

Vademecum
Technologia
Betonu

Spis treści

A SKŁADNIKI BETONU

- A1 - CO WARTO WIEDZIEĆ O CEMENCIE?**
- A2 - KRUSZYWA W SKŁADZIE BETONU**
- A3 - DODATKI DO BETONU W UJĘCIU NORMY PN-EN 206
"BETON – WYMAGANIA, WŁAŚCIWOŚCI, PRODUKCJA I ZGODNOŚĆ"**
- A4 - DOMIESZKI DO BETONU**
- A5 - SKŁADNIKI BETONU W ŚWIETLE WYMAGAŃ OGÓLNYCH
SPECYFIKACJI TECHNICZNYCH (OST) GDDKIA**

B MIESZANKA BETONOWA

- B1 - BETONOWANIE W WARUNKACH ZIMOWYCH**
- B2 - ODSĄCZANIE WODY Z MIESZANKI BETONOWEJ „BLEEDING”**
- B3 - DOBÓR CEMENTU ZE WZGLĘDU NA KLASY EKSPOZYCJI WEDŁUG
PN-EN 206:2014 "BETON - WYMAGANIA, WŁAŚCIWOŚCI,
PRODUKCJA I ZGODNOŚĆ"**
- B4 - TERMIKA BETONU**
- B5 - NAPOWIETRZANIE BETONU**
- B6 - OSIADANIE I PĘKANIE PLASTYCZNE BETONU**

C BETON STWARDNIAŁY

- C1 - KLASY EKSPOZYCJI BETONU ZGODNIE Z NORMĄ PN-EN 206:2014
"BETON – WYMAGANIA, WŁAŚCIWOŚCI, PRODUKCJA I ZGODNOŚĆ"**
- C2 - KOROZJA CHEMICZNA BETONU**
- C3 - WYKWITY WĘGLANOWE**
- C4 - WSPÓŁCZYNNIK WODA/CEMENT (W/C) A WŁAŚCIWOŚCI BETONU**
- C5 - PIELĘGNACJA BETONU**



A

SKŁADNIKI BETONU

Cement to spoiwo hydrauliczne, tj. drobno zmielony materiał nieorganiczny, który po zmieszaniu z wodą daje zaczyn, wiążący i twardniejący w wyniku reakcji i procesów hydratacji, po stwardnieniu pozostaje wytrzymały i trwały także pod wodą.

Cement produkowany jest przez wspólny przemiał klinkieru portlandzkiego, regulatora czasu wiązania (siarczanu wapnia) oraz, w zależności od rodzaju cementu, ewentualnych składników nieklinkierowych takich jak granulowany żużel wielopieczowy (S), popioły lotne (V lub W), kamień wapienny (LL). Klinkier portlandzki to półprodukt wytwarzany poprzez wypalanie surowców takich jak wapień, margiel, glina w piecu obrotowym, w temperaturze 1450°C.

W zależności od założonych wymagań dla cementu, może być on produkowany w oparciu o normy o statusie europejskim (PN-EN) i/lub krajowym (PN). Wykaz aktualnych norm przedmiotowych dotyczących cementu:

- PN-EN 197-1:2012 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- PN-B-19707:2013 „Cement – Cement specjalny – skład, wymagania i kryteria zgodności”
- PN-EN 14216:2005 „Cement – Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim ciepłe hydratacji”

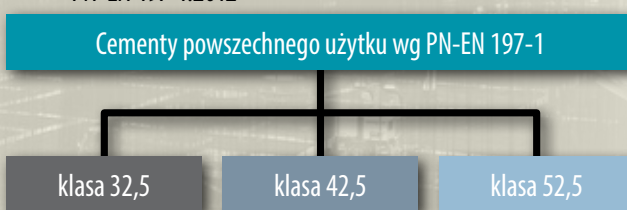
Zgodnie z normą PN-EN 197-1 wyróżnia się pięć głównych rodzajów cementów powszechnego użytku – tabela 1.

Ze względu na wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wyróżnia się 3 klasy wytrzymałości cementu - rys.1.

Tabela 1. Cementy powszechnego użytku wg PN-EN 197-1:2012

Rodzaj cementu	Nazwa normowa
CEM I	cement portlandzki
CEM II	cement portlandzki wieloskładnikowy
CEM III	cement hutniczy
CEM IV	cement pucolanowy
CEM V	cement wieloskładnikowy

Rys. 1. Klasy wytrzymałości cementów powszechnego użytku wg PN-EN 197-1:2012



Z uwagi na wytrzymałość wczesną (po 2 lub 7 dniach), klasa cementu dodatkowo oznaczona jest symbolem literowym:

- L – cement o niskiej wytrzymałości wczesnej (dotyczy tylko cementu hutniczego CEM III)
- N – cement o normalnej wytrzymałości wczesnej
- R – cement o wysokiej wytrzymałości wczesnej

Wymagania normy PN-EN 197-1:2012 względem właściwości fizycznych i mechanicznych oraz składu chemicznego przedstawiono odpowiednio w tabeli 2 i 3.

Tabela 2. Wymagania fizyczne i mechaniczne dla cementów wg PN-EN 197-1:2012

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				Początek czasu wiązania [min]	Stażność objętości [mm]	
	Wytrzymałość wczesna		Wytrzymałość normowa				
	2 dni	7 dni	28 dni				
32,5	L	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
	N	-	≥ 16,0				
	R	≥ 10,0	-				
42,5	L	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10
	N	≥ 10,0	-				
	R	≥ 20,0	-				
52,5	L	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	≤ 10
	N	≥ 20,0	-				
	R	≥ 30,0	-				

Tabela 3. Wymagania chemiczne dla cementów wg PN-EN 197-1:2012

Właściwość	Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wymagania [% m.c.]
Strata prażenia	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0
Pozostałość nierozpuszczalna	CEM I CEM III	wszystkie	≤ 5,0
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	CEM I CEM II ^{a)} CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5
		42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0
	CEM III ^{b)}	wszystkie	
Zawartość chlorków	wszystkie	wszystkie ^{c)}	≤ 0,10
Pucolanowość	CEM IV	wszystkie	wynik pozytywny

a) Cement rodzaju CEM II/B-T i CEM II/B-M z udziałem łupka palonego może zawierać do 4,5% siarczanów (jako SO₃) dla wszystkich klas wytrzymałości
b) Cement rodzaju CEM III/C może zawierać do 4,5% siarczanów
c) Cement rodzaju CEM II może zawierać więcej niż 0,10% chlorków, lecz wówczas maksymalną zawartość chlorków należy podać na opakowaniu i/lub dokumencie dostawy

Normy przedmiotowe w zakresie cementu wyszczególniają pewne właściwości specjalne cementów powszechnego użytku pokazane w tabeli 4.

Tabela 4. Właściwości specjalne cementów powszechnego użytku

Cecha specjalna	Oznaczenie	Norma
Niskie ciepło hydratacji	LH	PN-EN 197-1:2012
Odporność na siarczany	SR	PN-EN 197-1:2012
	HSR	PN-B-19707:2013
Niskoalkaliczność	NA	PN-B-19707:2013

Ponadto norma PN-EN 14216 wyróżnia cementy specjalne o bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH. Cementami o bardzo niskim ciepłe hydratacji (VLH) mogą :

- cement hutniczy VLH III (tylko VLH III/B i VLH III/C),
- cement pucolanowy VLH IV,
- cement wieloskładnikowy VLH V.

Cementy specjalne VLH produkowane mogą być tylko w klasie wytrzymałości 22,5, wymagania podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wymagania mechaniczne i fizyczne dla cementów VLH wg PN-EN 14216:2005

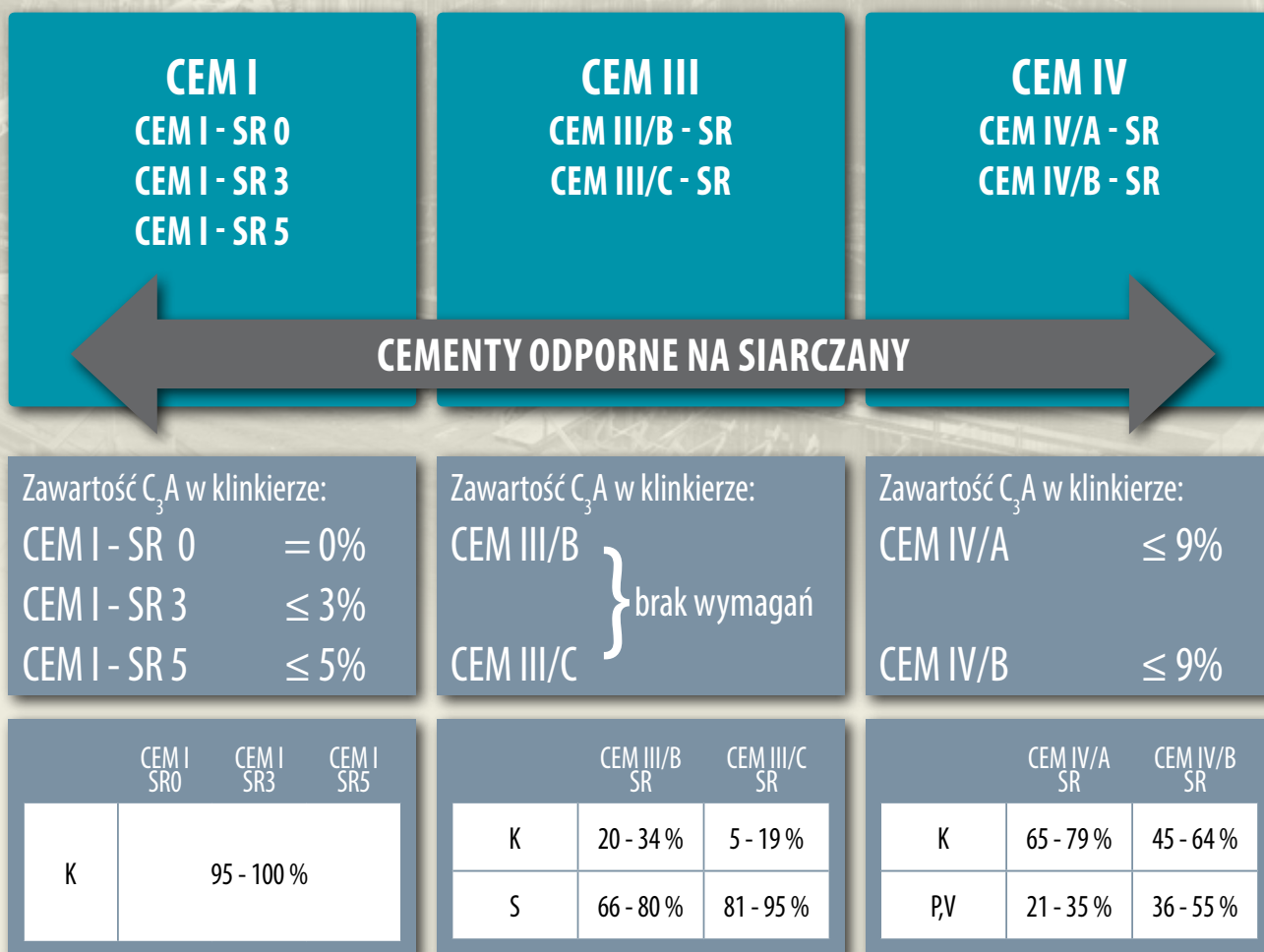
Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		Początek czasu wiązania [min]	Stąłość objętości [mm]
22,5	≥ 22,5	≤ 42,5	≥ 75	≤ 10

Cementy o niskim ciepłe hydratacji LH oraz cementy o bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH zalecane są do wykonywania konstrukcji masowych, narażonych na zarysowanie w wyniku powstających naprężeń termicznych. Reakcja cementu z wodą ma charakter egzotermiczny, a wydzielone ciepło może doprowadzić do powstania dużych różnic temperatury pomiędzy powierzchnią betonu a jego wnętrzem, co może być powodem naprężeń termicznych. Jeśli naprężenia termiczne przekroczą wartość wytrzymałości betonu, powstają mikrorysy, które w istotny sposób obniżają trwałość betonu. Wymagania dla cementu o niskim i bardzo niskim ciepłe hydratacji przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wymagania dla cementów o niskim LH i bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH

Cement	Wymagania	Metody badań
Cementy o niskim ciepłe hydratacji LH wg PN-EN 197-1	Ciepło hydratacji po 41 godzinach 270 J/g	Metoda semiadiabatyyczna wg PN-EN 196-9
	Ciepło hydratacji po 7 dniach ≤ 270 J/g	Metoda rozpuszczania wg PN-EN 196-8
Cementy o bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH wg PN-EN 14216	Ciepło hydratacji po 41 godzinach ≤ 220 J/g	Metoda semiadiabatyyczna wg PN-EN 196-9
	Ciepło hydratacji po 7 dniach ≤ 220 J/g	Metoda rozpuszczania wg PN-EN 196-8

Cementy odporne na siarczany SR, HSR zalecane są do wykonywania konstrukcji betonowych w warunkach agresji siarczanowej (klasy ekspozycji XA2 i XA3), a więc narażonych na działanie wód gruntowych lub wody morskiej, a także nawozów sztucznych, czy ścieków przemysłowych. Norma PN-EN 197-1 definiuje 7 rodzajów cementów powszechnego użytku odpornych na siarczany SR, kryterium klasyfikacji jest zawartość C_3A w klinkierze portlandzkim stosowanym do produkcji cementu – rys. 2. Wymagania dla cementów odpornych na siarczany SR przedstawiono w tabeli 7, a klasyfikację i wymagania dla cementów HSR w tabeli 8.



Rys. 2. Klasyfikacja cementów odpornych na siarczany SR wg PN-EN 197-1

Tabela 7. Wymagania chemiczne dla cementów odpornych na siarczany SR wg PN-EN 197-1:2012

Właściwość	Badanie wzorcowe	Rodzaj cementu	Klasa wytrzymałości	Wymagania ^{a)}
Zawartość siarczanów (jako SO ₃)	PN-EN 196-2:2013	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5 ^{b)}	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,0%
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 3,5%
Zawartość glinianu trójwapniowego C ₃ A w klinkierze ^{d)}	PN-EN 196-2:2013 ^{d)}	CEM I-SR 0	wszystkie	= 0%
		CEM I-SR 3		≤ 3%
		CEM I-SR 5		≤ 5%
	- e)	CEM III/B-SR CEM III/C-SR		brak wymagań
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		≤ 9%
Pucolanowość	PN-EN 196-5:2011	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	wszystkie	wynik pozytywny po 8 dniach

a) Wymagania podano w procentach masy gotowego cementu.
b) Dla szczególnych zastosowań cementy CEM I-SR 5 mogą być produkowane z wyższą zawartością siarczanów. W takich przypadkach wartość liczbową tego wyższego wymagania dotyczącego zawartości siarczanów należy zadeklarować w dokumencie dostawy.
c) Metoda badania dotycząca oznaczania zawartości C₃A w klinkierze z analizy gotowego cementu jest w trakcie opracowywania w CEN/TC 51.
d) W szczególnym przypadku cementów CEM I, dopuszcza się obliczenie zawartości C₃A w klinkierze z analizy chemicznej cementu. C₃A = 2,65 A – 1,69 F (A – %mas. Al₂O₃ w klinkierze, F – %mas. Fe₂O₃ w klinkierze, oznaczone wg PN-EN 196-2:2013).
e) Do czasu zakończenia prac nad metodą badania, zawartości C₃A w klinkierze należy oznaczać na podstawie analizy klinkieru w ramach wykonywanej przez producenta zakładowej kontroli produkcji.

Tabela 8. Wymagania dotyczące cementów specjalnych odpornych na siarczany HSR według PN-B-19707:2013

Rodzaj cementu HSR	Wymagania		
	Udział składnika nieklinkierowego [%]	Odporność na siarczany	Klinkier
CEM II/A-V CEM II/A-S CEM II/A-M (S-V) CEM II/B-S	brak wymagań	Odporność na agresję siarczanową jako wartość ekspansji w roztworze Na ₂ SO ₄ po 52 tygodniach X _t ≤ 0,5 %	zawartość C ₃ A ≤ 5 %
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego V ≥ 25 %		brak wymagań
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego V ≥ 20 %		brak wymagań
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopieczowego S ≤ 49 %	Metoda badania - Załącznik A do normy PN-EN 19707:2013	C ₃ A ≤ 9 %
CEM III/A	udział granulowanego żużla wielkopieczowego S ≥ 50 %		brak wymagań
CEM V/A (S-V) CEM V/B (S-V)	PN-EN 197-1		brak wymagań

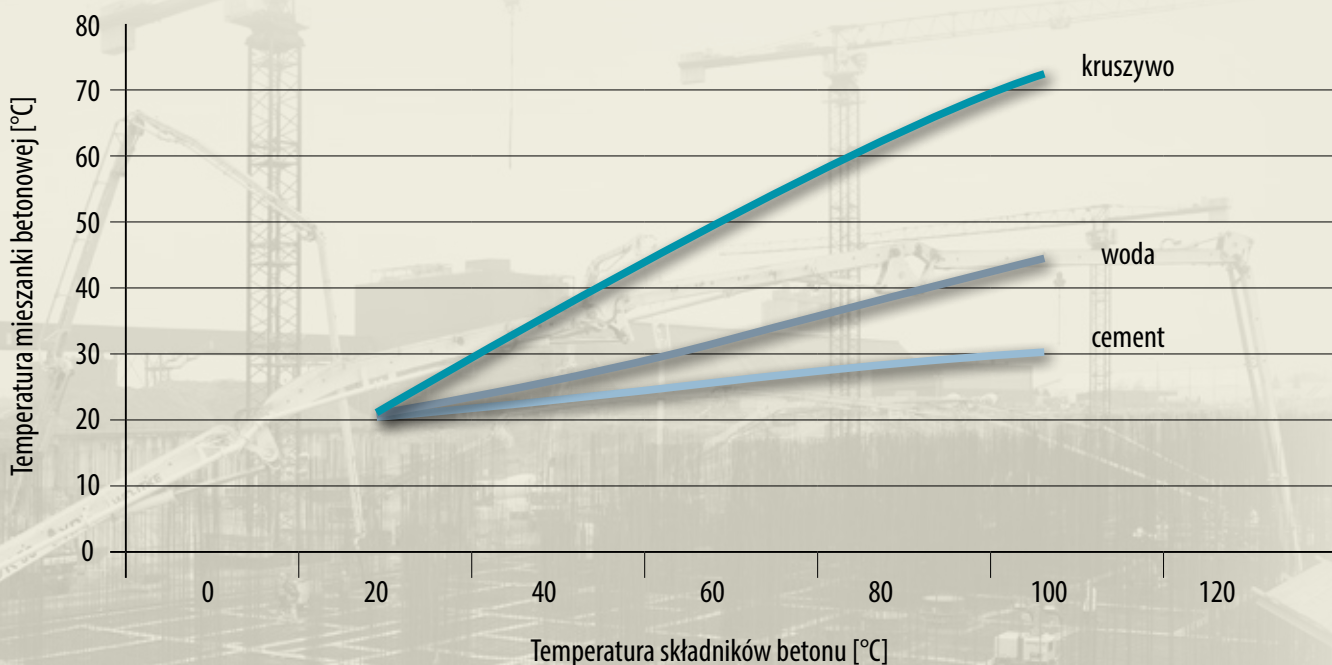
Cement o niskiej zawartości alkaliów NA należy stosować, gdy w składzie betonu może znajdować się kruszywo potencjalnie reaktywne alkalicznie. Reakcja alkaliów (jonów Na⁺ i K⁺) pochodzących z cementu oraz reaktywnej krzemionki występującej w kruszywie, powoduje powstanie żelu krzemianu sodowo-potasowego, który absorbuje wodę, zwiększając objętość i wywołując destrukcyjne

naprężenia. Przebieg reakcji alkalia-kruszywo ma powolny charakter, a negatywne skutki korozji alkalicznej mogą ujawnić się dopiero po kilku latach. Wymagania dla cementów NA zawarte są w normie krajowej PN-B-19707:2013 – tabela 9.

