



Betontechnische Empfehlungen

Optimieren von Beton nach DIN EN 206-1:2001-07 und
DIN 1045-2:2001-07
mit Flugasche als Betonzusatzstoff Typ II

Neuausgabe 2002

Herausgegeben vom
Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V.

BVK-Betontechnische Empfehlungen

Optimieren von Beton nach DIN EN 206-1:2001-07 und
DIN 1045-2:2001-07
mit Flugasche als Betonzusatzstoff Typ II

Neuausgabe 2002

Herausgegeben vom
Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V., BVK

Erarbeitet durch BVK-Arbeitskreis Beton

Redaktionsgruppe:

Dr.-Ing. Wolfgang vom Berg, Essen

Dipl.-Ing. Dietmar Lutze, Herten

Dipl.-Ing. Eberhard Schneider, Baden-Baden

Dr. rer. nat Hans Thamm, Düsseldorf

Impressum

Copyright by Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e. V. Düsseldorf, 2002

3. Auflage 2002

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf

Vorwort

Zur Zeit erleben wir deutliche Veränderungen in der Regelgebung zum Baugeschehen. Zum einen wird durch europäische Harmonisierungsbestrebungen eine völlig neue Normenstruktur entwickelt, zum anderen sind die Inhalte der uns gewohnten Normen durch Berücksichtigung der Interessen vieler Nationen erheblich verändert und manchmal verwirrend. Die DIN 1045 aus dem Jahr 1988 wird nach einer Übergangszeit von 3 Jahren, ab 2005, keine Gültigkeit mehr haben. Durch Aufnahme in die Bauregelliste 2002/1 wird DIN EN 206/1 DIN 1045-2 (zusammengefasst in DIN-Fachbericht 100) bauaufsichtlich und parallelgeltend eingeführt. Der Arbeitskreis Beton des BVK hat sich daher die Aufgabe gestellt, diesen Übergang durch die hiermit vorgelegten „BVK-Betontechnische Empfehlungen 2002“ beratend zu begleiten.

Es werden in den nächsten 3 Jahren zwei „BVK-Betontechnische Empfehlungen“ parallel genutzt werden können:

- die Ihnen bekannte, auf DIN 1045:1988-07 basierende 2. Auflage aus dem Jahre 1996 für alle noch abzuwickelnden Betonaufgaben auf alter Normenbasis sowie
- die hier vorliegende Fassung der „BVK-Betontechnische Empfehlungen 2002“, die die an das europäische Regelwerk angepassten neuen deutschen Normen, insbesondere DIN 1045-2:2001-07 als nationales Anwendungsdokument zur DIN EN 206-1:2001-07, berücksichtigt.

Düsseldorf, im April 2002

Arbeitskreis „Beton“ des BVK

Hinweis zu den verwendeten Kurzzeichen:

Die Berechnung und Darlegung wesentlicher Parameter und Größen ist bei der Berücksichtigung der Flugasche (k-Wert; f/z-Wert; w/(z+k·f)-Wert) im allgemeinen Sprachgebrauch nicht eindeutig. In diesen betontechnischen Empfehlungen wird daher durch Einführung von erläuternden Kurzzeichen versucht eine Eindeutigkeit der Begriffe herzustellen.

Besondere Bedeutung erlangen die Kurzzeichen bei der klaren Darstellung in den Tabellen ab Seite 17 und insbesondere in den Ablaufdiagrammen zum Betonentwurf im Abschnitt 5.4 auf den Seiten 57 und 58. Näheres siehe auch Tabelle 5.4.3 „Erläuterungen der Kurzzeichen“ auf Seite 56.

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	9
2	Grundlagen der Anwendung von Flugasche	11
2.1	Beton allgemein	11
2.2	Beton mit hohem Sulfatwiderstand	12
2.3	Schädigende Alkalreaktion	12
2.4	Unterwasserbeton	12
2.5	Bohrpfahlbeton	13
2.6	Schlitzwandbeton	13
2.7	Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen	13
2.8	Gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub	14
2.9	Mehlkorngehalt	14
3	Anforderungen nach Expositionsklassen und Anwendungsfällen	16
3.1	Expositionsklasse X0	17
3.2	Expositionsklassen XC, Karbonatisierung	18
3.3	Expositionsklassen XD, Chloridangriff	22
3.4	Expositionsklassen XS, Chloridangriff durch Meerwasser	25
3.5	Expositionsklassen XF, Frostangriff	28
3.6	Expositionsklassen XA, chemischer Angriff	32
3.7	Expositionsklassen XM, Verschleißbeanspruchung	35
3.8	Anwendungsfall UW, Unterwasserbeton	39
3.9	Anwendungsfall BP, Bohrpfehlbeton	40
3.10	Anwendungsfall SW, Schlitzwandbeton	42
3.11	Anwendungsfall FD, Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ..	43
4	Leistungsfähigkeit von Flugasche	44
4.1	Beton mit geringer Reißneigung	44
4.1.1	Hydratationswärme	44
4.1.2	Frühschwinden	45
4.2	Karbonatisierung	45
4.3	Chloridangriff	46
4.4	Sulfatangriff	47
4.5	Angriff kalklösender Kohlensäure	48
4.6	Alkalreaktion	48
5	Entwurfshilfen	49
5.1	Leistungsbeschreibung für Beton	49
5.2	Betonzusammensetzung und Erstprüfung (DIN 1045-2, Abschnitt 9.5)	50

5.3	Betonzusammensetzung	50
5.4	Betonoptimierung	52
6	Anwendungsmöglichkeiten	59
6.1	Massenbeton	59
6.2	Hochfester Beton	59
6.3	Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (FD Beton)	61
6.4	Recyclingbeton – Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung	62
6.5	Sandreicher Beton	63
6.6	Spritzbeton	64
6.7	Selbstverdichtender Beton (SVB)	64
6.8	Fahrbahndeckenbeton	65
6.9	Beton mit hohem Frost- und Frost-Tausalzwiderstand	66
6.10	Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff	68
7	Hinweis auf BVK-Betontechnische Merkblätter	68
8	Quellennachweis	69
8.1	Regelwerke	69
8.2	Literatur	70
	Übersichtstabelle „Grenzwerte für die Zusammensetzung von Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2“	Hintere Umschlagseite

1 Flugasche als Betonzusatzstoff

1.1 Definition

Flugaschen im Sinne dieser betontechnischen Empfehlungen sind alle Steinkohlenflugaschen, die nach DIN EN 450 zertifiziert sind.

Weiterhin schließen die Betontechnischen Empfehlungen jene Flugaschen mit ein, deren Anwendung bei gleichem Leistungsumfang durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt ist.

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

1.2 Regelungen

- Für Beton, Stahlbeton und Spannbeton nach EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2001-07,
- für Bohrpfahlbeton nach DIN 4014 oder DIN V 4026-500,
- für Ortbetonschlitzwände nach DIN 4126
- sowie für Beton nach ZTV-Ing

darf Flugasche als Betonzusatzstoff verwendet werden, wenn:

- sie der DIN EN 450 „Flugasche für Beton“ entspricht oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, erteilt wurde und
- eine laufende werkseigene Produktionskontrolle durch den Hersteller sowie eine Fremdüberwachung durch eine anerkannte Stelle durchgeführt werden.

Die Übereinstimmung des Betonzusatzstoffes mit den Bestimmungen der DIN EN 450 oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung muss für jedes Herstellerwerk nach einer durchzuführenden Erstprüfung durch ein Übereinstimmungszertifikat, erteilt von einer hierfür zugelassenen Zertifizierungsstelle unter Einschaltung einer anerkannten Überwachungsstelle, dokumentiert werden.

Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung kann beim Lieferanten des Betonzusatzstoffes jederzeit angefordert werden. In ihr sind die allgemeinen Bestimmungen, Anwendungsregeln, Produktbestimmungen, Qualitätssicherung und Ausführungsbestimmungen geregelt.

Die Grundlage für die Anwendung von Flugasche als Betonzusatzstoff nach DIN EN 450 ist durch Aufnahme der Norm in die Bauregelliste A Teil 1 geschaffen.

Die vorliegende Schrift berücksichtigt den aktuellen Stand der Vorschriften im Frühjahr 2002 (s. Abschnitt 8.1).

1.3 Stoffbeschreibung

Flugasche ist ein feinkörniger mineralischer Staub, der hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln besteht, bei der Verbrennung feingemahlener Kohle anfällt, puzzolanische Eigenschaften hat und im Wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 besteht. Der Gehalt an wirksamem SiO_2 , wie er gemäß EN 197-1 festgelegt und bestimmt wird, beträgt mindestens 25 M.-%. Flugasche wird durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung staub-

artiger Partikel aus Rauchgasen von Feuerungsanlagen gewonnen. Die chemische Zusammensetzung der Flugaschen ist vergleichbar mit der von natürlichen Puzzolanen. Die Partikelgröße liegt im Wesentlichen unter 0,1 mm (Bild 1.3).

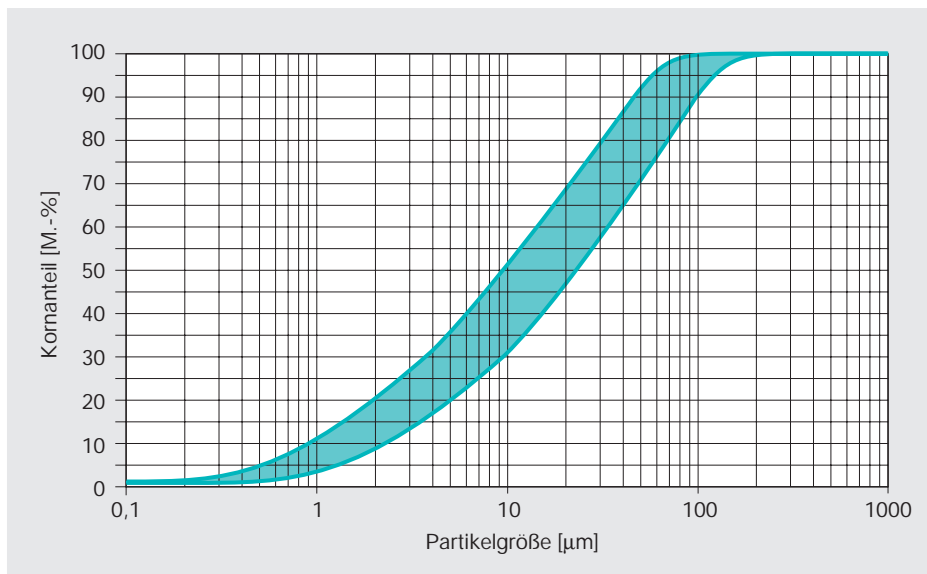


Bild 1.3 Korngrößenverteilung von Flugasche

1.4 Wirkungsweise

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

- **Physikalisch** wirkt die Flugasche durch die Feinkörnigkeit (Füller-Effekt) und die überwiegend kugelige Form der Partikel sowie durch ihre günstige Korngrößenverteilung.
- **Chemisch-mineralogisch** wirkt Flugasche als Keimsubstrat. Die Oberfläche ist so beschaffen, 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 Bindemittelleims die glasigen Partikel auflöst, Silizium- und Aluminiumoxide aus dem Glas herauslöst und dadurch die gleichen Hydratationsprodukte bildet (im Wesentlichen Calciumsilikathydrat- (CSH) und Calciumaluminathydrat-Phasen (CAH)), wie sie bei der hydraulischen Erhärtung von Zement entstehen.

Das Zusammenspiel der physikalischen, chemisch-mineralogischen und puzzolanischen Wirkungsweisen lässt sich nutzen für:

- eine Reduzierung des Wasseranspruchs des Frischbetons
- eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit und der Verdichtungswilligkeit des Frischbetons
- eine Verbesserung der Pumpfähigkeit des Frischbetons
- eine geringere Wasserabsonderung/Sedimentation des jungen Betons
- eine Verringerung der Hydratationswärme des jungen Betons, dadurch eine Reduzierung der Reißneigung
- eine Reduzierung von Ausblühungen
- eine bessere Nacherhärtung des Festbetons
- eine höhere Endfestigkeit des Festbetons
- eine Verbesserung der Sichtbetonflächen
- ein dichteres Gefüge, hierdurch ein größerer Widerstand des Betons gegen chemischen Angriff und eine Verbesserung des Korrosionsschutzes der Bewehrung, z. B. durch einen höheren Chlorideindringwiderstand
- die Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand in Kombination mit CEM I, II und III anstelle von Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement)

Die Bilder 1.4.1 bis 1.4.3 zeigen einige wichtige technologische Zusammenhänge und grundsätzliche Wirkungen der Flugasche durch Zugabe in den Beton.

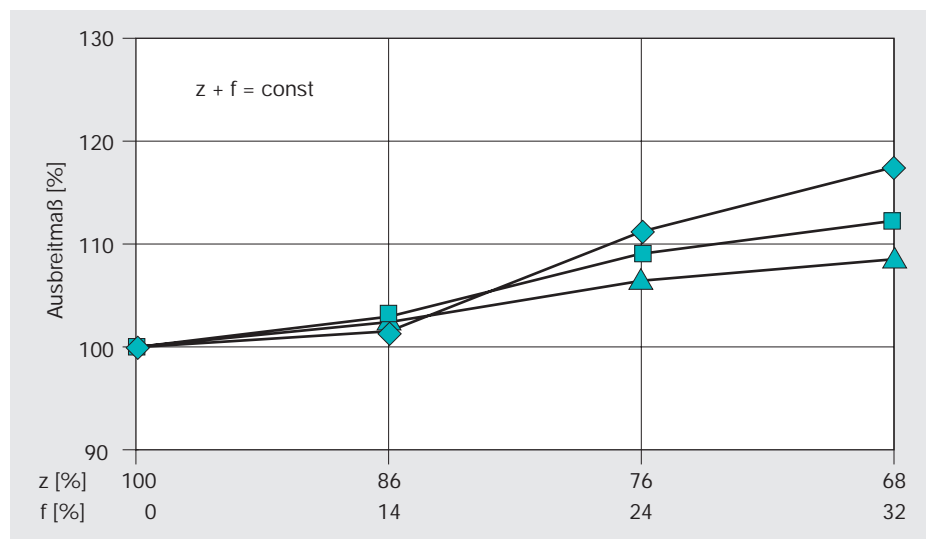


Bild 1.4.1 Vergrößerung des Ausbreitmaßes von Beton durch Zugabe verschiedener Flugaschen [1]

1.5 Allgemeine Hinweise

Die Anwendung und Anrechenbarkeit von Flugasche wird in DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 geregelt. Damit werden die in Jahrzehnten nachgewiesenen positiven Eigenschaften von

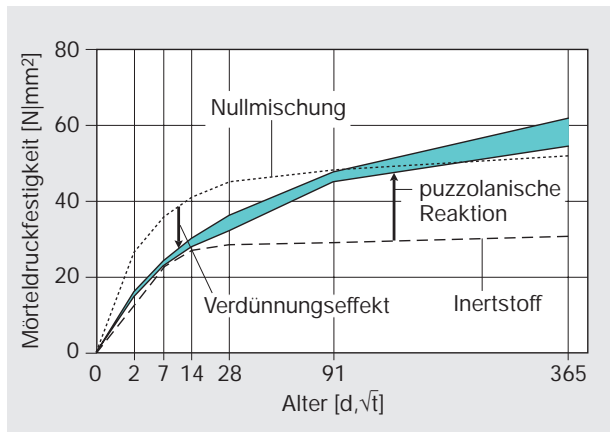


Bild 1.4.2: Beispiel für die Festigkeitsentwicklung von Beton mit und ohne Zugabe von Flugasche [2]

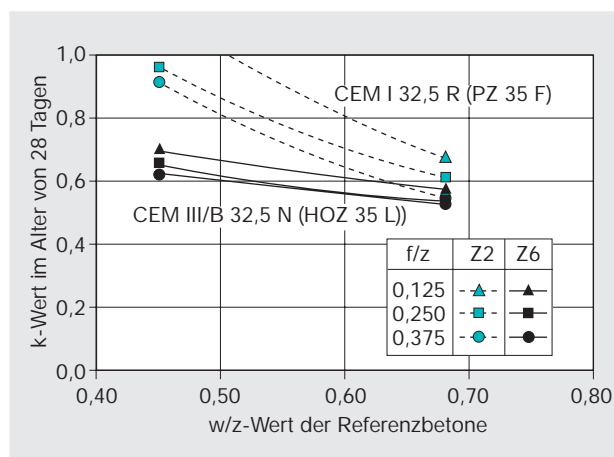


Bild 1.4.3: Zeitliche Entwicklung des Anrechenbarkeitswerts k_t , abhängig von der Zementart und vom Betrachtungsalter [2]

Flugasche als mitwirkendes Bindemittel im Beton endgültig in den Normen berücksichtigt.

