

Świadoma dekarbonizacja betonu zaczyna się od właściwości cementu

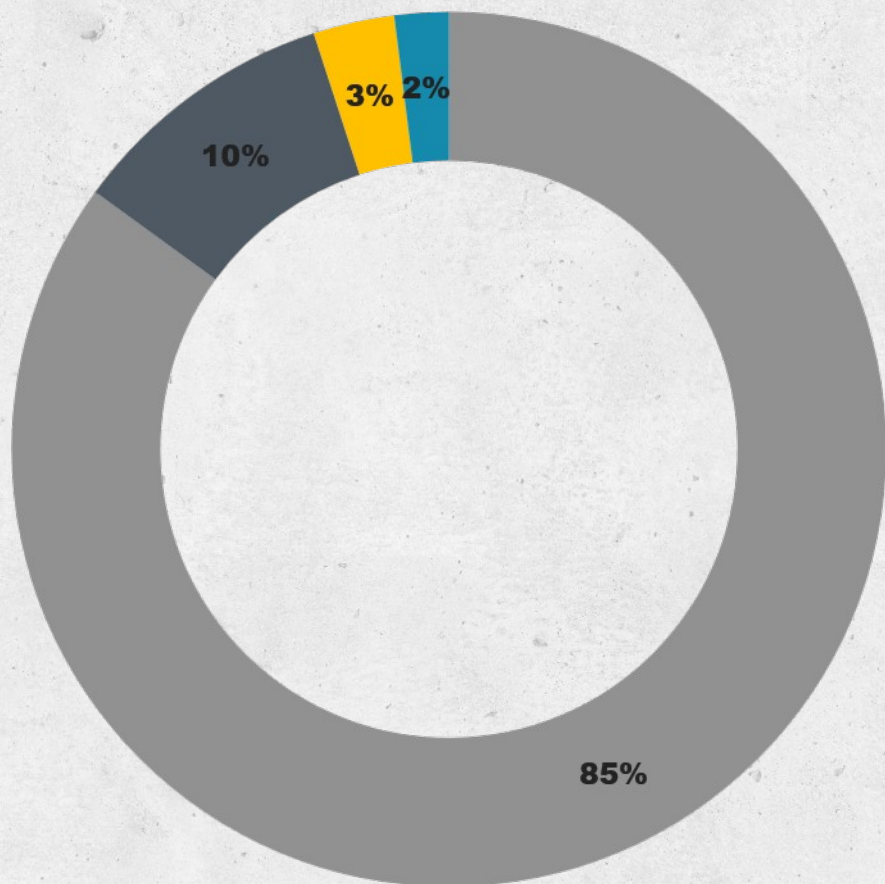
dr inż. Piotr Górak

Paweł Mofina

Cemex Polska Sp. z o.o.



Emisyjność betonu



CEMENT

85%



KRUSZYWO GRUBE

10%



KRUSZYWO DROBNE

3%



WODA I DOMIESZKI

2%



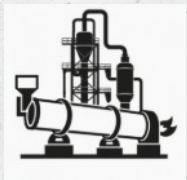
Cement jako projektowany układ materiałowy



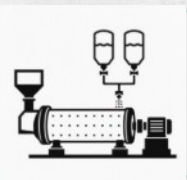
Składniki nieklinkierowe



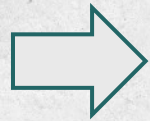
Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



Technologie przemiału



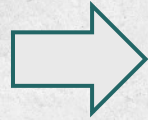
- Dostępność surowców,
- Jakość surowców,
- Dedykowana funkcja składnika,
- Efektywność / aktywność,
- Oczekiwane właściwości cementu,
- Emisyjność surowców.



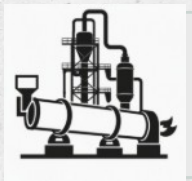
Cement jako projektowany układ materiałowy



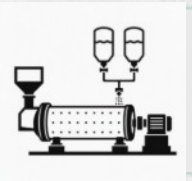
Składniki nieklinkierowe



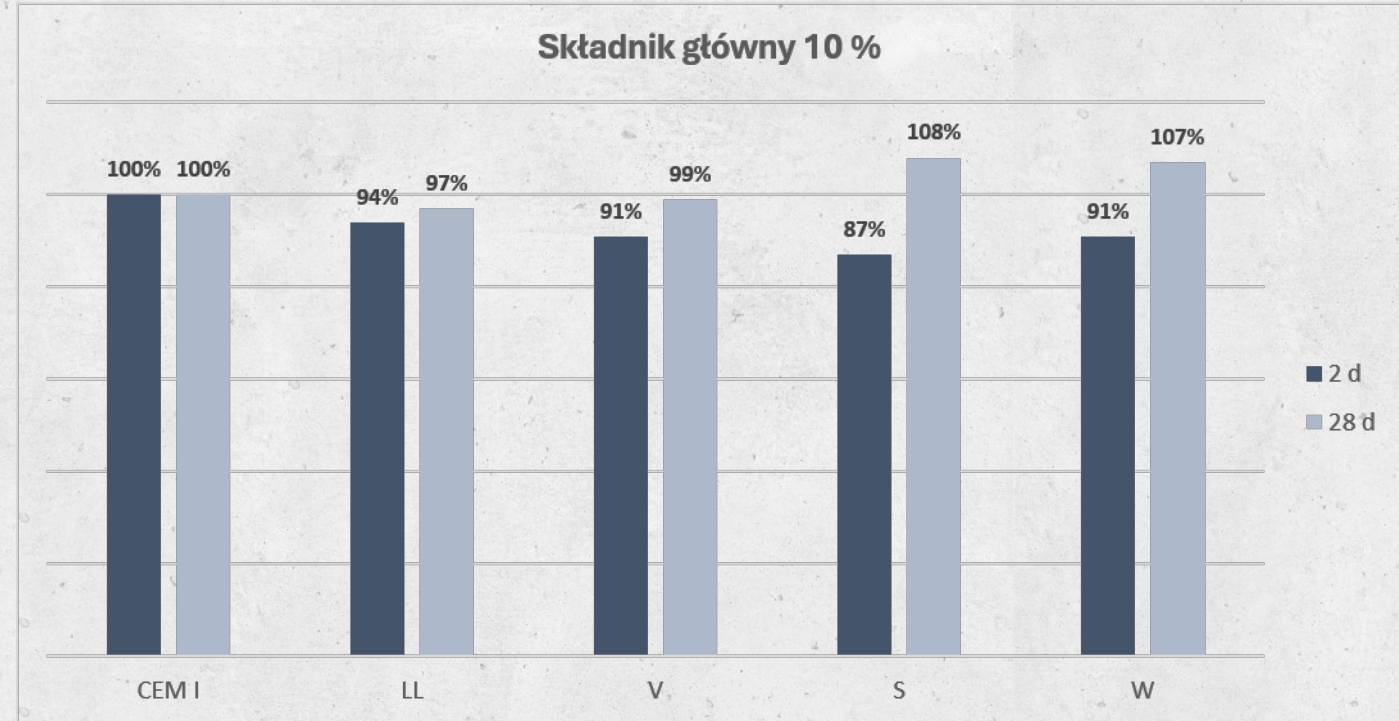
Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



