

1 Einleitung

Beton wird aus Zement, Wasser, Gesteinskörnung und ggf. Zusätzen und Fasern zusammengesetzt. Durch das Mischen der Ausgangsstoffe entsteht Frischbeton. Dabei bilden Zement und Wasser den Zementleim. Durch die Erhärtung des Zementleims im Frischbeton zu Zementstein entsteht Festbeton.

Sowohl der Frischbeton als auch der Festbeton müssen bestimmte Anforderungen erfüllen, die in Regelwerken festgelegt sind oder vom Verwender gefordert werden, [1] bis [6].

2 Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Verarbeitbarkeit

Die wichtigsten Eigenschaften des Frischbetons sind die Verarbeitbarkeit und die des Festbetons Festigkeit und Dauerhaftigkeit.

Verarbeitbarkeit (Konsistenz, Zusammenhaltevermögen, Verdichtungswilligkeit), Festigkeit und Dauerhaftigkeit werden entscheidend von der Zusammensetzung des Betons bestimmt. Die Verarbeitbarkeit wird durch die Konsistenzklassen beschrieben, wobei aber auch weitere Kriterien wie beispielsweise die richtige Wahl des Größtkorns von Bedeutung sind. Anforderungen an die Festigkeit werden durch Betonfestigkeitsklassen und Anforderungen an die Dauerhaftigkeit durch die zutreffenden Expositions- und Feuchtigkeitsklassen festgelegt.

Tafel 1: Druckfestigkeitsklassen

Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck, cyl}^{1)}$ [N/mm ²]	$f_{ck, cube}^{2)}$ [N/mm ²]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105 ³⁾	90	105
C100/115 ³⁾	100	115

¹⁾ $f_{ck, cyl}$: charakteristische Festigkeit von Zylindern, Durchmesser 150 mm, Länge 300 mm, Alter 28 Tage, Lagerung nach DIN EN 12390-2.

²⁾ $f_{ck, cube}$: charakteristische Festigkeit von Würfeln, Kantenlänge 150 mm, Alter 28 Tage, Lagerung nach DIN EN 12390-2.

³⁾ Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

3 Wasserzementwert und Zementgehalt

Eine wesentliche Größe für wichtige Eigenschaften des Festbetons ist der Wasserzementwert (w/z-Wert). Er gibt das Massenverhältnis des Wassergehalts w zum Zementgehalt z im Beton an. Je kleiner der Wasserzementwert im

Tafel 2: Umgebungsbedingungen und betontechnologische Anforderungen (Auswahl für Bauteildicken < 80 cm)

Expositionsklassen			Betontechnologische Maßnahmen			
Expositions-klasse	Einwirkung und Beanspruchung		max w/z ²⁾	min z ²⁾	min $f_{ck, cube}$	
X0	kein Angriff	kein Betonangriff	keine Anforderung	keine Anforderung	C 8/10 C 12/15 für tragende Bauteile	
XC	1 2 3 4	Karbonatisierung	trocken	0,75	240	C 16/20
			ständig nass	0,75	240	C 16/20
			mäßig feucht	0,65	260	C 20/25
			nass/trocken	0,60	280	C 25/30
XD/ XS	1 2 3	Chlorid	mäßig feucht	0,55	300	C 30/37 ¹⁾
			ständig nass	0,50	320	C 35/45 ^{1) 4)}
			nass/trocken	0,45	320	C 35/45 ¹⁾
XF	1 2	Frost bzw.	mäßige Wassersättigung ohne Taumittel	0,60	280	C 25/30
			mäßige Wassersättigung mit Taumittel	0,55 + LP 0,50	300 320	C 25/30 C 35/45 ⁴⁾
	3 4	Frost + Taumittel	hohe Wassersättigung ohne Taumittel	0,55 + LP 0,50	300 320	C 25/30 C 35/45 ⁴⁾
			hohe Wassersättigung mit Taumittel	0,50 + LP	320	C 30/37
XA	1 2 3	chem. Angriff	schwach angreifend	0,60	280	C 25/30
			mäßig angreifend	0,50	320	C 35/45 ^{1) 4)}
			stark angreifend	0,45	320	C 35/45 ¹⁾
XM	1 2 3	Ver-schleiß	mäßiger Verschleiß	0,55	300 ⁶⁾	C 30/37 ¹⁾
			starker Verschleiß	0,45 ³⁾	320 ^{3) 6)}	C 35/45 ^{1) 3)}
			sehr starker Verschleiß	0,45	320 ⁶⁾	C 35/45 ^{1) 5)}

Feuchtigkeitsklassen WO, WF, WA, WS sind zusätzlich festzulegen. Hierdurch können sich Auswirkungen auf den Zement und die Gesteinskörnung ergeben.

¹⁾ Bei LP-Beton aufgrund gleichzeitiger Anforderung aus Expositions-klasse XF eine Festigkeitsklasse niedriger.

²⁾ Zusatzstoffe vom Typ II (Flugasche und Silikastaub) dürfen bei bestimmten Zementen auf den Wasserzementwert und den Zementgehalt angerechnet werden. Dadurch kann min z auf bis zu 270 kg/m³ reduziert werden (bei XC1-XC3 auf bis zu 240 kg/m³). Einzelheiten sind in [2] enthalten.

³⁾ Mit Oberflächenbehandlung max w/z = 0,55; min z = 300 und C 30/37 möglich.

⁴⁾ Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen ($r \leq 0,30$) eine Festigkeitsklasse niedriger.

⁵⁾ Hartstoffe nach DIN 1100.

⁶⁾ Höchstzementgehalt 360 kg/m³; außer bei hochfestem Beton

Tafel 3: Richtwerte für den Wasseranspruch in kg je m³ Frischbeton

Sieblinie	k-Wert	D-Summe	Konsistenzbezeichnungen		
			steif ¹⁾ w = 1 100/(k + 3)	plastisch ¹⁾ w = 1 200/(k + 3)	weich ¹⁾ w = 1 300/(k + 3)
A32	5,48	352	130	150	170
B32	4,20	480	150	170	190
C32	3,30	570	170	190	210
A16	4,60	440	140	160	180
B16	3,66	534	160	180	200
C16	2,75	625	190	210	230
A8	3,63	537	160	180	200
B8	2,90	610	190	205	230
C8	2,27	673	210	230	250

¹⁾ Die Formeln bzw. Richtwerte beruhen auf empirischen Ermittlungen.

Bei den ermittelten Wassermengen handelt es sich um Anhaltswerte mit entsprechenden Streubreiten, genaue Werte werden erst in der Erstprüfung bestimmt.

Frischbeton ist, umso höher wird die Festigkeit sein; je größer er ist, umso geringer wird die Festigkeit sein.

Der Zement ist mit seinen hydraulischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Wasserzementwert ein wichtiger Faktor für die Festigkeit und Dichtigkeit des Betons. Zement bewirkt aber auch die hohe Alkalität des Betons und damit den Korrosionsschutz der Bewehrung.

Damit ein fester und dichter Beton mit hohem Korrosionsschutz für die Stahleinlagen entstehen kann, der außerdem den festgelegten Umwelteinwirkungen planmäßig widersteht, sind sowohl Mindestzementgehalte als auch höchst zulässige w/z-Werte und die daraus abgeleiteten Mindestdruckfestigkeitsklassen für Beton einzuhalten. Eine Zusammenstellung zeigt Tafel 2.

■ 4 Konsistenz und Wasseranspruch

Die Konsistenz eines Frischbetons ohne Zusatzmittel hängt vom Wassergehalt des Betons ab, der Wasseranspruch wiederum von der Verteilung des Korngemisches (Sieblinie). Um die gleiche Konsistenz zu erhalten, erfordert feinkörniges Gemisch mehr, grobkörniges weniger Wasser.

Die Zahlen der Tafel 3 geben den Wassergehalt w an, der sich aus Oberflächenfeuchte, Zugabewasser sowie ggf. wässrigen Anteilen der Zusatzmittel zusammensetzt. Alternativ kann er auch aus der in der Kopfzeile angegebenen Formel ermittelt werden.

Beispiel 1:

Sieblinienbereich A/B32, plastische Konsistenz:

$$w = (150 + 170)/2 = 160 \text{ kg/m}^3 \text{ oder}$$

$$w = 1\,200 / ((5,48 + 4,20)/2 + 3) = 154 \text{ kg/m}^3$$

Anmerkung: Der größere Wert wird empfohlen.

Für die Mischungsberechnung bzw. Mischanweisung wird jedoch die Zugabewassermenge w_{Zugabe} benötigt. Diese ergibt sich aus:

$$\text{Zugabewasser} = \text{Gesamtwassermenge} - \text{Oberflächenfeuchte} - \text{wässriger Anteil aus Zusatzmitteln}$$

Die Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung kann sehr unterschiedlich sein, sie liegt bei einem Korngemisch 0/32 i.A. bei 3 bis 5 M.-%. Der Anteil der Oberflächenfeuchte muss jeweils von dem Wassergehalt w abgezogen werden, um die Zugabewassermenge zu erhalten.

Beispiel 2:

Für die Herstellung von 1 m³ Beton ohne Zusatzmittel werden 650 kg Sand 0/4 mm mit 6 M.-% Oberflächenfeuchte verwendet. Die übrigen Gesteinskörnungen sind trocken. Mit $w = 160 \text{ kg/m}^3$ ergibt sich dann:

$$w_{\text{Zugabe}} = 160 - 650 \cdot 0,06 = 160 - 39 = 121 \text{ kg/m}^3$$

■ 5 Rohdichte

Für die Zusammensetzung des Betons müssen die Dichten der verwendeten Ausgangsstoffe bekannt sein. In den Tafeln 4, 5

Tafel 4: Dichte der Zemente

Zementart	Dichte [kg/dm³]	Schüttdichte [kg/dm³]	
		lose eingefüllt	ingerüttelt
Portlandpuzzolanzement, Portlandflugaschezement	~ 2,9	0,9 ... 1,2	1,6 ... 1,9
Portlandhütten-, Hochofen-, Portlandschiefer-, Portlandkalksteinzement	~ 3,0		
Portlandzement	~ 3,1		

Tafel 5: Dichte der Gesteinskörnungen

Art der Gesteinskörnung	Beispiel	Rohdichte [kg/dm³]
Leichte Gesteinskörnungen	Naturbims	0,4 ... 0,7
	Hüttenbims	0,5 ... 1,5
	Blähton, Blähschiefer	0,4 ... 1,9
Normale Gesteinskörnungen	Kiessand (Quarz)	2,6 ... 2,7
	Granit	2,6 ... 2,8
	Dichter Kalkstein	2,7 ... 2,8
	Basalt	2,9 ... 3,1
Schwere Gesteinskörnungen	Baryt (Schwerspat)	4,0 ... 4,3
	Magnetit	4,6 ... 4,8
	Hämatit	4,7 ... 4,9
Rezyklierte Gesteinskörnungen ¹⁾	Betonsplitt, -brechsand	≥ 2,0
	Bauwerksplitt, -brechsand	≥ 2,0

¹⁾ Verwendungsbeschränkung auf die Gesteinskörnungstypen 1 bzw. 2 (zu mindestens 90 % bzw. 70 % bestehend aus Beton und Gesteinskörnung) entsprechend DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“.

Tafel 6: Rohdichte von Zusätzen

Zusatzstoffart	Rohdichte [kg/m ³]
Quarzmehl [6]	ca. 2,65
Kalksteinmehl [6]	2,6 ... 2,7
Pigmente [7]	4 ... 5
Flugasche [4], [5]	2,2 ... 2,4
Trass [11]	2,4 ... 2,6
Hüttensandmehl [10]	im Einzelfall festlegen
Silikastaub ¹⁾ [8], [9]	ca. 2,2
Silikasuspension ¹⁾ [8], [9]	ca. 1,4

¹⁾ Bei Verwendung von Zementen, die Silikastaub als Hauptbestandteil enthalten, darf Silikastaub (Silikasuspension) nicht als Zusatzstoff eingesetzt werden.

und 6 sind die wichtigsten Kennwerte für die Ausgangsstoffe von Normalbeton aufgeführt.

■ 6 Zusammensetzung von Beton

6.1 Stoffraumrechnung

Die für 1 m³ Beton erforderlichen Zugabemengen von Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusätzen und Fasern sind jeweils durch eine Mischungsberechnung zu ermitteln [14].