Bei technologisch sachgerechter Anwendung dieser feinen, puzzolanisch wirkenden Bindemittelkomponente ist eine optimale Betonzusammensetzung erzielbar. Wegen ihrer Feinheit und dem damit verbundenen Effekt der Füllerwirkung wirkt Flugasche als Reaktionskeim für die Bildung zusätzlicher festigkeitsbildender Hydratationsprodukte in der Anfangserhärtung des Betons [1], [3], [4]. 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 können nach DIN 1045-2, auch aus wirtschaftlichen Gründen, 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 bei der Erstprüfung wie bei Betonen ohne Flugasche. Dabei wird das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten nach 2 und nach 28 Tagen als Bewertungskriterium herangezogen.

Grundsätzlich ist die Verwendung von Betonzusatzmitteln in Betonen mit Flugasche ohne jede Einschränkung möglich, lediglich beim Einsatz von Luftporenbildnern sollte die Dosierung an Hand von Vorversuchen optimiert werden.

Für Betone mit Flugasche als Betonzusatzstoff gelten selbstverständlich die gleichen Bemessungsgrundlagen wie für flugaschefreie Betone.

Aktuelles Detailwissen in allen Fragen der Anwendung und der Leistungsfähigkeit von Flugaschen im Beton kann aufgrund langjähriger Erfahrung bei den Vertriebsunternehmen und beim Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte abgerufen werden.

2 Grundlagen der Anwendung von Flugasche

Die DIN EN 206-1 unterscheidet zwischen nahezu inerten Zusatzstoffen (Typ I) und puzzolansischen oder latenthyaualischen Zusatzstoffen (Typ II).

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

2.1 Beton allgemein

Der Nachweis der Eignung ist die Grundlage dafür, dass gemäß DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.1, der Zementgehalt reduziert und die Flugasche auf den Wasserzementwert mit dem Anrechenbarkeitswert k_f angerechnet werden darf.

Der Mindestzementgehalt kann für alle Expositionsklassen – außer XF2 und XF4 – auf die in Tabelle 2, Zeile 5 (siehe hintere Umschlagseite), angegebenen Werte 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)
- Hochofenzement (CEM III/A)
- Hochofenzement (CEM III/B mit bis zu 70 M.-% Hütten sand, wenn die Zusammensetzung entsprechend DIN EN 197-1 nachgewiesen ist)

Hierbei darf die Summe von Zement- und Flugaschegehalt die Werte der in Zeile 4 angegebenen Mindestzementgehalte (min z) nicht unterschreiten. Diese Regelungen gelten auch für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge mit einer Trockenrohichte zwischen 800 kg/m^3 und 2000 kg/m^3 .

Für alle Expositionsklassen (mit Ausnahme XF2 und XF4) darf anstelle des höchstzulässigen Wasserzementwerts (w/z) der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq} = w/(z+k_f \cdot f_b)$ angenommen werden.

Der maximale Anteil Flugasche, der auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet werden darf, beträgt

$$\square \max f_b = 0,33 z$$

Falls eine größere Menge Flugasche verwendet wird, gilt die Mehrmenge zwar als Mehlkornanteil, findet aber bei der Berechnung des äquivalenten Wasserzementwerts $(w/z)_{eq}$ keine Anwendung.

Der k_f -Wert (Anrechenbarkeitswert) beträgt für alle Expositionsklassen 0,4 (Ausnahme XF2 und XF4) und bei besonderen Anwendungsfällen 0,7. Hierzu siehe Tabelle 2, Zeile 7 (siehe hintere Umschlagseite).

2.2 Beton mit hohem Sulfatwiderstand

siehe auch Abschnitt 4.4 „Sulfatangriff“, Seite 47

Zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand darf anstelle von HS-Zement nach DIN 1164 eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Sulfatgehalt des angreifenden Wassers: $SO_4^{2-} \leq 1.500 \text{ mg/l}$
- Zementart CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL oder CEM III/A
- Der Flugascheanteil, bezogen auf den Gehalt an Zement und Flugasche ($z+f$), muss bei den Zementarten CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM II/A-LL mindestens 20 M.-%, bei den Zementarten CEM II/A-T, CEM II/B-T und CEM III/A mindestens 10 M.-% betragen.

2.3 Schädigende Alkalireaktion

Flugasche, deren Gesamtalkaligehalt, bestimmt nach DIN EN 196-21 und ausgedrückt als Na_2O -Äquivalent, 4,0 M.-% nicht überschreitet, darf auch mit Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II und E III und für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA nach DAfStb-Richtlinie „Alkalireaktion im Beton“ verwendet werden.

2.4 Unterwasserbeton

siehe auch Anwendungsfall UW, Seite 39

Bei der Herstellung von Beton für tragende Bauteile unter Wasser darf Flugasche eingesetzt und wie folgt angerechnet werden:

- Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf bei Beton mit Größtkorn 32 mm 350 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{eq} = w/(z+0,7 \cdot f_b)$ darf 0,60 nicht überschreiten. Er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern, wie zum Beispiel die Expositionsklasse XA2.
- Die maximale Menge der auf $(w/z)_{eq}$ anrechenbaren Flugasche beträgt $f_b = 0,33 z$.

2.5 Bohrpfahlbeton (siehe auch Anwendungsfall BP1/BP2, Seite 40 und 41)

Für Bohrpfahlbeton nach DIN 4014 sind bis zur beabsichtigten Anpassung an die neuen Betonnormen gemäß Anlage Nr. 2.1/2 der Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen folgende Regelungen vorgesehen:

- Abschnitt 5.3.4 von DIN 1045-2 ist sinngemäß anzuwenden.
- 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 äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z+0,7 f_b)$ darf 0,60 nicht überschreiten. Er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern, wie zum Beispiel die Expositionsklasse XA2.
- Die maximale auf $(w/z)_{\text{eq}}$ anrechenbare Flugaschemenge beträgt $f_b = 0,33$ z.

2.6 Schlitzwandbeton (siehe auch Anwendungsfall SW, Seite 42)

Für Schlitzwandbeton nach DIN 4126 sind bis zur beabsichtigten Anpassung an die neuen Betonnormen gemäß Anlage Nr. 2.1/6 der Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen folgende Regelungen vorgesehen:

- Abschnitt 5.3.4 von DIN 1045-2 ist sinngemäß anzuwenden.
- Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z+f$) darf bei Beton mit Größtkorn von 32 mm 350 kg/m^3 nicht unterschreiten.
- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z+0,7 f_b)$ darf 0,60 nicht überschreiten. Er muss kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern, wie zum Beispiel die Expositionsklasse XA2
- Die maximale auf $(w/z)_{\text{eq}}$ anrechenbare Flugaschemenge beträgt $f_b = 0,33$ z.

2.7 Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (siehe auch Anwendungsfall FD, Seite 43)

Grundlage für die Herstellung von Beton ohne Oberflächenabdichtung beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ist die DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“. Diese definiert die Zusammensetzung flüssigkeitsdichter Betone (FD-Betone), für die ohne besonderen Nachweis ein ausreichender Widerstand gegen das Durchdringen wassergefährdender Stoffe angenommen werden kann.

Bei Herstellung dieser FD-Betone darf Flugasche unter folgenden Bedingungen eingesetzt und angerechnet werden:

- Der äquivalente Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z+0,4 f_b)$ von 0,50 darf nicht überschritten werden.
- Die Höchstmenge der auf den äquivalenten Wasserzementwert anrechenbaren Flugasche beträgt für diesen Anwendungsfall bis zur Überarbeitung der Richtlinie noch $f_b = 0,25$ z.

Der maximale Gehalt an Bindemittelleim ist auf 290 l/m^3 festgelegt, damit Schwinden und Hydratationswärmeentwicklung niedrig gehalten werden. Abweichend von diesen Vorgaben können auch andere geeignete flüssigkeitsdichte Betone mit Eignungsnachweis (FDE-Betone) verwendet werden.

2.8 Gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub

Der Mindestzementgehalt darf bei gleichzeitiger Anrechnung von Flugasche und Silikastaub für alle Expositionsklassen außer XF2 und XF4 auf die in Tabelle 2, Zeile 5 angegebenen Werte reduziert werden. Dabei darf der Gehalt an Zement, Flugasche und Silikastaub ($z+f+s$) die in der Zeile 4 angegebenen Mindestzementgehalte nicht unterschreiten.

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

$$\text{Flugasche/Zement} = f/z \leq 0,33$$

$$\text{Silikastaub/Zement} = s/z \leq 0,11$$

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

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

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

in Massenanteilen genügen.

Für die Zemente CEM II-S, CEM II/A-D, CEM II-T, CEM II/A-LL und für CEM III/A gilt:

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

in Massenanteilen.

Mit allen anderen Zementen ist eine gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silikastaub nicht zulässig.

Wegen der Sicherstellung der Alkalitätsreserve der Porenlösung ist bei gemeinsamer Verwendung eines Portlandsilikastaubzements CEM II/A-D mit Flugasche der Silikastaub des Zements mit $s = 10$ M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, zu berücksichtigen.

2.9 Mehlkorngelalt

In DIN 1045-2 werden abweichend von DIN EN 206-1 die Mehlkorngelalte aller Betone (Ausnahme Beton nach Abs. 5.3.4 „Unterwasserbeton“) begrenzt. Bei Betonen einschließlich Festigkeitsklassen C50/60 und LC50/55 gelten bei den Expositionsklassen XF und XM die in Tabelle F.4.1 von DIN 1045-2 angegebenen höchstzulässigen Mehlkorngelalte 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 Mehlkorngelalt generell 550 kg/m^3 . Die daraus resultierenden höchstzulässigen Mehlkorngelalte sind in Bild 2.9.1 grafisch dargestellt.

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 Mehlkorngelalte (s. Bild 2.9.2)

Die vorstehend genannten Mehlkorngelalte 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 um 50 kg/m^3 erhöht werden.

Der höchstzulässige Mehlkorngesamt kann auch anhand von Ablaufdiagramm 2 (Seite 58) bestimmt werden.

Mindestwerte für den Mehlkorngesamt nennen DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 nicht.

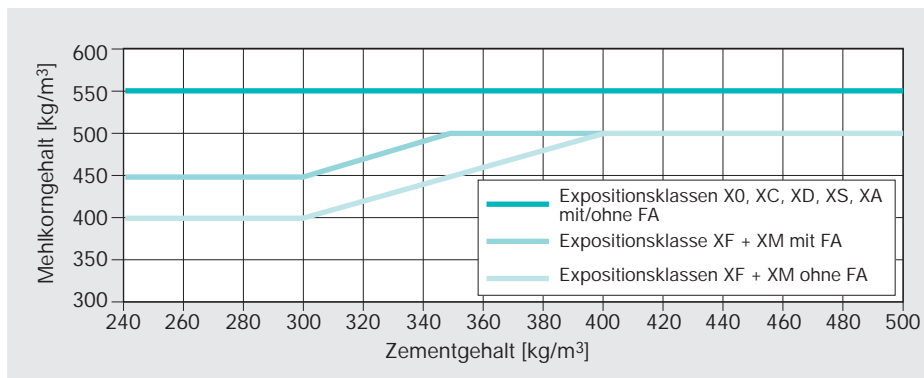


Bild 2.9.1 Zulässiger Mehlkorngesamt bei Betonen bis einschließlich C50/60 und LC50/55

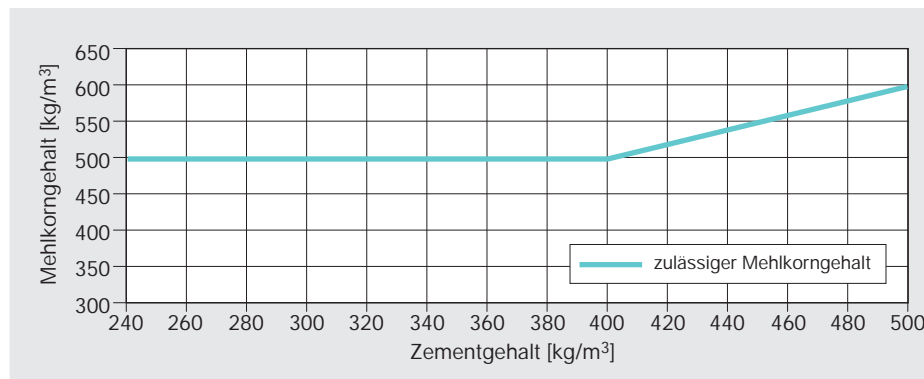


Bild 2.9.2 Zulässiger Mehlkorngesamt bei Betonen ab C55/67 und LC55/60

3 Anforderungen nach Expositionsklassen und Anwendungsfällen

DIN 1045-2 definiert die Grundanforderungen an die Betonzusammensetzung nach Expositionsklassen. In dieser Abhängigkeit sind jeweils der maximale w/z-Wert, die Mindestfestigkeitsklasse des Betons (f_{ck}) und der Mindestzementgehalt (min z) festgelegt.

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

In den nachstehenden Tabellen werden die für die einzelnen Expositionsklassen maßgeblichen Werte dargestellt.

Zur besseren Übersicht über alle mit DIN 1045-2 konformen Anwendungsmöglichkeiten von Flugasche sind in gleicher Darstellungsform die Anwendungsfälle:

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

Die im Folgenden angegebenen Mindestfestigkeitsklassen für Beton gelten nicht für Leichtbeton.

Expositionsklasse		X0	
<p>kein Korrosions- oder Angriffsrisiko</p> <p>Für Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht betonangreifender Umgebung kann die Expositionsklasse X0 zugeordnet werden</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p>alle Umgebungsbedingungen außer XF, XA und XM</p> <p>Fundamente ohne Bewehrung ohne Frost Innenbauteile ohne Bewehrung</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
Anforderungen nach DIN 1045-2			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		keine Anforderung
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 8/10
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	keine Anforderung
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	keine Anforderung
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	keine Anforderung
<p>andere Anforderungen</p> <p>keine</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...180

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>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.</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>Anforderungen nach DIN 1045-2</p> <p>gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklasse: XC2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,75
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 16/20
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	keine Anforderung
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80
<p>andere Anforderungen keine</p>			
<p>BVK-Empfehlungen</p>			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse**XC2****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:

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.

Klassenbezeichnung

nass, selten trocken

Teile von Wasserbehältern, Gründungsbauteile

Beschreibung der Umgebung

Anforderungen nach DIN 1045-2gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklasse: **XC1**

maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,75
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 16/20
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	keine Anforderung
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80
andere Anforderungen keine			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XC3	
<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>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.</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, Wäscheräumen, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
Anforderungen nach DIN 1045-2			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,65
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 20/25
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	20
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80
<p>andere Anforderungen</p> <p>keine</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse**XC4****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:

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.

