

Flugasche als Betonzusatzstoff

nach neuer Betonnorm

EN 206-1 / DIN 1045-2

Flugasche als Betonzusatzstoff

- **Definition**
- **Anwendung**
- **Grundlagen der Anrechnung**
 - **Anforderungen**
 - **Grundlagen des k-Wert-Ansatzes**
- **Anrechnungsregeln für Flugasche**
- **Mehlkorngehalt**
- **Berechnung der Betonzusammensetzung**
 - **Beispiele**
- **Anrechnungsregeln für Silikastaub**
- **Anrechnungsregeln für gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub**
 - **Beispiele**
- **Nachbehandlung nach DIN 1045 - 3**

Folgende Abkürzungen werden angewendet:

$(w/z)_{eq}$	=	äquivalenter Wasserzementwert $w/(z + k_f f_b)$
z	=	Zementgehalt
$\min z$	=	Mindestzementgehalt
$\min z_f$	=	Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche
$\text{zul } mk$	=	zulässiger Mehlkorngesamtgehalt ($mk_b + mk_g$)
mk_b	=	Mehlkorngesamtgehalt aus Bindemittel ($z + f + s$)
mk_g	=	Mehlkorngesamtgehalt aus Gesteinskörnung
K	=	Körnungsziffer
f_{cm}	=	mittlere Druckfestigkeit von Beton

Zur Anrechnung von Flugasche werden folgende Abkürzungen angewendet:

k_f	=	Anrechenbarkeitswert für Flugasche
f	=	Flugaschegehalt im Beton
f_b	=	anrechenbare Flugaschemenge
$\max f_b$	=	maximal anrechenbare Flugaschemenge ($f_b = 0,33 z$)
b_{eq}	=	äquivalenter Bindemittelgehalt ($z + k_f f_b$)
$\min f_b$	=	Mindestflugaschegehalt

Zur Anrechnung von Silikastaub werden folgende Abkürzungen angewendet:

k_s	=	Anrechenbarkeitswert für Silikastaub
s	=	Silikastaubgehalt im Beton
s_b	=	anrechenbare Silikastaubmenge
$\max s_b$	=	maximal anrechenbare Silikastaubmenge
b_{eq}	=	äquivalenter Bindemittelgehalt ($z + k_f f_b + k_s s_b$)
$\min s_b$	=	Mindestsilikastaubgehalt

Definition Betonzusatzstoff nach DIN EN 206-1 (Abschnitt 3.1.23)

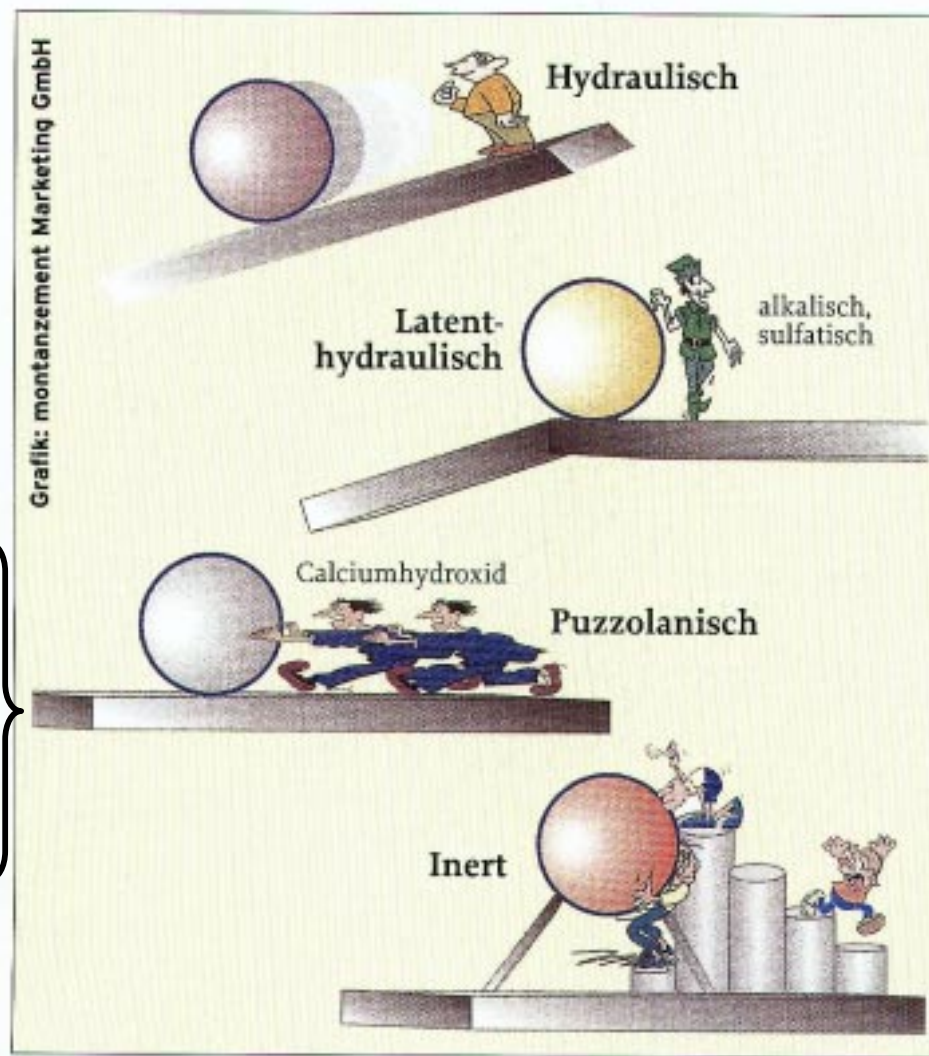
Fein verteilter Stoff, der im Beton verwendet wird, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Die Norm beinhaltet zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen:

- nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ I)
- puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe (Typ II)

Typen von Betonzusatzstoffen: Chemische Wirkung

Hochhydraulischer Kalk

**Flugasche
Silikastaub
Trass
getempertes
Gesteinsmehl**



Hüttensand

**Kalksteinmehl
Quarzmehl**

Betonzusatzstoffe Typ II

Die Eignung als Betonzusatzstoff Typ II ist nach DIN 1045-2 nachgewiesen für:

- Flugasche nach DIN EN 450
- Flugasche mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
- Trass nach DIN 51043
- Silikastaub mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
- andere mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
(z.B. getempertes Phonolit-Gesteinsmehl, Lavamehl)

Betonzusatzstoffe Typ I

Nationale Regelung in DIN 1045-2, bis entsprechende europäische Normen oder Richtlinien zur Verfügung stehen:

- Gesteinsmehle nach DIN 4226-1 (EN in Vorbereitung)
- Gesteinsmehle mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (müssen an die neue Betonnormung angepasst werden)
- Pigmente nach DIN EN 12878
- Stahl-, Glas- und Kunststofffasern mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
- organische Betonzusatzstoffe mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

Anwendung von Betonzusatzstoffen (Allgemeines)

Typ I: Zugabe zum Beton erfolgt ohne Anrechnung

Typ II: Anrechnung auf den Zementgehalt und den Wasserzementwert möglich, wenn Eignung nachgewiesen ist.