Tabela 9. Wymagania dla cementów niskoalkalicznych NA wg PN-B-19707:2013

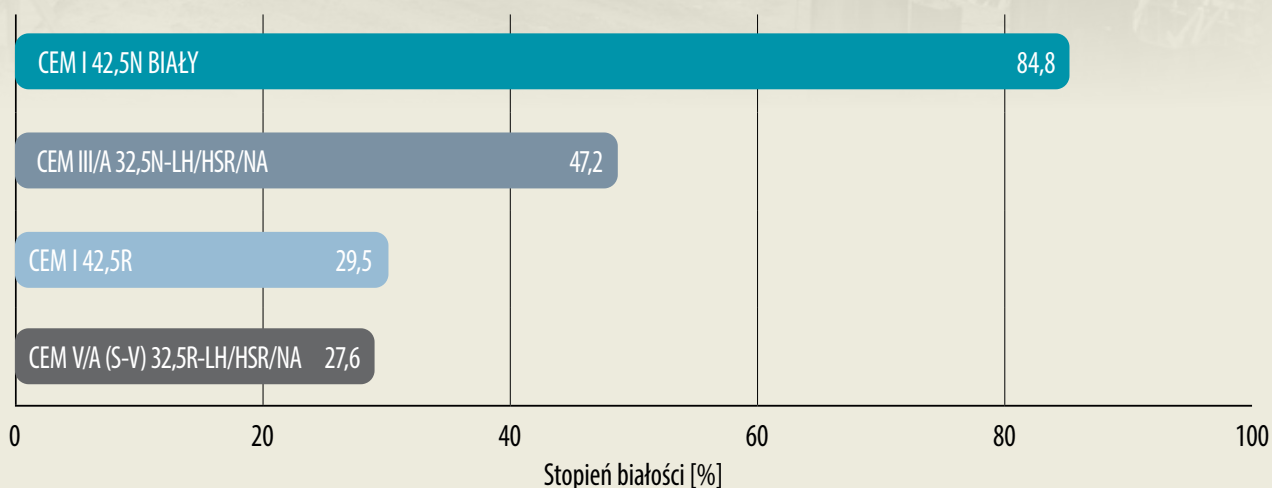
Rodzaj cementu NA	Wymagania	
	Udział składnika nieklinkierowego [%]	Całkowita zawartość alkaliów Na_2O_{eq} [%]
CEM I CEM II/A-LL	brak wymagań	$\leq 0,60$ %
CEM II/A-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego $V \geq 14$ %	$\leq 1,20$ %
CEM II/A-S	udział granulowanego żużła wielkopiecowego $S \geq 14$ %	$\leq 0,70$ %
CEM II/A-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego i udział granulowanego żużła wielkopiecowego (S+V) ≥ 14 %	$\leq 1,20$ %
CEM II/B-V	udział popiołu lotnego krzemionkowego $V \geq 25$ %	$\leq 1,50$ %
CEM II/B-S	brak wymagań	$\leq 0,80$ %
CEM II/B-M (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego $V \geq 20$ %	$\leq 1,30$ %
CEM III/A	udział granulowanego żużła wielkopiecowego $S \leq 49$ %	$\leq 0,95$ %
	udział granulowanego żużła wielkopiecowego $S \geq 50$ %	$\leq 1,10$ %
CEM III/B-C	brak wymagań	$\leq 2,00$ %
CEM IV/A (V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego $V \geq 25$ %	$\leq 1,50$ %
CEM IV/B (V)	brak wymagań	$\leq 2,00$ %
CEM V/A (S-V)	udział popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużła wielkopiecowego (S+V) ≤ 49 %	$\leq 1,60$ %
	udział popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużła wielkopiecowego (S+V) ≥ 50 %	$\leq 2,00$ %
CEM V/B (S-V)	brak wymagań	$\leq 2,00$ %

TEMPERATURA CEMENTU nie jest właściwością normową. W okresie wzmożonego pobytu rynkowego cement może mieć wyższą temperaturę, aczkolwiek w nieznacznym stopniu przekłada się to na temperaturę mieszanki betonowej – rys. 3.



Rys. 3. Wpływ temperatury składników betonu na temperaturę mieszanki betonowej

Również **BARWA CEMENTU** nie jest właściwością normową. Zależy głównie od rodzaju surowców użytych do jego produkcji (rys. 4). Cementy o dużej zawartości klinkieru portlandzkiego posiadają ciemnoszarą barwę. Wraz ze zwiększaniem udziału granulowanego żużla wielopieczowego w składzie cementu, jego barwa staje się jaśniejsza. Cementy z popiołem lotnym charakteryzują się barwą ciemną powodowaną resztkami niespalonego węgla.



Rys. 4. Stopień białości cementów powszechnego użytku

Beton w ok. 70% swojej objętości składa się z kruszywa (rys. 1). Zatem jego właściwości w istotny sposób przekładają się na właściwości mieszanki betonowej (konsystencja, urabialność i pompowalność oraz wydzielanie wody – bleeding) i stwardniałego betonu (wytrzymałość, wodoszczelność, nasiąkliwość, mrozoodporność oraz ścieralność). Właściwości kruszyw wynikają z cech skały macierzystej (gęstość, twardość, wytrzymałość) oraz z zastosowanej obróbki mechanicznej w procesie produkcji (kształt i wymiar ziaren, tekstura powierzchni). Przy doborze kruszywa do betonu należy kierować się zapisami normy PN-EN 206:2014 "Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność", uwzględniając:

- warunki realizacji robót,
- przeznaczenie betonu,
- warunki środowiska, na które będzie narażony beton (klasa ekspozycji),
- wymagania w zakresie odstoniętego kruszywa lub kruszywa stosowanego w przypadku mechanicznej obróbki powierzchni betonu.

Najważniejsze, z punktu widzenia technologii betonu, właściwości kruszyw to:

- skład ziarnowy,
- kształt i szorstkość ziaren,
- obecność zanieczyszczeń,
- nasiąkliwość,
- wytrzymałość/ścieralność,
- mrozoodporność,
- reaktywność (alkaliczna).

Podział ze względu na pochodzenie kruszyw do betonu wg normy PN-EN 12620+A1:2010 oraz kruszyw lekkich do betonu wg PN-EN 13055-1:2003 przedstawia rys. 2.

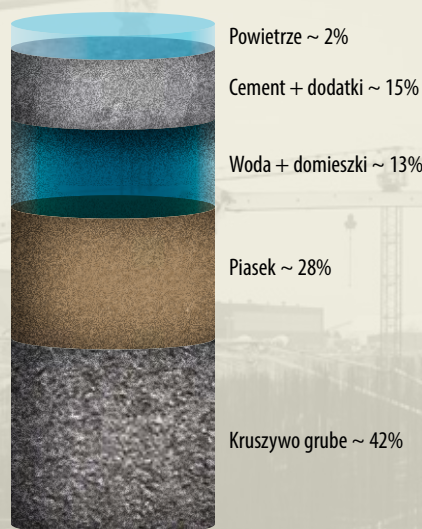
Ze względu na ciężar właściwy rozróżnia się kruszywa:

- lekkie – $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$,
- zwykłe – $\rho = 2000 \div 3000 \text{ kg/m}^3$,
- ciężkie – $\rho > 3000 \text{ kg/m}^3$.

Wymiar kruszywa przyjmujemy poprzez określenie minimalnego (d) i maksymalnego (D) wymiaru ziarna wyrażonego jako d/D. Dopuszczalna jest obecność nadziarna (pewnej ilości ziaren, które pozostają na sicie o oczku równym D) i podziarna (ziaren przechodzących przez sito o oczku równym d).

Wyróżniamy kruszywa:

- drobne – $D \leq 4 \text{ mm}$,
- grube – $D \geq 4 \text{ mm}$ i $d \geq 2 \text{ mm}$,
- naturalne 0/8 mm – kruszywa polodowcowe lub rzeczne, $D \leq 8 \text{ mm}$,
- o uziarnieniu ciągłym – mieszanina kruszyw, $D \leq 45 \text{ mm}$.



Rys. 1. Objętościowy skład betonu

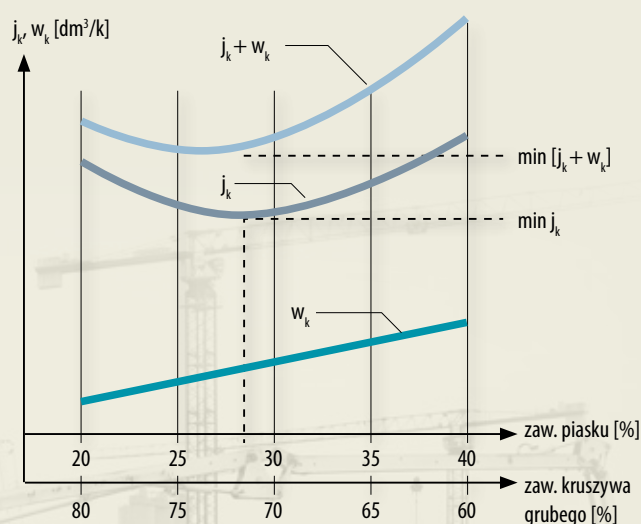


Rys. 2. Podział kruszyw

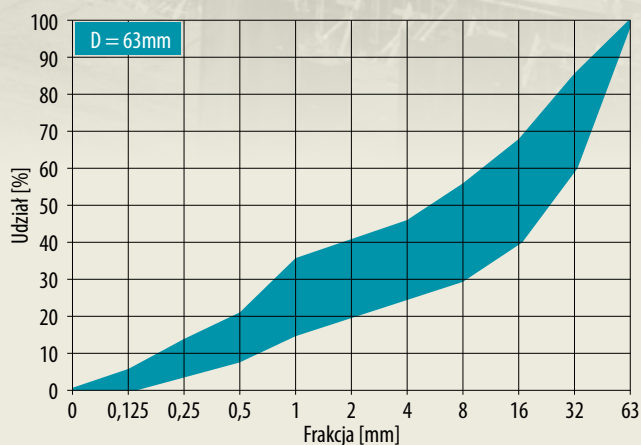
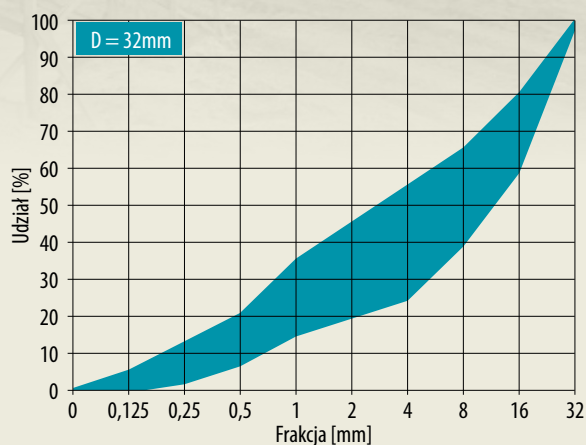
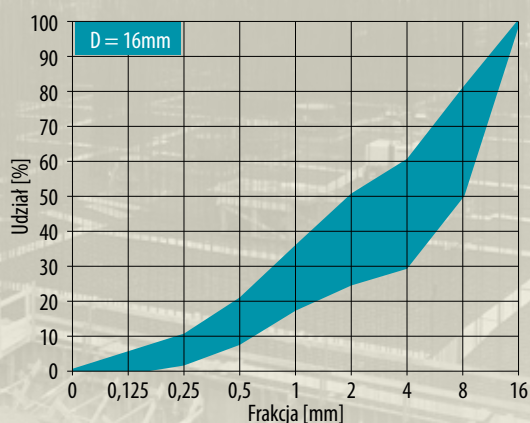
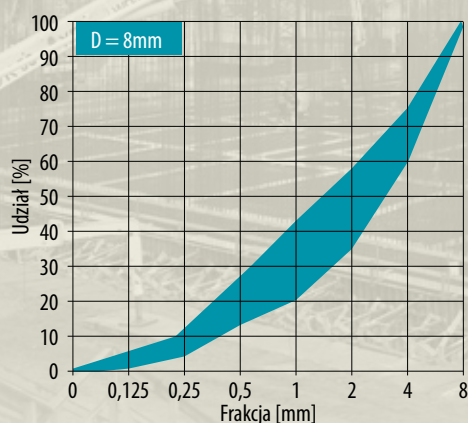
Mieszanka kruszywowa do betonu powinna zawierać kilka frakcji. W celu prawidłowego zaprojektowania mieszanki betonowej należy dobrać odpowiednie proporcje kruszywa grubego i piasku, tak aby tworzyły w betonie szczelny stos okruszowy. Uziarnienie kruszywa do betonu powinno zapewnić możliwie niskie zapotrzebowanie na zaczyn cementowy (cement i wodę) (rys. 3). Zapotrzebowanie to wynika głównie z dwóch cech kruszywa:

- jamistości (przepełnienie jam zaczynem),
- powierzchni zewnętrznej (otulenie powierzchni zaczynem), związanej z granulacją i wodozadržnością kruszywa.

Zarówno jamistość, jak i powierzchnię zewnętrzną należy zatem minimalizować (rys. 3). Równoczesne uzyskanie minimum tych dwóch wielkości nie jest jednak możliwe. Optymalnym rozwiązaniem jest kompromis, którego efektem są tzw. obszary właściwego uziarnienia, zawarte w specyfikacjach technicznych i literaturze specjalistycznej (rys. 4).

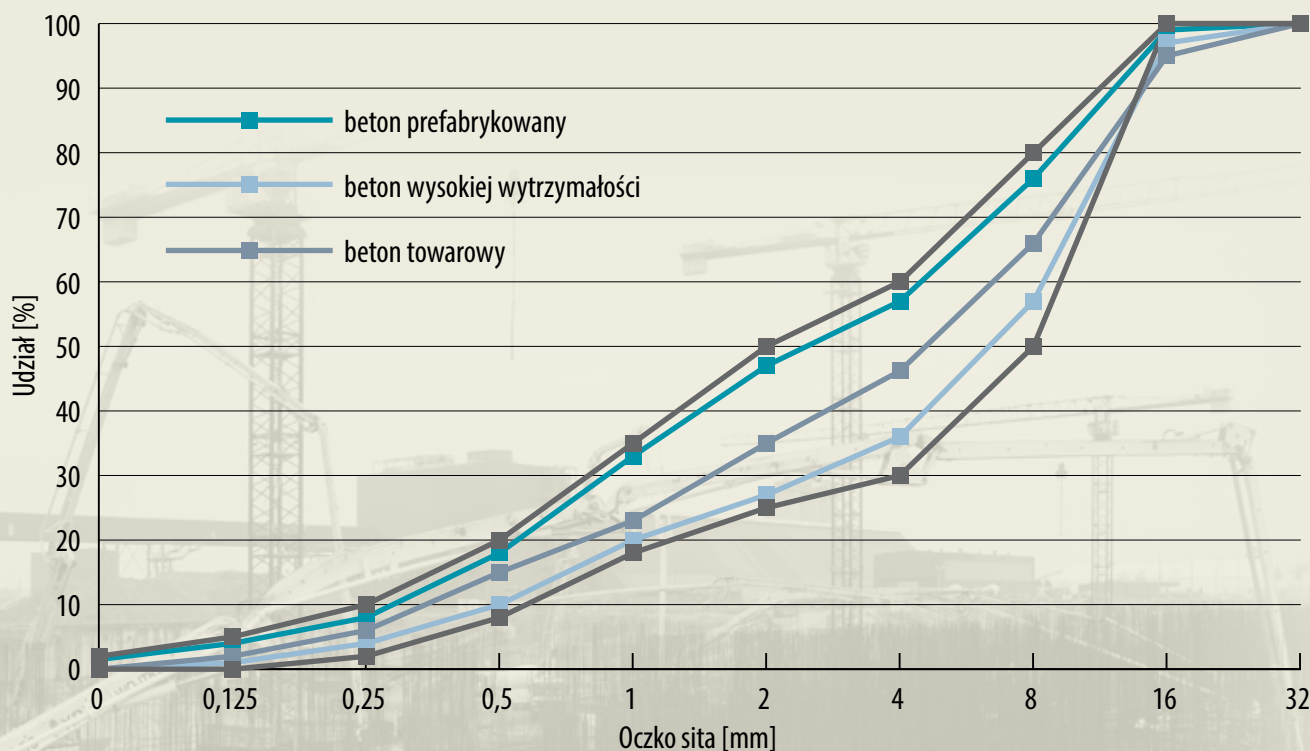


Rys. 3. Zmiany jamistości (j_k) i wodozadržności (w_k) kruszywa w zależności od zawartości piasku



Rys. 4. Obszary właściwego uziarnienia kruszywa w zależności od maksymalnego wymiaru ziaren D

Na rys. 5 przedstawiono krzywe graniczne obszaru dobrego uziarnienia dla mieszanki kruszywowej do 16 mm (najczęściej stosowanej w kraju) wraz z przykładowymi krzywymi uziarnienia. Należy dążyć, aby dla betonów towarowych (C8/10–C30/37) krzywa uziarnienia przebiegała blisko środka obszaru dobrego uziarnienia, dla betonów wysokich wytrzymałości (> C35/45) – blisko dolnej granicy obszaru dobrego uziarnienia, a dla elementów prefabrykowanych (wysoka zawartość piasku) – blisko górnej granicy.



Rys. 5. Krzywe graniczne wg PN-B-06250:1988

Krzywa uziarnienia kruszywa zawarta w obszarze dobrego uziarnienia, gwarantuje właściwą urabialność i konsystencję mieszanki betonowej przy możliwie najmniejszym zużyciu wody i cementu (zaczynu) oraz minimalnej zawartości powietrza. Zapewnia także niską przepuszczalność betonu oraz mniejszy skurcz. Nieciągła krzywa uziarnienia niekorzystnie wpływa na właściwości betonu, może skutkować:

- niewłaściwą urabialnością betonu,
- problemami z pompowaniem i zagęszczaniem betonu,
- segregacją składników mieszanki betonowej,
- wysokim zużyciem cementu,
- wysoką zawartością porów w betonie,
- obniżeniem parametrów wytrzymałościowych i trwałościowych betonu.

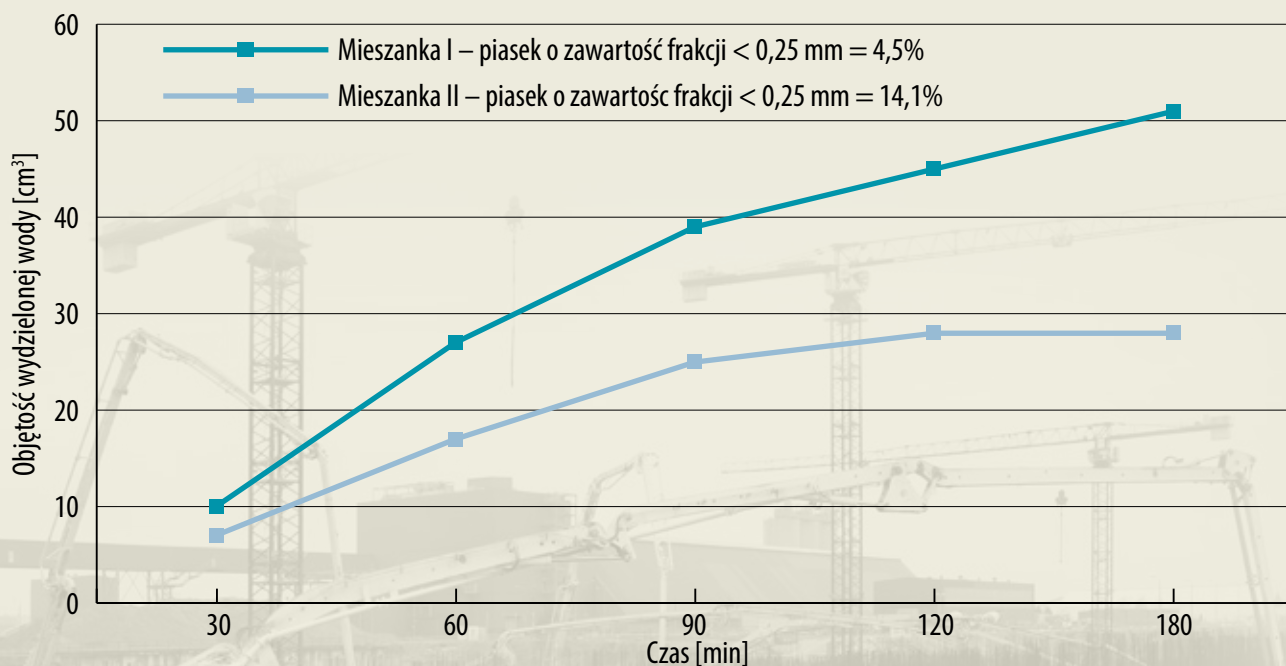
Maksymalny wymiar ziarna kruszywa w betonie zależy od:

- odległości między prętami zbrojenia:
 - maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie może być większy niż $3/4$ odległości między prętami zbrojenia,
- wymiarów elementu lub konstrukcji:
 - maksymalny wymiar ziaren kruszywa nie może być większy niż $1/3$ najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu,
- rodzaju betonu:
 - 0–16 mm – betony zwykłe,
 - 0–32 mm, 0–61 mm – betony masywne (obiekty hydrotechniczne, fundamenty wielkogabarytowe), betony posadzkowe,
 - 0–8 mm; 0–16 mm – kostka brukowa, betony prefabrykowane, nawierzchnie drogowe
 - 0–16 mm – betony samozagęszczalne.