[Klassenbezeichnung](#)

wechselnd nass und trocken

Außenbauteile mit direkter Beregnung

[Beschreibung der Umgebung](#)

Anforderung nach DIN 1045-2

gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: **XF1; XA1**

maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	10
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
andere Anforderungen keine			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XD1	
<p>Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride 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>			
Klassenbezeichnung			
<p>mäßige Feuchte Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen Einzelgaragen</p>			
Beschreibung der Umgebung			
<p>Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS1; XM1; XM2 (mit Oberflächenbehandlung)</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_{lv})$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,55
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 30/37
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	30
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<p>andere Anforderungen Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 25/30 anzusetzen.</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XD2	
<p>Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride 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 Solebäder; Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p>Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS2; XA2</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<p>andere Anforderungen</p> <p>Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen.</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XD3	
<p align="center">Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride</p> <p align="center">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 align="center">wechselnd nass und trocken</p> <p align="center">Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; Parkdecks</p>			
<p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p align="center">Anforderung nach DIN 1045-2</p> <p align="center">gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS3; XA3; XM2 (mit Oberflächenbehandlung); XM3</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<p align="center">andere Anforderungen</p> <p>Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF..., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen.</p>			
<p align="center">BVK-Empfehlungen</p>			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

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:			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meereswasser			
Außenbauteile in Küstennähe			
<i>Beschreibung der Umgebung</i>			
Anforderung nach DIN 1045-2			
gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XD1; XM1; XM2 (mit Oberflächenbehandlung)			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,55
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 30/37
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	30
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<i>andere Anforderungen</i>			
Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 25/30 anzusetzen.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XS2	
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:			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
unter Wasser			
Bauteile in Hafenbecken, die ständig unter Wasser liegen			
<i>Beschreibung der Umgebung</i>			
Anforderung nach DIN 1045-2			
gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XD2; XA2			
maximaler $w/(z+0,4 f_{ly})$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<i>andere Anforderungen</i>			
Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

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			
Kaimauern in Hafenanlagen			
Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach DIN 1045-2			
gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XD3; XA3; XM2 (mit Oberflächenbehandlung); XM3			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
andere Anforderungen			
Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XF1	
Betonkorrosion durch Frost ohne Taumittel Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden: Klassenbezeichnung			
mäßige Wassersättigung Außenbauteile Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XC4; XA1			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	10
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
andere Anforderungen besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.9)			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse**XF2****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

Anforderung nach DIN 1045-2

			mit LP	ohne LP
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,55	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30	C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	300	320
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	keine Anforderungen	
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	Anrechnung nicht zulässig	

andere Anforderungen

besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.9)

BVK-Empfehlungen

empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100	
-----------------------------	---	-------------------	-----------------	--

Expositionsklasse			XF3	
Betonkorrosion durch Frost ohne Taumittel Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden: <small>Klassenbezeichnung</small>				
hohe Wassersättigung offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser <small>Beschreibung der Umgebung</small>				
Anforderung nach DIN 1045-2				
			mit LP	ohne LP
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,55	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30	C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	30	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90	90
<small>andere Anforderungen</small> besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.9)				
BVK-Empfehlungen				
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100	

Expositionsklasse		XF4	
Betonkorrosion durch Frost mit Taumittel			
Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
hohe Wassersättigung			
Verkehrsflächen, die mit Taumittel behandelt werden; überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen; Räumeraufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone			
<i>Beschreibung der Umgebung</i>			
Anforderung nach DIN 1045-2			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 30/37
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	320
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	keine Anforderungen
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	Anrechnung nicht zulässig
<i>andere Anforderungen</i>			
Luftporenbildner; besondere Begrenzung des Mehlkorngelhalts beachten (s. Abschnitt 2.9)			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XA1	
Betonkorrosion durch chemischen Angriff			
Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser und Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
chemisch schwach angreifende Umgebung	Angriffskriterien gem. DIN EN 206-1		
Behälter von Kläranlagen; Güllebehälter	Wasser		
	pH-Wert	≤ 6,5 ... ≥ 5,5	
<i>Beschreibung der Umgebung</i>	CO ₂ [mg/l]	≥ 15 ... 40	
	NH ₄ ⁺ [mg/l]	≥ 15 ... 30	
	Mg ²⁺ [mg/l]	≥ 300 ... 1000	
	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	≥ 200 ... 600	
	Boden		
	SO ₄ ²⁻ [mg/kg]	≥ 2000 ... 3000	
	Säuregrad	> 200	
Anforderung nach DIN 1045-2			
maximaler w/(z+ 0,4 f _b)-Wert	max (w/z) _{eq}		0,60
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f _{ck}		C 25/30
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	min z _f	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	min f _b	kg/m ³	10
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei min z _f (max f _b = 0,33 z)	max f _b	kg/m ³	90
<i>andere Anforderungen</i> keine			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse**XA2****Betonkorrosion durch chemischen Angriff**

Wenn Beton chemischem Angriff durch 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

Angriffskriterien gem. DIN EN 206-1

Wasser	
pH-Wert	< 5,5 ... ≥ 4,5
CO ₂ [mg/l]	> 40 ... 100
NH ₄ ⁺ [mg/l]	> 30 ... 60
Mg ²⁺ [mg/l]	> 1000 ... 3000
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	> 600 ... 3000
Böden	
SO ₄ ²⁻ [mg/kg]	> 3000 ... 12000

Beschreibung der Umgebung**Anforderung nach DIN 1045-2**

gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen:

XS2; XD2

maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max(w/z)_{eq}$		0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90

andere Anforderungen

- a) Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.
b) Bei $SO_4^{2-} > 600$ mg/l ist ein HS-Zement zu verwenden.

Besonderheit

Anstelle von HS Zement kann bis zu $SO_4^{2-} \leq 1500$ mg/l eine Bindemittelkombination von Zement und Flugasche gewählt werden; Einzelheiten siehe Abschnitt 4.4.

BVK-Empfehlungen

empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100
-----------------------------	---	-------------------	-----------------

Expositionsklasse		XA3	
Betonkorrosion durch chemischen Angriff			
Wenn Beton chemischem Angriff durch Böden, Grundwasser und Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung			
chemisch stark angreifende Umgebung	Angriffskriterien gem. DIN 206-1		
Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern; Gärfuttersilos und Futtertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung	Wasser		
	pH-Wert	< 4,5 ... ≥ 4,0	
	CO ₂ [mg/l]	> 100	
	NH ₄ ⁺ [mg/l]	> 60 ... 100	
	Mg ²⁺ [mg/l]	> 3000	
	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	> 3000 ... 6000	
Boden			
Beschreibung der Umgebung	SO ₄ ²⁻ [mg/kg]	> 12000 ... 24000	
Anforderung nach DIN 1045-2			
gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS3; XD3; XM2 (mit Oberflächenbehandlung) XM3			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{\text{eq}}$		0,45
Minstdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
andere Anforderungen			
a) Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C30/37 anzusetzen.			
b) Bei SO ₄ ²⁻ > 600 mg/l ist ein HS-Zement zu verwenden.			
Besonderheit			
Anstelle von HS Zement kann bis zu SO ₄ ²⁻ ≤ 1500 mg/l eine Bindemittelkombination von Zement und Flugasche gewählt werden; Einzelheiten siehe Abschnitt 4.4).			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XM1	
<p align="center">Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung</p> <p align="center">Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p> <p>Klassenbezeichnung</p>			
<p align="center">mäßige Verschleißbeanspruchung</p> <p align="center">tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftberefite Fahrzeuge</p> <p>Beschreibung der Umgebung</p>			
<p align="center">Anforderung nach DIN 1045-2</p> <p align="center">gleiche Anforderungen*) gelten auch für die Expositionsklassen: XS1; XD1</p> <p align="center">*) mit Ausnahme des höchstzulässigen Mehlkorngelhalts</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,55
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 30/37
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	30
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<p align="center">andere Anforderungen</p> <p>Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 25/30 anzusetzen. Besondere Begrenzung des Mehlkorngelhalts (s. Abschnitt 2.9) sowie Anforderungen an Gesteinskörnung beachten. Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfestem Beton.</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XM2 (mit 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			
Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS1^{*)}; XD1^{*)}; XM1 <small>^{*)} mit Ausnahme des höchstzulässigen Mehlkorngehalts</small>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,55
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 30/37
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	30
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
andere Anforderungen			
Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF.., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 25/30 anzusetzen. Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts (s. Abschnitt 2.9) sowie Anforderungen an Gesteinskörnung beachten. Höchstzementgehalt 360 kg/m ³ , jedoch nicht bei hochfestem Beton. Es muss eine Oberflächenbehandlung des Betons durchgeführt werden (z.B. durch Vakuumieren und Flügelglätten)			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XM2 (ohne Oberflächenbehandlung)	
Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
starke Verschleißbeanspruchung tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler			
<i>Beschreibung der Umgebung</i>			
Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS3^{*)}; XD3^{*)}; XA3^{*)}; XM3 <small>^{*)} mit Ausnahme des höchstzulässigen Mehlkorngehalts</small>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<i>andere Anforderungen</i> Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen. Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts (s. Abschnitt 2.9) sowie Anforderungen an Gesteinskörnung beachten. Höchstzementgehalt 360 kg/m ³ , jedoch nicht bei hochfestem Beton.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Expositionsklasse		XM3	
<p>Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung 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 tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; Oberflächen, die häufig von Kettenfahrzeugen befahren werden; Wasserbauwerke in geschiebebelasteten Gewässern, z.B. Tosbecken</p> <p><i>Beschreibung der Umgebung</i></p>			
<p>Anforderung nach DIN 1045-2 gleiche Anforderungen gelten auch für die Expositionsklassen: XS3^{*)}; XD3^{*)}; XA3^{*)}; XM2 (ohne Oberflächenbehandlung) ^{*)} mit Ausnahme des höchstzulässigen Mehlkorngehalts</p>			
maximaler $w/(z+0,4 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 35/45
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	90
<p><i>andere Anforderungen</i></p> <p>Bei Verwendung von Luftporenbildner, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus der Expositionsklasse XF., ist die nächstniedrige Festigkeitsklasse C 30/37 anzusetzen.</p> <p>Besondere Begrenzung des Mehlkorngehalts beachten (s. Abschnitt 2.9). Es sind Hartstoffe nach DIN 1100 zu verwenden. Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfestem Beton.</p>			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100

Anwendungsfall			UW
Unterwasserbeton, Beton für Unterwasserschüttungen			
Klassenbezeichnung			
Beton für tragende Bauteile unter Wasser			
Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach DIN 1045-2 Abschnitt 5.3.4 „Anforderungen an Unterwasserbeton“ gleiche Anforderungen gelten auch für die Anwendungsfälle BP1 und SW			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60¹⁾
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30²⁾
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240/270²⁾
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	110/80
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80/90
andere Anforderungen Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	80...120

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

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

Anwendungsfall		BP1	
Beton für Ortbetonpfähle Bei Verwendung von Gesteinskörnung bis 32 mm Größtkorn			
Klassenbezeichnung			
Beton in ständig feuchter Umgebung			
Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen Anlage 2.1/2 zur DIN 4014 gleiche Anforderungen gelten auch für die Anwendungsfälle UW und SW			
maximaler $w/(z+0,7 f_p)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60¹⁾
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30²⁾
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240/270²⁾
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	110/80
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80/90
andere Anforderungen Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
BVK-Empfehlungen Zusätzliche Empfehlungen sind auch im BVK Merkblatt „Bohrpfahlbeton“ [MB 01] enthalten.			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	80...120

¹⁾ Der Wassermenge-Wert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen es erfordern (z. B. Expositionsklasse XA2).

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

Anwendungsfall			BP2
Beton für Ortbetonpfähle			
Bei Verwendung von Gesteinskörnung bis 16 mm Größtkorn			
Klassenbezeichnung			
Beton in ständig feuchter Umgebung			
Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach DIN 1045-2			
nach Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen Anlage 2.1/2 zur DIN 4014			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60¹⁾
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30²⁾
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240/270²⁾
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	160/130
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80/90
andere Anforderungen			
Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
BVK-Empfehlungen			
Zusätzliche Empfehlungen sind auch im BVK Merkblatt „Bohrpfahlbeton“ [MB 01] enthalten.			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	130...150

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

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

Anwendungsfall			SW
Beton für Ortbetonschlitzwände			
Klassenbezeichnung			
Beton in ständig feuchter Umgebung			
Beschreibung der Umgebung			
Anforderung nach DIN 1045-2, nach Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen Anlage 2.1/6 zur DIN 4126 gleiche Anforderungen gelten auch für die Anwendungsfälle UW und BP1			
maximaler $w/(z+0,7 f_b)$ -Wert	$\max (w/z)_{eq}$		0,60¹⁾
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}		C 25/30²⁾
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	240/270²⁾
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	110/80
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	80/90
andere Anforderungen Der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) darf 350 kg/m ³ nicht unterschreiten.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	60...120

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

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

Anwendungsfall			FD
Flüssigkeitsdichter Beton für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen			
<i>Klassenbezeichnung</i>			
Beton mit hohem Widerstand gegen eindringende Flüssigkeiten			
Beton für Tankstellenflächen; Beton für Auffangtassen unter Flüssigkeitsbehältern			
<i>Beschreibung der Umgebung</i>			
Anforderung nach 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}		–²⁾
Mindestzementgehalt bei Verwendung von Flugasche	$\min z_f$	kg/m ³	270²⁾
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	–²⁾
maximal anrechenbarer Flugaschegehalt bei $\min z_f$ ($\max f_b = 0,25 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	68
<i>andere Anforderungen</i> Die Bindemittelmenge darf 290 l/m ³ nicht überschreiten.			
BVK-Empfehlungen			
empfohlener Flugaschegehalt	f	kg/m ³	50...100
Mindestdruckfestigkeitsklasse	f_{ck}	kg/m ³	C 35/45
Nach Zustimmung eines entsprechenden Antrags an die Bauaufsicht zur Anpassung der FD-Regelung an die neuen Normen und ergänzender Festlegung von $f/z \leq 0,33$ gilt:			
Mindestflugaschegehalt	$\min f_b$	kg/m ³	50²⁾
empfohlener Flugasche- gehalt ($\max f_b = 0,33 z$)	$\max f_b$	kg/m ³	50...100

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen es erfordern (z. B. Expositionsklasse XA3)

²⁾ Die Norm trifft hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Empfehlung dar.

4 Leistungsfähigkeit von Flugasche

4.1 Beton mit geringer Reißneigung

Zur Rissbegrenzung im Festbeton werden im Allgemeinen konstruktive Maßnahmen ergriffen. Bei der Rissvermeidung und der Reduzierung der Reißneigung des jungen Betons ist neben den wesentlichen Einflussparametern wie Einbaubedingungen, Schalung und Nachbehandlung vor allem der Betonzusammensetzung Aufmerksamkeit zu schenken. Einflüsse aus Temperaturgefälle und Schwinden können durch sorgfältige Betonplanung gezielt minimiert werden.

4.1.1 Hydratationswärme

Um Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilkern und Bauteilrandzone weitgehend zu reduzieren, ist die Zementauswahl für den Beton hinsichtlich der Hydratationswärmeentwicklung von besonderer Bedeutung.

Als Bindemittelkomponente, die einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung der Hydratationswärme leistet, hat sich Flugasche nach DIN EN 450 bewährt [5], [6], [7], [MB 03].

Die relative Minderung der Hydratationswärme entspricht in etwa dem Prozentanteil des Zementaustausches (s. Abschnitt 6.1).

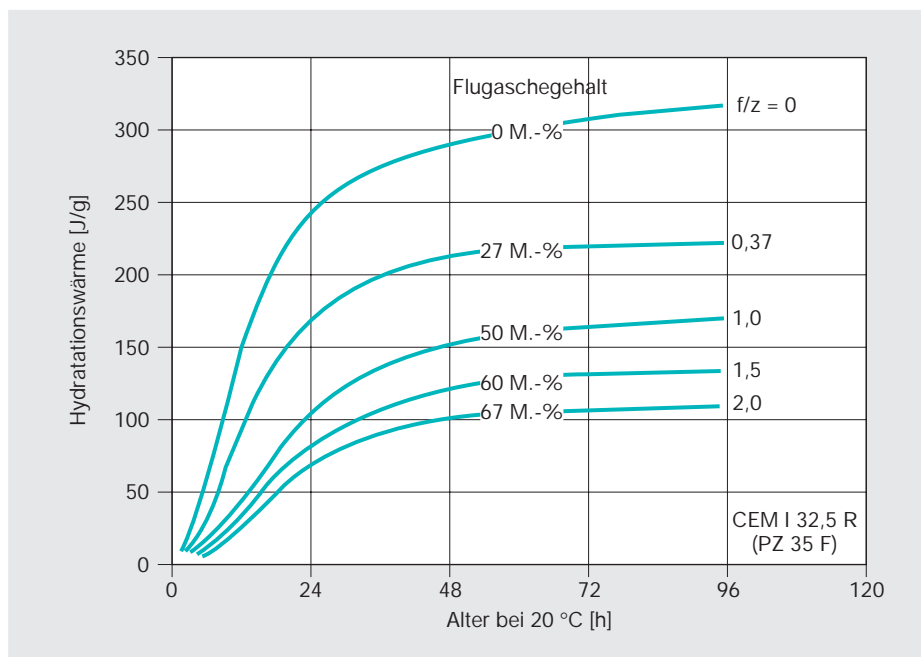


Bild 4.1: Hydratationswärmeentwicklung von Mörteln im Thermosflaschenversuch in Abhängigkeit vom Flugaschegehalt [8]

4.1.2 Fröhschwinden

Durch Schrumpfen und plastisches Schwinden erfährt der Beton im jungen Alter eine Zwangsbelastung. Ursache hierfür sind die Hydratation des Zements und ein rascher Entzug von in Kapillaren gebundenem Wasser. Es ist somit sinnvoll, den absoluten Wassergehalt des Betons zu minimieren [9].