- Maximale Zugabemengen sind, wenn nicht anderswo eingeschränkt (z.B. Mehlkorngelalt), nicht begrenzt (Ausnahme: Silikastaub < 11 M.-%, bez. auf Zementgehalt).
- Der gleichzeitige Einsatz von mehreren Betonzusatzstoffen ist erlaubt, wenn er nicht ausdrücklich ausgeschlossen wird.
- Die Verwendung von Betonzusatzstoffen ohne Anrechnung ist möglich mit allen Zementen nach DIN EN 197-1 und DIN 1164.
- Für Vorspannung mit sofortigem Verbund sind Flugasche und Silikastaub zugelassen.

Grundlagen der Anrechnung

Betonzusatzstoffe Typ II dürfen gemäß 5.2.5.1 der EN 206-1 / DIN 1045-2 bei der Betonzusammensetzung wie folgt angerechnet werden:

- auf den Zementgehalt durch Reduzierung des Mindestzementgehaltes (siehe DIN 1045-2 Anhang F, Tabellen F.2.1 und F.2.2)
- auf den äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ durch Anwendung des k-Wert-Ansatzes

$$(w/z)_{eq} = w/(z + k_f f_b) \quad \text{für Flugasche}$$

$$(w/z)_{eq} = w/(z + k_s s_b) \quad \text{für Silikastaub}$$

Grundlagen der Anrechnung

Die Anrechnung von Flugasche ist bei folgenden Zementarten erlaubt:

- Portlandzement (CEM I)
- Portlandsilikastaubzement (CEM II/A-D)
- Portlandhüttenzement (CEM II/A-S und CEM II/B-S)
- Portlandschieferzement (CEM II/A-T und CEM II/B-T)
- Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL)
- Hochofenzement (CEM III/A und CEM III/B mit bis zu 70 M.-% Hüttensand)

Grundlagen der Anrechnung

Die Anrechnung von Silikastaub ist bei folgenden Zementarten erlaubt:

- Portlandzement (CEM I)
- Portlandhüttenzement (CEM II/A-S und CEM II/B-S)
- Portlandschieferzement (CEM II/A-T und CEM II/B-T)
- Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL)
- Hochofenzement (CEM III/A und CEM III/B)
- Portlandpuzzolanzement (CEM II/A-P und CEM II/B-P)
- Portlandflugaschezement (CEM II/A-V)
- Portlandkompositzement (CEM II/B-M(S-V))

Anforderungen an Flugasche für Beton

sind definiert in der Stoffnorm DIN EN 450:1995 „Flugasche für Beton“

- Chemische Zusammensetzung (Glühverlust, Cl, SO₃, CaO_{frei})
- Feinheit und Kornrohichte
- Aktivitätsindex
- Raumbeständigkeit
- Grundlagen der Güteüberwachung
- Nachweis der Übereinstimmung

Überarbeitung EN 450 in EN 450-1 in Vorbereitung.

(Planmäßige Überarbeitung der Norm nach 5 Jahren Laufzeit)

Ergänzend wird EN 450-2 geschaffen, die das Verfahren des Übereinstimmungsnachweises enthalten soll (ähnlich wie EN 197-2 für Zement).
EN 450-2 wird in 2002 als DIN 18990 erscheinen

Anforderungen an Silikastaub für Beton

sind definiert in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen:

- Chemische Zusammensetzung (SiO_2 , Si, Glühverlust, Cl, SO_3)
- Gleichmäßigkeit und Stabilität von Suspensionen
- Feinheit
- Aktivitätsindex
- Raumbeständigkeit
- Grundlagen der Güteüberwachung
- Nachweis der Übereinstimmung

Eine Stoffnorm für Silikastaub (EN 13263) ist in Vorbereitung.

Die bestehenden Zulassungen sind bis dahin maßgebend.
Sie müssen aber an die neuen Betonnormen DIN EN 206-1
und DIN 1045-2 angepasst werden.