Urabialność mieszanki betonowej zależy od zawartości cementu, punktu piaskowego (czyli zawartości ziaren poniżej 2 mm) oraz zawartości najdrobniejszych frakcji 0/0,25 mm. Dobór punktu piaskowego zależy od metody układania i zagęszczania mieszanki betonowej:

- 27–30% – betony zwykłe, betony układane za pomocą pojemników, wibratorów wgłębnych i powierzchniowych,
- 35–40% – betony prefabrykowane, betony układane za pomocą pomp, wibratorów wgłębnych i powierzchniowych,
- 45–60% – betony zagęszczane za pomocą wibroprasy (np. produkcja kostki brukowej).

Mieszanki betonowe o wysokim punkcie piaskowym charakteryzują się większą zawartością cementu i/lub koniecznością stosowania dodatków do betonu. Wyższy punkt piaskowy, z uwagi na większą objętość zaczynu, skutkuje większym skurczem.

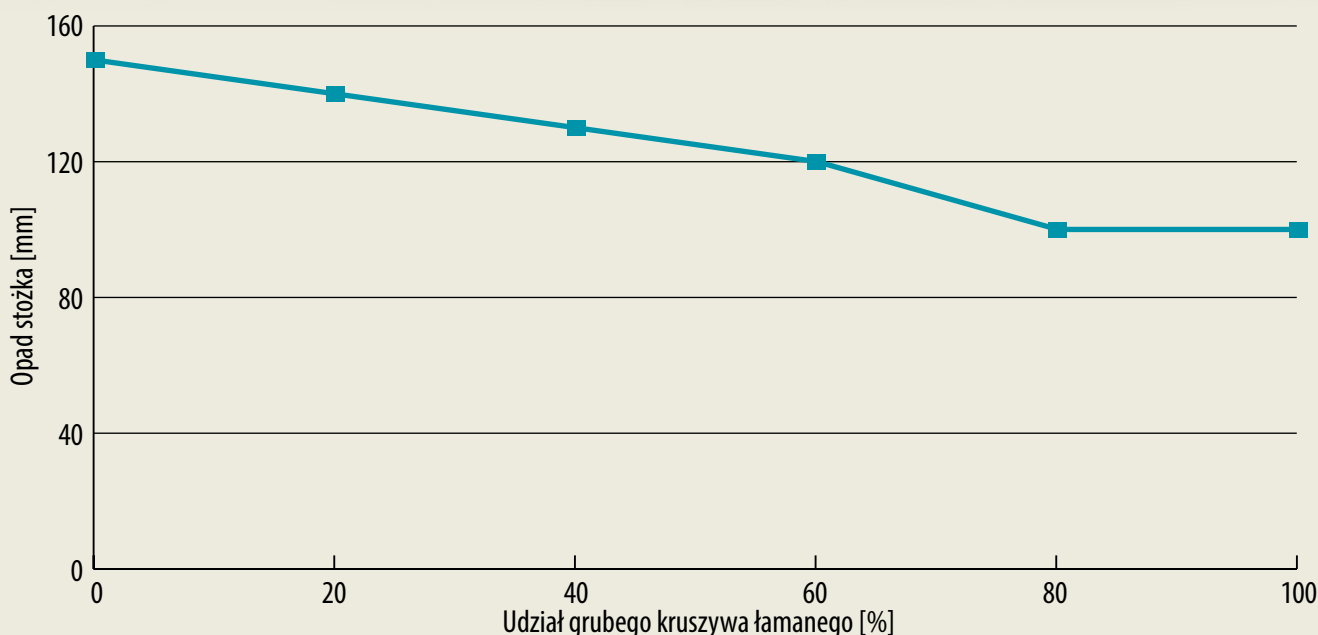


Rys. 6. Bleeding mieszanek betonowych zawierających piaski o różnej zawartości frakcji < 0,25 mm

Ponadto, wysoki punkt piaskowy nie zapewni dobrej urabialności mieszanki betonowej, jeśli kruszywo drobne pozbawione będzie ziaren poniżej 0,25 mm. Odpowiednia ilość frakcji 0/0,25 mm jest niezbędna przy podawaniu mieszanki betonowej pompami, a przy tym ogranicza wydzielanie wody (mleczka cementowego) z mieszanki betonowej – bleeding (rys. 6). Zjawisko bleedingu jest szczególnie niebezpieczne w przypadku betonu posadzkowego, gdyż powoduje znaczny wzrost współczynnika w/c w warstwie powierzchniowej. Wraz z wodą, na powierzchnię, może być wydzielana domieszka chemiczna i/lub np. niespalone części węgla z popiołu lotnego. Może to prowadzić do odparzenia warstwy górnej betonu, ponieważ osłabieniu ulega warstwa przejściowa pomiędzy podkładem betonowym, a posypką utwardzającą. Przy stosowaniu grubych „ostrych” piasków o niewielkiej zawartości frakcji poniżej 0,25 mm należy wprowadzać do mieszanki betonowej dodatek, np. popiołu lotnego, który uzupełnia skład ziarnowy kruszywa, tak aby był spełniony warunek dobrej urabialności:

$$0,6 < \frac{\text{cement} + \text{dodatki mineralne} + \text{frakcja } 0/0,5 \text{ mm} [\%]}{\text{frakcja } 0/2 \text{ mm} [\%]} < 1,05.$$

Piaski dla których zawartość ziaren < 0,25 mm waha się pomiędzy 12–18% zapewniają dobrą pompowalność i ograniczają wydzielanie mleczka cementowego z mieszanki betonowej.



Rys. 7. Konsystencja betonów o tym samym składzie i różnym udziale kruszywa łamanego

Kruszywa łamane charakteryzują się znacznie bardziej rozwiniętą powierzchnią ziaren, niż kruszywo żwirowe, co korzystnie wpływa na wytrzymałość strefy kontaktowej na styku zaczyn-kruszywo. Przekłada się to jednak w sposób niekorzystny na urabialność (konsystencję) mieszanki betonowej (rys. 7), ale przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości betonu.

Bardzo ważną cechą, obok wymiaru kruszywa, jest kształt ziaren. Jest on zależny od rodzaju skały macierzystej oraz od rodzaju obróbki mechanicznej (kruszywa łamane). Zawartość płaskich i wydłużonych ziaren powyżej 15% jest niekorzystna, ponieważ zwiększa się wodożądność mieszanki betonowej. Im bardziej kształt ziaren odbiega od okrągłego, tym więcej zaczynu cementowego jest potrzebne do ich otulenia. Ponadto, w trakcie układania i zagęszczania mieszanki betonowej ziarna układają się poziomo (rys. 8), co może prowadzić do tworzenia soczewek wodnych, w efekcie pod ziarnami tworzą się pory wpływające na obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu.



Rys. 8. niekorzystny wpływ płaskich ziaren kruszywa

Obecność frakcji pylastej <0,063 mm obniża przyczepność między kruszywem a zaczynem cementowym, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia wytrzymałości betonu, szczególnie wytrzymałości na zginanie. Ważne jest zatem stosowanie kruszywa pozbawionego pyłów, części organicznych oraz cząstek minerałów ilastych (gliny).

Nasiąkliwość kruszywa może, ale nie musi mieć wpływu na jego mrozoodporność. Niektóre kruszywa (jurajskie wapienie, karbońskie piaskowce) czy kruszywa lekkie charakteryzują się nasiąkliwością powyżej 2%, mimo to mogą spełniać kryterium mrozoodporności. Stosowanie kruszywa o wysokiej nasiąkliwości może prowadzić do zwiększenia skurczu plastycznego betonu. Kruszywa te należy stosować w stanie nasyconym (np. keramzyt).

Mrozoodporność kruszywa decyduje o jego przydatności do stosowania w betonie narażonym na różne oddziaływania środowiskowe. W tabeli 1 przedstawiono sposób doboru kruszyw w zależności od warunków środowiskowych.

Tabela 1. Dobór kruszywa w zależności od kategorii mrozoodporności

Warunki środowiskowe	Klimat		
	śródziemnomorski	atlantycki	kontynentalny*
Brak mrozu i sucho	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań
Częściowe nasycenie, brak soli	brak wymagań	F ₄ / MS ₃₅	F ₂ / MS ₂₅
Stałe nasycenie, brak soli	brak wymagań	F ₂ / MS ₂₅	F ₁ / MS ₁₈
Stałe nasycenie, sól	F ₄ / MS ₃₅	F ₂ / MS ₂₅	F ₁ / MS ₁₈
Nawierzchnie lotnisk	F ₂ / MS ₂₅	F ₁ / MS ₁₈	F ₁ / MS ₁₈

F – mrozoodporność na podstawie ubytku masy po 10 cyklach zamrażania i rozmrażania
MS – mrozoodporność na podstawie ubytku masy po 5 cyklach zanurzenia w roztworze MgSO₄ i suszeniu w 110°C
*Kategoria kontynentalny może odnosić się również do Islandii, części Skandynawii i rejonów górzystych, w których występują surowe warunki zimowe

Wytrzymałość kruszywa bezpośrednio przekłada się na wytrzymałość stwardniałego betonu. Miernikiem wytrzymałości kruszyw jest odporność kruszywa:

- na rozdrabnianie (współczynnik Los Angeles LA),
- ścieranie (współczynnik mikro-Devala M_{DE}),
- odporność na polerowanie (polerowalność PSV),
- odporność na ścieranie powierzchniowe (ścieralność AAV).

Poszczególne współczynniki określają właściwości mechaniczne kruszywa w powiązaniu z rodzajem skały. W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości współczynników dla różnych kruszyw. Stosowanie kruszyw charakteryzujących się wysoką odpornością na rozdrabnianie – niski współczynnik LA, konieczne jest w betonach, które narażone są na duże obciążenia mechaniczne i agresywne oddziaływanie środowiska (betony drogowe, mostowe, nawierzchnie lotniskowe). Stosowanie kruszyw o niskim współczynniku PSV

(polerowalność) zalecane jest z kolei w betonach nawierzchniowych (nawierzchnie drogowe, lotniskowe). W tabeli 3 przedstawiono wymagania dla kruszyw stosowanych do nawierzchni drogowych.

Tabela 2. Wytrzymałość kruszywa wg różnych współczynników

Rodzaj kruszywa	LA	M_{DE}	PSV	AAV
Bazalt	6–13	7–18	44–52	2–4
Granit	17–43	7–16	–	3
Żwir kwarcowy	16–34	6–23	43–53	1–3
Żwir magmowy	18–25	3–21	42–53	2–4
Wapień	24–30	18–38	42–43	–
Dolomit	11–25	7–18	41–47	7–10

Tabela 3. Wymagania dla kruszywa stosowanego do betonowych nawierzchni drogowych

Właściwość kruszywa	JWN KR1÷KR2	DWN KR3÷KR4	GWN, JWN KR3÷KR4	DWN KR5÷KR7	GWN KR5÷KR7
Odporność na rozdrabnianie (LA)	LA ₄₀	LA ₃₅	LA ₃₅	LA ₃₅	LA ₂₅
Odporność na polerowanie (PSV)	> PSV ₄₈	–	> PSV ₅₀	–	> PSV ₅₃
Mrozoodporność	najwyżej F ₂	najwyżej F ₁		najwyżej F ₁	
Mrozoodporność w 1% NaCl			≤ 6%		≤ 6%

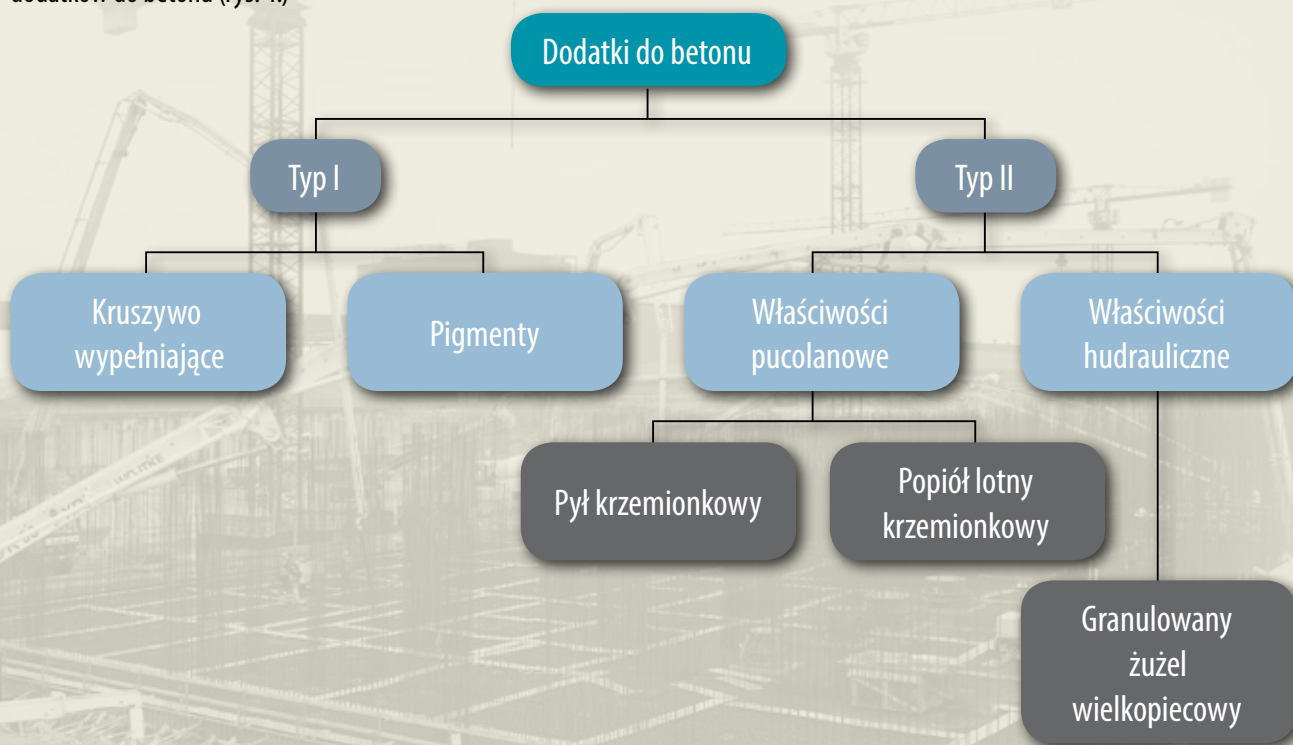
JWN – jednowarstwowa nawierzchnia, DWN – dolna warstwa nawierzchni, GWN – górna warstwa nawierzchni

Reaktywność alkaliczna kruszyw to podatność pewnych rodzajów kruszyw na reakcję z alkalią zawartymi w betonach. Alkalia są wprowadzane do betonu ze składnikami betonu, głównie z cementem. Reaktywność to zjawisko złożone tak pod względem mogących występować typów reakcji alkalicznych, jak i różnorodności czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych wpływających na ich wystąpienie i przebieg.

Kruszywa potencjalnie reaktywne alkalicznie nie powinny być stosowane w składzie betonu mostowego i drogowego.



DODATEK to drobnoziarnisty nieorganiczny składnik stosowany w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania właściwości specjalnych betonu (dodawany zazwyczaj w ilości powyżej 5 % masy cementu). Dodatek może w znaczący sposób modyfikować właściwości, zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Norma PN-EN 206:2014 wyróżnia 2 typy dodatków do betonu (rys. 1.)



Rys. 1. Dodatki do betonu wg PN-EN 206:2014


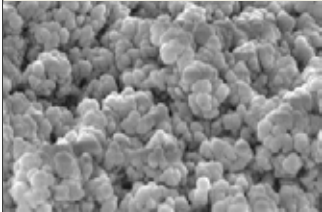

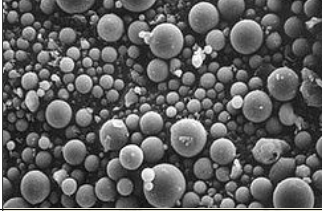


Ogólną przydatność dodatków do betonu ustala się w zależności od typu i rodzaju dodatku zgodnie z tabelą 1.

Tabela 1. Dodatki do betonu wg PN-EN 206:2014

Dodatki typu I		
Ogólną przydatność ustala się zgodnie z:		
Kruszywo wypełniające	PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu	
	PN-EN 13055-1:2003 Kruszywa lekkie - Część 1: Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy	
Pigmenty	PN-EN 12878:2014 Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie - Wymagania i metody badań	

Dodatki typu II

Ogólną przydatność ustala się zgodnie z:

Pył krzemionkowy	PN-EN 13263-1:2010 Pył krzemionkowy do betonu - Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności		
Popiół lotny	PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności		
Mielony granulowany żużel wielkopiecowy	PN-EN 15167-1:2007 Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności		

Dodatki można uwzględnić w składzie betonu w ramach zawartości cementu oraz wartości współczynnika w/c. Przydatność i ilość dodatków do betonu powinna być oceniana i dobrana na podstawie badań wstępnych.

Norma PN-EN 206:2014 dopuszcza do stosowania 3 możliwe koncepcje uwzględnienia dodatków typu II w składzie betonu:

- koncepcja współczynnika k,
- koncepcja równoważnych właściwości użytkowych (ECPC),
- koncepcja kombinacji równoważnych właściwości (EPCC).

W przypadku dodatków typu II do ustalenia ilości dodatku w składzie betonu zaleca się stosowanie koncepcji współczynnika k – tabela 2. Jest to koncepcja najbardziej rozpowszechniona i najczęściej stosowana przez krajowych producentów betonu.

