



BETONTECHNISCHE EMPFEHLUNGEN

*Optimieren von Beton nach
DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit
Flugasche als Zusatzstoff Typ II*

WIN 
Wirtschaftsverband
Mineralische Nebenprodukte e.V.

Betontechnische Empfehlungen

Optimieren von Beton nach DIN EN 206-1
und DIN 1045-2
mit Flugasche als Zusatzstoff Typ II

Neuausgabe 2016

Herausgeber
Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V., WIN

Redaktionsgruppe:

Dipl.-Ing. Fine Eck, Dinslaken (5. Auflage)

Dr.-Ing. Hans-Joachim Feuerborn, Essen

Dipl.-Oec. Thomas Kaczmarek, Düsseldorf (5. Auflage)

Dr.-Ing. Matthias Meißner, Herten

Dipl.-Ing. Martin Pielke, Dinslaken (5. Auflage)

Dipl.-Ing. Eberhard Schneider, Baden-Baden (1. bis 4. Auflage)

Dr. rer. nat. Hans Thamm, Düsseldorf (1. bis 4. Auflage)

Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH, 2016

Steinhof 39, 40699 Erkrath

www.verlagbt.de

Druck: B.O.S.S Medien GmbH, 47574 Goch

Vorwort

Mit den „Betontechnischen Empfehlungen“ hat der Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V. mit der 1. Auflage aus dem Jahr 1993 eine regelmäßig überarbeitete und angepasste Arbeitshilfe veröffentlicht, in der nahezu alle Regelungen für die Herstellung von Beton in Hinblick auf den Einsatz von Flugasche als Betonzusatzstoff zusammenfassend dargestellt wurden. Außerdem sind für die Praxis nutzbare Ergebnisse aus jüngeren Forschungsarbeiten beschrieben, die eine erweiterte Leistungsfähigkeit der Flugasche im Beton für die dargestellten Anwendungen ermöglichen.

Die vorliegende Dokumentation ist nun von der nachfolgenden Verbandsorganisation, dem Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. (WIN), überarbeitet worden und berücksichtigt den aktuellen Stand der technischen Regelwerke im August 2016. Sie versteht sich auch als anwendungsorientierte Arbeitshilfe des im Jahr 2008 in 2. Auflage erschienenen Handbuchs „Flugasche im Beton“ [Verlag Bau+Technik; ISBN 978-3-7640-0502-3].

Praktische Erfahrungen und neue Anwendungen im Rahmen allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen oder mit Zustimmung im Einzelfall ergänzen oder „überholen“ die bestehenden Regelwerke in sinnvoller Weise bzw. schreiben diese fort. Basierend auf Forschungsergebnissen und praktischen Erfahrungen beim Einsatz von Flugasche im Beton helfen WIN-Merkblätter als Anregung zur Lösung eigener Betonaufgaben, aber auch zur Optimierung vorhandener Rezepturen weiter, um die Leistungsfähigkeit des Baustoffs Beton mit Flugasche sinnvoll zu nutzen.

Die darin zusammengefassten Angaben und Empfehlungen wenden sich an den Fachmann und sind mit großer Sorgfalt und nach bestem Wissen des Herausgebers zusammengestellt. Sie ergänzen die „Betontechnische Empfehlungen“ und erscheinen auf der Internetseite des Verbandes: www.win-ev.org.

Düsseldorf, im September 2016

Thomas Kaczmarek

Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V.

Inhalt

1	Flugasche als Betonzusatzstoff	7
1.1	Definition	7
1.2	Regelungen	7
1.3	Stoffbeschreibung.....	7
1.4	Wirkungsweise	8
1.5	Allgemeine Hinweise.....	10
2	Anwendungsgrundlagen für Flugasche im Beton	10
2.1	Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2.....	10
2.1.1	Beton nach Expositionsklassen.....	10
2.1.2	Anrechenbarkeit, k-Wert-Ansatz	11
2.1.3	Gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub.....	13
2.1.4	Grenzwerte des Mehlkorngehalts.....	14
2.1.5	Beton mit hohem Widerstand gegen Sulfatangriff	15
2.1.6	Beton zur Vermeidung schädigender Alkalireaktion.....	17
2.1.7	Anwendung in Unterwasserbeton	17
2.1.8	Beton mit hohem Wassereindringwiderstand – WU-Beton.....	18
2.2	Beton für massige Bauteile	18
2.3	Bohrpfahlbeton.....	19
2.4	Schlitzwandbeton	21
2.5	Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen.....	21
2.6	Beton nach ZTV-ING	22
2.7	Beton nach ZTV-W	23
3	Leistungsfähigkeit von Flugasche.....	24
3.1	Beton mit geringer Reißneigung.....	24
3.1.1	Hydratationswärme	24
3.1.2	Frühschwinden.....	25
3.2	Karbonatisierung	25
3.3	Chloridangriff	26
3.4	Sulfatangriff.....	27
3.5	Lösender Angriff	29
3.5.1	Angriff kalklösender Kohlensäure	29
3.5.2	Lösender Angriff durch Säuren	29
3.6	Formänderung.....	29
3.7	Alkalireaktion	31
3.8	Hochfester Beton	33
3.9	Frost- und Frost-Taumittel-Angriff.....	34
3.9.1	Beton mit hohem Frostwiderstand.....	34
3.9.2	Beton mit hohem Frost-Taumittelwiderstand.....	35
4	Festlegungen nach Expositionsklassen und bei besonderen Anwendungsfällen	36
4.1	Expositionsklasse X0	38
4.2	Expositionsklassen XC, Karbonatisierung.....	39
4.3	Expositionsklassen XD, Chloridangriff	43

4.4	Expositionsklassen XS, Chloridangriff durch Meerwasser	46
4.5	Expositionsklassen XF, Frostangriff	49
4.6	Expositionsklassen XA, Chemischer Angriff	55
4.7	Expositionsklassen XM, Verschleißbeanspruchung	58
4.8	Anwendungsfall UW, Unterwasserbeton	62
4.9	Anwendungsfall BP, Bohrpfehlbeton	63
4.10	Anwendungsfall SW, Schlitzwandbeton	65
4.11	Anwendungsfall FD, Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen....	66
5	Entwurfshilfen für Flugaschenbetone	67
5.1	Festlegung und Zusammensetzung des Betons	67
5.2	Entwurfsgrößen und Entwurfshilfen	68
5.3	Stoffraumrechnung	70
5.4	Betonoptimierung	71
5.5	Beispiel und Ablaufdiagramm	72
6	Neue Anwendungsmöglichkeiten	77
6.1	Massenbetone mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung	77
6.2	Recyclingbeton – Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung	79
6.3	Sandreicher Beton	79
6.4	Spritzbeton	80
6.5	Selbstverdichtender Beton (SVB)	81
6.6	Fahrbahndeckenbeton	82
6.7	Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff	83
7	Quellennachweis	85
7.1	Regelwerke	85
7.2	Literatur	86

Erläuterungen einiger im Text verwendeter Kurzzeichen. Eine vollständige Übersicht der Kurzzeichen gibt Tabelle 5.2.2 im Abschnitt Entwurfshilfen

$\max (w/z)_{\text{eq}}$ = höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert nach
DIN EN 206-1/DIN 1045-2

$\text{erf} (w/z)_{\text{eq}}$ = erforderlicher äquivalenter Wasserzementwert zum Erreichen der
angestrebten Druckfestigkeit

k_f = Anrechenbarkeitswert für Flugasche; Faktor für die Anrechnung
der Flugaschezugabe auf den Wasserzementwert in der Formel
 $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + k_f \cdot f_b)$

$\min z$ = Mindestzementgehalt in kg/m^3

$\min z_f$ = Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche in kg/m^3

$\min f_b$ = Mindestflugaschegehalt bei Reduzierung des Zementgehalts in kg/m^3

1 Flugasche als Betonzusatzstoff

1.1 Definition

Flugaschen als Betonzusatzstoff im Sinne dieser betontechnischen Empfehlungen sind alle Flugaschen, die nach DIN EN 450-1 [R 1] zertifiziert sind und deren Umweltverträglichkeit durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung⁽¹⁾ nachgewiesen ist.

Weiterhin schließen die betontechnischen Empfehlungen jene Flugaschen mit ein, deren Anwendung bei gleichem Leistungsumfang durch eine Europäische Technische Zulassung (ETA) geregelt ist.

Bei Braunkohlenflugaschen mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung sind bestimmte Anwendungsmöglichkeiten eingeschränkt. Daher ist in jedem Fall vor ihrer Anwendung die jeweilige Zulassung heranzuziehen.

1.2 Regelungen

Flugasche darf als Betonzusatzstoff gemäß folgender Regelwerke eingesetzt werden:

- für Beton, Stahl- und Spannbeton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 [R 3], [R 4]
- für Betone nach Richtlinien des DAfStb, die sich auf DIN 1045-2 beziehen
- für Bohrpfahlbeton nach DIN EN 1536/DIN SPEC 18140 [R 14], [R 15]
- für Ortbetonschlitzwände nach DIN EN 1538/DIN 4126 [R 16], [R 17]
- für Beton im Anwendungsbereich der ZTV-ING [R 20]
- für Beton im Anwendungsbereich der ZTV-W [R 21]
- für Beton im Anwendungsbereich der ZTV-StB [R 24]

Voraussetzung ist, dass

- die Flugasche der DIN EN 450-1 „Flugasche für Beton“ [R 1] bzw. einer Europäischen Technischen Zulassung entspricht und
- die Übereinstimmung ihrer Eigenschaften mit den Festlegungen der DIN EN 450-1 bzw. einer Europäischen Technischen Zulassung oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung⁽¹⁾ gemäß den Anforderungen zur Konformitätsbewertung nach DIN EN 450-2 [R 2] nachgewiesen wird.

1.3 Stoffbeschreibung

Flugasche besteht hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln, die bei der Verbrennung feingemahlener Kohle mit oder ohne Mitverbrennungsstoffe erzeugt werden. Die staubfeinen Partikel werden durch elektrostatische Abscheidung aus den Rauchgasen der Feuerungsanlagen gewonnen.

Hauptbestandteile sind amorphe Phasen von Silizium-, Aluminium- und Eisenoxiden (SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3). Damit ist ihre chemische Zusammensetzung vergleichbar mit der von

⁽¹⁾ Die bestehenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Flugasche sind weiterhin gültig, jedoch längstens bis 2020. Die durch das EuGH-Urteil zur Bauregelliste erforderlichen Nachfolgeregelungen befinden sich noch in der Abstimmung.

natürlichen Puzzolanen. Ihr Gehalt an reaktionsfähigem SiO_2 gemäß EN 197-1 beträgt mindestens 25 M.-%.

Flugasche kann durch Sieben, Sichten, Trocknen, Mischen, Mahlen, Kohlenstoffreduktion etc. aufbereitet werden.

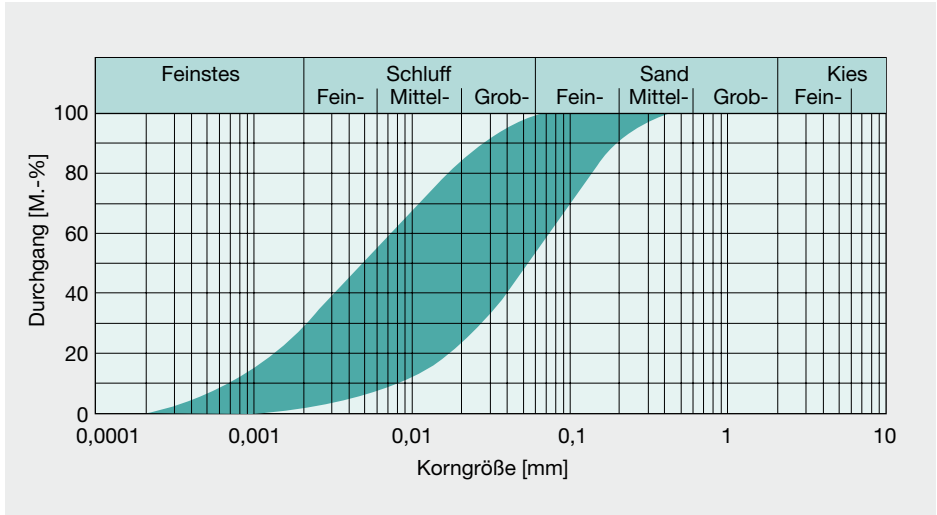


Bild 1.3 Bandbreite der Korngrößenverteilung von Flugasche

1.4 Wirkungsweise

Die Wirkungsweise von Flugasche im Beton basiert auf physikalischen, chemisch-mineralogischen und puzzolanischen Eigenschaften.

- **Physikalisch** wirkt die Flugasche durch die Feinkörnigkeit (Füller-Effekt) und die überwiegend kugelige Form der Partikel (Kugellager-Effekt) sowie durch ihre günstige Korngrößenverteilung.
- **Chemisch-mineralogisch** wirkt Flugasche als Keimsubstrat. Die Oberfläche ist so geschaffen, dass Reaktionsprodukte aus der Zementhydratation aufwachsen können und hierdurch zu einer zunehmenden Verdichtung des Bindemittelgefüges führen.
- **Puzzolanisch** wirkt Flugasche dadurch, dass die hochalkalische Porenlösung des frischen Bindemittels die glasigen Partikel anlöst, Silizium- und Aluminiumoxide aus dem Glas herauslöst und dadurch vergleichbare Hydratationsprodukte bildet, wie sie bei der hydraulischen Erhärtung von Zement entstehen, d.h. im Wesentlichen Calciumsilikathydrat- (CSH) und Calciumaluminathydrat-Phasen (CAH), die jedoch kalkärmer sind.

Das Zusammenspiel der physikalischen, chemisch-mineralogischen und puzzolanischen Wirkungsweisen bewirkt im Beton:

- Einsparungspotential beim Zement
- Reduzierung des Wasseranspruchs

- bessere Verarbeitbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Pumpfähigkeit
- Reduzierung von Wasserabsonderung und Sedimentation
- Verringerung der Hydratationswärme
- Reduzierung der Reißneigung
- Reduzierung von Ausblühungen
- höheres Nacherhärtungspotential
- Verbesserung von Sichtbetonflächen
- eine höhere Dauerhaftigkeit des Betons und der Bewehrung bei chemischen Angriffen im Allgemeinen, insbesondere bei Chloridangriff und Sulfatangriff
- ein stark vermindertes Risiko von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen

Die Bilder 1.4.1 und 1.4.2 zeigen einige wesentliche technologische Zusammenhänge und grundsätzliche Wirkungen der Flugasche durch Zugabe in den Beton.

Bild 1.4.1 Vergrößerung des Ausbreitmaßes von Beton durch Zugabe verschiedener Flugaschen und von Quarzmehl [1.4-1]

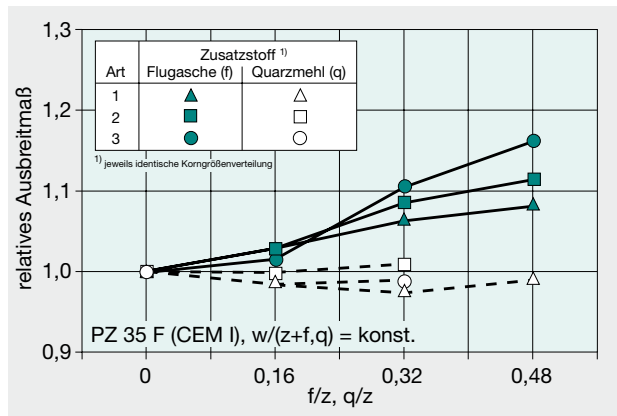
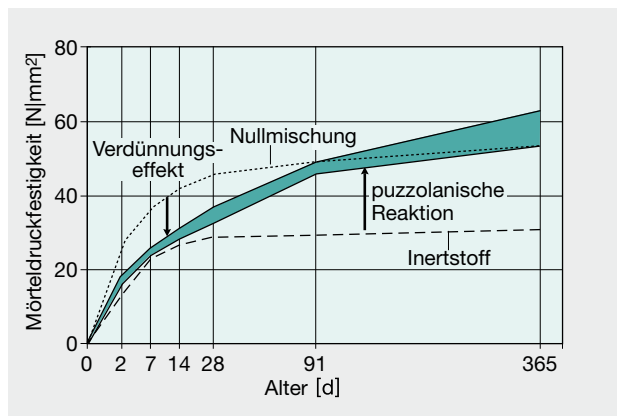


Bild 1.4.2 Beispiel für die Festigkeitsentwicklung von Mörtel mit und ohne Zugabe von Flugasche [1.4-2]



1.5 Allgemeine Hinweise

Die Anwendung und die Anrechenbarkeit von Flugasche wird in DIN EN 206-1 [R 3] und DIN 1045-2 [R 4] geregelt, die im DIN Fachbericht 100 „Beton“ [R 5] zusammengefasst sind.

Frisch- und Festbetoneigenschaften lassen sich bei technologisch sachgerechter und auf den Anwendungsfall abgestimmter Zugabemenge optimieren. Wegen ihrer Feinheit und des damit verbundenen Effekts der Füllerwirkung wirkt Flugasche als Reaktionskeim für die Bildung zusätzlicher festigkeitsbildender Hydratationsprodukte in der Anfangserhärtung des Betons [1.4-1], [1.5-1], [1.5-2].

Die Reaktion der Flugasche ist bereits in den ersten Stunden der Betonerhärtung nachgewiesen. Der wesentliche Festigkeitsbeitrag erfolgt ab einem Betonalter von etwa 14 Tagen. Betone mit hohen Anteilen an Flugasche sollten und können nach DIN 1045-2 hinsichtlich des Festigkeitsnachweises auf 56 Tage projiziert werden. Dies ist auf Grund des später wirksam werdenden Festigkeitsbetrags der Flugasche sinnvoll.

Die Festlegung der Nachbehandlungsdauer flugaschehaltiger Betone erfolgt nach DIN 1045-3 [R 6]. Dabei wird i. d. R. das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit bei 20 °C nach 2 Tagen und der mittleren Druckfestigkeit zum „Nachweiszeitpunkt“, üblicherweise nach 28 Tagen (bei Vereinbarung eines späteren Festigkeitsnachweises jedoch auch nach 56 oder 90 Tagen), als Bewertungskriterium herangezogen.

Die Verwendung von Betonzusatzmitteln in Flugaschebetonen ist ohne jede Einschränkung möglich. Bei Einsatz mehrerer Betonzusatzmittel ist die Verträglichkeit und Wirksamkeit aller Betonausgangsstoffe zu prüfen.

Die Bemessungsgrundlagen werden durch den Einsatz von Flugasche als Betonzusatzstoff nicht berührt.

2 Anwendungsgrundlagen für Flugasche im Beton

Flugasche für Beton ist ein Bauprodukt nach DIN EN 450-1 und kann als puzzolanischer Betonzusatzstoff des Typs II nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 eingesetzt werden. Flugasche kann auf den Zementgehalt des Betons nach festgelegten Kriterien angerechnet werden. Diese Anwendungsgrundlage für Flugasche gilt im Bereich verschiedener Regelwerke für Beton, deren sachbezogener Inhalt im Folgenden beschrieben wird.

2.1 Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.1.6, ist für Flugasche nach DIN EN 450 oder mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung die Eignung als Zusatzstoff Typ II nachgewiesen.

2.1.1 Beton nach Expositionsklassen

DIN 1045-2 definiert in Abhängigkeit von der Art und Intensität der Beanspruchung des Betons oder der Bewehrung verschiedene Expositionsklassen (Detailliertes hierzu siehe Tabellenblätter im Kapitel 4 ab Seite 37). Aus diesen ergeben sich Grundanforderungen an

die Betonzusammensetzung für den Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert), die Festigkeitsklasse des Betons (f_{ck}), den Mindestzementgehalt (min z) und die durch Flugasche substituierbare Zementmenge (siehe Tabelle 2.1.1, Doppelseite Heftumschlag hinten).

Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 2.1.1 auch die Anwendungsfälle

- Unterwasserbeton,
- Bohrpfahlbeton,
- Beton für Ortbetonschlitzwände und
- Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen

sowie Festlegungen nach ZTV-ING, ZTV-W und für Massenbeton eingearbeitet worden.

Die in Tabelle 2.1.1 angegebenen Mindestfestigkeitsklassen gelten nicht für Leichtbeton, da die Festigkeit von Leichtbeton im Wesentlichen von der leichten Gesteinskörnung abhängt.

2.1.2 Anrechenbarkeit, k-Wert-Ansatz

Der Nachweis der Eignung von Betonzusatzstoffen des Typs II ist Voraussetzung dafür, dass diese gemäß DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.1, bei der Betonzusammensetzung auf den Zementgehalt und mit dem Anrechenbarkeitswert k (k_f für Flugasche und k_s für Silkestaub) auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet werden dürfen. Der k -Wert berücksichtigt hierbei alle dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften des Betons und bezieht sich im Allgemeinen auf die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen. Für Flugasche gilt im Regelfall ein k_f -Wert von 0,4, der unter Berücksichtigung unterschiedlichster Zemente und Expositionsbedingungen „auf der sicheren Seite“ festgelegt wurde (Bild 2.1.2).

Die Verwendung und Anrechenbarkeit von Flugasche ist mit den meisten Zementen nach EN 197 [R 8] möglich. Von der Verwendung ausgenommen sind Puzzolan- und Komposit-

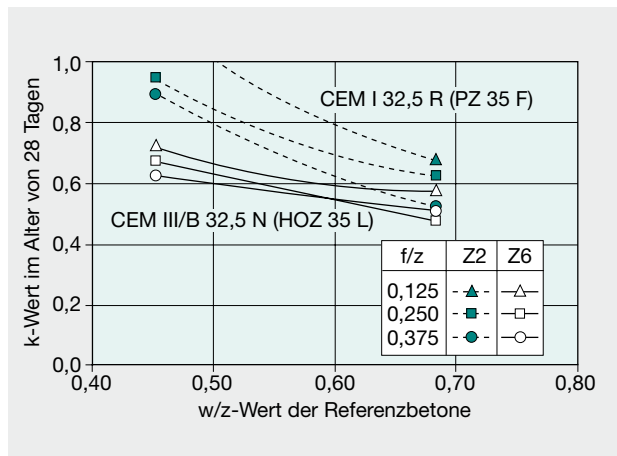


Bild 2.1.2 Anrechenbarkeitswerte k_f abhängig von der Zementart und dem w/z-Wert im Betrachtungsalter von 28 Tagen [1.4-2]

zemente der Klassen CEM IV und CEM V sowie Zemente mit den Hauptbestandteilen Q (natürlich getempertes Puzzolan), W (kalkreiche Flugasche) und L (Kalkstein). Eine Übersicht gibt Tabelle 2.1.2.1 (s. S. 91).

Gemäß DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.2.2, darf Flugasche mit dem Anrechenbarkeitswert k_f auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet werden. Dabei kann der Mindestzementgehalt für alle Expositionsklassen reduziert werden, wenn eine der folgenden Zementarten verwendet wird:

- Portlandzement	CEM I
- Portlandsilikastaubzement	CEM II/A-D
- Portlandhüttenzement	CEM II/A-S oder CEM II/B-S
- Portlandschieferzement	CEM II/A-T oder CEM II/B-T
- Portlandkalksteinzement	CEM II/A-LL
- Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P
- Portlandflugaschezement	CEM II/A-V
- Portlandkompositzemente	CEM II/A-M (mit den Hauptbestandteilen S,D,P,V,T,LL)
- Portlandkompositzemente	CEM II/B-M [(S-D), (S-T), (D-T)]
- Hochofenzement	CEM III/A
- Hochofenzement	CEM III/B mit bis zu 70 M.-% Hüttensand, wenn die Zusammensetzung entsprechend DIN EN 197-1 [R 8] nachgewiesen ist.

Dabei darf die Summe von Zement- und Flugaschegehalt ($z + f$) die Werte der in Tabelle 2.1.1, Zeile 4, angegebenen Mindestzementgehalte (min z) nicht unterschreiten. Diese Regelungen gelten auch für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge mit einer Trockenrohddichte zwischen 800 kg/m³ und 2000 kg/m³.

Die Flugasche darf bei Verwendung der zuvor genannten Zemente in allen Expositionsklassen angerechnet werden.

Ausnahme: Die Verwendung von Zementen mit dem Hauptbestandteil „D“, Silikastaub, ist für die Anwendung bei den Expositionsklassen XF2 und XF4 ausgeschlossen.

Zur Anrechnung von Flugasche darf anstelle des höchstzulässigen Wasserzementwerts (w/z) der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{äq}} = w/(z + k_f \cdot f_b)$ angenommen werden. Der k_f -Wert (Anrechenbarkeitswert) beträgt für alle Expositionsklassen 0,4 und in besonderen Anwendungsfällen 0,7 (siehe hierzu Tabelle 2.1.1, Zeile 9). Dabei muss die Höchstmenge Flugasche, die auf den Wasserzementwert angerechnet werden darf, folgenden Bedingungen genügen:

- bei Zementen ohne die Hauptbestandteile P, V und D
 $f/z \leq 0,33$ in Massenanteilen,
- bei Zementen mit den Hauptbestandteilen P und V ohne den Hauptbestandteil D
 $f/z \leq 0,25$ in Massenanteilen

- und bei Zementen mit dem Hauptbestandteil D
 $f/z \leq 0,15$ in Massenanteilen

Falls eine größere Menge Flugasche verwendet wird, darf die Mehrmenge bei der Berechnung des äquivalenten Wasserzementwerts nicht berücksichtigt werden.