Die Einzelmengen ermittelt man jeweils unter Einschluss der Oberflächenfeuchte mit der Stoffraumrechnung. Die Rechnung geht davon aus, dass 1 m³ (= 1000 dm³) Beton sich aus den Volumenanteilen der einzelnen Stoffe und dem Porengehalt zusammensetzt. Die Volumenanteile sind zu errechnen aus $V = \text{Masse/Rohdichte}$

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{g}{\rho_g} + p + z. \text{B. } \frac{f}{\rho_f}$$

- z: Zementgehalt [kg]
- w: Wassergehalt [kg]
- g: Gesteinskörnungsgehalt [kg]
- f: Gehalt an Zusatzstoffen [kg]
- ρ_z : Rohdichte des Zements [kg/dm³]
- ρ_w : Rohdichte des Wassers [kg/dm³]
- ρ_g : Rohdichte der Gesteinskörnung [kg/dm³]
- ρ_f : Rohdichte der Zusatzstoffe [kg/dm³]
- p: Porenvolumen [dm³]

Beispiel 3:

(vereinfacht nur für z, w, g, p und Gesteinskörnungen gleicher Rohdichte):

Gegeben:

- Zementgehalt: $z = 300 \text{ kg/m}^3$
- Dichte des Zements: $\rho_z = 3,0 \text{ kg/dm}^3$
- Wassergehalt: $w = 150 \text{ kg/dm}^3$
- Luftgehalt (Poren): $p = 2 \text{ dm}^3 (= 20 \text{ l} = 2 \%)$
- Rohdichte der Gesteinskörnung: $\rho_g = 2,60 \text{ kg/dm}^3$

Gesucht:

- Volumen der Gesteinskörnung in 1 m³ verdichtetem Beton
- Masse der Gesteinskörnung in 1 m³ verdichtetem Beton

Lösung:

$$V_z = \frac{z}{\rho_z} = \frac{300}{3,0} = 100 \text{ dm}^3$$

$$V_w = \frac{w}{\rho_w} = \frac{150}{1,0} = 150 \text{ dm}^3$$

$$\text{Luftporengehalt} = 20 \text{ dm}^3$$

$$\frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + p = 270 \text{ dm}^3$$

Für den Stoffraum V_g der Gesteinskörnung ergibt sich daraus:

$$V_g = \frac{g}{\rho_g} = 1000 - 270 = 730 \text{ dm}^3$$

Die Masse der oberflächentrockenen Gesteinskörnung errechnet sich dann zu $g = 730 \cdot 2,65 = 1935 \text{ kg}$.

6.2 Mischungsberechnung

In der Praxis hat sich für die Mischungsberechnung von Betonen folgende Vorgehensweise bewährt, die anhand eines Beispiels dargestellt werden soll:

Anmerkung: In diesem Merkblatt ist nur eine Auswahl der notwendigen Grenz- und Kennwerte aufgeführt. Es empfiehlt sich, die Broschüre „Beton – Herstellung nach Norm“ [12] und den Bauteilkatalog [13] parallel zu verwenden.

Beispiel 4:

Gegeben:

- Festigkeitsklasse: C20/25 (aus Statik)
- Expositionsklasse: XC1
- Feuchtigkeitsklasse: WO
- Konsistenzklasse: F3
- Gesteinskörnung: Sand/Kies B32, E1, Größtkorn D32
 $\rho_g = 2,65 \text{ kg/dm}^3$
- Zement: CEM II 42,5 N, $\rho_z = 3,0 \text{ kg/dm}^3$

1 Anforderungen

Aus der Anforderung XC1 ergeben sich folgende Grenzwerte der Betonzusammensetzung:

$$\begin{aligned} \min f_{ck} &= \mathbf{C 16/20 \text{ N/mm}^2} \\ \max w/z &= \mathbf{0,75} \\ \min z &= \mathbf{240 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

Aus der Statik ergibt sich: $\min f_{ck} = \mathbf{C 20/25}$.

Aus WO/E1 ergeben sich keine weiteren Anforderungen.

Daraus ergeben sich die maßgebenden Grenzwerte:

$$\begin{aligned} \min f_{ck} &\geq \mathbf{C 20/25 \text{ N/mm}^2} \\ \max w/z &\leq \mathbf{0,75} \\ \min z &\geq \mathbf{240 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

2 Berücksichtigung eines Vorhaltemaßes

Für die Festlegung des aus den Expositionsklassen resultierenden w/z-Werts ist ein Vorhaltemaß v von 0,02 bis 0,05 zu berücksichtigen (gewählt 0,02).

$$\max w/z \leq 0,75 - 0,02 = 0,73$$

Für die Bestimmung des Zielwerts der Betondruckfestigkeit $f_{cm, cube}$ sollte bei unbekannter Standardabweichung der Betonproduktion ein Vorhaltemaß v von 6 bis 12 N/mm² be-

rücksichtigt werden. Das Vorhaltemaß muss jedoch mindestens so groß gewählt werden, dass später die Konformitätskriterien sicher erfüllt werden. Bei bekannter Standardabweichung σ (mit $\sigma \geq 3 \text{ N/mm}^2$) kann ein Vorhaltemaß v an der unteren Grenze gewählt werden (3 bis 6 N/mm^2), anderenfalls sollte es sich im oberen Bereich befinden (9 bis 12 N/mm^2). In dem folgenden Beispiel wird ein Vorhaltemaß $v = 9 \text{ N/mm}^2$ gewählt.

$$f_{\text{cm, cube}} = f_{\text{ck, cube}} + 9 = 25 + 9 = 34 \text{ N/mm}^2$$

3 Umrechnung auf Trockenlagerung

Die Betonfestigkeitsklassen beziehen sich auf eine 28-Tage-Wasserlagerung der Probekörper nach DIN EN 12390-2 [16]. Da in Deutschland die Probekörper üblicherweise 7 Tage feucht und 21 Tage an der Luft gelagert werden und sich auch die Walzkurven auf $f_{\text{c, dry, cube}}$ beziehen, ist die erforderliche Würfeldruckfestigkeit mit dem Faktor 0,92 [3] auf Trockenlagerung umzurechnen:

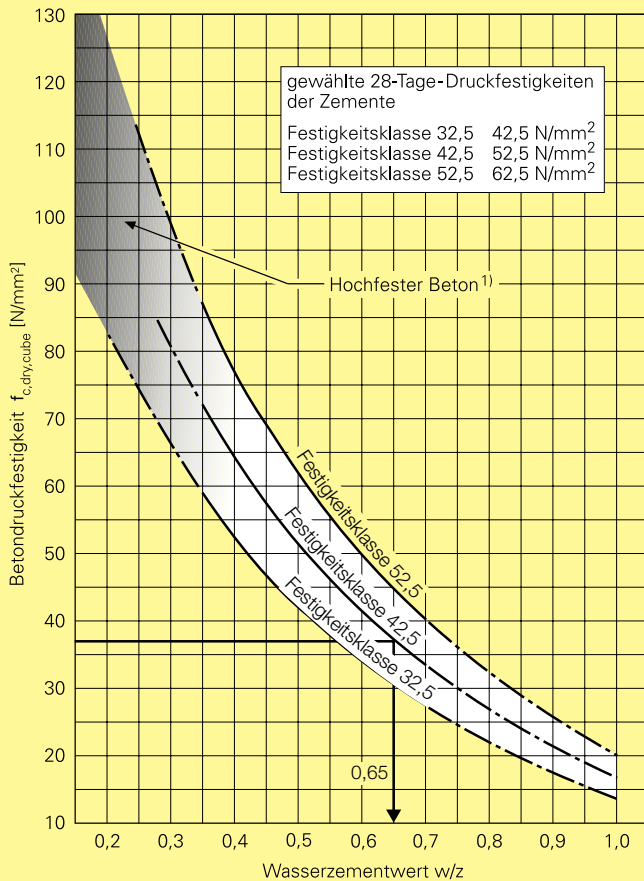
$$f_{\text{c, cube}} = 0,92 \cdot f_{\text{c, dry, cube}}$$

$$f_{\text{c, dry, cube}} = f_{\text{c, cube}} / 0,92 = 34 / 0,92 = 37 \text{ N/mm}^2$$

4 Bestimmung des maximalen w/z-Werts

Mit Hilfe der Walzkurven wird der für die Druckfestigkeit erforderliche w/z-Wert ermittelt (Bild 1).

Für einen Zement CEM II 42,5 N ergibt sich: $\max w/z \leq 0,65$



¹⁾ Bei hochfestem Beton verliert der Einfluss der Zementdruckfestigkeit an Bedeutung.

Bild 1: Zusammenhang Betondruckfestigkeit, Zementfestigkeitsklasse und w/z-Wert („Walzkurven“)

Überprüfung der Anforderung aus Expositionsklassen inklusive betontechnologischer Abminderung von 0,02:

$$\max w/z = 0,65 \leq 0,73$$

$$\text{gew.: } w/z = 0,65$$

5 Ermittlung des Wasseranspruchs für die Gesteinskörnung
Aus Tafel 3 ergibt sich für eine weiche Konsistenz F3 und Sieblinie B32 mit $k = 4,2$:

$$\text{erf. } w = 190 \text{ l/m}^3$$

6 Bestimmung des erforderlichen Zementgehalts

$$z = \frac{w}{w/z} = \frac{190}{0,65} = 292 \text{ kg/m}^3$$

Überprüfung des Mindestzementgehalts:

$$\text{vorh. } z = 292 \text{ kg/m}^3 \geq \min z = 240 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{gew. } z = 292 \text{ kg/m}^3$$

7 Bestimmung des Gehalts an Gesteinskörnung

Mit Hilfe der Stoffraumrechnung lässt sich der Anteil der Gesteinskörnung berechnen:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3$$

$$- 190 \text{ dm}^3 \text{ Wasser (190 kg/m}^3 / 1,0 \text{ kg/dm}^3)$$

$$- 97 \text{ dm}^3 \text{ Zement (292 kg/m}^3 / 3,0 \text{ kg/dm}^3)$$

$$- 20 \text{ dm}^3 \text{ Luftporen (geschätzt)}$$

$$693 \text{ dm}^3 \cdot 2650 \text{ kg/m}^3 = 1836 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 1836 \text{ kg/m}^3$$

Die Gesteinskörnung kann nun entsprechend der gewählten Sieblinie auf einzelne Korngruppen aufgeteilt werden.

8 Berechnung des Zugabewassers

Die Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung schwankt nach Abschnitt 3 zwischen 3 und 5 M.-%. Das heißt zwischen

$$1836 \cdot 0,03 = 55 \text{ l/m}^3 \text{ Wasser und}$$

$$1836 \cdot 0,05 = 92 \text{ l/m}^3 \text{ Wasser}$$

Angenommen wird 80 l/m^3 (entsprechend 4,4 M.-%)

Daraus ergibt sich eine Zugabewassermenge von

$$w_{\text{Zugabe}} = 190 - 80 = 110 \text{ l/m}^3$$

9 Betonzusammensetzung

Es ergibt sich folgende Zusammensetzung für 1 m^3 Beton:

Zement: 292 kg
Gesteinskörnung: 1836 kg
Wasser: 190 l

10 Mischanweisung

Es ergibt sich unter Abzug der Oberflächenfeuchte folgende Mischanweisung für 1 m^3 Beton:

Zement: 292 kg
Gesteinskörnung: 1916 kg
Zugabewasser: 110 l

■ 7 Anrechnung von Zusätzen

7.1 Zusatzmittel

Falls die Gesamtmenge flüssiger Zusatzmittel größer als 3 l/m³ Beton ist, muss die darin enthaltene Wassermenge bei der Berechnung des w/z-Werts berücksichtigt werden.

7.2 Zusatzstoffe

Flugasche und Silikastaub dürfen unter bestimmten Voraussetzungen auf den Mindestzementgehalt und den w/z-Wert angerechnet werden. Die Zugabemengen müssen mindestens der Zementverringermenge entsprechen.

Die Berücksichtigung beim w/z-Wert erfolgt über Anrechenbarkeitswerte k mit folgender Beziehung:

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + k_f \cdot f} \quad \text{bzw.} \quad \frac{w}{z + k_s \cdot s}$$

Dabei sind:

- (w/z)_{eq} = äquivalenter Wasserzementwert
- k_f = k-Wert für Flugasche (k_f = 0,4)
- k_s = k-Wert für Silikastaub (k_s = 1,0)
- f = Massenanteil Flugasche [kg]
- s = Massenanteil Silikastaub [kg]

Der maximale Gehalt, der auf den w/z-Wert angerechnet werden darf beträgt

bei Flugasche:

- f_s ≤ 0,33 · z bei Zementen ohne P, V und D
- f_s ≤ 0,25 · z bei Zementen mit P oder V, aber ohne D
- f_s ≤ 0,15 · z bei Zement mit D

bei Silikastaub:

- f_s ≤ 0,11 · z bei allen Zementarten

Es können auch größere Mengen an Flugasche zugegeben werden. Diese dürfen aber nicht auf den äquivalenten w/z-Wert angerechnet werden. Größere Mengen an Silikastaub sind unzulässig. Wird gleichzeitig Flugasche und Silikastaub zugegeben, gelten andere Anrechenbarkeiten. Diese Anrechenbarkeiten und weitere Festlegungen wie z. B. für Beton mit hohem Sulfatwiderstand sind in [12] zu finden.

Beispiel 5:

Gegeben:

Festigkeitsklasse:	C25/30
Expositionsklassen:	XC4, XF1
Feuchtigkeitsklasse:	WA
Konsistenzklasse:	F3
Gesteinskörnung:	Sand/Kies B32, E1 Größtkorn D32
Zement:	CEM III/A 42,5 N ρ _z = 3,0 kg/dm ³

Grenzwerte: (w/z)_{eq} ≤ 0,60
z ≥ 270 kg/m³

Vorhaltemaß für (w/z)_{eq}: v = 0,02

Es soll die maximal mögliche Menge an Flugasche zugegeben werden; f_s soll also sein = f_{s,max} ≤ 0,33 · z, k_f = 0,40

Lösung:

Die Mischungsberechnung hat ergeben:
w/z = 0,58, z = 328 kg/m³, w = 190 l/m³

Der Zementgehalt bei Anrechnung von Flugasche ergibt sich aus folgender Formel:

$$z = b_{eq} / (1 + k_f \cdot f_s / z) = 328 / (1 + 0,4 \cdot 0,33) = \mathbf{290 \text{ kg/m}^3}$$

mit: b_{eq} = Masseanteil (Zement + Flugasche)

$$f = (f_s / z) \cdot z = 0,33 \cdot 290 = \mathbf{96 \text{ kg/m}^3} \text{ Flugasche}$$

Kontrolle:

z	= 290 kg/m ³	> 270 kg/m ³
(w/z) _{eq}	= 190 / (290 + 0,4 · 96) = 0,58	≤ 0,60 - v
f _s	= f _{s,max} = 96 kg/m ³	= 96 kg/m ³

Oftmals wird z. B. zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit eine kleinere Flugaschemenge als die maximal mögliche zugegeben. Dann ist der (w/z)_{eq} vorzugeben und die erforderliche Zugabewassermenge aus dem b_{eq} zu ermitteln.