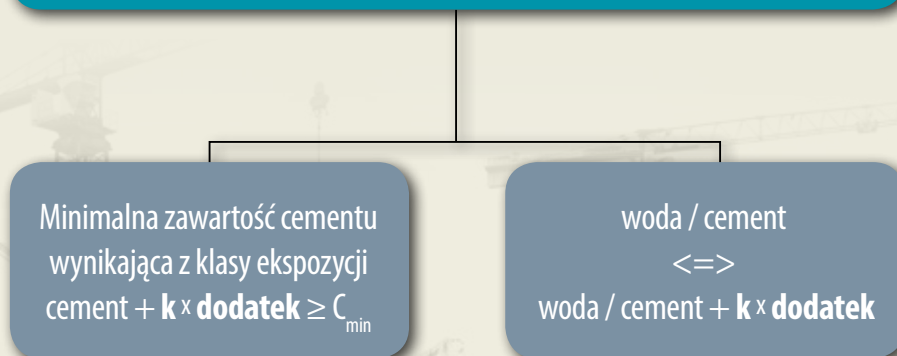
Tabela 2. Zasady stosowania dodatków do betonu zgodnie z koncepcją współczynnika k

Rodzaj dodatku typu II	Współczynnik „k”	Maksymalna zawartość dodatku	Uwagi
Pył krzemionkowy	2,0	pył krzemionkowy /cement ≤11%	ilość cementu nie powinna być zmniejszona o więcej niż 30 kg/m ³
	1,0 w klasach ekspozycji XA, XF przy w/c < 0,45		
Popiół lotny krzemionkowy	0,4	popiół lotny /cement ≤ 33%	dotyczy cementu CEM I
		popiół lotny /cement ≤ 25%	dotyczy cementu CEM II/A
Granulowany żużel wielkopiecowy	0,6	żużel wielkopiecowy /cement ≤ 1,0	dotyczy cementów CEM I i CEM II/A

Zalecana koncepcja współczynnika k opiera się na porównaniu betonu referencyjnego z betonem, w którym część cementu zastąpiona została dodatkami. Kryterium porównawczym jest trwałość lub, dopuszczona jako kryterium zastępcze, wytrzymałość betonu.

Koncepcja współczynnika k pozwala na uwzględnienie dodatku poprzez zastąpienie współczynnika w/c współczynnikiem $w/(c+k \times d)$ – rys. 2, gdzie d – ilość dodatku. Ponadto należy spełnić warunek minimalnej zawartości cementu $(c+k \times d)$ wymaganej ze względu na klasę ekspozycji.

Stosowanie dodatków typu II do betonu wg koncepcji współczynnika "k"



Rys. 2. Stosowanie koncepcji współczynnika k wg PN-EN 206:2014

Dodatki typu II stosowane do betonu zgodnie z normą PN-EN 206:2014 muszą spełniać wymagania norm przedmiotowych (tabela 1). Wymagania przedstawiono w tabelach 3-7.

Tabela 3. Wymagania w zakresie składu chemicznego popiołu lotnego

Składnik	Zawartość składnika [%]	
	Popiół otrzymywany wyłącznie przez spalanie węgla	Popiół otrzymywany przez współspalanie
Straty prażenia: • kategoria A • kategoria B • kategoria C		≤ 5,0 ≤ 7,0 ≤ 9,0
Chlorki		≤ 0,10
SO ₃		≤ 3,0
CaO _{wolny}		≤ 1,5 ¹⁾
CaO _{reaktywny}		≤ 10,0
SiO ₂ reaktywny	Określenie zawartości nie jest konieczne Należy przyjąć, że wymaganie jest spełnione	≥ 25,0
Sumaryczna zawartość tlenków: SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃		≥ 70,0
Zawartość MgO		≤ 4,0
Całkowita zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na ₂ O _{eq}		≤ 5,0
Zawartość rozpuszczalnych związków fosforu w przeliczeniu na P ₂ O ₅		≤ 100 mg/kg

1) Popiół lotny, w którym zawartość wolnego CaO ≥ 1,5% masy może być akceptowany pod warunkiem zachowania stałości objętości – próba Le Chateliera ≤ 10 mm wg metodyki podanej w normie PN-EN 450-1:2012

Tabela 4. Wymagania w zakresie właściwości fizycznych popiołu lotnego

Właściwość		Wymagania
Miałość, pozostałość na sicie o oczkach 45 µm przy przesiewaniu na mokro wg PN-EN 451-2:1998, [%] • kategoria N • kategoria S		≤ 40 ≤ 12
Wskaźnik aktywności [%]	po 28 dniach po 90 dniach	≥ 75 ≥ 85
Stałość objętości (badanie jest konieczne, gdy zawartość CaO _{wolne} jest wyższa niż 1,5%)		maks. 10 mm
Gęstość objętościowa		maksymalna różnica ± 200 kg/m ³ w stosunku do wartości zadeklarowanej przez producenta
Początek czasu wiązania zaczynu zawierającego 25% popiołu i 75% cementu portlandzkiego CEM I		nie powinien być dwukrotnie dłuższy niż początek wiązania zaczynu wykonanego w 100% z cementu porównawczego
Wodoządnosc (dotyczy popiołu o miałości w kategorii S)		≤ 95% wodoządnosci cementu porównawczego (CEM I)

Tabela 5. Wymagania w zakresie właściwości pyłu krzemionkowego

Właściwość	Wymagania
Powierzchnia właściwa [m ² /g]	od 15 do 35
Strata prażenia [%]	≤ 4,0
SiO ₂ [%]	kat.1 ≥ 85,0 kat.2 ≥ 80,0
Cl ⁻ [%]	≤ 0,30
SO ₃ [%]	≤ 2,0
CaO wolny [%]	≤ 1,0
Si wolny [%]	≤ 0,4
Wskaźnik aktywności po 28 dniach [%] (90% cementu CEM I 42,5 i 10% pyłu)	≥ 100

Tabela 6. Wymagania w zakresie składu chemicznego dla mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego

Składnik	Zawartość składnika [%]
MgO	≤ 18,0
Siarczany	≤ 2,5
Siarczki	≤ 2,0
Straty prażenia, z poprawką na utlenianie siarczków	≤ 3,0
Chlorki ¹⁾	≤ 0,10
Zawartość wilgoci	≤ 1,0

1) Mielony żużel wielkopieczowy może zawierać więcej niż 0,10% chlorków – w takim przypadku informację o faktycznej zawartości chlorków należy podać na opakowaniu lub dokumentach dostawy.

Tabela 7. Wymagania w zakresie właściwości fizycznych dla mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego

Właściwość	Wymagania
Powierzchnia właściwa	≥ 2750 cm ² /g
Początek czasu wiązania ¹⁾	nie powinien być dwukrotnie dłuższy niż początek czasu wiązania zaczynu wykonanego w 100% z masy cementu porównawczego
Wskaźnik aktywności po 7 dniach ²⁾ po 28 dniach ²⁾	≥ 45% ≥ 70%

1) Początek wiązania należy określać dla kombinacji 50% (masowo) mielonego żużla wielkopieczowego i 50% (masowo) cementu

2) Wskaźnik aktywności należy określać jako stosunek wytrzymałości na ściskanie kombinacji 50% (masowo) mielonego żużla wielkopieczowego i 50% (masowo) cementu, do wytrzymałości na ściskanie cementu porównawczego użytego do badań.

Do oznaczenia początku czasu wiązania i wskaźnika aktywności należy stosować cement portlandzki CEM I klasy 42,5 lub wyższej spełniający dodatkowo wymagania: powierzchnia właściwa ≥ 3000 cm²/g, zawartość glinianu trójwapiennego C₃A od 6% do 12%, zawartość alkaliów Na₂O_{eq} od 0,5% do 1,2%.

Domieszka to substancja dodawana podczas wykonywania mieszanki betonowej, w małych ilościach (nie więcej niż 5%) w stosunku do masy cementu, w celu modyfikacji właściwości mieszanki betonowej i/lub stwardniałego betonu. Najczęściej stosowane domieszki wymieniono na rys.1. Przydatność domieszek do betonu ustala się zgodnie z normą PN-EN 934-2+A1:2012 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu”.



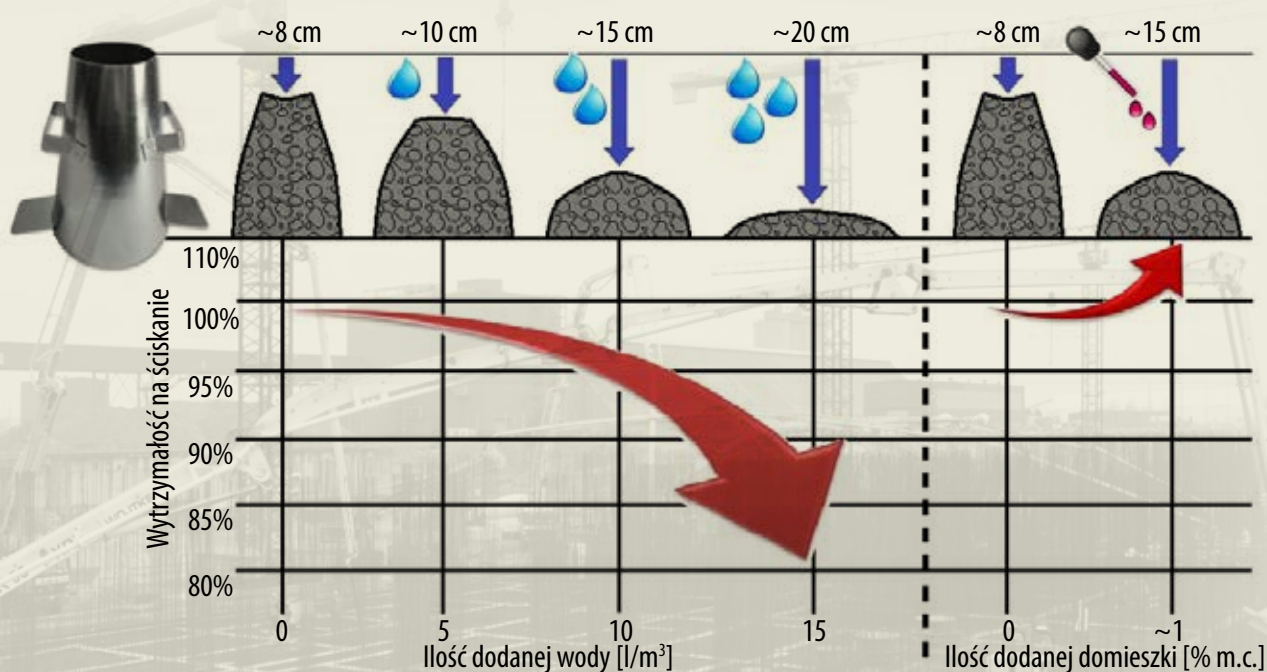
Rys. 1. Domieszki do betonu wg PN-EN 934-2

Domieszki do betonu klasyfikuje się ze względu na skutki modyfikacji właściwości betonu (tabela 1), przy czym decydujący jest główny kierunek działania. W przypadku, gdy domieszka modyfikuje więcej niż jedną właściwość, jest traktowana jako kompleksowa (wielofunkcyjna).

Tabela 1. Domieszki do betonu – charakterystyka, działanie, zastosowanie

Rodzaj domieszki	Charakterystyka	Efekty działania	Przeznaczenie
Plastyfikatory	<ul style="list-style-type: none"> domieszki zmniejszające ilość wody o ok. 5-12% 	<ul style="list-style-type: none"> zwiększenie ciekłości mieszanki (stałe w/c) wzrost wytrzymałości na ściskanie (stała konsystencja) 	<ul style="list-style-type: none"> beton towarowy beton posadzkowy produkcja kostki brukowej beton drogowy (wałowany)
Superplastyfikatory	<ul style="list-style-type: none"> domieszki zmniejszające ilość wody o ok. 12-40% i więcej, zależnie od rodzaju bazy chemicznej najefektywniej działają domieszki polimerowe 	<ul style="list-style-type: none"> znaczna redukcja ilości wody zarobowej zwiększenie wytrzymałości na ściskanie ograniczenie ilości cementu w składzie obniżenie porowatości poprawa trwałości 	<ul style="list-style-type: none"> beton towarowy prefabrykacja drobno- i wielkogabarytowa beton samozagęszczalny fibrobeton beton natryskowy
Napowietrzające	<ul style="list-style-type: none"> domieszki umożliwiające wprowadzenie określonej ilości równomiernie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza 	<ul style="list-style-type: none"> poprawa mrozoodporności obniżenie wytrzymałości na ściskanie (zwiększenie napowietrzenia o 1%, spadek wytrzymałości ok. 5MPa) 	<ul style="list-style-type: none"> beton w klasach ekspozycji XF2÷XF4 beton hydrotechniczny beton mostowy beton drogowy nawierzchniowy
Zwiększające wiązliwość wody	<ul style="list-style-type: none"> domieszki ograniczające samoczynne wydzielanie wody z mieszanki betonowej 	<ul style="list-style-type: none"> zwiększenie spoistości mieszanki betonowej ograniczenie bleedingu poprawa trwałości warstwy wierzchniej 	<ul style="list-style-type: none"> beton układany pod wodą produkcja kostki brukowej beton posadzkowy
Przyspieszające wiązanie	<ul style="list-style-type: none"> domieszki skracające czas przechodzenia mieszanki ze stanu plastycznego w sztywny 	<ul style="list-style-type: none"> skrócenie czasu wiązania szybszy przyrost wytrzymałości wczesnej podwyższone ciepło hydratacji pogorszenie urabialności 	<ul style="list-style-type: none"> prefabrykacja drobno- i wielkogabarytowa betonowanie w warunkach zimowych beton natryskowy
Przyspieszające twardnienie	<ul style="list-style-type: none"> domieszki przyspieszające narastanie wytrzymałości 	<ul style="list-style-type: none"> szybszy przyrost wytrzymałości wczesnej podwyższone ciepło hydratacji pogorszenie urabialności 	<ul style="list-style-type: none"> prefabrykacja drobno- i wielkogabarytowa beton wodoszczelny beton natryskowy
Opóźniające wiązanie	<ul style="list-style-type: none"> domieszki wydłużające czas przechodzenia mieszanki ze stanu plastycznego w sztywny 	<ul style="list-style-type: none"> wydłużenie czasu wiązania utrzymanie konsystencji w dłuższym okresie czasu obniżenie ciepła hydratacji obniżenie wytrzymałości w początkowym okresie 	<ul style="list-style-type: none"> betonowanie ciągłe betonowanie w podwyższonych temperaturach daleki transport mieszanki betonowej beton architektoniczny
Uszczelniające	<ul style="list-style-type: none"> domieszki zmniejszające absorpcję kapilarną betonu 	<ul style="list-style-type: none"> uszczelnienie betonu poprawa trwałości przeciwdziałanie podciąganiu kapilarnemu 	<ul style="list-style-type: none"> beton wodoszczelny beton w klasach ekspozycji XA, XD, XS
Kompleksowe	<ul style="list-style-type: none"> domieszki łączące kilka efektów działania 	<ul style="list-style-type: none"> opóźniająco-upłynniające napowietrzająco-upłynniające 	<ul style="list-style-type: none"> zależnie od efektów działania

Najpowszechniej w technologii betonu stosuje się domieszki redukujące ilość wody - plastyfikatory i superplastyfikatory. Głównym celem ich stosowania jest zapewnienie odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej bez konieczności zwiększania zawartości wody, co mogłoby skutkować obniżeniem wytrzymałości betonu (rys. 2), a także jego trwałości.



Rys. 2. Zasada działania domieszek redukujących ilość wody w mieszance betonowej

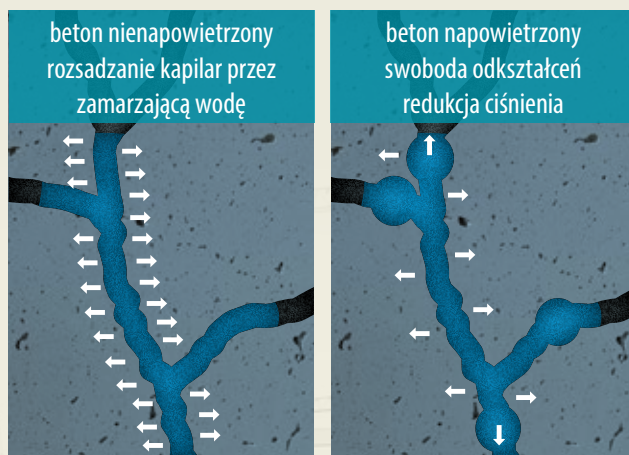
Wyróżnia się 3 zasadnicze efekty stosowania domieszek redukujących ilość wody (rys. 3):

- poprawa urabialności poprzez zwiększenie ciekłości mieszanki betonowej,
- zwiększenie wytrzymałości betonu poprzez zmniejszenie ilości wody zarobowej przy niezmienionej zawartości cementu,
- zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła wskutek zmniejszenia zużycia cementu na projektowaną klasę wytrzymałości betonu.



Rys. 3. Główne efekty stosowania domieszek redukujących ilość wody w mieszance betonowej

Ważną grupę domieszek do betonu stanowią domieszki napowietrzające. Domieszki te tworzą i stabilizują w mieszanke betonowej zamknięte pęcherzyki powietrza, które w stwardniałym betonie pozostają w postaci równomiernie rozmieszczonych mikroporów, przerywających ciągłość kapilar (rys. 4) oraz korzystnie kształtujących mrozoodporność betonu (zapobiegają rozsadaniu betonu przez zamarzającą w porach kapilarnych wodę). W technologii betonu coraz częściej stosowane są również inne rodzaje domieszek, zwykle o wąskim, specjalistycznym efekcie działania. Do tej grupy zalicza się, m.in. domieszki przeciwskurczowe, domieszki obniżające temperaturę zamarzania wody w betonie (potocznie nazywane przeciwmrozowymi), inhibitory korozji stali zbrojeniowej, domieszki zwiększające przyczepność betonu do stali zbrojeniowej.



Rys. 4. Schemat działania domieszek napowietrzających

STOSUJĄC DOMIESZKI CHEMICZNE NALEŻY KIEROWAĆ SIĘ NASTĘPUJĄCYMI ZASADAMI:

- ▶ CAŁKOWITA ILOŚĆ DOMIESZEK NIE POWINNA PRZEKRACZAĆ DOPUSZCZALNEJ ILOŚCI ZALECANEJ PRZEZ PRODUCENTA ORAZ NIE POWINNA BYĆ WIĘKSZA NIŻ 50 G/KG CEMENTU (5% MASY CEMENTU), CHYBA ŻE ZNANY JEST WPŁYW WIĘKSZEGO DOZOWANIA NA WŁAŚCIWOŚCI I TRWAŁOŚĆ BETONU,
- ▶ STOSOWANIE DOMIESZEK W ILOŚCIACH MNIEJSZYCH NIŻ 2 G/KG CEMENTU DOPUSZCZA SIĘ WYŁĄCZNIE W PRZYPADKU WCZEŚNIEJSZEGO ICH WYMIESZANIA Z CZĘŚCIĄ WODY ZAROBOWEJ,
- ▶ JEŻELI CAŁKOWITA ILOŚĆ DOMIESZEK PŁYNNYCH PRZEKRACZA 3 L/M³ BETONU WODĘ W NICH ZAWARTĄ NALEŻY UWZGLĘDNIĆ PRZY OBLICZANIU WSPÓŁCZYNNIKA W/C,
- ▶ W PRZYPADKU STOSOWANIA WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ DOMIESZKI NALEŻY SPRAWDZIĆ ICH WZAJEMNĄ KOMPATYBILNOŚĆ I EFEKTYWNOŚĆ DZIAŁANIA W UKŁADZIE Z CEMENTEM.

Skuteczność działania domieszek i uzyskanie kompatybilnego układu domieszka - cement (rys. 5.) jest podstawowym warunkiem osiągnięcia spodziewanych modyfikacji właściwości mieszanki betonowej i betonu. Efektywność działania i kompatybilność domieszek do betonu powinny być zawsze sprawdzone, już na etapie badań wstępnych.



Rys. 5. Kształtowanie kompatybilności układu domieszka - cement

W 2013r. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad wprowadziła do stosowania nowe Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST) określające warunki dla wykonania nawierzchni betonowej oraz betonu konstrukcyjnego. Zasadniczym celem opracowania OST było stworzenie nowoczesnych dokumentów technicznych, zgodnych ze stanem wiedzy i popartych doświadczeniami budowlanymi, tak by zapewnić nowym inwestycjom w inżynierii komunikacyjnej wysoką jakość i trwałość konstrukcji betonowych. OST stanowią podstawę sporządzania specyfikacji technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych (STWiORB) dla realizacji robót na drogach krajowych, ponadto są zalecane przy realizacjach na drogach wojewódzkich, powiatowych i gminnych. Dokumenty te zmieniają podejście do problemu trwałości konstrukcji betonowych poprzez odpowiednie zdefiniowanie wymogów dotyczących składników, warunków produkcji oraz właściwości betonu. Obecne zapisy dają technologom betonu większe możliwości w kształtowaniu trwałości konstrukcji. Wymagania i zalecenia w zakresie składników do produkcji betonu są jednym z obszarów, który uległ najistotniejszym i najszerzym modyfikacjom wraz z wprowadzeniem nowych Ogólnych Specyfikacji Technicznych (OST).