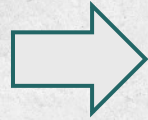
Technologie przemiału



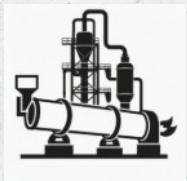
Cement jako projektowany układ materiałowy



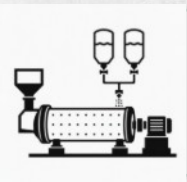
Składniki nieklinkierowe



Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



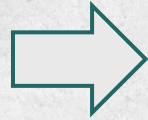
Technologie przemiału



Cement jako projektowany układ materiałowy



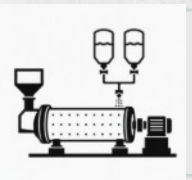
Składniki nieklinkierowe



Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



Technologie przemiału



Cement jako projektowany układ materiałowy



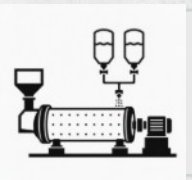
Składniki nieklinkierowe



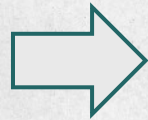
Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



Technologie przemiału



- Normowe wymagania składu,
- Oczekiwane właściwości cementu,
- Planowany zakres aplikacji,
- **Weryfikacja laboratoryjna zdolności aplikacyjnych.**

Cement jako projektowany układ materiałowy



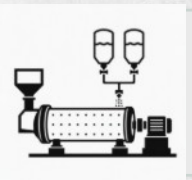
Składniki nieklinkierowe



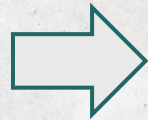
Projektowanie składu



Produkcja klinkieru



Technologie przemiału



- Stosowanie DRM,
- Stosowanie paliw alternatywnych,
- Sterowanie procesem wypału,
- Modelowanie specjalnych właściwości klinkieru.

