

Mischungsentwurf für Beton mit rezyklierten Zuschlägen Nachweis der Änderungen der Betoneigenschaften

Frischbetoneigenschaften: Veränderung des Wasseranspruchs

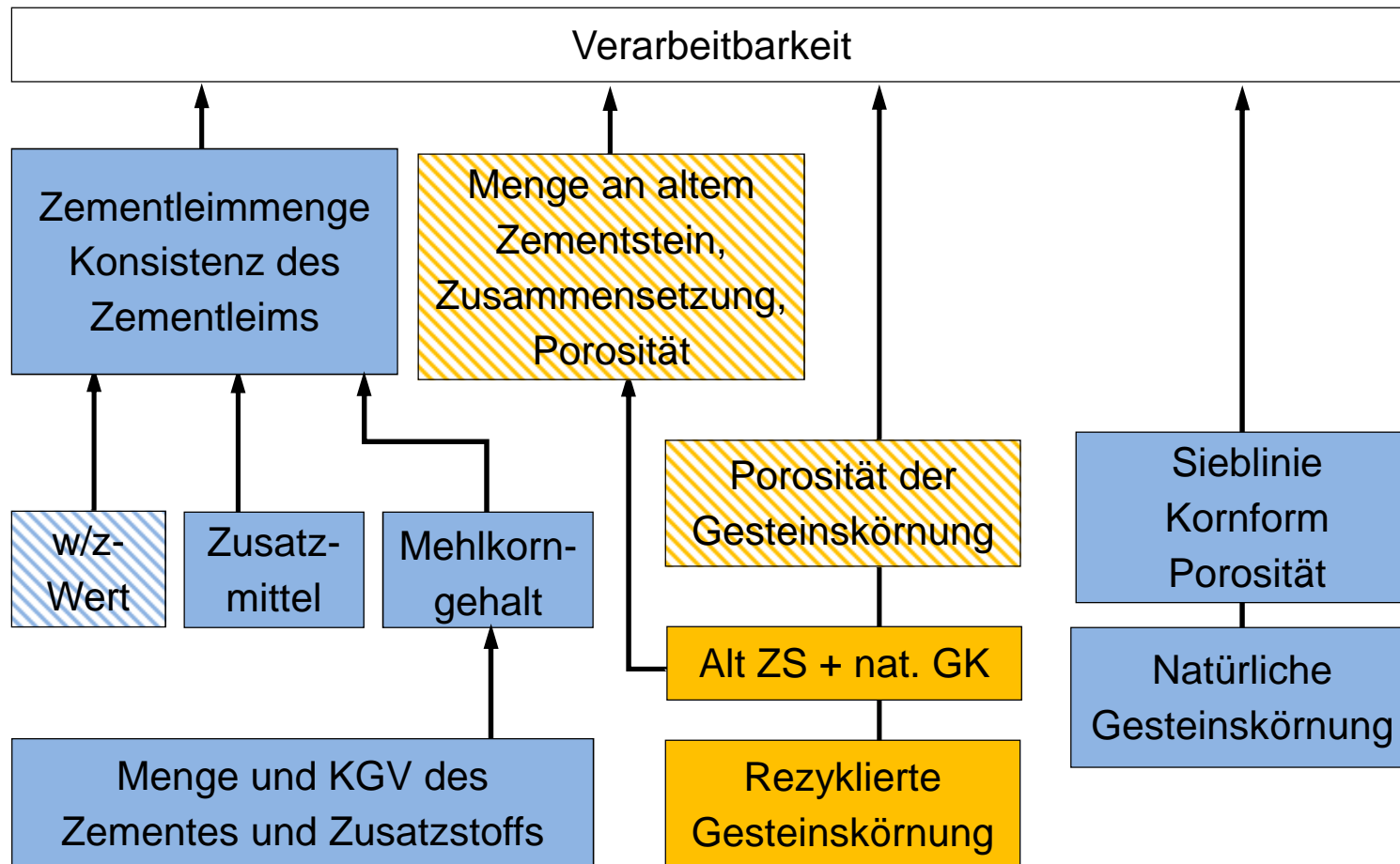
Festbeton: Veränderung der Trockenrohddichte von Beton durch die Zugabe von Rezyklat