CEMENT

Nowe Ogólne Specyfikacje Techniczne uwzględniają rodzaj i funkcję elementu konstrukcji w obiekcie inżynierskim oraz warunki środowiskowe (klasy ekspozycji), w jakich obiekt będzie użytkowany. Dopuszczają do stosowania w betonie nawierzchniowym i konstrukcyjnym cement portlandzki CEM I, cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II oraz cement hutniczy CEM III – wymagania stawiane poszczególnym rodzajom cementu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Ogólne Specyfikacje Techniczne uwzględniają różnice we właściwościach cementów, wprowadzając tzw. czas równoważny dla określania właściwości betonu, zwłaszcza trwałościowych (mrozoodporność, szczelność, podatność na korozję). W zależności od rodzaju zastosowanego cementu właściwości betonu należy określać w terminach wg tabeli 3.

Tabela 1. Wymagania OST odnośnie cementu do betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim

Rodzaj betonu	Wymagania odnośnie cementu	Oferta Górażdże Cement S.A.
Beton konstrukcyjny	Cement portlandzki CEM I całkowita zawartość alkaliów $Na_2O_{eq} \leq 0,8\%$ wg PN-EN 196-2 początek wiązania ≥ 120 min wg PN-EN 196-3	CEM I 42,5R CEM I 52,5R
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S całkowita zawartość alkaliów $Na_2O_{eq} \leq 0,8\%$ wg PN-EN 196-2	CEM II/A-S 52,5N
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S całkowita zawartość alkaliów $Na_2O_{eq} \leq 0,9\%$ wg PN-EN 196-2	CEM II/B-S 32,5R CEM II/B-S 42,5N
Beton konstrukcyjny sprężony	Zaleca się stosowanie cementu portlandzkiego CEM I	CEM I 42,5R CEM I 52,5R
Beton konstrukcyjny masywny	Cementy jak dla betonu konstrukcyjnego, ale o niskim cieple hydratacji LH. Dopuszcza się stosowanie cementu hutniczego CEM III/A za wyjątkiem klasy ekspozycji XF4.	CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA
Beton konstrukcyjny w klasach ekspozycji XA2, XA3, XD3 i XS3	Cementy odporne na siarczany: <ul style="list-style-type: none"> cement portlandzki CEM I SR wg PN-EN 197-1 cement portlandzki - żuźlowy CEM II/A,B-S HSR wg PN-B-19707 cement hutniczy CEM III/A HSR wg PN-B-19707 	CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA

Dopuszcza się, zastosowanie cementów o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R). Do betonu klasy wyższej niż C30/37 powinien być stosowany cement klasy $\geq 42,5$.

Tabela 2. Wymagania OST odnośnie cementu do betonu nawierzchniowego

Rodzaj nawierzchni	Rodzaj cementu	Wymagania specjalne	Kategoria ruchu	Oferta Górażdże Cement S.A.
Nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem w górnej warstwie	Cement portlandzki CEM I 32,5 CEM I 42,5 R lub N	Właściwa ilość wody $\leq 28,0\%$ wg PN-EN 196-3 Wytrzymałość na ściskanie $\leq 29,0$ MPa po 2 dniach wg PN-EN 196-1 Początek wiązania ≥ 120 min wg PN-EN 196-3 Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2	KR5÷KR7	CEM I 42,5R
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2		CEM II/A-S 52,5N
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,90\%$ wg PN-EN 196-2		CEM II/B-S 32,5R CEM II/B-S 42,5N
Nawierzchnia betonowa do wczesnego obciążenia ruchem	Cement portlandzki CEM I 32,5 CEM I 42,5 CEM I 52,5 R lub N	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR7	CEM I 42,5R CEM I 52,5R
Typowa nawierzchnia betonowa: -dolne warstwy nawierzchni; -nawierzchnie 2-warstwowe z tej samej mieszanki; -nawierzchnie 1-warstwowe	Cement portlandzki CEM I 32,5	Właściwa ilość wody $\leq 28,0\%$ wg PN-EN 196-3 Wytrzymałość na ściskanie $\leq 29,0$ MPa po 2 dniach wg PN-EN 196-1 Początek wiązania ≥ 120 min wg PN-EN 196-3 Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2 Stopień zmielenia ≤ 3500 cm^2/g wg PN-EN196-6	KR1÷KR7	-
	Cement portlandzki CEM I 42,5		KR1÷KR7	CEM I 42,5R
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2		CEM II/A-S 52,5N
	Cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL		KR1÷KR3	-
	Cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V ⁿ⁾	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,20\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR3	-
	Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,90\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR7	CEM II/B-S 32,5R CEM II/B-S 42,5N

Typowa nawierzchnia betonowa: -dolne warstwy nawierzchni; -nawierzchnie 2-warstwowe z tej samej mieszanki; -nawierzchnie 1-warstwowe	Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-V) ¹⁾	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,20\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR3	-
	Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL)	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,80\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR4	-
	Cement hutniczy CEM III/A ²⁾	Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 1,05\%$ wg PN-EN 196-2	KR1÷KR4	CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA

1) jeśli nawierzchnia nie będzie poddawana działaniu środków odładzających; strata prażenia popiołu lotnego użytego do produkcji cementu nie więcej niż 5% (kategoria A wg PN-EN 450-1)

2) min. klasa wytrzymałości cementu 42,5

Stosowanie cementu niskoalkalicznego NA, jest uzasadnione tylko w przypadkach, gdy dla używanych kruszyw faktycznie stwierdzono potencjalną reaktywność alkaliczną.

Tabela 3. Czas wykonywania badań w zależności od zastosowanego cementu wg OST

Rodzaj cementu	Czas równoważny [dni]
CEM I (R), CEM II/A-S (R)	28 dni
CEM I (N), CEM II/A-S (N), CEM II/B-S (N,R)	56 dni
CEM III/A	90 dni

KRUSZYWO

Dotychczasowe dokumenty dopuszczały w inżynierii komunikacyjnej betony wykonane tylko na kruszywie bazaltowym lub granitowym. Według zapisów nowych OST o możliwości stosowania danego kruszywa decydują jego właściwości. Wymagania dotyczące kruszyw w betonie konstrukcyjnym i nawierzchniowym przedstawiono, przez przywołanie odpowiedniej kategorii zgodnej z normą PN-EN 12620 „Kruszywa do betonu”, w tabelach 4÷6.

Do betonu nawierzchniowego powinno być stosowane kruszywo o wymiarach o $D/d \geq 1,4$ i uziarnieniu:

- $D \leq 31,5$ mm, dla nawierzchni 1- i 2-warstwowych z tej samej mieszanki,
- 0-2 mm, 2-8 mm, dla górnej warstwy nawierzchni z odkrytym kruszywem,
- $D \leq 31,5$ mm, dla dolnej warstwy nawierzchni.

Stos okruszowy kruszywa do betonu nawierzchniowego powinien składać się z min. 3 frakcji. Do betonu konstrukcyjnego powinny być stosowane kruszywa o maksymalnym wymiarze ziarna $D \leq 31,5$ mm.

Tabela 4. Wymagania dla kruszyw do betonu konstrukcyjnego wg OST

Właściwości kruszywa	Kruszywo grube $D \leq 31,5$ mm	Kruszywo drobne $D \leq 4$ mm
Uziarnienie wg PN-EN 933-1	W zależności od wymiaru kruszywa, kategoria nie niższa: - G_c 85/20 dla $D/d \leq 2$ lub $D \leq 11,2$ mm - G_c 90/15 dla $D/d > 2$ lub $D > 11,2$ mm	G_f 85
Tolerancja uziarnienia	W zależności od wymiaru kruszywa, kategorie: - G_T 15 dla $D/d < 4$ - G_T 17,5 dla $D/d \geq 4$	wg PN-EN 12620 zgodnie z tablicą C.1
Zawartość pyłów wg PN-EN 933-1	Kategoria nie wyższa niż $f_{1,5}$	Kategoria nie wyższa niż f_3
Kształt kruszywa grubego wg PN-EN 933-3 lub wg PN-EN 933-4	Kategoria nie wyższa niż Fl_{20} lub Sl_{20}	-
Zawartość ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej w kruszywie grubym [%] wg PN-EN 933-5	Kategoria nie niższa niż $C_{100/0}$	-
Mrozoodporność w 1 % NaCl, badana na kruszywie 8/16, wg PN-EN 1367-6, Odporność na rozdrabnianie, badana na kruszywie 10/14, wg PN-EN 1097-2	$\leq 6\%$ $\leq 2\%$	$\leq LA_{25}$ $\leq LA_{40}$
„Zgorzel słoneczna” bazaltu badana na kruszywie 10/14, wg PN-EN 1367-3	Kategoria SB_{LA}	-
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6	Deklarowana przez producenta	
Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3	Deklarowana przez producenta	
Nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6	WA_{24} deklарowana przez producenta	-
Skład chemiczny – uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3	Deklarowany przez producenta	
Reaktywność alkaliczno – krzemionkowa wg PN-B-06714-46	Stopień potencjalnej reaktywności 0 ¹⁾	
Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie wg PN-EN 1744-1	Nie wyższa niż kategoria $AS_{0,2}$	
Zawartość siarki całkowitej wg PN-EN 1744-1	$\leq 1\%$	
Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie wg PN-EN 1744-1	$\leq 0,02\%$	-
Zanieczyszczenia lekkie wg PN-EN 1774-1	$\leq 0,1\%$	$\leq 0,5\%$
Zawartość substancji organicznych wg PN-EN 1744-1	Barwa nie ciemniejsza niż wzorcowa	

1) w przypadku stwierdzenia, że badane kruszywo odpowiada 1 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej należy wykonać badanie dodatkowe zgodnie z PN-B-06714-34; dopuszczenie do zastosowania przy spełnieniu wymagania: reaktywność alkaliczna z cementem nie wywołująca zwiększenia wymiarów liniowych większych niż 0,1 %.

Tabela 5. Właściwości i kategorie kruszywa grubego do betonowych nawierzchni drogowych wg OST

Właściwości kruszywa	Przeznaczenie betonu				
	JWN ¹⁾ KR1 ÷ KR2	DWN ²⁾ KR3 ÷ KR4	GWN ³⁾ JWN KR3 ÷ KR4	DWN KR5 ÷ KR7	GWN z odkrytym kruszywem KR 5 ÷ KR7
Skład chemiczny – uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3	Deklarowany przez producenta				
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6	Deklarowana przez producenta				
Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3	Deklarowana przez producenta				
Uziarnienie wg PN-EN 933-1	Kategoria nie niższa niż: - G_c 90/15 dla $D > 4$ i $d \geq 1$ - G_c 85/20 dla $D \leq 4$ i $d \geq 1$				
Tolerancje uziarnienia na sitach pośrednich	Kategoria nie niższa niż: - $G_{20/15}$ dla $D/d < 4$; $D/1,4$ - $G_{20/17,5}$ dla $D/d \geq 4$; $D/2$				
Zawartość pyłu wg PN-EN 933-1	Kategoria nie wyższa niż $f_{1,5}$				
Kształt kruszywa grubego wg PN-EN 933-3 lub PN-EN 933-4	$\leq SI_{30}$ lub FI_{30}	$\leq SI_{20}$ lub FI_{20}			$\leq SI_{10}$ lub FI_{15}
Zawartość ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej [%] wg PN-EN 933-5	Brak wymagań	$\geq C_{50/10}$	$\geq C_{90/1}$	$\geq C_{100/0}$	
Odporność kruszywa na rozdrabnianie, badania na kruszywie 10/14 wg PN-EN 1097-2	$\leq LA_{40}$	$\leq LA_{35}^{4)}$			$\leq LA_{25}^{4)}$
Odporność na polerowanie wg PN-EN 1097-8	PSV deklarowana (nie mniej niż 48)	-	PSV ₅₀	-	PSV deklarowana (nie mniej niż 53)
Mrozoodporność, badania na kruszywie 8/16 wg PN-EN 1367-1	$\leq F_2$	$\leq F_1$	-	$\leq F_1$	-
Mrozoodporność w 1% NaCl badania na kruszywie 8/16 wg PN-EN 1367-6	-	-	$\leq 6\%$	-	$\leq 6\%$
„Zgorzel słoneczna” bazaltu, badania na kruszywie 10/14 wg PN-EN 1367-3	Kategoria: SB_{SZ} (SB_{LA})				
Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa wg PN-B-06714-46	Stopień potencjalnej reaktywności „0” ⁵⁾				
Zanieczyszczenia lekkie wg PN-EN 1744-1	$\leq 0,1\%$				
Zawartość substancji organicznych wg PN-EN 1744-1	Barwa nie ciemniejsza od wzorcowej				
Zawartość siarki całkowitej wg PN-EN 1744-1	$\leq 1\%$				

1) JWN – nawierzchnia jednowarstwowa

2) DWN – dolna warstwa nawierzchni

3) GWN – górna warstwa nawierzchni

4) dopuszcza się zastosowanie kruszyw o kategorii odporności na rozdrabnianie LA_{40} , tylko w przypadku, gdy ubytek masy kruszywa w badaniu mrozoodporności w 1% NaCl przeprowadzonego na frakcji 8/16 wg PN-EN 1367-6 jest $\leq F_{NaCl}$ 2% oraz są spełnione pozostałe wymagania określone w tabelicy 5.

5) w przypadku stwierdzenia, że badane kruszywo odpowiada 1 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej należy wykonać badanie dodatkowe zgodnie z PN-B-06714-34; dopuszczenie do zastosowania przy spełnieniu wymagania: reaktywność alkaliczna z cementem nie wywołująca zwiększenia wymiarów liniowych większych niż 0,1 %.

Tabela 6. Właściwości i kategorie kruszywa drobnego do betonowych nawierzchni drogowych wg OST

Właściwości kruszywa	Przeznaczenie betonu				
	JWN ¹⁾ KR1 ÷ KR2	DWN ²⁾ KR3 ÷ KR4	GWN ³⁾ JWN KR3 ÷ KR4	DWN KR5 ÷ KR7	GWN z odkrytym kruszywem KR 5 ÷ KR7
Skład chemiczny – uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3	Deklarowany przez producenta				
Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6	Deklarowana przez producenta				
Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3	Deklarowana przez producenta				
Uziarnienie wg PN-EN 933-1	G _f 85				
Zawartość pyłu wg PN-EN 933-1;	Kategoria nie wyższa niż f ₃				
Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa wg PN-B-06714-46	Stopień potencjalnej reaktywności „0” ⁴⁾				
Zanieczyszczenia lekkie wg PN-EN 1744-1	≤ 0,5%				
Zawartość substancji organicznych wg PN-EN 1744-1	Barwa nie ciemniejsza od wzorcowej				
Zawartość siarki całkowitej wg PN-EN 1744-1	≤ 1%				

1) JWN – nawierzchnia jednowarstwowa
2) DWN – dolna warstwa nawierzchni
3) GWN – górna warstwa nawierzchni
4) w przypadku stwierdzenia, że badane kruszywo odpowiada 1 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej należy wykonać badanie dodatkowe zgodnie z PN-B-06714-34; dopuszczenie do zastosowania przy spełnieniu wymagania: reaktywność alkaliczna z cementem nie wywołująca zwiększenia wymiarów liniowych większych niż 0,1 %.

WODA

Nowe OST wymagają stosowania wody zgodnej z normą PN-EN 1008. Do stosowania w betonie konstrukcyjnym i nawierzchniowym nie dopuszcza się stosowania wody z recyklingu.

DODATKI DO BETONU

Dodatki do betonu typu I lub typu II wg PN-EN 206:2014 mogą być stosowane tylko do betonu nawierzchniowego w kategoriach ruchu KR1 ÷ KR2. Zgodnie z wytycznymi OST niedopuszczalne jest uwzględnianie dodatków w zawartości cementu i współczynnika w/c. Do betonu konstrukcyjnego, w myśl OST, dopuszcza się stosowanie pyłu krzemionkowego spełniającego wymagania normy PN-EN 13263-1 jako dodatku do betonu, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 206:2014.

DOMIESZKI DO BETONU

Domieszki stosowane do betonu konstrukcyjnego i nawierzchniowego muszą spełniać wymagania norm PN-EN 934-1 i PN-EN 934-2. Ogólną przydatność i kompatybilność (w przypadku stosowania więcej niż jednej domieszki domieszek) należy sprawdzić w badaniach wstępnych.

W składzie betonu nawierzchniowego mogą być stosowane następujące rodzaje domieszek:

- uplastyczniające,
- upłynniające,
- opóźniające,
- napowietrzające,

przy czym, równocześnie można stosować nie więcej niż 3 rodzaje domieszek i tylko jedną domieszkę z danego rodzaju.

W betonie konstrukcyjnym dopuszcza się stosowanie domieszek poprawiających właściwości betonu lub pozwalających uzyskać właściwości specjalne mieszanki betonowej lub stwardniałego betonu. Ponadto, do betonu specyfikowanego w klasach ekspozycji XF2 ÷ XF4 zaleca się stosowanie domieszki napowietrzającej.

A close-up, high-resolution photograph of a concrete surface. The texture is highly detailed, showing a rough, granular, and somewhat porous appearance with various shades of gray and brown. The lighting creates subtle shadows and highlights, emphasizing the unevenness of the material. A white horizontal bar is overlaid on the upper portion of the image, containing the text 'B MIESZANKA BETONOWA'.

B MIESZANKA BETONOWA

Problem prowadzenia robót monolitycznych (betonowania) w warunkach obniżonej temperatury pojawia się wraz z nadejściem okresu jesienno-zimowego. Za warunki obniżonej temperatury zgodnie z wytycznymi zawartymi w instrukcji ITB nr 282/2011, uznaje się czas, gdy średnia temperatura dobowa jest niższa niż 10°C. Najwięcej problemów przysparza jednak okres ujemnych temperatur. Betonowania nie powinno się prowadzić, gdy temperatura otoczenia spadnie poniżej -15°C. Wielu inwestorów i wykonawców nie jest świadomych ryzyka, jakie niesie za sobą nieodpowiednie przygotowanie do prowadzenia robót monolitycznych w warunkach zimowych.

Najbardziej narażony na negatywne oddziaływanie ujemnych temperatur jest młody beton.

GŁÓWNYMI ZAGROŻENIAMI W OKRESIE OBNIŻONYCH TEMPERATUR SĄ:

- ▶ **SPOWOLNIENIE PROCESÓW WIĄZANIA I TWARDNIENIA BETONU – NISKA TEMPERATURA SPOWALNIA PRZEBIEG PROCESU HYDRATAcji CEMENTU, WYDŁUŻENIU ULEGA CZAS WIĄZANIA CEMENTU, PRZEZ CO OPÓŹNIA SIĘ PROCES NARASTANIA WYTRZYMAŁOŚCI BETONU W KONSTRUKCJI. W BARDZO NISKICH TEMPERATURACH MOŻE NASTĄPIĆ CAŁKOWITE ZATRZYMANIE PROCESU HYDRATAcji,**
- ▶ **USZKODZENIE POWSTAŁEJ MIKROSTRUKTURY BETONU PRZEZ ZAMARZAJĄCĄ WODĘ – ZWIĘKSZAJĄCA SWOJĄ OBJĘTOŚĆ ZAMARZAJĄCA WODA ROZRYWA SŁABE WIĄZANIA POWSTAJĄCE W POCZĄTKOWYM OKRESIE PROCESU HYDRATAcji, POWODUJĄC ZNISZCZENIE STRUKTURY MŁODEGO BETONU, PRZEZ CO STWARDNIAŁY BETON CHARAKTERYZUJE SIĘ OBNIŻONĄ WYTRZYMAŁOŚCIĄ I TRWAŁOŚCIĄ.**

Aby zapewnić skuteczną ochronę przed niską temperaturą konieczne jest wcześniejsze przygotowanie odpowiedniej receptury mieszanki betonowej (rodzaj i ilość cementu, odpowiedni dobór domieszek chemicznych oraz dodatków, wielkość współczynnika w/c). Należy ponadto odpowiednio zaplanować harmonogram realizacji (przebieg robót budowlanych), z uwzględnieniem wytycznych dla sposobu układania mieszanki betonowej oraz pielęgnacji betonu po wbudowaniu.