Bei Zementen mit dem Hauptbestandteil D (Silikastaub) darf keine über $f/z = 0,15$ hinausgehende Menge Flugasche verwendet werden.

Tabelle 2.1.2.2 Anrechnungskriterien von Flugasche in Abhängigkeit der Zementarten

Zement	Anrechenbare Flugaschemenge f_b
CEM I	$\leq 0,33 z$
CEM II/A-[S,T,LL]	
CEM II/B-[S,T]	
CEM II/A-M [(S,T),(S-LL),(T-LL)]	
CEM II/B-M (S-T)	
CEM III/A	
CEM III/B ¹⁾	
CEM II/A-P	$\leq 0,25 z$
CEM II/A-V	
CEM II/A-M [(S-P), (S-V), (P-V), (P-T), (P-LL), (V-T), (V-LL)]	
CEM II/A-D	$\leq 0,15 z$ ²⁾
CEM II/A-M [(S-D)), (D-T), (D-LL), (D-P), (D-V)]	
CEM II/B-M [(S-D), (D-T)]	

¹⁾ max 70 M,-% Hüttensand

²⁾ Bei den Zementen mit dem Hauptbestandteil D darf keine über $f = 0,15 z$ hinausgehende Menge Flugasche verwendet werden.

2.1.3 Gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub

Bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche und Silikastaub (DIN 1045-2, Abs. 5.2.5.2.4) darf der Mindestzementgehalt für alle Expositionsklassen außer XF2 und XF4 auf die in Tabelle 2.1.1, Zeile 5, angegebenen Werte reduziert werden. Dabei darf der Gehalt an Zement, Flugasche und Silikastaub ($z + f + s$) die in der Zeile 4 für den Mindestzementgehalt angegebenen Werte nicht unterschreiten.

Für alle Expositionsklassen mit Ausnahme XF2 und XF4 darf anstelle des Wasserzementwerts der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq} = w/(z + 0,4f_b + 1,0s)$ verwendet werden. Dabei müssen die Mengen der beiden Zusatzstoffe, die auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet werden dürfen, folgenden Bedingungen genügen:

$$f_b \leq 0,33 z$$

$$s \leq 0,11 z$$

Falls eine größere Menge an Flugasche verwendet wird, darf die Mehrmenge bei der Berechnung des äquivalenten Wasserzementwerts $(w/z)_{\text{eq}}$ nicht berücksichtigt werden.

Um eine ausreichende Alkalität der Porenlösung sicherzustellen, muss bei gleichzeitiger Verwendung von CEM I, Flugasche und Silikastaub die Höchstmenge an Flugasche der Bedingung

$$f/z \leq 3 (0,22 - s / z)$$

in Massenanteilen genügen.

In Verbindung mit den Zementarten

- CEM II/A-S, CEM II/B-S,
- CEM II/A-T, CEM II/B-T,
- CEM II/A-LL,
- CEM II/A-M [(S-T), (S-LL), (T-LL)],
- CEM II/B-M (S-T) und für
- CEM III/A

gilt:

$$f/z \leq 3 (0,15 - s / z)$$

in Massenanteilen.

Bei allen anderen Zementen ist die gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silikastaub nicht zulässig.

Tabelle 2.1.3 Anrechnungskriterien von Flugasche (f) und Silikastaub (s) in Abhängigkeit der Zementarten (gilt für alle Expositionsklassen außer XF2 und XF4)

k-Wert	f/z	Zement
$k_f = 0,4$	$\leq 3 (0,22 - s/z)$	CEM I
$k_s = 1,0$	$\leq 3 (0,15 - s/z)$	CEM II/A-[S,LL,T] CEM II/B-[S,T] CEM II/A-M (S-T) CEM II/A-M (S-LL) CEM II/A-M (T-LL) CEM II/B-M (S-T) CEM III/A

2.1.4 Grenzwerte des Mehlkorngelhalts

In DIN 1045-2 Abschnitt 5.3.2 werden die Mehlkorngelhalte aller Betone begrenzt. Ausgenommen sind Unterwasserbeton nach Abschnitt 5.3.4 und selbstverdichtender Beton. Für Betone bis einschließlich der Festigkeitsklassen C50/60 und LC50/55 gelten für die Expositionsklassen XF und XM die in Tabelle F.4.1 der DIN 1045-2 angegebenen höchstzulässigen Mehlkorngelhalte in Verbindung mit zusätzlichen Regeln in Abschnitt 5.3.2 der DIN 1045-2. Für die übrigen Expositionsklassen (X0, XC, XD, XS und XA) beträgt der höchstzulässige Mehlkorngelhalt generell 550 kg/m^3 (Bild 2.1.4).

Für die Betone ab den Festigkeitsklassen C55/67 und LC55/60 gelten für alle Expositionsklassen die in Tabelle F.4.2 der DIN 1045-2 angegebenen höchstzulässigen Mehlkorngelhalte (Bild 2.1.4).

Bei Verwendung von Flugasche dürfen sowohl die Werte der Tabelle F.4.1 als auch der Tabelle F.4.2 der DIN 1045-2 um den Gehalt der Flugasche, jedoch nicht um mehr als 50 kg/m³ Beton überschritten werden.

Die vorstehend genannten Mehlkorngelhalte gelten für Betone mit Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 16 mm bis 63 mm. Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm dürfen die Werte der Tabellen F.4.1 und F.4.2 der DIN 1045-2 zusätzlich um 50 kg/m³ erhöht werden.

Für selbstverdichtenden Beton (SVB) nach [R 9] gelten hiervon abweichende Anforderungen. Der Mehlkorngelhalt für SVB muss ≥ 450 kg/m³ und darf nicht mehr als 650 kg/m³ Beton betragen.

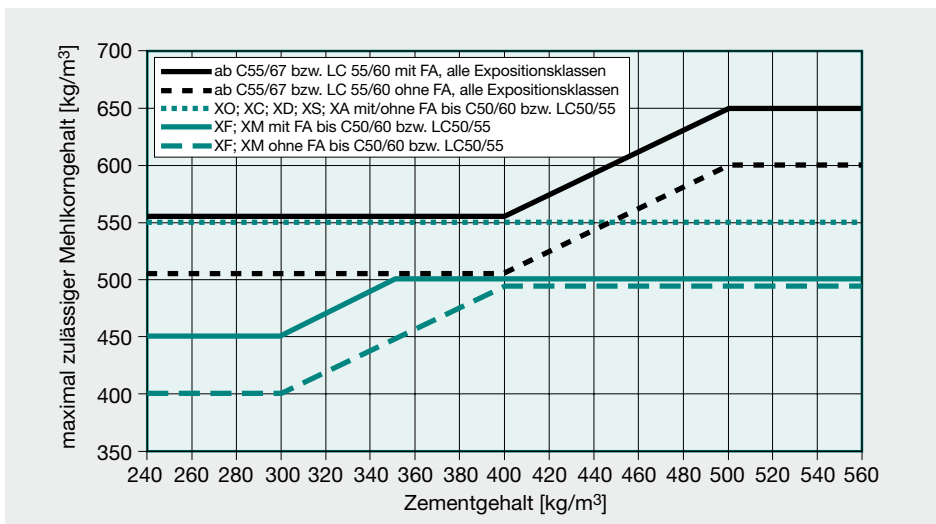


Bild 2.1.4 Zulässiger Mehlkorngelhalt von Beton

2.1.5 Beton mit hohem Widerstand gegen Sulfatangriff

Nach DIN 1045-2 ist im Rahmen der Festlegung des Betons anzugeben, wenn der Sulfatgehalt des Grundwassers > 600 mg/l beträgt. Bei der Einstufung eines Betons in die Expositionsklasse XA2 oder XA3 aufgrund von Sulfatangriff ist die Stärke des Sulfatangriffs anzugeben. Gemäß Abschnitt 5.2.5.2.2 der DIN 1045-2 müssen zur Herstellung von Beton mit hohem Widerstand gegen Sulfatangriff folgende Fälle unterschieden werden:

- a) Sulfatgehalt des angreifenden Wassers: $SO_4^{2-} \leq 600$ mg/l
Keine besondere Anforderung an Zement und Zusatzstoff

- b) Sulfatgehalt des angreifenden Wassers: $\text{SO}_4^{2-} > 600 \text{ mg/l}$ und $\leq 1500 \text{ mg/l}$

Bei Verwendung der Zementarten

Portlandzement	CEM I,
Portlandhüttenzement	CEM II/A-S oder CEM II/B-S,
Portlandkalksteinzement	CEM II/A-LL,
Portlandflugaschezement	CEM II/A-V,
Portlandkompositzemente	CEM II/A-M [S,T,V,LL] oder
Portlandkompositzemente	CEM II/B-M (S-T)

darf anstelle von SR-Zement nach DIN EN 197-1 [R 8] (vormals HS-Zement nach DIN 1164-10 [R 10]) eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden, wenn der Flugascheanteil, bezogen auf den Gehalt an Zement und Flugasche (z+f), mindestens 20 % beträgt (entspricht $f = 0,2 (z + f)$ oder $0,25 z$).

Bei Verwendung der Zementarten

Portlandschieferzemente	CEM II/A-T, CEM II/ B-T oder
Hochofenzement	CEM III/A

darf anstelle von SR-Zement nach DIN EN 197-1 eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden, wenn der Flugascheanteil, bezogen auf den Gehalt an Zement und Flugasche (z + f), mindestens 10 % beträgt (entspricht $f = 0,1(z + f)$ oder $0,11z$).

- c) Sulfatgehalt des angreifenden Wassers: $\text{SO}_4^{2-} > 1500 \text{ mg/l}$

Die Verwendung von SR-Zement (HS-Zement) ist vorgeschrieben. Ausnahmen sind im Rahmen von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, z.B. für Massenbetone geregelt.

Tabelle 2.1.5 Anrechnungskriterien von Flugasche bei Beton mit hohem Sulfatwiderstand in Abhängigkeit der Zementarten

Anrechnung mit:		Zement	Mindestmenge Flugasche
k_f -Wert	f/z		
0,4	$\leq 0,33$	CEM I CEM II/A-[S,LL] CEM II/B-S CEM II/A-M [S,T,LL] CEM II/B-M (S-T)	$f = 0,2 (z + f)$ oder $0,25 z$
	$\leq 0,25$	CEM II/A-V CEM II/A-M (V)	
	$\leq 0,33$	CEM II/A-T CEM II/B-T CEM III/A	$f = 0,1 (z + f)$ oder $0,11 z$

Anmerkung: Die Anforderungen an SR-Zemente sind für CEM I-SR 0, CEM I-SR 3, CEM III/B-SR und CEM III C-SR nach DIN EN 197-1 [R 8] erfüllt.

2.1.6 Vermeidung schädigender Alkali-Kieselsäurereaktion im Beton

Die DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ (Alkalirichtlinie) [R 11] regelt die Verwendung gebrochener Gesteinskörnungen und fordert anhand von petrografischen Beurteilungen deren Einstufungen in Alkaliempfindlichkeitsklassen von E I-S = unbedenklich bis E III-S = bedenklich. E I-S Gesteinskörnung darf ohne weitere Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WA angewendet werden.

DIN 1045-2 ergänzt die Tabelle 1 „Expositionsklassen“ mit der Klasse 8 „Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäurereaktion“, um Regelungen zur Einstufung der Umgebungsbedingungen hinsichtlich AKR. Die Differenzierung wird über vier Feuchtigkeitsklassen WO, WF, WA und WS getroffen, denen der Beton ausgesetzt sein kann. Ergänzend hierzu fordert die Alkalirichtlinie Alkaliempfindlichkeitsklassen aller verwendeten Gesteinskörnungen (E I, E II und E III). Bei Verwendung von Gesteinskörnung E III-S gelten die Regelungen gemäß Tabelle 2.1.6, bei denen deutlich wird, dass bei Zementgehalten unter 300 kg/m³ das E III-S-Gestein für alle Klassen WO, WF und WA eingesetzt werden kann.

Die Begrenzung des Zementgehalts auf unter 300 kg/m³ ist für alle Expositionsklassen bei entsprechendem Einsatz und Anrechnung von Flugasche zu erreichen. Weitere Hinweise zur Verwendung von Flugasche zur Vermeidung von schädigender AKR enthält Abschnitt 3.7. Flugasche, deren Gesamtalkaligehalt, ausgedrückt als Na₂O-Äquivalent, 5,0 M.-% nicht überschreitet, darf auch mit ‚ungünstigen‘ Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II und E III und für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA verwendet werden. Darüber hinaus ist festgelegt, dass der Alkaligehalt der Flugasche nicht als wirksam anzusetzen ist. Es ist zu beachten, dass die durch andere Betonzusatzstoffe als Flugasche eingebrachte Alkalimenge in der Summe 600 g/m³ Beton nicht überschreiten darf.

2.1.7 Unterwasserbeton

Tabelle 2.1.6 Maßnahmen und Einstufungen bei Verwendung von E III-S Gestein

Zementgehalt in [kg/m ³]	Feuchtigkeitsklasse		
	WO	WF	WA
	„trocken“	„feucht“ Massenbeton	„feucht“ und Alkalizufuhr von außen
kleiner 300	keine	keine	keine
300 bis 350	keine	keine	NA-Zement oder „Betontest“
über 350	keine	NA-Zement oder „Betontest“	Austausch des Gesteins oder „Betontest“

(siehe auch Anwendungsfall UW, Seite 62)

Bei der Herstellung von Beton für tragende Bauteile unter Wasser gemäß DIN 1045-2 Abschnitt 5.3.4 „Anforderungen an Unterwasserbeton“ darf Flugasche wie folgt angerechnet werden:

- Flugasche kann mit einem k-Wert $k_f = 0,7$ angerechnet werden.
- Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + 0,7f_b)$ darf 0,60 nicht überschreiten; er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern (z.B. Expositionsklasse XA2).
- Die maximal anrechenbare Flugaschemenge beträgt $f_b = 0,33 z$.

Bei einem Größtkorn der verwendeten Gesteinskörnung von 16 mm wird empfohlen, analog zur Regelung für den Bohrfahlbeton zu verfahren (siehe Details in Abschnitt 2.3). Die Grenzwerte des Mehlkorngehalts nach Abschnitt 5.3.2 der DIN 1045-2 dürfen überschritten werden.

2.1.8 Beton mit hohem Wassereindringwiderstand - WU-Beton

Für Betone mit hohem Wassereindringwiderstand trifft DIN 1045-2 in Abschnitt 5.5.3 in Abhängigkeit der Bauteildicke unabhängig von den Anforderungen entsprechend der Expositionsklassen Mindestfestlegungen für die Betongüte ($(w/z)_{\text{eq}}$ -Wert, Betondruckfestigkeitsklasse) und den Zementgehalt. Beton mit hohem Wassereindringwiderstand erfordert die Mindestdruckfestigkeitsklasse C25/30. Zusätzlich gilt:

- bei einer Bauteildicke von $d > 0,40 \text{ m}$: $(w/z)_{\text{eq}} \leq 0,70$
- bei einer Bauteildicke von $d \leq 0,40 \text{ m}$: $(w/z)_{\text{eq}} \leq 0,60$ und

bei Anrechnung von Flugasche einen Mindestzementgehalt $z = 270 \text{ kg/m}^3$.

Darüber hinaus gehende Regelungen zur Festlegung des Betons bei Bauteilen, die teilweise oder ständig stehendem oder fließendem, drückendem oder nichtdrückendem Wasser ausgesetzt sind, enthält die DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ (WU-Richtlinie) [R 12].

2.2 Beton für massige Bauteile

Zur Herstellung von massigen Bauteilen ist in Änderung bzw. Ergänzung zu den Anforderungen von DIN Fachbericht 100 die DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [R 13] zu beachten. Die Richtlinie gilt für massige Bauteile, deren kleinste Bauteilabmessung $0,80 \text{ m}$ beträgt, und bei denen Zwang und Eigenspannungen in besonderer Weise zu berücksichtigen sind.

Um möglichst rissfreie Bauteile zu erhalten, müssen die Spannungen aus Temperaturdifferenzen reduziert werden. Dazu ist die Bindemittelauswahl für den Beton hinsichtlich der Hydratationswärmeentwicklung von besonderer Bedeutung. Deswegen wurden in der DAfStb-Richtlinie

- der Mindestzementgehalt in den Expositionsklassen XD2, XD3, XS2, XS3, XF2, XF3, XF4 und XA2 von 320 kg/m^3 auf 300 kg/m^3 reduziert,
- der Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in der Expositionsklasse XA1 von 270 kg/m^3 auf 240 kg/m^3 abgesenkt,
- die Mindestdruckfestigkeitsklasse in den Expositionsklassen XD2, XS2, XF2 und XF3 (jeweils ohne künstlich eingeführte Luftporen) sowie in XD3, XS3 und XA2 von C35/45 auf C30/37 gemindert und

- in den Expositionsklassen XD3 und XS3 der $(w/z)_{\text{aq}}$ von 0,45 auf 0,50 erhöht. Dies gilt bei Verwendung von Zementen nach Tabelle F.3.1 oder F.3.2 der DIN 1045-2 in Kombination mit Flugasche als Betonzusatzstoff, wobei der Mindestflugaschegehalt 20 M.-% von $(z + f)$ betragen muss, sowie bei Verwendung von CEM II/B-V, CEM III/A oder CEM III/B mit oder ohne Flugasche als Betonzusatzstoff.

Die hier beschriebenen Besonderheiten für Beton für massige Bauteile sind in Tabelle 2.2.1 zusammenfassend dargestellt und in Tabelle 2.1.1 (Doppelseite Heftumschlag hinten) aufgenommen worden.

Tafel 2.2.1: Sonderregelungen für Massengbeton nach DAfStb Richtlinie [R 13].
Felder mit Abweichungen von DIN 1045-2 sind hinterlegt.

Expositionsklasse		XD2	XD3	XS2	XS3	XF2 ²⁾	XF3 ²⁾	XF4	XA1	XA2
höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert		0,50	0,50 ¹⁾	0,50	0,50 ¹⁾	0,50	0,50	0,50	0,60	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse		C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C25/30	C30/37
Mindestzementgehalt	[kg/m ³]	300	300	300	300	300	300	300	280	300
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche	[kg/m ³]	270	270	270	270	270	270	270	240	270
zulässiger anrechenbarer Flugaschegehalt bei min z	[kg/m ³]	90	90	90	90	90	90	90	80	90
Mindestflugaschegehalt	[kg/m ³]	30	60	30	60	30	30	30	40	30

¹⁾ Bei Verwendung von CEM II/B-V, CEM III/A oder CEM III/B auch ohne Flugascheanrechnung zulässig

²⁾ Ohne künstliche Luftporen

Bei extrem großen Bauteilabmessungen, wie sie z.B. bei Fundamentplatten, Schleusen etc. auftreten können, sind solche Betone technisch und wirtschaftlich sinnvoll, bei denen die Zementgehalte die Anforderungen des normativen Regelwerks unterschreiten und die dafür deutlich höhere Flugaschegehalte aufweisen. Derartige Betonzusammensetzungen erfordern jedoch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall. Weitere Hinweise und vertiefende Angaben zur Verwendung von Flugasche in Massengbeton enthält Abschnitt 6.1.

2.3 Bohrpfehlbeton

(siehe auch Anwendungsfälle BP16/BP32, Seite 63/64)

Die Herstellung von Bohrpfehlern regelt DIN EN 1536 [R 14], in Verbindung mit DIN SPEC 18140 [R 15].

Die Bedingungen der Anrechenbarkeit bei Bohrpfehlbeton müssen dem Abschnitt 5.2.5.2.2 der DIN 1045-2, siehe auch Abschnitt „Anrechenbarkeit, k-Wert-Ansatz“, entsprechen. Abweichend hiervon gilt:

- Flugasche kann mit dem k-Wert $k_f = 0,7$ angerechnet werden.
- Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf bei einem Größtkorn von 32 mm 350 kg/m^3 und bei einem Größtkorn von 16 mm 400 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der Mindestzementgehalt bei der Anrechnung von Flugasche darf bei einem Größtkorn von 32 mm 270 kg/m^3 und bei einem Größtkorn von 16 mm 300 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der äquivalente Wasserzement $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + 0,7f_f)$ darf 0,60 nicht überschreiten. Er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern, wie zum Beispiel die Expositionsklasse XA2.
- Neben den in Tabelle 2.1.2.1 gelisteten Zementen dürfen zusätzlich
 - Portlandflugaschezement CEM II/B-V,
 - Portlandpuzzolanzement CEM II/B-P und
 - Hochofenzement CEM III/C
 gemeinsam mit Flugasche verwendet werden.
- Von den Kompositzementen sind gegenüber Tabelle 2.1.2.2 nur die Arten
 - CEM II/A-M (S-V) und
 - CEM II/B-M (S-V)
 bei gemeinsamer Verwendung erlaubt.
- Eine Anrechnung der Flugasche darf bei den Zementen
 - CEM II/A-D,
 - CEM II/B-[V, P] und
 - CEM III/C
 nicht vorgenommen werden.

Tabelle 2.3: Anrechnungskriterien von Flugasche bei Bohrpfehlbeton in Abhängigkeit der Zementarten

Anrechnung mit:		Nach DIN EN 1536 zulässige Zementart	Nach DIN SPEC 18140 zulässige Zementart	Mindestmenge $f + z$ [kg/m^3]	
k_f -Wert	f/z			Größtkorn 16 mm	Größtkorn 32 mm
0,7	$\leq 0,33$	CEM I CEM II/A-S CEM II/B-S CEM III/A CEM III/B	CEM II/A-T CEM II/B-T CEM II/A-LL	100 + 300 (= 400)	80 + 270 (= 350)
	$\leq 0,25$	CEM II/A-V	CEM II/A-P CEM II/A-M (S-V) CEM II/B-M (S-V)		
))	CEM II/A-D CEM II/B-V CEM III/C	CEM II/B-P		

) Nur gemeinsame Verwendung, aber keine Anrechnung von Flugasche möglich

Der Anrechenbarkeitswert $k_f = 0,7$ ist aufgrund der besonders günstigen Umgebungsbedingungen festgelegt. Das Erdreich sorgt für eine dauerhafte Umgebungsfeuchte und schützt den Beton gegen Austrocknung. Dies sichert eine gute Nachbehandlung und Nacherhärtung. Hierdurch erreichen Flugaschebetone ein sehr dichtes Gefüge und damit eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischem Angriff.

Dies ermöglicht auch die Anrechnung von Flugasche bei Bohrpfahlbeton mit einem k_f -Wert von 0,7 in einem Baugrund, der beispielsweise wegen geogener Belastungen oder Verunreinigungen der Expositionsklasse XA zugeordnet werden muss.

2.4 Schlitzwandbeton

(siehe auch Anwendungsfall SW, Seite 65)

Die europäische Norm für Schlitzwandbeton DIN EN 1538 [R 16] ist zurzeit noch nicht bauaufsichtlich eingeführt – ebenso wie DIN 4126 [R 17]. Die Zusammensetzung von Betonen für Schlitzwände muss in jedem Fall dem Stand der Technik entsprechen. Demzufolge sind neben den genannten bauaufsichtlich nicht eingeführten Normen auch Regelungen für ähnliche Anwendungsfälle (Unterwasserbeton, Bohrpfahlbeton) sinngemäß anzuwenden. Daraus ergibt sich:

- Flugasche kann mit einem k_f -Wert $k_f = 0,7$ angerechnet werden.
- Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + 0,7f_b)$ darf 0,60 nicht überschreiten; er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern (z.B. Expositionsklasse XA2).
- Die maximal anrechenbare Flugaschemenge beträgt $f_b = 0,33 z$.

Bei einem Größtkorn der verwendeten Gesteinskörnung von 16 mm wird empfohlen, analog zur Regelung für den Bohrpfahlbeton zu verfahren. Die Grenzwerte des Mehlkorngehalts nach Abschnitt 5.3.2 der DIN 1045-2 dürfen überschritten werden.

Der Anrechenbarkeitswert $k_f = 0,7$ ist aufgrund der besonders günstigen Umgebungsbedingungen festgelegt. Das Erdreich sorgt für eine dauerhafte Umgebungsfeuchte und schützt den Beton gegen Austrocknung. Dies sichert eine gute Nachbehandlung und Nacherhärtung. Hierdurch erreichen Flugaschebetone ein sehr dichtes Gefüge und damit eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischem Angriff.

Dies ermöglicht auch die Anrechnung von Flugasche bei Schlitzwandbeton mit einem k_f -Wert von 0,7 in einem Baugrund, der beispielsweise wegen geogener Belastungen oder Verunreinigungen der Expositionsklasse XA zugeordnet werden muss.

2.5 Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen

(siehe auch Anwendungsfall FD, Seite 66)

Grundlage für die Herstellung von Beton ohne Oberflächenabdichtung beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ist die DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ [R 19], auf die in DIN 1045-2 Abs. 5.3.5 verwiesen wird. Grundsätzlich

unterscheidet die DAfStb-Richtlinie zwischen flüssigkeitsdichtem Beton (FD-Beton) und flüssigkeitsdichtem Beton nach Eindringprüfung (FDE-Beton).