Festbeton: Mechanische Eigenschaften

Festbeton: Dauerhaftigkeit

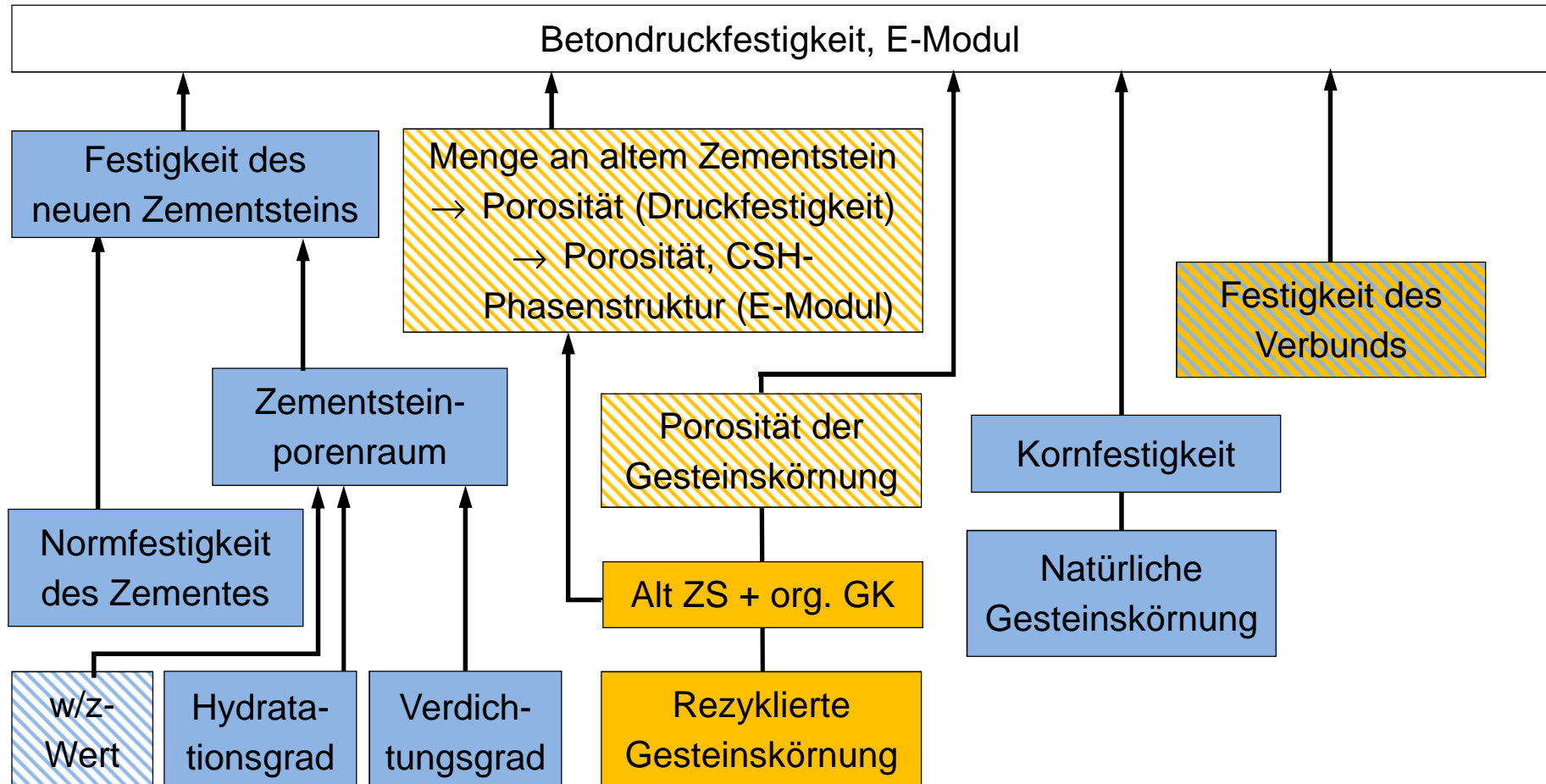
Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit und Gegenmaßnahmen

- Vornässen der Zuschläge bzw.
- Wasseraufnahme der Zuschläge in Rezeptur berücksichtigen
- Feinstoffzugabe
- Verwendung von Fließmittel



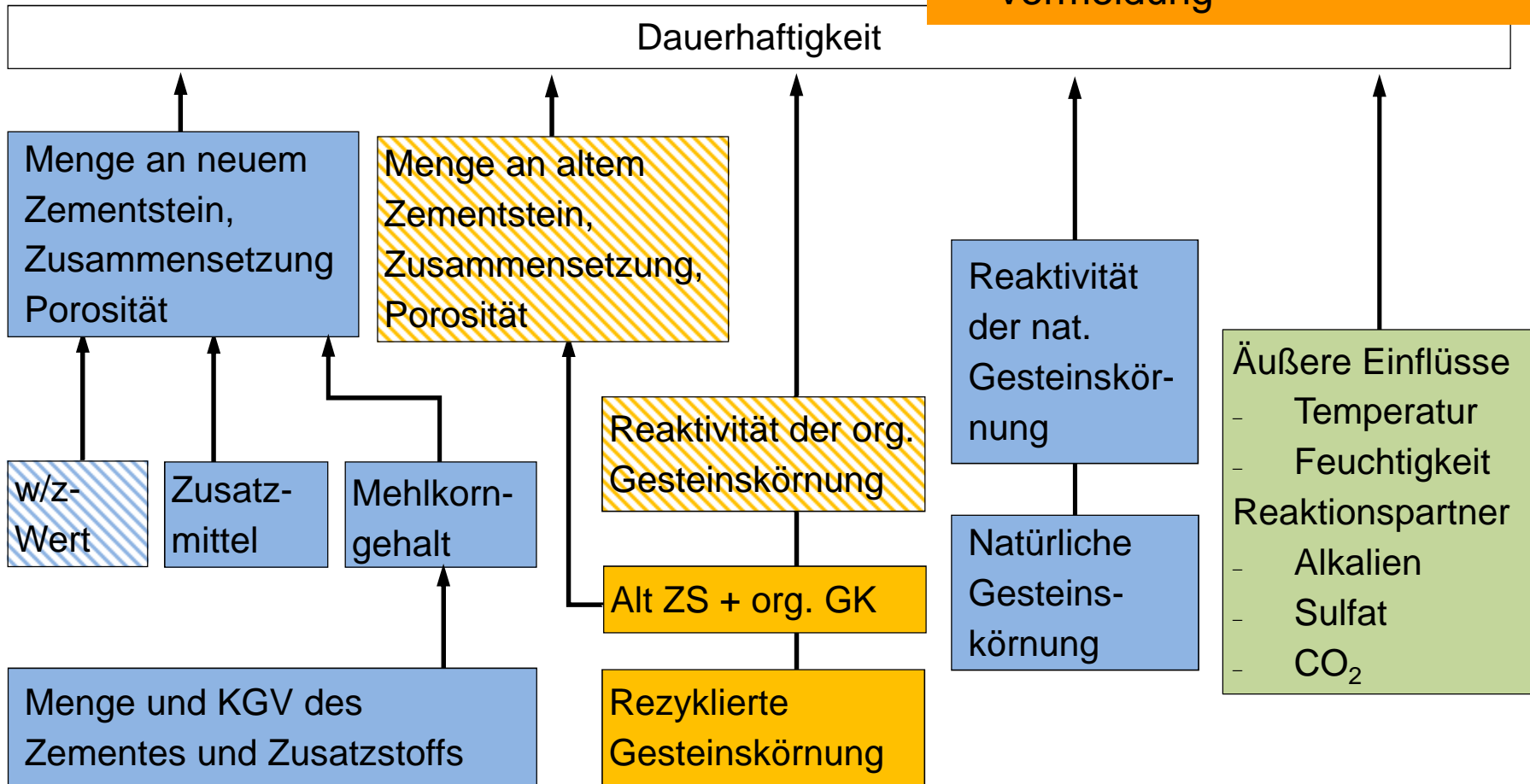
Einflüsse auf die Festigkeit und Gegenmaßnahmen