Grundlagen des k-Wert-Ansatzes

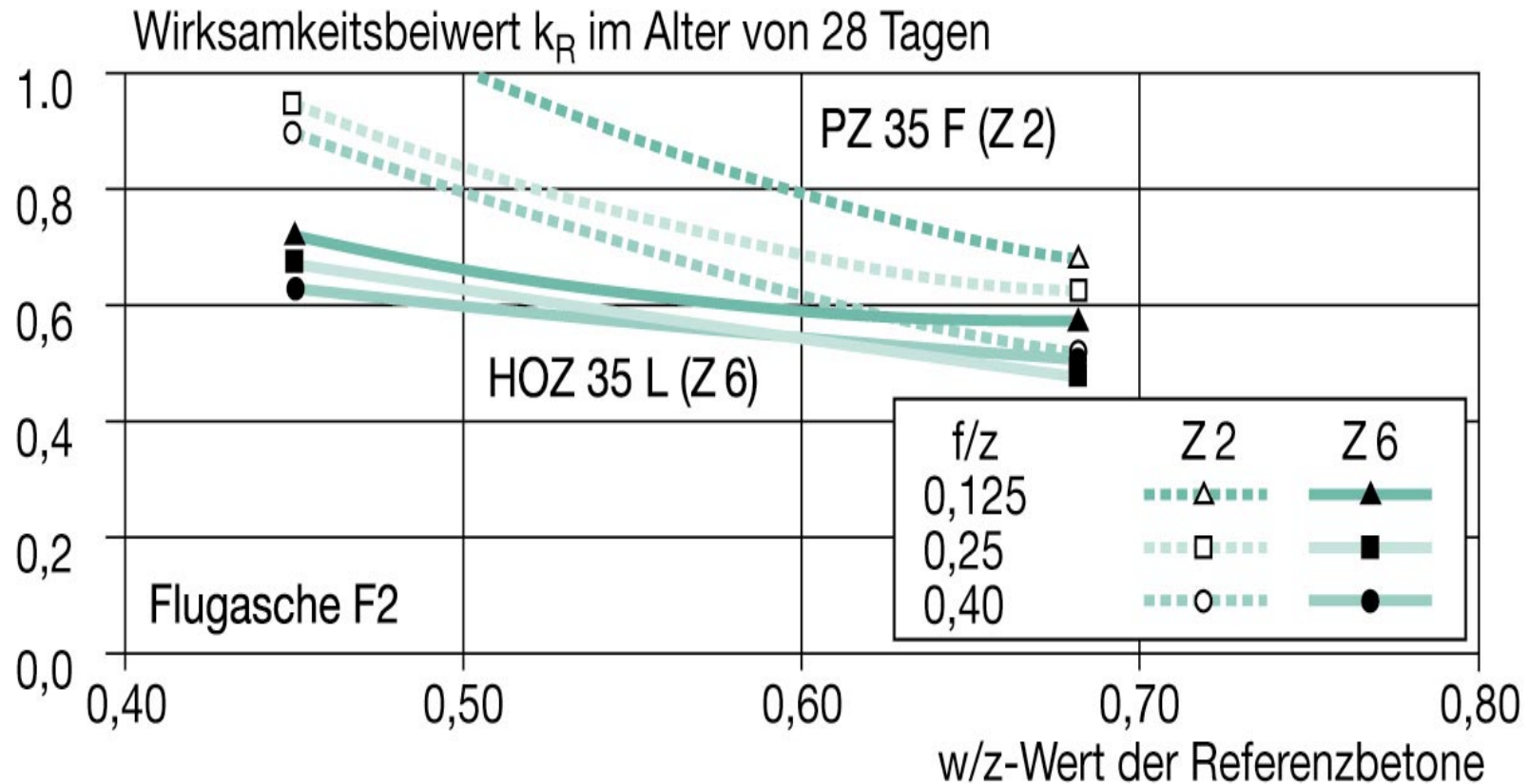
Mit dem k-Wert-Ansatz wird Flugasche beim Nachweis des maximal zulässigen Wasserzementwerts berücksichtigt, indem der Begriff "Wasserzementwert" w/z durch den "äquivalenten Wasserzementwert" $(w/z)_{eq} = w/(z + k_f f_b)$ ausgetauscht wird.

Die Größe des Anrechenbarkeitswerts k_f ist:

Anwendung	k_f
Alle Expositionsklassen (außer XF2 und XF4)	0,4
XF2, XF4	0
Unterwasserbeton	0,7
Bohrpfahl-/Schlitzwandbeton	0,7

Betonzusatzstoffe vom Typ II

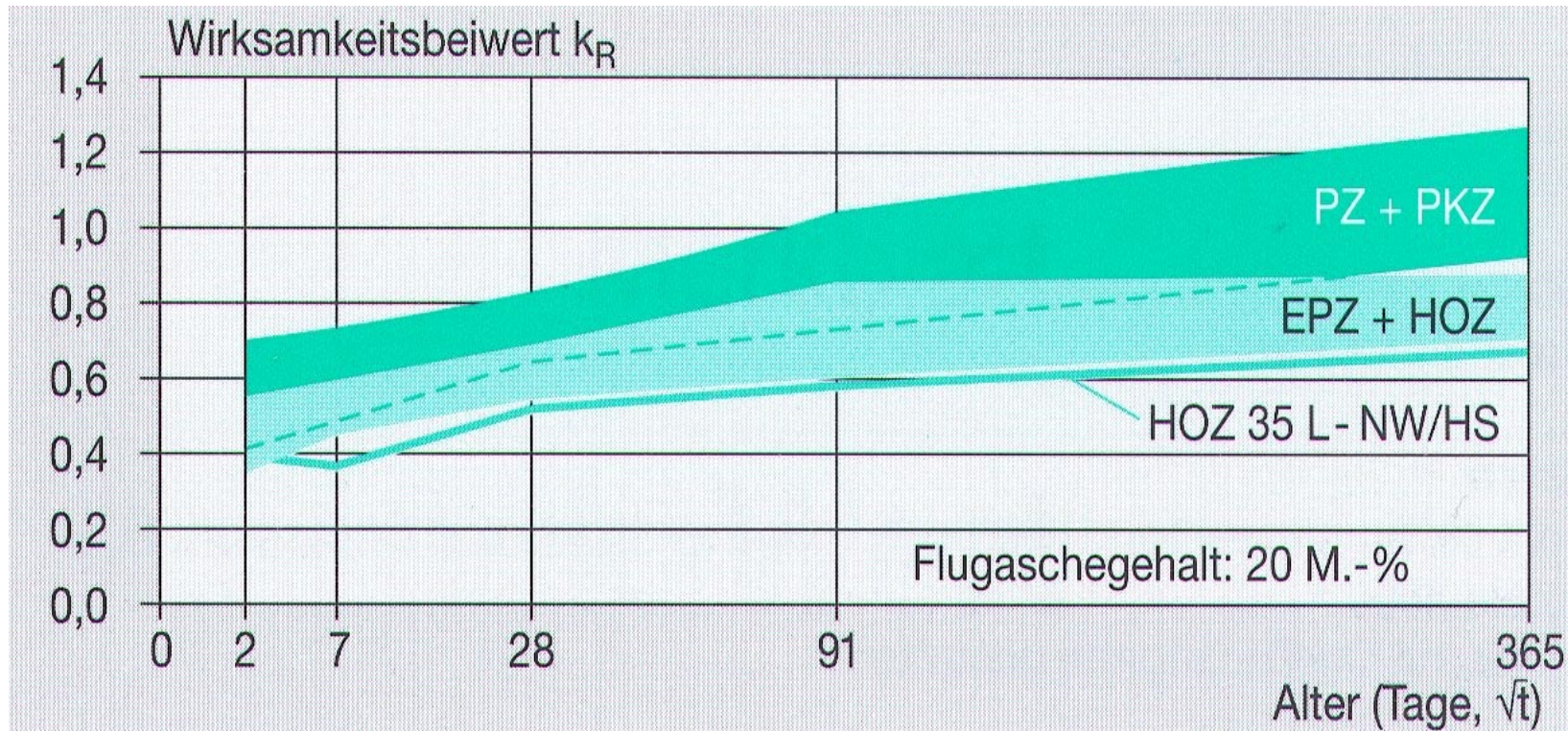
Wirksamkeitskennwert k für Flugasche



Quelle: BVK- Bundesverband der Kraftwerksnebenprodukte e.V.; Betontechnische Merkblätter; Merkblatt k- Wert