Für flüssigkeitsdichte Betone (FD-Betone) kann ohne besonderen Nachweis ein ausreichender Widerstand gegen das Durchdringen wassergefährdender Stoffe angenommen werden, wenn diese Betone nach den Festlegungen des Abschnitts 3 der Richtlinie zusammengesetzt werden. Ziel dieser Festlegung ist es, ein möglichst dichtes Betongefüge zu erreichen. Die Betonzusammensetzung erfordert daher neben einem niedrigen Porenraum (Wassergehalt) einen möglichst hohen Volumen-Anteil an Feststoffen. Aufgrund der gegenüber Zement geringeren Kornrohichte ($2,3 \text{ kg/dm}^3$ gegenüber $3,1 \text{ kg/dm}^3$) bietet Flugasche bei gleichem Gewichtsanteil physikalisch ein höheres Feststoffvolumen in der Bindemittelmatrix. Insofern empfiehlt es sich gerade bei FD-Beton, eine Betonzusammensetzung mit einem größtmöglichen anrechenbaren Anteil Flugasche anzustreben.

Bei Herstellung von FD-Beton darf Flugasche gemäß den Bedingungen des Abschnitts 5.2.5 der DIN 1045-2 (siehe auch Abschnitt 2.1.2 „Anrechenbarkeit, k-Wert-Ansatz“) eingesetzt werden. Insofern gilt:

$$f_b \leq 0,33 z \text{ und} \\ k_f = 0,4$$

Abweichend von DIN 1045-2 gilt:

- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + 0,4f_b)$ von 0,50 darf nicht überschritten werden, die Mindestdruckfestigkeitsklasse ist C30/37.
- Das Volumen des Bindemittelleims ist auf 290 l/m^3 begrenzt, damit Schwinden und Hydratationswärmeentwicklung niedrig gehalten werden.
- Die auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnete Flugaschemenge ($f_b \cdot k_f$) zählt mit zum Leimvolumen.

Neben den Festlegungen für FD-Beton können auch andere geeignete flüssigkeitsdichte Betone mit besonderer Eindringprüfung (FDE-Betone) verwendet werden.

2.6 Beton nach ZTV-ING

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat für die in seinem Hoheitsbereich zu erstellenden und zu unterhaltenden Ingenieurbauwerke „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“, ZTV-ING [R 20], geschaffen. Die ZTV-ING Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton ist gemeinsam mit anderen Regelwerken der „Sammlung Brücken- und Ingenieurbau“ auf der Homepage der BAST unter „Publikationen/Downloads“ veröffentlicht.

Geregelt werden unter anderem

- Zuordnungen der typischen ZTV-ING Bauwerke zu den Expositionsklassen, insbesondere bei Frost- und Frost-Tausalz (Chlorid) -Beanspruchung,
- die Grenzwerte der Betonzusammensetzung hinsichtlich $(w/z)_{\text{eq}}$ -Wert, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Mindestzement-/Flugaschegehalt,
- Anforderungen an die Art und Verwendung der Betonausgangsstoffe

Das Anrechnungskonzept mit dem k_f -Wert für Flugasche entspricht im Grundsatz den Regelungen gemäß DIN Fachbericht 100, Abschnitt 5.2.5.1. Siehe auch Abschnitt 2.1.2 „Anrechenbarkeit, k-Wert-Ansatz“ dieser Broschüre.

Abweichend davon ist in ZTV-ING Teil 3 „Massivbau“, Abschnitt 1, Beton festgelegt, dass

- der Gehalt an Flugasche 60 M.-% bezogen auf den Zementgehalt nicht überschreiten darf ($f/z \leq 0,6$),
- die anrechenbare Flugaschemenge 80 kg/m^3 nicht überschreiten darf ($f_b \leq 80 \text{ kg/m}^3$),
- bei Gründungsbauteilen, wie z.B. Bohrpfählen, einem Beton mit CEM III/B Flugasche zugegeben werden darf. Für weitere Anwendungsbereiche bedarf diese Kombination der Zustimmung des Auftraggebers,
- die gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub (auch im Zement) ebenso der Zustimmung des Auftraggebers bedarf,
- die Anrechnung von Flugasche in der Expositionsklasse XF2 bei Verwendung von CEM I und CEM II/A-Zementen zulässig ist, wie auch bei anderen Zementarten, dann jedoch mit Zustimmung des Auftraggebers,
- die Anrechnung von Flugasche in der Expositionsklasse XF4 der Zustimmung des Auftraggebers bedarf. Bei Kappen (XF4, XD3) ist keine Anrechnung zulässig.

Die in Einzelfällen bei den Expositionsklassen XF2 und XF4 noch erforderliche Zustimmung des Auftraggebers soll die Anrechnung von Flugasche grundsätzlich ermöglichen. Bei gleichzeitiger Verwendung von Zementen mit geringem Klinkeranteil ($< 80 \text{ M.-% v. z}$) erfordert dies jedoch objektbezogene Nachweise.

2.7 Beton nach ZTV-W

Für Wasserbauwerke wie z. B. Schleusenbauten, Hebewerke und Wehre hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in der Arbeitsgruppe „Standardleistungsbeschreibungen im Wasserbau“ die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauten aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215)“ [R 21] geschaffen.

Ähnlich wie nach ZTV-ING basieren die Festlegungen der ZTV-W hinsichtlich des Betons auf DIN EN 206-1/DIN 1045-2. Abweichungen von diesen betreffen unter anderem

- die Einstufung typischer ZTV-W Bauwerke in Expositionsklassen, insbesondere bei Frost-, Chlorid und Meerwasserbeanspruchung
- die Grenzwerte für den $(w/z)_{\text{eq}}$ -Wert und die Mindestdruckfestigkeitsklasse,
- Anforderungen an die Art und die Verwendung von Zementen
- Für Beton der Expositionsklassen XD2, XS2, XD3, XS3 wird der Einsatz von Flugasche in Verbindung mit CEM I, CEM III A sowie definierten CEM II-Zementen gefordert:

CEM I, CEM II: $f \geq 0,2 (z + f)$

CEM III A: $f \geq 0,1 (z + f)$

Die Verwendung von Silikastaub ist nicht zulässig.

- Flugasche muss während der Bauzeit vom selben Herkunftsort genommen werden (Produktzertifikat). Eine Ersatzflugasche ist zu benennen. Vor einem Wechsel sind in Abstimmung mit dem Auftraggeber neue Eignungsprüfungen durchzuführen.

3 Leistungsfähigkeit von Flugasche

Die Leistungsfähigkeit von Flugasche ermöglicht aufgrund der physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften Anwendungs- und Nutzungsvorteile sowohl im Frisch- als auch im Festbeton. Neben einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit ermöglicht Flugasche eine bessere Dauerhaftigkeit der damit hergestellten Betone.

3.1 Beton mit geringer Reißneigung

Um die Reißneigung des jungen Betons zu reduzieren, ist neben den Einbaubedingungen, der Schalung und der Nachbehandlung vor allem der Betonzusammensetzung Aufmerksamkeit zu schenken. Ungünstige Einflüsse aus Temperaturdifferenzen und Schwinden können durch Flugasche betontechnologisch gezielt minimiert werden [3.1-1].

3.1.1 Hydratationswärme

Um Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilkern und Bauteilrandzone auf ein Mindestmaß zu reduzieren, ist die Bindemittelauswahl für den Beton hinsichtlich seiner Hydratationswärmementwicklung von besonderer Bedeutung.

Einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung der Hydratationswärme leistet dabei die Flugasche [3.1.1-1], [3.1.1-2], [3.1.1-3].

Die Minderung der Hydratationswärme verhält sich in etwa proportional zur ausgetauschten Zementmenge. Beim Austausch von ca. 40 M.-% CEM I 32,5 R gegen Flugasche wird die Hydratationswärme auch um ca. 40 % gesenkt.

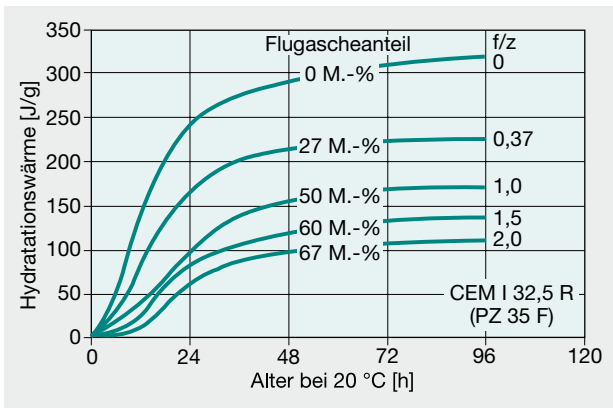


Bild 3.1.1: Hydratationswärmementwicklung von Mörteln im Thermosflaschenversuch bei unterschiedlichen Flugaschegehalten [3.1.1-4]

3.1.2 Fröhschwinden

Durch Fröhschwinden (plastisches Schwinden im jungen Beton) erfährt der Beton im jungen Alter eine Zwangbeanspruchung. Ursache hierfür ist ein rascher Entzug von in Kapillaren gebundenem Wasser. Es ist somit sinnvoll, den absoluten Wassergehalt des Betons zu minimieren.

Die Verwendung von Flugasche erlaubt die Herstellung sehr gut verarbeitbarer Betone auch bei geringerem Wassergehalt. Betone mit Flugasche erzielen selbst bei schwierigen Schalungsverhältnissen eine gute Schalungsausfüllung. Durch die geringere Kornrohichte erzielt die Flugasche im Bindemittel ein größere Feststoffmenge, was zu einem dichteren porenärmeren Bindemittelgefüge führt. Das Fröhschwinden kann somit wirkungsvoll reduziert werden.

3.2 Karbonatisierung

Der in den Beton eingebettete Betonstahl benötigt einen dauerhaften Korrosionsschutz. Diesen Korrosionsschutz gewährleistet die Bindemittelmatrix durch die Alkalität der Porenlösung. Wird die Alkalität durch von außen eindringende Medien, insbesondere durch Luft-CO₂, unter ein kritisches Niveau gesenkt (pH < 10,5), karbonatisiert der Beton, der Korrosionsschutz wird aufgehoben.

Betone mit Flugasche zeichnen sich gegenüber Betonen ohne Flugasche durch eine dichtere Bindemittelmatrix aus, eine messbare Verbesserung der Porenstruktur ist festzustellen. Insbesondere im höheren Alter wird daher die Betonoberfläche wirkungsvoll gegen das Eindringen von z. B. CO₂ abgedichtet [3.2-1], [3.2-2].

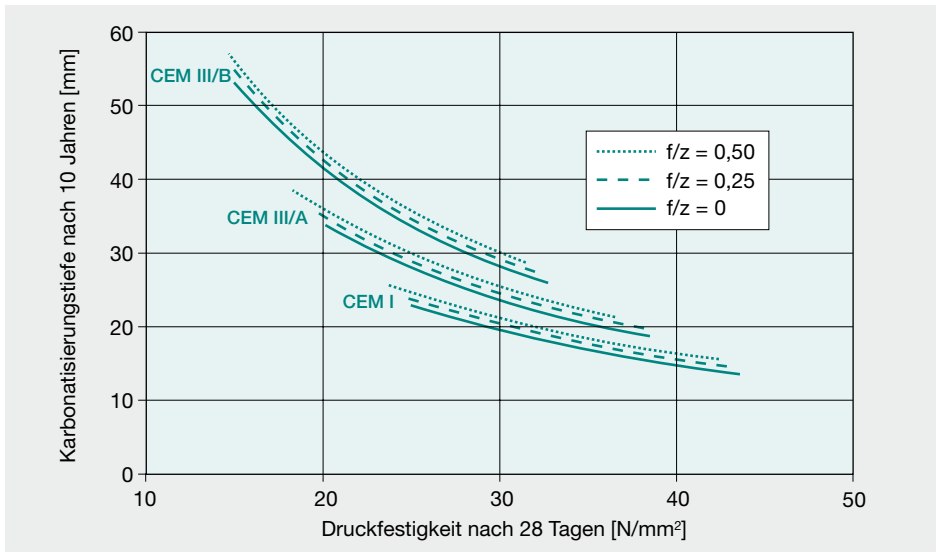


Bild 3.2: Karbonisierungstiefen nach zehn Jahren in Abhängigkeit von der 28-Tage-Druckfestigkeit (Lagerung: 2d in der Form, 5d im Wasser, danach im Normklima 20 °C/65 % r.F) [3.2-3]

3.3 Chloridangriff

Meerwasser und Tausalze enthalten Chloride, die den Beton(-stahl) bis zur Schädigung beanspruchen können.

Aufgrund der physikalischen und chemischen Wirkung der Flugasche im Beton wird dessen Dichtigkeit und damit die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe erhöht. Der positive Einfluss von Flugasche als Bindemittelkomponente auf die für die chloridinduzierte Stahlkorrosion maßgebenden Mechanismen im Beton wurde durch umfangreiche Forschung nachgewiesen. Bei Betonen, die durch Chlorid belastet sind, steigt der Elektrolytwiderstand mit zunehmendem Flugaschegehalt und mit zunehmendem Alter. Mit ansteigendem Elektrolytwiderstand nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit ab.

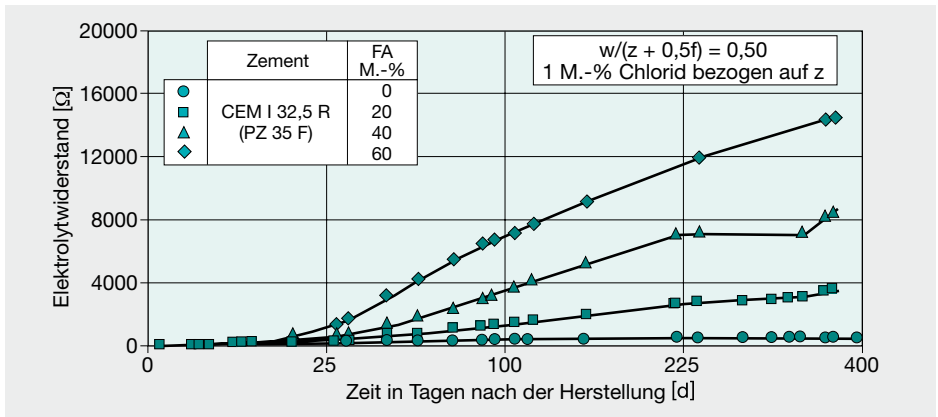


Bild 3.3.1: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands von Beton mit und ohne Flugasche [3.3]

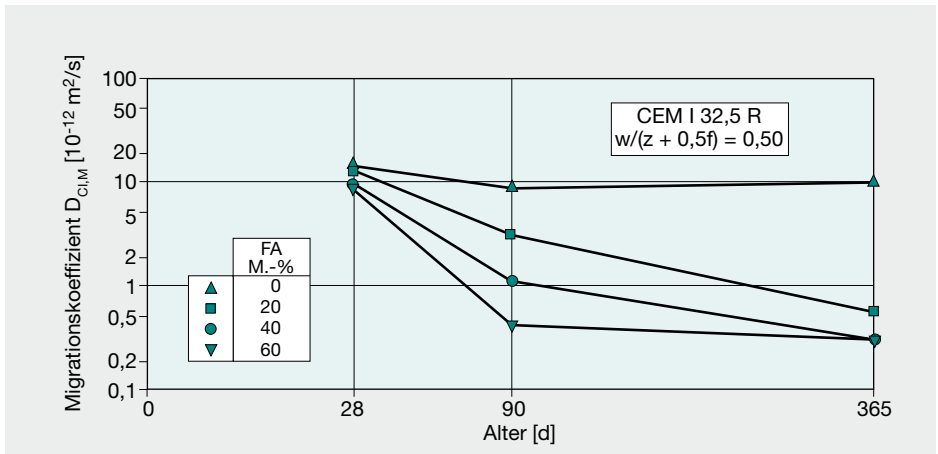


Bild 3.3.2: Migrationskoeffizient von Mörtel mit und ohne Flugasche [3.3]

Bei Betonen die von außen mit Chloridlösung beaufschlagt werden, sinkt mit zunehmendem Flugaschegehalt und Betonalter (Reifegrad) der Chloriddiffusionskoeffizient (vergleichbar mit dem Migrationskoeffizienten), der Chloriddiffusionswiderstand steigt. Ursache hierfür ist die Verbesserung der Porenstruktur durch die anhaltende puzzolanische Reaktion der Flugasche.

Die Nutzungsdauer chloridbeanspruchter Betonbauwerke kann durch die Verwendung von Flugasche erheblich verlängert werden [3.3].

3.4 Sulfatangriff

Durch das Eindringen sulfathaltiger Wässer in den Beton entsteht durch chemische Umwandlung z.B. Ettringit, das durch sein erhöhtes Kristallvolumen Treiben hervorruft. Diese Treibreaktionen können zur Zerstörung des Betons führen.

Flugasche erhöht den Widerstand des Betons gegen Sulfatangriff. Die schützende Wirkung ist umso ausgeprägter, je größer der Anteil der Flugasche im Bindemittel ist [1.4-1], [1.4-2], [3.4-1], [3.4-2], [3.4-3].

Die internationalen Erfahrungen [3.4-4] sowie umfangreiche nationale Untersuchungen gingen in die Regelung für den Einsatz von Flugasche zur Herstellung von sulfatwiderstandsfähigem Beton ein. Aus Zement und Flugasche können Bindemittelgemische für Betone hergestellt werden, die den mit SR-Zementen hergestellten Betonen in Bezug auf den Sulfatwiderstand vergleichbar sind.

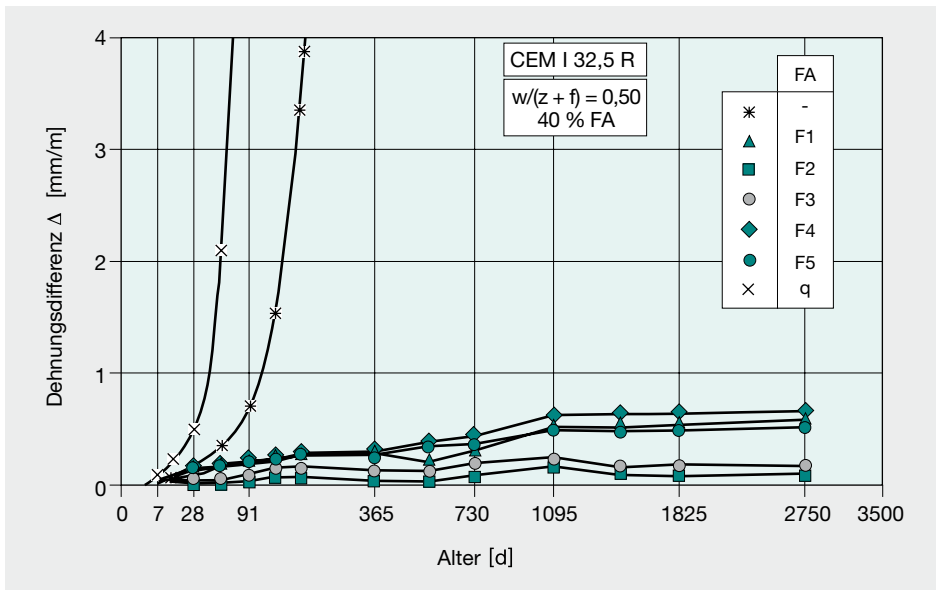


Bild 3.4.1: Dehnungsdifferenzen an Mischungen mit CEM I 32,5 R in Kombination mit fünf Flugaschen und einem Quarzmehl (q): $w/(z + f)$ bzw. $w/(z + q) = 0,50$; f/z bzw. $q/z = 0,67$; Vorlagerung 28 Tage [3.4-3]

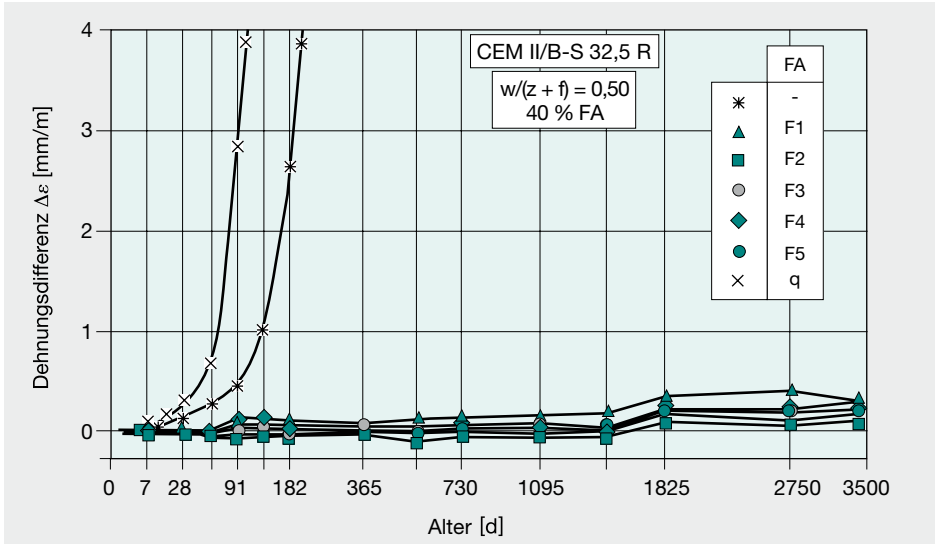


Bild 3.4.2: Dehnungsdifferenzen an Mischungen mit CEM II/B-S 32,5R in Kombination mit fünf Flugaschen und einem Quarzmehl (q): $w/(z + f)$ bzw. $w/(z + q) = 0,50$; f/z bzw. $q/z = 0,67$; Vorlagerung 28 Tage [3.4-3]

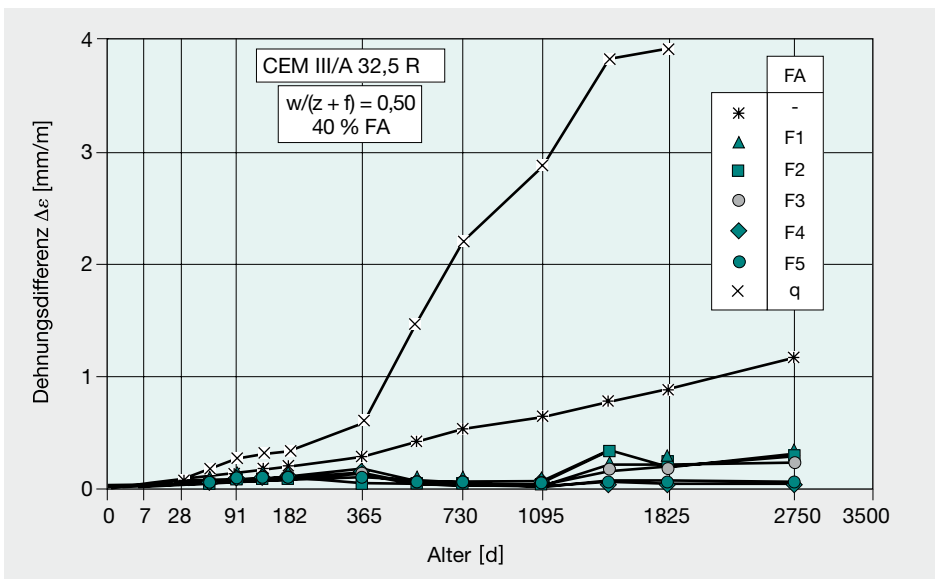


Bild 3.4.3: Dehnungsdifferenzen an Mischungen mit CEM III/A 32,5 in Kombination mit fünf Flugaschen und einem Quarzmehl (q): $w/(z + f)$ bzw. $w/(z + q) = 0,50$; f/z bzw. $q/z = 0,67$; Vorlagerung 28 Tage [3.4-3]

3.5 Lösender Angriff

Beton kann auf vielfältige Weise lösend angegriffen werden. Dem sauren Angriff gemein ist das Herauslösen von alkalischen Bestandteilen des Betons. Im Folgenden sind zwei Arten des lösenden Angriffs näher beschrieben.

3.5.1 Angriff kalklösender Kohlensäure

Infolge tektonischer oder vulkanischer Tätigkeiten oder als Folge der Zersetzung organischer Stoffe in Böden kann Grundwasser hohe Konzentrationen von Kohlensäure enthalten. Natürliche Wässer enthalten somit oft Kohlensäure in solchen Mengen, dass die mit ihnen in Kontakt kommenden Mörtel und Betone durch Herauslösen der Calciumverbindung aus dem Gefüge des Zementsteins geschädigt werden können. Daher werden nach DIN 1045-2, Tabelle 2, je nach Angriffsvermögen der Wässer die Betone den Expositionsclassen XA1, XA2 oder XA3 zugewiesen. In Untersuchungen über den Zeitraum von mehreren Jahren [3.5.1] hat sich die Verwendung von Flugasche beim Angriff kalklösender Kohlensäure auf die Widerstandsfähigkeit der Bindemittelmatrix als positiv erwiesen. Mit zunehmender Menge der eingesetzten Flugasche steigt der Widerstand gegen den Angriff kalklösender Kohlensäure.

3.5.2 Lösender Angriff durch Säuren

Bei der Einwirkung von Säuren werden die alkalischen Bestandteile des Betons angegriffen und in leichtlösliche Salze umgewandelt. Der Angriffsgrad wird durch den Säuretyp, den pH-Wert der Säure, die Säurekapazität, die Temperatur und die Austauschgeschwindigkeit bestimmt. Nicht alle Säuren greifen den Beton an. In einigen wenigen Fällen kann der Kontakt einer Säure mit dem Beton zu einer Passivierung der Betonoberfläche führen. Beim lösenden Angriff von Säuren werden die Mineralphasen des Zementsteins in wasserlösliche Salze umgewandelt. Auch bestimmte Gesteinskörnungen – wie z.B. Kalkstein – können von Säuren lösend angegriffen werden. Der Angriffsgrad der meisten organischen Säuren (z.B. Weinsäure) ist als gering einzustufen. Nur einige niedermolekulare organische Säuren (z.B. Milch-, Ameisen- und Essigsäure) können den Beton in stärkerem Maße angreifen [3.5.2-1].