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z_{red} + 0,4 \cdot f_{s, \text{ gewählt}}} \quad (\text{siehe Beispiel IV im Anhang})$$

■ 8 Berücksichtigung von Luftporen

Praktisch vollständig verdichteter Beton enthält neben Kapillar-, Gel- und Schrumpfporen immer noch ca. 2 % Luftporen (20 l/m³) als Verdichtungsporen. Werden jedoch durch die Zugabe eines luftporenbildenden Zusatzmittels (LP) gezielt Mikroluftporen in den Beton eingeführt, so wird dadurch der Widerstand gegen Frost- und Taumittel gesteigert, gleichzeitig aber auch die Druckfestigkeit verringert. Diesem Umstand wird in DIN EN 206 dadurch Rechnung getragen, dass bei verschiedenen Expositionsklassen die erforderlichen Mindestdruckfestigkeitsklassen bei Verwendung von LP-Beton um eine Klasse niedriger sein dürfen. Soll die Festigkeit jedoch z. B. aufgrund statischer Erfordernisse erhalten bleiben, lässt sich dies betontechnologisch bei der Mischungsberechnung für die Erstprüfung vereinfacht durch die Annahme berücksichtigen, dass 1 % LP bei der Berechnung des w/z-Werts festigkeitsverringend wie ca. 10 l Wasser wirken. Da sich durch die Zugabe des Luftporenbildners auch die Konsistenz ändert (verflüssigende Wirkung) muss dies ebenfalls bei der Wasserzugabe berücksichtigt werden; 1 % LP wirken auf die Konsistenz wie 5 l Wasser (siehe auch Tafel 7).

Beispiel 6:

Ein Beton mit w/z = 0,48, z = 379 kg/m³ und w = 182 l/m³ soll als LP-Beton mit 6 Vol.-% Luftporen ohne Festigkeitsverlust und ohne Änderung der Konsistenz zusammengesetzt werden.

Anmerkung: In den erforderlichen 6 % Luftporen sind 2 % ohnehin vorhandene Luftporen bereits enthalten.

$$z_{\text{ohne LP}} = \frac{w}{w/z} = \frac{182}{0,48} = 379 \text{ kg/m}^3 \text{ Zement}$$

$$z_{\text{mit LP}} = \frac{w + w_{LP,fc} - w_{LP,Kons}}{w/z} = \frac{182 + (6 - 2) \cdot 10 - (6 - 2) \cdot 5}{0,48} = 421 \text{ kg/m}^3 \text{ Zement}$$

Dabei sind:

$w_{LP,fc}$ = Wassergehaltseinfluss auf Druckfestigkeit

$w_{LP,Kons}$ = Wassergehaltseinfluss auf Konsistenz

Der Festigkeitsverlust könnte also durch eine Erhöhung des Zementgehalts um $421 - 379 = 42 \text{ kg/m}^3$ kompensiert werden, ohne dass sich die Konsistenz ändert. Eine Senkung des nun höheren Zementgehalts könnte unter anderem durch die Wahl einer höheren Zementfestigkeitsklasse, die Verwendung von BV/FM, die Veränderung der Sieblinie und ggf. die Anrechnung von Flugasche und dergleichen durchgeführt werden.

■ 9 Ergänzende Hinweise

Je nach Notwendigkeit können von Fall zu Fall weitere Kontrollen wie z.B. die Überprüfung des Mehlkorngehalts, des Zementleingehalts usw. erforderlich werden oder sinnvoll sein.

■ 10 Mischungsberechnung mit Vordrucken

Der Verband Deutscher Betoningenieure VDB hat einen Vordruck entwickelt, mit dessen Hilfe der Anwender durch die Mischungsberechnung geführt wird. Die Formulare stehen zum Download unter www.betoningenieure.de zur Verfügung. Ein Beispiel ist in Tafel 8 wiedergegeben.

■ 11 Ablaufschema und Rechenbeispiele

Die ausführliche Vorgehensweise bei der Mischungsberechnung wird anhand eines Ablaufschemas in Tafel 9 beschrieben.

■ 12 Rechenbeispiele

Die im Anhang aufgeführten Rechenbeispiele orientieren sich an dem Ablaufschema in Tafel 9 und sollen dies ergänzen und für den Praktiker nachvollziehbar erläutern.

■ 13 Anhalts- und Erfahrungswerte aus der praktischen Betontechnologie

In der praktischen Betontechnologie haben sich die in Tafel 7 wiedergegebenen Anhalts- und Erfahrungswerte oft als hilfreich erwiesen, wenn keine anderen Daten zur Verfügung stehen. Die Werte können nur als grobe Schätzung für einen Normalfall herangezogen werden und sollten deshalb auch mit Augenmaß und Sachverstand angewendet werden.

■ 14 Normen, Regelwerke, Literatur

- [1] DIN EN 1992-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [2] DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [3] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [4] DIN EN 450-1 Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [5] DIN EN 934 Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teile 1 bis 6
- [6] DIN EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton
- [7] DIN EN 12878 Pigmente zum Einfärben von Zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfverfahren
- [8] DIN EN 13263-1 Silikastaub für Beton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [9] DIN EN 13263-2 Silikastaub für Beton – Teil 2: Konformitätsbewertung
- [10] DIN EN 15167-1 Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Anforderungen und Konformitätskriterien
- [11] DIN 51043 Traß – Anforderungen, Prüfung
- [12] Beton – Herstellung nach Norm, Verlag Bau+Technik, Erkrath 2016
- [13] Bauteilkatalog, Verlag Bau+Technik, Erkrath 2016
- [14] Guter Beton, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2014
- [15] Zementmerkbblätter, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf
- [16] DIN EN 12390-2 Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Ausgabe 08-2009

Tafel 7: Anhalts- und Erfahrungswerte aus der praktischen Betontechnologie

Betonzusammensetzung:	
Änderung des Größtkorns	$\pm 10 \text{ l Wasser/m}^3$
Siebliniensprung	$\pm 20 \text{ l Wasser/m}^3$
Konsistenzsprung um eine Klasse	$\pm 20 \text{ l Wasser/m}^3$
BV	-10 bis 20 l Wasser auf Wasseranspruch/m ³
FM	-20 bis 30 l Wasser auf Wasseranspruch/m ³
LP	+1 % LP → +10 l Wasser berücksichtigen (siehe Abschnitt 8)
Konsistenz:	
2 l Wasser	erhöht das Ausbreitmaß um ca. 1 cm
BV: 0,1 M.-% vom Zementgewicht	erhöht das Ausbreitmaß um ca. 1 cm
FM: 0,1 M.-% vom Zementgewicht	erhöht das Ausbreitmaß um ca. 1,5 bis 2 cm (Wirkungsdauer unterschiedlich)
1 % LP	wirkt bei der Verarbeitbarkeit wie 10 kg Mehlkorn oder 5 l Wasser
Je 10 Minuten steift Beton um 1,0 bis 1,5 cm an.	witterungsabhängig
Druckfestigkeit des Betons:	
+10 l Wasser	-3,5 N/mm ² Druckfestigkeit
-0,01 w/z	+1,0 N/mm ² Druckfestigkeit
+10 kg/m ³ Zement (w/z = const.)	-1,0 N/mm ² Druckfestigkeit (Leimschichtdicke!)
+10 kg/m ² Zement (w = const.)	+1,5 N/mm ² Druckfestigkeit
Wechsel um eine Zementfestigkeitsklasse	± 20 bis 25 % bei der Betondruckfestigkeit
+1 % LP	-3,5 N/mm ² Druckfestigkeit
Temperaturabnahme Warmbeton:	
ca. 20 %/h (grober Schätzwert)	T_z Temperatur des Zements
$T_{Bo} \approx 0,1 \cdot T_z + 0,2 \cdot T_w + 0,7 \cdot T_g$	T_w Temperatur des Wassers
	T_g Temperatur der Gesteinskörnung

Tafel 8: Vordruck mit Mischungsberechnung

Mischungsentwurf für Normalbeton

Werk / Baustelle TB-MIX Beton - (Bestell) Nr: 12345

Beton: unbewehrt Stahlbeton Spannbeton
 Schwerbeton nach Alkali-Richtlinie Faserbeton

Betonart: nach Eigenschaften nach Zusammensetzung Standardbeton
 sonstige Eigenschaften _____

Anforderungen

Expositionsklasse <input type="checkbox"/> X0 <input checked="" type="checkbox"/> XC 4 <input type="checkbox"/> XD <input type="checkbox"/> XS <input checked="" type="checkbox"/> XF 1 <input checked="" type="checkbox"/> XA 1 <input type="checkbox"/> XM	Druckfestigkeitsklasse <input type="checkbox"/> C 30 / 37
<input type="checkbox"/> Sulfatgehalt: Wasser _____ [mg/l] Boden _____ [mg/kg]	Prüfalter <input checked="" type="checkbox"/> 28 Tage <input type="checkbox"/> 56 Tage <input type="checkbox"/> _____ Tage
Konsistenzklasse <input type="checkbox"/> C0 <input type="checkbox"/> C1 <input type="checkbox"/> C2 <input type="checkbox"/> C3 <input type="checkbox"/> F1 <input type="checkbox"/> F2 <input checked="" type="checkbox"/> F3 <input type="checkbox"/> F4 <input type="checkbox"/> F5 <input type="checkbox"/> F6	Sieblinie <input checked="" type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C Größtkorn <input type="checkbox"/> 8 <input checked="" type="checkbox"/> 16 <input type="checkbox"/> 22 <input type="checkbox"/> 32 mm
<input checked="" type="checkbox"/> max. w/z-Wert <u>0,60</u>	Wassereindringwiderstand <input type="checkbox"/> e _{max} _____ mm
<input checked="" type="checkbox"/> max. (w/z) _{eq} -Wert <u>0,60</u> <input type="checkbox"/> f ≤ 0,33 z	Bauteildicke <input checked="" type="checkbox"/> d ≤ 40 cm <input type="checkbox"/> d > 40 cm
<input checked="" type="checkbox"/> min. / <input type="checkbox"/> max. Zementgehalt <u>280</u> / _____ kg/m ³	höchstzulässiger Mehlkorngesamt <u>400</u> - <u>450</u> kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> bei Anrechnung von Flugasche <u>270</u> / _____ kg/m ³	<input type="checkbox"/> min. / <input type="checkbox"/> max. Zementleimgehalt _____ / _____ dm ³ /m ³
<input type="checkbox"/> min. Luftgehalt im Frischbeton _____ Vol.-%	
Alkaliempfindlichkeitsklasse <input checked="" type="checkbox"/> EI <input type="checkbox"/> EII <input type="checkbox"/> EIII <input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/> OF <input type="checkbox"/> G	Feuchtigkeitsklasse <input type="checkbox"/> WO <input checked="" type="checkbox"/> WF <input type="checkbox"/> WA

Ausgangsstoffe

Zementart / Festigkeitsklasse CEM III/A 42,5 N nach DIN EN 197 - 1 Werk Z-Werk

Zement mit besonderen Eigenschaften: SR NA LH VLH

Gesteinskörnung
 - Art: normal schwer rezykliert Körnungsziffer K = 4,13 Werk Steinbrech
 - Anforderungen: FI SI f F 4 MS CI Q _____

Zusatzstoff: Typ I _____ _____ Hersteller _____ Werk _____
 Typ II Flugasche _____ Fasern Hersteller F-Werk Werk Dortmund

Zusatzmittel Z_m Hersteller Mittel-Mix
 BV 92 FM _____ LP _____ VZ _____ ST _____ _____