Betonzusatzstoffe vom Typ II

Wirksamkeitskennwert k für Flugasche



Quelle: BVK- Bundesverband der Kraftwerksnebenprodukte e.V.; Betontechnische Merkblätter; Merkblatt k- Wert

Anrechnungsregeln für Flugasche

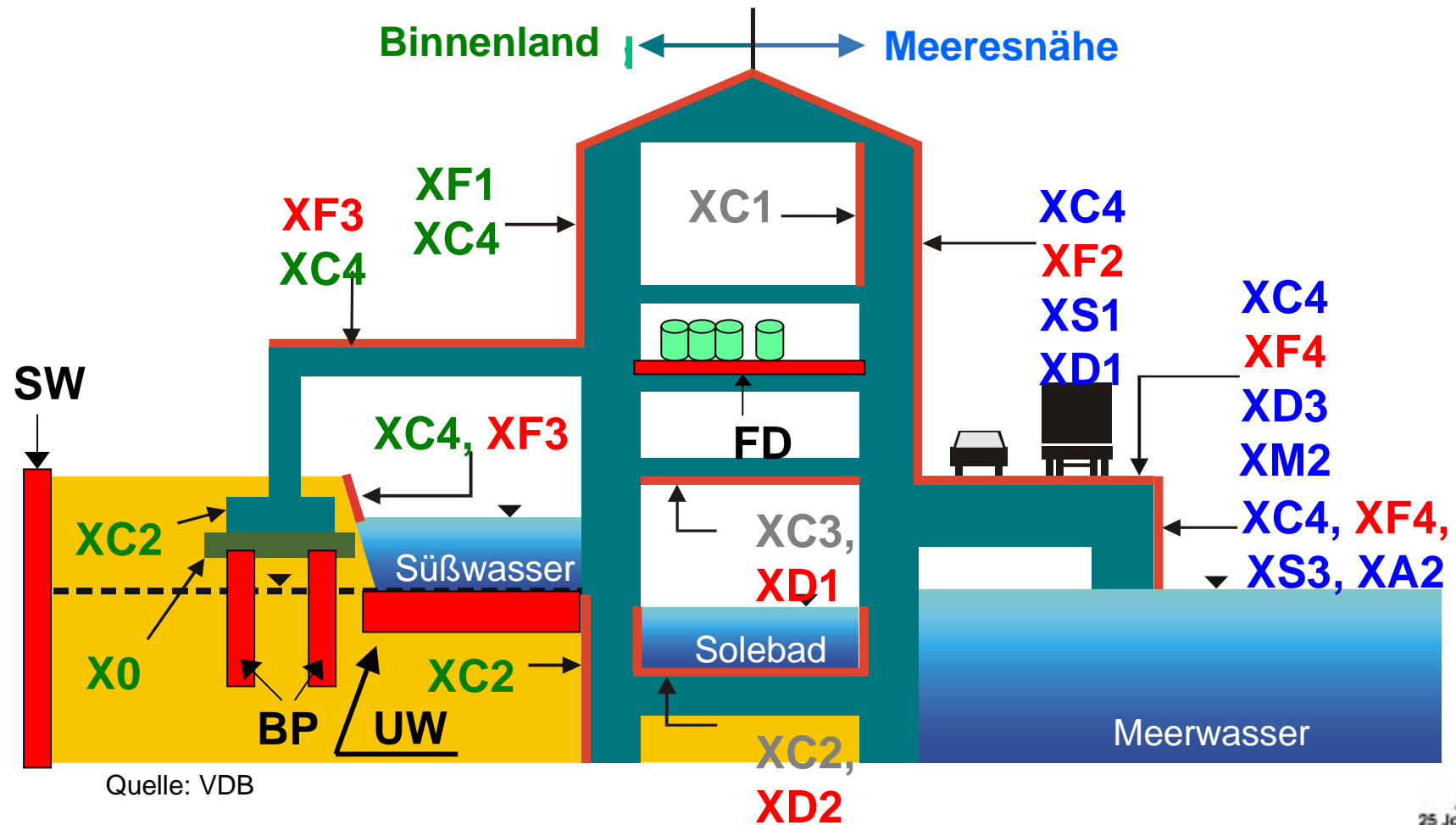
Bei Anrechnung von Flugasche dürfen die nachfolgenden Mindestzementgehalte bei Gesteinskörnung mit Größtkorn 32 mm¹⁾ nicht unterschritten werden:

Expositionsklasse	Mindestzementgehalt (min z_f) bei Anrechnung von Flugasche [kg/m ³]
X0	keine Anforderungen
XC1, XC2, XC3	240
XC4	270
XS, XD, XA, XM	270
XF1, XF3 ²⁾	270
Unterwasserbeton	je nach Expositionsklasse

- 1) Bei einem Größtkorn von 63 mm darf min z_f um 30 kg reduziert werden.
2) Ein ausreichender Nachweis bei XF2 und XF4 ist bisher nicht erfolgt. Eine Flugaschezugabe zur Verbesserung des Mehlkorngehalts ist jedoch jederzeit möglich.