Cement jako projektowany układ materiałowy



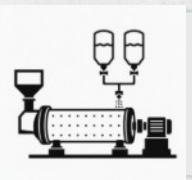
Składniki nieklinkierowe



Projektowanie składu



Produkcja klinkieru

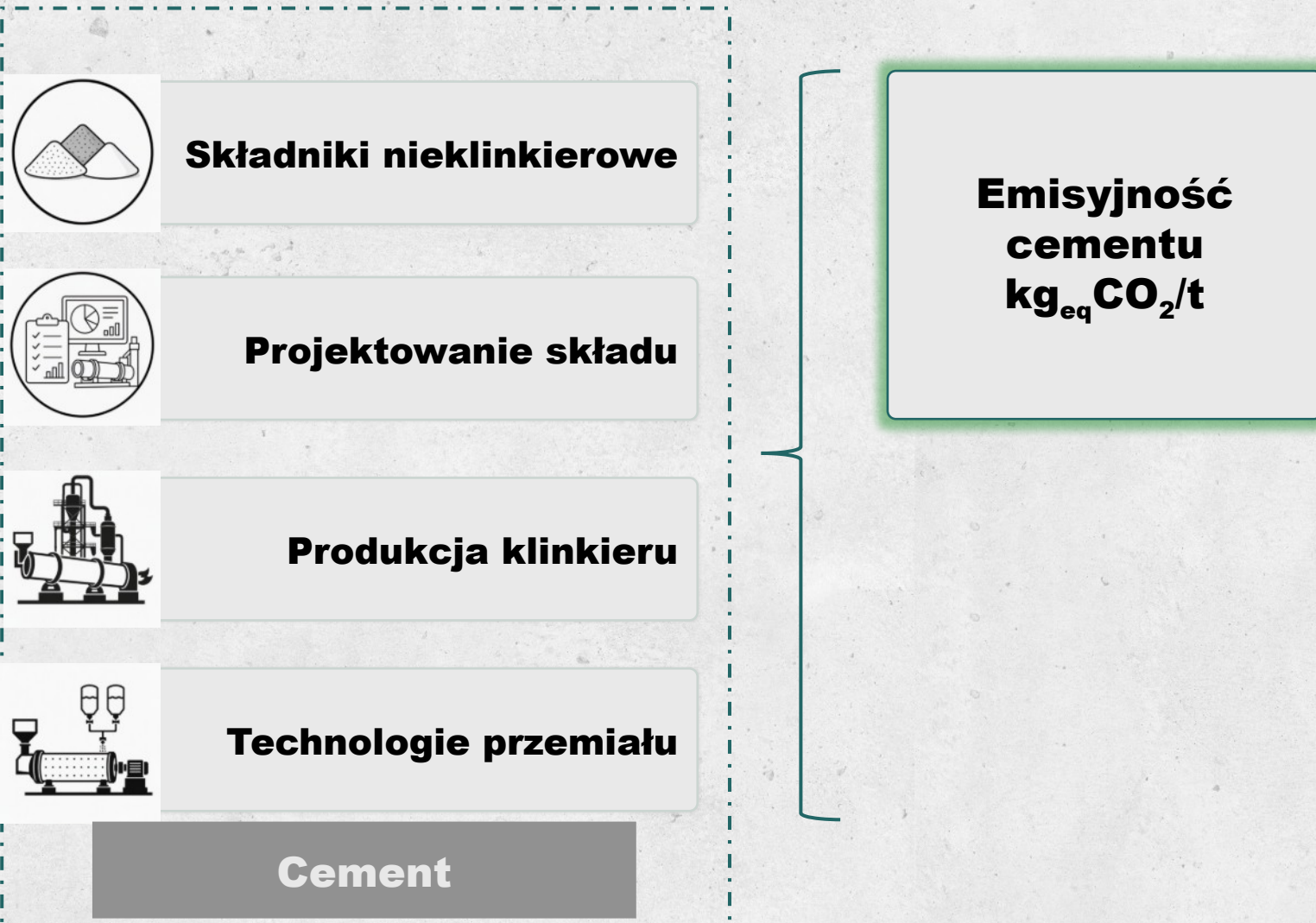


Technologie przemiału



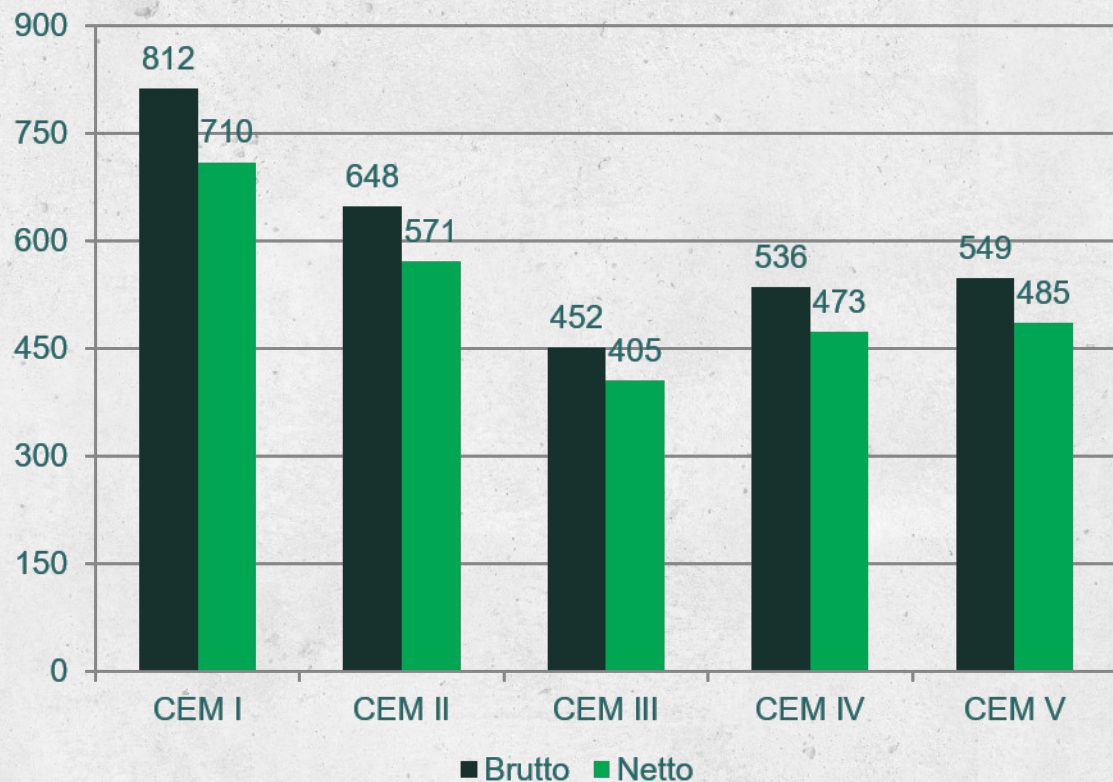
- Rodzaj młynów,
- Praca separatorów,
- Parametry mielenia,
- Wydajność mielenia.

Cement jako projektowany układ materiałowy

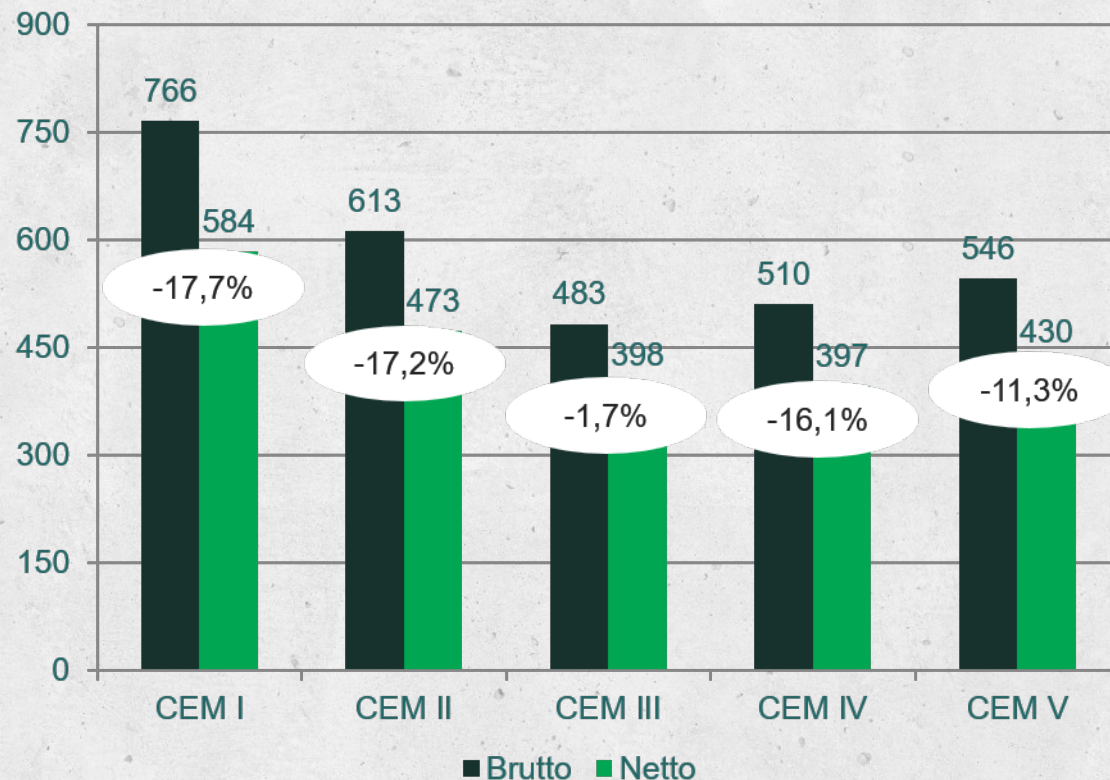


Cement jako projektowany układ materiałowy

EPD Dane 2017



EPD Dane 2022



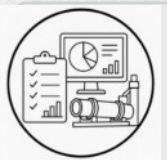
Porównanie wartości brutto i netto dla średnich krajowych SPC, A1-A3, kg CO₂ eq./t cementu według deklaracji EPD dla przemysłu cementowego w Polsce.



Cement w betonie



Składniki nieklinkierowe



Projektowanie składu



Technologie przemiału



Aktywatory przemiału

Cement

**Emisyjność
cementu
 $\text{kg}_{\text{eq}}\text{CO}_2/\text{t}$**

**Właściwości
cementu**

Skład receptury
(rodzaj i ilość cementu)

Właściwości betonu

Właściwości mieszanki

Efektywność środowiskowa
(CO_2/MPa)

Beton



Cement w betonie

Skład receptury – emisyjność vs obszary zastosowań

Rodzaj cementu	Emisja netto CO ₂ na 1 tonę cementu*	Agresja wobec zbrojenia										Agresja wobec betonu									
		Karbonatyzacja				Korozja wywołana chlorkami						Zamrażanie/odmrażanie				Środowisko chemicznie agresywne			Agresja wywołana ścieraniem		
						woda morska			inne												
		XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2 ^{a)}	XA3 ^{a)}	XM1	XM2	XM3
		Emisyjność cementu w 1 m3 betonu od cementu kgCO ₂ /m ³																			
CEM I 42,5 R-NA	481	125	135	135	144	144	154	164	144	154	154	144	144	154	164	144			144	144	154
CEM I 42,5 R-SR5/NA	509	132	143	143	153	153	163	173	153	163	163	153	153	163	173	153	163	183	153	153	163
CEM I 52,5 R-NA	527	137	148	148	158	158	169	179	158	169	169	158	158	169	179	158			158	158	169
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	449	117	126	126	135	135	144	153	135	144	144	135	135	144	153	135	144	162	135	135	144
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	447	116	125	125	134	134	143	152	134	143	143	134	134	143	152	134			134	134	143
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	376	98	105	105	113	113	120	128	113	120	120	113	113			113	120	135	113	113	120
CEM II/B-S 42,5 N-NA	327	85	92	92	98	98	105	111	98	105	105	98	98	105	111	98			98	98	105
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R	370**	96	104	104	111	111	118	126	111	118	118	111				111			111	111	118
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	231	60	65	65	69	69	74	79	69	74	74	69	69	74	79	69	74	83	69	69	74
CEM I 42,5 R-SR 5/NA + pop.	481	120	125	125	135	135	144	149	135	144	144	135				135	144	159	135	135	144
CEM II/A-LL 42,5 R + pop.	447	112	116	116	125	125	134	139	125	134	134	125				125			125	125	134