Frischwasser 100 % Restwasser _____ % / Dichte Restwasser _____ kg/dm³

Berechnung

Druckfestigkeitsklasse aus	- Bemessung C <u>30 / 37</u> - Expositionsklasse C <u>25 / 30</u>	C _{maßg.} = <u>30 / 37</u>
Zielfestigkeit aus	- f _{cm} ≥ (f _{ck} + Vorhaltemaß ^a) = <u>37</u> + <u>9</u> = <u>46</u> N/mm ² - f _{cm,dry} = f _{cm} / 0,92 = <u>46</u> / 0,92 = <u>50</u> N/mm ²	f _{cm} = <u>46</u> N/mm ² f _{cm,dry} = <u>50</u> N/mm ²
Wassergehalt w ^b aus	- Konsistenzklasse C _____ / F <u>3</u> 1) w aus Tab.: <u>190</u> kg/m ³ - Körnungsziffer K <u>4,13</u> oder: 2) w = 13 00 / (4,13 + 3) = <u>182</u> kg/m ³ - Erfahrung bei Zugabe von: Zusatzmittel <u>10</u> % w = <u>171</u> kg/m ³ Zusatzstoff w = _____ kg/m ³	(<u>190</u> · 0,90) w _{maßg.} = <u>171</u> kg/m ³
w/z-Wert aus	- Expositionsklasse w/z = <u>0,60</u> - 0,02 w/z = <u>0,58</u> - Zielfestigkeit w/z = <u>0,53</u> - Flugasche [w/(z + k · f)] = <u>171</u> / (287 + 0,4 · 95) ^④ (w/z) _{eq} = <u>0,53</u>	w/z _{maßg.} = <u>0,53</u> ^①
Zementgehalt z aus	- Wassergehalt [z = w/(w/z)] = <u>171</u> / <u>0,53</u> z = <u>325</u> kg/m ³ - Expositionsklasse z = <u>270</u> kg/m ³ - unter Anrechnung von Flugasche: [z ₁ = z / (1 + k · 0,33)] = <u>325</u> / (1 + 0,40 · 0,33) z ₁ = <u>287</u> kg/m ³	Z _{maßg.} = <u>287</u> kg/m ³ ^②
Zusatzstoffgehalt aus	- Typ I Gehalt = _____ kg/m ³ - Typ II (Flugasche) f = 0,33 · z ₁ = <u>0,33</u> · <u>287</u> f = <u>95</u> kg/m ³	f _{maßg.} = <u>95</u> kg/m ³ ^③
Zusatzmittelgehalt aus <input type="checkbox"/> BV <input type="checkbox"/> FM <input type="checkbox"/> LP <input type="checkbox"/> VZ <input type="checkbox"/> ST <input type="checkbox"/> _____	- Dosierbereich _____ bis <u>0,5</u> M.-% von z - Dosierbereich _____ bis _____ M.-% von z	Z _m maßg. = <u>1,44</u> kg/m ³ Z _m maßg. = _____ kg/m ³

^a Gemäß Anhang A DIN 1045-2:2008-07

^b Empfehlung: höherer Wassergehalt maßgebend

Tafel 8: Vordruck mit Mischungsberechnung (Fortsetzung)

Stoffraumrechnung für 1 m³ Beton

Ausgangsstoffe	Frischbeton			Mehlkorngehalt		Leimgehalt	
	Masse [kg]	Dichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]		[kg]		[dm³]
Zement	287	3,0	96	Zement	287	Zement	96
Frischwasser	171	1,0	171			Frischwasser	171
Restwasser						Restwasser	—
- Feststoff aus Restwasser		2,1		Feststoff	—	Feststoff	—
Luftgehalt [Vol.-%]			20				
Zusatzstoff	95	2,32	41	Zusatzstoff	95	Zusatzstoff	41
Zusatzmittel						Zusatzmittel	—
Gesteinskörnung	1754 = 2,61		672	Gesteinskörnung ≤ 0,125 mm	50		
Summe	2307		1000	Summe	432	Summe	308

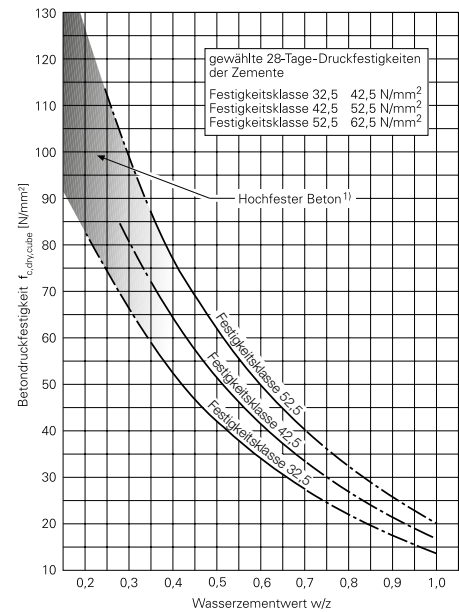
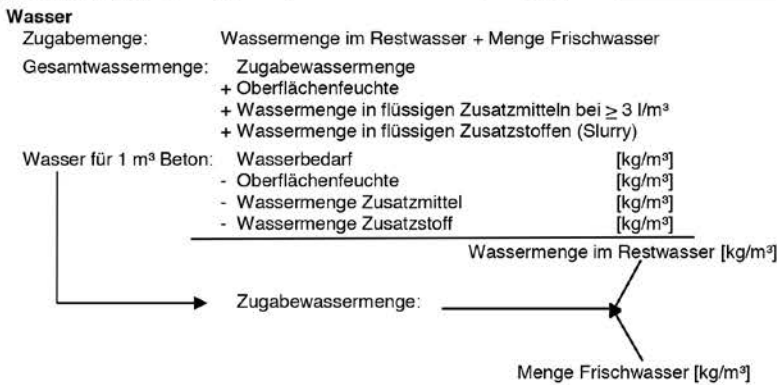
Zusammensetzung für 1 m³ Frischbeton

Stoffe	Korngruppe [mm]	Anteil [Vol.-%]	Stoffraum [dm³]	Kornroh-dichte [kg/dm³]	Masse (Gesteinskörnung trocken) [kg]	Oberflächenfeuchte		Masse (Gesteinskörnung feucht) [kg]
						[M.-%]	[kg]	
	0 / 2	38	255	2,61	666	5,0	33	699
	2 / 8	22	148	2,65	392	3,0	12	404
	8 / 16	40	269	2,58	694	1,0	7	701
	/							
	/							
Summe		100	672		1752		52	1804
Zugabewasser								
- Frischwasser					171		- 52	119
- Restwasser (Wasser + Feststoff)								
Zement					287			287
Zusatzstoff					95			95
Zusatzmittel								(1,44)
Frischbetongewicht					2305			2305

Ort, Datum, Unterschrift: Dortmund, den 23.05.2014

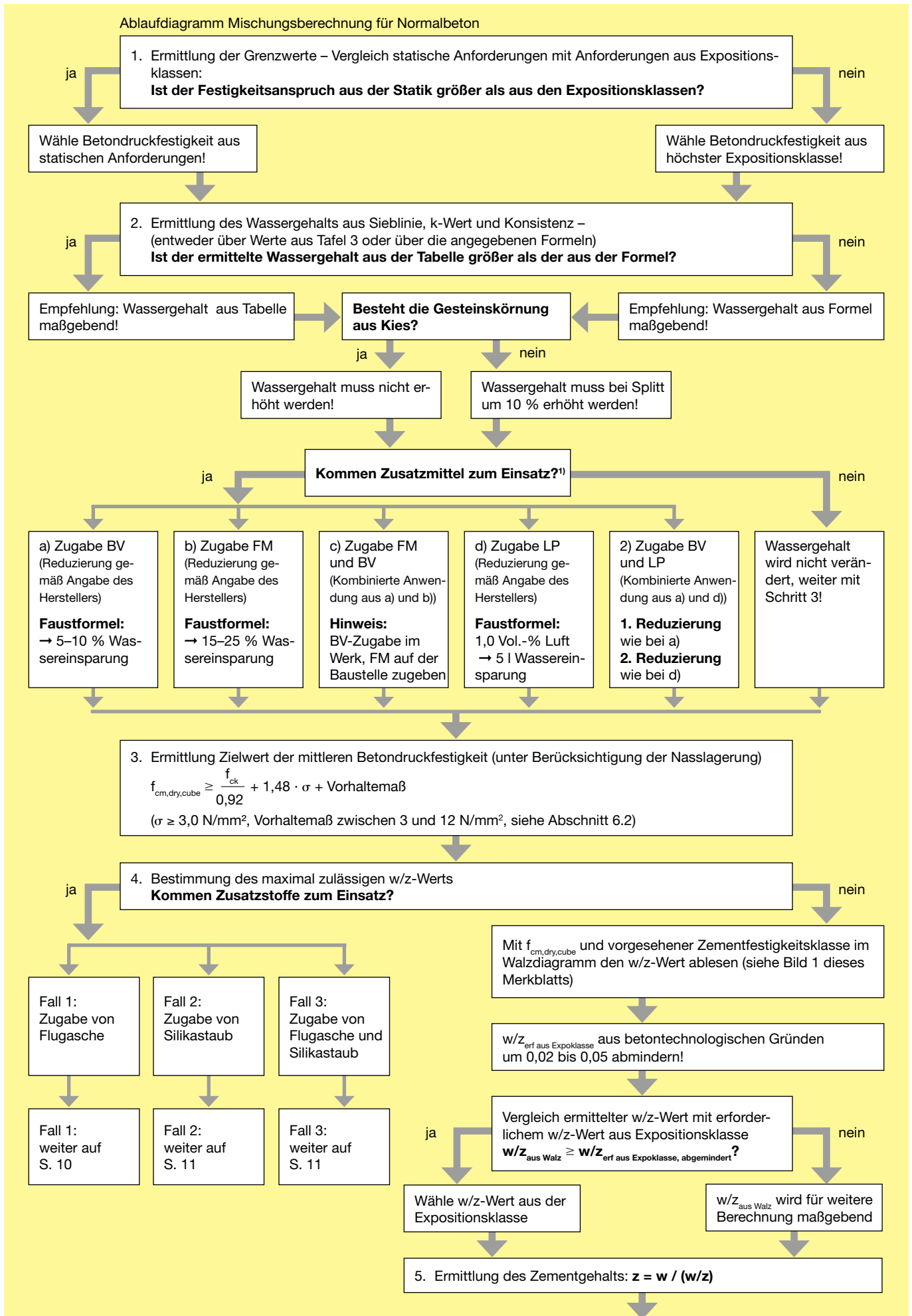
G. Würfel

Konsistenzklassen und Wasseranspruch für Frischbeton				
Bezeichnung	Klasse	Wasseranspruch	Ausbreitmaß [mm]	Verdichtungsmaß
sehr steif	C0	w = 1000/(K+3)		≥ 1,46
steif	C1 / F1	w = 1100/(K+3)	< 340	1,45 bis 1,26
plastisch	C2 / F2	w = 1200/(K+3)	350 bis 410	1,25 bis 1,11
weich	C3 / F3	w = 1300/(K+3)	420 bis 480	1,10 bis 1,04
sehr weich	F4		490 bis 550	
fließfähig	F5		560 bis 620	
sehr fließfähig	F6		≥ 630	

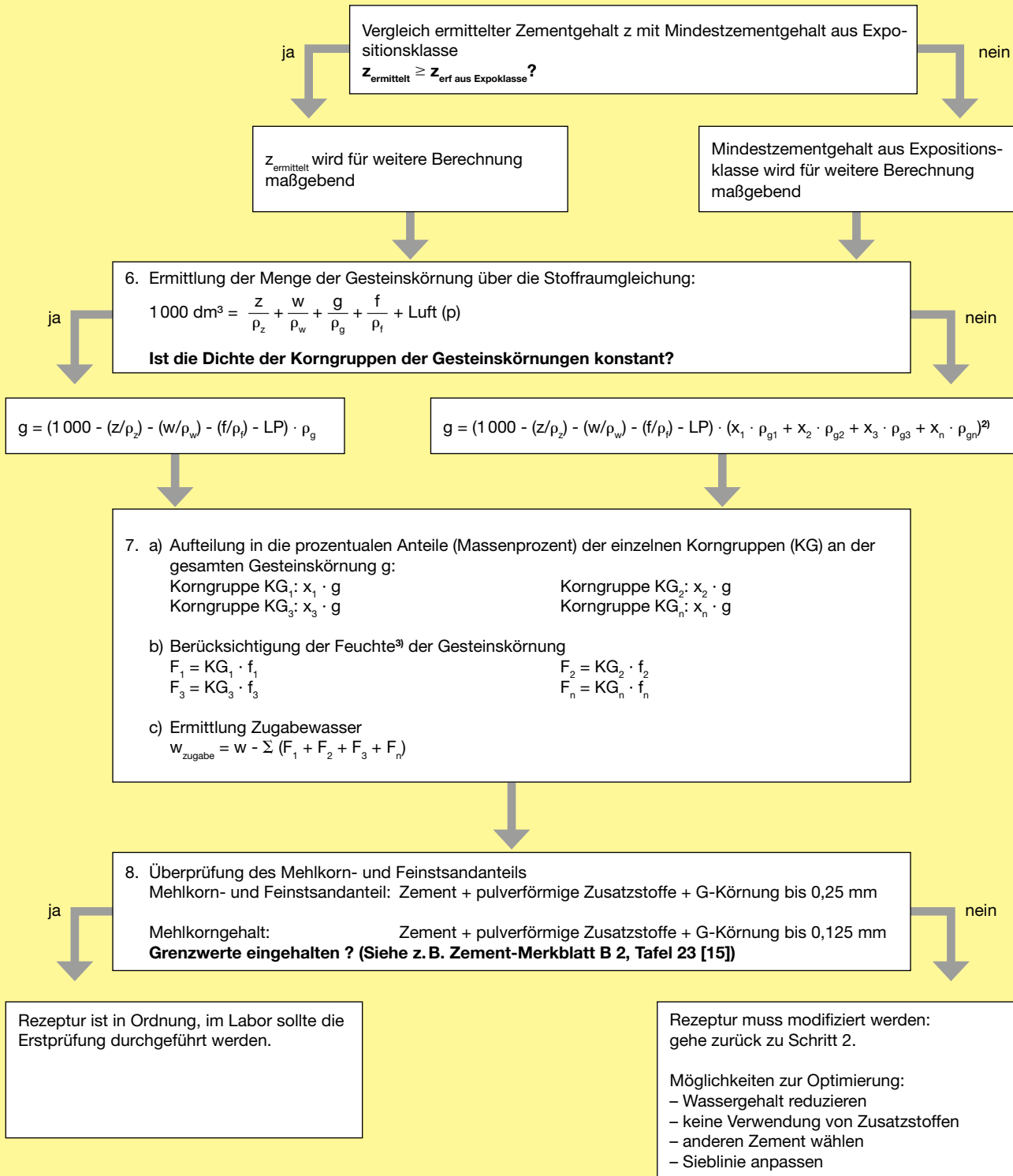


¹ Bei höchstem Beton verliert der Einfluss der Zementdruckfestigkeit an Bedeutung.