- Rohdichten Rezyklat > 2 kg/dm³
- Wasseraufnahme < 10 %
- Fraktion > 2 mm
- Begrenzung der Zugabemenge

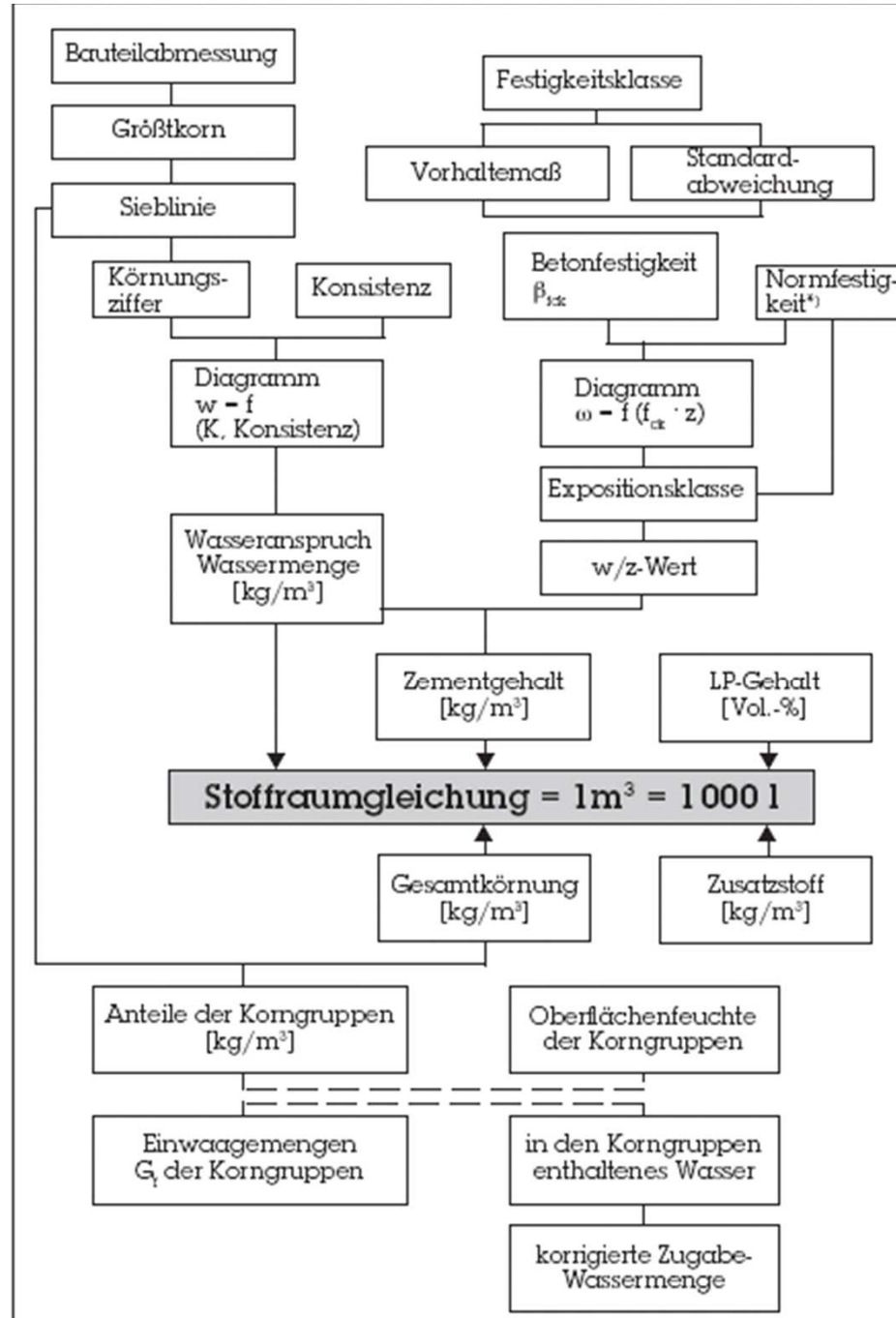


Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit und Gegenmaßnahmen

- Einsatz nur in bestimmten Expositionsklassen unter Beachtung der Begrenzung des Rezyklatanteils
- Regelungen zur AKR-Vermeidung