Grundsätzlich lässt sich die Widerstandsfähigkeit von Beton gegenüber einem lösenden Säureangriff durch abnehmenden Wasserzementwert und zunehmende Substitution des Portlandzementklinkers im Zement durch puzzolanische Zusatzstoffe erhöhen.

Beide Maßnahmen führen zu einer dichteren Betonstruktur, weil die Zusatzstoffe die Porenradialverteilung in Richtung kleinerer Radialen verschieben. Die Zugabe puzzolanischer Zusatzstoffe, wie z.B. Flugasche, führen zu einer Verringerung des Calciumhydroxidgehalts durch Umwandlung zu CSH-Phasen, wodurch ein wesentlicher Reaktionspartner beim lösenden Angriff reduziert wird [3.5.2-2] und [3.5.2-3].

3.6 Formänderung

Es sind keine Einflüsse von Flugasche auf das Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton sowie abgeleitete Bemessungskennwerte wie z.B. den E-Modul bekannt.

In verschiedenen Forschungsarbeiten, z.B. [3.6-1], wurde bereits 1984 gezeigt, dass flugaschehaltige Betone bei gleicher Nennfestigkeit infolge der größeren Nacherhärtung ein erheblich geringeres Kriechen aufweisen.

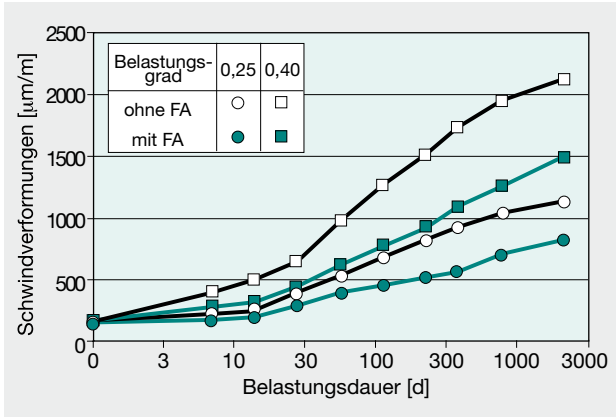


Bild 3.6.1: Kriechen von Beton mit und ohne Flugasche bei gleicher Betondruckfestigkeit von 40 N/mm²; Belastung im Alter von 28 Tagen; $f/(z + f) = 0,28$ [3.6-1]

Jüngere Untersuchungen bestätigen diese Ergebnisse und belegen, dass Flugaschebetone neben deutlich geringeren Kriechverformungen auch deutlich geringere Schwindverformungen aufweisen [3.6-2]. Als primäre Ursache wird die Abnahme der Dicke der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Matrix angeführt. Bei den Untersuchungen wurden im Mittel 20 % geringere Schwindverformungen der Flugaschebetone gegenüber Betonen ohne Flugasche beobachtet.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wird in [3.6-2] empfohlen, bei verformungsempfindlichen Betonkonstruktionen Flugaschebetone einzusetzen, da sich bei diesen das Rissverhalten vergleichsweise günstig darstellt und die Rissbildung nennenswert abgemindert werden kann.

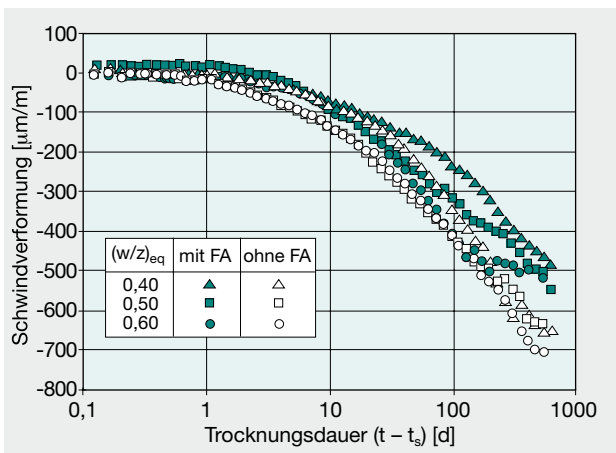
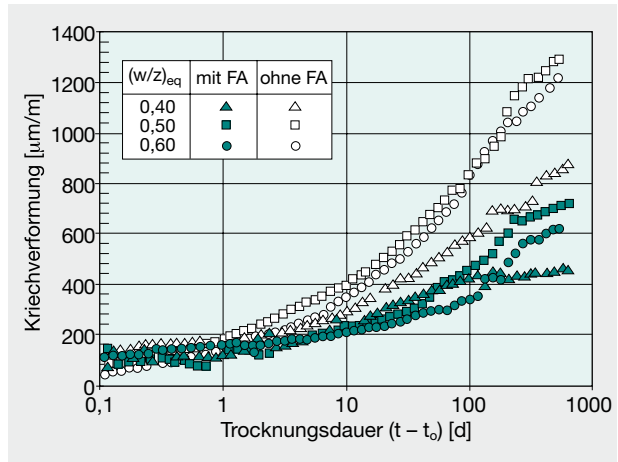


Bild 3.6.2 Zeitlicher Verlauf der Schwindverformungen für Betone bei $(w/z)_{eq}$ 0,40, 0,50 und 0,60 jeweils mit und ohne Flugasche; Trocknungsbeginn nach dem Ende des 3. Tages ($t_s = 3$ Tage) [3.6-2]

Bild 3.6.3 Zeitlicher Verlauf der Kriechverformung für Betone bei $(w/z)_{eq}$ 0,40, 0,50 und 0,60 jeweils mit bzw. ohne Flugasche; Belastungsbeginn am 28. Tag ($t_s = 3$ Tage) [3.6-2]



3.7 Alkalireaktion

Für die Herstellung von Beton mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen ist ergänzend zu DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 die DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkalirichtlinie)“ [R 11] zu berücksichtigen. Die überarbeitete Richtlinie enthält keine Einschränkungen für den Einsatz von Flugasche [3.7-4]. Dies ist einer Vielzahl von Ergebnissen langjähriger Forschungsarbeiten im In- und Ausland geschuldet [3.7-1], [3.7-2], [3.7-3]. Es wurde eindeutig bestätigt, dass durch den Austausch von Zement gegen Flugasche eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen vermieden werden kann.

Flugasche wirkt in Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen sowohl „passiv“ als auch „aktiv“. Der „passive“ Effekt beruht auf einer Verringerung des Alkaligehalts aus dem Portlandzementklinker im Beton und damit einer Verdünnung der Alkalikonzentrationen in der Porenlösung bei Austausch von Portlandzementklinker durch Flugasche. Der „aktive“ Effekt beruht zum einen auf einer Erhöhung der Gefügedichtigkeit der Zementsteinmatrix und damit einer Verlangsamung des Transports von Alkalien bzw. Wasser zum Reaktionsort. Zum anderen werden die Alkalien in die Hydratationsprodukte der Flugasche fest eingebunden, was zu einer Absenkung der Alkalikonzentration in der Porenlösung führt.

Bei neueren Untersuchungen in Deutschland wurde die Zusammensetzung der Porenlösung, insbesondere pH-Werte und Alkalität, genauer betrachtet [3.7-4]. Die Stärke des chemischen Angriffs auf die silikatischen Bestandteile einer Gesteinskörnung hängt von der Höhe des pH-Werts bzw. der (OH^-) -Ionenkonzentration der Porenlösung ab. Erst bei einer ausreichend hohen (OH^-) -Ionenkonzentration wird SiO_2 ausgelöst, das zusammen mit Alkalien quellfähige Alkalisilikatgele bildet.

Im Bild 3.7 ist der Einfluss von Art und Menge an Betonzusatzstoffen auf die Gesamtalkali- $(\text{Na}^+, \text{K}^+)$ und (OH^-) -Konzentration in der Porenlösung des Betons dargestellt. Beispielhaft

sind die Ergebnisse eines Betons mit 400 kg/m^3 Bindemittel, einem w/b-Wert von 0,45 und Grauwacke (GW) als reaktiver Gesteinskörnung im Alter von 90 Tagen, gelagert bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$, abgebildet.

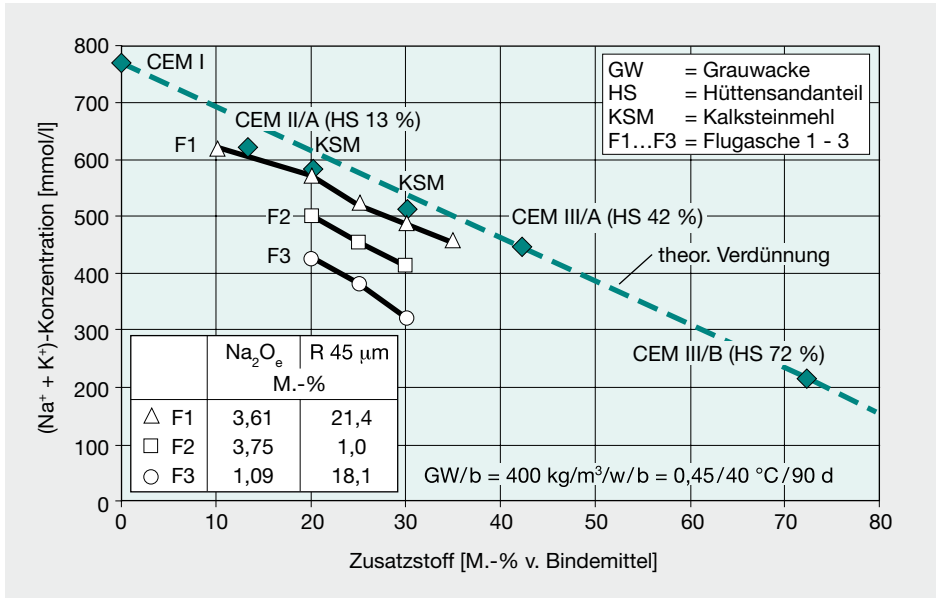


Bild 3.7: Einfluss von Art und Menge der Zusatzstoffe auf die $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung im Alter von 90 d [3.7-4]

Ausgehend von einem Beton mit reinem Portlandzement entspricht die gestrichelte Linie im Bild 3.7 den berechneten Werten für eine theoretische Verdünnung entsprechend der Austauschrate des Zements durch Zusatzstoff. Werte oberhalb, auf oder unterhalb dieser Linie können als Freisetzung, Verdünnung oder Alkalibindung angesehen werden. Im Vergleich zum Kalksteinmehl ist bei Flugasche eine zusätzliche Alkalieinbindung über die normale Verdünnung hinaus zu beobachten. Die Einbindung ist umso stärker, je geringer das Alkaliäquivalent der Flugasche ist. Diese Untersuchungen wurden bei reaktionsbeschleunigenden Bedingungen ($40 \text{ }^\circ\text{C}$ Lagerung) durchgeführt. Parallel durchgeführte Langzeituntersuchungen an Zementsteinen mit Flugasche zeigen, dass auch bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Lagerung keine für Alkalireaktionen kritische Freisetzung von Alkalien stattfindet.

Auch bei neueren Untersuchungen an Betonsteinproben, die bei $8 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $60 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert wurden, ist die dauerhafte Alkalieinbindung bei allen Temperaturen nachgewiesen worden [3.7-5].

In verschiedenen Ländern wird Flugasche bereits seit langem zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton eingesetzt. Mit den neu erbrachten oben beschriebenen Nachweisen ist davon auszugehen, dass auch in Deutschland künftig Flugasche zur Vermeidung schädigender Alkali-Kieselsäure-Reaktion eingesetzt werden wird.

3.8 Hochfester Beton

Hochfester Beton ist ein Beton mit Festigkeiten über denen eines C50/60 gemäß DIN EN 206-1/ DIN 1045-2. Für Betone der Festigkeitsklassen C95/105, C100/115 sowie LC70/77 und LC80/88 ist nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.7, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Entscheidend für hohe Festigkeiten und korrespondierende Dauerhaftigkeiten sind sehr hohe Packungsdichten im Bindemittelgefüge hochfester Betone. Diese lassen sich nur mit minimalem Wassergehalt und abgestimmten Korngrößenverteilungen in Verbindung mit leistungsfähigen Fließmitteln erzielen (siehe auch Abschnitt 5.5). Hierdurch wird ein erhöhter Eindringwiderstand gegenüber beton- und stahlangreifenden Flüssigkeiten und Gasen wie z.B. Sulfate, Säuren und Chloride erzielt [3.8-1], [3.8-2]. Die Mengen an bestimmten Stoffen wie z.B. Zement sind dabei weniger von Bedeutung als die Feinheit der verwendeten Stoffe. Neben besonders fein aufgemahlenen und granulometrisch optimierten Zementen empfiehlt sich auch der Einsatz von besonders feiner Flugasche (Kategorie S nach DIN EN 450-1). Ergänzungen durch Silikastaub und Gesteinsmehle können ggf. sinnvoll sein.

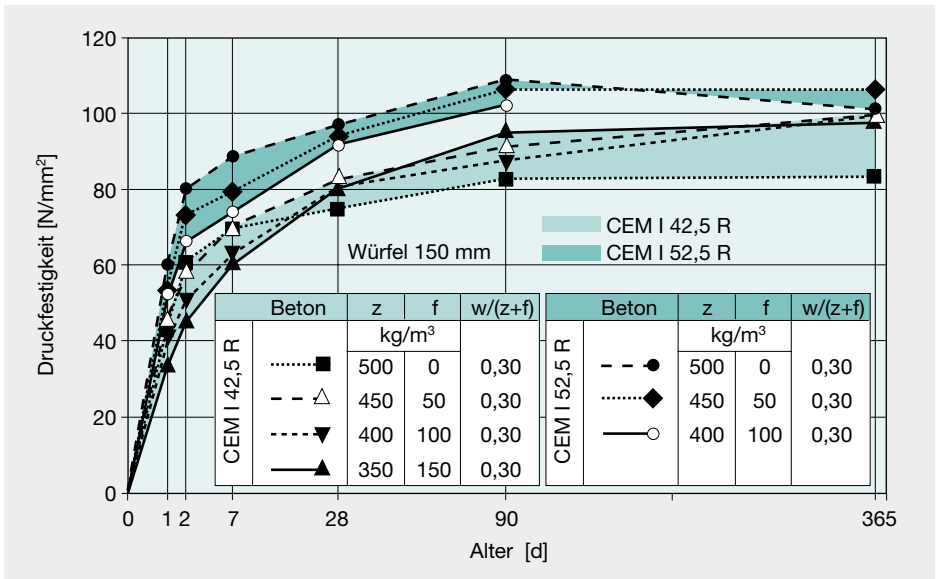


Bild 3.8: Druckfestigkeitsentwicklung hochfester Betone bis zum Alter von 365 Tagen

Da die Füllerwirkung mit steigender Feinheit und der puzzolanische Festigkeitsbeitrag mit sinkendem Wassergehalt zunehmen, kann die Wirkung von besonders feinen Flugaschen deutlich höher sein, als dies ein Anrechenbarkeitswert k_f von 0,4 ausdrückt. Wie normale Flugasche führt auch feine Flugasche zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Betons. Weiterhin ist es praxisgerecht, das Nacherhärtungspotential der hochfesten Betone mit Flugasche in Ansatz zu bringen und die Festigkeitsnachweise erst nach 56 Tagen oder 90 Tagen zu führen [3.8-3], [3.8-4].

Tabelle 3.8: Hochfeste Betone mit Flugasche

Bauteil		Brücken- überbau ¹⁾	Brücken- überbau ²⁾	Brücken- bogen ²⁾	Gebäude- stützen ³⁾
Beton		B 85 (C70/85)	B 65 (C55/67)	B 65 (C55/67)	B 95 (C80/95)
Konsistenz		KF (F4)	KF (F4)	SVB	KF (F4)
Zement		CEM I 42,5R-SR	CEM III/A 42,5R-NA	CEM III/A 42,5R-NA	CEM I 42,5R
	kg/m ³	360	360	370	400
Flugasche	kg/m ³	120	70	200	80
Silikastaub		Slurry mit 50 % Feststoffgehalt	Slurry mit 50 % Feststoffgehalt	-	Slurry mit 50 % Feststoffgehalt
	kg/m ³	70	50	-	70
Wasser			Zugabewasser	Zugabewasser	
	kg/m ³	143	110	135	195
Zusatzmittel		PCE/VZ	FM/Stabi	FM/Stabi	-
	M.-% v. z.	1,6/0,2	1,7/2,6	2,4/2,5	-
(w/z) _{eq}		0,32	0,34	0,37	0,35
Gesteins- körnung	kg/m ³	A16/B16 1831	A16/B16 1902	A16/B16 1642	A16/B16

¹⁾ Luckenberger Brücke über die Havel

²⁾ Bogenbrücke Wölkau, BAB A17

³⁾ Telekom Center München

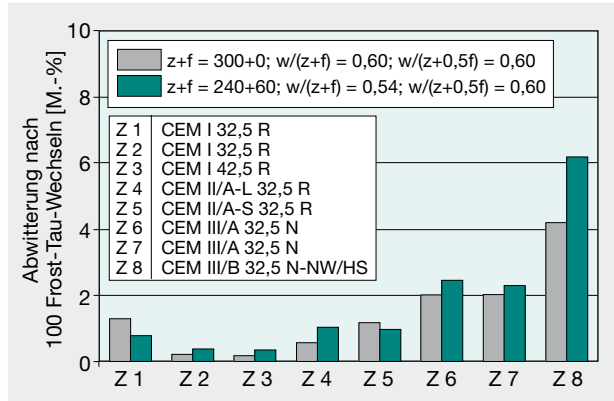
3.9 Frost- und Frost-Taumittel-Angriff

Beton, der im durchfeuchteten Zustand einer Frost-Tauwechsel-Beanspruchung, ggf. unter gleichzeitiger Einwirkung von Taumitteln, ausgesetzt ist, muss so hergestellt werden, dass er dem Angriff ausreichend widersteht und dauerhaft ist.

3.9.1 Beton mit hohem Frostwiderstand

Betone mit hohem Frostwiderstand werden in Deutschland üblicherweise ohne Luftporenbildner hergestellt. Ein ausreichender Frostwiderstand wird durch eine entsprechend niedrige Kapillarporosität und ein dichtes Gefüge sichergestellt. Da Betone mit Flugasche bei gleicher Betondruckfestigkeit und ausreichender Nachbehandlung einen vergleichbaren Widerstand gegen Frostbeanspruchung aufweisen wie Betone ohne Flugasche, kann in den Expositionsklassen XF1 und XF3 Flugasche in gleicher Weise auf den Zementgehalt angerechnet werden wie bei den anderen Expositionsklassen [3.9-1].

Bild 3.9.1: Einfluss von Flugasche auf die Frostabwitterung nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von der Zementart [3.9-2]

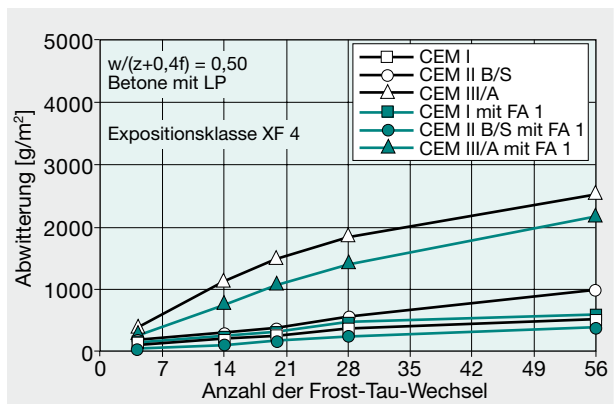


3.9.2 Beton mit hohem Frost-Taumittel-Widerstand

Taumittel reduzieren bekanntlich den Gefrierpunkt von Wasser. Dringt taumittelhaltiges Wasser in den Beton ein, besteht die Möglichkeit, dass bei sinkender Außentemperatur dieses zunächst im oberflächennahen Bereich und später erst im Betoninneren friert. Dies erhöht die Gefahr von Frostschäden beträchtlich.

Betone, die mit Frost-Tauwechseln bei gleichzeitiger Taumittelinwirkung beansprucht werden, sind nach DIN 1045-2 den Expositionsklassen XF2 (mäßige Wassersättigung, mit Taumittelinwirkung) und XF4 (hohe Wassersättigung, mit Taumittelinwirkung) zuzuordnen. Betone der Expositionsklassen XF2 können mit oder ohne künstlich eingebrachte Mikroluftporen hergestellt werden. Die Betone der Expositionsklasse XF4 müssen in der Regel mit künstlich eingebrachten Mikroluftporen hergestellt werden, die durch Luftporenbildner erzeugt werden. Alternativ können auch geeignete Mikrohohlkugeln verwendet werden. Lediglich erdfeuchter Beton mit einem Wasserzementwert $w/z \leq 0,40$ darf ohne Luftporen hergestellt werden.

Bild 3.9.2: Einfluss von Flugasche auf die Abwitterung nach 100 Frost-Tausalz-Wechseln in Abhängigkeit von der Zementart [3.9-3]



Mit Einführung der DIN 1045-2 Ausgabe August 2008 kann Flugasche auch bei den Expositionsclassen XF2 und XF4 auf den Zementgehalt angerechnet werden. Diese, im Rahmen der zuvor veröffentlichten A 2 Änderung der DIN 1045-2 erfolgte Anwendungserweiterung, basiert auf Ergebnissen langjähriger Forschungsarbeiten [3.9-3].

Die Regelung zur Anrechnung gilt nur für Flugasche als Betonzusatzstoff. Betone mit Silikastaub als Betonzusatzstoff sind für die Expositionsclassen XF2 und XF4 nicht zugelassen.

Im Geltungsbereich der ZTV-ING ist die Anrechnung von Flugasche für die Expositionsclassen XF2 und XF4 grundsätzlich zugelassen, bedarf jedoch in besonderen Fällen der Zustimmung des Auftraggebers. Näheres hierzu siehe Abschnitt 2.6 „Beton nach ZTV-ING“.

4 Festlegungen nach Expositionsclassen und bei besonderen Anwendungsfällen

DIN 1045-2 definiert die Anforderungen an die Betonzusammensetzung nach Expositionsclassen. In diesen Classen sind jeweils der höchstzulässige Wasserzementwert, die Mindestfestigkeitsklasse des Betons (f_{ck}) und der Mindestzementgehalt (min z) festgelegt.

Bei Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 kann in den meisten Fällen der Mindestzementgehalt reduziert werden (min z_p). An Stelle des w/z-Werts gilt dann der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq} = w / (z + k \cdot f_b)$. Der k_f -Wert ist in der Regel mit 0,4, in besonderen Fällen mit 0,7 anzunehmen und der anrechenbare Flugaschegehalt darf in der Regel 0,33 z, bei besonderen Zementarten 0,25 z und 0,15 z, nicht überschreiten.