Tafel 9: Ablaufschema für die Mischungsberechnung einer Betonzusammensetzung



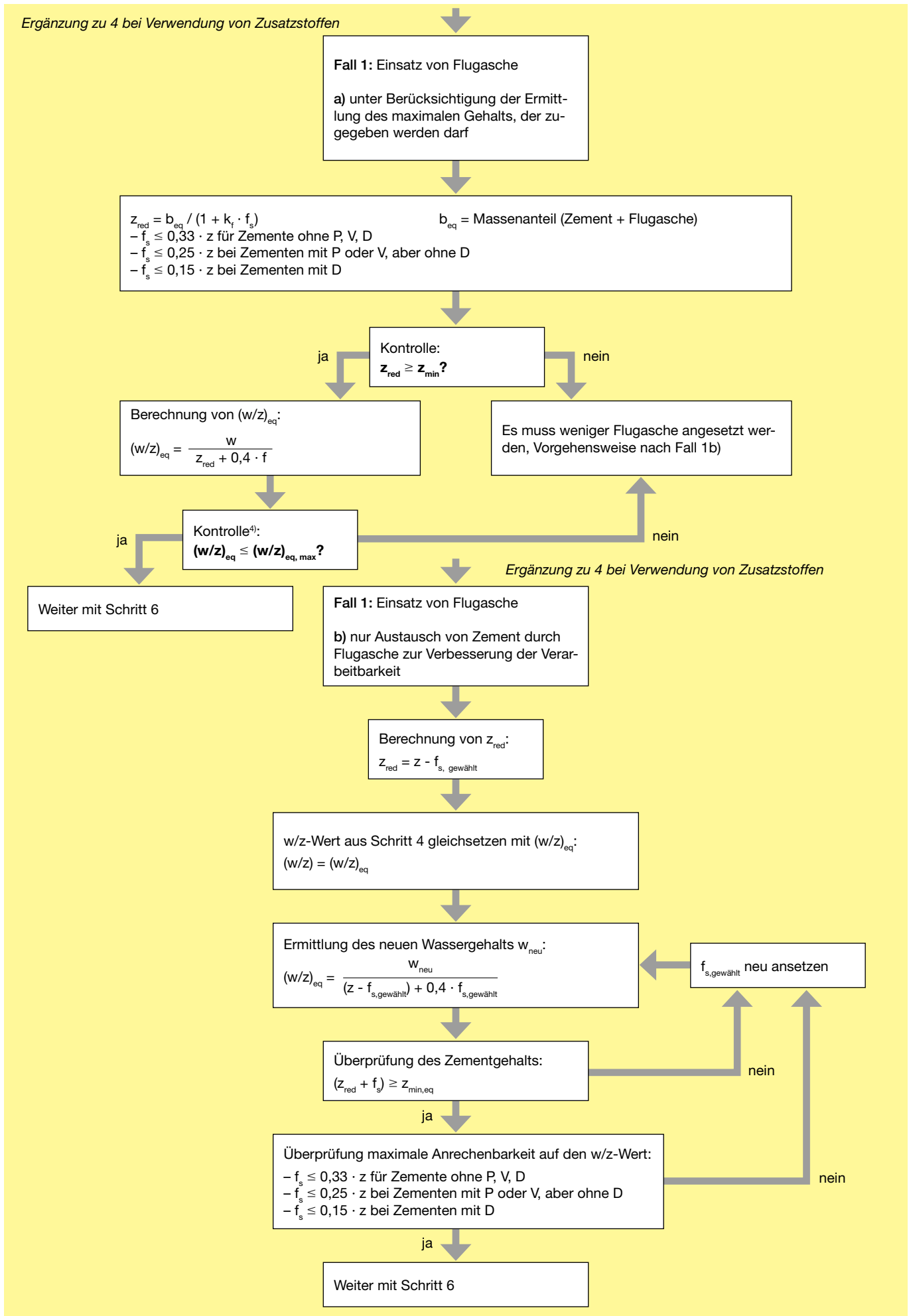
Tafel 9: Ablaufschema für die Mischungsberechnung einer Betonzusammensetzung (Fortsetzung)



Fußnoten:

- 1) Reduzierungen und Dosiermengen aus Angaben des Herstellers entnehmen (falls die Zusatzmittelmenge $\geq 3l/m^3$ ist, muss dies beim w/z-Wert berücksichtigt werden).
- 2) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$: Prozentualer Anteil an den einzelnen Korngruppen in Massenprozent ergibt sich aus der Sieblinienberechnung (Bei Gesteinskörnungen annähernd gleicher Rohdichte kann vereinfacht Massenprozent gleich Volumenprozent gesetzt werden).
- 3) $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$: Prozentualer Anteil an Feuchtigkeit in der Gesteinskörnung (im Regelfall wird der Sand elektronisch gemessen, bei den anderen Korngruppen entweder prüftechnisch ermitteln oder aus Erfahrung ableiten).
- 4) Auch bei $(w/z)_{eq, max}$ handelt es sich um den abgeminderten Wert aus der Expositions-klasse.

Tafel 9: Ablaufschema für die Mischungsberechnung einer Betonzusammensetzung (Fortsetzung)

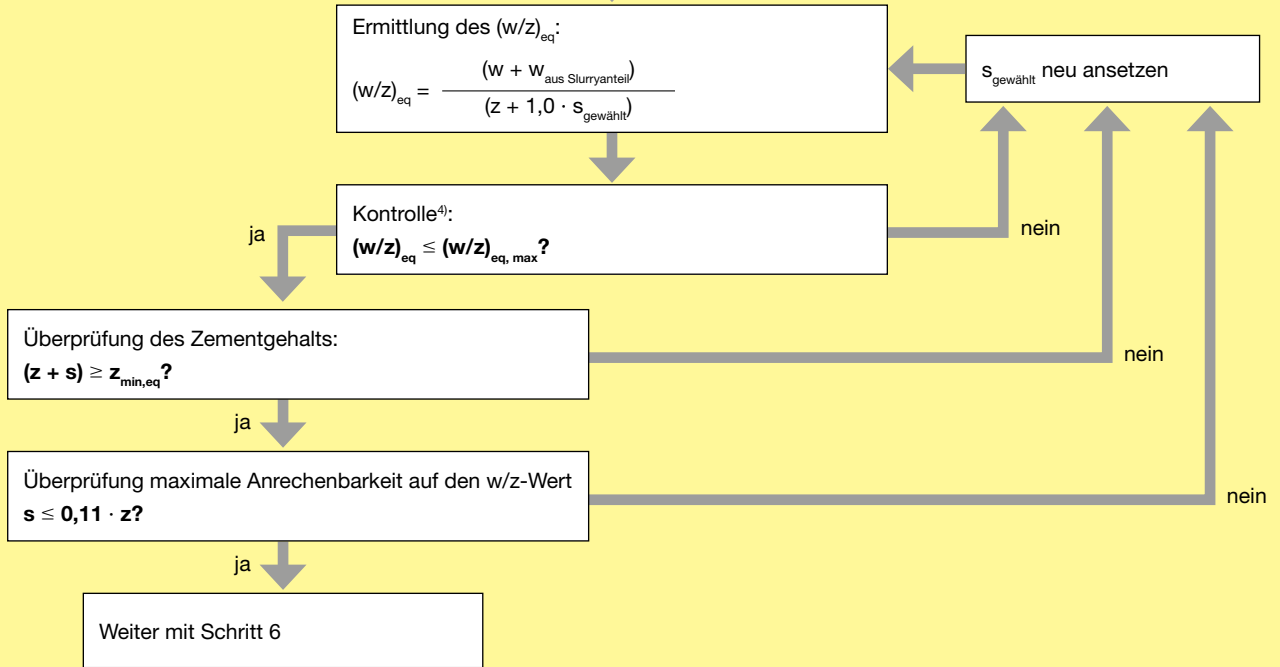


Tafel 9: Ablaufschema für die Mischungsberechnung einer Betonzusammensetzung (Fortsetzung)

Ergänzung zu 4 bei Verwendung von Zusatzstoffen

Fall 2: Einsatz von Silikastaub

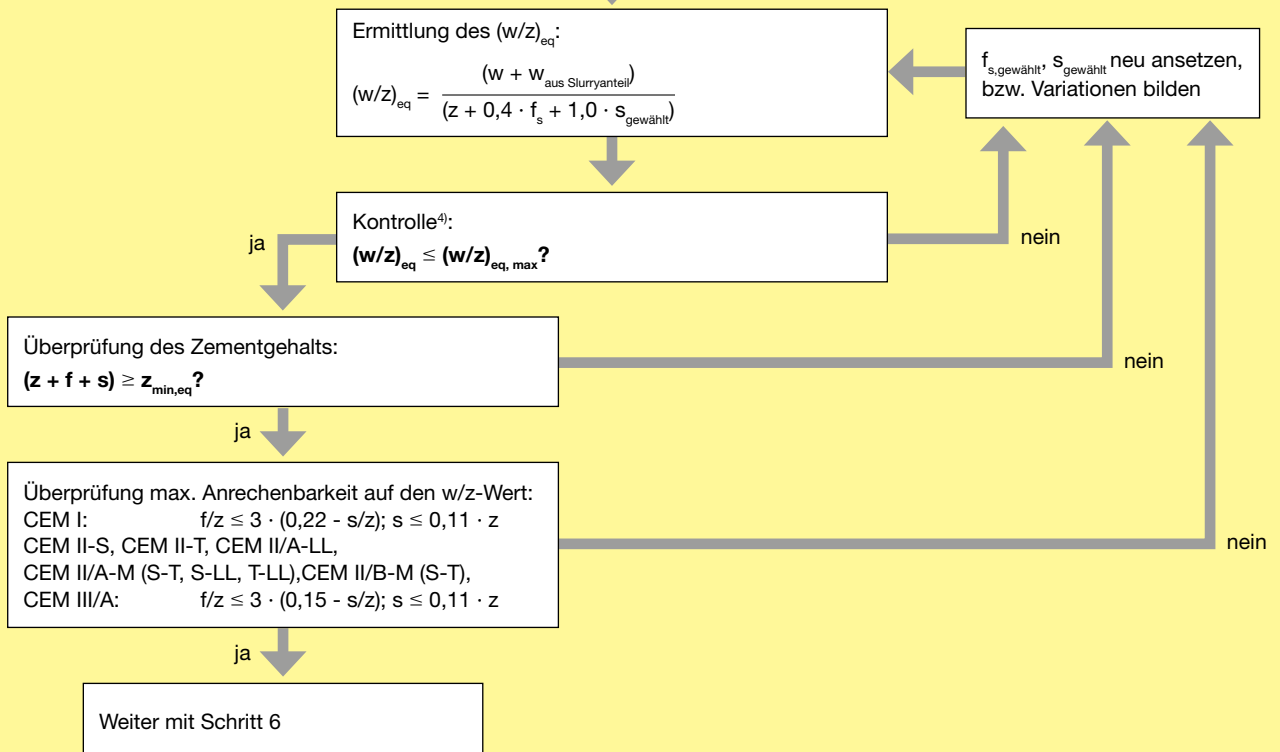
(Nicht anwendbar für Expositionsklasse XF2 und XF4; Hauptsächlich Anwendung zur Herstellung von Betonen mit höheren Betondruckfestigkeiten, meist erfolgt keine Reduzierung des Zementgehalts. Zugabe von Silikastaub nur für folgende Zemente möglich: CEM I, CEM II/A-S, /B-S, /A-P, /B-P, /A-V, /A-T, /A-LL, CEM II/A-M (S, P, V, T, LL), CEM II/B-M (S-T, S-V), CEM III/A, CEM III/B)



Ergänzung zu 4 bei Verwendung von Zusatzstoffen

Fall 3: Gleichzeitiger Einsatz von Flugasche und Silikastaub

(Nicht anwendbar für Expositionsklasse XF2 und XF4, Kombination aus Fall 1 und Fall 2)



■ 15 Anhang

Rechenbeispiele

Beispiel I (Innenbauteil):

Expositionsklasse:	XC1
Feuchtigkeitsklasse:	WO
Festigkeitsklasse aus Statik:	C20/25
Konsistenz:	F3
Zement:	CEM II 42,5 N; $\rho_z = 3,0 \text{ kg/dm}^3$
Zusatzstoffe:	keine
Zusatzmittel:	keine
Gesteinskörnungen:	Kies, Sieblinie B32, E1

Korngruppe	Rohdichte ρ_g [kg/dm ³]	Anteil [M.-%]	Feuchte [M.-%]
Sand: 0/2 mm	2,65	37	4,5
Kiessand, Kies: 2/8 mm	2,65	25	3,0
Kies: 8/32 mm	2,65	38	2,0

Gesucht: Mischungsberechnung

Vorgehensweise gemäß Ablaufdiagramm:

1. Ermittlung der Grenzwerte

	max w/z	min f_{ck}	min z [kg/m ³]	min z bei Zugabe von FA [kg/m ³]	Luft [Vol.-%]	Bemerkungen
aus Statik	–	C20/25	–	–	–	–
aus XC1	0,75	C16/20	240	240	–	–

Die weiß hinterlegten Zahlen stellen die Grenzwerte dar.