Grundlagen: Berechnungs- schema für den Mischungsentwurf



^{*)} Zement-Normdruckfestigkeit nach DIN EN 196-1

1. Stoffraumrechnung

Die Stoffraumgleichung besagt, dass das Volumen von $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ l}$ verdichtetem Frischbeton sich aus der Summe der Volumenanteile ("Raumanteile") von Zement, Wasser, Körnung, Betonzusatzstoffen und Luftporen ergibt.

$$1000 = V_z + V_w + V_g + V_f + V_p \text{ [dm}^3\text{]}$$

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

In der Gleichung
bedeuten:

z = Zementgehalt (Masse) $[\text{kg/m}^3]$

w = Wassergehalt (Masse) $[\text{kg/m}^3]$

g = Korngelalt (Masse) $[\text{kg/m}^3]$

f = Gehalt an Zusatzstoffen (Masse) $[\text{kg/m}^3]$

V_p = Luftgehalt (Porenvolumen) im verdichteten
Frischbeton $[\text{dm}^3/\text{m}^3]$

ρ_z = Dichte des Zementes $[\text{kg/dm}^3]$

ρ_w = Dichte des Wassers $[\text{kg/dm}^3]$

ρ_g = Rohdichte der Gesteinskörnung $[\text{kg/dm}^3]$

ρ_f = Dichte des Zusatzstoffes $[\text{kg/dm}^3]$

Durch Umstellen der Stoffraumgleichung lässt sich der Stoffraum der Gesteinskörnung aus den übrigen Größen berechnen. Durch weiteres Auflösen folgen die Massen der trockenen Gesteinskörnung.

2. Näherungsbeziehung für die Zusammensetzung und die Festbetonrohddichte von Beton

Zusammensetzung (Masse)

= Masse Hydratationsprodukte + Masse Gesteinskörnungen
= $z + 0,24 \cdot z + 0,18 \cdot z + g = 1,42 \cdot z + g$ [kgFeststoff/m³Beton]

Annahme: vollständige Hydratation

Zusammensetzung (Volumen)

= Volumen Hydratationsprodukte + Volumen GK + Vol. Poren

= $2,13 \cdot z / \rho_z + V_g + V_p + (V_w + V_z - 2,13 \cdot z / \rho_z)$

= $V_g + V_p + V_w + V_z$

$\rho_{\text{Fest}} = (1,42 \cdot z + g) / (V_g + V_p + V_w + V_z)$

3. Reihenentwicklung für die Veränderung von Zementstein- gehalt und Festbetondichte beim Mehrfachrecycling

Gedankenexperiment:

Ein Beton wird zu einer rezyklierten Gesteinskörnung aufbe-
reitet. Aus diesen Rezyklaten wird ein Beton der 2. Generation
hergestellt, der wiederum zerkleinert und zu Beton der 3.
Generation verarbeitet wird.

Wie hoch ist der Zementsteingehalt der n-ten Generation?

Zementsteingehalt in kg/kg

$$ZS_i = \frac{1,42 * z * \sum_{i=1}^n \left(\frac{Vg}{1000}\right)^{i-1}}{1,42 * z * \sum_{i=1}^n \left(\frac{Vg}{1000}\right)^{i-1} + g_0 * \left(\frac{Vg}{1000}\right)^{i-1}}$$

i: Betongeneration

Z: Zementgehalt im Beton im kg/m³

V_g: Volumen der Gesteinskörnung
pro 1000 dm³ Beton

g₀: Masse der GK pro 1000 dm³
Ausgangsbeton (i = 1)

Festbetonrohddichte in kg/dm³

$$\rho_i = (1/1000) * 1,42 * z * \sum_{i=1}^n \left(\frac{Vg}{1000}\right)^{i-1} + g_0 * \left(\frac{Vg}{1000}\right)^{i-1}$$

Beispiel i = 3

$$ZS_3 = \frac{1,42 * z * \left[1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^2\right]}{1,42 * z * \left[1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^2\right] + g_0 * \left(\frac{Vg}{1000}\right)^2}$$

$$\rho_3 = (1/1000) * 1,42 * z * \left[1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^1 + \left(\frac{Vg}{1000}\right)^2\right] + g_0 * \left(\frac{Vg}{1000}\right)^2$$

Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

Aufgabe 2: Veränderung der Trockenrohichte von Beton durch die Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung

Aufgabe 3: Änderung des Zementsteingehalts bei Mehrfachrecycling

Aufgabe 4: Veränderung der Festigkeit und des E-Moduls

Aufgabe 5: Dauerhaftigkeit

Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

Es soll die Rezeptur für einen Beton berechnet werden, bei dem 50 Vol-% der Gesteinskörnungen > 4 mm durch rezyklierte Gesteinskörnungen zu ersetzen sind. Wie viel kg Wasser müssen je m³ Frischbeton zusätzlich zugegeben werden, um das Saugen der RC-Gesteinskörnungen zu kompensieren?

Vorgaben:

$$z = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_z = 3,1 \text{ kg/dm}^3$$

$$w/z = 0,5$$

$$\rho_{\text{Kies}} = 2,62 \text{ kg/dm}^3$$

Sieblinie: A/B 16

Luftporengehalt.

$$V_p = 20 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

Kennwerte RC-Material:

KG	ρ_{Roh} [kg/dm ³]	WA [M-%]
4/8 mm	2,00	8
8/16 mm	2,20	4

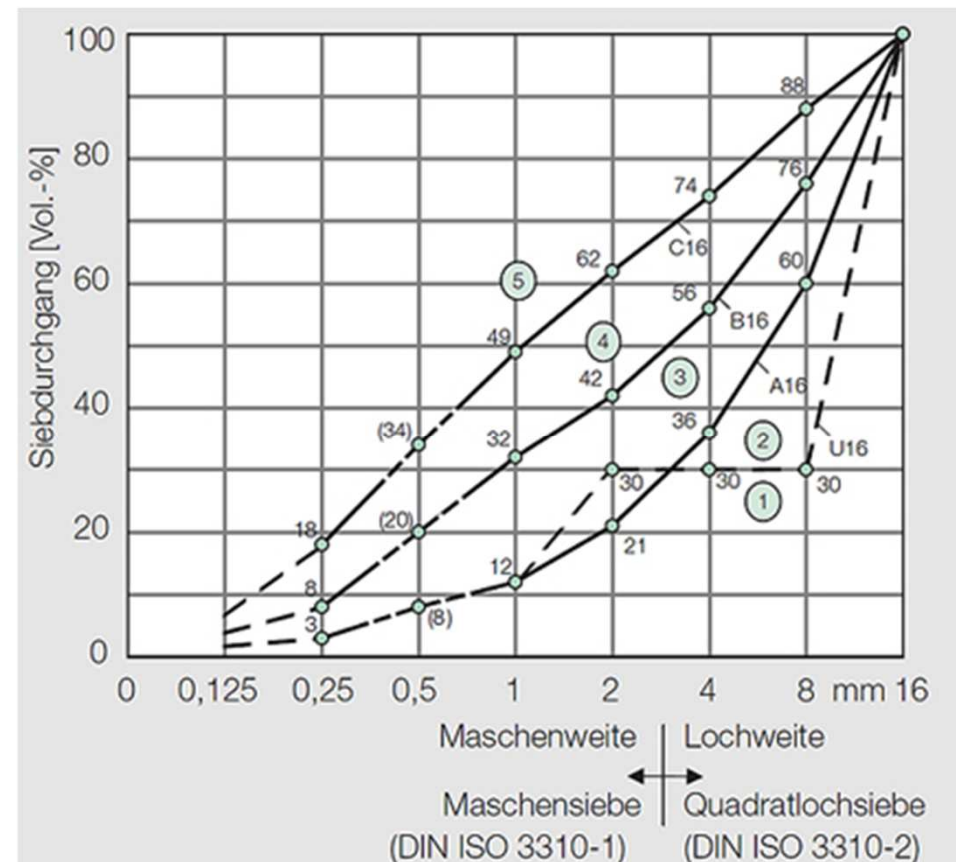
Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

Volumenanteile der einzelnen Korngruppen aus der Sieblinie:
 Mitte zwischen Sieblinie A und Sieblinie B:

Fraktion 0/4 mm
 46 Vol-% = 460 dm³Kies/m³GK

Fraktion 4/8 mm
 22 Vol-% = 220 dm³/m³
 = 110 dm³Kies/m³Gk
 + 110 dm³RC/m³GK

Fraktion 8/16 mm
 32 Vol-% = 320 dm³/m³
 = 160 dm³Kies/m³GK
 + 160 dm³RC/m³GK



Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

	Volumenanteile aus Sieblinie	Rohdichte	Masseanteile
	dm ³ Fraktion/ m ³ GK	kg/dm ³	kgFraktion/ m ³ GK
Kies			
0/4	460	2,62	1205,2
4/8	110	2,62	288,2
8/16	160	2,62	419,2
Summe			1912,6
Rezyklierte Gesteinskörnungen			
4/8	110	2,00	220
8/16	160	2,20	352
Summe			572

Rohdichte der Gesamt-
gesteinskörnung

$$\rho_g = 1912,6 \text{ kgFraktion/m}^3\text{GK} + 572 \text{ kgFraktion/m}^3\text{GK}$$

$$= 2484,6 \text{ kgGK/m}^3\text{GK} = 2,484 \text{ kgGK/dm}^3\text{GK}$$

Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

Stoffraumrechnung

$$1000 = v_g + v_z + v_w + v_p$$

Ergebnis

$$v_g = 692 \text{ dm}^3\text{GK/m}^3\text{Beton}$$

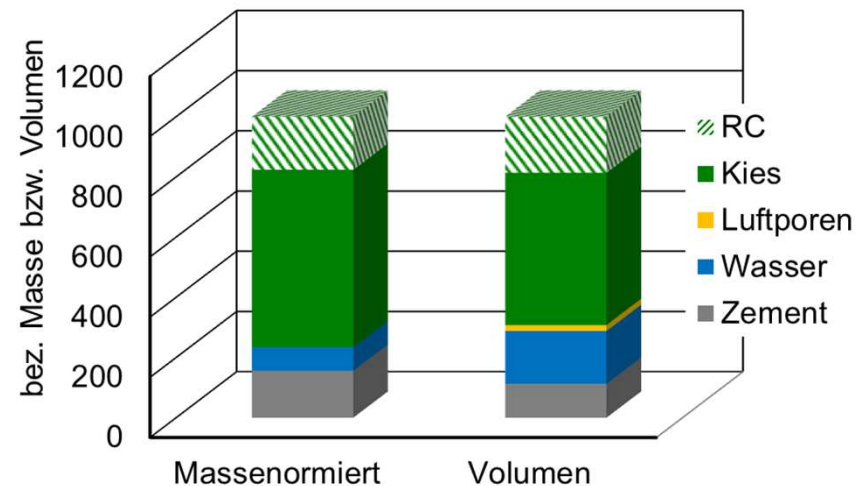
$$g = 1719 \text{ kgGK/m}^3\text{Beton}$$

$$v_g = 1000 - v_z + v_w + v_p$$

$$g = \rho_g * v_g = \rho_g * (1000 - z/\rho_z - w/\rho_w - v_p)$$

$$g = 2,484 * (1000 - 350/3,1 - 0,5 * 350/1 - 20)$$

	Masse	Masse _{normiert}	Volumen
	kg/m ³ B	kg/1000 kg B	dm ³ /m ³ B
Zement	350	156	113
Wasser	175	78	175
Luftporen	0	0	20
GK	1719	766	692
Summe	2244	1000	1000