In den nachstehenden Tabellenblättern werden die für die einzelnen Expositionsclassen maßgeblichen Werte detailliert dargestellt:

- Beschreibung der Exposition, des Angriffs und der Umgebungsbedingungen
- Beispiele für Bauteile
- äquivalenter Wasserzementwert $(w/z + 0,4f_b)$ -Wert / $(w/z + 0,7f_b)$ -Wert
- Mindestdruckfestigkeitsklasse des Betons
- Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche
- Mindestflugaschegehalt
- maximal anrechenbarer Flugaschegehalt f_b/z (0,33; 0,25; 0,15)

Zusätzlich sind nahezu alle mit DIN 1045-2 konformen Anwendungsmöglichkeiten von Flugasche dargestellt für:

- Unterwasserbeton
- Bohrpfahlbeton
- Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
- Beton für Ortbetonschlitzwände
- Flugasche betreffende Regelungen der ZTV-ING und ZTV-W

Tabelle 4: Übersicht Expositionsklassen nach DIN 1045-2

Klasse	Beschreibung der Umgebung	WIN-Empfehlung für den Flugaschegehalt [kg/m³]
1 Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko		
X0	Für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall: alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß oder chemischer Angriff	50...100
2 Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung		
XC1	Trocken oder ständig nass	50...100
XC2	Nass, selten trocken	50...100
XC3	Mäßige Feuchte	50...100
XC4	Wechselnd nass und trocken	50...100
3 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride, ausgenommen Meerwasser		
XD1	Mäßige Feuchte	50...100
XD2	Nass, selten trocken	50...100
XD3	Wechselnd nass und trocken	50...100
4 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride im Meerwasser		
XS1	Salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser	50...100
XS2	Unter Wasser	50...100
XS3	Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche	50...100
5 Frostangriff mit und ohne Taumittel		
XF1	Mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	50...100
XF2	Mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	50...100
XF3	Hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	50...100
XF4	Hohe Wassersättigung, mit Taumittel	50...100
6 Betonkorrosion durch chemischen Angriff		
XA1	Chemisch schwach angreifende Umgebung	50...100
XA2	Chemisch mäßig angreifende Umgebung und Meeresbauwerke	50...100
XA3	Chemisch stark angreifende Umgebung	50...100
7 Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung		
XM1	Mäßige Verschleißbeanspruchung	50...100
XM2	Starke Verschleißbeanspruchung	50...100
XM3	Sehr starke Verschleißbeanspruchung	50...100
Flüssigkeitsdichter Beton für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen		
FD	Beton mit hohem Widerstand gegen eindringende Flüssigkeiten	50...100
Anwendungsfälle		
UW	Unterwasserbeton für tragende Bauteile unter Wasser	80...150
BP 32	Beton für Ortbetonpfähle (bis 32 mm GK) im Erdreich und ständig feuchter Umgebung	80...150
BP 16	Beton für Ortbetonpfähle (bis 16 mm GK) im Erdreich und ständig feuchter Umgebung	120...180
SW	Beton für Ortbetonschlitzwände im Erdreich und ständig feuchter Umgebung	60...150

Expositionsklasse		X0	
<p>Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko</p> <p>Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht betonangreifender Umgebung können der Expositionsklasse X0 zugeordnet werden.</p>			
Klassenbezeichnung			
<p>Alle Umgebungsbedingungen außer XF, XA und XM</p> <p>Fundamente ohne Bewehrung ohne Frost Innenbauteile ohne Bewehrung</p>			
Beschreibung der Umgebung			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 - Regelfall</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	keine Anforderung	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C8/10	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	keine Anforderung	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	keine Anforderung	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b=0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$)	$\max f_b$	keine Anforderung	
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XC1	
<p>Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p><i>ANMERKUNG: Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall zu sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.</i></p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>trocken oder ständig nass</p> <p>Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden); Beton, der ständig in Wasser getaucht ist</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XC2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$	0,75	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C16/20	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	240	kg/m^3
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	keine Anforderung	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 80/60/36 *)	
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Eigenschaften von Flugasche hinsichtlich Karbonatisierung werden im Abschnitt 3.2 näher beschrieben.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m^3

Expositionsklasse		XC2	
<p>Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p><i>ANMERKUNG: Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall zu sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.</i></p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>nass, selten trocken</p> <p>Teile von Wasserbehältern; Gründungsbauteile</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XC1</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,75	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C16/20	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	240	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	keine Anforderung	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 80/60/36 *	
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Eigenschaften von Flugasche hinsichtlich Karbonatisierung werden im Abschnitt 3.2 näher beschrieben.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2

Expositionsklasse		XC3	
<p>Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p><i>ANMERKUNG: Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall zu sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.</i></p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>mäßige Feuchte</p> <p>Bauteile, zu denen die Außenluft häufig oder ständig Zugang hat, z.B. offene Hallen, Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit z.B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäscherien, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
Festlegungen nach DIN 1045-2			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,65	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C20/25	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	240	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	20	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 80/60/36 *)	
<p style="text-align: center;">WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Eigenschaften von Flugasche hinsichtlich Karbonatisierung werden im Abschnitt 3.2 näher beschrieben.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XC4	
<p>Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p><i>ANMERKUNG: Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall zu sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.</i></p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>Wechselnd nass und trocken</p> <p>Außenbauteile mit direkter Beregnung; Bauteile in Wasserwechselzonen</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XF1 und XA1</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$	0,60	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	10	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 * 80 ZTV-ING	
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Eigenschaften von Flugasche hinsichtlich Karbonatisierung werden im Abschnitt 3.2 näher beschrieben.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XD1	
<p>Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>mäßige Feuchte</p> <p>Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen; Einzelgaragen</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XS1, XM1 und XM2 (mit Oberflächenbehandlung)</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C30/37	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	30	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</p>			
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C25/30 anzusetzen.</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Wichtigste Eigenschaft der Flugasche ist die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XD2	
<p style="text-align: center;">Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>nass, selten trocken</p> <p>Solebäder; Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massengeton, ZTV-ING und ZTV-W</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XS2, XF2 (ohne LP), XF3 (ohne LP) und XA2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 C30/37 Massengeton / ZTV-ING	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massengeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) <small>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</small>	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Flugasche bewirkt die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XD3	
<p>Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>wechselnd nass und trocken</p> <p>Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; Parkdecks</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DafStb-Richtlinie Massenstein ZTV-ING und ZTV-W</p> <p>Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XS3, XA3, XM2 (ohne Oberflächenbehandlung) und XM3</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$	<p>0,45 0,50 Massenstein</p>	
Minstdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	<p>C35/45 C30/37 Massenstein</p>	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	<p>50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massenstein</p>	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: <p>90/68/41 *) 80 ZTV-ING</p>	
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen. ZTV-ING: Bei Beton für Kappen (XF4 und XD3) darf Flugasche nicht angerechnet werden. weitere Festlegungen			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Flugasche bewirkt die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XS1	
Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser			
Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Luft ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meereswasser			
Außenbauteile in Küstennähe			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ZTV-ING			
Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD1, XM1 und XM2 (mit Oberflächenbehandlung)			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C30/37	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	30	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C25/30 anzusetzen.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Flugasche bewirkt die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XS2	
<p>Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser</p> <p>Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Luft ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>unter Wasser</p> <p>Bauteile z.B. in Hafenbecken, die ständig unter Wasser liegen</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massenbeton und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XD2, XF2 (ohne LP), XF3 (ohne LP) und XA2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 C30/37 Massenbeton	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 30 Massenbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Flugasche bewirkt die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XS3	
Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser			
Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Luft ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche z.B. Kaimauern in Hafenanlagen			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massengbeton und ZTV-ING			
Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD3, XA3, XM2 (ohne Oberflächenbehandlung) und XM3			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,45 0,50 Massengbeton	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 C30/37 Massengbeton	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 30 Massengbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Die technischen Vorteile von Flugaschebeton bei Chloridangriff/-belastung werden im Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Flugasche bewirkt die Erhöhung des Elektrolytwiderstands und die Minderung der Chloriddiffusion.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF1	
<p>Betonkorrosion durch Frost ohne Taumittel</p> <p>Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>mäßige Wassersättigung</p> <p>Außenbauteile</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XC4 und XA1</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,60	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	10	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</p> <p>Besondere Begrenzung des Mehlkorns beachten (s. Abschnitt 2.1.4)</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF2 mit LP	
Betonkorrosion durch Frost mit Taumittel Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
mäßige Wassersättigung Betonbauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 und ZTV-ING			
Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklasse XF3 mit LP			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	30	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68*) 80 ZTV-ING	
LP-Gehalt je nach gewähltem Größtkorn der Gesteinskörnung einstellen. Besondere Begrenzung des Mehlkorns beachten (s. Abschnitt 2.1.3).			
ZTV-ING erlaubt ohne Einschränkung die Anrechnung der Flugasche bei CEM I oder CEM II/A. Die Anrechnung bei anderen Zementen erfordert die Zustimmung des Auftraggebers. Details dazu siehe Abschnitt 2.6.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF2 ohne LP	
<p>Betonkorrosion durch Frost mit Taumittel</p> <p>Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>mäßige Wassersättigung</p> <p>Betonbauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massengemischbeton und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XD2, XS2, XF3 (ohne LP) und XA2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 C30/37 Massengemischbeton/ ZTV-ING	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massengemischbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68 *) 80 ZTV-ING	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2			
<p>ZTV-ING erlaubt ohne Einschränkung die Anrechnung der Flugasche bei CEM I oder CEM II/A. Die Anrechnung bei anderen Zementen erfordert die Zustimmung des Auftraggebers. Details dazu siehe Abschnitt 2.6.</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF3 mit LP	
Betonkorrosion durch Frost ohne Taumittel Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden: Klassenbezeichnung			
hohe Wassersättigung offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ZTV-ING Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklasse XF2 mit LP			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
LP-Gehalt je nach gewähltem Größtkorn der Gesteinskörnung einstellen. Besondere Begrenzung des Mehlkorns beachten (s. Abschnitt 2.1.4) weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF3 ohne LP	
<p>Betonkorrosion durch Frost ohne Taumittel</p> <p>Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>hohe Wassersättigung</p> <p>offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massenbeton und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XD2, XS2, XF2 (ohne LP) und XA2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 Regelfall C30/37 Massenbeton / ZTV-ING	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massenbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) <small>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</small>	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>Besondere Begrenzung des Mehlkorns beachten (s. Abschnitt 2.1.4)</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XF4	
Bewehrungskorrosion durch Frost mit Taumittel Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden: Klassenbezeichnung			
hohe Wassersättigung Verkehrsflächen, die mit Taumittel behandelt werden; überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen; Räumleraufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massenbeton und ZTV-ING Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XS3, XA3, XM2 (mit Oberflächenbehandlung) und XM3			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C30/37 Regelfall C25/30 Massenbeton / ZTV-ING bei Kappenbeton	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massenbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68* 80 ZTV-ING	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2			
ZTV-ING erlaubt die Anrechnung der Flugasche nur mit Zustimmung des Auftraggebers. Bei Kappenbeton (XF4 und XD3) ist keine Anrechnung der Flugasche erlaubt.			
LP-Gehalt je nach gewähltem Größtkorn der Gesteinskörnung einstellen. Besondere Begrenzung des Mehlkorns beachten (s. Abschnitt 2.1.4). weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XA1	
<p>Betonkorrosion durch chemischen Angriff</p> <p>Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser und Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>chemisch schwach angreifende Umgebung</p> <p>Behälter von Kläranlagen; Güllebehälter</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>	Angriffskriterien gem. DIN EN 206-1 Tab. 2		
	Wasser		
	pH-Wert	≤ 6,5 ... ≥ 5,5	
	SO ₄ ²⁻ CO ₂ NH ₄ ⁺ Mg ²⁺	≥ 200 ... ≤ 600 ≥ 15 ... ≤ 40 ≥ 15 ... ≤ 30 ≥ 300 ... ≤ 1000	mg/l
	Boden SO ₄ ²⁻	≥ 2000 ... ≤ 3000	mg/kg
	Säuregrad	> 200	
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall</p> <p>und ggf. abweichend bei DAfStb-Richtlinie Massenbeton und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen für den Regelfall und ZTV-ING gelten auch für die Expositionsklassen XC4 und XF1</p>			
maximaler w/(z+ 0,4 f _b)-Wert	max (w/z) _{eq}	0,60	
Minstdruckfestigkeitsklasse	f _{ck}	C 25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	min z _f	270 Regelfall / ZTV-ING 240 Massenbeton	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei min z _f	min f _b	10 Regelfall / ZTV-ING 40 Massenbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt (max f _b = 0,33 ·z _f / 0,25·z _f / 0,15·z _f *)	max f _b	bei Ansatz von min z _f : 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Die technischen Eigenschaften von Flugasche hinsichtlich chemischem Angriff werden im Abschnitt 2.1.5 näher beschrieben. Flugasche erhöht generell den Widerstand bei treibendem und lösendem Angriff.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XA2	
Betonkorrosion durch chemischen Angriff Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser und Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden: Klassenbezeichnung			
chemisch mäßig angreifende Umgebung und Meeresbauwerke Betonbauteile, die mit Meerwasser in Berührung kommen; Bauteile in stark betonangreifenden Böden Beschreibung der Umgebung	Angriffskriterien gem. DIN EN 206-1 Tab. 2		
	Wasser pH-Wert	< 5,5 ... ≥ 4,5	
	SO ₄ ²⁻	> 600 ... ≤ 3000	mg/l
	CO ₂	> 40 ... ≤ 100	
	NH ₄ ⁺	> 30 ... ≤ 60	
	Mg ²⁺	> 1000 ... ≤ 3000	
	Boden	> 3000 ... ≤ 12000	mg/kg
	SO ₄ ²⁻		
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall und ggf. abweichend bei DAfStb Richtlinie Massenbeton und ZTV-ING Festlegungen gelten auch für die Expositionsklassen XD2, XS2, XF2 (ohne LP) und XF3 (ohne LP)			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,50	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45 Regelfall C30/37 Massenbeton / ZTV-ING	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50 Regelfall / ZTV-ING 30 Massenbeton	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *) *) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.5 und Tabellen 2.1.5 und 2.1.1	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen. Für die Expositionsklassen XA2 und XA3 ist ggf. der Sulfatgehalt des angreifenden Wassers anzugeben, da dieser die Bindemittelauswahl bestimmt. Einzelheiten siehe Abschnitt 2.1.5 weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise Ab einem SO ₄ ²⁻ -Gehalt von 600 mg/l kann anstelle von SR-Zement ein Bindemittelgemisch aus Zement und Flugasche verwendet werden. Ab einem SO ₄ ²⁻ -Gehalt von 1500 mg/l ist stets SR-Zement zu verwenden. Bei Massenbetonen mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (s. Abschnitt 6.1) volle XA2-Nutzung mit Flugasche möglich. Flugasche erhöht generell den Widerstand bei treibendem und lösendem Angriff.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XA3	
<p>Betonkorrosion durch chemischen Angriff</p> <p>Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser und Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>chemisch stark angreifende Umgebung</p> <p>Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern; Gärfuttersilos und Futtertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>	Angriffskriterien gem. DIN EN 206-1 Tab. 2		
	Wasser		
	pH-Wert	< 4,5 ... ≥ 4,0	
	SO ₄ ²⁻ CO ₂ NH ₄ ⁺ Mg ²⁺	> 3000 ... ≤ 6000 > 100 > 60 ... ≤ 100 > 3000	mg/l
Boden			
SO ₄ ²⁻	>12000 .. ≤ 24000	mg/kg	
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall</p> <p>und ZTV-ING</p> <p>Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD3, XS3, XA3, XM2 (ohne Oberflächenbehandlung) und XM3</p>			
maximaler w/(z+0,4 f _b)-Wert	max (w/z) _{eq}	0,45	
Minstdruckfestigkeitsklasse	f _{ck}	C35/45	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	min z _f	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei min z _f	min f _b	50	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt (max f _b = 0,33 ·z _f / 0,25·z _f / 0,15·z _f *)	max f _b	bei Ansatz von min z _f : 90/68/41 *) 80 ZTV-ING	
<p>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.5 und Tabellen 2.1.5 und 2.1.1</p>			
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.</p> <p>Für die Expositionsklassen XA2 und XA3 ist ggf. der Sulfatgehalt des angreifenden Wassers anzugeben, da dieser die Bindemittelauswahl bestimmt.</p> <p>Einzelheiten siehe Abschnitt 2.1.5</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise</p> <p>Flugasche erhöht generell den Widerstand bei treibendem und lösendem Angriff.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XM1	
Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung			
Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
mäßige Verschleißbeanspruchung			
tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall			
Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD1, XS1 und XM2 (mit Oberflächenbehandlung)			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C30/37	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	30	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *)	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2			
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C25/30 anzusetzen. Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts für Expositionsklassen XM... beachten (s. Abschnitt 2.1.3). Maximaler Zementgehalt 360 kg/m ³ , jedoch nicht bei hochfestem Beton.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XM2 mit Oberflächenbehandlung	
<p align="center">Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung</p> <p>Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p align="center">starke Verschleißbeanspruchung</p> <p align="center">tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p align="center">Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall</p> <p align="center">Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD1, XS1 und XM1</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,55	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C30/37	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	30	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 90/68/41 *	
<p>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</p>			
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C25/30 anzusetzen.</p> <p>Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts für Expositionsklassen XM... beachten (s. Abschnitt 2.1.4). Maximaler Zementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfestem Beton.</p> <p>Es muss eine Oberflächenbehandlung durchgeführt werden, die eindeutig zu einer Verbesserung der Betonoberfläche führt (z.B. durch Flügelglätten).</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Expositionsklasse		XM2 ohne Oberflächenbehandlung	
Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung			
Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
starke Verschleißbeanspruchung			
tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall			
Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD3, XS3, XA3 und XM3			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,45	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m^3
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 90/68/41 *)	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2			
Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.			
Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.1.4). Maximaler Zementgehalt 360 kg/m^3 , jedoch nicht bei hochfestem Beton.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m^3

Expositionsklasse		XM3	
<p>Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung</p> <p>Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p><i>Klassenbezeichnung</i></p>			
<p>sehr starke Verschleißbeanspruchung</p> <p>tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; Oberflächen, die häufig von Kettenfahrzeugen befahren werden; Wasserbauwerke in geschiebelasteten Gewässern, z. B. Tosbecken</p> <p><i>Beschreibung der Umgebung</i></p>			
<p>Festlegungen nach DIN 1045-2 – Regelfall</p> <p>Festlegungen für den Regelfall gelten auch für die Expositionsklassen XD3, XS3, XA3 und XM2 (ohne Oberflächenbehandlung)</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,45	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C35/45	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *)	
<p><i>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.1 und Tabelle 2.1.2.2</i></p>			
<p>Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Exposition XF..., ist die nächst niedrigere Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.</p> <p>Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.1.3). Maximaler Zementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfestem Beton.</p> <p>Es sind Hartstoffe nach DIN 1100 zu verwenden.</p> <p><i>weitere Festlegungen</i></p>			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

Anwendungsfall		UW	
Unterwasserbeton, Beton für Unterwasserschüttungen			
Klassenbezeichnung			
Beton für tragende Bauteile unter Wasser			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2, Abs. 5.3.4			
Festlegungen gelten auch für den Anwendungsfall Schlitzwandbeton (SW)			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,60¹⁾	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	240/270²⁾	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	110/80²⁾	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68/41 *	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.1.7			
Der Gehalt an Zement und Flugasche darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Die Anforderungen an Unterwasserbeton gelten für Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 32 mm. Es kann angenommen werden, dass bei einem Größtkorn von 16 mm analog zu den Regelungen des Anwendungsfalls BP 16 ausgegangen werden darf.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	80 ... 150	kg/m ³

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z. B. Expositionsklasse XA).

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die Empfehlungen des WIN orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

Anwendungsfall		BP 32	
<p>Beton für Ortbetonpfähle Bei Verwendung von Gesteinskörnung mit 32 mm Größtkorn</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>Beton im Erdreich und ständig feuchter Umgebung</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Festlegungen nach DIN EN 1536 und DIN SPEC 18140 Festlegungen gelten auch für den Anwendungsfall Schlitzwandbeton (SW)</p>			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,60¹⁾	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	80	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68 *	
<p>*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.3 und Tabelle 2.3</p>			
<p>Der Gehalt an Zement und Flugasche darf 350 kg/m³ nicht unterschreiten.</p> <p>weitere Festlegungen</p>			
<p>WIN Empfehlungen/Hinweise Die technischen Besonderheiten bei der Anwendung von Flugasche hinsichtlich Bohrspahlbeton werden im Abschnitt 2.3 näher beschrieben.</p>			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	80 ... 150	kg/m ³

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z. B. Expositionsklasse XA2).

Anwendungsfall		BP 16	
Beton für Ortbetonpfähle Bei Verwendung von Gesteinskörnung mit 16 mm Größtkorn Klassenbezeichnung			
Beton im Erdreich und ständig feuchter Umgebung Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN EN 1536 und DIN SPEC 18140			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,60¹⁾	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	300	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	100	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 100/75 *	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.3 und Tabelle 2.3			
Der Gehalt an Zement und Flugasche darf 400 kg/m ³ nicht unterschreiten. weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise Die technischen Besonderheiten bei der Anwendung von Flugasche hinsichtlich Bohrpfahlbeton werden im Abschnitt 2.3 näher beschrieben.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	120 ... 180	kg/m ³

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z. B. Expositionsklasse XA2).

Anwendungsfall		SW	
Beton für Ortbetonschlitzwände			
Klassenbezeichnung			
Beton im Erdreich und ständig feuchter Umgebung			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN EN 4126/DIN EN 1538 ³⁾			
Festlegungen gelten auch für den Anwendungsfall UW			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,60¹⁾	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	C25/30	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	240/270²⁾	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	110/80²⁾	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$: 90/68 *	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.4			
Der Gehalt an Zement und Flugasche darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
DIN EN 4126/DIN EN 1538 ³⁾ trifft diese Regelung für Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 32 mm. Es kann angenommen werden, dass bei einem Größtkorn von 16 mm analog zu den Regelungen des Anwendungsfalls BP 16 ausgegangen werden darf.			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	60 ... 150	kg/m ³

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z. B. Expositionsklasse XA2).
²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die Empfehlungen des WIN orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen.
³⁾ Die Normen sind bauaufsichtlich nicht eingeführt.

Anwendungsfall		FD	
Flüssigkeitsdichter Beton für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen			
Klassenbezeichnung			
Beton mit hohem Widerstand gegen eindringende Flüssigkeiten			
Beton für Tankstellenflächen; Beton für Auffangtassen unter Flüssigkeitsbehältern			
Beschreibung der Umgebung			
Festlegungen nach DIN 1045-2 und DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$	0,50¹⁾	
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	\geq C30/37	
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	270²⁾	kg/m ³
Mindestflugaschegehalt bei $\min z_f$	$\min f_b$	50²⁾	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 \cdot z_f / 0,25 \cdot z_f / 0,15 \cdot z_f$ *)	$\max f_b$	bei Ansatz von $\min z_f$; 90/68/41 *	
*) je nach verwendeter Zementart, siehe Abschnitt 2.5			
Die Bindemittelleimenge darf 290 l/m ³ nicht überschreiten. Bei der Ermittlung der Bindemittelleimenge wird das Volumen aus Zement, des mit $k_f = 0,4$ anrechenbaren Flugascheanteils und des Wassers addiert.			
weitere Festlegungen			
WIN Empfehlungen/Hinweise			
Empfohlener Flugaschegehalt	f	50 ... 100	kg/m ³

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z. B. Expositionsklasse XA).

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die Empfehlungen des WIN orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen.

5 Entwurfshilfen für Flugaschebetone

Beim Entwurf einer Betonzusammensetzung müssen alle Parameter berücksichtigt werden, die dessen Widerstand gegen Lasten und Einwirkungen (Exposition) im Rahmen normativer Festlegungen sicherstellen. Im Nachfolgenden sind die wesentlichen Schritte und Informationen für die sachgerechte Planung von Flugaschebetonen in sinnvoller Reihung dargestellt. Sowohl ein Rechenbeispiel als auch ein Ablaufdiagramm verdeutlichen ergänzend in Abschnitt 5.5 den Entwurf.

5.1 Festlegung und Zusammensetzung des Betons

Die Festlegung des Betons trifft formal in der Regel der Bauwerksplaner („*Verfasser der Festlegung*“). Alle Einwirkungen aus Lasten und Umgebung auf Standsicherheit und Dauerhaftigkeit wie auch Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und auch ästhetische Ansprüche sind hierbei zu berücksichtigen. Daher ist es in der Praxis letztlich unabdingbar, dass sich alle an der Planung, der Herstellung, dem Einbau und der Nachbehandlung des Betons Beteiligten sorgfältig abstimmen. Grundsätze der Festlegung des Betons beschreibt Abschnitt 6 des DIN Fachberichts 100 [R 5]. Danach kann Beton

entweder als *Beton nach Eigenschaften* (DIN FB 100 Abs. 6.2) festgelegt werden:

Beton, für den die geforderten Eigenschaften und zusätzlichen Anforderungen dem Hersteller gegenüber festgelegt sind, der für die Bereitstellung eines Betons, der den geforderten Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist (DIN FB 100 Abs. 3.1.11 → Definition).

oder als *Beton nach Zusammensetzung* (DIN FB 100 Abs. 6.3):

Beton, für den die Zusammensetzung und die Ausgangsstoffe, die verwendet werden müssen, dem Hersteller vorgegeben werden, der für die Lieferung eines Betons mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist (DIN FB 100 Abs. 3.1.12 → Definition).

Für beide Varianten sind *grundlegende* und *zusätzliche Anforderungen* zur Festlegung definiert, die eine tiefe Sachkenntnis erfordern. Der Verfasser der Festlegung sollte insofern auch über die Leistungsfähigkeit von Flugaschebetonen und deren Anwendungsmöglichkeiten, wie diese in den Abschnitten 3 „Leistungsfähigkeit von Flugaschebeton“ und 6 „Anwendungsmöglichkeiten“ dieser Broschüre beschrieben sind, informiert sein.

Dies berücksichtigend sind bei der Festlegung des Betons im Wesentlichen anzugeben:

- Druckfestigkeitsklasse (ggf. von 28 d abweichendes Nachweissalter)
- Expositions- und Feuchtigkeitsklassen
- Größtkorn
- Konsistenz
- Betontransport und -förderung
- Frischbetontemperatur

- Anforderungen zur Hydratationswärmeentwicklung
- Verarbeitungsdauer
- Besondere Widerstände (Chlorid, Sulfat, Abrieb, Wasser)
- Anforderungen an die Nachbehandlung des Betons

Der Verfasser der Festlegung und der Hersteller des *Betons nach Eigenschaften* müssen dann in Abhängigkeit von den Expositionsclassen die *Grundanforderungen an die Zusammensetzung des Betons* gemäß DIN FB 100 Abs. 5.2 beachten und die *Grenzwerte für die Betonzusammensetzung* gemäß DIN FB 100 Abs. 5.3.2 einhalten. Hierzu zählen:

- zulässige Arten und Classen der Betonausgangsstoffe
- höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert
- Mindestzement-/Mindestbindemittelgehalt
- Druckfestigkeitsklasse des Betons
- ggf. Mindestluftgehalt des Betons

Um allen Anforderungen weitestgehend gerecht zu werden, ist die angestrebte Zusammensetzung des Betons im Rahmen einer *Erstprüfung* (DIN FB 100 Abs. 3.1.41) zu bestätigen.

5.2 Entwurfsgrößen und Entwurfshilfen

Die Dimensionierung der mit Beton hergestellten Bauteile bemisst sich nach dem Volumen, insofern ist bei Übergabe des Betons der „*Kubikmeter Beton*“ als Bezugsgröße definiert. Die erforderliche Genauigkeit zur Zusammensetzung eines Kubikmeters Beton ist jedoch nicht durch volumetrische sondern nur durch *gravimetrische Dosierung* zu gewährleisten. Daher sind in den Regelwerken mit wenigen Ausnahmen Anforderungs- und Grenzwerte in gravimetrischen Größen beschrieben. Die Berücksichtigung beider Bezugsgrößen erfolgt durch die Stoffraumgleichung (Berechnung siehe Abschnitt 5.3).