Wg normy PN-EN 206:2014 "Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność" temperatura mieszanki betonowej podczas zabudowy nie powinna być niższa niż 5°C (rys. 1). Zachowanie temperatury mieszanki na poziomie powyżej 5°C pozwala uniknąć ryzyka zamarznięcia wody w mieszance. Niemniej ważne jest uzyskanie przez młody beton minimalnej wytrzymałości na ściskanie, zanim ulegnie on pierwszemu zamarznięciu. Naprężenia powstające wskutek zwiększania objętości przez zamarzającą wodę mają charakter naprężeń rozciągających. Gdy ich wartość przekroczy granicę wytrzymałości matrycy cementowej, dochodzi do rozerwania powstałych wiązań.



Rys. 1. Minimalna temperatura mieszanki betonowej

Odporność betonu na tego typu oddziaływania można podzielić na dwie grupy:

1. odporność pełną – beton narażony na bezpośrednie działanie czynników zewnętrznych (opady deszczu, śnieg, ujemna temperatura) powinien przed pierwszym zamarznięciem osiągnąć wytrzymałość co najmniej 5 MPa dla betonów z cementów CEM I, minimum 8 MPa dla betonów z cementami CEM II, CEM IV i CEM V oraz minimum 10 MPa dla betonów z cementów hutniczych CEM III,
2. odporność warunkową – beton nienarażony na bezpośrednie działanie czynników zewnętrznych (beton osłonięty lub pod daszeniem) powinien przed pierwszym zamarznięciem osiągnąć wytrzymałość co najmniej 5 MPa, bez względu na rodzaj zastosowanego cementu.

Spełnienie przedstawionych wytycznych wymaga odpowiedniego przygotowania mieszanki betonowej, producenci betonu dążą do tego, aby węzły betoniarskie wyposażone były w instalacje do podgrzewania kruszywa i/lub wody. Podgrzewanie wody zarobowej jest łatwiejsze i trwa krócej, a często może być zabiegiem wystarczającym dla uzyskania odpowiedniej temperatury mieszanki betonowej. Do wyznaczenia temperatury mieszanki betonowej można użyć wzoru:

$$t_b = \frac{c \cdot (z \cdot t_z + f \cdot t_f + g \cdot t_g) + c_w \cdot w \cdot t_w}{c \cdot (z + f + g) + c_w \cdot w}$$

gdzie: t_b – temperatura mieszanki betonowej;

t_z – temperatura cementu;

t_f – temperatura popiołu;

t_g – temperatura kruszywa;

t_w – temperatura wody;

z – ilość cementu [kg/m^3];

f – ilość popiołu [kg/m^3];

g – ilość kruszywa [kg/m^3];

w – ilość wody [kg/m^3];

c_w – ciepło właściwe wody $\left[4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

c – ciepło właściwe cementu, popiołu i kruszywa $\left[0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

Można również orientacyjnie wyznaczyć temperaturę mieszanki na podstawie tabeli 1, w zależności od temperatury składników.

Tabela 1. Temperatura mieszanki betonowej w zależności od temperatury kruszywa i wody

Temperatura kruszywa [°C]	Temperatura wody [°C]								
	5	10	20	30	40	50	60	70	80
	Osiągnięta temperatura mieszanki betonowej [°C]								
5	5	6	9	11	14	16	19	22	24
10	8	9	12	15	17	20	22	25	27
15	11	13	15	18	21	23	26	28	31
20	15	16	19	21	24	26	29	31	34
30	21	23	25	28	30	33	35	38	40

Kruszywo w betonie zajmuje ok. 70% – 80% objętości, więc jego temperatura w największym stopniu przekłada się na temperaturę mieszanki betonowej. Najprostszym sposobem zwiększenia temperatury kruszywa jest podgrzewanie go ciepłym powietrzem, które wprowadza się poprzez system rur ułożonych pod pryzmą kruszywa. Innym sposobem jest stosowanie nadmuchu pary wodnej. W okresie zimowym należy ponadto unikać zawilgocenia i przemarzania kruszywa.

Proces podgrzewania składników betonu musi przebiegać z uwzględnieniem wytycznych dotyczących maksymalnych temperatur poszczególnych składników:

- ▶ maksymalna temperatura wody <60°C lub dozowanej bezpośrednio na kruszywo <80°C,
- ▶ maksymalna temperatura kruszywa <50°C.

W okresie niskich temperatur zaleca się:

- stosowanie cementów wyższych klas wytrzymałościowych, np. 42,5 i 52,5,
- stosowanie cementów o wyższej zawartości klinkieru cementowego, np. CEM I i CEM II,
- zwiększenie udziału cementu (o 5-10%) w składzie mieszanki betonowej (więcej cementu - więcej ciepła z hydratacji).

W okresie obniżonych temperatur można stosować także odpowiednie domieszki chemiczne w składzie betonu. Są to głównie domieszki o działaniu obniżającym temperaturę zamarzania wody, przyspieszające wiązanie cementu i redukujące ilość wody (plastyfikatory i superplastyfikatory):

- domieszki obniżające temperaturę zamarzania wody w betonie – domieszki na bazie soli bezchlorkowych, umożliwiające obniżenie temperatury zamarzania wody w betonie o kilka stopni, woda w betonie bez domieszki zamarza w temperaturze od -1°C do -3°C ,
- domieszki przyspieszające wiązanie – zwiększają początkową szybkość reakcji zachodzących między składnikami cementu a wodą w zaczynie cementowym, ich stosowanie ma na celu uzyskanie w krótkim okresie czasu minimalnej wytrzymałości betonu, zapewniającej odporność na pierwsze zamarznięcie,
- domieszki redukujące ilość wody zarobowej – stosując plastyfikatory lub superplastyfikatory można uzyskać kilka efektów w postaci:
 - zmniejszenia ilości wody, która może zamarznąć,
 - zwiększenia stężenia soli w wodzie obniżających temperaturę jej zamarzania,
 - zwiększenia wytrzymałości betonu, a tym samym odporności na destrukcyjne działanie zamarzającej wody.

Stosowanie kombinacji domieszek (przyspieszających, redukujących ilość wody) pozwala na optymalne dostosowanie właściwości mieszanki betonowej i betonu do warunków otoczenia w trakcie wykonywania prac budowlanych. Bardzo ważne jest odpowiednie przygotowanie procesu betonowania, grunt, podbudowa, deskowanie, podobnie jak zbrojenie, nie mogą być pokryte warstwą śniegu lub lodu (rys. 2). Zamarznięta na powierzchni deskowania lub zbrojenia woda, wpływa na lokalne zmiany współczynnika w/c, a tym samym pogarsza właściwości betonu. Grunt lub deskowanie powinno mieć temperaturę, która nie spowoduje zamarzania młodego betonu przed osiągnięciem przez niego wytrzymałości, zapewniającej odporność na zamarzanie. Podczas układania betonu zaleca się ponadto jego ochronę przed opadami atmosferycznymi.



Rys. 2. Błędy zabudowy mieszanki betonowej – oblodzone zbrojenie

Pielęgnacja betonu jest jednym z najważniejszych etapów prowadzenia robót monolitycznych. Prawidłowe kształtowanie warunków dojrzewania betonu zapewnia osiągnięcie założonych właściwości betonu. Pielęgnację należy rozpocząć niezwłocznie po ułożeniu i zagęszczeniu mieszanki betonowej. Odpowiednia pielęgnacja betonu zależy od szeregu czynników, takich jak: temperatura otoczenia, opady atmosferyczne, wiatr, masywność betonu, receptura betonu, itp. W warunkach obniżonych temperatur należy przede wszystkim zapewnić ochronę betonu przed utratą ciepła.

W tym celu stosuje się następujące metody:

- metoda zachowania ciepła – wykorzystuje ciepło zakumulowane w kruszywie i wodzie oraz ciepło wydzielone podczas reakcji hydratacji cementu, dodatkowo należy stosować osłony i izolacje (rys. 3a) w celu wyeliminowania strat ciepła,
- metoda podgrzewania betonu – podgrzewanie ciepłym powietrzem (rys. 3b), parą niskoprężną lub za pomocą instalacji elektrycznej (rys. 3c), metodę stosuje się w celu przyspieszenia procesów wiązania i twardnienia betonu, aby móc prowadzić dalsze prace budowlane lub gdy konieczny jest wcześniejszy demontaż deskowań, stosowanie tej metody może wiązać się z ryzykiem przegrzania betonu lub jego przesuszenia, co w efekcie prowadzi do powstania wysokiego gradientu temperatur, a w konsekwencji do spękania betonu,
- metoda cieplaków – stosowanie osłon, które całkowicie izolują beton, ograniczając straty ciepła, a także chronią przed czynnikami zewnętrznymi (rys. 3d), pozwalają na stworzenie dowolnych warunków dojrzewania betonu, metoda ta jest najskuteczniejsza, ale również kosztowna.

W każdej z tych metod należy zwracać szczególną uwagę na kontrolę stanu wilgotności betonu.

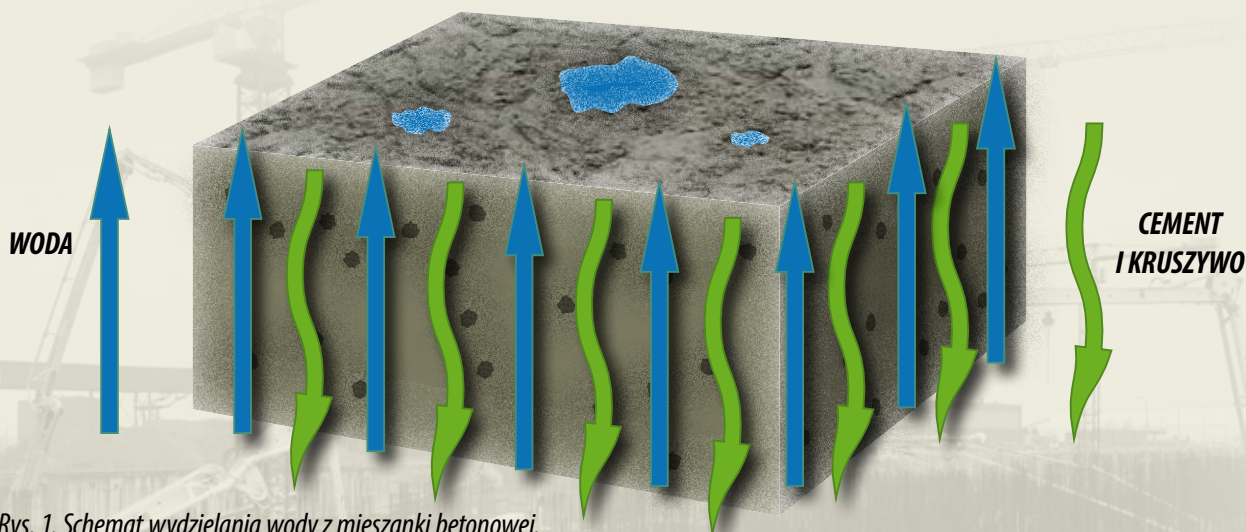


Rys. 3. Metody pielęgnacji betonu w obniżonych temperaturach

Przed podjęciem decyzji o rozpoczęciu prac budowlanych w warunkach obniżonych temperatur należy wziąć pod uwagę szereg czynników. Oprócz kryteriów technologicznych – sposobie wbudowania i pielęgnacji betonu - należy pamiętać również o kadrze technicznej. Uświadomienie pracowników o zagrożeniach pojawiających się podczas betonowania w obniżonych temperaturach pomaga sprawnie przeprowadzić prace budowlane bez konieczności ich przerywania. W okresie obniżonych temperatur zachodzi potrzeba zaostrzenia kontroli jakości robót. Kontrola powinna obejmować przede wszystkim te fazy wykonywania robót, które decydują o bezpieczeństwie konstrukcji na etapie wznoszenia oraz o zachowaniu wymagań określonych w projekcie, normach lub warunkach technicznych wykonania i odbioru robót. Wykonawca robót powinien mieć świadomość, że wykonywanie monolitycznych elementów konstrukcyjnych w warunkach obniżonych temperatur jest czasochłonne, kosztowne i trudne technologicznie.



Odsączenie wody z mieszanki betonowej, określane w technologii betonu z ang. jako „bleeding”, jest zjawiskiem naturalnym. Zaczyna się w momencie zabudowy mieszanki i trwa do momentu rozpoczęcia procesów wiązania spoiwa. Jest procesem samoistnym i wynika z różnicy gęstości pomiędzy stałymi składnikami mieszanki betonowej (kruszywo, cement), a wodą. Woda jako składnik mieszanki o najmniejszej gęstości jest wypierana w górę przez osiadające składniki o większym ciężarze właściwym (rys. 1).



Rys. 1. Schemat wydzielenia wody z mieszanki betonowej.

MOŻNA WYRÓŻNIĆ DWA RODZAJE „BLEEDINGU”:

- ▶ **WEWNĘTRZNY, KTÓRY WYSTĘPUJE W PRZYPADKU ELEMENTÓW PIONOWYCH,**
- ▶ **POWIERZCHNIOWY, KTÓRY JEST OBSERWOWANY PODCZAS WYKONYWANIA POSADZEK LUB NAWIERZCHNI.**

Niewielkie odsączenie wody z mieszanki betonowej jest w pewnym stopniu korzystne ponieważ zapobiega przesuszaniu powierzchni betonu. Natomiast zbyt duży „bleeding” prowadzi do niekontrolowanego zwiększenia współczynnika w/c w strefie przypowierzchniowej, co w konsekwencji powoduje obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu. Obfity „bleeding” może także powodować wzrost ścieralności, a w przypadku posadzek, delaminację warstwy posypki utwardzającej (rys. 2).

Zjawisko odsączenia wody z mieszanki betonowej można kontrolować przez odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy składników betonu.

Tabela 1. Właściwości cementów

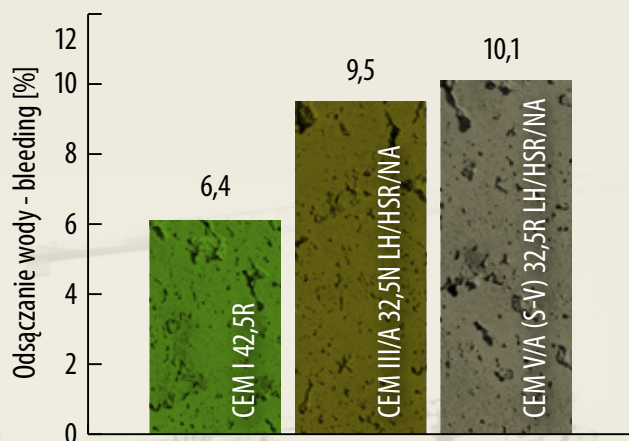
Rodzaj cementu	Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	Początek czasu wiązania [min]
CEM I 42,5R	3710	150
CEM III/A 32,5N LH/HSR/NA	3520	200
CEM V/A (S-V) 32,5R LH/HSR/NA	3270	230



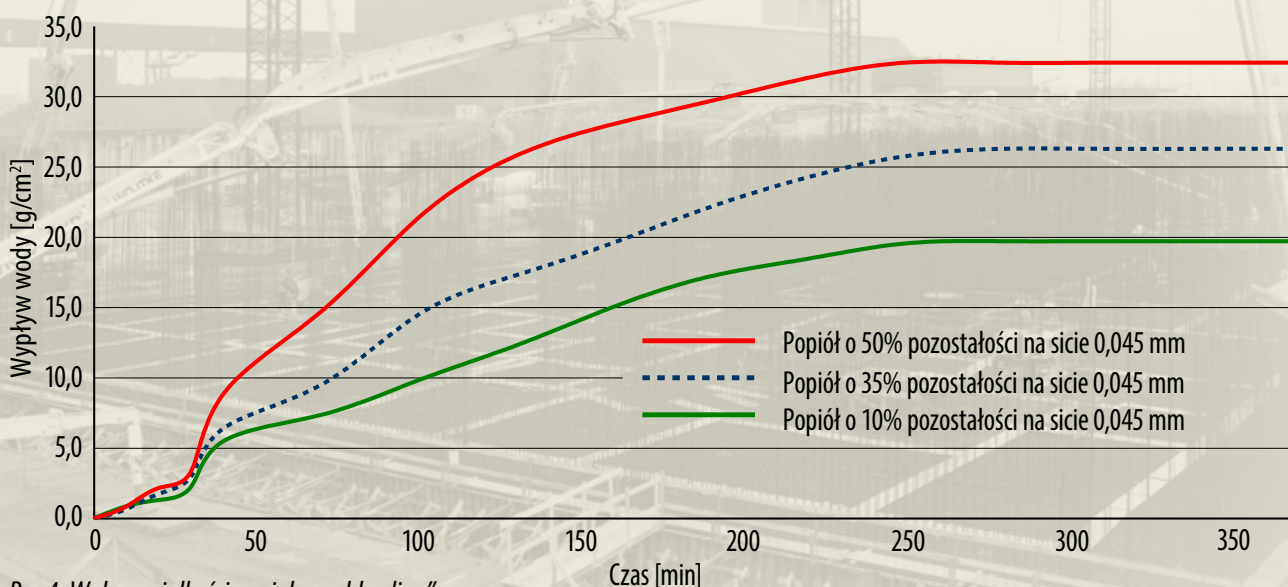
Rys. 2. Uszkodzenia warstwy wierzchniej betonu wskutek „bleedingu”

Tendencja do samoistnego odsączenia wody zależy od rodzaju i właściwości zastosowanego cementu (rys. 3). Duże znaczenie mają szczególnie stopień rozdrobnienia, rodzaj cementu (zawartość klinkieru cementowego) oraz początek czasu wiązania cementu (tabela 1).

Wpływ na ilość odsączonej wody z mieszanki betonowej ma także jakość i ilość stosowanego popiołu lotnego. Miałkość popiołu lotnego, czyli pozostałość na sicie 0,045 mm (maksymalnie 40%), to jedna z podstawowych właściwości popiołów lotnych determinująca jakość. Niższa pozostałość wpływa korzystnie nie tylko na aktywność popiołu i urabialność mieszanki betonowej, ale także ogranicza zjawisko „bleedingu” (rys. 4).



Rys. 3. Wpływ rodzaju cementu na „bleeding”

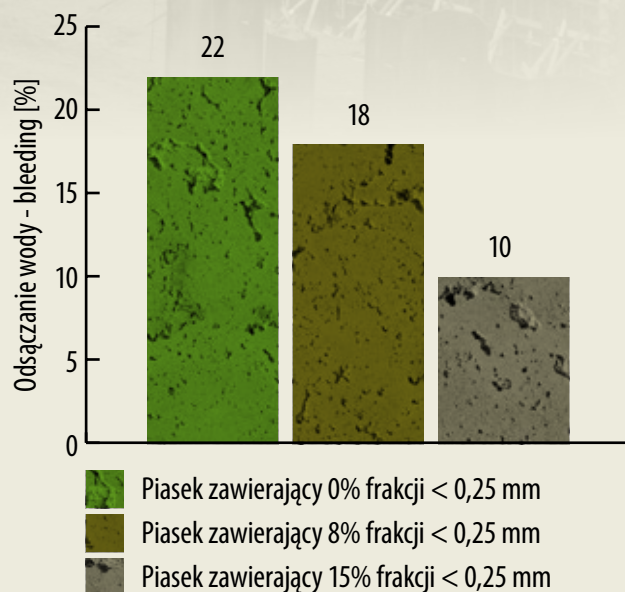


Rys. 4. Wpływ miałkości popiołu na „bleeding”

Szczególnie ważnym aspektem związanym z ograniczeniem wypływu wody z mieszanki betonowej jest odpowiedni dobór uziarnienia kruszywa drobnego. Zaleca się, aby ilość frakcji $0 \div 0,25$ mm w mieszance kruszywowej wynosiła co najmniej 5%. Aby spełnić to wymaganie zawartość frakcji $0 \div 0,25$ mm w piasku powinna zawierać się w przedziale od 13% do 15%. Zastosowanie piasku o niewielkiej zawartości drobnej frakcji w wyraźny sposób zwiększa ilość odsączonej wody (rys. 5).