Aufgabe 1: Zusatzwasser infolge des Wasseranspruchs von RC-Zuschlag

	Volumenanteile aus Sieblinie	Rohdichte	Masseanteile	Volumen GK=0,692 m ³ GK/m ³ Beton	WA	H ₂ O
	dm ³ Fraktion/ m ³ GK	kg/dm ³	kgFraktion /m ³ GK	kgFraktion/ m ³ Beton	kgH ₂ O/ kgGK	kg/m ³
Kies						
0/4	460	2,62	1205,2	834	n.b.	
4/8	110	2,62	288,2	199	n.b.	
8/16	160	2,62	419,2	290	n.b.	
Summe			1912,6	1324		
Rezyklierte Gesteinskörnung						
4/8	110	2,00	220	152	0,08	12
8/16	160	2,20	352	244	0,04	10
Summe			572	396		22

Wasserszugabe: 175 kg/m³ + 22 kg/m³

Aufgabe 2: Veränderung der Trockenrohddichte von Beton durch die Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung

Um wie viel Prozent verringert sich die Trockenrohddichte eines Betons gegenüber dem Ausgangsbeton, wenn 50 Vol-% des Zuschlages durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden? Der Ausgangsbeton soll Rheinkies ($\rho_g = 2,62 \text{ kg/dm}^3$) enthalten und mit einem w/z-Wert von 0,5 hergestellt werden. Die Rohddichte des Rezyklats beträgt $2,20 \text{ kg/dm}^3$. In beiden Betonen sollen 350 kg/m^3 CEM I 42,5 R ($\rho_z = 3,1 \text{ kg/dm}^3$) enthalten sein. Der Luftporengehalt wird mit $20 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ angenommen.

Stoffraumrechnung:

$$1000 = g/\rho_g + z/\rho_z + w/\rho_w + v_p$$



3. Näherungsbeziehung für die Zusammensetzung und die Festbetonrohddichte von Beton

Zusammensetzung (Masse)
 = Masse Hydratationsprodukte + Masse Gesteinskörnungen
 = $z + 0,24 \cdot z + 0,18 \cdot z + g = 1,42 \cdot z + g$ [kgFeststoff/m³Beton]
 Annahme: vollständige Hydratation

Zusammensetzung (Volumen)
 = Volumen Hydratationsprodukte + Volumen GK + Vol. Poren
 = $2,13 \cdot z/\rho_z + V_g + V_p + (V_w + V_z - 2,13 \cdot z/\rho_z)$
 = $V_g + V_p + V_w + V_z$

$$\rho_{\text{Fest}} = (1,42 \cdot z + g)/(V_g + V_p + V_w + V_z)$$

Aufgabe 2: Veränderung der Trockenrohddichte von Beton durch die Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung

Beton aus Rheinkies:

$$g = \rho_g (1000 - z/\rho_z - w/\rho_w - v_p)$$

$$g = 2,62 \cdot (1000 - 350/3,1 - 175 - 20)$$

$$g = 2,62 \cdot 691$$

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

Beton aus Rheinkies + Rezyklat

$$V_{\text{Kies}} = 0,5 \cdot 691$$

$$V_{\text{RC}} = 0,5 \cdot 691$$

$$g_{\text{Kies}} = 2,62 \cdot 0,5 \cdot 691 = 905 \text{ kg/m}^3$$

$$g_{\text{RC}} = 2,2 \cdot 0,5 \cdot 691 = 760 \text{ kg/m}^3$$

Trockenrohddichte

$$\rho_{\text{Fest}} = (1,42 \cdot z + g) / (V_g + V_p + V_z + V_w)$$

$$= (1,42 \cdot 350 + 1813) / 1000$$

$$= 2,31 \text{ kg/dm}^3$$

$$\rho_{\text{Fest}} = (1,42 \cdot z + g_{\text{Kies}} + g_{\text{RC}}) / (V_g + V_p + V_z + V_w)$$

$$= (1,42 \cdot 350 + 905 + 760) / 1000$$

$$= 2,16 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Dichteunterschied} = 100 \cdot (2,31 - 2,16) / 2,31 = 6,5 \%$$

Aufgabe 2: Veränderung der Trockenrohddichte von Beton durch die Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung

Bestätigung durch experimentelle Werte

Substitution der groben Gesteinskörnungen durch Rezyklate

Rohdichterückgang

$2,42\text{g/cm}^3 \rightarrow 2,29\text{g/cm}^3 \equiv 5,5\%$

Festigkeitsrückgang

$48,3\text{ N/mm}^2 \rightarrow 46,2\text{ N/mm}^2 \equiv 4,4\%$

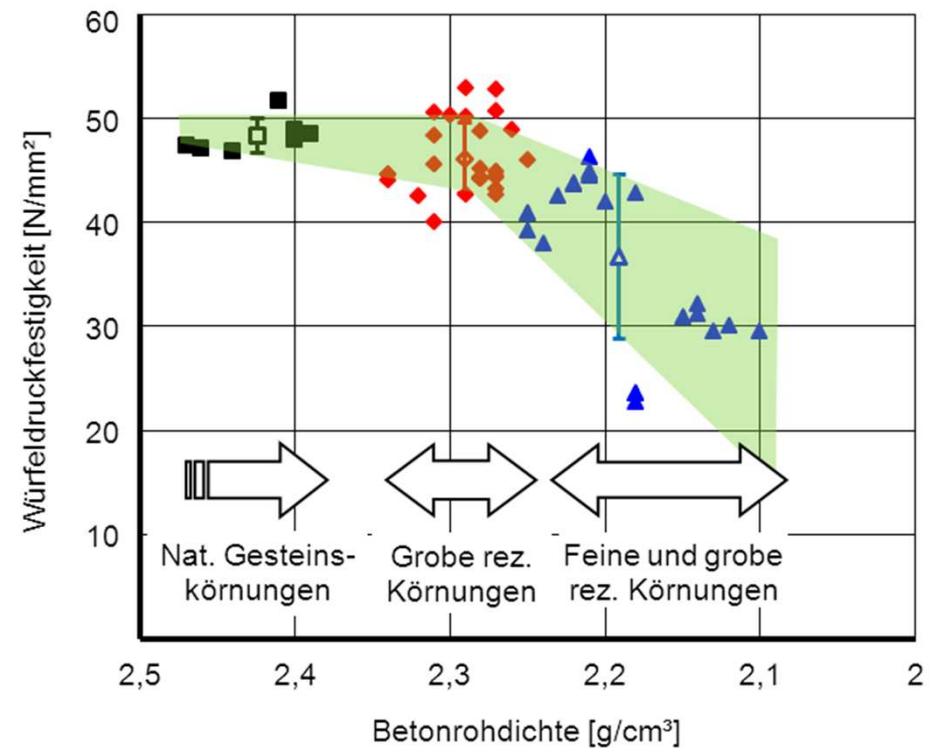
Substitution der groben und feinen Gesteinskörnungen durch Rezyklate

Rohdichterückgang

$2,42\text{g/cm}^3 \rightarrow 2,19\text{g/cm}^3 \equiv 9,6\%$

Festigkeitsrückgang

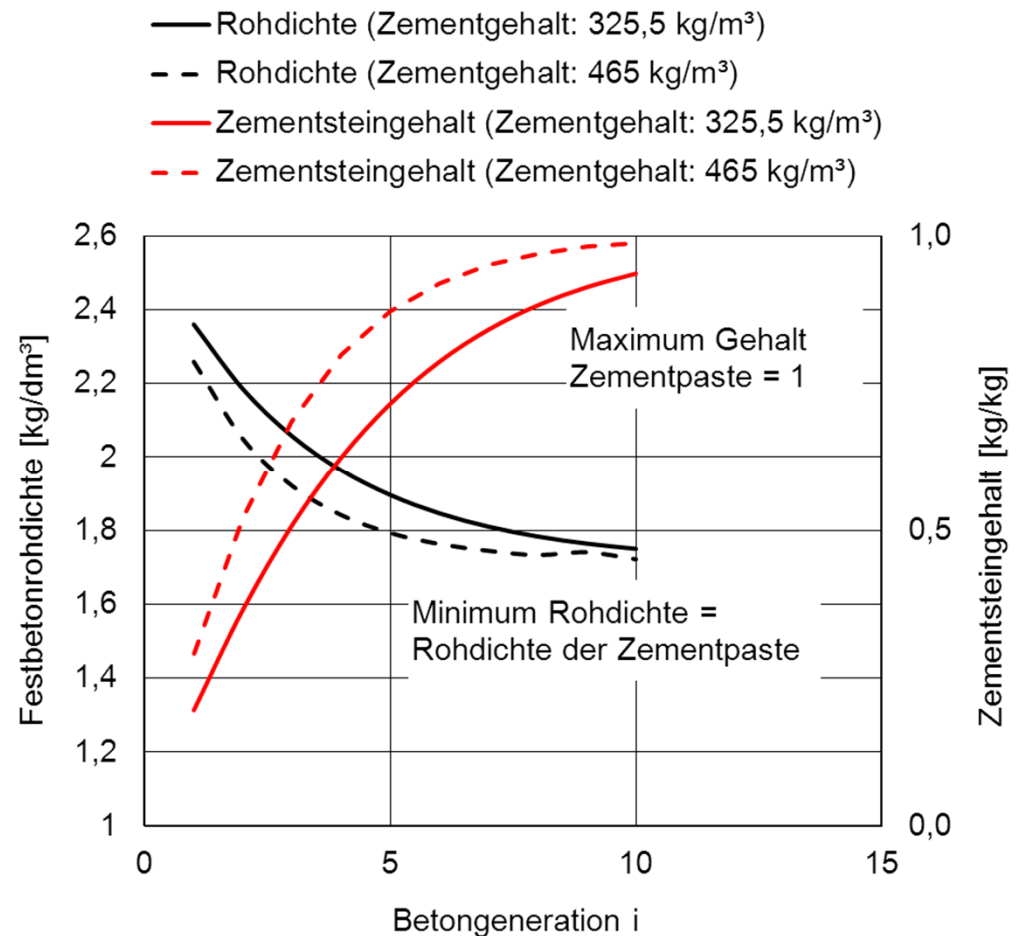
$48,3\text{ N/mm}^2 \rightarrow 36,7\text{ N/mm}^2 \equiv 24,1\%$



Aufgabe 3: Änderung des Zementsteingehalts bei Mehrfachrecycling

Ausgangsbetone

	Volumen- zusammen- setzung	Dichte	Masse- zusammen- setzung
	dm ³ /m ³	kg/dm ³	kg/m ³
1. Generation; Zementgehalt: 325,5 kg/m ³			
water	165	1	165,0
cement	105	3,1	325,5
aggregate	730	2,6	1898,0
air	0		
Summe	1000	w/z = 0,51	2388,5
1. Generation; Zementgehalt: 465 kg/m ³			
	235	1,00	235,0
	150	3,1	465,0
	615	2,6	1599,0
	0		
	1000	w/z = 0,51	2299,0