Die Verwendung von Flugasche erlaubt die Herstellung sehr gut verarbeitbarer Betone auch bei geringerem Wassergehalt. Durch die geringere Kornrohdichte erzielt die Flugasche im Bindemittelleim eine größere Feststoffmenge, was zu einem dichteren porenärmeren Bindemittelgefüge führt. Das Fröhschwinden kann somit wirkungsvoll reduziert werden.

4.2 Karbonatisierung

Der Verbundbaustoff Stahlbeton erfordert zur dauerhaften Standsicherheit einen ausreichenden Korrosionsschutz des Betonstahls. Stahlkorrosion kann im schlimmsten Fall zu einem vollständigen Versagen der Trageigenschaft eines Betonbauwerks führen.

Die den Betonstahl umgebende Bindemittelmatrix gewährleistet durch die Alkalität der Porenlösung den Korrosionsschutz. Wird die Alkalität durch von außen eindringende Medien, insbesondere durch Luft-CO₂ und Feuchte, 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 dichter gegen das Eindringen von CO₂ und Feuchte.

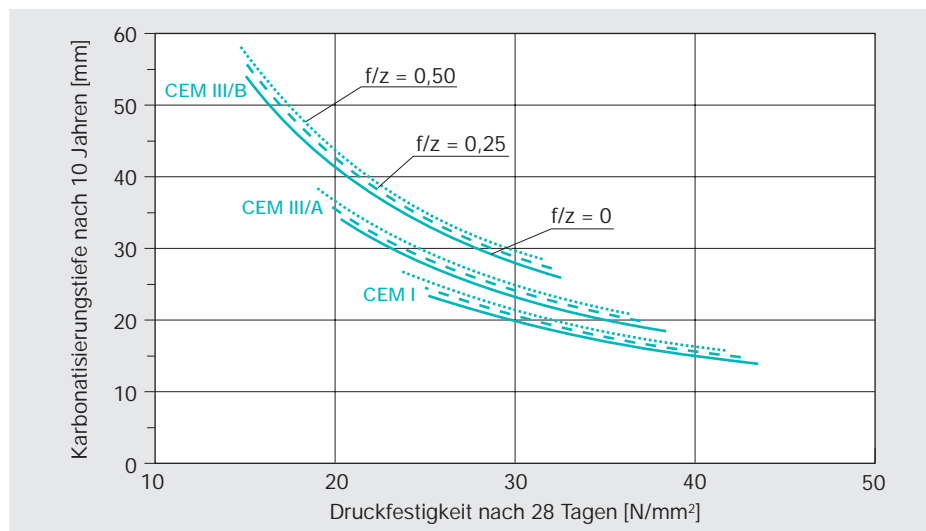


Bild 4.2: Karbonatisierungstiefen nach zehn Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Lagerung: 2d in der Form, 5d in Wasser, danach Normalklima 20 °C/65 % r.F.) [10]

4.3 Chloridangriff

Beton im Meerwasser und in den spritzwassergefährdeten Randbereichen des Straßen- und Verkehrswegebauwerks kann durch Chloridangriff bis zur Schädigung beansprucht werden.

Aufgrund der physikalischen und chemischen Wirkung der Flugasche im Beton wird dessen Dichtheit und damit die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe erhöht. Der positive Einfluss von Flugasche als Bindemittelkomponente auf die für die chloridinduzierte Stahl-

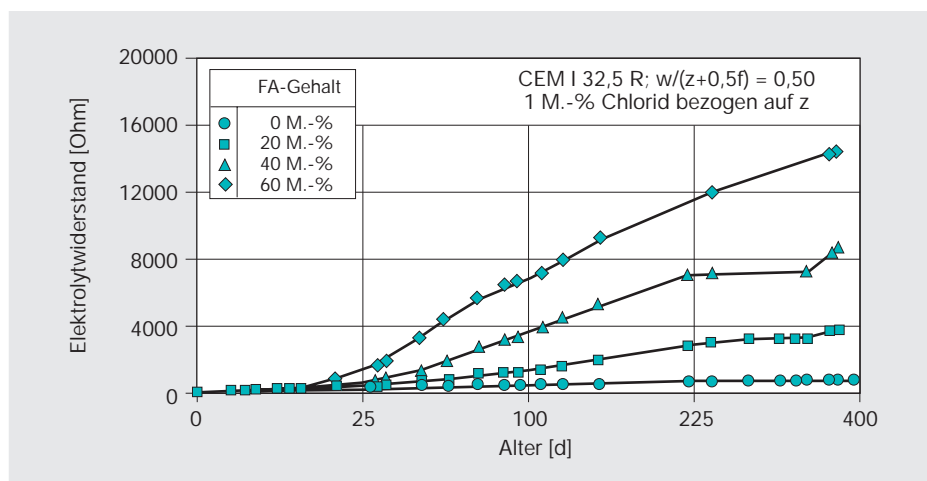


Bild 4.3.1: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands von Beton mit und ohne Flugasche [11]

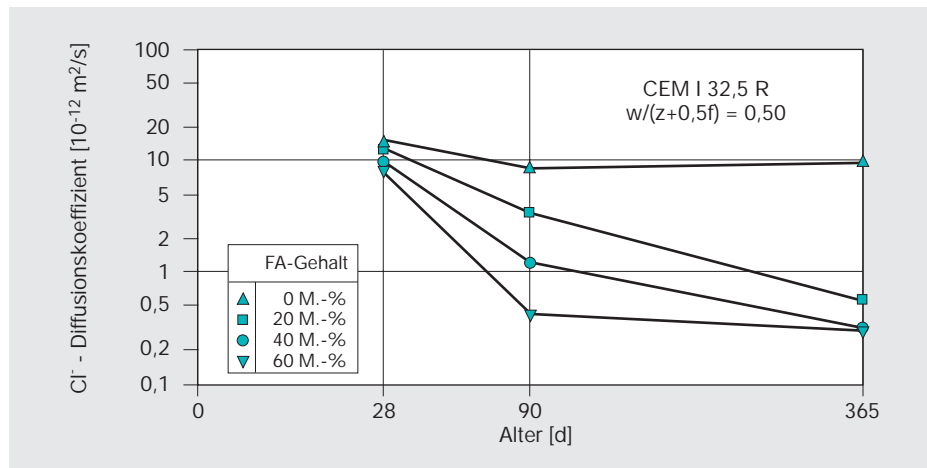


Bild 4.3.2: Chloriddiffusionskoeffizient von Mörtel mit und ohne Flugasche [11]

korrosion 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 4.3.1).

Bei Betonen, die von außen mit Chloridlösung beaufschlagt werden, sinkt mit zunehmendem Flugaschegehalt und Alter der Chloriddiffusionskoeffizient (Bild 4.3.2). Ursache hierfür ist die Verbesserung der Porenstruktur durch die anhaltende puzzolanische Reaktion der Flugasche. Die Nutzungsdauer chloridbeanspruchter Betonbauwerke wird durch die Verwendung von Flugasche verlängert [11].

4.4 Sulfatangriff

Durch das Eindringen sulfathaltiger Wasser in den Beton entsteht durch chemische Umwandlung z.B. Ettringit, das durch sein größeres Volumen Treiben hervorruft. Diese Treibreaktionen können zur Zerstörung des Betons führen. Deshalb ist bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers > 600 mg/l ein HS-Zement zu verwenden.

Flugasche erhöht den Widerstand des Betons gegen Sulfatangriff. Die schützende Wirkung ist um so deutlicher, je größer der Anteil der Steinkohlenflugasche im Bindemittel ist [1], [12], [13], [14].

Die internationalen Erfahrungen 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 HS-Zementen hergestellten Betonen in Bezug auf den Sulfatwiderstand vergleichbar sind.

Ohne weiteren Nachweis gilt nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 folgende Regelung :

- Zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand darf bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers von ≤ 1500 mg/l anstelle von HS-Zement nach DIN 1164 eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden, wenn die Bedingungen gemäß Tabelle 4.4 eingehalten sind:

Tabelle 4.4: Regelung für den Einsatz von Flugasche zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand

Zementart	Flugascheanteil f am Bindemittel (f+z)	äquivalenter Wasserzementwert (w/z) _{eq}	k _f -Wert ¹⁾	Anrechenbarer Flugaschegehalt
CEM I	f/(z+f) ≥ 0,20	w/(z+k _f · f)	0,4 / 0,7	f ≤ 0,33 z
CEM II/A-S				
CEM II/B-S				
CEM II/A-LL				
CEM II/A-T	f/(z+f) ≥ 0,10			
CEM II/B-T				
CEM III/A				

¹⁾ Je nach maßgeblicher Expositionsklasse oder Anwendungsbedingung

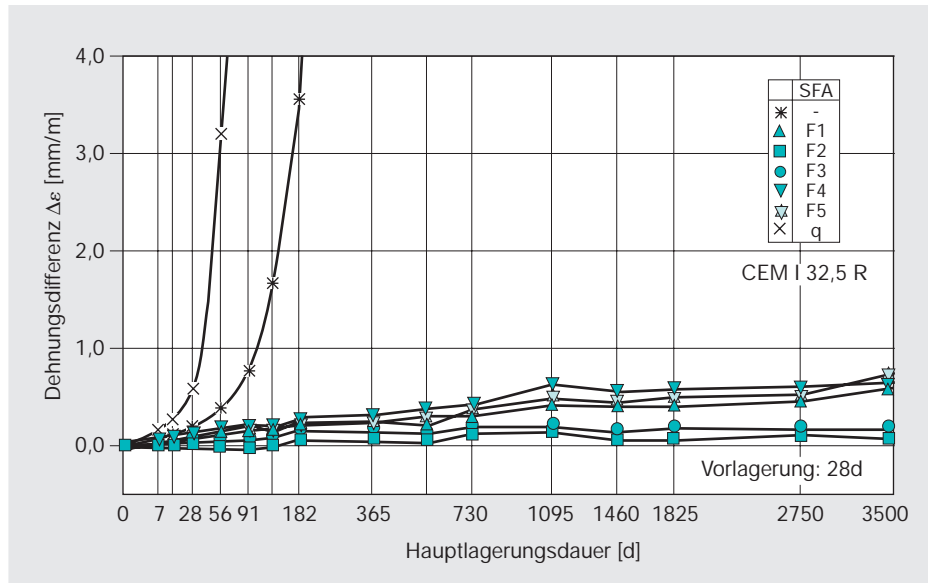


Bild 4.4: Dehnungsdifferenzen von Mischungen mit CEM I 32,5 R in Kombination mit fünf Flugaschen (F1 bis F5) und einem Quarzmehl (q); $w/(z+f) = 0,50$ bzw. $w/(z+q) = 0,50$; Vorlagerung 28 Tage; $f/z = 0,67$ bzw. $q/z = 0,67$ [15].

4.5 Angriff kalklösender Kohlensäure

Infolge geologischer 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 CO_2 -Gehalt der Wässer die Betone den Expositionsklassen XA1, XA2 oder XA3 zugewiesen. In Untersuchungen über den Zeitraum von mehreren Jahren [16] 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.

4.6 Alkalireaktion

Einige Gesteinskörnungen enthalten alkalireaktive Kieselsäure, die mit dem im Porenwasser des Betons gelösten Alkalihydroxid zu einem wasserreichen Alkalisilikathydrat reagieren kann. Diese Reaktion, die als Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bezeichnet wird, führt unter bestimmten Bedingungen zu einer Volumenvergrößerung, die eine Schädigung des Betons verursachen kann.

In Deutschland ist AKR im Beton außer bei Opalsandstein und Flint aus Norddeutschland auch bei präkambrischer Grauwacke aus bestimmten Bereichen in Sachsen, Brandenburg und Thüringen und in jüngster Zeit bei den im Oberrhein-Graben verwendeten gebrochenen Gesteinskörnungen beobachtet worden.

Flugasche wird seit Jahrzehnten eingesetzt, um Schäden durch AKR zu vermeiden [17], [18]. Im Gegensatz zu Regelungen in Großbritannien und Kanada ist diese Leistungsfähigkeit der Flugasche im deutschen Regelwerk bisher noch nicht verankert.

Die Zugabe einer ausreichenden Menge an Steinkohlenflugasche kann eine schädigende AKR verhindern, obwohl die Flugasche im Vergleich zum Zement einen höheren Gesamtalkaligehalt aufweisen kann. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die Alkalien in der Flugasche überwiegend in die Glasmatrix eingebunden sind und daher nicht wasserlöslich vorliegen. Lediglich ein geringer Teil der Alkalien liegt als lösliches Alkalisulfat auf der Oberfläche der Partikel vor [19]. Nach der Alkalirichtlinie des DAfStb ist daher der wirksame Alkaligehalt von Flugasche mit 1/6 des Gesamtalkaligehalts anzusetzen.

Nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.2.2, darf Flugasche, deren Gesamtalkaligehalt (Na_2O -Äquivalent) 4,0 M.-% nicht überschreitet, auch mit Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E II und E III und für die Feuchtigkeitsklasse WF oder WA nach DAfStb-Richtlinie „Alkalireaktion im Beton“ verwendet werden. Im Allgemeinen liegen die Gesamtalkaligehalte der Flugaschen unter dem genannten Höchstwert.

5 Entwurfshilfen

5.1 Leistungsbeschreibung für Beton

Nach DIN EN 206-1, Abschn. 6.1, ist Beton entweder als Beton nach Eigenschaften:

Beton, bei dem die geforderten Eigenschaften und zusätzlichen Anforderungen dem Hersteller gegenüber festgelegt sind, wobei der Hersteller für die Bereitstellung eines Betons, der den geforderten Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist.

oder als Beton nach Zusammensetzung:

Beton, bei dem die Zusammensetzung des Betons und die zu verwendenden Ausgangsstoffe dem Hersteller gegenüber festgelegt sind und bei welchem der Hersteller für die Bereitstellung eines Betons mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist.

festzulegen.

Bei Aufstellung der Leistungsbeschreibung sind das vorgesehene Anwendungsgebiet, die Nachbehandlungsbedingungen, die Bauteilabmessungen (Wärmeentwicklung) und die Umgebungsbedingungen, denen das Bauteil ausgesetzt wird, zu berücksichtigen.

Beim Standardbeton (Normalbeton ohne Zusätze der Festigkeitsklassen C8/10, C12/15 und C16/20) ist der Hersteller dafür verantwortlich, dass die Normvorgaben für den Zementgehalt berücksichtigt sind.

Grundlage für den Entwurf oder die Vorgabe einer Betonzusammensetzung sind die Ergebnisse der Erstprüfung (Eignungsprüfung) oder die Langzeiterfahrungen mit vergleichbaren Betonen.

5.2 Betonzusammensetzung und Erstprüfung (DIN 1045-2, Abschnitt 9.5)

Bei Beton nach Eigenschaften ist vor Verwendung einer neuen Betonzusammensetzung mit einer Erstprüfung festzustellen, ob die geforderten Eigenschaften des Frisch- und Festbetons mit der in Aussicht genommenen Betonzusammensetzung erreicht werden. Die Erstprüfung eines Betons muss erneut durchgeführt werden, wenn sich die Ausgangsstoffe wesentlich ändern.

Für die Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften eines Betons dürfen folgende Variationen in der Zusammensetzung vorgesehen werden:

- Zement → ± 15 kg/m³
- Flugasche → ± 15 kg/m³.

5.3 Betonzusammensetzung

Die Festlegung einer Betonzusammensetzung mit Flugasche erfolgt wie üblich unter Zuhilfenahme der Stoffraumrechnung und unter Berücksichtigung der in den Vorschriften festgelegten Grenzwerte (s. Abschnitte 2 und 3). Die Festlegung der Zugabemenge der Flugasche erfolgt:

- gemäß den Vorgaben der DIN EN 206-1/DIN 1045-2
- gemäß den Vorgaben geltender allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen,
- innerhalb der zulässigen Mehlkorngelhalte,
- nach den Erfahrungen und Erfordernissen vor Ort.