Przy stosowaniu piasków o niewielkiej zawartości ziaren $<0,25$ mm zalecane jest stosowanie dodatków mineralnych w składzie betonu np. popiołów lotnych lub mączek wapiennych. Alternatywnym rozwiązaniem może być także zastosowanie domieszki chemicznej zwiększającej wiązliwość wody.

Szczególną uwagę należy zwrócić podczas stosowania domieszek opóźniających wiązanie spoiwa w składzie betonu. Wydłużenie początku czasu wiązania cementu może doprowadzić do nasilenia zjawiska odsączenia wody.



Rys. 5. Wpływ uziarnienia piasku na ilość odsączonej wody

Norma PN-EN 206:2014 podaje zalecane wartości graniczne składu oraz właściwości betonu w odniesieniu do klas ekspozycji. Warunkiem zastosowania cementu w wyspecyfikowanej klasie ekspozycji jest potwierdzenie jego przydatności do stosowania w warunkach środowiska opisanych tą klasą. Beton może być poddany więcej niż jednemu oddziaływaniu, a zatem warunki środowiska, w których znajduje się beton, mogą wymagać określenia warunków oddziaływań środowiskowych za pomocą kombinacji klas ekspozycji.

Przy doborze cementu do określonych zastosowań wg PN-EN 206 należy brać pod uwagę:

- realizację robót,
- przeznaczenie betonu,
- warunki pielęgnacji,
- wymiary konstrukcji,
- potencjalną reaktywność alkaliczną kruszyw,
- warunki środowiska.

CEMENTY POWSZECHNEGO UŻYTKU - WYMAGANIA:

- **WYTRZYMAŁOŚĆ WCZESNA (PO 2 LUB 7 DNIACH ZALEŻNIE OD KLASY)**
- **WYTRZYMAŁOŚĆ NORMOWA NA ŚCISKANIE (PO 28 DNIACH)**
- **CZAS WIĄZANIA**
- **STAŁOŚĆ OBJĘTOŚCI**
- **WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE (STRATA PRAŻENIA, ZAWARTOŚĆ CZĘŚCI NIEROZPUSZCZALNYCH, ZAWARTOŚĆ SIARCZANÓW, ZAWARTOŚĆ CHLORKÓW, PUCOLANOWOŚĆ)**

CEMENTY SPECJALNE - DODATKOWE WYMAGANIA:

- **NISKIE CIEPŁO HYDRATACJI (LH)**
- **ODPORNOŚĆ NA SIARCZANY (HSR)**
- **NISKA ZAWARTOŚĆ ALKALIÓW (NA)**

Dobór cementu ma wpływ na trwałość betonu (mrozoodporność, odporność na korozję chemiczną i warunki pasywacji stali zbrojeniowej). Zakres stosowania cementów powszechnego użytku w zależności od klasy ekspozycji przedstawiono w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Zakres stosowania cementów powszechnego użytku

Rodzaj cementu	Zakres i przykłady zastosowania
Cement portlandzki CEM I 42,5 R CEM I 52,5 R Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S 52,5N	<ul style="list-style-type: none"> • cementy znajdują zastosowanie we wszystkich klasach ekspozycji (z wyłączeniem XA2 i XA3, gdzie wymagane jest stosowanie cementów odpornych na siarczany SR lub HSR), • cementy w klasie wytrzymałości 42,5R i 52,5R są szczególnie przydatne w produkcji betonu wysokich klas wytrzymałości (C40/50 i wyższych), • budowa obiektów inżynierii komunikacyjnej - obiekty mostowe, betony nawierzchniowe, • produkcja betonów samozagęszczalnych (SCC), • zaleca się stosowanie przy produkcji wibroprasowanej kostki brukowej, galanterii betonowej, produkcji pokryć dachowych, a także w prefabrykacji wielkogabarytowej żelbetowej i sprężonej, • betonowanie w warunkach obniżonych temperatur, • produkcja zapraw murarskich i tynkarskich

<p>Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 32,5R</p>	<ul style="list-style-type: none"> • znajduje zastosowanie we wszystkich klasach ekspozycji (z wyłączeniem XA2 i XA3, gdzie wymagane jest stosowanie cementów odpornych na siarczany SR lub HSR), • produkcja betonu towarowego klas C8/10 – C35/45, a także betonu samozagęszczalnego SCC, • produkcja betonu i zapraw barwionych oraz zapraw murarskich i tynkarskich, • produkcja prefabrykatów wielko i drobnowymiarowych dojrzewających w warunkach naturalnych lub poddawanych niskociśnieniowej obróbce cieplnej, • budowa dróg oraz obiektów inżynierskich, • stabilizacja gruntu
<p>Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5N</p>	<ul style="list-style-type: none"> • znajduje zastosowanie we wszystkich klasach ekspozycji (z wyłączeniem XA2 i XA3, gdzie wymagane jest stosowanie cementów odpornych na siarczany SR lub HSR), • zalecany jest do produkcji betonu klas wytrzymałości C8/10 do C45/55, betonów samozagęszczalnych SCC oraz betonów wysokiej trwałości, • produkcja betonu i zapraw barwionych oraz zapraw murarskich i tynkarskich, • produkcja wibroprasowanej kostki brukowej, galanterii betonowej, prefabrykacji drobno i wielkogabarytowej żelbetowej lub sprężonej dojrzewającej w warunkach naturalnych lub poddawanych niskociśnieniowej obróbce cieplnej, • znajduje również zastosowanie w budownictwie komunikacyjnym do budowy dróg oraz obiektów inżynierskich
<p>Cement hutniczy CEM III/A 52,5N-NA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • przydatny jest we wszystkich klasach ekspozycji, w klasach ekspozycji XA2 i XA3 należy dodatkowo stosować cement hutniczy odporny na siarczany SR lub HSR, • zalecany jest przy produkcji betonu klas wytrzymałości do C50/60 oraz betonu samozagęszczalnego SCC i betonów wysokiej trwałości, • produkcja betonu i zapraw barwionych oraz zapraw murarskich i tynkarskich, • przydatny przy wykonywaniu mostowych obiektów inżynierskich, • może być stosowany w produkcji prefabrykatów wielko i drobnowymiarowych, • produkcja wibroprasowanej kostki brukowej, galanterii betonowej i dachówki cementowej
<p>Cement hutniczy CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA CEM III/B 42,5L- LH/SR/NA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • znajdują zastosowanie we wszystkich klasach ekspozycji z wyłączeniem klasy ekspozycji XF4, • szczególnie przydatne są w produkcji betonu o podwyższonej odporności na agresję chemiczną, w przypadku obiektów takich jak oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów, zbiorniki na ścieki, instalacje do odsiarczania spalin, fundamenty czy obiekty hydrotechniczne, • wykonywanie betonów masywnych, zapór wodnych itp., • do prac budowlanych w górnictwie, • produkcja betonu zwykłego klasy C8/10 do C40/50 i betonów wysokowartościowych, • produkcja prefabrykatów wielko i drobnowymiarowych dojrzewających w warunkach naturalnych i podwyższonej temperatury • produkcja zapraw murarskich i tynkarskich, zwykłych i barwionych, • znajdują zastosowanie przy budowie nawierzchni drogowych w kategorii ruchu KR1-KR4 (CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA) oraz stabilizacji gruntu
<p>Cement wielokładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • może być stosowany we wszystkich klasach ekspozycji z wyłączeniem klasy XF3 i XF4, • przydatny do wykonywania konstrukcji i elementów narażonych na agresję chemiczną (klasy ekspozycji XA) oraz karbonatację (klasy ekspozycji XC), np. do budowy infrastruktury rolnej, oczyszczalni ścieków itp., • produkcja betonu zwykłego klasy C8/10 do C30/37

Tabela 2. Zakresy stosowania cementów zgodnych z PN-EN 197-1 w betonie w zależności od klasy ekspozycji wg PN-B-06265:2004 (⊙ – akceptowany zakres stosowania, ✗ – brak możliwości stosowania)

Klasy ekspozycji		Rodzaj cementu					
		CEM I 42,5R CEM I 52,5R	CEM II/A-S 52,5N CEM II/B-S 32,5R CEM II/B-S 42,5N	CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	CEM III/A 52,5N-NA	CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA	CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA
Brak zagrożenia korozją	X0	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Karbonatyzacja	XC1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XC2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XC3	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XC4	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Chlorki nie-pochodzące z wody morskiej	XD1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XD2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XD3	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Chlorki pochodzące z wody morskiej	XS1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XS2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XS3	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Zamrażanie / rozmrażanie	XF1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XF2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XF3	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	✗
	XF4	⊙	⊙	✗	⊙	✗ ¹⁾	✗
Agresja chemiczna	XA1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XA2	✗	✗	⊙	✗	⊙	⊙
	XA3	✗	✗	⊙	✗	⊙	⊙
Ścieranie	XM1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XM2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	XM3	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

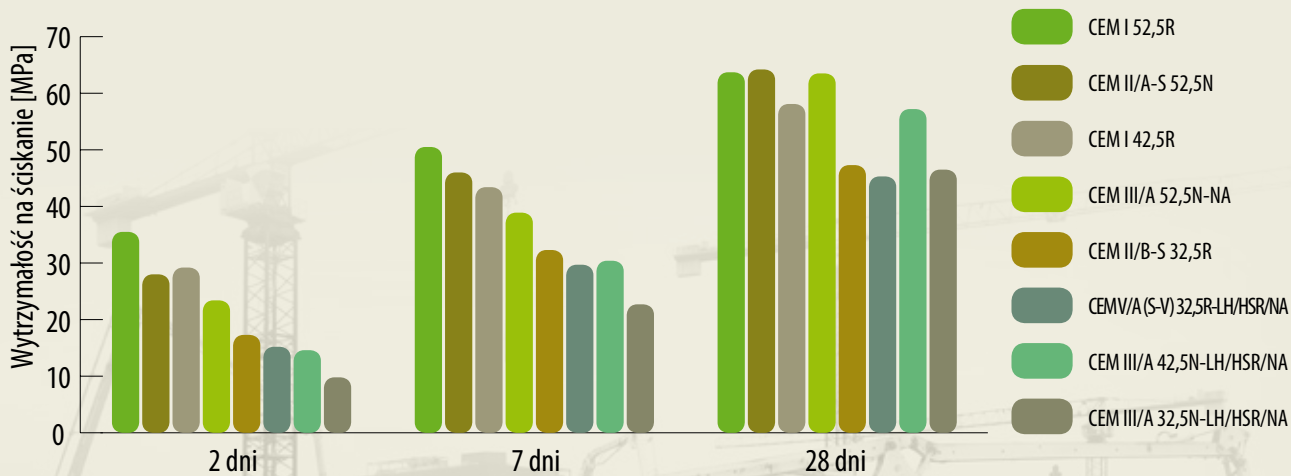
¹⁾ dopuszcza się stosowanie w przypadku:

- elementów konstrukcji budowlanych w wodzie morskiej, jeżeli: $w/c \leq 0,45$; min. klasa wytrzymałości C35/45 i zawartość cementu $\geq 340 \text{ kg/m}^3$,
- trasy najazdu sprzętu mobilnego, jeśli: $w/c \leq 0,35$; min. klasa wytrzymałości C40/50 i zawartość cementu $\geq 360 \text{ kg/m}^3$.

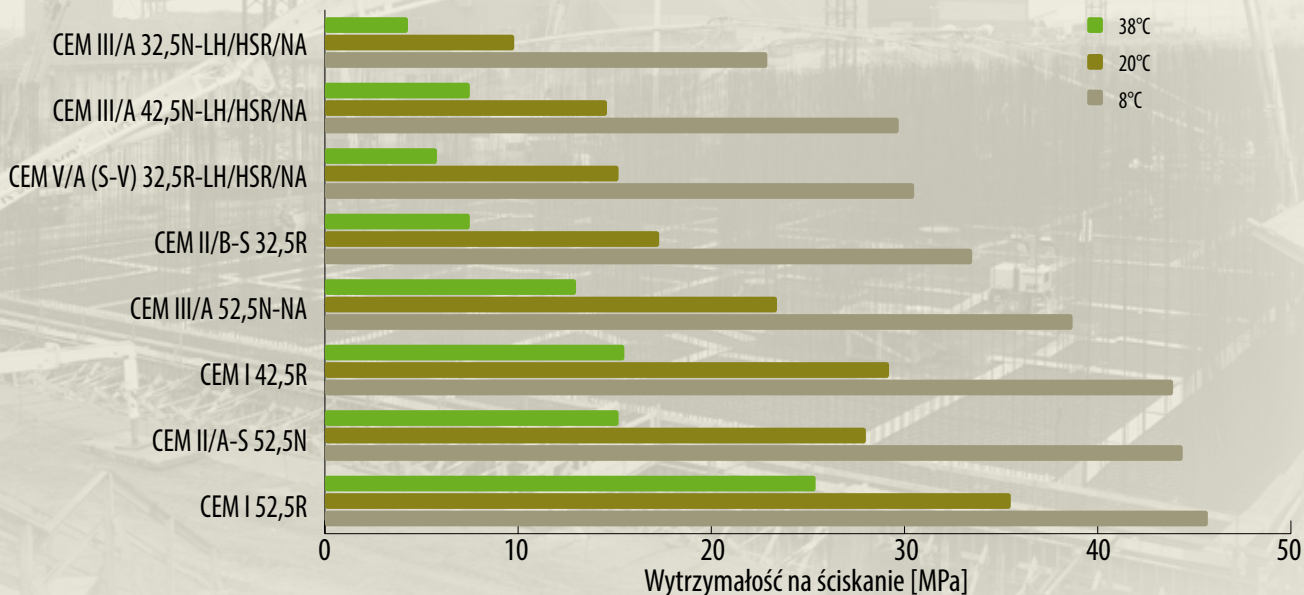
W obu przypadkach nie dopuszcza się porów powietrznych.

DYNAMIKA NARASTANIA WYTRZYMAŁOŚCI

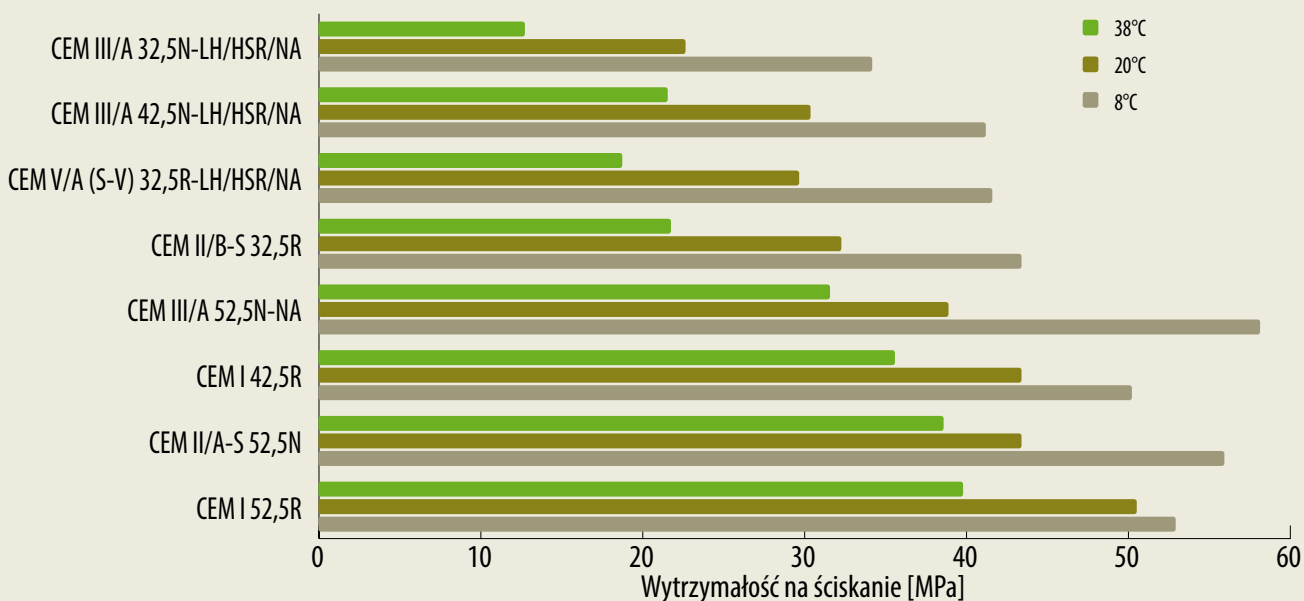
Normowo wytrzymałość cementu oznacza się na zaprawach normowych w temperaturze 20°C po 2 lub 7 dniach (dla wytrzymałości wczesnych) i 28 dniach dla wytrzymałości normowej (rys. 1). Dynamika narastania wytrzymałości, głównie wczesnej, jest związana z ciepłem hydratacji cementu. Im wyższa temperatura betonu (rys. 2 i 3), tym procesy hydratacji zachodzą szybciej, a tym samym szybszy jest przyrost wytrzymałości. Właściwość ta jest istotna z punktu widzenia prefabrykacji betonowej, gdzie szybkość rotacji form jest kluczowa dla procesu produkcyjnego. Największą dynamiką narastania wytrzymałości charakteryzują się cementy portlandzkie CEM I 42,5R, CEM I 52,5R, a także cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S 52,5N oraz cement hutniczy CEM III/A 52,5 N-NA.



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie po 2, 7 i 28 dniach w temperaturze 20°C

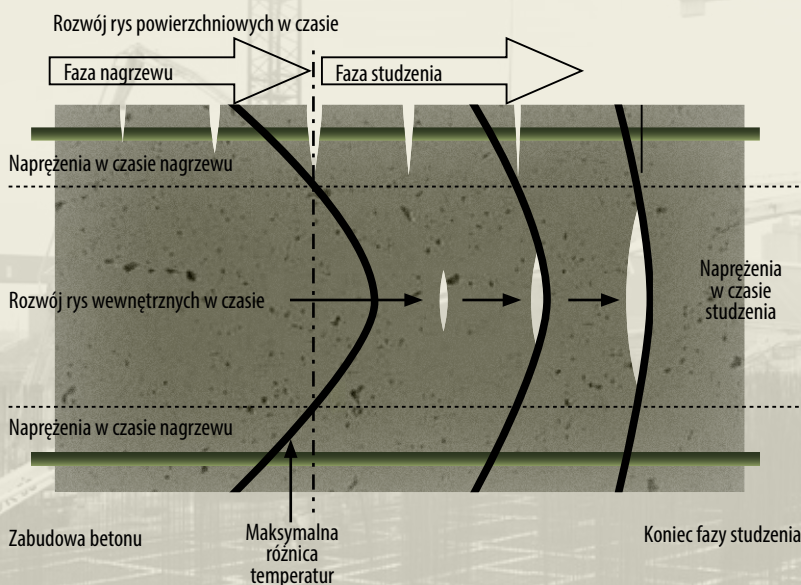


Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach w różnych temperaturach dojrzewania

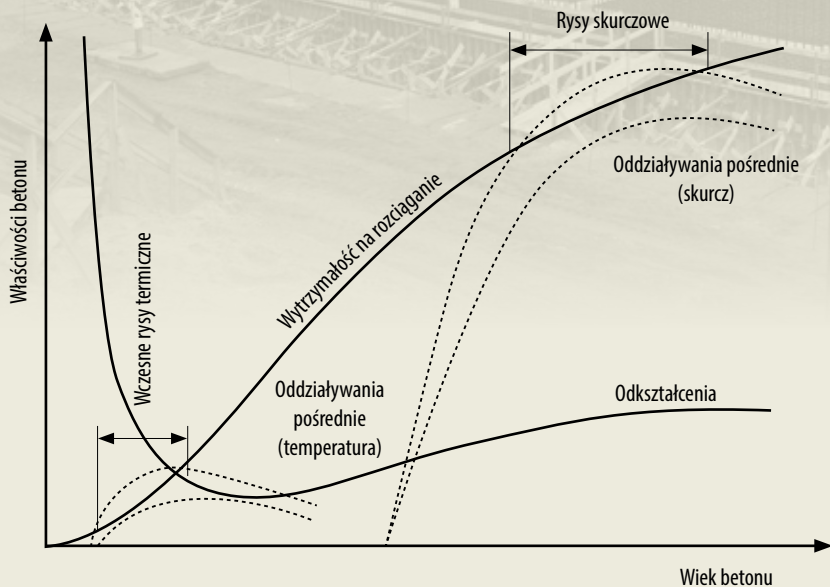


Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach w różnych temperaturach dojrzewania

Efekty termiczne związane z hydratacją cementu nabierają szczególnego znaczenia w betonowych konstrukcjach masywnych. Powstająca w wyniku wydzielanego ciepła w procesie hydratacji cementu, różnica temperatur pomiędzy wnętrzem, a stosunkowo szybko chłodzoną powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego, prowadzi do powstania naprężeń termicznych. Może to w ekstremalnych warunkach skutkować powstawaniem rys w całej objętości elementu betonowego (rys. 1), prowadząc do obniżenia jego trwałości i skrócenia okresu użytkowania.