Betonzusatzstoffe

Expositionsklassen und Anwendungsfälle

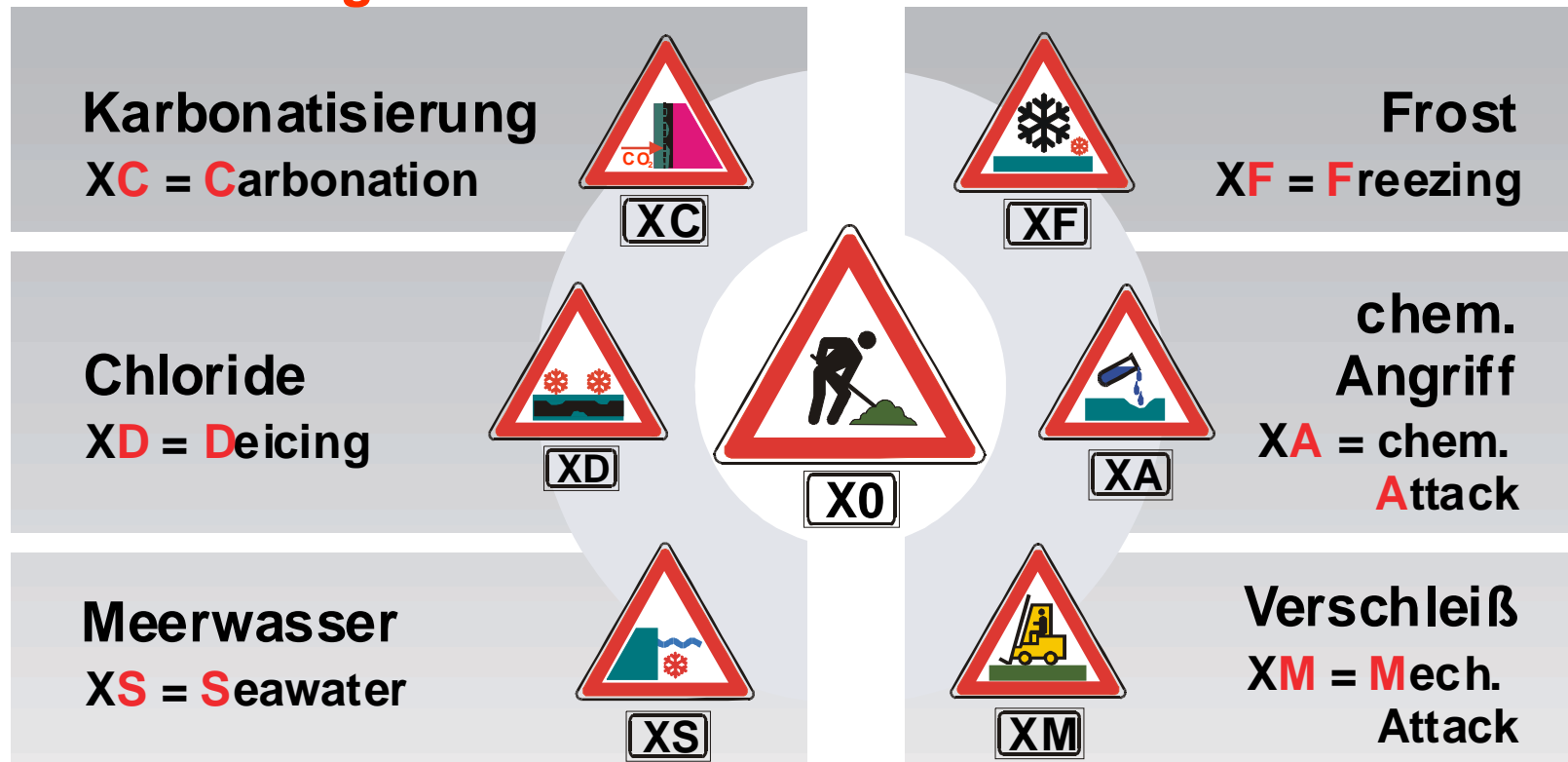


Betonzusatzstoffe

Expositionsklassen

Bewehrungs-Korrosion

Beton-Korrosion



Quelle: VDB

Anrechnungsregeln für Flugasche

Mindestflugaschegehalt ($\min f_b$)

Es muss mindestens die Menge an Flugasche $\min f_b$ zugegeben werden, um die der Mindestzementgehalt $\min z$ reduziert wurde.

$$(\text{Zement} + \text{Flugasche}) \geq \text{Mindestzementgehalt}$$

$$(\min z_f + f_b) \geq \min z$$

maximal anrechenbare Flugaschemenge ($\max f_b$)

Die maximal auf den Wasserzementwert anrechenbare Flugaschemenge $\max f_b$ beträgt:

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

Grenzwerte für die Betonzusammensetzung

Expositions- klasse	Mindest- zementgehalt (min z)	bei Anrechnung von Flugasche (min z _f)	max w/z _{eq} = w/(z+0,4 f _b)	f _b ≤ 0,33 z ¹⁾	Mindestflug- aschegehalt (min f _b) ²⁾
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	–	[kg/m ³]	[kg/m ³]
X0	–	–	–	–	–
XC1, XC2	240	240	0,75	80	–
XC3	260	240	0,65	80	20
XC4, XF1, XA1	280	270	0,60	90	10
XS1, XD1, XM1	300	270	0,55	90	30
XS2, XD2, XA2	320	270	0,50	90	50
XS3, XD3, XA3, XM3	320	270	0,45	90	50
XF2	300/320	–	0,55/0,50	–	–
XF3	300/320	270	0,55/0,50	90	30/50
XF4	320	–	0,50	–	–
XM2	300/320	270	0,55/0,45	90	30/50

1) Maximal mögliche Anrechnungsmenge bei min z_f 2) Differenzmenge zwischen min z und min z_f

Grenzwerte für die Betonzusammensetzung

Anwendungsfälle	Mindestzementgehalt (min z)	Bei Anrechnung von Flugasche: Mindestzementgehalt (min z _f)	$\max (w/z)_{eq}$ $= w / (z+k f_b)$	$f_b \leq 0,33 z^1$ $f_b \leq 0,25 z^2$
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	—	[kg/m ³]
Bohrpfahlbeton, <u>GK 32 mm</u>	350	280	$w/(z+0,7 f_b) \leq 0,60$	92 ¹⁾
Bohrpfahlbeton, <u>GK 16 mm</u>	400	320	$w/(z+0,7 f_b) \leq 0,60$	106 ¹⁾
Schlitzwandbeton	350	5)	$w/(z+0,7 f_b) \leq 0,60$	5)
Unterwasserbeton	350	5)	$w/(z+0,7 f_b) \leq 0,60$	5)
FD – Beton ³⁾	270 ⁴⁾	270 ⁴⁾	$w/(z+0,4 f_b) \leq 0,50$	68 ²⁾

1), 2) Maximal mögliche Anrechnungsmenge bei min z_f
3) Bindemittelleimgehalt ≤ 290 l/m³