Je nach Betonieraufgabe werden üblicherweise Flugaschemengen zwischen 40 kg/m³ und 120 kg/m³ eingesetzt. Als Rechenwert für die Rohdichte von Flugasche kann im Allgemeinen 2,3 kg/dm³ angesetzt werden (Tabelle 5.3.1)

Tabelle 5.3.1: Mittlere Kornrohdsichten üblicher Betonausgangsstoffe

Baustoff	Kornrohdsichte [kg/dm ³]	Baustoff	Kornrohdsichte [kg/m ³]
Flugasche	2,20 ... 2,50	Rheinkies	2,60 ... 2,65
CEM I	3,00 ... 3,15	Quarzit	2,60 ... 2,70
CEM II	2,95 ... 3,00	Kalkstein	2,65 ... 2,85
CEM III	2,90 ... 2,95	Granit	2,60 ... 2,70
		Basalt	2,90 ... 3,00

Beim Entwurf von Beton mit Flugasche ergeben sich folgende Besonderheiten:

- Der Wasseranspruch liegt für die gleiche Konsistenz i.d.R. rund 5 l/m³ bis 10 l/m³ niedriger als für Beton ohne Flugasche (Tabelle 5.3.2).

Tabelle 5.3.2: Anhaltswerte für den Wasseranspruch von Beton (ohne Zusatzmittel) nach [20]

Körnungs- ziffer K	Sieblinie	Konsistenz- klasse	Wasseranspruch in l/m ³		
			ohne Flugasche	mit Flugasche	eigene Erfahrungswerte
5,48	A 32	F2	150	140	
		F3	170	160	
4,20	B 32	F2	170	160	
		F3	190	180	
3,30	C 32	F2	190	180	
		F3	210	200	
4,60	A 16	F2	160	150	
		F3	180	170	
3,66	B 16	F2	180	170	
		F3	200	190	
2,75	C 16	F2	210	200	
		F3	230	220	

- Zur Abschätzung der zu erwartenden Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Bild 5.3) kann in der Beziehung $(w/z)_{eq} = w/(z+k_r \cdot f_{td})$ anstelle des k_r -Werts von 0,4 der k_r -Wert von $\geq 0,5$ angenommen werden.
- Zur Abschätzung des Nacherhärtungspotenzials kann ein höherer k_r -Wert angenommen werden (s. Bild 1.4.3). Näheres hierzu wird in [MB05] beschrieben.

Die hier wiedergegebenen Entwurfshilfen sollen das zielorientierte Arbeiten erleichtern. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Liste der Ausgangswerte für den gegebenen Anwendungsfall in den Planungs- und Entwurfstabellen 5.4.1 und 5.4.2 leicht vervollständigen.

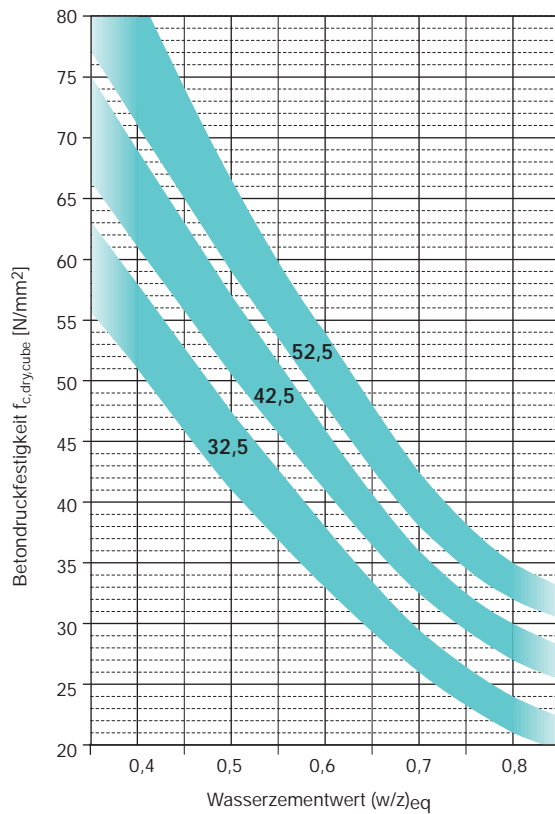


Bild 5.3: Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit $f_{c,dry,cube}$ vom äquivalenten Wasserzementwert und der Festigkeitsklasse des Zements [20]

5.4 Betonoptimierung

Es gibt mehrere Möglichkeiten, alle Anforderungen für eine richtige Betonzusammensetzung mit Flugasche zu erfüllen. Das Ablaufdiagramm 1 (siehe Seite 57) zeigt, wie man sich dem Optimum im konkreten Falle schrittweise nähern kann. Es nennt dazu die einzelnen Schritte mit den dazugehörigen Berechnungsformeln.

Das Beispiel in der Tabelle 5.4.2 verdeutlicht die empfohlene Vorgehensweise. Die Vorteile der Flugasche zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und zur Senkung des Wassergehalts wurden hier mit dem in den Regelwerken angegebenen Grenzwert $\max f_b = 0,33$ z optimal ausgenutzt. Der k_f -Wert wurde mit 0,4 berücksichtigt (Tabelle 2).

Hinweis:

Es können hier nicht alle Randbedingungen für die Optimierung einer Zusammensetzung vorgestellt werden. Bei der Berechnung wird jedoch bald deutlich, dass die Veränderungen der Verhältniswerte Flugasche zu Zement (f/z) und Wasser zu Bindemittel $(w/z)_{eq}$ eine rasche Optimierung erlauben.

Tabelle 5.4.1: Aufgabenstellung und Ausgangsdaten

(1) Betonbeschreibung, Aufgabenstellung	
Betonart	Leichtbeton LC Normalbeton C Schwerbeton C
Bewehrung	unbewehrt Stahlbeton Spannbeton
Betonfestigkeitsklasse	C8/10...C100/115; LC8/9...LC80/88
Konsistenzklasse	F1...F6; C0...C3; V0...V4; S1...S5
Expositionsklasse	X0; XC1..4; XS1..3; XD1..3; XF1..4; XA1..3; XM1..3
Anwendungsfall	UW; BP1..2; SW; FD
Sonstige Anforderungen	.....
(2) Anforderungen	
min z	..... kg/m ³ (siehe Tabelle 2)
min z _r	..... kg/m ³ (siehe Tabelle 2)
min f _b	..... kg/m ³ (siehe Tabelle 2)
max (w/z) _{eq}	..... (siehe Tabelle 2)
k _r -Wert	0 / 0,4 / 0,7 (siehe Tabelle 2)
zul mk	..... kg/m ³ (siehe Abschnitt 2.9)
(3) Vorgaben	
Zementart	CEM I, CEM II, CEM III
Zementfestigkeitsklasse	.....
Art der Gesteinskörnung	..... Kies / Splitt
Gesteinskörnung-Sieblinie/Größtkorn	A/B/C/U 32/16/.....mm
K-Wert der Gesteinskörnung	.....
Mehlkornanteil in der Gesteinskörnung (sm)	..... M.-%
(4) Sonstige Ausgangsdaten	
Zusatzmittel	.....
erf w	..... l/m ³ (s. Tabelle 5.3.2)
erf mk	..... kg/m ³ (Erfahrungswert)
Entwurfsfestigkeit	..... N/mm ² (eigene Festlegung)
erf (w/z) _{eq}	..... (s. Bild 5.3)
Materialkennwerte	ρ _p kg/dm ³ (s. Tabelle 5.3.1)
	ρ _g kg/dm ³ (s. Tabelle 5.3.1)
	ρ _z kg/dm ³ (s. Tabelle 5.3.1)
(5) Äquivalenter Wasserzementwert	
höchstzulässiger äquivalenter Wasserzementwert max (w/z) _{eq}	.....
erforderlicher äquivalenter Wasserzementwert erf (w/z) _{eq}	.....

Tabelle 5.4.2: Ablaufschema Betonentwurf, Beispiel XF1

Schritt	Beispiel
(1) Betonbeschreibung, Aufgabenstellung	
Betonart	Normalbeton
Bewehrung	Stahlbeton
Expositionsklasse/Anwendungsfall	XF1
Mindestfestigkeitsklasse	C 25/30
Konsistenzklasse	F3
(2) Anforderungen	
min z	280 kg/m ³
min z _r (Tab. 2)	270 kg/m ³
max (w/z) _{eq} (Tab. 2)	0,60
k _f (Tab. 2)	0,4
(3) Vorgaben	
Zementart	CEM II/B-S
Zementfestigkeitsklasse	32,5 R
Art der Gesteinskörnung	Sand, Kies
Gesteinskörnung-Sieblinie/Größtkorn	A 32/B 32
K-Wert der Gesteinskörnung	4,8
Mehlkornanteil in der Gesteinskörnung (sm)	4 M.-%
(4) Sonstige Ausgangsdaten	
Zusatzmittel	0,5 BV
erf w (Tab. 5.3.2)	176 l/m ³
erf mk	400 kg/m ³
Entwurfspannung	39 N/mm ²
erf (w/z) _{eq}	0,55
Materialkennwerte	ρ _f = 2,30 kg/dm ³ ρ _g = 2,63 kg/dm ³ ρ _z = 3,10 kg/dm ³
(5) Äquivalenter Wasserzementwert	
kleiner Wert aus: erf (w/z) _{eq} max (w/z) _{eq}	hier: erf (w/z) _{eq} = 0,55

Tabelle 5.4.2: (Fortsetzung) Ablaufschema Betonentwurf, Beispiel XF1

(6) Bindemittelgehalt**)	
rech $b_{eq} = erf w/(w/z)_{eq}$	$176/0,55 = 320 \text{ kg/m}^3$
(7) Zementgehalt	
rech $z = rech b_{eq} / 1,132^*)$	$326/1,123 = 94 \text{ kg/m}^3$
rech $z > min z_f$	$283 > 270$
$\rightarrow z$	$\rightarrow z = 283 \text{ kg/m}^3$
(8) anrechenbares FA**)	
$f_b = 0,33 z$	$0,33 \cdot 283 = 94 \text{ kg/m}^3$
$\rightarrow f_b$	$\rightarrow f_b = 94 \text{ kg/m}^3$
(9) Bindemittelgehalt	
$z + f_b > min z$	$283 + 94 > 280$
(10) Wassergehalt	
$w = erf (w/z)_{eq} \cdot (z + k_f \cdot f_b)$	$0,55 (283 + 0,4 \cdot 94) = 176 \text{ l/m}^3$
(11) Gehalt an Gesteinskörnung	
$g = (1000 - z/\rho_z - f_b/\rho_f - w - p) \cdot \rho_g$	$= (1000 - 283/3,10 - 94/2,30 - 176 - 15) \cdot 2,63$ $= 1780 \text{ kg/m}^3$
(12) Mehlkorngesamt	
$mk = z + f + (sm/100) \cdot g$	$= 283 + 94 + 0,04 \cdot 1780$ $= 448 \text{ kg/m}^3$
(13) zul mk	
s. Ablaufschema Mehlkorn	zul mk = $400 + 50 + 0 = 450 \text{ kg/m}^3$
(14) $mk \leq zul mk$	
$mk \leq zul mk$	$448 \leq 450 \text{ kg/m}^3$
(15/16) erforderlicher Mehrkorngesamt	
$mk \leq erf mk?$	$448 > 400 \rightarrow f_g = 0$
(17) endgültiger Flugaschegehalt	
$f = f_g + f_b$	$f = 0 + 94 = 94 \text{ kg/m}^3$
(18) endgültiger Gehalt an Gesteinskörnung	
$g = (1000 - z/\rho_z - f_b/\rho_f - w - p) \cdot \rho_g$	$g = (1000 - 283/3,10 - 94/2,30 - 176 - 15) \cdot 2,63$ $g = 1780 \text{ kg/m}^3$

*) $1,132 = 1,0 + 0,33 \cdot 0,4 = 1 + f/z \cdot k_f$

**) vergl. Ablaufdiagramm/Erläuterungen

Tabelle 5.4.3: 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 Bild 5.3)
 $\text{erf } w$ = erforderlicher Wasseranspruch (Erfahrungswert, s. auch Tab. 5.3.2) in l/m^3
 k_f = Anrechenbarkeitswert für Flugasche; Faktor für die Anrechnung der Flugaschezugabe auf den Wasserzementwert in der Formel $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z+k_f \cdot f_b)$
 $\min z$ = Mindestzementgehalt (s. Tab. 2) in kg/m^3
 $\min z_f$ = Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche (s. Tab. 2) in kg/m^3
 $\min f_b$ = Mindestflugaschegehalt (s. Tab. 2) bei Reduzierung des Zementgehalts in kg/m^3
 $\text{erf } mk$ = erforderlicher Mehlkorngelalt in kg/m^3 entsprechend den vorliegenden Erfahrungen
 $\text{zul } mk$ = höchstzulässiger Mehlkorngelalt 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 = Kornrohddichte der Flugasche in kg/dm^3
 ρ_g = Kornrohddichte der Gesteinskörnung in kg/dm^3
 ρ_z = Kornrohddichte des Zements in kg/dm^3

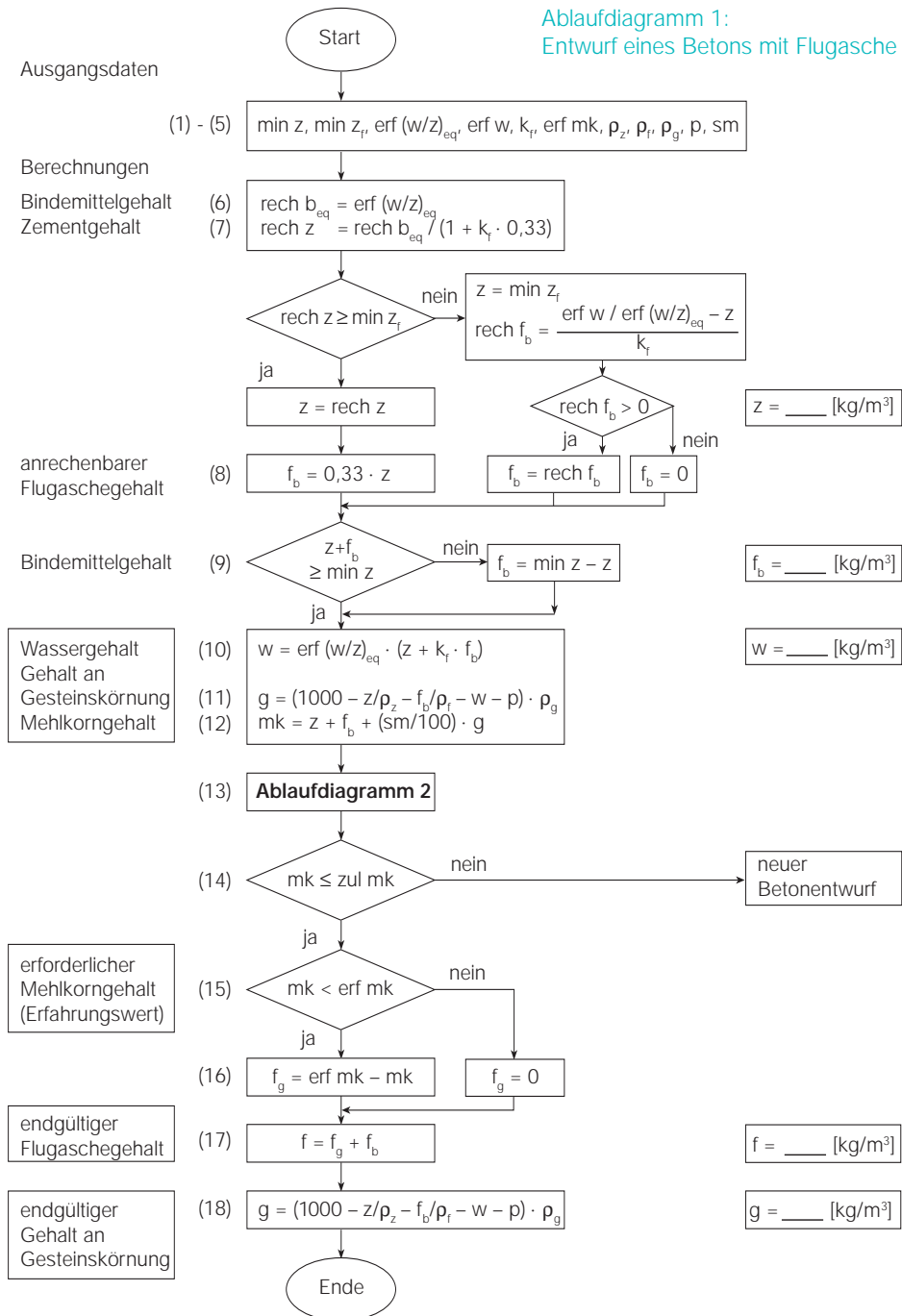
Rechengrößen/Hilfsgrößen

- $\text{rech } b_{\text{eq}}$ = 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
 $\text{rech } z$ = $\text{rech } b_{\text{eq}} / (1+k_f \cdot 0,33)$
 $mk1$ = zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Zementmenge
 $mk2$ = zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Verwendung von Zusatzstoffen
 $mk3$ = zulässiger Mehlkornanteil abhängig von der Gesteinskörnung
 f_g = Flugaschegehalt in kg/m^3 , der über den anrechenbaren Anteil hinausgeht