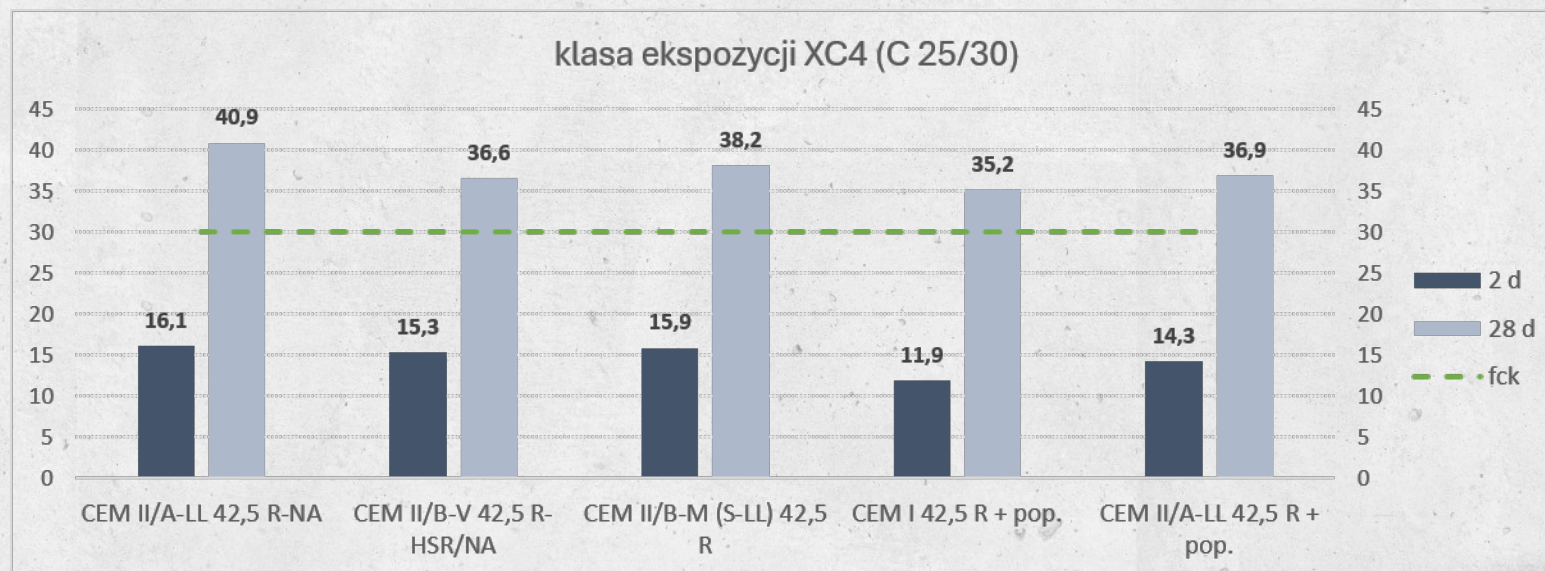
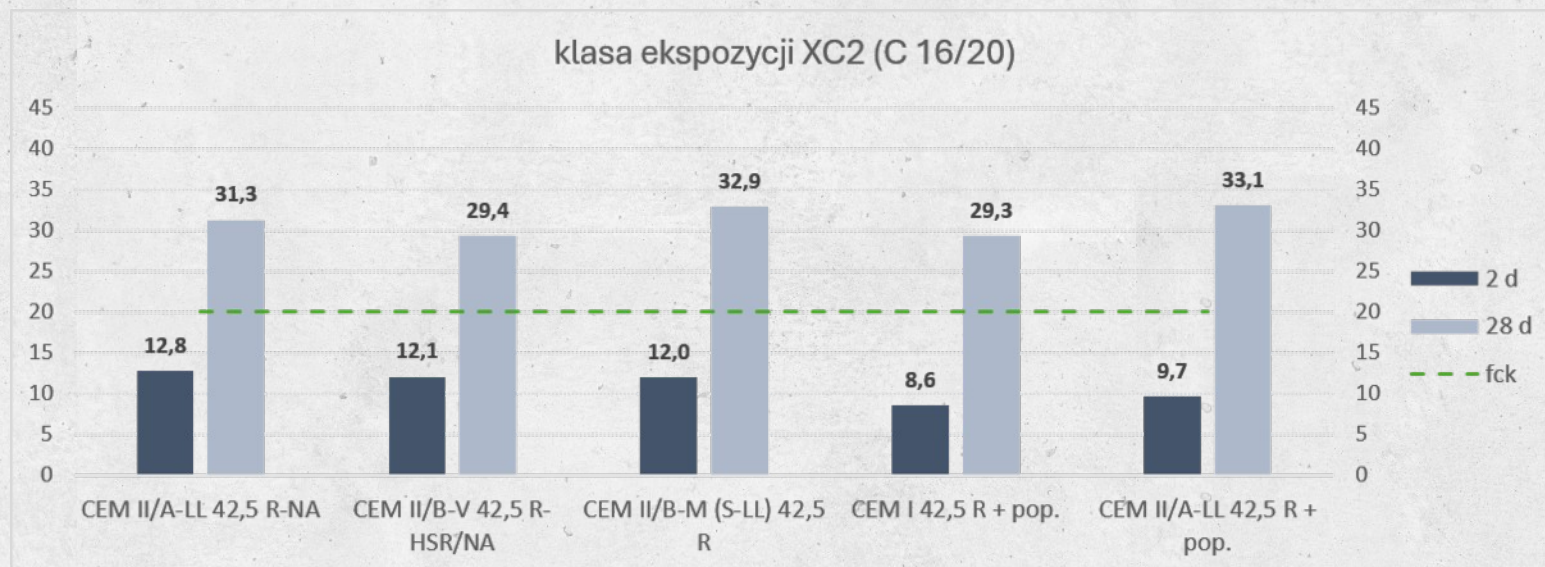


Cement w betonie

Wytrzymałość na ściskanie XC2 i XC4

	Emisyjność cementu w 1 m3 betonu od cementu kgCO ₂ /m ³			
	XC1	XC2	XC3	XC4
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	116	125	125	134
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	98	105	105	113
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R	96	104	104	111
CEM I 42,5 R-SR 5/NA + pop.	120	125	125	135
CEM II/A-LL 42,5 R + pop.	112	116	116	125