Neben den in Abschnitt 2 „Anwendungsgrundlagen für Flugasche im Beton“ und Abschnitt 4 „Festiglegungen nach Expositionsclassen und bei besonderen Anwendungsfällen“ beschriebenen Festlegungen und Empfehlungen (Hinweise für den Regelfall siehe Tabelle 5.2.0), sind für den Betonentwurf daher auf jeden Fall noch die Kenntnis der Kornrohdichte aller Betonausgangsstoffe (Tabelle 5.2.1) und der Konsistenzwassermenge (Tabelle 5.2.2) erforderlich.

Durch die *Grundanforderungen an die Zusammensetzung des Betons* werden im Zusammenhang mit den Expositionsclassen quantitative Festlegungen zum äquivalenten Wasserzementwert, zum Zement- und Betonzusatzstoffgehalt sowie zur Betondruckfestigkeit getroffen. Darauf aufbauend kann die erforderliche Zementfestigkeitsklasse aus Bild 5.2 ausgewählt sowie die untere Grenzwassermenge vorbestimmt werden.

Häufig deckt sich die so vorbestimmte Wassermenge nicht mit den Erfahrungen über den erforderlichen Wasserbedarf der vor Ort gegebenen Gesteinskörnungen; in der Regel wird die angestrebte Konsistenz damit nicht erreicht. Dann muss der Wassergehalt unter gleichzeitiger Anhebung des Bindemittelgehalts - somit bei Sicherstellung des erforderlichen äquivalenten Wasserzementwerts - angehoben werden und/oder eine ausreichende Menge Betonverflüssiger/Fließmittel zudosiert werden.

Im verdichteten Zustand weist Beton ein Porenvolumen von ca. 1,5 Vol.-% bis 2,0 Vol.-% auf, das beim Betonentwurf berücksichtigt werden muss.

Tabelle 5.2.0 Übliche Anrechnungsgrößen von Flugasche ¹⁾

k-Wert		Anrechenbare Flugaschemenge f_b	
0,4	Regelfall	$\leq 0,33 z$	Regelfall bei üblichen Zementen
		$\leq 0,25 z$	Bei Verwendung von Zementen mit den Hauptbestandteilen natürliche Puzzolane (P) und Flugasche (V)
0,7	Unterwasserbeton, Bohrpfahlbeton	$\leq 0,15 z$	Bei Verwendung von Zementen mit dem Hauptbestandteil Silikastaub (D)

¹⁾ Vollständige Angaben zu allen Anwendungsfällen siehe Details in Tabellen 2.1.2.2; 2.1.3; 2.1.5 und Abschnitt 4

Tabelle 5.2.1: Mittlere Dichten und Rohdichten üblicher Betonausgangsstoffe

Betonausgangsstoff	Dichte [kg/dm ³]	Gesteinskörnung	Rohdichte [kg/dm ³]
Flugasche	2,3	Rheinkies	2,60 ... 2,65
CEM I	3,1	Quarzit	2,60 ... 2,70
CEM II	3,0	Kalkstein	2,65 ... 2,85
CEM III	2,9	Granit	2,60 ... 2,70
		Basalt	2,90 ... 3,00

Tabelle 5.2.2: Anhaltswerte für den Wasseranspruch von Beton (ohne Zusatzmittel) [5.2]

Körnungs- ziffer K	Sieblinie	Wasseranspruch in l/m ³ bei einer Konsistenz		
		steif	plastisch	weich
5,48	A 32	130	150	170
4,60	A 16	140	160	180
4,20	B 32	150	170	190
3,66	B 16	160	180	200
3,30	C 32	170	190	210
2,75	C 16	190	210	230

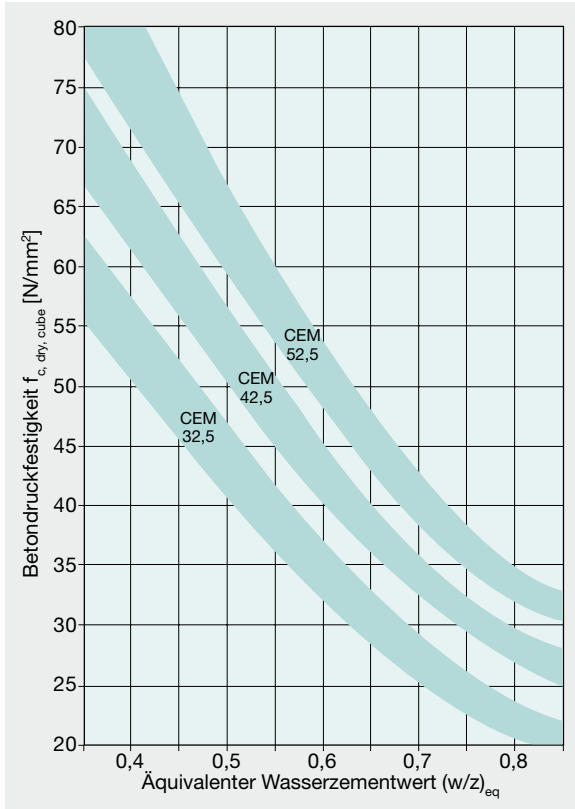


Bild 5.2 Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit f_{c28} vom äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}}$ und der Festigkeitsklasse des Zements [5.2]

Aufgrund der Einbausituation sowie architektonischer Vorgaben (Sichtbeton) können sich weitere Anforderungen an den Beton ergeben. Dazu zählen in der Regel ein ausreichender und stabiler Leimgehalt sowie eine definierte Verarbeitungs- und Erhärtungsdauer. In aller Regel hat sich die Verwendung von Flugasche gerade unter diesen Aspekten als sichere Steuerungsgröße bewährt (vergleiche hierzu beispielsweise Inhalte aus Abschnitt 3 dieser Broschüre).

5.3 Stoffraumrechnung

Anmerkung: Die im Folgenden benutzten erforderlichen Abkürzungen und Formelzeichen sind übersichtlich in Tabelle 5.5.2 Seite 76 erläutert.

Basierend auf der Bezugsgröße *ein Kubikmeter Beton* wird der Betonentwurf mit der Stoffraumgleichung vorgenommen:

$$\frac{g}{\rho_g} + \frac{z}{\rho_z} + \frac{f}{\rho_f} + \frac{w}{\rho_w} + p = 1000 \text{ [dm}^3/\text{m}^3\text{]}$$

$g / (\rho_g)$: Gesteinskörnung/(Kornrohddichte g)

$z / (\rho_z)$: Zement/(Dichte z)

$f / (\rho_f)$: Flugasche/(Dichte f)

$w / (\rho_w)$: Wasser/(Dichte w)

p : Porenvolumen

Formel 5.3.1

Die Ergebnisse der Stoffraumrechnung werden in Liter [l] oder Kubikdezimeter [dm³] und kg pro Kubikmeter [kg/m³] angegeben. Die Eingangsgrößen für die Stoffraumgleichung werden nun unter Beachtung der *Grundanforderungen an die Zusammensetzung des Betons* (DIN FB 100 Abs. 5.2) ermittelt.

Der Schlüssel für eine optimale Nutzung der Flugasche liegt in der anforderungsgerechten Zusammensetzung des Bindemittels. Hierbei müssen das zulässige f/z-Verhältnis (das hier hilfswise mit f_b/z bezeichnet wird, da es sich um die dem Bindemittelanteil anrechenbare Flugaschemenge handelt) und der k_f-Wert berücksichtigt werden. Mit dem notwendigen Wassergehalt wird zunächst eine Beziehung zwischen dem erforderlichen (w/z)_{eq}-Wert und dem äquivalenten Bindemittelgehalt (b_{eq}), bestehend aus dem Zementgehalt und dem anrechenbaren Flugaschegehalt, hergestellt:

$$b_{eq} = w/(w/z)_{eq} \text{ [kg]} \quad \text{Formel 5.3.2}$$

Mit Hilfe der zulässigen Größen für (f_b/z) und dem k-Wert der Flugasche k_f können dann in zwei Schritten der erforderliche Zement- und der optimale Flugaschegehalt aus dem äquivalenten Bindemittelgehalt bestimmt werden. Zuerst ist der Zementgehalt zu bestimmen:

$$z = b_{eq}/(1 + k_f \cdot f_b/z) \text{ [kg]} \quad \text{Formel 5.3.3}$$

Das Ergebnis muss auf die Einhaltung des jeweils geforderten Mindestzementgehalts geprüft werden, andernfalls ist eine Erhöhung des Wassergehalts vorzunehmen und bei Formel 5.3.2 erneut zu beginnen. Anschließend kann der optimale Flugaschegehalt bestimmt werden:

$$f = (f_b/z) \cdot z \text{ [kg]} \quad \text{Formel 5.3.4}$$

Durch die zuvor beschriebenen Überlegungen und Rechenschritte wurde den *Grundanforderungen an die Zusammensetzung des Betons* (DIN FB 100 Abs. 5.2) entsprochen. Die Stoffmengen für w, z und f sind vordefiniert und bekannt. Die Stoffraumgleichung (Formel 5.3.1) ist daher unter Berücksichtigung des Porenvolumens zur Bestimmung der Menge der Gesteinskörnung umzustellen:

$$g = \left[1000 - \frac{z}{\rho_z} - \frac{f}{\rho_f} - \frac{w}{\rho_w} - p \right] \cdot \rho_g \text{ [kg]} \quad \text{Formel 5.3.5}$$

Die Ergebnisse sind abschließend hinsichtlich der Begrenzung des Mehlkorngehalts zu überprüfen und ggf. zu korrigieren.

Damit ist der Betonentwurf abgeschlossen. Selbstverständlich muss das Ergebnis unter Berücksichtigung der Anforderungen der Förder- und Verarbeitbarkeit und der Einbaubedingungen überprüft und ggf. angepasst werden.

5.4 Betonoptimierung

In häufigen Anwendungsfällen legt der Verfasser der Festlegung des Betons ein von 28 Tagen abweichendes höheres Nachweialter fest. Hier kann das Nacherhärtungspotenzial der Flugasche aufgrund ihrer puzzolanischen Eigenschaft geltend gemacht werden.

Im Regelfall wird die Leistung der Flugasche mit dem k-Wert 0,4 angesetzt (Tabelle 5.2.0). Die damit bestimmte Druckfestigkeit des Betons liegt in den überwiegenden Fällen deutlich auf der sicheren Seite. Dies führt zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Druckfestigkeit bei Flugaschebetonen.

Verschiedene Untersuchungen bestätigen, dass der k-Wert von

- der verwendeten Zementart,
- dem $(w/z)_{\text{eq}}$ -Wert,
- dem f/z-Wert,
- dem absoluten Wassergehalt und
- dem Betrachtungsalter

abhängig ist. Es ist daher möglich mit einem vom zulässigen k-Wert abweichenden Rechenwert „ k_{R} “ die zu erwartende Druckfestigkeit eines Flugaschebetons praxisnah abzuschätzen.

Hierzu bedient man sich der Beziehung zwischen $(w/z)_{\text{eq}}$ -Wert und Betondruckfestigkeit, wie sie im Bild 5.2 dargestellt ist. Die bekannte Gleichung zur Bestimmung des äquivalenten Wasserzementwerts

$$(w/z)_{\text{eq}} = \frac{w}{z + k_{\text{R}} \cdot f} \quad [-] \quad \text{Formel 5.4.1}$$

kann durch Einsetzen des Rechenwerts k_{R} entsprechend der oben dargestellten Überlegungen genutzt werden, um die zu erwartende Druckfestigkeit im Diagramm in Bild 5.2 zu ermitteln.

$$(w/z)_{\text{eq}} = \frac{w}{z + k_{\text{R}} \cdot f} \quad [-] \quad \text{Formel 5.4.2}$$

Der höhere k_{R} -Wert führt dann zu einem niedrigeren rechnerischen $(w/z)_{\text{eq}}$, was wiederum zur Ermittlung einer höheren Druckfestigkeit führt. Wohlgermerkt, handelt es sich bei dieser Betrachtung nur um eine rechnerische Abschätzung. Die Stoffraumrechnung zur Festlegung der Betonzusammensetzung muss die normenkonformen Grenzwerte berücksichtigen; es sei denn, der Beton wird gesondert zugelassen. Weitere Informationen über die Anwendung von k_{R} werden in einem Merkblatt beschrieben.

5.5 Beispiel und Ablaufdiagramm

Der Entwurf zur sachgerechten Zusammensetzung eines Flugaschebetons mit Hilfe der in den Abschnitten 5.1 bis 5.4 beschriebenen Vorgehensweisen und Randbedingungen kann, wie nachfolgend beschrieben, sowohl anhand eines Rechenbeispiels als auch mit Hilfe eines logischen Ablaufdiagramms schrittweise nachvollzogen werden.

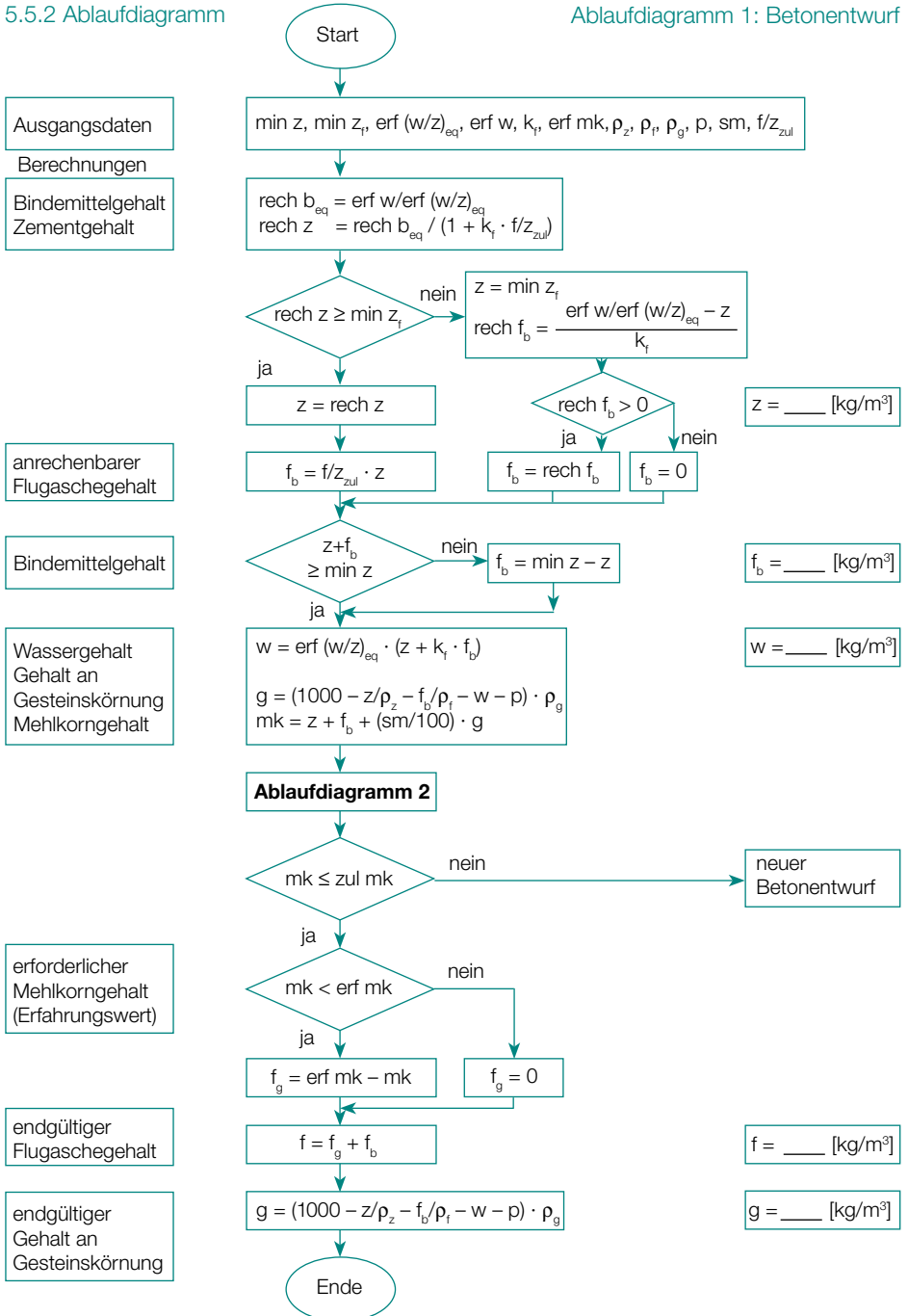
5.5.1 Beispiel

Festlegung des Betons		
Maßnahme	Festlegung	Hilfsmittel
Betonentwurf Expositionsklasse Druckfestigkeitsklasse Größtkorn Konsistenzklasse Eigenschaft	Beton nach Eigen- schaften XC4, XF1, XA1, WF C25/30 32 F3 pumpfähig	DIN FB 100 Abs. 6 Festlegung des Betons BTE ¹⁾ Kapitel 3 „Leistungsfähigkeit von Flugaschebeton“ Abschnitt 6 „Anwendungsmöglichkeiten“
Grundanforderungen - Grenzwerte		
Maßnahme	Festlegung	Hilfsmittel
Art und Klasse der Ausgangsstoffe max (w/z) _{eq} min z _t bei Verwendung von FA k _f -Wert erf f _v /z	CEM II/B-S Flugasche 0,60 = (w/z) _{eq} 270 = min z _t 0,4 = k _f 0,33 = erf f _v /z	BTE Abschnitt 2 „Anwendungsgrundlagen für Flugasche im Beton“ BTE Abschnitt 4 „Festlegungen nach Expo- sitionsklassen und bes. Anwendungsfällen“
Gegebene Stoffe und Erfah- rungswerte Art Gesteinskörnung Alkaliempfindlichkeitsklasse Mehlkornanteil gewählter Wasserbedarf gewählte Zementart und -festigkeitsklasse	Flusskies, -sand E I-S 4 % Mehlkorn > 175 l Wasser CEM II/B 32,5	Stoffdatensammlung und Erstprüfungen im Betonwerk Alkalieinstufung der Gesteinskörnung Sieblinien der Gesteinskörnung Erfahrungswert / Körnungsziffer / BTE Tab. 5.2.2 Anhaltswerte Wasseranspruch BTE Bild 5.2
Stoffraumrechnung für 1 m ³ Beton		
Formel	Rechnung	Ergebnis
$b_{eq} = w/(w/z)_{eq}$ [kg] Formel 5.3.2	$b_{eq} = 175/(0,57)$ (w/z) _{eq} mit Vorhaltemaß gewählt	$b_{eq} = 307$ kg
$z = b_{eq}/(1 + k_f \cdot f_v/z)$ [kg] Formel 5.3.3	$z = 307/(1 + 0,4 \cdot 0,33)$	$z = 271$ kg
Überprüfung des Zementgehalts	BTE Abschnitt 4 „Festlegungen nach Expositionsklassen“ BTE Tabelle 2.1.1	
$f = (f_v/z) \cdot z$ [kg] Formel 5.3.4	$f = 0,33 \cdot 271$	$f = 90$ kg
$g = \left[1000 - \frac{z}{\rho_z} - \frac{f}{\rho_f} - \frac{w}{\rho_w} - p \right] \cdot \rho_g$ [kg] Formel 5.3.5	$g = \left[1000 - \frac{271}{3,0} - \frac{90}{2,3} - \frac{175}{1,0} - 20 \right] \cdot 2,65$	$g = 1790$ kg
Mehlkorn	$mk = 0,04 \cdot 1790 + 271 + 90$	$mk = 433$ kg
Überprüfung des Mehlkorngehalts	BTE Abschnitt 4 „Festlegungen nach Expositionsklassen“ BTE Abschnitt 2.1.4 und Bild 2.1.4	

¹⁾ BTE: Die vorliegenden WIN **Beton**T**echnischen** **E**mpfehlungen
Hinweis: Sind höhere Betondruckfestigkeiten erforderlich, weil beispielsweise auch noch Anforderungen aus den
Expositionsklassen XD oder XS gestellt werden, ist neben der Wahl einer höheren Zementfestigkeitsklasse zunächst
die Absenkung des Wassergehalts bei gleichzeitigem Einsatz von Betonzusatzmitteln zu beachten.

5.5.2 Ablaufdiagramm

Ablaufdiagramm 1: Betonentwurf



Ablaufdiagramm 2: Mehlkorngehalt

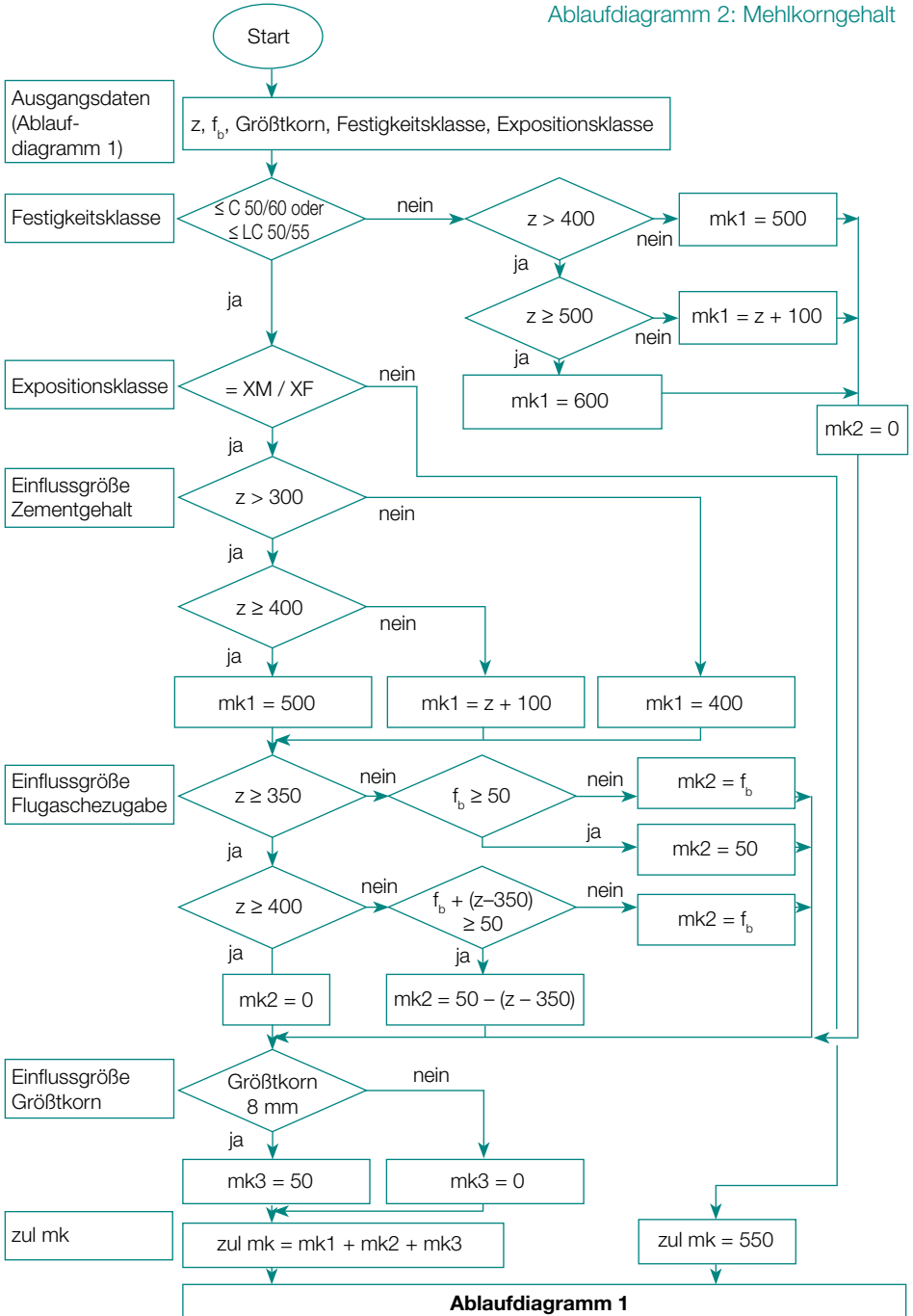


Tabelle 5.5.2: Erläuterungen der Kurzzeichen

Eingangsdaten	
$\max (w/z)_{\text{eq}}$	= höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2
$\text{erf } (w/z)_{\text{eq}}$	= erforderlicher äquivalenter Wasserzementwert zum Erreichen der angestrebten Druckfestigkeit (z. B. aus Diagramm in Bild 5.2)
$\text{erf } w$	= erforderlicher Wasseranspruch (Erfahrungswert, s. auch Tab. 5.2.2) in l/m^3
k_f	= Anrechenbarkeitswert für Flugasche; Faktor für die Anrechnung der Flugaschezugabe auf den Wasserzementwert in der Formel $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + k_f \cdot f_b)$
$\max f_b$	= maximal anrechenbare Flugaschemenge in Abhängigkeit der Zementart (s. Tab. 2.1.2.2) in kg/m^3
f/z_{zul}	= zulässiger Anteil Flugasche bezogen auf den Zementgehalt, zulässiges Verhältnis f_b/z
$\min z$	= Mindestzementgehalt (s. Tab.2.1.1) in kg/m^3
$\min z_f$	= Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche (s. Tab.2.1.1) in kg/m^3
$\min f_b$	= Mindestflugaschegehalt (s. Tab. 2.1.1) bei Reduzierung des Zementgehalts in kg/m^3
$\text{erf } mk$	= erforderlicher Mehlkorngesamtgehalt in kg/m^3 entsprechend den vorliegenden Erfahrungen
$\text{zul } mk$	= höchstzulässiger Mehlkorngesamtgehalt in kg/m^3 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 bzw. Ablaufdiagramm 2
p	= Porengehalt im Beton (Erfahrungswert) in l/m^3
sm	= Siebdurchgang der Gesteinskörnung bei der Korngröße 0,125 mm in M.-%
ρ_f	= Dichte der Flugasche in kg/dm^3
ρ_g	= Kornrohddichte der Gesteinskörnung in kg/dm^3
ρ_z	= Dichte des Zements in kg/dm^3
Rechengrößen/Hilfsgrößen	
$\text{rech } b_{\text{eq}}$	= Rechenwert für den äquivalenten Bindemittelgehalt in kg/m^3 nach der Formel $z + k_f \cdot f_b$
$\text{rech } f_b$	= Rechenwert für den Flugaschegehalt in kg/m^3
$\text{rech } z$	= $\text{rech } b_{\text{eq}} / (1 + k_f \cdot 0,33)$ [je nach Zementart auch 0,25; 0,15]
$mk1$	= zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Zementmenge
$mk2$	= zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Verwendung von Zusatzstoffen
$mk3$	= zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Gesteinskörnung
f_g	= Flugaschemenge in kg/m^3 , die über den anrechenbaren Anteil hinausgeht
Ergebniswerte	
z	= Zementgehalt in kg/m^3
f_b	= anrechenbare Flugaschemenge in kg/m^3 . Je nach Zementart gilt $f_b \leq 0,33 z$; $0,25 z$; $0,15 z$
w	= Wassergehalt in l/m^3
f	= gesamte Zugabe an Flugasche in kg/m^3 (kann größer sein als die anrechenbare Menge f_b ; $f = f_b + f_g$)
g	= Menge der Gesteinskörnung in kg/m^3
mk	= Mehlkorngesamtgehalt im Beton in kg/m^3

6 Neue Anwendungsmöglichkeiten

6.1 Massenbetone mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

Für die Herstellung von massigen Bauteilen (Massenbeton) ist die Beherrschung der Hydratationswärme von besonderer Bedeutung für die Dauerhaftigkeit (siehe auch Abschnitte 2.2 und 3.1.1). Die Möglichkeiten, Zement durch Flugasche auszutauschen und dadurch insbesondere Temperaturspitzen zu reduzieren, sind begrenzt. Die Richtlinie für massige Bauteile aus Beton [R 13] fordert in Verbindung mit DIN 1045-2 [R 4] Mindestzementgehalte von 240 kg/m^3 und 270 kg/m^3 . In den meisten Anwendungsfällen könnte der Zementgehalt bei entsprechender Zugabe von Flugasche noch deutlich stärker reduziert werden, ohne Dauerhaftigkeit und Festigkeit zu beeinträchtigen. Dadurch würden die Hydratationstemperaturen noch weiter abgesenkt. Derartige Betonkonzepte erfordern jedoch eine Zustimmung im Einzelfall der Bauaufsichtsbehörde oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, Berlin).