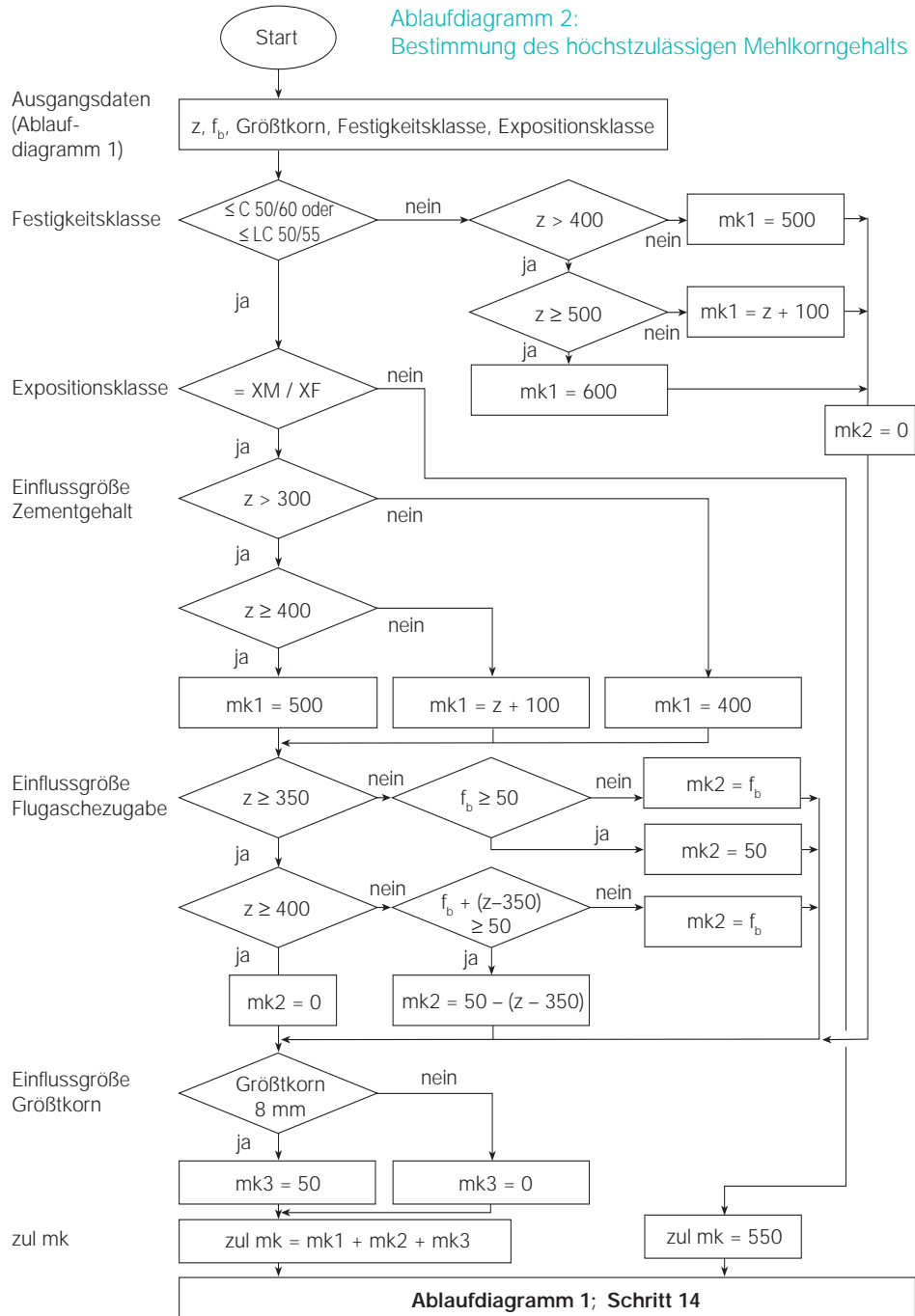
Ergebniswerte

- z = Zementgehalt in kg/m^3
 f_b = anrechenbarer Flugaschegehalt in kg/m^3 . Es gilt $f_b \leq 0,33 z$
 w = Wassergehalt in l/m^3
 f = Gesamter Flugaschegehalt in kg/m^3
 (kann größer sein als der anrechenbare Anteil $f_b \leq 0,33 z$; $f = f_b + f_g$)
 g = Gehalt an Gesteinskörnung in kg/m^3
 mk = Mehlkorngelalt im Beton in kg/m^3

Ablaufdiagramm 1:
Entwurf eines Betons mit Flugasche



Ablaufdiagramm 2:
Bestimmung des höchstzulässigen Mehlskorngehalts



6 Anwendungsmöglichkeiten

6.1 Massenbeton

An Massenbeton für die Herstellung von Fundamenten, Bodenplatten und sonstigen großvolumigen Bauteilen (Beton für massige Bauteile) sind betontechnologisch besondere Anforderungen zu stellen. Nach den Vorgaben für die Bauausführung sind die Betonzusammensetzung, die Frischbetoneigenschaften (z. B. Konsistenz und Erstarrungsverzögerung) und die Festbetoneigenschaften (z. B. Entwicklung der Hydratationswärme und Bemessungsalter von 56 bzw. 90 Tagen) festzulegen bzw. nachzuweisen sowie die Art und Dauer der Nachbehandlung zu bestimmen.

Um möglichst rissefreie Bauteile zu erhalten, d.h. Spannungen aus Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilkern und -randzone auf ein Mindestmaß zu reduzieren, ist die Zementauswahl für den Beton hinsichtlich der Entwicklung der Hydratationswärme von besonderer Bedeutung.

Als Bindemittelkomponente, die einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung der Hydratationswärme leistet, hat sich Flugasche nach DIN EN 450 bewährt. So kann beispielsweise beim Austausch von 50 % Zement gegen Flugasche die Hydratationswärme um etwa 50 % gesenkt werden.

Abweichend von den derzeitigen Normvorgaben kann bei Betonen mit Zustimmung im Einzelfall der maximale Anteil Flugasche im Gesamtbindemittel in Abhängigkeit von der Zementart gemäß Tabelle 6.1 festgelegt werden. Ergänzende Empfehlungen sind in [MB03] enthalten.

Tabelle 6.1: Zusammensetzung von Beton für massige Bauteile mit Zustimmung im Einzelfall

Betonfestigkeitsklasse		B 25		B 35	
Zementgehalt z	kg/m ³	180		225	
Flugaschegehalt f	kg/m ³	200		160	
Wassergehalt w	kg/m ³	170		160	
w/(z+f)		0,45		0,42	
w/z		0,94		0,71	
Sieblinienbereich		0/32		0/16	
Zusatzmittelart		FM	VZ	FM	VZ
Zusatzmittelmenge	M.-% v. z	1,0 ... 1,2	0,4 ... 0,8	0,9 ... 1,2	0,3 ... 0,5

Es ist nachgewiesen, dass bei diesen Flugaschegehalten der Ca(OH)₂-Gehalt im Beton ausreichend hoch ist, um die für den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderliche Alkalität des Betons zu gewährleisten [8], [21], [22].

6.2 Hochfester Beton

Für stark auf Druck beanspruchte Bauteile kann der Einsatz von hochfesten Betonen als Ortbeton wie auch als Fertigteil – ob vorgespannt oder schlaff bewehrt – wirtschaftlich sein.

Die Wirtschaftlichkeit kann sowohl durch schlankere Bauteile als auch durch verminderten Bewehrungsanteil erreicht werden. Hinzu kommt, dass hochfeste Betone im Vergleich zu normalen Betonen eine verbesserte Dauerhaftigkeit aufweisen, die zu einem erhöhten Widerstand gegenüber eindringenden beton- und stahlangreifenden Stoffen (z.B. Sulfate, Säuren, Chloride) sowie zu einem verbesserten Frost-Tausalz widerstand führt. Die Anwendungsregeln für hochfeste Betone wurden im Wesentlichen unverändert in die neue Betonnorm DIN 1045-2 überführt, die nun für Betone bis zu den Festigkeitsklassen C80/95 bzw. LC60/66 gilt. Für Betone der Festigkeitsklassen C95/105, C100/115 sowie LC70/77 und LC80/88 ist nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.7, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Es hat sich in Laboruntersuchungen (s. Bild 6.2) gezeigt, dass bei Zementgehalten zwischen 350 kg/m^3 und 500 kg/m^3 und Flugaschegehalten zwischen 50 kg/m^3 und 150 kg/m^3 bei moderaten Fließmitteldosierungen plastische bis weiche hochfeste Betone bis zur Festigkeitsklasse C70/85 zielsicher ohne zusätzliche Verwendung von Silikastaub hergestellt werden können [23].

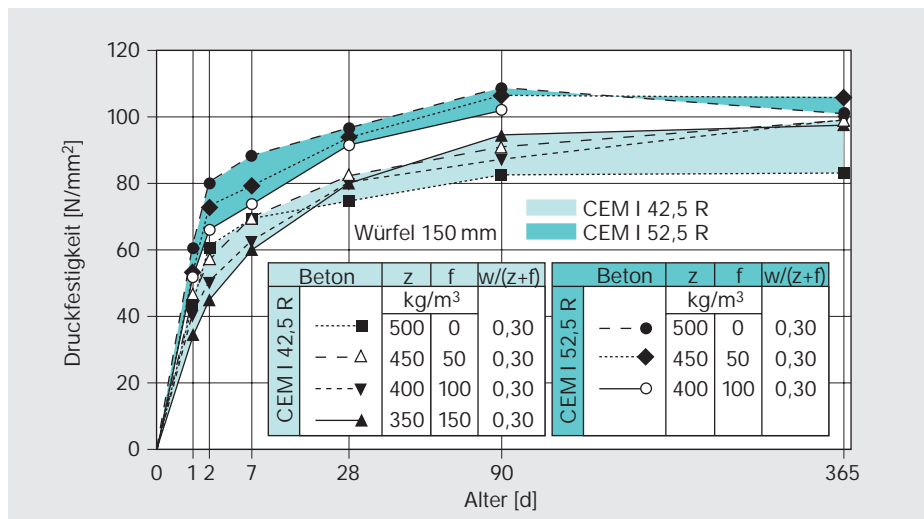


Bild 6.2: Druckfestigkeitsentwicklung bis zum Alter von 365 Tagen [24]

Durch umfangreiche Untersuchungen [24], [25] wurde nachgewiesen, dass die Wirksamkeit der Flugasche in Betonen mit $(w/z)_{\text{eq}} < 0,4$ über den bei normal festem Beton üblichen Anrechbarkeitswert k_f von 0,4 weit hinausgeht, weil Füllerwirkung und puzolanischer Festigkeitsbeitrag mit sinkendem w/z -Wert zunehmen. Es ist praxisgerecht, das Nachhärtungspotential der hochfesten Betone mit Flugasche in Ansatz zu bringen und die Festigkeitsnachweise nach 56 Tagen oder 90 Tagen durchzuführen [MB 05].

Die im Regelwerk für hochfesten Beton angegebenen Bemessungswerte für den E-Modul sowie für die Schwind- und Kriechmaße können auch bei Betonen mit hohen Flugaschegehalten ($> 120 \text{ kg/m}^3$) und niedrigen Zementgehalten ($\leq 350 \text{ kg/m}^3$) angewendet werden.

Deshalb können die Kennwerte für die Formänderung und die Bemessungsregeln der DIN 1045-1 direkt angewendet werden.

Der Vorteil hochfester Betone mit Flugasche und ohne Silikastaub liegt im Vergleich zu Betonen mit Silikastaub neben wesentlichen wirtschaftlichen Aspekten und besserer Verarbeitbarkeit in der geringeren Hydratationswärmeentwicklung, so dass hohe Temperaturen im Bauteil vermieden und damit Zwangsspannungen verringert werden können.

Die in Tabelle 6.2 aufgeführten Anwendungsbeispiele belegen die Möglichkeit einer zielsicheren Herstellung von hochfesten Betonen unter Verwendung von Flugasche [26], [27]. Ergänzende Empfehlungen sind in [MB06] enthalten.

Tabelle 6.2: Zusammensetzung hochfester Betone

Bauteil		Wände	Stützen	Fertigteilstützen
Betonfestigkeitsklasse		B 65	B 90	B 115
Konsistenzbereich		KP / KF	KF	KP / KF
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	400	430	470
Flugaschegehalt f	kg/m ³	100	90	120
Silikastaubgehalt s ¹⁾	kg/m ³	–	45	35
Wassergehalt w	kg/m ³	155 ²⁾	125 ³⁾	120 ²⁾
Gesteinskörnung		Mainsand 0/2 Rheinkies 2/16	Rheinsand 0/2 Rheinkies 2/16	Mainsand 0/2 Basaltsplitt 2/5 Basaltsplitt 11/16
Sieblinienbereich		A 16 / B 16	A 16 / B 16	A 16 / B 16
Zusatzmittelart		FM	BV	FM
Zusatzmittelmenge	M.-% v. z	2,0	1,4	2,0

¹⁾ als Silikasuspension eingesetzt ²⁾ ohne Wasseranteil aus Fließmittel ³⁾ mit Wasseranteil aus Silikasuspension

6.3 Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (FD Beton)

Betone für Betonbauten, die eine besondere Dichtheit aufweisen und die ohne Oberflächenabdichtung beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen mit diesen unmittelbar in Kontakt kommen, müssen besonders sorgfältig zusammengesetzt und eingebaut werden. Grundsätzlich wird in der DAFStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ zwischen flüssigkeitsdichtem Beton (FD-Beton) und flüssigkeitsdichtem Beton nach Eignungsprüfung (FDE-Beton) unterschieden.

Für die Zusammensetzung des FD-Betons mit Flugasche bis zu einer Menge von $f/z = 0,25$ und einem äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq} < 0,5$ ist ein Gesamtbindemittelmittelvolumen von $\leq 290 \text{ l/m}^3$ Beton festgelegt.

Ziel dieser Festlegung ist es, eine möglichst dichte Bindemittelmatrix zu erreichen. Die Betonzusammensetzung erfordert daher neben einem niedrigen Porenraum (Wassergehalt) einen möglichst hohen Volumenanteil an Feststoff. Aufgrund der gegenüber Zement geringeren Kornrohichte ($2,3 \text{ kg/dm}^3$ gegenüber $3,1 \text{ kg/dm}^3$) füllt Flugasche bei gleichem Gewichtsanteil einen höheren Volumenanteil mit Feststoff aus. Insofern bietet es sich gerade bei FD-Beton an, eine Betonzusammensetzung mit einem größtmöglichen anrechenbaren Anteil Flugasche anzustreben. Unter diesem Ansatz können bei der Grenzmenge von 290 Litern Leim pro Kubikmeter Beton bei der Verwendung von Flugasche etwa 25 Liter mehr Feststoffvolumen in die Matrix eingebracht werden. Hierbei werden die Randbedingungen der Anrechenbarkeit mit dem k_f -Wert 0,4 und $f_b \leq 0,25 z$ eingehalten. Die vorgenannte Richtlinie bezieht sich auf Beton nach DIN 1045 : 1988-07. Eine Überarbeitung und Anpassung an die neuen Betonnormen ist vorgesehen.

6.4 Recyclingbeton – Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton hat mit seiner Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ die Voraussetzung für die Verwendung dieser Gesteinskörnungen im Beton geschaffen.

Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung muss die Anforderungen der DIN 1045-2 erfüllen. Für Bauvorhaben, die nach dieser DAfStb-Richtlinie und davor mit Zustimmung im Einzelfall

Tabelle 6.4: Zusammensetzung von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung

Bauteil/Verwendung		Wände ¹⁾	Massenbeton ²⁾	Außenbauteile ²⁾	Füllbeton ³⁾
Betonfestigkeitsklasse		B 35	B 35	B 35	B 15
Konsistenzbereich		KR	KR	KR	KR
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	290	300	310	240
Flugaschegehalt f	kg/m ³	70	50	40	40
wirksamer Wassergehalt w	kg/m ³	201	177	183	195
$w/(z+0,4 f_b)$		0,63	0,55	0,56	0,76
w/z		0,69	0,59	0,59	0,81
Gesteinskörnung Gehalt	kg/m ³	1632	1715	1738	1765
Anteil rezykliert	M.-%	58	33	20	65
Zusatzmittelart		BV	BV	FM	–
Zusatzmittelmenge	M.-% v. z	1,8	1,5	1,3	–

¹⁾ Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

²⁾ Bauverein AG Darmstadt, Hundertwasserhaus

³⁾ Diepmannstalbrücke A1, Remscheid

erstellt wurden, kam insbesondere zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit Flugasche in Mengen von 40 kg/m^3 bis 70 kg/m^3 Beton zum Einsatz.

In Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung nach dem Entwurf von DIN 4226-100 ist Flugasche zur Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften eine unverzichtbare Komponente.

6.5 Sandreicher Beton

In einigen Bundesländern weisen Vorkommen an Gesteinskörnungen ein Sand-Kies-Verhältnis von 80/20 M.-% auf.

Zur Verwertung dieses Sandüberschusses wurde eine Technologie für sandreiche Betone unter Verwendung von $\geq 80 \text{ kg/m}^3$ Flugasche entwickelt [28]. Hochwirksame Fließmittel in

Tabelle 6.5: Zusammensetzung und Kennwerte sandreicher Betone im Vergleich zu Betonen mit üblichem Korngemisch

		übliches Korngemisch	sandreich 1	sandreich 2
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	280	320	270
Flugaschegehalt f	kg/m ³	60	80	130
Wassergehalt w	kg/m ³	188	208	200
w / (z+0,4 f _p)		0,62	0,59	0,67
Gesteinskörnung				
Sand 0/2a	M.-%	35	80	80
Kiessand 2/8	M.-%	29	–	–
Kies 8/32	M.-%	36	20	20
Zusatzmittelart		BV	FM	FM
Zusatzmittelmenge	kg/m ³	0,6	6,4	6,4
Frisch- und Festbetonkennwerte				
Ausbreitmaß a ₄₅	cm	43	59	59
Luftgehalt	Vol.-%	2,0	3,5	2,0
Druckfestigkeit	N/mm ²	37	35	39

Kombination mit Flugasche machen übliche Zementgehalte für eine praxismgerechte Verarbeitbarkeit möglich.

Die Zugabe von Flugasche wirkt sich im sandreichen Beton physikalisch durch eine Reduzierung des Luftporengehalts des Frischbetons aus.

Der Einsatz von Flugasche in sandreichem Beton trägt damit zur besseren Rohstoffnutzung bei und verbessert seine Wirtschaftlichkeit.

6.6 Spritzbeton

Im modernen Tunnelbau, Tiefbau und bei der Sicherung von tektonisch oder erosionsbedingten Gefahrenzonen im Gebirge ist Spritzbeton mittlerweile unverzichtbar. Neben hohen Anforderungen an die Festbetoneigenschaften sind zeitgesteuerte Verarbeitbarkeit und

Tabelle 6.6: Zusammensetzung von Spritzbeton

Verfahren		Trockenspritzbeton	Nassspritzbeton
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	310 ... 360	360 ... 380
Flugaschegehalt f	kg/m ³	30 ... 50	50 ... 80
Wassergehalt w	kg/m ³		< 180
Sieblinienbereich		0/11	0/11
Mehlkorngehalt	kg/m ³	≥ 470	≥ 550

Frühfestigkeit wichtige Anforderungskriterien an Spritzbeton. Man unterscheidet Trockenspritzverfahren (Wasserzugabe erst an der Spritzdüse) und Nassspritzverfahren (Druckförderung der feuchten Mischung), die je nach Randbedingung vor Ort und nach den gegebenen Produktions- und Transportmöglichkeiten verwendet werden. Flugasche wird vor allem im Nassspritzbeton verwendet. Mit Flugasche werden Vorteile bei der Förderung sowie durch Reduzierung des auftretenden Rückpralls erzielt. Außerdem lassen sich wegen der rheologischen Verbesserung des Betons homogenere Oberflächen erreichen [29]. Spritzbeton mit Flugasche zeichnet sich auch durch eine gute Haftung am Untergrund aus.

6.7 Selbstverdichtender Beton (SVB)

Selbstverdichtende Betone (Setzfließmaß von ≥ 700 mm zum Zeitpunkt des Einbaus) sind Hochleistungsbetone, die sich beim Einbringen in die Schalung aufgrund ihrer hohen Mörtelgehalte ohne Entmischung und Bluten gleichmäßig verteilen und sich ohne den Einsatz von Verdichtungsgeräten unter Eigengewicht selbst verdichten und entlüften.

Die Voraussetzungen für eine zielsichere Herstellung von selbstverdichtendem Beton sind eine nach Volumenanteilen ermittelte Betonzusammensetzung mit einem hohen Mörtelgehalt, ein hochwirksames Fließmittel sowie gleichbleibende Eigenschaften der Ausgangsstoffe. Der Anteil an grober Gesteinskörnung > 4 (2) mm beträgt in der Regel 50 % bis 65 % des Feststoffvolumens, der Anteil an feiner Gesteinskörnung < 4 (2) mm entspricht etwa 40 % des Mörtelvolumens. Ca. 60 % des Mörtelvolumens werden als tragfähige, niedrig viskose Suspension aus dem Mehlkorn, Wasser und Fließmittel hergestellt. Der Mehlkorn-

Tabelle 6.7: Zusammensetzung und Kennwerte selbstverdichtender Betone [MB07]

		SVB 1	SVB 2	SVB 3
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM II/B-S 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM II/A-S 52,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³ / l/m ³	280/93	290/94	265/86
Flugaschegehalt f	kg/m ³ / l/m ³	330/146	315/140	340/145
Wassergehalt w ¹⁾	kg/m ³ / l/m ³	168	181	175
w / (z+0,4 f _b) ²⁾		0,53	0,55	0,58
w/z		0,60	0,62	0,66
Gesteinskörnung				
Sand 0/2	kg/m ³ / l/m ³	690 / 262	725 / 280	700 / 266
Kiessand 2/8	kg/m ³ / l/m ³	440 / 167	-	440 / 167
Kies 8/16	kg/m ³ / l/m ³	360 / 139	770 / 285	360 / 139
Zusatzmittelart		FM	FM	FM
Zusatzmittelmenge	kg/m ³ / l/m ³	5,0 / 4,5	6,4 / 6,0	5,5 / 5,0
Mehlkorngehalt	kg/m ³ / l/m ³	610 / 239	605 / 234	605 / 231
Mörtelgehalt	kg/m ³ / l/m ³	1468 / 669	1511 / 695	1408 / 672
Frisch- und Festbetonkennwerte				
Setzfließmaß	mm	680	700	680
Druckfestigkeit	N/mm ²	60	69	77
Festbetonrohddichte	kg/m ³	2330	2264	2320

¹⁾ einschließlich Wasser aus FM

²⁾ anrechenbare Flugasche $f_b = 0,33 z$

gehalt im Mörtel setzt sich dabei additiv zusammen aus den Ausgangsstoffen Zement, Flugasche und Gesteinskörnung < 125 µm.

Der Mehlkorngehalt ist je nach Anwendungsgebiet durch rheologische Voruntersuchungen am Bindemittelleim und am Mörtel zu ermitteln und zu optimieren. In der Regel liegen die Gehalte an Zement und Flugasche in Abhängigkeit von der Art der Gesteinskörnung und des Größtkorns insgesamt zwischen 500 kg/m³ und 625 kg/m³, wobei der Gehalt an Flugasche mit > 250 kg/m³ anzusetzen ist (Beispiele s. Tafel 6.7). Durch den Einsatz hochwirksamer Fließmittel entspricht der Wasserbedarf selbstverdichtender Betone dem normaler Betone [30]. Ergänzende Empfehlungen sind in [MB07] enthalten.

6.8 Fahrbahndeckenbeton

Aufgrund fehlender Nachweise darf Flugasche dem Beton von Fahrbahndecken zwar zugegeben, aber nicht auf den Zementgehalt angerechnet werden. Als Mindestzementgehalt wird nach ZTV-Beton StB 98 eine Menge von 340 kg/m³ vorgeschrieben. Mit einem Demonstrationsbauvorhaben „Werkstraße“, Baujahr 1990, wurde gezeigt, dass die Verwen-

Tabelle 6.8: Zusammensetzung von Fahrbahndeckenbetone ohne und mit Flugasche

		Beton ohne Flugasche	Beton mit Flugasche
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	330	270
Flugaschegehalt f	kg/m ³	–	90
Wassergehalt w	kg/m ³	145	141
w / (z+0,4 f _b) ¹⁾		–	0,47
w/z		0,44	0,52
Gesteinskörnung			
Sand 0/2	kg/m ³	534	505
Grauwackesplitt 5/11	kg/m ³	186	201
Basaltsplitt 8/22	kg/m ³	1263	1233
Zusatzmittelart		LP	LP
Zusatzmittelmenge	kg/m ³	1,32	1,20
Mehlkorngehalt	kg/m ³	364	391

¹⁾ mit $f_b = 0,25 z$

zung von Flugasche auch im Beton für Fahrbahndecken positiv auf Frisch- und Festbetoneigenschaften wirkt und dieser allen Anforderungen geltender Regelwerke gerecht wird. Dies wurde in einem über sechs Jahre begleitenden Untersuchungsprogramm nachgewiesen [31].

Abweichend von der zu Baubeginn geltenden ZTV-Beton StB 78 (82) wurde der Beton entsprechend den Angaben in Tabelle 6.8 zusammengesetzt und mit einem Referenzbeton verglichen.

Durch gutachterliche Untersuchungen und Stellungnahmen zur Beurteilung des Gebrauchs- und Substanzwerts [32] der Versuchsstrecke und zur Verwendung von Flugasche in Beton mit hohem Frost-Tausalz widerstand für den Straßenbau [33] wurden Grundlagen für eine Änderung des geltenden Regelwerks ZTV-Beton StB geschaffen.

6.9 Beton mit hohem Frost- und Frost-Tausalz widerstand

Bei reinem Frostangriff (XF1 und XF3) kann nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 Flugasche auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet werden. Wie Bild 6.9.1 zeigt, wird der Frostwiderstand von Beton bei teilweisem Austausch von Zement durch Flugasche nicht signifikant verändert. Die Anrechnung von Flugasche für Betone mit hohem Frost-Tausalz widerstand (Expositionsklassen XF2 und XF4) ist zur Zeit nicht zulässig, da die hierzu erforderlichen Nachweise bisher nicht erbracht wurden. Entsprechende Untersuchungen werden zur Zeit durchgeführt. Dass flugaschehaltige Betone bei Verwendung von CEM I- und CEM II-Zementen einen hohen Frost-Tausalz widerstand aufweisen, ist aus Bild 6.9.2 ersichtlich.

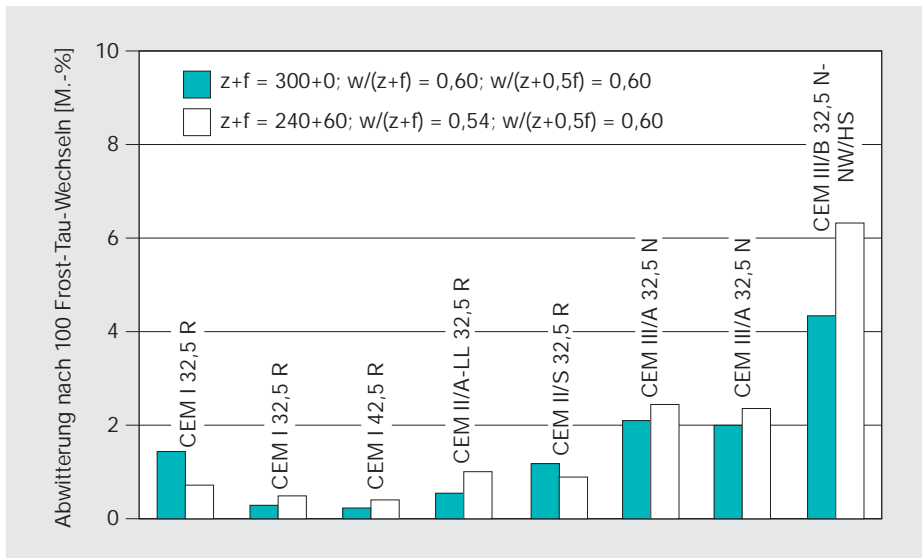


Bild 6.9.1: Einfluss von Flugasche auf die Frostabwitterung nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von der Zementart (ermittelt mit dem VDZ-Verfahren)

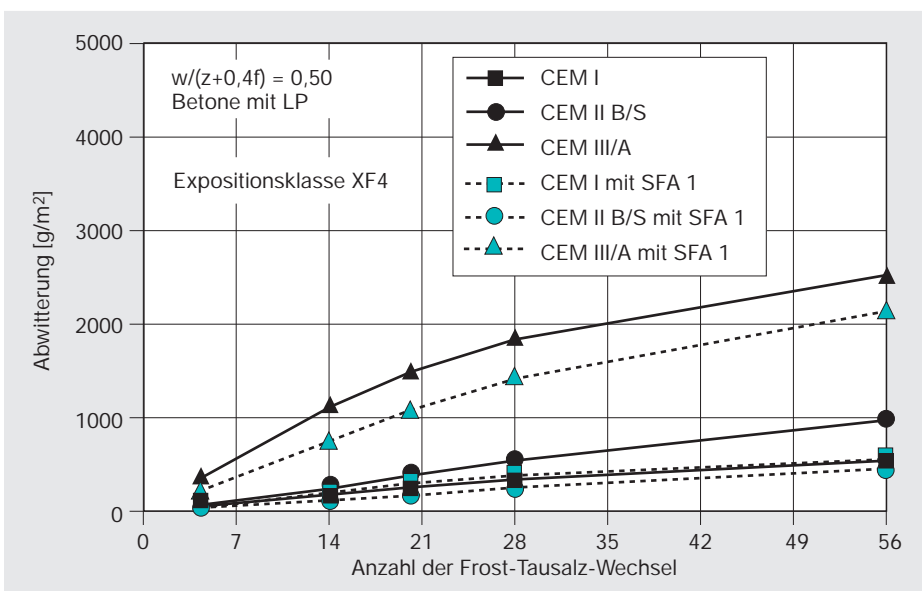


Bild 6.9.2: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand in Abhängigkeit von der Zementart (ermittelt mit dem CDF-Verfahren) [34]

6.10 Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff

Betone, die einen hohen Widerstand gegen den Angriff von Säuren aufweisen, bedürfen einer besonders aufwändigen Zusammensetzung. Entscheidend für ihre Dauerhaftigkeit ist neben dem sehr niedrigen äquivalenten Wasserzementwert und dem Bindemittelchemismus die dichtest mögliche Zusammensetzung der Gesteinskörnung, der Bindemittelkomponenten Zement, Flugasche und Silikastaub und ihr minimierter Anteil im Beton [35].

Diese dichtest mögliche Zusammensetzung des Gesamtgemisches aus Gesteinskörnung und Bindemittel erfolgt auf Grundlage der Idealsieblinie nach Fuller & Thompson von 1907.

Eine optimale Zusammensetzung der Bindemittelkomponenten Zement, Flugasche und Silikastaub findet man beispielsweise mit dem Verfahren zur Ermittlung des Wasseranspruches nach Punkte [36], mit welchem der Mindestwasserbedarf bei dichtester Lagerung der Einzelkomponenten und des Bindemittelgemisches bestimmt werden kann.