Wytrzymałości na ściskanie betonów w
klasach ekspozycji XC2 i XC4



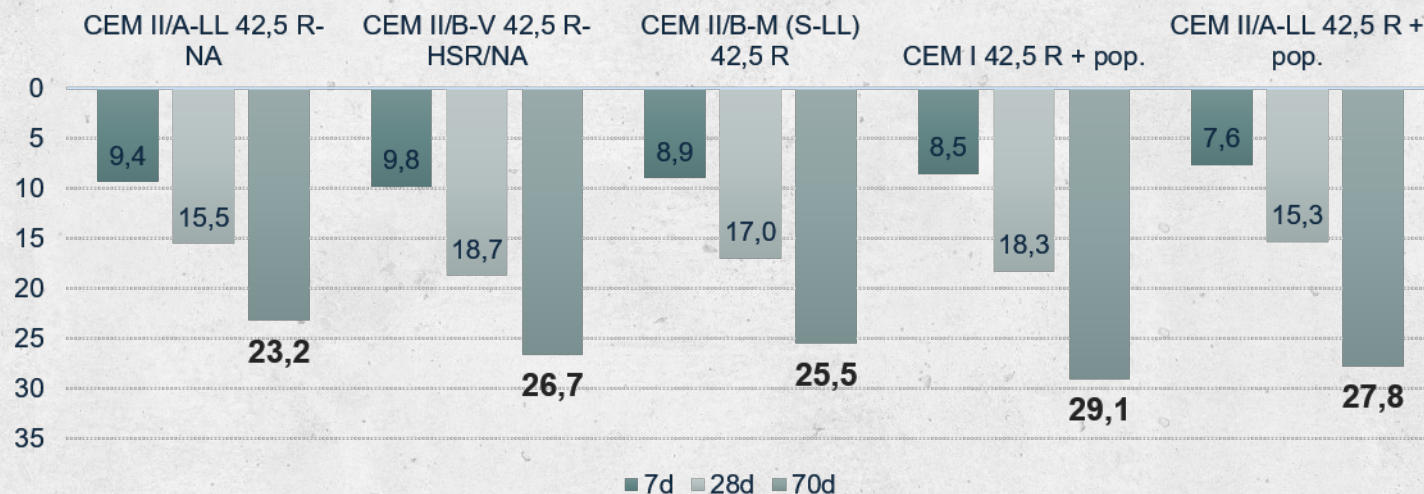
Cement w betonie

Karbonatyzacja XC2 i XC4

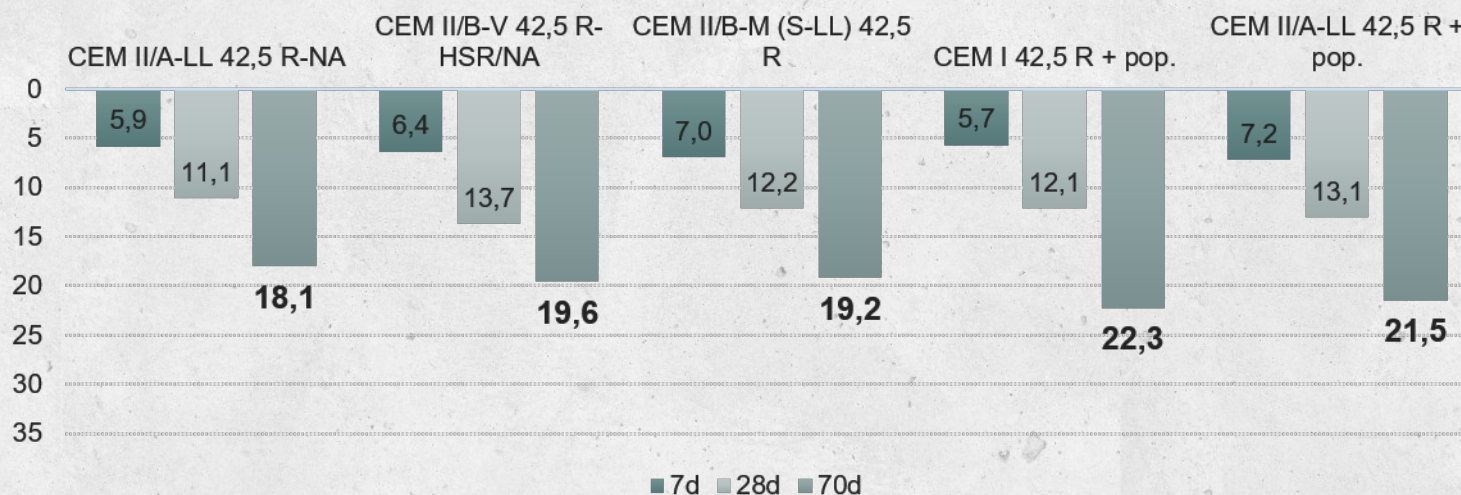
	Emisyjność cementu w 1 m3 betonu od cementu kgCO ₂ /m ³			
	XC1	XC2	XC3	XC4
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	116	125	125	134
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	98	105	105	113
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R	96	104	104	111
CEM I 42,5 R-SR 5/NA + pop.	120	125	125	135
CEM II/A-LL 42,5 R + pop.	112	116	116	125

Głębokość karbonatyzacji betonów w klasach
ekspozycji XC2 i XC4

Klasa ekspozycji XC2



Klasa ekspozycji XC4



Cement w betonie

Właściwości mieszanki

Zmiana dozowania domieszek w zależności od rodzaju cementu (składnika głównego)