Aufbauend auf erfolgreich realisierten Bauprojekten mit Zustimmung im Einzelfall, wurden in den letzten Jahren vom Deutschen Institut für Bautechnik mehrere allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Massensbetone erteilt (siehe Tab. 6.1), die es erlauben, den Zementgehalt unter die normativen Grenzen abzusenken, bei gleichzeitiger Erhöhung des Flugaschegehalts. Dabei kann die Flugasche als Betonzusatzstoff mit höheren k -Werten, in der Regel mit $k = 0,7$, angerechnet werden. Mit äquivalenten Wasserzementwerten von $0,50$ bis $0,60$ können Betone der Festigkeitsklasse C12/15 bis C35/45 hergestellt werden. In umfangreichen Versuchsprogrammen wurde unter anderem auch nachgewiesen, dass bei den abgeminderten Zement- und hohen Flugaschegehalten der Ca(OH)_2 -Gehalt im Beton stets ausreichend hoch ist, um den Korrosionsschutz der Bewehrung dauerhaft sicherzustellen.

Anwendungsbereiche der Betone mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung sind erdberührte massige Bauteile aus Beton und Stahlbeton, die nach DIN 1045-2 in die Expositionsklassen X0, XC2 und XA1, bei Sulfatangriff auch bis XA2, einzustufen sind. Diese Massensbetone sind wasserundurchlässig und haben darüber hinaus überwiegend auch einen hohen Wassereindringwiderstand.

Die positiven Erfahrungen mit den durch Zulassung ermöglichten Massensbetonen erlauben mittlerweile auch die Ausdehnung der Anwendung auf Expositionen der Klassen XC4 und XF1 (Tabelle 6.1).

Einige Zulassungsinhaber, die gleichzeitig Anbieter von Flugasche sind, stellen die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Dritten zur Nutzung zur Verfügung.

Tabelle 6.1: Massenbetone mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Stand 08/2016)

	Sonderbeton für Gründungsbauwerke (MBG)	HochTief Massenbeton (MBG)	CPM Basecrete und CPM Topcrete (MBG)	Sonderbeton mit EFA-Füller für erdberührte massige Bauteile (MBG)
abZ-Nr.	Z-3.51-1799	Z-3.51-1816	Z-3.51-1909	Z-3.51-1955
Zement	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 N	CEM II/B-S 32,5 R CEM III 32,5 N	CEM II/B-S 32,5N/R CEM III/A 32,5N/R CEM III/A 42,5N
-herkunft	beliebig	beliebig	beliebig	beliebig
Flugascheherkunft	beliebig	beliebig	beliebig	beliebig
Zusatzmittel	BV, FM, VZ	BV, FM, VZ	BV, FM, VZ	BV, FM, VZ
Druckfestigkeitsklasse, Nachweisalter 91 Tage	C25/30 C30/37	min C12/15 max C30/37	min C30/37	min C30/37
(w/z) _{eq}	I C25/30 max 0,58 II C30/37 max 0,55 III C30/37 max 0,50	max 0,65 max 0,60	max 0,50	max 0,50
k-Wert	0,7	0,7	0,7	0,7
Expositions-klassen	X0, XC2, XA1, bzw. XA2 bei Sulfatangriff, dabei (w/z) _{eq} ≤ 0,50	X0, XC2, XA1	X0, XC2, XA1 und XA2 für Sulfatangriff	X0, XC2 und XA1, XA2 bei Sulfatangriff, XS2
Eigenschaft	WU	WU / EW	WU / EW	EW
		WU = wasserundurchlässiger Beton		
		EW = hoher Wassereindringwiderstand		
Anwendungsbereich	a/b/c/d/e	a/b/-/-/e	a/b/c/d/e	a/b/c/d/e

a = massige, ein- oder mehrseitig erdberührte Bauteile aus Beton und Stahlbeton nach DIN 1045 für o.g. Expositions-klassen

b = ergänzend zu a: bei „schwachen“ chemischen Angriff

c = ergänzend zu a: bei „starkem“ chemischen Angriff

d = für Bohrfähigkeit zulässig

e = ergänzend zu a: erdberührte, frostfreie Gründungsbauteile mit Luftkontakt - Anm.: Schutzschicht aufbringen

6.2 Recyclingbeton - Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnungen müssen die Anforderungen der DIN 4226-100 [R 22] und DIN EN 12620 erfüllen. Ihren Einsatz im Beton regelt die Richtlinie „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung“ [R 23] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), die in Verbindung mit DIN 1045-2 gilt. Bei Bauvorhaben nach dieser DAfStb-Richtlinie sowie vorangegangenen Pilotprojekten mit Zustimmung im Einzelfall kam Flugasche in Mengen von 40 kg/m³ bis 70 kg/m³ Beton zum Einsatz.

Flugasche hat in Recycling-Betonen die gleiche Wirkung wie in Normalbetonen, d.h. sie verbessert nahezu alle Frisch- und Festbetoneigenschaften. Der bei den porösen RC-Gesteinskörnungen tendenziell erhöhte Leimbedarf wird bevorzugt durch Flugasche gedeckt.

Tabelle 6.2: Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung

Anwendung		Wandbeton ¹⁾	Massenbeton ²⁾	Außenbauteil ²⁾	Füllbeton ³⁾
Betonfestigkeitsklasse		B 35 (C30/35)	B 35 (C30/35)	B 25 (C20/25)	B 15 (C12/15)
Konsistenz		KR (F3)	KP (F2)	KR (F3)	KP (F2)
Zement	kg/m ³	CEM I 42,5 R 290	CEM I 42,5 R 300	CEM I 32,5 R 310	CEM III/A 32,5 240
Flugasche	kg/m ³	70	50	40	40
Wasser (wirksam)	kg/m ³	201	177	183	195
Zusatzmittel	M.-% v. z	BV 1,8	BV 1,5	FM 1,3	- -
w/z		0,69	0,59	0,59	0,81
(w/z) _{eq}		0,63	0,55	0,56	0,76
Gesteinskörnung	kg/m ³	1632	1715	1738	1765
Größtkorn	mm	32	16	16	32
Anteil rezyklierter Gesteinskörnung	M.-%	58	33	20	65

¹⁾ Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

²⁾ Bauverein AG Darmstadt, Hundertwasserhaus

³⁾ Diepmannstalbrücke A1, Remscheid

6.3 Sandreicher Beton

In einigen Regionen Deutschlands weisen die Vorkommen an Gesteinskörnungen ein Sand-Kies- Verhältnis von bis zu 80/20 M.-% auf. Zur Verwertung dieses Sandüberschusses wurde unter Verwendung von mehr als 80 kg/m³ Flugasche eine Technologie für sandreiche Betone entwickelt [6.3]. Trotz der sehr großen Oberflächen dieser sandreichen Gesteinskörnungen, ermöglicht die Flugasche in Kombination mit hochwirksamen Fließmitteln eine gute Verar-

beitbarkeit des Betons in fließfähiger Konsistenz. Durch die Zugabe und Verwendung von Flugasche liegen die Zementgehalte in üblicher Größenordnung. Damit trägt Flugasche in sandreichem Beton zur Schonung von Rohstoffen sowie zur Wirtschaftlichkeit bei.

Tabelle 6.3: Zusammensetzung und Kennwerte sandreicher Betone im Vergleich zu einem Beton mit üblichem Korngemisch

Betonart		üblich	sandreich 1	sandreich 2
Zement	kg/m ³	CEM I 32,5 R 280	CEM I 32,5 R 320	CEM I 42,5 R 270
Flugasche	kg/m ³	60	80	130
Wasser	kg/m ³	188	208	200
Zusatzmittel	kg/m ³	BV 0,6	FM 6,4	FM 6,4
$(w/z)_{eq}$		0,62	0,59	0,67
Gesteinskörnung				
Sand 0/2a	M.-%	35	80	80
Kies 2/8	M.-%	29	-	-
Kies 8/32	M.-%	35	20	20
Frisch und Festbetonkennwerte				
Ausbreitmaß d 45 min	mm	430	590	590
Luftgehalt	Vol.-%	2	3,5	2
Druckfestigkeit	N/mm ²	37	35	39

6.4 Spritzbeton

Im Tunnelbau, Tiefbau sowie bei der Sicherung von tektonisch oder erosionsbedingten Gefahrenzonen im Gebirge ist Spritzbeton unverzichtbar. Hohe Anforderungen werden an die Frühfestigkeit und die Verarbeitbarkeit gestellt. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Trockenspritzverfahren und Nassspritzverfahren. Beim Trockenspritzverfahren erfolgt die Wasserzugabe erst an der Spritzdüse, beim Nassspritzverfahren erfolgt eine Druckförderung der feuchten Mischung. Die Wahl des Spritzverfahrens ist abhängig von den vor Ort gegebenen Produktions- und Transportmöglichkeiten sowie weiteren Randbedingungen. Flugasche ist besonders im Nassspritzbeton von Vorteil. Durch Flugasche wird die Pumpbarkeit verbessert und der Rückprallanteil verringert. Außerdem lassen sich wegen der rheologischen Verbesserung des Spritzbetons homogenere Oberflächen erreichen [6.4-1]. Spritzbeton mit Flugasche zeichnet sich durch eine gute Haftung am Untergrund aus.

Tabelle 6.4: Betonzusammensetzung für Spritzbeton

Beton		Tunnel Göggelsbuch ICE Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt [6.4-2]	Schulwaldtunnel ICE Neubaustrecke Frankfurt-Köln [6.4-1]
Zement	kg/m ³	CEM I 52,5R 310 ... 360	CEM I 42,5R 400
Flugasche	kg/m ³	60 ... 110	50
Wasser	kg/m ³	203 ... 205	180
Zusatzmittel	M.-% v. Z	BV / VZ 1,2 / 1,2	FM / BE 1,0 / 5,7
Gesteinskörnung/Größtkorn	mm	8	8

6.5 Selbstverdichtender Beton (SVB)

Selbstverdichtende Betone weisen ein Setzfließmaß von ≥ 65 cm zum Zeitpunkt des Einbaus auf. Sie sind Hochleistungsbetone, die sich beim Einbringen in die Schalung aufgrund ihrer hohen Leim- und Mörtelgehalte ohne Entmischung und Sedimentieren gleichmäßig verteilen und sich ohne den Einsatz von Verdichtungsgeräten unter Eigengewicht selbst verdichten und entlüften.

Gleichbleibende Ausgangsstoffe sind Voraussetzung für die zielsichere Herstellung selbstverdichtender Betone. Bei der Herstellung ist neben dem Inhalt der DIN 1045-2/DIN EN 206-9 die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB Richtlinie) [R 9] zu berücksichtigen.

Selbstverdichtende Betone weisen hohe Mörtelgehalte in Kombination mit hochwirksamen Fließmitteln auf, die auf Basis von Polycarboxylatethern hergestellt sind.

Tabelle 6.5: Zusammensetzung selbstverdichtender Betone

Bauteil		Bogen- tragwerk	Decken- konstruktion	Dach- konstruktion	Wände/ Decken	Faulbehälter
Zement	kg/m ³	CEM III/A 42,5 R NA 370	CEM I 32,5 R 300	CEM I 42,5 R 350	CEM II/A-LL 32,5 R 410	CEM II/A-LL 42,5 R 320
Flugasche	kg/m ³	200	210	150	110	246
Wasser	kg/m ³	135	192	174	225	174
Zusatzmittel						
Fließmittel	kg/m ³	8,88	4,2	3,9	4,1	3,84
Stabilisierer	kg/m ³	9,25	0,5	1,0	-	0,96
Verzögerer	kg/m ³	-	0,9	-	-	-
(w/z) _{eq}		0,30	0,50	0,42	0,49	0,42
Gesteinskörnung					A16/B16	
Sand 0/2	kg/m ³	709	765	798		809
Kies 2/8	kg/m ³	442	300	508		142
Kies 8/16	kg/m ³	491	570	373		648

Der Gesamtmehlkorngehalt ist durch rheologische Vorversuche gestuft zunächst am Bindemittelteil und dann am Mörtel zu ermitteln und zu optimieren. In der Regel liegen die Gehalte an Zement und Flugasche in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart und des Größtkorns insgesamt über 500 kg/m³. Hierbei kann der Anteil an Flugasche bis 250 kg/m³ und mehr sinnvoll angesetzt werden. Der Wassergehalt dieser SVB entspricht dabei dem normaler Rüttelbetone.

6.6 Fahrbahndeckenbeton

Im Betonstraßenbau werden nach ZTV Beton-StB 07 [R 24] in der Regel Betone ohne den Zusatz von Flugasche verwendet, da diese in der Expositionsklasse XF4 bisher nicht angerechnet werden durften. Mit dem Inkrafttreten der DIN 1045-2:2008-08 ist die Anrechnung von Flugasche auch in dieser Expositionsklasse möglich. Diese Öffnung der Anwendung wurde bisher jedoch noch nicht in das Regelwerk des Betonstraßenbaus übernommen.

Bereits im Jahr 1990 wurde mit dem Demonstrationsbauvorhaben „Werkstraße“ nachgewiesen, dass sich Flugasche auch im Fahrbahndeckenbeton positiv auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirkt [6.6-1]. Erst in jüngerer Zeit wurde im Rahmen von Nachuntersuchungen der einwandfreie Zustand der Betonfahrbahn erneut nachgewiesen sowie die Gleichwertigkeit zu einem reinen Zementbeton bestätigt [6.6-2], [6.6-3], [6.6-4]. Abweichend von der bei Baubeginn geltenden ZTV-Beton wurde der Beton entsprechend den Angaben der nachfolgenden Tabelle zusammengesetzt und mit einem Referenzbeton verglichen.

Tabelle 6.6: Vergleichende Zusammensetzung von Fahrbahndeckenbetonen für das Demonstrationsbauvorhaben „Werkstraße“

Beton			Beton ohne Flugasche	Beton mit Flugasche
Zement		kg/m ³	PZ 35 F (CEM I 32,5R) 330	PZ 45 F (CEM I 42,5R) 270
Flugasche davon angerechnet mit k = 1		kg/m ³	0	90 68
Wasser		kg/m ³	145	141
Zusatzmittel		kg/m ³	LP 1,32	LP 1,20
w/z			0,44	0,52
(w/z) _{eq}			-	0,42
Gesteinskörnung				
Natursand	0/2	kg/m ³	534	505
Grauwackesplitt	5/11	kg/m ³	186	201
Basaltsplitt	8/22	kg/m ³	1263	1233
Mehlkorngehalt		kg/m ³	364	391

In neueren Forschungsprojekten zum Einsatz von Flugasche in Straßenbeton war die Oberflächendauerhaftigkeit flugaschehaltiger Straßenbetone mit einer kombinierten Prüfung aus Abrieb, Frost-Tausalz- und lösendem Angriff untersucht worden. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die Zugabe von Flugasche Straßenbetone von hoher Dauerhaftigkeit hergestellt werden können.

Der langsameren Festigkeitsentwicklung der Flugaschebetone steht ein dichteres Betongefüge gegenüber. Sowohl die Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand als auch die Prüfung der Oberflächendauerhaftigkeit mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus ergaben für die untersuchten Flugaschebetone im Vergleich zum Referenzbeton vergleichbare Dauerhaftigkeitseigenschaften. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass die Qualität der Nachbehandlung einen größeren Einfluss auf die Betoneigenschaften hatte als der Flugascheinsatz. Durch eine bessere Nachbehandlung konnten bei allen Betonen deutlich bessere Dauerhaftigkeitseigenschaften erzielt werden [6.6-5].

6.7 Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff

Die Reaktionsprodukte aus Wasser und Zement ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH-Phasen) sind bei stark lösendem Angriff durch Säuren Schwachstellen im Beton, da diese durch Säuren völlig aufgelöst werden können. Daher weist Beton grundsätzlich nur einen bedingten Widerstand gegen Säureangriff auf. Durch Absenkung des Zementklinkeranteils und Verwendung von Betonzusatzstoffen wie Flugasche sowie durch Verbesserung der Dichtigkeit des Gefüges kann der Säurewiderstand eines Betons jedoch deutlich verbessert werden.

Wie bisherige Untersuchungen zeigen, sind hinsichtlich der Zementauswahl grundsätzlich zwei Konzepte möglich.

1. Einsatz eines Zements mit reduziertem Klinkeranteil sowie zusätzlichen Hauptbestandteilen, die als säureunempfindlich anzusehen sind:
Erfolgreiche Eignungsversuche wurden mit speziell konfektionierten CEM II/B-S 52,5 und CEM III/A 52,5 R durchgeführt [6.7-1], [6.7-2].
2. Verwendung eines unterhalb des Mindestzementgehalts der DIN 1045-2 liegenden Anteils an CEM I gemeinsam mit ausgewählten Betonzusatzstoffen:
Erfolgreiche Eignungsversuche wurden mit Zementgehalten zwischen 200 kg/m^3 bis 250 kg/m^3 durchgeführt (Tab. 6.7). Der Beton des im Jahr 1999 hergestellten Naturzugkühlturms Niederaußern weist einen Gehalt an CEM I 42,5 von ca. 250 kg/m^3 , 75 kg/m^3 Flugasche und 25 kg/m^3 Silikastaub auf. Dieser Beton gilt bislang als Referenzbeton bei erhöhter Säurebeanspruchung [6.7-3], [6.7-4].

Die Betonzusammensetzung nach Konzept 1 aus Tabelle 6.7 hat den Vorteil, dass die Zusammensetzung des Betons der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 entspricht.

Die Betonzusammensetzung nach Konzept 2 aus Tabelle 6.7 hat den Vorteil, dass durch die Reduzierung des Zementanteils auch die Druck- und Zugfestigkeit des Betons im Vergleich zu Konzept 1 gemindert werden können. Damit kann auch der zur Beschränkung der Rissbreite erforderliche sehr hohe Bewehrungsgrad reduziert werden. Konzept 2 erfordert für die Herstellung des Betons wegen der Unterschreitung des Mindestzementgehalts allerdings eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall.

Tabelle 6.7: Zusammensetzungen von Betonen mit erhöhtem Säurewiderstand (Kühlturm-rezepturen) für zwei unterschiedliche Zementkonzepte sowie Referenzbeton [6.7-1], [6.7-2], [6.7-3], [6.7-4]

Beton		Konzept 1: Einhaltung des Mindestzementgehalts nach DIN 1045-2 durch Zement mit reduziertem Klinkeranteil	Konzept 2: Unterschreitung des Mindestzementgehalts nach DIN 1045-2 bei Einsatz eines CEM I	Referenzbeton: Betonzusammensetzung des Kühlturms Niederaußern (Unterschreitung des Mindestzementgehalts nach DIN 1045-2)
Quelle		[6.7-1]	[6.7-3]	[6.7-4]
Zement	kg/m ³	CEM II B/S 52,5 R 270	CEM I 42,5 R 220	CEM I 42,5 R-SR 248
Flugasche Feinheit Kategorie N	kg/m ³	80	48	74
Flugasche Feinheit Kategorie S	kg/m ³	20	47	-
Silikastaub	kg/m ³	-	-	Slurry mit 50 % Feststoffgehalt 56
Wasser	kg/m ³	132	109	125
Gesteins- körnung	kg/m ³	~ 1900	~ 1960	~ 1940

Abweichend vom Verfahren nach [6.7-3] wurden in jüngerer Zeit ebenfalls Untersuchungen an unterschiedlich zusammengesetzten Betonen durchgeführt (Bild 6.7). Es zeigte sich, dass bei Verzicht auf Silikastaub auch ein besonders hoher Säurewiderstand durch eine Kombination aus CEM III/A sowie Flugaschen der Feinkategorie N und S erzielt wird [6.7-5].