2. Ermittlung des Wassergehalts

Möglichkeit 1:

– Sieblinie B32 und gewünschte Konsistenz F3: 190 l/m³ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

Möglichkeit 2:

→ k-Wert von Sieblinie B32: 4,20 (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

→ einsetzen in die Formel:

$$\begin{aligned}
 w &= 1300/(k + 3) \\
 &= 1300/(4,20 + 3) \\
 &= 181 \text{ l/m}^3
 \end{aligned}$$

gewählt: $w = 190 \text{ l/m}^3$

3. Ermittlung Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit (unter Berücksichtigung der Nasslagerung)

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{f_{ck}}{0,92} + 1,48 \cdot \sigma + \text{Vorhaltema\ss}$$

($\sigma \geq 3,0 \text{ N/mm}^2$, Vorhaltema\ss zwischen 3 und 12 N/mm^2 wählbar, hier gewählt mit 3 N/mm^2 , sehr gute Produktionsbedingungen. Weitere Erläuterungen zur Wahl des Vorhaltema\sses siehe Abschnitt 6.2 Mischungsberechnung)

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{25}{0,92} + 1,48 \cdot 3 + 3$$

$$f_{cm,dry,cube} \geq 34,6 \text{ N/mm}^2 \approx \mathbf{35 \text{ N/mm}^2}$$

4. Bestimmung des maximal zulässigen w/z-Werts

Mit $f_{cm,dry,cube} = 35 \text{ N/mm}^2$ und der Zementfestigkeitsklasse 42,5 in das Walzdiagramm gehen – Bild 1 dieses Zementmerkblatts – und den zugehörigen w/z-Wert ablesen:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,68$$

Vergleich mit zulässigem w/z-Wert aus maßgebender Expositions-kategorie:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,68 \leq 0,73 \text{ (w/z-Wert aus Expositions-kategorie: 0,75, Abminderung um 0,02)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

Generell gilt, der kleinere w/z-Wert wird maßgebend.

$$\mathbf{w/z = 0,68}$$

5. Ermittlung des Zementgehalts

$$\begin{aligned}
 z &= w/(w/z) \\
 &= 190/0,68 \\
 &= 279 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

(Anmerkung: In der Praxis kann man entweder auf 275 abrunden oder auf 280 aufrunden!)

Vergleich mit Mindestzementgehalt aus maßgebender Expositions-kategorie:

$$z = 279 \text{ kg/m}^3 \geq 240 \text{ kg/m}^3 \text{ (Mindestzementgehalt aus Expositions-kategorie)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

$$\mathbf{z = 279 \text{ kg/m}^3}$$

6. Ermittlung der Menge der Gesteinskörnung über die Stoffraumgleichung

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{f}{\rho_f} + \text{Luft (p)}$$

Luftgehalt: Annahme 1,8 Vol.-%

Einsetzen der Werte und Gleichung auflösen nach g:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{279}{3,0} + \frac{190}{1,0} + \frac{g}{2,65} + \frac{0}{2,32} + 18$$

$$g = (1000 - (279/3,0) - (190/1,0) - 18) \cdot 2,65$$

$$\mathbf{g = 1852 \text{ kg/m}^3}$$

7. Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korngruppe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m ³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m ³]	Anteil feuchte Gesteinskörnung [kg/m ³]
0/2 mm	37	$0,37 \cdot 1852 = 685$	4,5	$0,045 \cdot 685 = 30,8$	$685 + 30,8 = 715,8$
2/8 mm	25	$0,25 \cdot 1852 = 463$	3,0	$0,03 \cdot 463 = 13,9$	$463 + 13,9 = 476,9$
8/32 mm	38	$0,38 \cdot 1852 = 704$	2,0	$0,02 \cdot 704 = 14,1$	$704 + 14,1 = 718,1$
Σ	100	1852		58,8	1910,8

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{\text{Zugabe}} = w - \sum (F_1 + F_2 + F_3)$$

$$w_{\text{Zugabe}} = 190 \text{ l} - 58,8 \text{ l}$$

$$w_{\text{Zugabe}} = 131,2 \text{ l}$$

8. Überprüfung des Mehlkorn- und Feinstsandanteils

Die Überprüfung des Mehlkorn- und des Feinstsandanteils wird exemplarisch nur an Beispiel I und Beispiel II vorgeführt. Bei den Beispielen III und IV wird darauf verzichtet.

Grundlage für die Überprüfung ist neben der Menge des Zements und der Menge der pulverförmigen Betonzusatzstoffe die angesetzte Sieblinie:

Mehlkorn- und Feinstsandanteil:

Gesamtmenge Zement

+ Gesamtmenge der pulverförmigen Betonzusatzstoffe

+ Gesteinskörnung bis 0,25 mm

Mehlkorngehalt:

Gesamtmenge Zement

+ Gesamtmenge der pulverförmigen Betonzusatzstoffe

+ Gesteinskörnung bis 0,125 mm

Aus der Sieblinienberechnung liegt vor: Sieblinie B32 (siehe Bild 2)

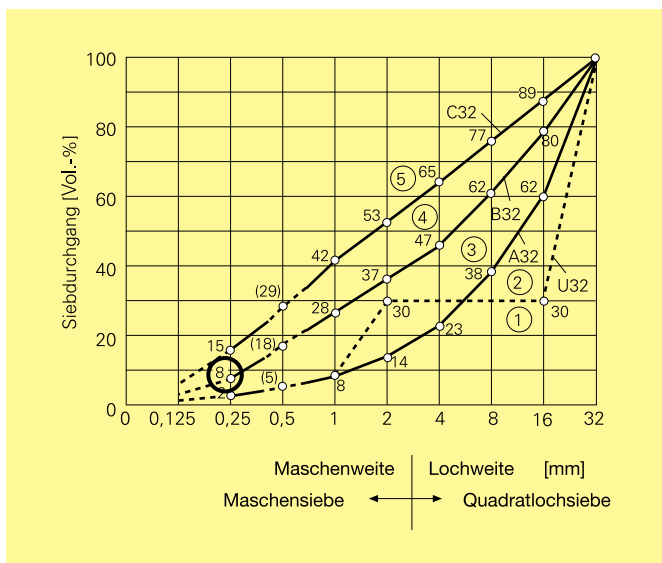


Bild 2: Regelsieblinien nach DIN 1045-2 mit einem Größtkorn von 32 mm

Mehlkorn- und Feinstsandanteil: 279 kg
 + 0 kg
 + 0,08 · 1 852 = 148,2 kg

 427,2 kg/m³

Mehlkorngehalt: 279 kg
 + 0 kg
 + 0,04 · 1 852 = 74,1 kg

 353,1 kg/m³

Vergleich mit zulässigen Grenzwerten (z.B. Zementmerkblatt B 2, Tafel 23)

Höchstzulässiger Mehlkorngehalt:

$$550 \text{ kg/m}^3 \geq 353,1 \text{ kg/m}^3$$

erfüllt!

Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton bis zur Betonfestigkeitsklasse C50/60 und LC50/55

Zementgehalt ¹⁾ [kg/m ³]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt ²⁾ [kg/m ³]		
	Expositionsklassen		
	XF, XM	X0, XC, XD, XS, XA	
	Größtkorn der Gesteinskörnung		
	8 mm	16 mm bis 63 mm	8 mm bis 63 mm
≤ 300	450	400	550
≥ 350	500	450	550

¹⁾ Für Zwischenwerte ist der Mehlkorngehalt geradlinig zu interpolieren.

²⁾ Die Werte dürfen erhöht werden, wenn
 – der Zementgehalt 350 kg/m³ übersteigt, um den um 350 kg/m³ hinausgehenden Zementgehalt,
 – ein puzzolischer Zusatzstoff Typ II (z.B. Flugasche, Silika) verwendet wird, um dessen Gehalt, jedoch insgesamt um höchstens 50 kg/m³.

Beispiel II (Innenbauteil):

Die Änderungen zu Beispiel I sind fett gedruckt.

Expositionsklasse: XC1

Feuchtigkeitsklasse: WO

Festigkeitsklasse aus Statik: C20/25

Konsistenz: F3

Zement: CEM II 42,5 N; ρ_z = 3,0 kg/dm³

Zusatzstoffe: keine

Zusatzmittel: **Betonverflüssiger, Dosierung: 0,4 % vom Zementgewicht → 7 % Wassereinsparung**
 Gesteinskörnungen: Kies und Splitt, Sieblinie A/B16 mit unterschiedlichen Rohdichten, E1

Korngruppe	Rohdichte ρ _g [kg/dm ³]	Anteil [M.-%]	Feuchte [M.-%]
Sand: 0/2 mm	2,63	45	4,5
Kiessand, Splitt: 2/8 mm	2,70	8	3,0
Splitt: 8/16 mm	2,61	47	1,0

Gesucht: Mischungsberechnung

Vorgehensweise gemäß Ablaufdiagramm:

1. Ermittlung der Grenzwerte der Betonzusammensetzung

	max w/z	min f _{ck}	min z [kg/m ³]	min z bei Zugabe von FA [kg/m ³]	Luft [Vol.-%]	Bemerkungen
aus Statik	-	C20/25	-	-	-	-
aus XC1	0,75	C16/20	240	240	-	-

Die weiß hinterlegten Zahlen stellen die Grenzwerte dar.

2. Ermittlung des Wassergehalts

Möglichkeit 1:

– Sieblinie A/B16 und gewünschte Konsistenz F3: 190 l/m³ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

Möglichkeit 2:

→ k-Wert von Sieblinie A/B16: (4,60 + 3,66)/2 = 4,13

(siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

→ einsetzen in die Formel:

$$w = 1300 / (k + 3)$$

$$= 1300 / (4,13 + 3)$$

$$= 183 \text{ l/m}^3$$

gewählt: $w = 190 \text{ l/m}^3$
 (Empfehlung: höheren Wassergehalt wählen)

Korrekturfaktor Splitt:
 Erhöhung des Wassergehalts um 10 %: $w = 1,1 \cdot 190 = 209 \text{ l}$

Zugabe Betonverflüssiger:
 7 % Wassereinsparung $w = 0,93 \cdot 209 = 195 \text{ l}$

3. Ermittlung Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit (unter Berücksichtigung der Nasslagerung)

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq \frac{f_{\text{ck}}}{0,92} + 1,48 \cdot \sigma + \text{Vorhaltema\ss}$$

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq \frac{25}{0,92} + 1,48 \cdot 3 + 3$$

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq 34,6 \text{ N/mm}^2 \approx \mathbf{35 \text{ N/mm}^2}$$

4. Bestimmung des maximal zulässigen w/z-Werts

Mit $f_{\text{cm,dry,cube}} = 35 \text{ N/mm}^2$ und der Zementfestigkeitsklasse 42,5 in das Walzdiagramm gehen – Bild 1 dieses Zementmerkblatts – und den zugehörigen w/z-Wert ablesen:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,68$$

Vergleich mit zulässigem w/z-Wert aus maßgebender Expositions-klassenklasse:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,68 \leq 0,73 \text{ (w/z-Wert aus Expositions-klassenklasse: 0,75, Abminderung um 0,02)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

$$\mathbf{w/z = 0,68}$$

5. Ermittlung des Zementgehalts

$$z = w/(w/z) = 195/0,68 = 287 \text{ kg/m}^3$$

(Anmerkung: In der Praxis kann man entweder auf 285 ab-, oder auf 290 aufrunden!)