CEM II/B-M (S-LL) 100%

CEM II/B-M (S-V) 135%

CEM III/A 42,5 N 110%

CEM II/B-S 52,5 170%

CEM II/B-S 42,5 105%

CEM II/B-LL 130%

CEM II/A-LL 95%

CEM II/A-V 52,5 120%

CEM II/A-V 42,5 105%

CEM I 42,5 100%

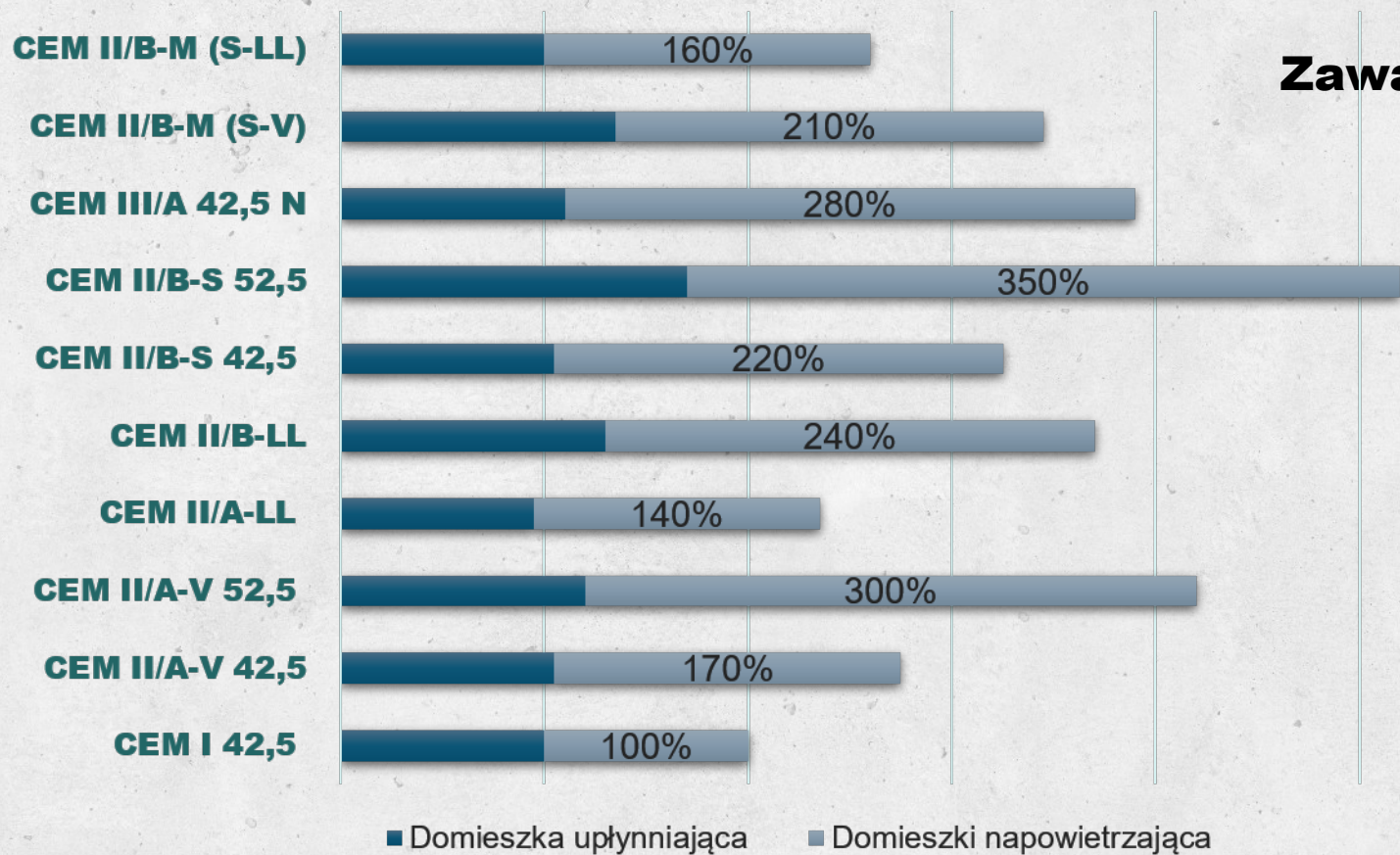
Opad stożka 150 mm +/- 10 mm



Cement w betonie

Właściwości mieszanki

Zmiana dozowania domieszek w zależności od rodzaju cementu (składnika głównego)



Zawartość powietrza 6,0% +/- 0,5%



Cement w betonie



Trwałość nie jest dodatkiem do dekarbonizacji
to warunek, aby redukcja emisji nie została okupiona
krótszym okresem użytkowania lub
bezpieczeństwem konstrukcji.

Cement w betonie

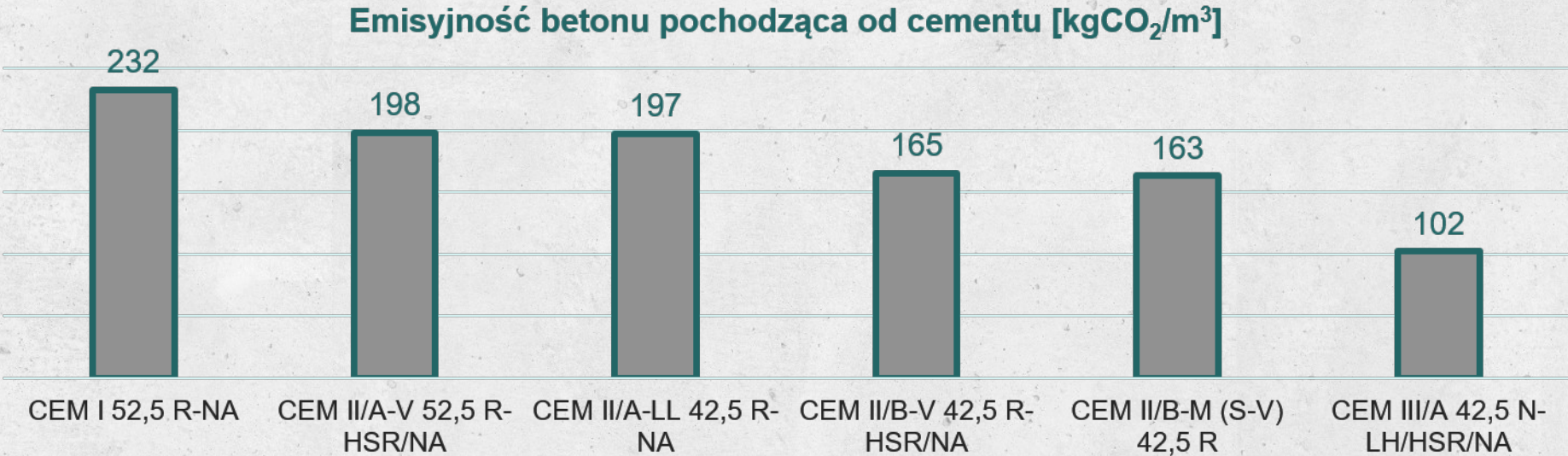
Właściwości betonu

C40/50

XF4 • XD3 • XC4

S5

Rodzaj cementu
CEM I 52,5 R-NA
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA
CEM II/A-LL 42,5 R-NA
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA

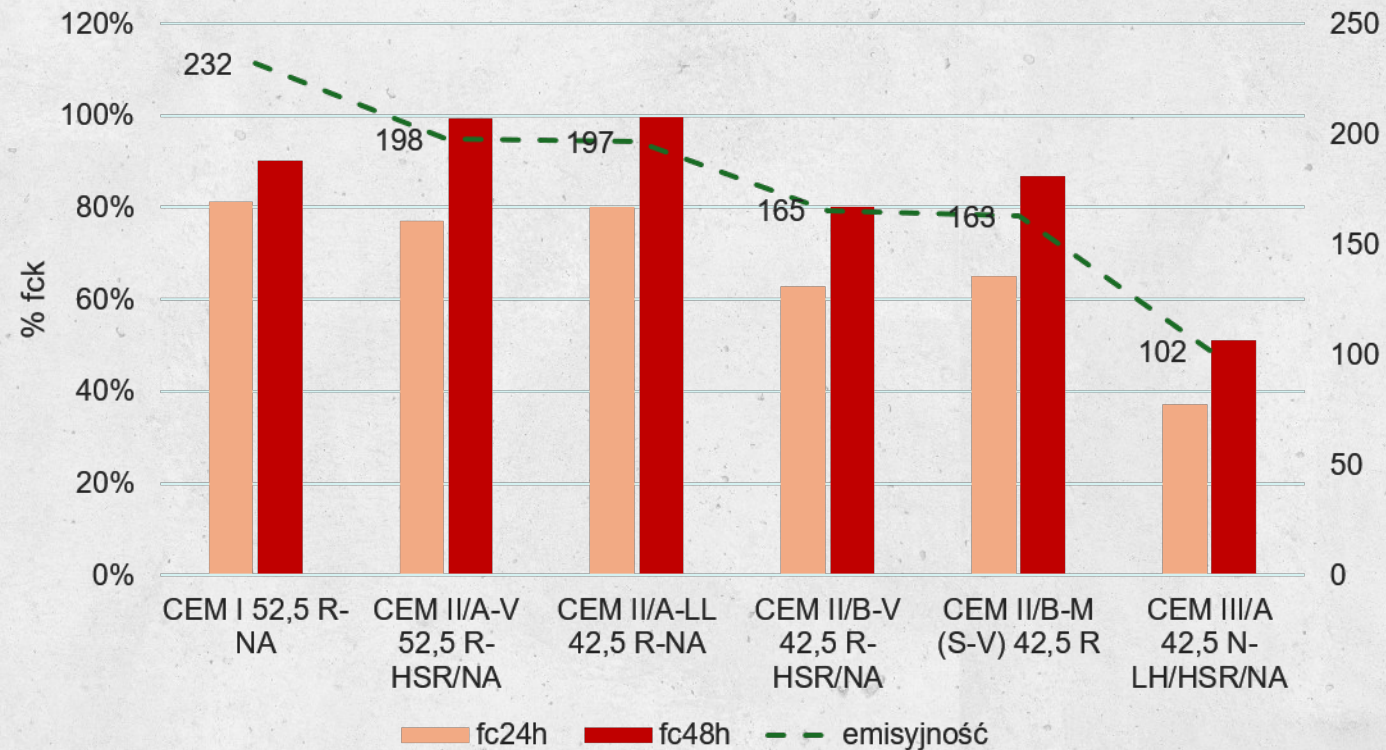


Cement w betonie

Właściwości betonu

C40/50

Rodzaj cementu	Emisyjność betonu od cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
	kg CO ₂ /m ³	fc24h	fc48h	fc28d
CEM I 52,5 R-NA	232	40,6	45,1	72,4
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	198	38,6	49,7	74,1
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	197	40,1	49,9	71,1
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	165	31,4	40	75,8
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	163	32,6	43,4	79,2
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	102	18,6	25,5	66,8



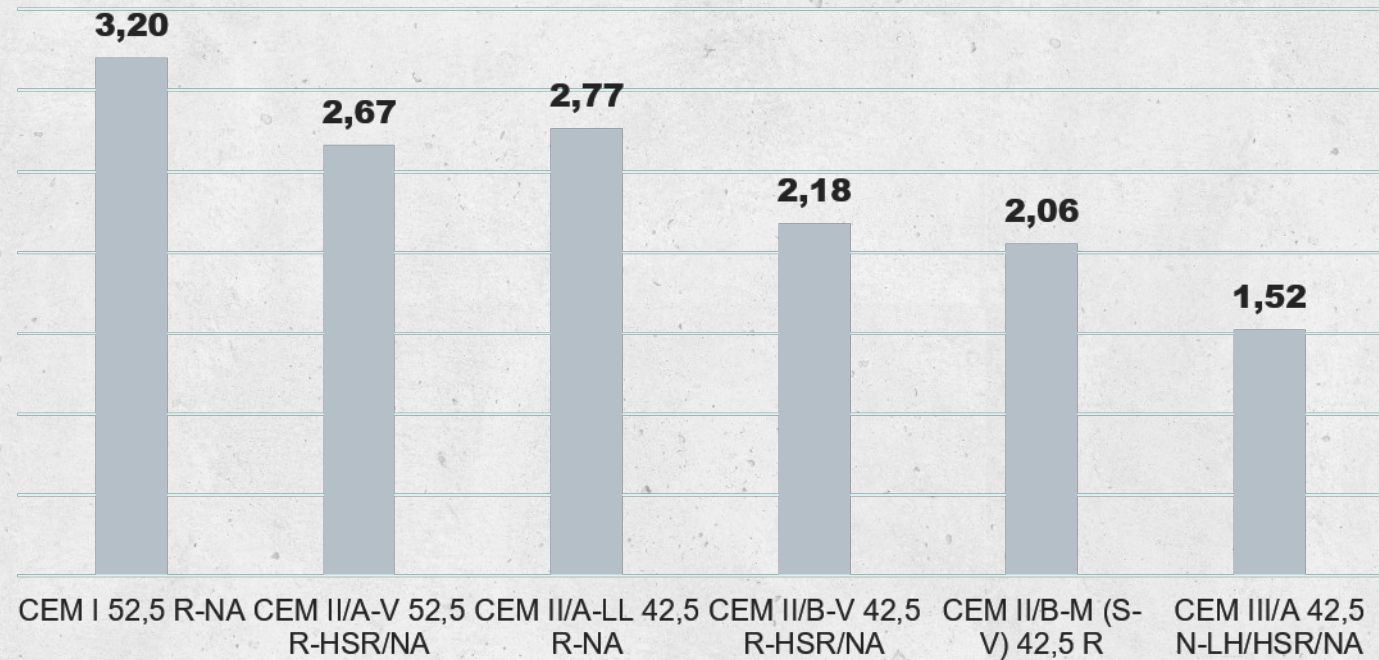
Cement w betonie

Właściwości betonu – Efektywność środowiskowa

C40/50

Rodzaj cementu	Emisyjność betonu od cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
	kg CO ₂ /m ³	fc28d	% fck+4 MPa
CEM I 52,5 R-NA	232	72,4	134%
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	198	74,1	137%
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	197	71,1	132%
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	165	75,8	140%
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	163	79,2	147%
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	102	66,8	124%

Efektywność środowiskowa **kgCO₂/MPa**



Cement w betonie

Właściwości betonu

XF4 • XD3 • XC4

Rodzaj cementu	Emisyjność betonu od cementu	Mrozoodporność PN-B 06265		Czas równoważny
	kg CO ₂ /m ³	Załącznik N	Załącznik O	
CEM I 52,5 R-NA	232	F200	FT2	28d
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	198	F200	FT2	28d
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	197	F200	FT2	28d
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	165	F200	FT2	56d
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	163	F200	FT2	56d
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	102	F200	FT2	90d

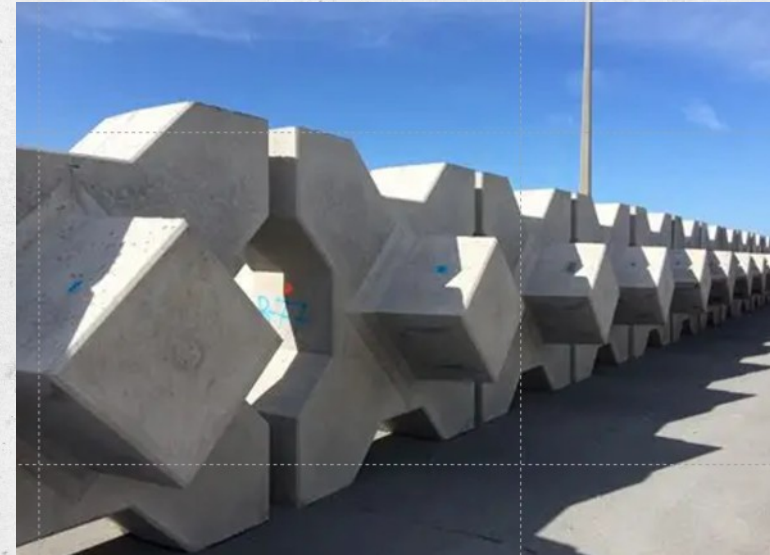


Cement w betonie

Właściwości betonu

XF4 • XD3 • XC4

Rodzaj cementu	Emisyjność betonu od cementu	Mrozoodporność	Współczynnik migracji chlorków	Ocena odporności na wnikanie chlorków
	kg CO ₂ /m ³	Załącznik O	Dnss [x10 ⁻¹² m ² /s]	[-]
CEM I 52,5 R-NA	232	FT2	4,035	Dobra
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	198	FT2	2,255	Dobra
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	197	FT2	3,896	Dobra
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	165	FT2	1,548	Bardzo dobra
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	163	FT2	1,581	Bardzo dobra
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	102	FT2	0,529	Bardzo dobra