4) Außenbauteil nach DIN 1045, 7.88
5) Je nach Expositionsklasse

Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand

Expositionsklasse XA2

Sulfatgehalt des angreifenden Wassers $\text{SO}_4^{2-} \leq 1.500 \text{ mg/l}$

Anwendungsfall nach DIN 1045-2; Abschnitt 5.2.5.2.2

$$(w/z)_{\text{eq}} = w / (z + 0,4 f_b) \leq 0,50$$

$$f_b \leq 0,33 z$$

$$f_b / (z + f_b) \geq 0,20 \text{ bei CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM II/A-LL}$$

$$f_b / (z + f_b) \geq 0,10 \text{ bei CEM II/A-T, CEM II/B-T und CEM III/A}$$

Mehlkorngehalt

Der Mehlkorngehalt eines Betons setzt sich zusammen aus:

- Zement (mk_z)
- Betonzusatzstoff (mk_f)
→ $mk_b = mk_z + mk_f$
- Kornanteil $< 0,125$ mm der Gesteinskörnung (mk_g)
→ $mk = mk_b + mk_g$

und ist bei bestimmten Randbedingungen gemäß den folgenden Tabellen zu begrenzen:

(Ausnahme: Für selbstverdichtende Betone gelten die Angaben der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ bzw. der bauaufsichtlichen Zulassungen.)

Höchstzulässiger Mehlkorngesamt für Festigkeitsklassen $\leq C50/60$ und $\leq LC 50/55$ mit einem Größtkorn von 16 mm bis 63 mm

Expositionsklasse	Zementgehalt	Höchstzulässiger Mehlkorngesamt
	[kg/m ³]	
XF, XM	≤ 300	400
	≥ 350	450
alle anderen Betone		550

Bei Zementgehalten zwischen 300 kg/m³ und 350 kg/m³ ist zwischen den Werten der Tabelle linear zu interpolieren.

Die Mehlkorngesamte dürfen erhöht werden:

- wenn der Zementgehalt 350 kg/m³ übersteigt, um den über 350 kg/m³ hinausgehenden Zementgehalt,
- wenn ein Betonzusatzstoff Typ II verwendet wird, um den Gehalt des Zusatzstoffs,
jedoch insgesamt um höchstens 50 kg/m³.
- wenn das Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm beträgt, um 50 kg/m³.

**Höchstzulässiger Mehlkorngesamt für Festigkeitsklassen
 \geq C55/67 und \geq LC 55/60 mit einem Größtkorn von
 16 mm bis 63 mm**

Expositionsklasse	Zementgehalt	Höchstzulässiger Mehlkorngesamt
	[kg/m ³]	
alle	≤ 400	500
	450	550
	≥ 500	600

Bei Zementgehalten zwischen 400 kg/m³ und 500 kg/m³ ist zwischen den Werten der Tabelle linear zu interpolieren.

Die Mehlkorngesamte dürfen um 50 kg/m³ erhöht werden, wenn das Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm beträgt.

Berechnungsbeispiel 1

Expositionsklasse	XF1 (XC4) Außenbauteile, Frost bei mäßiger Wassersättigung ohne Taumittel
Festigkeitsklasse	C25/30
Zielfestigkeit	35 N/mm ²
Zement	CEM II/A-LL 32,5 R
Zusatzstoff	Flugasche
Anrechenbarkeitswert	$k_f = 0,4$
Gesteinskörnung	Sand/Kies, Größtkorn 16 mm, Bereich 3
Körnungsziffer	$K = 3,8$
Konsistenz	F3
Wasserbedarf	186 l/m ³ (ohne Berücksichtigung einer Wassereinsparung durch Flugasche)

äquivalenter Wasserzementwert

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + 0,4 f_b} = 0,58 < 0,60$$

Ausgangsgleichungen zur Berechnung des Zement- und Flugaschegehalts:

Äquivalenter Bindemittelgehalt b_{eq} :

$$b_{eq} = \text{Zement } (z) + 0,4 \text{ Flugasche } (f_b)$$

$$b_{eq} = z + 0,4 f_b \quad (1)$$

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + 0,4 f_b} = \frac{w}{b_{eq}} \quad (2)$$

maximal anrechenbarer Anteil Flugasche $\max f_b$:

$$\max f_b = 0,33 z \quad (3)$$

Berechnung:

Äquivalenter Bindemittelgehalt b_{eq} aus Gl. (2):

$$b_{eq} = \frac{w}{(w/z)_{eq}} = \frac{186}{0,58} = 320 \text{ kg/m}^3$$

Zementgehalt z aus Gl. (1) und (3):

$$b_{eq} = z + 0,4 \cdot 0,33 z$$

$$b_{eq} = 1,132 z$$

$$z = \frac{b_{eq}}{1,132} = \frac{320}{1,132} = 283 \text{ kg/m}^3 > 270 \text{ kg/m}^3 = \min z_f$$

Maximal anrechenbarer Anteil Flugasche $\max f_b$ aus Gl. (3):

$$\max f_b = 0,33 z = 0,33 \cdot 283 = 94 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kontrolle: } (w/z)_{eq} = \frac{186}{283 + 0,4 \cdot 94} = 0,58$$

Nachweis des Mehlkorngeshalts (mk) nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2

höchstzulässiger Mehlkorngeshalt (zul mk)

nach Tabelle 4.1	400 kg/m ³
zuzüglich nach Absatz 5.3.2	+ 50 kg/m ³
	<hr/>
zul mk	450 kg/m ³

vorhandener Mehlkorngeshalt (vorh mk)

aus Gesteinskörnung (mk _g) - Annahme	67 kg/m ³
aus Zement (mk _z)	+ 283 kg/m ³
aus Flugasche (mk _f)	+ 94 kg/m ³
	<hr/>
vorh mk	444 kg/m ³

$$\text{vorh mk} \leq \text{zul mk}$$

Berechnungsbeispiel 2

- überhöhter Mehlkorngesamt

Expositionsklasse XF1 (XC4)	Außenbauteile, Frost mit mäßiger Wassersättigung ohne Taumittel
Festigkeitsklasse	C30/37 (B 35)
Zielfestigkeit	45 N/mm ²
Zement	CEM I 32,5 R
Zusatzstoff	Flugasche
Anrechenbarkeitswert	$k_f = 0,4$
Gesteinskörnung	Sand/Kies, Größtkorn, 16 mm, Bereich 3
Körnungsziffer	$K = 3,8$
Konsistenz	F3
Wasserbedarf	188 l/m ³ (ohne Berücksichtigung einer möglichen Wassereinsparung durch Flugasche)