Vergleich mit Mindestzementgehalt aus maßgebender Expositions-klassenklasse

$$z = 287 \text{ kg/m}^3 \geq 240 \text{ kg/m}^3 \text{ (Mindestzementgehalt aus Expositions-klassenklasse)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

$$\mathbf{z = 287 \text{ kg/m}^3}$$

6. Ermittlung der Menge der Gesteinskörnung über die Stoffraumgleichung

Luftgehalt: Annahme 1,8 Vol.-%

Einsetzen der Werte in die Stoffraumgleichung und auflösen nach g:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{287}{3,0} + \frac{195}{1,0} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{0}{2,32} + 18$$

(Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Rohdichten!)

$$g = (1000 - (z/\rho_z) - (w/\rho_w) - (f/\rho_f) - LP) \cdot (x_1 \cdot \rho_{g1} + x_2 \cdot \rho_{g2} + x_3 \cdot \rho_{g3})$$

$$g = (1000 - (287/3,0) - (195/1,0) - 18) \cdot (0,45 \cdot 2,63 + 0,08 \cdot 2,70 + 0,47 \cdot 2,61)$$

$$\mathbf{g = 1816 \text{ kg/m}^3}$$

7. Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korn-grup-pe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m³]	Anteil feuchte Gesteins-körnung [kg/m³]
0/2 mm	45	$0,45 \cdot 1816 = 817$	4,5	$0,045 \cdot 817 = 36,8$	$817 + 36,8 = 853,8$
2/8 mm	8	$0,08 \cdot 1816 = 145$	3,0	$0,03 \cdot 145 = 4,4$	$145 + 4,4 = 149,4$
8/16 mm	47	$0,47 \cdot 1816 = 854$	1,0	$0,01 \cdot 854 = 8,5$	$854 + 8,5 = 862,5$
Σ	100	1816		49,7	1865,7

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{\text{zugabe}} = w - \Sigma (F_1 + F_2 + F_3)$$

$$w_{\text{zugabe}} = 195 \text{ l} - 49,7 \text{ l}$$

$$\mathbf{w_{\text{zugabe}} = 145,3 \text{ l}}$$

8. Überprüfung des Mehlkorn- und Feinstsandanteils

Aus der Sieblinienberechnung liegt vor: Sieblinie A/B16

Diagramme und Tabellen siehe Beispiel I

$$\begin{aligned} \text{Mehlkorn- und Feinstsandanteil:} & 287 \text{ kg} \\ & + 0 \text{ kg} \\ & \underline{+ 0,06 \cdot 1816 = 109,0 \text{ kg}} \\ & 396,0 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mehlkorngehalt:} & 287 \text{ kg} \\ & + 0 \text{ kg} \\ & \underline{+ 0,03 \cdot 1816 = 54,5 \text{ kg}} \\ & 341,5 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Vergleich mit zulässigen Grenzwerten:

Höchstzulässiger Mehlkorngehalt:

$$550 \text{ kg/m}^3 \geq 341,5 \text{ kg/m}^3 \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

Beispiel III (Außenbauteil):

Expositions-klassen: **XC4, XD1, XF2**
 Feuchtigkeits-klassen: **WF**
 Festigkeits-klassen aus Statik: **C30/37**
 Konsistenz: **F2**
 Zement: **CEM I 52,5 R; $\rho_z = 3,1 \text{ kg/dm}^3$**
 Zusatzstoffe: keine
 Zusatzmittel: Betonverflüssiger, Dosierung: 0,4 % vom Zementgewicht → 7 % Wassereinsparung
bei Variante 2 zusätzlich: Luftporenbildner, Dosierung: 0,8 % vom Zementgewicht → 1 Vol.% Luft führt zu ca. 5 l Wassereinsparung
 Gesteinskörnungen: Sand und Splitt, **Sieblinie B16 mit unterschiedlichen Rohdichten; E1**

Gesucht: Mischungsberechnung

Korngruppe	Rohdichte ρ_g [kg/dm ³]	Anteil [M.-%]	Feuchte [M.-%]
Sand 0/1 mm	2,75	18	4,5
Sand 1/4 mm	2,65	36	3,0
Splitt 2/8 mm	2,65	23	2,5
Splitt 8/16 mm	2,65	23	2,0

Vorgehensweise gemäß Ablaufdiagramm:

1. Ermittlung der Grenzwerte

	max w/z	min f_{ck}	min z [kg/m ³]	min z bei Zugabe von FA [kg/m ³]	Luft [Vol.-%]	Bemerkungen
aus Statik	-	C30/37	-	-	-	-
aus XC4	0,60	C25/30	280	270	-	-
aus XD1	0,55	C30/37 (25/30)	300	270	-	-
aus XF2	0,50	C35/45	320	270	-	M_{s25}
	0,55	C25/30	300	270	4,5	mit LP-Mittel

Bei dieser Aufgabenstellung gibt es zwei Lösungsmöglichkeiten. Entweder die **Variante 1** als C35/45 ohne LP-Mittel (siehe weiß hinterlegte Zahlen) oder die **Variante 2** als C30/37 mit LP-Mitteln (dunkelgelb hinterlegte Zahlen). Im folgenden werden beide Möglichkeiten vorgestellt:

Variante 1: C35/45 als Beton ohne Luftporenbildner

2. Ermittlung des Wassergehalts

Möglichkeit 1:

- Sieblinie B16 und gewünschte Konsistenz F2: 180 l/m³ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

Möglichkeit 2:

→ k-Wert von Sieblinie B16: 3,66 (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

→ einsetzen in die Formel:

$$w = 1200 / (k + 3) = 1200 / (3,66 + 3) = 180 \text{ l/m}^3$$

gewählt: w = 180 l/m³

Korrekturfaktor Splitt:

Erhöhung des Wassergehalts um 10 %: $w = 1,1 \cdot 180 = 198 \text{ l}$

Zugabe Betonverflüssiger:

7 % Wassereinsparung **w = 0,93 · 198 = 184 l**

3. Ermittlung Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit (unter Berücksichtigung der Nasslagerung)

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{f_{ck}}{0,92} + 1,48 \cdot \sigma + \text{Vorhaltema\ss} \quad (\text{hier gew\aa}hlt: v = 5 \text{ N/mm}^2)$$

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{45}{0,92} + 1,48 \cdot 3 + 5$$

$$f_{cm,dry,cube} \geq 58,4 \text{ N/mm}^2 \approx \mathbf{59 \text{ N/mm}^2}$$

4. Bestimmung des maximal zulässigen w/z-Werts

Mit $f_{cm,dry,cube} = 59 \text{ N/mm}^2$ und der Zementfestigkeitsklasse 52,5 in das Walzdiagramm gehen – Bild 1 – und den zugehörigen w/z-Wert ablesen:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,53$$

Vergleich mit zulässigem w/z-Wert aus maßgebender Expositions-kategorie:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,53 \geq 0,50 \text{ (w/z-Wert aus Expositions-kategorie)}$$

nicht erfüllt!

→ maßgebend w/z = 0,50 aus Expositions-kategorie

→ betontechnologische Abminderung des w/z-Werts um 0,02 erforderlich!

$$\rightarrow w/z = 0,50 - 0,02 = 0,48$$

w/z = 0,48

5. Ermittlung des Zementgehalts

$$z = w/(w/z) = 184/0,48 = 383 \text{ kg/m}^3$$

Vergleich mit Mindestzementgehalt aus maßgebender Expositions-kategorie:

$$z = 383 \text{ kg/m}^3 \geq 320 \text{ kg/m}^3 \text{ (Mindestzementgehalt aus Expositions-kategorie)}$$

erfüllt!

$$\mathbf{z = 383 \text{ kg/m}^3}$$

6. Ermittlung der Menge der Gesteinskörnung über die Stoffraumgleichung

Luftgehalt: Annahme 1,8 Vol.-%

Einsetzen der Werte in die Stoffraumgleichung und auflösen nach g:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{383}{3,1} + \frac{184}{1,0} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{0}{2,32} + 18$$

(Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Rohdichten!)

$$g = (1000 - (z/\rho_z) - (w/\rho_w) - (f/\rho_f) - LP) \cdot (x_1 \cdot \rho_{g1} + x_2 \cdot \rho_{g2} + x_3 \cdot \rho_{g3})$$

$$g = (1000 - (383/3,1) - (184/1,0) - 18) \cdot (0,18 \cdot 2,75 + 0,36 \cdot 2,65 + 0,23 \cdot 2,65 + 0,23 \cdot 2,65)$$

$$\mathbf{g = 1800 \text{ kg/m}^3}$$

7. Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korngruppe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m ³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m ³]	Anteil feuchte Gesteinskörnung [kg/m ³]
0/1 mm	18	0,18 · 1800 = 324	4,5	0,045 · 324 = 14,6	324 + 14,6 = 338,6
1/4 mm	36	0,36 · 1800 = 648	3,0	0,03 · 648 = 19,4	648 + 19,4 = 667,4
2/8 mm	23	0,23 · 1800 = 414	2,5	0,025 · 414 = 10,4	414 + 10,4 = 424,4
8/16 mm	23	0,23 · 1800 = 414	2,0	0,02 · 414 = 8,3	414 + 8,3 = 422,3
Σ	100	1800		52,7	1852,7 ≈ 1853

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{\text{zugabe}} = w - \sum (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

$$w_{\text{zugabe}} = 184 \text{ l} - 52,7 \text{ l}$$

$$w_{\text{zugabe}} = \mathbf{131,3 \text{ l}}$$

8. Entfällt bei diesem Beispiel

Variante 2: C30/37 als Beton mit Luftporenbildner

2. Ermittlung des Wassergehalts

Möglichkeit 1:

- Sieblinie B16 und gewünschte Konsistenz F2: 180 l/m³ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

Möglichkeit 2:

- k-Wert von Sieblinie B16: 3,66 (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)
- einsetzen in die Formel:

$$w = 1200 / (k + 3) = 1200 / (3,66 + 3) = 180 \text{ l/m}^3$$

gewählt: w = 180 l/m³

bis hier wie Variante 1

Korrekturfaktor Splitt:

Erhöhung des Wassergehalts um 10 %:

$$w = 1,1 \cdot 180 = 198 \text{ l}$$

Zugabe Betonverflüssiger:

7 % Wassereinsparung

$$w = 0,93 \cdot 198 = 184 \text{ l}$$

Zugabe Luftporenbildner:

1 Vol.-% → eine Wassereinsparung von ca. 5 l

Auch im vollständig verdichteten Beton sind immer ca. 1,5 Vol.-% Luft enthalten. Bei einem Beton mit erhöhtem Frost-Taumittelwiderstand mit einem Größtkorn von 16 mm sind nach [3] mindestens 4,5 Vol.-% Luft gefordert. (4,5 Vol.-% - 1,5 Vol.-% = 3,0 Vol.-%, daher sind für die Wassereinsparung 3 Vol.-% zu berücksichtigen.)

$$w = 184 - 3 \cdot 5 = 169 \text{ l} \approx 170 \text{ l}$$

$$w = \mathbf{170 \text{ l}}$$

3. Ermittlung Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit (unter Berücksichtigung der Nasslagerung)

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq \frac{f_{\text{ck}}}{0,92} + 1,48 \cdot \sigma + \text{Vorhaltema\ss}$$

XF2 fordert zwar nur C25/30, aber aus statischer Erfordernis muss ein C30/37 gewählt werden. Bei LP-Beton muss aufgrund der zusätzlich eingeführten Luftporen mit einem Festigkeitsverlust (1 Vol.-% → -3,5 N/mm²) gerechnet werden, der bei der Zielfestigkeit mit berücksichtigt werden muss.

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq \frac{37}{0,92} + 1,48 \cdot 3 + 5 + 3 \cdot 3,5$$

$$f_{\text{cm,dry,cube}} \geq 60,2 \text{ N/mm}^2 \approx \mathbf{60,0 \text{ N/mm}^2}$$

4. Bestimmung des maximal zulässigen w/z-Werts

Mit $f_{\text{cm,dry,cube}} = 60 \text{ N/mm}^2$ und der Zementfestigkeitsklasse 52,5 in das Walzdiagramm gehen – Bild 1 – und den zugehörigen w/z-Wert ablesen:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,52$$

Vergleich mit zulässigem w/z-Wert aus maßgebender Expositions-klasse:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,52 \leq 0,53 \text{ (w/z-Wert aus Expositions-klasse: 0,55, Abminderung um 0,02)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

$$w/z = \mathbf{0,52}$$

5. Ermittlung des Zementgehalts

$$z = w / (w/z) = 170 / 0,52 = 327 \text{ kg/m}^3$$

Vergleich mit Mindestzementgehalt aus maßgebender Expositions-klasse

$$z = 327 \text{ kg/m}^3 \geq 300 \text{ kg/m}^3 \text{ (Mindestzementgehalt aus Expositions-klasse)} \quad \mathbf{\text{erfüllt!}}$$

$$z = \mathbf{327 \text{ kg/m}^3}$$

6. Ermittlung der Menge der Gesteinskörnung über die Stoffraumgleichung

Luftgehalt: Annahme 4,5 Vol.-%

Einsetzen der Werte und Gleichung auflösen nach g:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{327}{3,1} + \frac{184}{1,0} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{0}{2,32} + 45$$

(Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Rohdichten!)

$$g = (1000 - (z/\rho_z) - (w/\rho_w) - (f/\rho_f) - LP) \cdot (x_1 \cdot \rho_{g1} + x_2 \cdot \rho_{g2} + x_3 \cdot \rho_{g3})$$

$$g = (1000 - (327/3,1) - (170/1,0) - 45) \cdot (0,18 \cdot 2,75 + 0,36 \cdot 2,65 + 0,23 \cdot 2,65 + 0,23 \cdot 2,65)$$

$$g = \mathbf{1813 \text{ kg/m}^3}$$

7. Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korn-gruppe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m³]	Anteil feuchte Gesteinskörnung [kg/m³]
0/1 mm	18	0,18 · 1813 = 326	4,5	0,045 · 326 = 14,7	326 + 14,7 = 340,7
1/4 mm	36	0,36 · 1813 = 653	3,0	0,03 · 653 = 19,6	653 + 19,6 = 672,6
2/8 mm	23	0,23 · 1813 = 417	2,5	0,025 · 417 = 10,4	417 + 10,4 = 427,4
8/16 mm	23	0,23 · 1813 = 417	2,0	0,02 · 417 = 8,3	417 + 8,3 = 425,3
Σ	100	1813		53,0	1866

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{\text{zugabe}} = w - \sum (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

$$w_{\text{zugabe}} = 170 \text{ l} - 53,0 \text{ l}$$

$$w_{\text{zugabe}} = \mathbf{117,0 \text{ l}}$$

8. Entfällt bei diesem Beispiel

9. Gegenüberstellung der beiden Varianten

Kennwert	Variante 1 (C35/45, nur mit BV)	Variante 2 (C30/37 als LP Beton)
Wassergehalt [l/m³]	184 (131,3)	170 (117)
f _{cm,dry,cube} [N/mm²]	59	60
w/z-Wert	0,48	0,52
Zementgehalt [kg/m³]	383	327
Gesteinskörnung [kg/m³]	1800 (1853)	1813 (1866)
Mehlkorngehalt [kg/m³]	485	400

Beispiel IV (Außenbauteil):

Expositionsklassen: XC4, XF1, XA1
 Feuchtigkeitsklasse: WF
 Festigkeitsklasse aus Statik: C30/37
 Konsistenz: F3
 Zement: CEM III/A 42,5 N;
 $\rho_z = 3,0 \text{ kg/dm}^3$
 Zusatzstoffe: Flugasche zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit
 Zusatzmittel: Betonverflüssiger, Dosierung: 0,5 % vom Zementgewicht → 10 % Wassereinsparung
 Gesteinskörnungen: Sand und Kies, Sieblinie A/B16 mit unterschiedlichen Rohdichten

Korngruppe	Rohdichte ρ_g [kg/dm³]	Anteil [M.-%]	Feuchte [M.-%]
Sand: 0/2 mm	2,61	38	5,0
Kiessand, Kies: 2/8 mm	2,65	22	3,0
Kies: 8/16 mm	2,58	40	1,0

Gesucht: Mischungsberechnung

Vorgehensweise gemäß Ablaufdiagramm:

1. Ermittlung der Grenzwerte

	max w/z	min f _{ck}	min z [kg/m³]	min z bei Zugabe von FA [kg/m³]	Luft [Vol.-%]	Bemerkungen
aus Statik	-	C30/37	-	-	-	-
aus XC4	0,60	C25/30	280	270	-	-
aus XF1	0,60	C25/30	280	270	-	F ₄
aus XA1	0,60	C25/30	280	270	-	-

Die weiß hinterlegten Zahlen stellen die Grenzwerte dar.