Da Flugaschen in der Regel einen geringeren Wasseranspruch als Zement aufweisen, entfalten sie bei diesen anspruchsvollen Bindemittelgemischen ihre ganze physikalische, rheologische Wirksamkeit mit hohem Haftverbund in der Matrix. Ohne Flugasche als Betonzusatzstoff sind derartige Hochleistungsbetone nicht herzustellen.

Eine Mischungszusammensetzung für einen säureresistenten Beton ist in Tabelle 6.10 dargestellt. Für Betone dieser Zusammensetzung ist aufgrund des niedrigen Zementgehalts eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Tabelle 6.10: Zusammensetzung eines Betons mit hohem Widerstand gegen Säureangriff [35]

Zementgehalt z	kg/m ³ / l/m ³	229 / 74
Flugaschegehalt f	kg/m ³ / l/m ³	67 / 28
Silikastaubgehalt s	kg/m ³ / l/m ³	22 / 9
z + f + s	kg/m ³ / l/m ³	318 / 111
Wassergehalt w	kg/m ³ / l/m ³	117
z + f + s + w	kg/m ³ / l/m ³	435 / 228
Gesteinskörnung		
Quarzmehl 0/0,05	kg/m ³	51
Sand 0/2	kg/m ³	459
Kiessand 2/8	kg/m ³	158
Kies 8/16	kg/m ³	1330
Zusatzmittelart		FM

7 Hinweis auf BVK-Betontechnische Merkblätter

Praktische Erfahrungen und neue Anwendungen 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 Flug-

asche im Beton sollen als Anregung zur Lösung eigener Betonaufgaben aber auch zur Optimierung vorhandener Rezepturen die BVK – Betontechnischen Merkblätter helfen, die Leistungsfähigkeit des Baustoffs Flugasche sinnvoll zu nutzen.

Die hier zusammengefassten Angaben und Empfehlungen wenden sich an den Fachmann und sind mit großer Sorgfalt und nach bestem Wissen des Herausgebers zusammengestellt. Sie ergänzen die BVK – Betontechnische Empfehlungen und erscheinen in loser Folge. Bisher sind erschienen:

- [MB01] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt Bohrpfahlbeton, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052101
- [MB02] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt Walzbeton, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052102
- [MB03] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt Massenbeton, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052103
- [MB05] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt k-Wert, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052105
- [MB06] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt Hochfester Beton, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052106
- [MB07] BVK – Betontechnische Merkblätter; Merkblatt Selbstverdichtender Beton (SVB) mit Flugasche, Ausgabe 2001; Bestell-Nr. 052107

8 Quellennachweis

8.1 Regelwerke

DIN EN 450:1995-01: Flugasche für Beton

DIN EN 196-21:1990-03: Prüfverfahren für Zement; Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement

DIN EN 197-1:2001-02: Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

DIN 1164:2000-11: Zement mit besonderen Eigenschaften; Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis

DIN 4226-1:2001-07: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel; Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen

DIN 4226-100: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel; Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen

DIN 1045-2:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN EN 206-1:2001-07: Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

DIN 1045:1988-06: Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung

DIN 4014:1990-03: Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten

- DIN V 4026-500:1996-04: Verdrängungspfähle; Herstellung
- DIN 4126:1986-08: Ortbeton-Schlitzwände; Konstruktion und Ausführung
- DAfStb-Richtlinie „Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau“ 1996
- DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ 1998
- DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädliche Alkalireaktionen im Beton“ (Alkali-Richtlinie) 1997
- Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinien für die Zuteilung von Zulassungen für anorganische Betonzusatzstoffe - Zulassungsrichtlinien (Fassung Juni 1993). Mitteilung DIBt 24 (1993) H. 4, S.122-136
- British Standards BS 8110, Part 1: 1985 - Structural use of concrete
- ZTV-ING, T. 3, A. 1: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 3: „Massivbau“, Abschnitt 1 „Beton“ (Entwurf 2001)
- ZTV Beton - StB 78 (82): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 1982
- ZTV Beton - StB 98: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 1998

8.2 Literatur

- [1] Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. Beton 40 (1990) H. 12, S. 519-523
- [2] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. DAfStb Heft 448
- [3] Hüttl, R.: Der direkte Nachweis des Reaktionsmechanismus von Steinkohlenflugasche. Beton-Informationen 40 (2000) H. 5, S. 63-75
- [4] Schießl, P.; Härdtl, R.: Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugasche im Beton nach DIN 1045 bzw. EN 206. Vorträge zur VGB -Konferenz vom 4./5. Dez. 1991, Vortrag 7, VGB-Kraftwerkstechnik, Essen 1992
- [5] Kern, E.; Hegger, J.: 19000 m³ Beton für Fundamentplatte in einem Arbeitsgang eingebracht. Beton-Informationen 31 (1991) H. 5, S. 51-53
- [6] Kern, E.: Erfahrungen mit Flugasche als Betonzusatzstoff aus der Sicht der Bauausführung. VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992) H. 6, S. 565-572
- [7] 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
- [8] Schießl, P., Härdtl, R.: Betone für massige Bauteile. Beton 46 (1996) H. 11, S. 668-672
- [9] 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
- [10] Wierig, H.-J.; Scholz, E.: Carbonatisierung von Beton mit Steinkohlenflugasche. VGB-Konferenz Flugasche im Beton - Fortschritte in der Betontechnologie, VGB-TB 702, Vortrag 6, VGB-Kraftwerkstechnik, Essen 1991
- [11] Schießl, P.; Wiens, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl im Beton. In:13. Internationale Baustofftagung, ibausil 24.-26. September 1997, S. 1.0161-1.0173, Weimar 1997
- [12] 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

- [13] 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
- [14] Schießl, P.; Härdtl, R.: Einfluß von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben F 262 vom 5.10.1992 (AIF-Nr. 7690)
- [15] Schießl, P.; Wiens, U.; Schröder, P.; Müller, Ch.: Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugasche; beton 51 (2001) H. 1, S. 10-17, H. 2, S. 66-71
- [16] Backes, H.-P.; Schneider, E.: Verhalten flugaschehaltiger Mörtel bei Angriff kalklösender Kohlensäure. TIZ international 112 (1988) H. 1, S.42-45
- [17] Stanton T. E.: Expansion of concrete trough reaction between cement and aggregate. Proc.Am.Soc. Civil Eng. 66 (1940) S. 1781-1811
- [18] Schäfer, E.; Meng, B.: Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion. beton 51 (2001) H. 10, S. 577-584
- [19] Härdtl, R.; Schießl, P.: Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die Alkali-reaktion im Beton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 62 (1996) S. 94-101
- [20] Weber, R.; Tegelaar, R.: Guter Beton. Ratschläge für die richtige Betonherstellung. Verlag Bau+Technik 20. Auflage, 2001
- [21] Koch, H.-J.; Lutze, D.: Sonderbeton für Fundamentplatten. Genehmigung im Einzelfall für das Kraftwerk Schkopau. Beton 45 (1995) H. 4, S. 227-233
- [22] Ehrlich, N.; Schmidt, D.; Weise, F.: Betonsortenauswahl stark wasser- und frostbelasteter Massenbetonbauwerke. Beton- und Stahlbetonbau 95 (2000) H. 8, S. 474-483
- [23] Wiens, U.; Schröder, P.; Müller, Ch.: Verwendung von Steinkohlenflugasche (SFA) in Hochleistungsbetonen. VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte, Herstellung von Hochleistungsbetonen mit Steinkohlenflugasche, VGB-TW 709, VGB Kraftwerkstechnik, Essen 2000
- [24] Müller, Ch.; Schröder, P.; Schießl, P.: Hochleistungsbeton mit Steinkohlenflugasche. In: Vorträge zur VGB/BVK Fachtagung Flugasche im Beton, VGB Kraftwerkstechnik, Essen 1998
- [25] Zimbelmann, R., K.; Junggunst, J.: Hochleistungsbeton mit hohem Flugaschegehalt. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), H. 2, S. 58-65
- [26] Hirschfeld, M.; Dams, S.: B 90 für die Shadow-Arkaden. Beton 43 (1993) H. 11, S. 569-575
- [27] Theile, V.; Hildebrandt, H.; Brüggemann, H.-G.: Hochhausensemble mit projektbezogenen Sonderbetonen. Beton 46 (1996) H. 9, S. 535-540
- [28] Sievers, H.: Sandreiche Betonzusammensetzungen. Beton 47 (1997), H. 1, S. 20-25
- [29] Brötz, K.; Löschnig, P.; Müller, F.: Spritzbeton am Schulwaldtunnel. Tunnel Heft 6 (2000)
- [30] König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F.: Selbstverdichtender Beton. Innovation im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Bauwerk Verlag, 2001
- [31] Koch, H.-J.; Lutze, D.: Fahrbahndecken aus Beton - Versuchsstrecke mit Steinkohlenflugasche. Beton 47 (1997) H. 6, S. 319-322
- [32] Schniering, A.; Lutze, D.: Fahrbahndecke aus Beton mit Steinkohlenflugasche als Bindemittelkomponente. Straße und Autobahn 49 (1998) H. 12, S. 679-684
- [33] Schießl, P.: Gutachtliche Stellungnahme zur Verwendung von Steinkohlenflugasche in Beton mit hohem Frost-Tausalz-widerstand für den Straßenbau, B 2222/2
- [34] Brameshuber, W.; Pierkes, R.; Uebachs, St.: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-widerstand von Beton. VGB Forschungsprojekt P 203 - laufend -
- [35] Hüttl, R.; Hillemeier, B.: Hochleistungsbeton - Beispiel Säureresistenz. Betonwerk und Fertigteil-Technik 66 (2000), S. 52-59
- [36] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken - Forschen, Messen, Optimieren. VDB Fachtagung 2002: Beton - Entwicklungen und Tendenzen, Bremen, Mai 2002

Tabelle 2: Grenzwerte
für die Betonzusammensetzung
von Beton
nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2



Seit 1970 sind in Deutschland mehr als 40 Millionen Tonnen Flugasche aus Steinkohlekraftwerken in 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:

- eine Reduktion des Wasseranspruchs des Frischbetons
- eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit des Frischbetons
- eine Verbesserung der Pumpfähigkeit des Frischbetons
- eine geringere Wasserabsonderung/Sedimentation des jungen Betons
- eine Verringerung der Hydratationswärme des jungen Betons, dadurch eine Reduzierung der Reißneigung
- eine Reduzierung von Ausblühungen
- eine bessere Nacherhärtung des Festbetons
- eine höhere Endfestigkeit des Festbetons
- eine Verbesserung der Sichtbetonflächen
- ein dichteres Gefüge, hierdurch ein größerer Widerstand des Betons gegen chemischen Angriff, hierdurch eine Verbesserung des Korrosionsschutzes der Bewehrung, z.B. durch einen höheren Chlorideindringwiderstand
- die Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand in Kombination mit CEM I, II und III anstelle von Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zementen)

Erst die gewissenhafte Abstimmung aller Komponenten des Betons führt zu einer optimalen Einstellung aller Eigenschaften. Es ist die Aufgabe des entwerfenden Betoningenieurs, diese Wirkungen optimal zu nutzen und in der Eignungsprüfung nachzuweisen.

Die vorliegenden Empfehlungen des BVK stellen ihm dazu wichtige Daten aus den Vorschriften und Regelwerken sowie Erfahrungen aus Forschung und Praxis an die Seite.

Tabelle 2: Grenzwerte für die Betonzusammensetzung von Beton nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2

1	kein Korrosions- oder Angriffsrisiko	Bewehrungskorrosion											Betonangriff										weitere Anwendungsfälle										
		durch Karbonatisierung verursachte Korrosion				durch Chloride verursachte Korrosion			Frostangriff				aggressive chemische Umgebung			Verschleißangriff ^h			Unterwasserbeton	Bohrpfahlbeton		Schlitzwandbeton	FD-Beton										
						Chloride außer aus Meerwasser		andere Chloride als Meerwasser	ohne		mit									ohne				mit		0/32		0/16					
		Taumittel												13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Expositionsklassen	1	X0 ^a	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2		XF3		XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3	UW	BP1	BP2	SW	FD				
höchstzulässiger Wasserzementwert	(w/z) _{eq}	2	-	0,75	0,75	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,60	0,55 ^g	0,50 ^g	0,55	0,50	0,50 ^g	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		
Mindestdruckfestigkeitsklasse ^c	3	C8/10	C16/20		C20/25	C25/30	C30/37 ^e	C35/45 ^e	C35/45 ^e	C30/37 ^e	C35/45 ^e	C35/45 ^e	C25/30	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37	C25/30	C35/45 ^e	C35/45 ^e	C30/37 ^e	C30/37 ^e	C35/45 ^e	C35/45 ^e	C25/30 ²⁾	C25/30 ²⁾	C25/30 ²⁾	C25/30 ²⁾	-			
Mindestzementgehalt ^d in kg/m ³	min z	4	-	240	240	260	280	300	320 ^b	320 ^b	300	320 ^b	320 ^b	280	300	320	300	320	320	280	320	320	300 ¹⁾	300 ¹⁾	320 ¹⁾	320 ¹⁾	350	350	400	350	270		
Bei Verwendung von Flugasche, Anrechnungskriterien entsprechend DIN EN 206-1 / DIN 1045-2, Absatz 5.2.5.2.2																																	
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche in kg/m ³	min z _f	5		240	240	240	270	270	270	270	270	270	270	300 ²⁾	320 ²⁾	270	270	320 ²⁾	270	270	270	270	270	270	270	270	270 ²⁾	270 ²⁾	270 ²⁾	270 ²⁾	270		
zulässiger anrechenbarer Flugaschegehalt: f/z = 0,33 bei min z _f	max f _b bei min z _f	6		80	80	80	90	90	90	90	90	90	90	-	-	90	90	-	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	68		
Mindestflugaschegehalt	min f _b	7		0	20	10	30	0	0	30	0	0	10	-	-	30	50	0	10	50	50	30	30	50	50	80	80	130	80	-			
k-Wert	k _f	8		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0	0	0,4	0,4	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4			
Mindestluftgehalt in Vol.-%		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	f	-	f	-	f _i	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Andere Anforderungen		10	Gesteinskörnungen mit Regelanforderungen und zusätzlich Widerstand gegen Frost bzw. Frost- und Taumittel (siehe DIN 4226-1)											-	-	i																	
		11												F ₄	MS ₂₅	F ₂	MS ₁₈																3)
Anforderungen an den Zement		12	Zuordnung der Zemente gemäß Tabelle F3 der DIN 1045-2																														

Fußnoten:

- a Nur für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall.
- b Für massige Bauteile (kleinste Bauteilabmessung 80 cm) gilt der Mindestzementgehalt von 300 kg/m³.
- c Gilt nicht für Leichtbeton.
- d Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden. In diesem Fall darf b) nicht angewendet werden.
- e Bei Verwendung von Luftporenbeton, z. B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger.

- f Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm ≥ 5,5 Vol.-%, 16 mm ≥ 4,5 Vol.-%, 32 mm ≥ 4,0 Vol.-% und 63 mm ≥ 3,5 Vol.-% betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderung um höchstens 0,5 Vol.-% unterschreiten.
- g Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt werden, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z angerechnet werden.
- h Die Gesteinskörnungen bis 4 mm Größtkorn müssen überwiegend aus Quarz oder aus Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand. Die Körner aller Gesteinskörnungen sollen mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben. Das Korngemisch soll möglichst grobkörnig sein.

- i Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfesten Betonen.
- j Erdfeuchter Beton mit w/z ≤ 0,40 darf ohne Luftporen hergestellt werden.
- k Zum Beispiel Vakuumieren und Flügelglätten des Betons.
- l Schutzmaßnahmen siehe DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2.

¹⁾ Der Wasserzementwert muss kleiner sein, wenn andere Anforderungen es erfordern (z.B. Expositionsklasse XA2).
²⁾ DIN EN 206-1/DIN 1045-2 treffen hier keine Festlegungen. Die vom BVK gemachten Angaben orientieren sich an den üblichen Anforderungen der Expositionsklassen und stellen somit eine sachliche Orientierung dar.
³⁾ Näheres siehe „BVK-Empfehlungen“ im Anwendungsfall FD auf Seite 43 dieser Broschüre.



**Bundesverband
Kraftwerksnebenprodukte e.V.**

Niederkasseler Kirchweg 97 · 40547 Düsseldorf
Telefon 0211/57 91 95 · Telefax 0211/57 95 24
e-mail: thamm.bvk@t-online.de
<http://www.bvk-online.com>