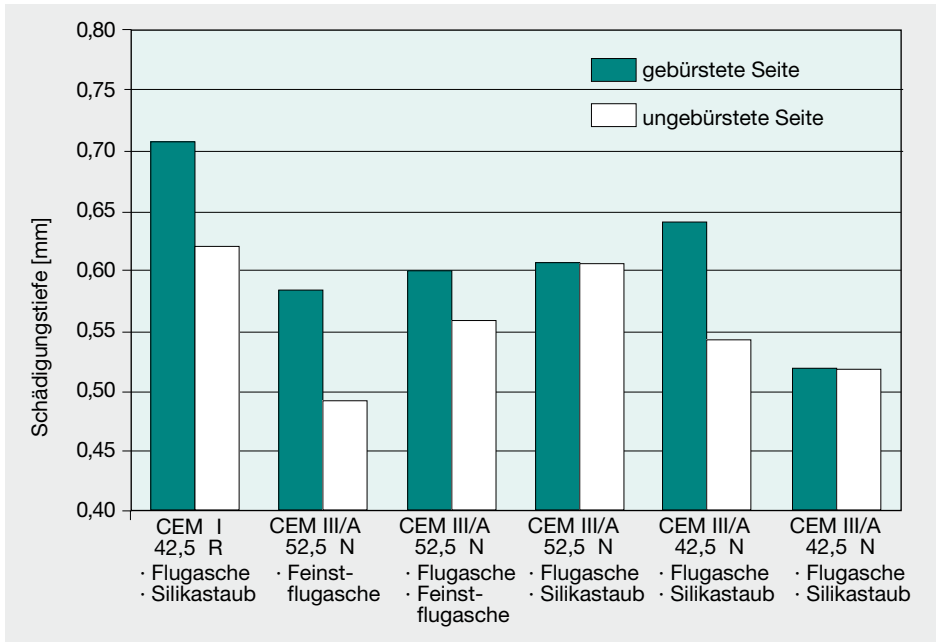


Bild 6.7: Schädigungstiefen von unterschiedlich zusammengesetzten Mörteln nach Säurebeanspruchung gemäß [6.7-2]

7 Quellennachweis

7.1 Regelwerke

- [R 1] DIN EN 450-1:2012-10: Flugasche für Beton – Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [R 2] DIN EN 450-2:2005-05: Flugasche für Beton – Konformitätsbewertung
- [R 3] DIN EN 206-1:2001-07: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [R 4] 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
- [R 5] DIN Fachbericht 100:2010-03: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [R 6] DIN 1045-3: 2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung
- [R 7] DIN 1045-1:2011-01: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [R 8] DIN EN 197-1:2011-11: Zement – Teil 1 Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [R 9] DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2012-09
- [R 10] DIN 1164-10:2004-08: Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften mit DIN 1164-10 Berichtigung 1, Januar 2005. Berichtigungen zu DIN 1164-10:2004-08
- [R 11] DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2013-10
- [R 12] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003-11 + B1:2006-03
- [R 13] DAfStb-Richtlinie Massige Bauteile für Beton (Massenbeton-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2010-04
- [R 14] DIN EN 1536:2010-12: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Bohrpfähle; Deutsche Fassung EN 1536. Beuth Verlag, Berlin
- [R 15] DIN SPEC 18140:2012-02: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 1536: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle. Beuth Verlag, Berlin
- [R 16] DIN EN 1538:2010-02: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Schlitzwände. Beuth Verlag, Berlin
- [R 17] DIN 4126:2013-09: Ortbetonschlitzwände, Konstruktion und Ausführung
- [R 18] MLTB: Musterliste der technischen Baubestimmungen der ARGE BAU, jeweils aktuelle Fassung

- [R 19] DAfStb-Richtlinie Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (FD-Richtlinie). Beuth-Verlag, Berlin, Ausgabe 2011-03
- [R 20] ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton, Abs. 3.2 Verwendung von Zusatzstoffen, Satz (7). Verkehrsblatt Verlag, 2014-12
- [R 21] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Wasserbauten aus Beton und Stahlbeton ZTV-W (Leistungsbereich 215), Bundesanstalt für Wasserbau, 2012
- [R 22] DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. Beuth Verlag, Berlin
- [R 23] DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2010-09
- [R 24] ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (FGSV 899). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV Verlag GmbH, Juni 2008

7.2 Literatur

- [1.1] Lutze, D.; vom Berg, W. (Hrsg.): Handbuch Flugasche im Beton. 2. überarbeitete Auflage, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2008
- [1.4-1] Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. beton 40 (1990) H. 12, S.519-523
- [1.4-2] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 448
- [1.5-1] Hüttl.R.: Der direkte Nachweis des Reaktionsmechanismus von Steinkohlenflugasche. Beton-Informationen 40 (2000) H. 5, S. 63-75
- [1.5-2] Schießl, P.; Härdtl, R.: Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugasche in Beton nach DIN 1045 bzw. EN 206. Vorträge zur VGB-Konferenz vom 4./5.Dez. 1991, Vortrag 7, VGB-Kraftwerkstechnik, Essen 1992
- [2.6-1] Brameshuber, W.; Pierkes, R.; Tauscher, F.; Friebel, W.-D.: Anrechnung von Flugasche bei Betonen für Innenschalen von Straßentunneln. beton 55 (2005) H. 7+8, S. 348-353
- [3.1-1] Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriechen und Schwinden von Beton. Grundlagen der neuen DIN 1045 und Ansätze für die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002) H. 1, S. 18-19
- [3.1.1-1] Kern, E.; Hegger, J.: 19000 m³ Beton für Fundamentplatte in einem Arbeitsgang eingebracht. Beton-Informationen 31 (1991) H. 5, S. 51-53
- [3.1.1-2] Kern, E.: Erfahrungen mit Flugasche als Betonzusatzstoff aus der Sicht der Bauausführung. VGB-Kraftwerkstechnik 72 (1992) H. 6, S.565-572
- [3.1.1-3] Lewandowski, R.: Einfluß unterschiedlicher Flugaschequalitäten und -zugabemengen auf die Betoneigenschaften. Betonwerk und Fertigteil-Technik 49 (1983) H. 1, S. 11-15, H. 2, S. 105-110, H. 3, S. 152-158
- [3.1.1-4] Schießl, P., Härdtl, R.: Betone für massige Bauteile. Beton 46 (1996) H. 11, S. 668-672
- [3.2-1] vom Berg, W.: Karbonatisierung von Beton mit Flugasche. Tagungsband zur VGB-Konferenz „Forschung in der Kraftwerkstechnik 1988“, VGB TB 704, VGB Kraftwerkstechnik GmbH, Essen 1988
- [3.2-2] Schubert, P.: Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Mörtel. VGB Technisch-Wissenschaftliche Berichte VGB TW 645, VGB Kraftwerkstechnik GmbH, Essen 1989

- [3.2-3] Wierig, H.-J.; Scholz, E.: Carbonatisierung von Beton mit Steinkohlenflugasche. VGB-Konferenz Flugasche in Beton – Fortschritte in der Betontechnologie, VGB-TB 702, Vortrag 6, VGB-Kraftwerkstechnik, Essen 1991
- [3.3] Wiens, U.: Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 551, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005
- [3.4-1] Wischers, G.; Sprung, S.: Verbesserung des Sulfatwiderstandes von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche – Sachstandsbericht Mai 1989. beton 40 (1990) H.1, S.17-21 und H. 2, S. 62-66
- [3.4-2] Müller-Rochholz, J.: Einfluß von Flugasche, Kalksteinmehl und Kreidemehl auf Festigkeit und Sulfatbeständigkeit von Mörteln (5-Jahreswerte). Prüfbericht Nr. 44-92 MRF 9-2, Fachhochschule Münster 1992
- [3.4-3] Schießl, P.; Hårdtl, R.: Einfluß von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben F 262 vom 5.10.1992 (AIF-Nr. 7690)
- [3.4-4] Stanton, T. E.: Expansion of concrete trough reaction between cement and aggregate. Proc. Am. Soc. Civil Eng. 66 (1940) S. 1781-1811
- [3.5.1] Backes, H.-P.; Schneider, E.: Verhalten flugaschehaltiger Mörtel bei Angriff kalklösender Kohlensäure. TIZ international 112 (1988) H. 1, S. 42-45
- [3.5.2-1] Lefebvre, Y.; Jlicoer, C.; Page, M.; Seabrook, P.T.: Degradation Kinetics of Portland Cement Pastes, Mortars and Concretes in Acidic Environments. Malhotra, V.M. (Ed.): Durability of Concrete. Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, August 1997, Vol. II, S. 1487-1510, American Concrete Institute, ACI SP-170, Michigan 1997
- [3.5.2-2] Efes, Y.; Lühr, H.-P.: Beurteilung des Kohlensäure-Angriffs auf Mörtel aus Zementen mit verschiedenem Klinker-Hüttensand-Verhältnis. Tonindustrie-Zeitung 104 (1980) H. 3, S. 153-167
- [3.5.2-3] Nägele, E.; Hillemeier, B.; Hilsdorf, H. K.: Der Angriff von Ammoniumsalzlösungen auf Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984) H. 11, S. 742-751
- [3.6-1] Alexander, K.M.; Wardlaw, J.; Ivanusec, I.: Fly ash: The Manner of its Contribution to Strength and the Magnitude of its Effect on Creep and Related Properties of High Quality Concrete. Civil Engineering Transactions 26 (1984) H. 4, S. 295-304
- [3.6-2] Müller, H. S.; Guse, U.; Schneider, E.: Leistungsfähigkeit von Beton mit Flugasche. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) H. 8, S. 693-704
- [3.7-1] Stenton, T. E.: Studies of Use of Pozzolans for Counter Acting Accessive Concrete Expansion Resulting from Reaction between Aggregates and the Alkalis in Cement, Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes, ASTM STB 99, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1950, S. 178-203
- [3.7-2] Stark, J.: Wirkung von Flugasche auf AKR. Literaturstudie, Bauhaus Universität Weimar 2002
- [3.7-3] Thomas, M. D. A.: Review of the Effect of Fly Ash and Slag on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. BRE Literature Review, BRE Watford 1996
- [3.7-4] Heinz, D.; Schmidt, K.; Urbonas, L.: Vermeidung von schädigender AKR durch Steinkohlenflugasche. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) H. 8, S. 511-520
- [3.7-5] Vermeidung einer schädigenden AKR durch den Einsatz von Steinkohlenflugasche. VGB-Forschungsprojekt 272 – Abschlussbericht. FdZ-Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, 20.08.2007
- [3.8-1] Wiens, U.; Schröder, P.; Müller, Ch.: Verwendung von Steinkohlenflugasche (SFA) in Hochleistungsbetonen. Aachen: Institut für Bauforschung. Forschungsvorhaben Nr. F 521
- [3.8-2] Zimbelmann, R. K.; Junggunst, J.: Hochleistungsbeton mit hohem Flugaschegehalt. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999) H. 2, S. 58-65

- [3.8-3] Theile, V.; Hildebrandt, H.; Brüggemann, H.-G.: Hochhausensemble mit projektbezogenen Sonderbetonen. beton 46 (1996) H. 9, S. 535-540
- [3.8-4] Hirschfeld, M.; Dams, S.: B 90 für die Shadow-Arkaden. beton 43 (1993) H. 11, S. 569-575
- [3.9-1] Wiens, U.; Schneider, E.; Lutze, D.: Zum Frost- und Frosttausalz-widerstand von flugaschehaltigen Betonen. 3. Fachtagung des IBPM und Wissensbau Essen: CIF- und CDF-Test, Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton, Essen 5.10.2000
- [3.9-2] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 448, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1995
- [3.9-3] Brameshuber, W.; Schießl, P.; Uebachs, S.; Brandes, C.; Eck, T.: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-widerstand von Beton, Abschlussbericht zum Verbundvorhaben IBAC/RWTH Aachen und cbm/TU München, Bericht Nr F 759/2 (VGB P 203), Aachen 2005
- [5.2] Weber, R.: Guter Beton – Ratschläge für die richtige Betonherstellung, 22. Auflage. Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 2007
- [6.3] Sievers, H.: Sandreiche Betonzusammensetzungen. beton 47 (1997) H. 1, S. 20-25
- [6.4-1] Brötz, K.; Löschnig, P.; Müller, F.: Spritzbeton am Schulwaldtunnel. Tunnel (2000) H. 6
- [6.4-2] Wagner, J.-P.; Wilmes, M.: Betontechnik und Ausführung im Los Nord der ICE Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt, insbesondere der Tunnel Offenbau. BVK/VGB Tagung „Flugasche im Beton – Neue Erkenntnisse“, VGB TB 708, VGB PowerTech Service, Essen 2005
- [6.6-1] Koch, H.-J.; Lutze, D.: Fahrbahndecken aus Beton – Versuchsstrecke mit Steinkohlenflugasche. beton 47 (1997) H. 6, S. 319-322
- [6.6-2] Schniering, A.; Lutze, D.: Fahrbahndecke aus Beton mit Steinkohlenflugasche als Bindemittelkomponente. Straße und Autobahn 49 (1998) H. 12, S. 679-684
- [6.6-3] Versuchsstrecke Kraftwerk Knepper – Messtechnische Zustandserfassung und Gegenüberstellung der Ergebnisse 1996/2006. Bericht, Schniering Ingenieurgesellschaft mbH, Essen, 22.12.2006 (unveröffentlicht)
- [6.6-4] Untersuchungen an Straßenbetonen. Prüfbericht Nr. M 900, Institut für Bauforschung an der RWTH Aachen (ibac), 27.08.2007 (unveröffentlicht)
- [6.6-5] Skarabis, J.; Schießl, P.: Oberflächendauerhaftigkeit von Straßenbeton. Ibausil, 13-26. September 2009, Weimar, Band 2, S. 79-84
- [6.7-1] Diepenseifen, M.; Hornung, D.; Schultz, W.: Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff. BWi BetonWerk International (6/2008)
- [6.7-2] Petersen, L.; Lohaus, L.: Entwicklung eines Hochleistungsbetons mit erhöhtem Säurewiderstand. BWi BetonWerk International (8/2007)
- [6.7-3] Niepel, A.; Hüttl, R.; Klöker, T.; Meyer, J.; Busch, D.: Bau und Betrieb von Naturzugkühltürmen aus Beton mit erhöhtem Säurewiderstand; VGB Kraftwerkstechnik 87 (2007) H. 12
- [6.7-4] Budnik, J.; Starkmann, U.: Der Naturzugkühlturm Niederaußem. beton 49 (1999) H. 10, S. 548 - 553
- [6.7-5] Buwert, C.; Hüttl, R.; Röben, R.: Vergleichende Prüfung der Säurebeständigkeit und der Frost-Tausalz-Beständigkeit an Microsit-Betonen – Zusammenfassender Bericht. MBF Gesellschaft für Materialprüfung und Baustofforschung GmbH, Berlin, im Auftrag der BauMineral GmbH. Prüfbericht Nr. 179/06, 05.12.2006 (unveröffentlicht)

Tabelle 2.1.2.1 Zugabe und Anrechenbarkeit von Flugaschen bei Zementarten nach EN 197-1:2011-11 gemäß DIN 1045-2:2008-08 [R 4]

Hauptzementarten	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung: (Massenanteile in Prozent) ¹⁾										Nebenbestandteile	
			Hauptbestandteile											
			Portlandzementklinker	Hütten sand	Silicastaub	Puzzolane		Flugasche		gebrannter Schiefer	Kalkstein			
K	S	D ²⁾	P	natürlich	natürlich getempert	Q	V	W	T	L	LL			
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0..5
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0..5
	Portlandflugaschezement	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0..5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0..5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0..5
		Portlandschieferzement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-
	CEM II/B-T		65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0..5
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0..5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0..5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0..5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0..5
	Portlandkompositzement ³⁾	CEM II/A-M	80-88	12-20	-	12-20	-	12-20	-	12-20	-	12-20	-	0..5
CEM II/B-M		65-79	21-35	-	-	-	<-- 21-35 -->	-	21-35	-	-	-	0..5	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5	
		CEM III/B	20-34	66-80 ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0..5	
CEM IV	Puzzolanzement ³⁾	CEM IV/A	65-89	-	-	-	<-- 11-35 -->	-	-	-	-	-	0..5	
		CEM IV/B	45-64	-	-	-	<-- 36-55 -->	-	-	-	-	-	0..5	
CEM V	Kompositzement ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	-	<-- 18-30 -->	-	-	-	-	-	0..5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	-	<-- 31-50 -->	-	-	-	-	-	0..5	

¹⁾ Die Werte der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.
²⁾ Der Anteil von Silicastaub ist auf 10 % begrenzt.
³⁾ In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile außer Portlandzementklinker durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden.
⁴⁾ Der Hütten sandgehalt darf bei Anrechnung von Flugasche 70 M.-% nicht überschreiten.

Farblgende:

- weiß auf dunkelgrün: Flugasche anrechenbar mit f/z ≤ 0,33
- schwarz auf grün: Flugasche anrechenbar mit f/z ≤ 0,25
- schwarz auf hellgrün: Flugasche anrechenbar mit f/z ≤ 0,15
- Zelle gestrichen: Flugasche Zugabe und Anrechnung nicht zugelassen

Fußnoten zu Tabelle 2.1.1

- ^a Nur für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall.
- ^b Gilt nicht für Leichtbeton.
- ^c Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden.
- ^d Bei Verwendung von Luftporenbeton, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger.
- ^e Bei langsam oder sehr langsam erhärtenden Betonen ($r < 0,30$) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die geforderte Druckfestigkeitsklasse nach 4.3.1 (DIN 1045-2) ist auch in diesem Fall an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen.
- ^f Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm $\geq 5,5$ Vol.-%, 16 mm $\geq 4,5$ Vol.-%, 32 mm $\geq 4,0$ Vol.-% und 63 mm $\geq 3,5$ Vol.-% betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderung um höchstens 0,5 Vol.-% unterschreiten.
- ^g Die Anrechnung auf den Mindestzementgehalt und den Wasserzementwert ist nur bei Verwendung von Flugasche zulässig. Bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche und Silikastaub ist eine Anrechnung auch für die Flugasche ausgeschlossen.
- ^h Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfesten Betonen.
- ^j Erdfeuchter Beton mit $w/z \leq 0,40$ darf ohne Luftporen hergestellt werden.
- ^k Zum Beispiel Vakuumieren und Flügelglätten des Betons.
- ^l Schutzmaßnahmen siehe DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2.
- ¹ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen bestehen (z.B. Expositionsklasse XA2)
- ² DIN EN 206-1/DIN 1045-2 trifft hier keine Festlegungen. Die Angaben des WIN orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Orientierung dar.

^A ZTV-ING: Anrechnung von Flugasche bei CEM I und CEM II/A ohne Einschränkung; Anrechnung von FA bei anderen CEM mit Zustimmung des Auftraggebers erlaubt.

^B ZTV-ING: Mit Zustimmung des Auftraggebers erlaubt. Bei Kappenbeton (XF4 + XD3; C25/30) keine Anrechnung von Flugasche zugelassen.

^C ZTV-ING: Für Gründungsbauteile (z.B. BP) CEM III/B und Flugasche ohne Einschränkung zugelassen, mit Zustimmung des Auftraggebers auch FA und andere Zementarten möglich.

^D ZTV-ING: gegebenenfalls SR-Zement verwenden.

^E ZTV-ING: Gesteinskörnung: NaCl-Verfahren ≤ 8 M.-%.

^M Bei Verwendung von CEM II/B-V, CEM III/A oder CEM III/B ohne oder mit Flugasche oder bei anderen Zementen der Tabellen F.3.1 oder F.3.2 nach DIN 1045-2 in Kombination mit Flugasche, wobei der Mindestflugaschegehalt 20 M.-% von (z+f) betragen muss.

Nachwort

Seit 1970 sind in Deutschland mehr als 50 Millionen Tonnen Flugasche aus Steinkohlekraftwerken in weit über 1 Milliarde Kubikmeter Beton zur Verbesserung der Betoneigenschaften verwendet worden. Die Wirkungsweise von Flugasche im Beton basiert auf einem Zusammenspiel von physikalischen, chemisch-mineralogischen und puzzolanischen Vorgängen, die sich u.a. nutzen lassen für:

- Reduktion des Wasseranspruchs beim Frischbeton
- Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit von Frischbeton
- Verbesserung der Pumpfähigkeit des Frischbetons
- geringere Wasserabsonderung/Sedimentation bei jungem Beton
- Reduzierung der Reißneigung
- Reduzierung von Ausblühungen
- bessere Nacherhärtung bei Festbeton
- höhere Endfestigkeit des Festbetons
- Verbesserung der Sichtbetonoberfläche, gleichmäßigere Farbgebung, saubere Fasen und Kanten
- dichteres Gefüge, damit ist verbunden:
 - ein größerer Widerstand des Betons gegen chemischen Angriff
 - eine Verbesserung des Korrosionsschutzes der Bewehrung
 - ein höherer Widerstand gegen das Einwirken von Chlorid
- die Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand in Kombination mit CEM I, CEM II und CEM III anstelle von Zement mit hohem Sulfatwiderstand (SR-Zement)

Flugasche ist ein wertvoller Sekundärrohstoff

Steinkohlenflugasche (SFA) ist ein Nebenprodukt der Energieerzeugung und ist nach DIN EN 450-1 „Flugasche im Beton“ zertifiziert bzw. hat eine bauaufsichtliche Zulassung und wird als Betonzusatzstoff Typ II gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 verwendet.

Durch den Einsatz von SFA werden natürliche Ressourcen geschont. Rohstoffe müssen nicht eigens abgebaut und mit hohem Energieaufwand und CO₂-Ausstoß aufbereitet werden. Dadurch verbessert sich die Ökobilanz von Beton erheblich. Die Recyclingfähigkeit bleibt erhalten.

Die gewissenhafte Abstimmung aller Komponenten des Betons führt zu einer optimalen Einstellung aller Eigenschaften. Die vorliegenden Betontechnischen Empfehlungen stellen dazu wichtige Daten aus den Vorschriften und Regelwerken sowie Erfahrungen aus Forschung und Praxis zusammen.

Tabelle 2.1.1: Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton nach DIN EN 12620

Hinweise „in grün“: Massenbeton Hinweise „auf grün“: ZTV-ING-Beton		Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko	Bewehrungskorrosion													
			durch Karbonatisierung verursachte Korrosion				durch Chloride verursachte Korrosion								-	
							Chloride nicht aus Meerwasser				Chloride aus Meerwasser					
1		2	3	4	5	6	7	8	9	9a	10	11	12	12a	13	
Expositionsklasse		1	X0 ^a	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3 ^b		XS1	XS2	XS3	XF1	
höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert	(w/z) _{eq}	2	-	0,75	0,75	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,50 ^M	0,55	0,50	0,45	0,50 ^M	0,60
Mindestdruckfestigkeitsklasse ^a		3	C 8/10	C16/20		C20/25	C25/30	C30/37 ^a	C35/45 ^b	C35/45 ^d		C30/37 ^a	C35/45 ^b	C35/45 ^d	C25/30	
<u>abweichend</u> bei Massenbeton und ZTV-ING		3a	-	-	-	-	-	C30/37 ^a	-	C30/37 ^M	-	C30/37 ^a	-	C30/37 ^M	-	
Mindestzementgehalt ^c in kg/m ³	min z	4	-	240	240	260	280	300	320	320	-	300	320	320	-	280
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		4a	-	-	-	-	-	-	300	300	300	-	300	300	300	-
Bei Verwendung von Flugasche, Anrechnungskriterien er																
Mindestzementgehalt ^c bei Anrechnung von Flugasche in kg/m ³	min z _f	5	-	240	240	240	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		5a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
zulässiger anrechenbarer Flugaschegehalt: f/z=0,33 bei min z _f in kg/m ³	max f _b bei min z _f	6	-	80	80	80	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		6a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
zulässiger anrechenbarer Flugaschegehalt: f/z=0,25 bei min z _f in kg/m ³	max f _b bei min z _f	6b	-	60	60	60	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
zulässiger anrechenbarer Flugaschegehalt: f/z=0,15 bei min z _f in kg/m ³	max f _b bei min z _f	6d	-	36	36	36	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		6e	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>abweichend</u> bei ZTV-ING Beton	max f _b	6f	anrechenbare Flugasche													
Mindestflugaschegehalt in kg/m ³	min f _b	7	-	-	-	20	10	30	50	50	-	30	50	50	-	10
<u>abweichend</u> bei Massenbeton		7a	-	-	-	-	-	-	30	30	30	-	30	30	30	-
Maximale Flugaschemenge bei ZTV-ING-Beton in kg/m ³	max f	8	maximale Zugabemenge Flugasche													
Anrechenbarkeitswert für Flugasche, k _f -Wert	k _f	9	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Mindestluftgehalt in Vol.-%		10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andere Anforderungen		11														
		12														
Anforderungen an den Zement		13	D													

Zuordnung

EN 206-1/DIN 1045-2, DaFSt-Richtlinie „Massenbeton“ und nach ZTV-ING

Betonkorrosion												weitere Anwendungsfälle					
Frostangriff					Aggressive chemische Umgebung	Verschleißbeanspruchung ^h						Unterwasserbeton	Bohrpfahlbeton		Schlitzwandbeton	FD-Beton	
LP-Beton		LP-Beton		LP-Beton									0/32	0/16			
mit Taumittel	mit Taumittel	ohne Taumittel	mit Taumittel														
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
XF2 ^a		XF3		XF4 ^b	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2		XM3	UW	BP32 ^c	BP16 ^c	SW	FD	
0,55 ^a	0,50 ^a	0,55	0,50	0,50 ^a	0,60	0,50	0,45	0,55	0,55	0,45	0,45	0,60 ¹	0,60 ¹	0,60 ¹	0,60 ¹	0,50	
C25/30	C35/45 ^b	C25/30	C35/45 ^b	C30/37	C25/30	C35/45 ^b	C35/45 ^b	C30/37 ^d	C30/37 ^d	C35/45 ^d	C35/45 ^d	C 25/30 ^e	C 25/30	C 25/30	C 25/30 ^e	C30/37	
-	C30/37	-	C30/37	C25/30 ^e	-	C30/37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
300	320	300	320	320	280	320	320	300 ^f	300 ^f	320 ^f	320 ^f	350	350	400	350	270	
-	300	-	300	300	-	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

entsprechend DIN EN 206-1/DIN 1045-2 Abschnitt 5.2.5.2.2

270 ^a	270 ^a	270	270	270 ^a	270	270	270	270	270	270	270	270 ²	270	300	270 ²	270
-	-	-	-	-	240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	100	90	90
-	-	-	-	-	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	75	68	68
-	-	-	-	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	41	41	-	41	41	41	41	41	41	41	41	-	-	-	41
-	-	-	-	-	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

chemenge bei ZTV-ING stets nicht höher als 80 kg/m³ Beton (f_b ≤ 80 kg/m³)

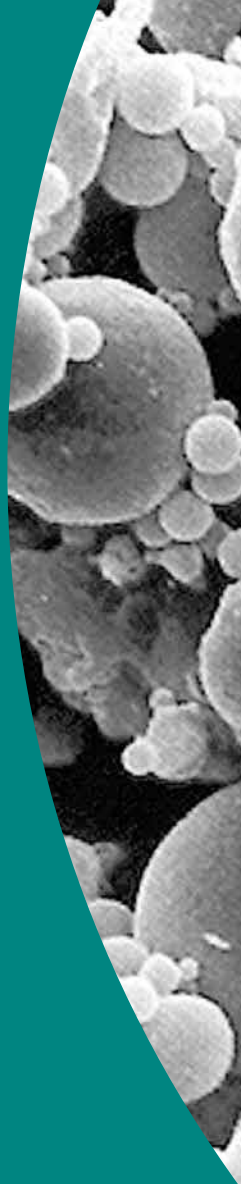
30	50	30	50	50	10	50	50	30	30	50	50	80	80	100	80	-
-	30	-	30	30	40	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

bei ZTV-ING-Beton darf 60 M.-% des jeweiligen Zementgehalts nicht überschreiten (f ≤ 0,6z)

0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4
f	-	f	-	f ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Gesteinskörnungen für die Expositionsklassen XF1 bis XF4					I			Oberflächenbehandlung des Betons ^h		Hartstoffe nach DIN 1100					
MS ₂₅ ^E		F ₂		MS ₁₈ ^E											

der Zemente gemäß Tabelle F.3.1, F.3.2 und F.3.3 der DIN 1045-2



WIRTSCHAFTSVERBAND MINERALISCHE NEBENPRODUKTE E.V.

Anschrift Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Telefon 0211 4578341

E-Mail service@win-ev.org

Webseite www.win-ev.org