Aufgabe 4: Änderung der Druckfestigkeit durch Verwendung von RC-Zuschlag

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

Ausgehend von den errechneten Volumenanteilen der einzelnen Betonbestandteile aus Aufgabe 1 soll nun ermittelt werden, um wie- viel % der E-Modul sinkt bei:

1. Zugabe von 50 Vol % Betonbruch
 2. Zugabe von 50 Vol % Ziegelbruch
- jeweils im Austausch gegen die natürliche Gesteinskörnung

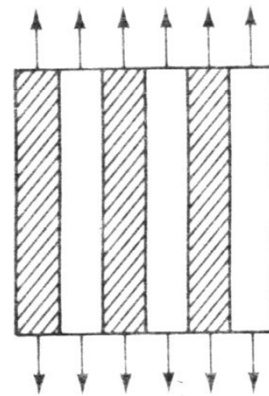
	Volumen
	dm ³ /m ³ Beton
Zement	113
Wasser	175
Luftporen	20
GK	692
Summe	1000

Vorgaben:

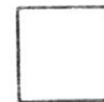
- E-Modul Matrix: 20.000,00 N/mm²
- E-Modul Naturzuschlag: 40.000,00 N/mm²
- E-Modul Betonbruch: 20.000,00 N/mm²
- E-Modul Ziegelbruch: 12.000,00 N/mm²

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

Der Berechnung liegt ein vertikal geschichtetes Betonstrukturmodell zugrunde.



(a)



Matrix



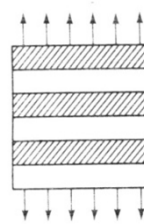
Aggregate

$$E_{Komposit} = E_1 \cdot V_1 + E_2 \cdot V_2$$

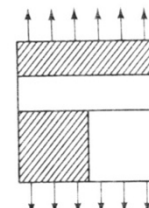
E_1 E-Modul der Komponente 1 in N/mm²

V_1 Volumenanteil der Komponente 1 in m³/m³

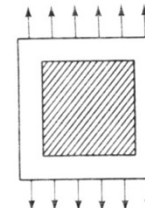
Vergleich: Weitere
 Betonstrukturmodelle



(b)



(c)



(d)

nach Young

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

E-Modul Ausgangsbeton

$$V_{\text{Beton}} = V_{\text{Matrix}} + V_{\text{G}} + V_{\text{Poren}}$$

$$V_{\text{Matrix}} = V_{\text{Wasser}} + V_{\text{Zement}} = 175 \text{ dm}^3 + 113 \text{ dm}^3 = 288 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{G}} = 159 \text{ dm}^3 \cdot 2 + 76 \text{ dm}^3 \cdot 2 + 111 \text{ dm}^3 \cdot 2 = 692 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Poren}} = 20 \text{ dm}^3$$

$$\text{E-Modul} = 0,288 \cdot 20000 \text{ N/mm}^2 + 0,692 \cdot 40000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{E-Modul Ausgangsbeton} = 33400 \text{ N/mm}^2$$

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

E-Modul RC-Beton , Betonbruch:

$$V_{\text{Beton}} = V_{\text{Matrix}} + V_{\text{G}} + V_{\text{Poren}}$$

$$V_{\text{Matrix}} = V_{\text{Wasser}} + V_{\text{Zement}} = 175 \text{ dm}^3 + 113 \text{ dm}^3 = 288 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{G(Naturzuschlag)}} = V_{\text{G(Betonbruch)}} = 159 \text{ dm}^3 + 76 \text{ dm}^3 + 111 \text{ dm}^3 \\ = 346 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Poren}} = 20 \text{ dm}^3$$

$$\text{E-Modul} = 0,288 \cdot 20000 \text{ N/mm}^2 + 0,346 \cdot 40000 \text{ N/mm}^2 \\ + 0,346 \cdot 20000 \text{ N/mm}^2$$

E-Modul RC-Beton, Betonbruch = 26520 N/mm²

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

E-Modul RC-Beton , Ziegelbruch

$$V_{\text{Beton}} = V_{\text{Matrix}} + V_{\text{G}} + V_{\text{Poren}}$$

$$V_{\text{Matrix}} = V_{\text{Wasser}} + V_{\text{Zement}} = 175 \text{ dm}^3 + 113 \text{ dm}^3 = 288 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{G(Naturzuschlag)}} = V_{\text{G(Betonbruch)}} = 159 \text{ dm}^3 + 76 \text{ dm}^3 + 111 \text{ dm}^3 = 346 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Poren}} = 20 \text{ dm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{E-Modul} &= 0,288 \cdot 20000 \text{ N/mm}^2 + 0,346 \cdot 40000 \text{ N/mm}^2 \\ &+ 0,346 \cdot 12000 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

E-Modul RC-Beton, Ziegelbruch = 23752 N/mm²

Aufgabe 4: Änderung des E-Moduls durch Verwendung von RC-Zuschlag

Gegenüberstellung:

E-Modul Ausgangsbeton = 33400 N/mm²

E-Modul RC-Beton, Betonbruch = 26520 N/mm²
→ Absenkung um 20,7%

E-Modul RC-Beton, Ziegelbruch = 23752 N/mm²
→ Absenkung um 29,0%

Aufgabe 5: Dauerhaftigkeit