äquivalenter Wasserzementwert

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + 0,4 f_b} = 0,48 < 0,60$$

Berechnung:

Äquivalenter Bindemittelgehalt b_{eq} aus Gl. (2):

$$b_{eq} = \frac{w}{(w/z)_{eq}} = \frac{188}{0,48} = 392 \text{ kg/m}^3$$

Zementgehalt z aus Gl. (1) und (3):

$$b_{eq} = z + 0,4 \cdot 0,33 z$$

$$b_{eq} = 1,132 z$$

$$z = \frac{b_{eq}}{1,132} = \frac{392}{1,132} = 346 \text{ kg/m}^3 > 270 \text{ kg/m}^3 = \min z_f$$

Maximal anrechenbarer Anteil Flugasche $\max f_b$ aus Gl. (3):

$$\max f_b = 0,33 z = 0,33 \cdot 346 = 114 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kontrolle: } (w/z)_{eq} = \frac{188}{346 + 0,4 \cdot 114} = 0,48$$

Nachweis des Mehlkorngeshalts (mk) nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2

höchstzulässiger Mehlkorngeshalt (zul mk)

nach Tabelle 4.1	446 kg/m ³
zuzüglich nach Absatz 5.3.2	+ 50 kg/m ³
zul mk	<u>496 kg/m³</u>

vorhandener Mehlkorngeshalt (vorh mk)

aus Gesteinskörnung (mk _g) - Annahme	67 kg/m ³
aus Zement (mk _z)	+ 346 kg/m ³
aus Flugasche (mk _f)	+ 114 kg/m ³
vorh mk	<u>527 kg/m³</u>

Der zulässige Mehlkorngeshalt wird um 31 kg/m³ überschritten.

vorh mk > zul mk

Rückrechnung zur Einhaltung des höchstzulässigen Mehlkorngehalts

Der höchstzulässige Mehlkornanteil mk_b aus Zement z und Flugasche f vom gesamten Mehlkorngesamt mk darf $mk_b = mk - mk_g = 500^* - 67 = 433 \text{ kg/m}^3$ betragen. Der äquivalente Bindemittelgehalt b_{eq} beträgt:

$$b_{eq} = \frac{w}{(w/z)_{eq}} = \frac{188}{0,48} = 392 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Ermittlung des anrechenbaren Anteil Flugasche aus Gleichung (1) und (3):

$$z = b_{eq} - 0,4 \cdot f_b$$

$$z = mk_b - f_b \quad \Rightarrow \quad b_{eq} - 0,4 \cdot f_b = mk_b - f_b$$

$$\Rightarrow \quad f_b - 0,4 \cdot f_b = mk_b - b_{eq}$$

Gleichungsumstellung nach f_b :

$$\Rightarrow \quad f_b = \frac{mk_b - b_{eq}}{0,6} = \frac{433 - 392}{0,6} = 69 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \quad z = mk_b - f_b = 433 - 69 = 364 \text{ kg/m}^3$$

Kontrolle : $(w/z)_{eq} = \frac{188}{364 + 0,4 \cdot 69} = 0,48$

* bei Rückrechnung dieses Beispiels wird der Zementgehalt $\geq 350 \text{ kg/m}^3$; $\Rightarrow mk = 500 \text{ kg/m}^3$

Fazit:

Aufgrund der Begrenzung des Mehlkorngehalts können unter Berücksichtigung der Anforderungen für den Beton der Festigkeitsklasse C 30/37 nicht 114 kg/m³, sondern nur 69 kg/m³ Flugasche eingesetzt werden, wobei sich der Zementgehalt um 18 kg/m³ erhöht.

$$f/z = 69 / 364 = 0,19 < 0,33$$

Durch Einsatz von Flugasche wird jedoch in der Regel der Wasseranspruch des Betons bei gleicher Verarbeitbarkeit um 5 bis 10 l/m³ reduziert.

Bei Berücksichtigung dieses Vorteils lässt sich der Beispielbeton wie folgt optimieren:

Wasserbedarf	188 l/m ³
Wasserreduzierung bei Einsatz von Flugasche f im Beispiel	<u>- 5 l/m³</u>
Wasserbedarf reduziert	183 l/m ³

Bindemittel:

$$b_{eq} = \frac{w}{(w/z)_{eq}} = \frac{183}{0,48} \Rightarrow b_{eq} = 381 \text{ kg/m}^3$$

Mehlkorngehalt aus Bindemittel mk_b

$$mk_b = mk - mk_g$$

$$mk_b = 496 - 67 \Rightarrow mk_b = 429 \text{ kg/m}^3$$

Daraus errechnen sich folgende Mengen für Zement und Flugasche:

Anrechenbarer Anteil Flugasche f_b

Ansatz

$$mk_b = z + f_b \Rightarrow z = mk_b - f_b \quad \text{und}$$

$$b_{eq} = z + k_f f_b \Rightarrow z = b_{eq} - k_f f_b$$

daraus folgt

$$mk_b - f_b = z + k_f f_b \Rightarrow f_b = (mk_b - b_{eq}) / 0,6 \Rightarrow f_b = 429 - 381 / 0,6 = 80 \text{ kg/m}^3$$

Zementgehalt z

$$z = mk_b - f_b$$

$$z = 433 - 80 = 353 \text{ kg/m}^3 > 270 \text{ kg/m}^3 = \min z_f$$

Anrechenbarer Flugaschegehalt

$$\frac{f_b}{z} = \frac{80}{353} = 0,23 < 0,33$$

$$\text{Kontrolle} \quad (w/z)_{eq} = \frac{183}{353 + 0,4 \cdot 80} = 0,48 < 0,60$$

Neuer Mehlkorngengehalt m_k :

aus Gesteinskörnung mk_g	67 kg/m ³
aus Zement z	+ 353 kg/m ³
aus Flugasche f_b	<u>+ 80 kg/m³</u>
	500 kg/m ³

Die Anforderungen an den Mehlkorngengehalt des Betons nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2 werden zielsicher erreicht.