[www://xbloc.com/en/swinoujscie-poland](http://xbloc.com/en/swinoujscie-poland)



Cement w betonie

Właściwości betonu

XF4 • XD3 • XC4

Rodzaj cementu	Emisyjność betonu od cementu	Ocena odporności na karbonatyzację
	kg CO ₂ /m ³	
CEM I 52,5 R-NA	232	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm
CEM II/A-V 52,5 R-HSR/NA	198	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm
CEM II/A-LL 42,5 R-NA	197	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4mm
CEM II/B-V 42,5 R-HSR/NA	165	Głębokość karbonatyzacji dk70 = 6,1 mm
CEM II/B-M (S-V) 42,5 R	163	Głębokość karbonatyzacji dk70 < 4,0 mm
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	102	Głębokość karbonatyzacji dk70 = 5,0 mm



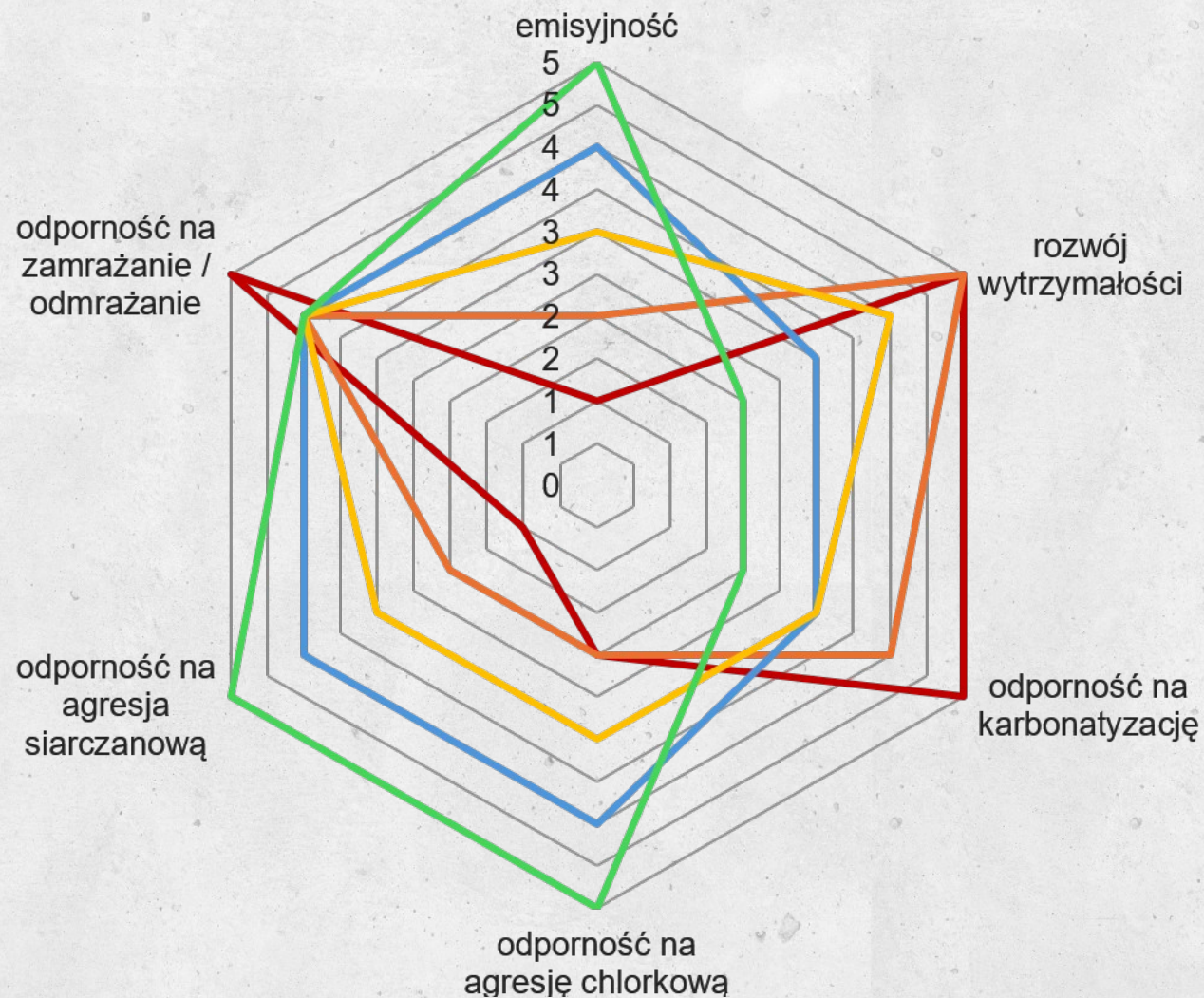
Cement w betonie

Właściwości betonu, a właściwości cementu

Ocena wielokryterialna

Skala ocen	5	1
Emisyjność	najniższa	najwyższa
Rozwój wytrzymałości	bardzo szybki	bardzo wolny
Odporność na agresję środowiskową	najwyższa	najniższa

CEM I 52,5 R-NA
CEM II/A-LL 42,5 R-NA
CEM II/B-S 42,5 N-NA
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R
CEM III/A 42,5 N-NA/HSR/LH



Podsumowanie

- **Cement jest kluczem do dekarbonizacji betonu.** Cement $\approx$ 85% emisji betonu – to od jego właściwości zaczyna się świadoma dekarbonizacja,
- **Cement to projektowalny układ materiałowy.** Emisyjność i funkcjonalność można kształtować na czterech poziomach: doboru składników nieklinkierowych, projektowania składu, produkcji klinkieru oraz technologii przemiału,
- **Trwałość nie może być dodatkiem do dekarbonizacji – musi być świadomym wyborem.** Redukcja emisji nie może zostać okupiona krótszym okresem użytkowania lub bezpieczeństwem konstrukcji,
- Realnym kryterium w aspekcie optymalnego wyboru może być efektywność środowiskowa liczona jako ilość **CO₂/MPa** dla danej aplikacji,
- Sterowanie emisyjnością betonu wymaga odpowiedniego doboru cementu według kompromisu między emisyjnością, a oczekiwanymi właściwościami betonu dostosowanymi do obszaru zastosowania.

Dziękuję za uwagę