2. Ermittlung des Wassergehalts

Möglichkeit 1:

- Sieblinie A/B16 und gewünschte Konsistenz F3: 190 l/m³ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

Möglichkeit 2:

→ k-Wert von Sieblinie A/B16: $(4,60 + 3,66)/2 = 4,13$ (siehe Tafel 3 dieses Merkblatts)

→ einsetzen in die Formel:

$$w = 1300 / (k + 3) = 1300 / (4,13 + 3) = 182 \text{ l/m}^3$$

gewählt: w = 190 l/m³

Zugabe Betonverflüssiger:

10 % Wassereinsparung $w = 0,90 \cdot 190 = 171 \text{ l}$

3. Ermittlung Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit (unter Berücksichtigung der Nasslagerung)

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{f_{ck}}{0,92} + 1,48 \cdot \sigma + \text{Vorhaltemaß}$$

$$f_{cm,dry,cube} \geq \frac{37}{0,92} + 1,48 \cdot 3 + 5$$

$$f_{cm,dry,cube} \geq 49,7 \text{ N/mm}^2 \approx 50 \text{ N/mm}^2$$

4. Bestimmung des maximal zulässigen w/z-Werts

Mit $f_{cm,dry,cube} = 50 \text{ N/mm}^2$ und der Zementfestigkeitsklasse 42,5 in das Walzdiagramm gehen – Bild 1 dieses Zementmerkblatts – und den zugehörigen w/z-Wert ablesen:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,53$$

Vergleich mit zulässigem w/z-Wert aus maßgebender Expositionsklasse:

$$w/z_{\text{ermittelt}} = 0,53 \leq 0,60 \text{ (Expositionswert aus Expositionsklasse)}$$

erfüllt!

→ maßgebend w/z = 0,53

→ betontechnologische Abminderung des w/z-Werts nicht erforderlich!

w/z = 0,53

5. Ermittlung des Zement und Flugaschegehalts

a) $z = w/(w/z) = 171/0,53 = 322 \text{ kg/m}^3$

Vergleich mit Mindestzementgehalt aus maßgebender Expositionsklasse

$$z = 322 \text{ kg/m}^3 \geq 280 \text{ kg/m}^3 \text{ (Mindestzementgehalt aus Expositionsklasse)}$$

erfüllt!

z = 322 kg/m³

b) Anrechnung von Flugasche auf den Zementgehalt

$$(w/z)_{\text{eq}} = \frac{w}{z + k_f \cdot f_s} \quad k_f = 0,4$$

Maximaler Gehalt, der auf den w/z-Wert angerechnet werden darf, beträgt bei Flugasche:

- $f_s \leq 0,33 \cdot z$ für Zemente ohne P, V, D
- $f_s \leq 0,25 \cdot z$ bei Zementen mit P oder V, aber ohne D
- $f_s \leq 0,15 \cdot z$ bei Zementen mit D

Größere Mengen dürfen zugegeben, aber nicht auf den Wasserzementwert angerechnet werden (siehe auch Abschnitt 6 dieses Merkblatts).

Berechnung des Zementgehalts bei Anrechnung der maximal möglichen Menge von Flugasche (siehe auch Abschnitt 6 und Beispiel in Tafel 8 „VDB-Formblatt Mischungsentwurf“):

$$z = \frac{b_{eq}}{(1 + k_f \cdot (f_s/z))} = \frac{322}{(1 + 0,4 \cdot 0,33)} = 285 \text{ kg}$$

b_{eq} = Massenanteil (Zement + Flugasche)

Berechnung der maximalen Flugaschemenge:

$$f = (f_s/z) \cdot z$$

$$f = 0,33 \cdot 285$$

$$f = 94,1 \text{ kg} \approx 94 \text{ kg}$$

Kontrolle des Mindestzementgehalts:

$$z = 285 \text{ kg} \geq 270 \text{ kg (aus Expositionsklasse) ist erfüllt!}$$

In folgendem Beispiel wird nicht die maximale Menge ausgeschöpft, sondern – wie in den meisten Anwendungsfällen üblich – eine gewisse Flugaschemenge vorgegeben (hier: 40 kg Flugasche).

Bei diesem Anwendungsfall sind zwei Ansätze möglich, die sich darin unterscheiden, ob die Konsistenz sich verändern kann (Ansatz A) oder ob sie gleichbleiben soll (Ansatz B). Bei Ansatz A wird die Zementmenge nicht erhöht, was bei gleichem $(w/z)_{eq}$ -Wert zwangsläufig zu einer Reduzierung des Wassergehalts und einer damit verbundenen Änderung der Konsistenz führt. Soll die Konsistenz beibehalten werden – was eher der Praxis entspricht – ist dies durch eine Erhöhung der Zugabemenge des Betonverflüssigers zu kompensieren oder es ist ein neuer Zementgehalt auszurechnen (Ansatz B).

Ansatz A: Mit reduziertem Wassergehalt (bewirkt zunächst eine Konsistenzänderung)

$$z_{red} = 322 - 40 = 282 \text{ kg/m}^3$$

Vorgehensweise:

w/z -Wert aus Schritt 4 gleichsetzen mit $(w/z)_{eq}$ und neuen Wassergehalt ausrechnen:

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{(z_{red} + k_f \cdot f)}$$

$$0,53 = \frac{w}{(282 + 0,40 \cdot 40)}$$

$$w = 157,9 \text{ l} \approx 158 \text{ l}$$

Die ermittelte Wassermenge von 158 l weicht von der für die Konsistenz F3 nötigen Wassermenge von 171 l ab. Um die gleiche Konsistenz bei dem um 13 l reduzierten Wassergehalt zu erreichen, muss die Zugabemenge des Betonverflüssigers unter Berücksichtigung der maximalen Zugabemenge gemäß Herstellerangabe auf Grundlage einer Erstprüfung erhöht werden.

c) Überprüfung des Zementgehalts

$$(z + f) \geq \min z$$

$$282 + 40 \geq 270 \text{ ist}$$

erfüllt!

d) Überprüfung maximaler Anrechenbarkeit auf den w/z -Wert

$$f \leq 0,33 \cdot z$$

$$40 \leq 0,33 \cdot 282$$

$$40 \leq 93,1 \text{ ist}$$

erfüllt!

6. Ermittlung der Menge der Gesteinskörnung über die Stoffraumgleichung

Luftgehalt: Annahme 2,0 Vol.-%

Einsetzen der Werte und Gleichung auflösen nach g:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{282}{3,0} + \frac{158}{1,0} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{40}{2,32} + 20$$

(Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Rohdichten!)

$$g = (1000 - (z/\rho_z) - (w/\rho_w) - (f/\rho_f) - LP) \cdot (x_1 \cdot \rho_{g1} + x_2 \cdot \rho_{g2} + x_3 \cdot \rho_{g3})$$

$$g = (1000 - (282/3,0) - (158/1,0) - (40/2,32) - 20) \cdot (0,38 \cdot 2,61 + 0,22 \cdot 2,65 + 0,40 \cdot 2,58)$$

$$g = 1853 \text{ kg/m}^3$$

7. Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korngruppe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m³]	Anteil feuchte Gesteinskörnung [kg/m³]
0/2 mm	38	$0,38 \cdot 1853 = 704$	5,0	$0,05 \cdot 704 = 35,2$	$704 + 35,2 = 739,2$
2/8 mm	22	$0,22 \cdot 1853 = 408$	3,0	$0,03 \cdot 408 = 12,2$	$408 + 12,2 = 420,2$
8/16 mm	40	$0,40 \cdot 1853 = 741$	1,0	$0,01 \cdot 741 = 7,4$	$741 + 7,4 = 748,4$
Σ	100	1853		54,8	1907,8

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{zugabe} = w - \Sigma (F_1 + F_2 + F_3)$$

$$w_{zugabe} = 158 \text{ l} - 54,8 \text{ l}$$

$$w_{zugabe} = 103,2 \text{ l}$$

8. Entfällt bei diesem Beispiel

Ansatz B: Mit gleich bleibendem Wassergehalt (bewirkt keine Konsistenzänderung)

Bei Ansatz B muss unter Berücksichtigung der gewählten Flugaschemenge von 40 kg/m³ und dem für die Konsistenz erforderlichen Wassergehalt von 171 l ein neuer Zementgehalt errechnet werden.

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{(z_{red,neu} + k_f \cdot f)}$$

Einsetzen und Auflösen nach $z_{red,neu}$:

$$0,53 = \frac{171}{(z_{red,neu} + 0,40 \cdot 40)}$$

$$z_{red,neu} = 307 \text{ kg/m}^3$$

Die Überprüfung des Zementgehalts, die Ermittlung der Gesteinskörnungsmenge und die prozentuale Aufteilung auf die Korngruppen erfolgt analog zu der unter A vorgestellten Vorgehensweise und ist nachfolgend in etwas gekürzter Form wiedergegeben.

Überprüfung Zementgehalt:

$$(z + f) \geq \min z$$

$$(307 + 40) \geq 270 \text{ ist}$$

erfüllt!

Die Überprüfung der maximalen Anrechenbarkeit der Flugasche auf den w/z-Wert kann aufgrund der verwendeten Formel entfallen. Aus der Stoffraumgleichung ergibt sich:

$$1\,000 \text{ dm}^3 = \frac{307}{3,0} + \frac{171}{1,0} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{40}{2,32} + 20$$

$$g = (1\,000 - (z/\rho_z) - (w/\rho_w) - (f/\rho_f) - LP) \cdot (x_1 \cdot \rho_{g1} + x_2 \cdot \rho_{g2} + x_3 \cdot \rho_{g3})$$

$$g = (1\,000 - (307/3,0) - (171/1,0) - (40/2,32) - 20) \cdot (0,38 \cdot 2,61 + 0,22 \cdot 2,65 + 0,40 \cdot 2,58)$$

$$g = 1\,797 \text{ kg/m}^3$$

Aufteilung in die prozentualen Anteile der einzelnen Korngruppen (KG) an der gesamten Gesteinskörnung g

Korngruppe	Anteil [M.-%]	Anteil trocken [kg/m³]	Feuchte [M.-%]	Feuchte [kg/m³]	Anteil feuchte Gesteinskörnung [kg/m³]
0/2 mm	38	0,38 · 1 797 = 683	5,0	0,05 · 683 = 34,2	683 + 34,2 = 717,2
2/8 mm	22	0,22 · 1 797 = 395	3,0	0,03 · 395 = 11,9	395 + 11,9 = 406,9
8/16 mm	40	0,40 · 1 797 = 719	1,0	0,01 · 719 = 7,2	719 + 7,2 = 726,2
Σ	100	1 797		53,3	1 850,3 ≈ 1 850

Berechnung Zugabewasser:

$$w_{\text{zugabe}} = w - \Sigma (F1 + F2 + F3)$$

$$w_{\text{zugabe}} = 171 \text{ l} - 53,3 \text{ l}$$

$$w_{\text{zugabe}} = 117,7 \text{ l}$$

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Herausgeber

InformationsZentrum Beton GmbH, Steinhof 39, 40699 Erkrath

www.beton.org

Kontakt und Beratung vor Ort

Büro Berlin, Teltower Damm 155, 14167 Berlin, Tel.: 030 3087778-0, berlin@beton.org

Büro Hannover, Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde, Tel.: 05132 502099-0, hannover@beton.org

Büro Beckum, Neustraße 1, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, beckum@beton.org

Büro Ostfildern, Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, ostfildern@beton.org

Verfasser

Dipl.-Ing. Michaela Biscopio, Dipl.-Ing. Rolf Kampen, InformationsZentrum Beton GmbH