Für das vorgestellte Beispiel ergibt sich für die Betonoptimierung mit Flugasche folgende Betonzusammensetzung:

Komponenten	Massenanteile kg/m ³	Dichte kg/dm ³	Volumenanteile l/m ³
Zement CEM I 32,5 R	353	3,10	114
Flugasche	80	2,30	35
Wasser	183	1,00	183
Gesteinskörnung A/B 16	1.717	2,63	653
Luftgehalt (Annahme)			15
Summe	2.333		1.000

Der Zementanteil kann in diesem Beispiel bei Einhaltung des zulässigen Mehlkorngehalts beim Einsatz von 80 kg/m³ Flugasche als Betonzusatzstoff von 381 kg/m³ auf 353 kg/m³ verringert werden.

Anrechnungsregeln für Silikastaub

- Mindestzugabemenge min s

Es muss mindestens die Menge an Silikastaub min s zugegeben werden, um die der Mindestzementgehalt reduziert wurde

$$(Zement + Silikastaub) \geq \text{Mindestzementgehalt}$$

- Maximale Einsatzmenge

Der Gehalt an Silikastaub im Beton darf 11 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt nicht überschreiten

$$s/z \leq 0,11 \text{ bzw. } s/(z+s) \leq 0,10$$

Grund: Sicherstellung eines ausreichenden Alkalitätdepots im Beton zum Korrosionsschutz

Anrechnungsregeln für Silikastaub

- Anrechnung auf den Wasserzementwert

Vorgehensweise wie bei Flugasche:

Verwendung des äquivalenten Wasserzementwerts
für alle Expositionsklassen
mit Ausnahme von XF2 und XF4 ($k = 0$)

Achtung: Wasseranteil von Silikasuspensionen ist beim Wassergehalt des Betons zu berücksichtigen

Anrechnungsregeln für gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub

- Mindestzugabemengen

Es muss mindestens die Menge an Flugasche und Silikastaub zugegeben werden, um die der Mindestzementgehalt (min z) reduziert wurde:

$$\begin{aligned} (\text{Zement} + \text{Flugasche} + \text{Silikastaub}) &\geq \text{Mindestzementgehalt} \\ (\text{min } z_f + f + s) &\geq \text{min } z \end{aligned}$$

- Anrechnung auf den Wasserzementwert

Für alle Expositionsklassen mit Ausnahme von XF2 und XF4 ($k = 0$) gilt:

- äquivalenter Wasserzementwert

$$(w/z)_{eq} = w / (z + 0,4 f_b + 1,0 s_b)$$

- mit Flugasche $f_b \leq 0,33 z$
mit Silikastaub $s_b \leq 0,11 z$

Berechnungsbeispiel 3

bezogen auf die vorangegangene Berechnung für Beton C 30/37
(B 35), Wasserbedarf 188 l/m³

$$(w/z)_{eq} = \frac{W}{z + 0,4 f_b + 1,0 s_b} = 0,48$$

$$b_{eq} = \frac{188}{0,48} = 392 \text{ kg/m}^3$$

$$b_{eq} = z + 0,4 \cdot 0,33 z + 1,0 \cdot 0,11 z$$

$$b_{eq} = 1,242 z$$

$$z = \frac{392}{1,242} = 316 \text{ kg/m}^3$$

Maximal anrechenbarer Anteil Flugasche

$$f_b = 0,33 \cdot z = 0,33 \cdot 316 = 104 \text{ kg / m}^3$$

Maximal anrechenbarer Anteil Silikastaub

$$s_b = 0,11 z = 0,11 \cdot 316 = 35 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kontrolle } (w/b)_{eq} = \frac{188}{316 + 0,4 \cdot 104 + 1,0 \cdot 35} = 0,48$$

Nachweis des Mehlkorngelhalts (mk) nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.3.2

höchstzulässiger Mehlkorngelhalt (zul mk)

nach Tabelle 4.1	416 kg/m ³
zuzüglich nach Absatz 5.3.2	<u>+ 50 kg/m³</u>
zul mk	466 kg/m ³

vorhandener Mehlkorngelhalt (vorh mk)

aus Gesteinskörnung (mk _g) - Annahme	67 kg/m ³
aus Zement (mk _z)	+ 316 kg/m ³
aus Flugasche (mk _f)	+ 104 kg/m ³
aus Silikastaub (mk _b)	<u>+ 35 kg/m³</u>
vorh mk	522 kg/m ³

Der zulässige Mehlkorngelhalt wird um 56 kg/m³ überschritten.

vorh mk > zul mk ⇒ Rückrechnung entsprechend Beispiel 2

Anrechnungsregeln für gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silikastaub

➤ maximale Einsatzmenge Silikastaub

Der Gehalt an Silikastaub im Beton darf 11 M.-% - bezogen auf den Zementgehalt nicht überschreiten.

➤ maximale Einsatzmenge Flugasche

Zulässiges Verhältnis Flugasche/Zement (f/z)

Zementart DIN EN 197-1	f/z
CEM I	$\leq 3 (0,22 - s/z)$
CEM II/A-D	$\leq 3 (0,15 - s/z)$
CEM II-S	
CEM II-T	
CEM II/A-LL	
CEM III/A	

Nachbehandlung nach DIN 1045 - 3

Die Festlegung der Nachbehandlungsdauer von Beton mit Flugasche oder Silikastaub erfolgt wie bei Beton ohne Betonzusatzstoff in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung bei 20 °C, ausgedrückt durch das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit f_{cm} nach 2 Tagen und nach 28 Tagen.

Festigkeitsentwicklung von Betonen bei 20 °C

Festigkeitsentwicklung	Festigkeitsverhältnis $f_{cm,2}/f_{cm,28}$
schnell	$\geq 0,5$
mittel	$\geq 0,3$ bis $< 0,5$
langsam	$\geq 0,15$ bis $< 0,3$
sehr langsam	$< 0,15$

Nachbehandlung nach DIN 1045 - 3

Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen für alle Expositionsklassen¹⁾ außer X0 und XC1

Lufttemperatur [°C]	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm,2} / f_{cm,28}$ ²⁾			
	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
≥ 25 °C	1	2	2	3
$25 > \text{°C} \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \text{°C} \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \text{°C} \geq 5$ ³⁾	3	6	10	15

- 1) Für die Expositionsklasse XM sind die Werte der Tabelle zu verdoppeln
- 2) Zwischenwerte dürfen ermittelt werden
- 3) Bei Temperaturen < 5 °C ist die Nachbehandlungszeit um die Zeit, in der die Temperaturen < 5 °C betragen, zu verlängern