Rys. 1. Mechanizm powstawania rys w betonowym elemencie masywnym bez więzów zewnętrznych



Rys. 2. Właściwości mechaniczne betonu i zagrożenie tworzenia się rys w twardniejącym betonie

Zarysowania pojawiają się wówczas, gdy naprężenia osiągają wartość wyższą od wytrzymałości betonu na rozciąganie w danym stadium rozwoju struktury. W procesie wiązania i twardnienia betonu, niebezpieczeństwo tego, że naprężenia wewnętrzne będą wyższe od uzyskanych już wytrzymałości, nie jest tendencją stałą. Ryzyko tworzenia się rys termicznych jest najwyższe w początkowym okresie hydratacji cementu, w którym młody beton charakteryzuje się niską wytrzymałością oraz minimalnym poziomem odkształceń granicznych (rys. 2).

Środki zaradcze ograniczające ryzyko zarysowania to przede wszystkim zabiegi technologiczne, mające na celu obniżenie temperatury twardnienia oraz zmniejszenie różnic pomiędzy temperaturą wnętrza i powierzchnią elementu. Wskazane jest, aby gradient temperatur nie przekraczał $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$, a maksymalna temperatura betonu we wnętrzu konstrukcji masywnej nie przekraczała 65°C .

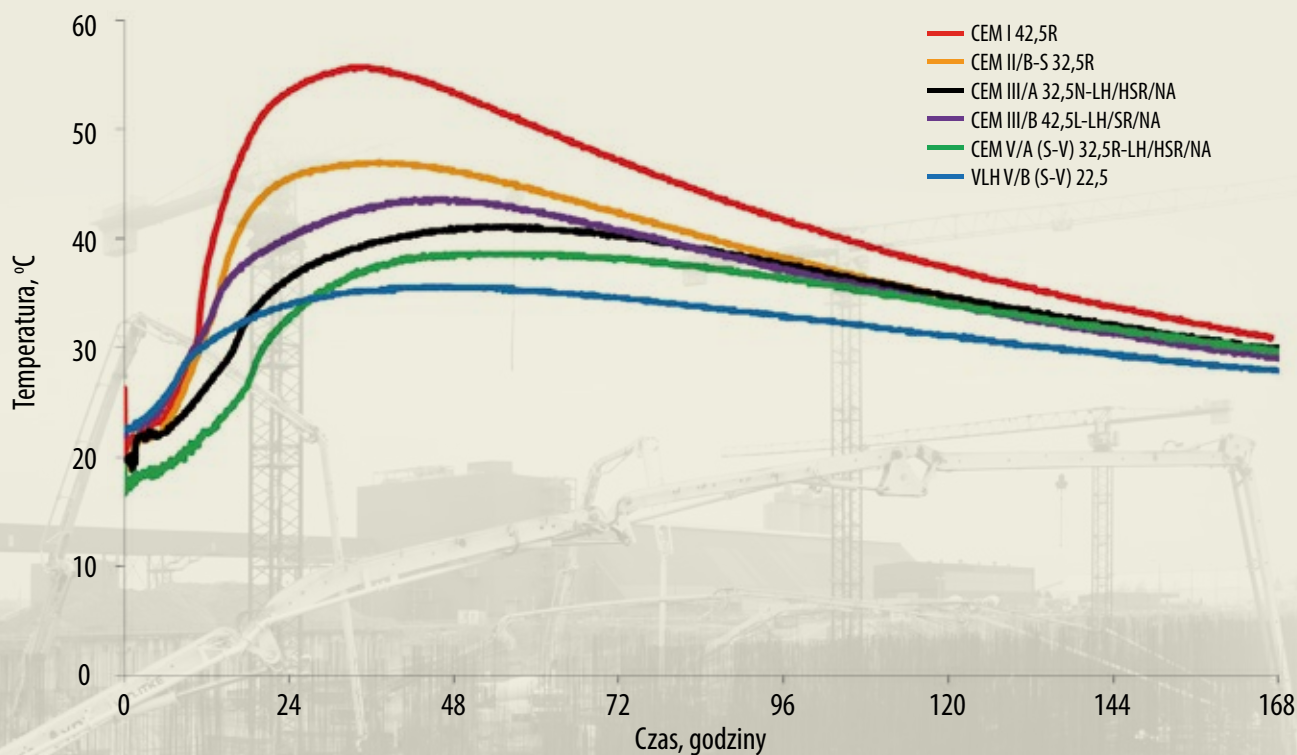
Czynniki wpływające na temperaturę twardnienia i ryzyko powstawania rys w betonowej konstrukcji masywnej przedstawiono w tabeli 1. Czynniki te dzielimy na materiałowe, które związane są odpowiednim doborem składników betonu oraz wykonawcze związane z procesem zabudowy mieszanki betonowej i pielęgnacji betonu.

Najefektywniejszą metodą ograniczenia temperatury twardnienia betonowego elementu masywnego jest „wprowadzenie” z zastosowanym spoiwem jak najmniejszej ilości ciepła z procesu hydratacji. Osiąga się to poprzez zastosowanie w składzie betonu:

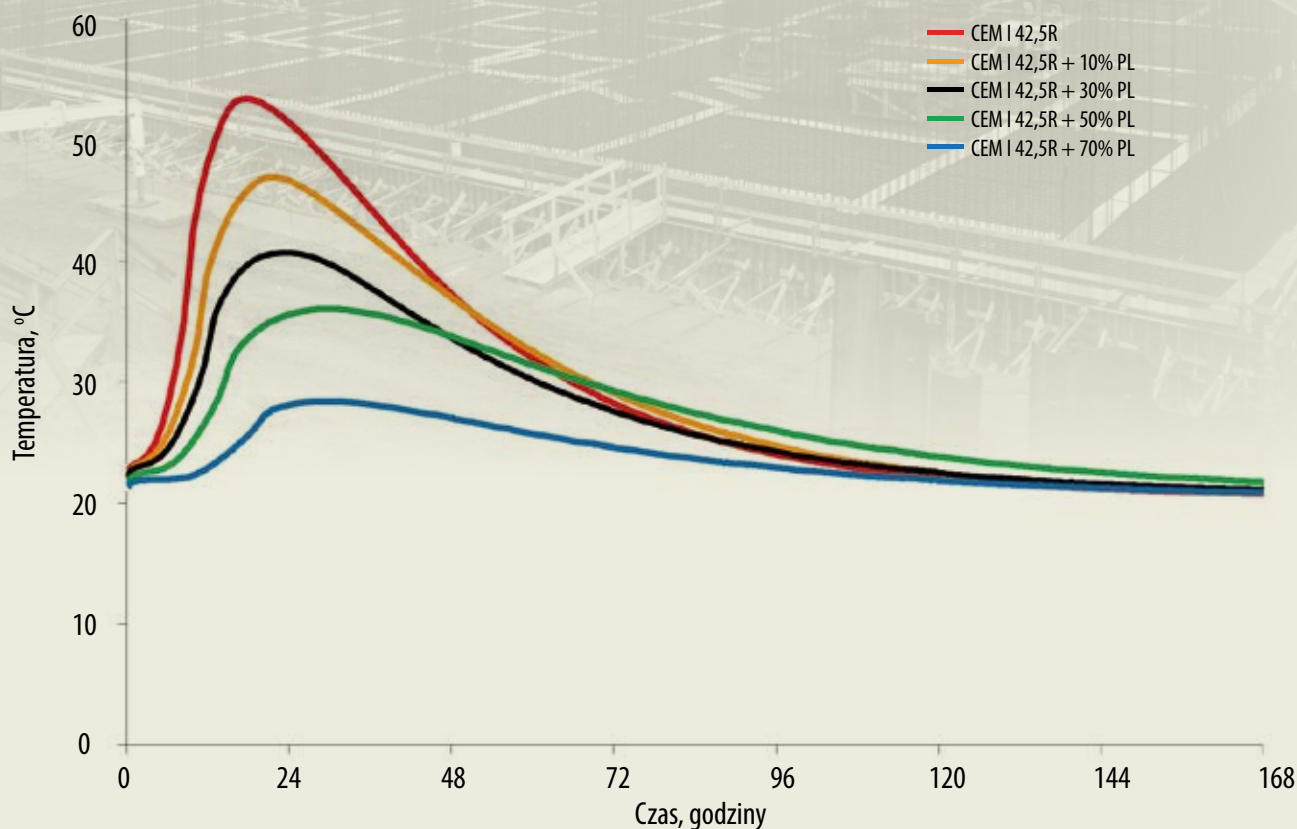
- cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi - CEM II ÷ CEM V, w tym także cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji VLH III ÷ VLH V (rys. 3),
- ograniczonej ilości cementu - zmniejszenie ilości cementu o $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ w składzie betonu obniża jego temperaturę o około 12°C , niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu,
- popiołu lotnego krzemionkowego jako częściowego zamiennika cementu (rys. 4).

Tabela 1. Czynniki wpływające na temperaturę twardnienia i ryzyko zarysowania betonu

Czynnik	Wpływ		Komentarz
	Negatywny	Pozytywny	
Czynniki materiałowe			
Moduł sprężystości kruszywa	Wysoka wartość	Niska wartość	Zwiększenie odkształcalności betonu i stosunku f_{ctm}/E_{cm}
Rodzaj kruszywa	Wysoki współczynnik rozszerzalności cieplnej	Niski współczynnik rozszerzalności cieplnej	Kruszywa o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej, m.in.: marmur, kamień wapienny, granit, bazalt
Maksymalny rozmiar ziaren kruszywa	Mały	Duży	Duży maksymalny rozmiar kruszywa umożliwia zmniejszenie ilości zaczynu cementowego w mieszance betonowej (przy dobrze zaprojektowanej krzywej uziarnienia)
Rodzaj cementu	CEM I	CEM II CEM III CEM IV CEM V	Zastosowanie cementów CEM II ÷ CEM V i/lub dodatków mineralnych w składzie betonu zmniejsza ilość wydzielanego ciepła i szybkość jego wydzielania w czasie
Stosowanie dodatków do betonu	Brak	Popiół lotny	
Domieszki chemiczne	Brak	Plastyfikatory Superplastyfikatory	Zmniejszenie zawartości cementu i/lub obniżenie współczynnika w/c
Temperatura mieszanki	Wysoka	Niska	Obniżenie poprzez schłodzenie kruszywa np. zimną wodą, lodem lub ciekłym azotem
Czynniki wykonawcze			
Temperatura otoczenia	Wysoka	Niska	Prowadzenie betonowania w nocy lub w przypadku dużych elementów wykonanie ich w okresach o stosunkowo niskich temperaturach
Deskowanie dla elementów grubości <500 mm	Poszycie z izolowanej sklejki	Poszycie stalowe, z tworzyw sztucznych zbrojonych włóknem szklanym	Umożliwia szybkie schłodzenie elementu
Deskowanie dla elementów grubości >500 mm	Poszycie stalowe, z tworzyw sztucznych zbrojonych włóknem szklanym	Poszycie z izolowanej sklejki	Izolacja pozwala ograniczyć gradient temperatur oraz kontrolować szybkość odprowadzanie ciepła
Stosowanie izolacji	Brak	Płyty styropianowe, folia, brezent itp.	Ograniczenie zewnętrznych wpływów termicznych
Kolejność betonowania	Betonowanie blokami (naprzemiennie)	Betonowanie sekcjami w kolejności	Nieistotne jeżeli połączenia mają pełną swobodę odkształceń lub gdy betonowanie odbywa się w sposób ciągły
Przerwy pomiędzy kolejnymi etapami betonowania	Długie	Krótkie	Ogranicza gradienty temperatur na styku sąsiednich warstw/bloków i zapewnia lepszą przyczepność pomiędzy warstwami
Rozkład zbrojenia	Pręty o dużej średnicy rozstawione daleko od siebie	Pręty o małej średnicy blisko rozstawione od siebie	Zwiększenie rozwinięcia powierzchni stali zbrojeniowej – poprawa szybkości odprowadzania ciepła z wnętrza betonu



Rys. 3. Przebieg temperatury twardnienia betonu w czasie (zawartość cementu 300 kg/m^3 , $w/c=0,5$)



Rys. 4. Przebieg temperatury twardnienia zaprawy normowej z różną zawartością popiołu lotnego w czasie (PL – popiół lotny krzemionkowy)



Napowietrzenie mieszanki betonowej ma na celu wprowadzenie do struktury betonu dodatkowych porów powietrznych o odpowiednim kształcie, rozmiarze i rozmieszczeniu. Napowietrzenie jest jednym z głównych zabiegów technologicznych mających na celu poprawę odporności betonu na destrukcyjne działanie mrozu.

NAJSKUTECZNIEJSZĄ METODĄ OCHRONY BETONU PRZED DESTRUKCYJNYM DZIAŁANIEM MROZU JEST PRAWIDŁOWE NAPOWIETRZENIE

Korozja mrozowa (cykliczne zamrażanie i rozmrażanie) powoduje uszkodzenia struktury betonu wskutek zamarzania wody w porach kapilarnych betonu. Zamarzająca woda zmienia stan skupienia, przemianie fazowej woda-lód towarzyszy zmiana objętości o około 9%. Ponieważ cała objętość kapilary, w której zamarza woda, jest nią wypełniona, powstający lód nie ma wolnych przestrzeni na kompensację zwiększonej objętości. W wyniku tego, wewnątrz kapilary powstaje wysokie ciśnienie (około 110 MPa). Beton, jako ciało kruche, charakteryzuje się stosunkowo niewielką wytrzymałością na rozciąganie, szacowaną na około 10% wartości wytrzymałości na ściskanie. W efekcie powstającego ciśnienia, generowane są naprężenia wewnętrzne, których wartości przekraczają poziom wytrzymałości betonu na rozciąganie, powodując uszkodzenie struktury betonu, objawiające się zarysowaniem, powierzchniowym złuszczeniem i odpryskami. Przykłady destrukcyjnego działania mrozu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykłady destrukcji betonu wskutek agresji mrozowej

Poprawne napowietrzenie betonu polega na wprowadzeniu drobnych, regularnie rozmieszczonych, sferycznych pęcherzyków powietrznych, niepołączonych ze sobą i przerywających system porów kapilarnych w betonie (rys. 2).

Prawidłowo napowietrzony beton powinien charakteryzować się:

- zawartością powietrza na poziomie 4 do 6%,
- jak największą zawartością mikroporów ($< 0,3$ mm), minimum 1,5%,
- wskaźnikiem rozmieszczenia porów poniżej $0,2 \pm 0,25$ mm.

Wymagania dotyczące całkowitej zawartości powietrza, w tym zawartości mikroporów i ich rozmieszczenia, zawarte są w normie PN-EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” oraz w Ogólnych Specyfikacjach Technicznych (OST) opracowanych przez GDDKiA - tabela 1 i 2.

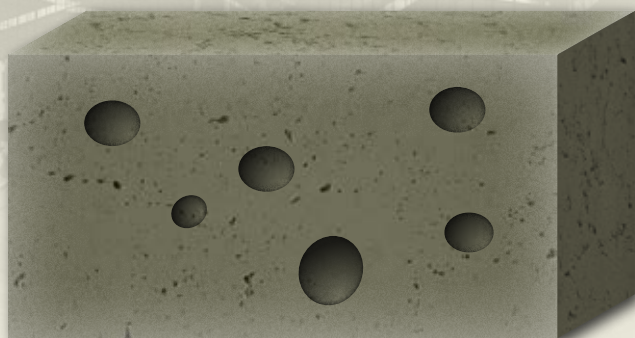
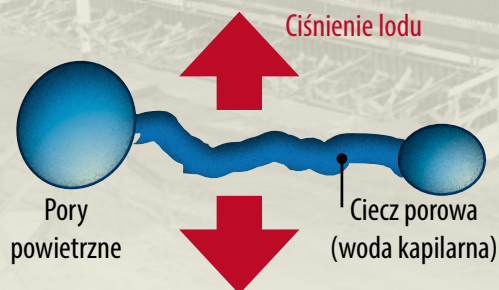
Tabela 1. Wymagania dotyczące napowietrzenia betonu

Norma/Specyfikacja techniczna	Wymaganie	Klasa ekspozycji			
		XF1	XF2	XF3	XF4
PN-EN 206	Zawartość powietrza	-	$\geq 4,0\%$	$\geq 4,0\%$	$\geq 4,0\%$
OST „Nawierzchnia z betonu cementowego”	Zawartość mikroporów o średnicy $< 0,3$ mm (A_{300})	OST nie przewiduje nawierzchni w tych klasach ekspozycji		$\geq 1,5\%$	
	Wskaźnik rozmieszczenia porów L			$\leq 0,25$ mm	$\leq 0,20$ mm
	Zawartość powietrza			wg tabeli 2	
OST „Beton konstrukcyjny”	Zawartość powietrza	-	wg tabeli 2		

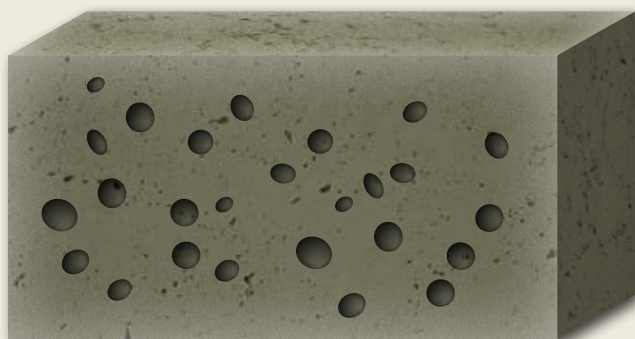
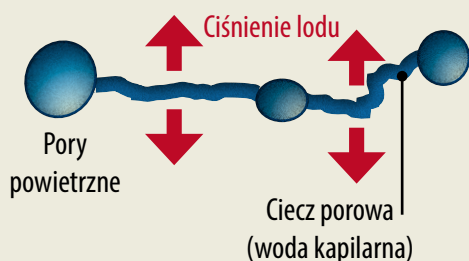
Tabela 2. Wymagania dotyczące napowietrzenia mieszanki betonowej wg OST

Maksymalny wymiar kruszywa [mm]	Etap wykonania badań		Tolerancja pomiarowa [%]
	Projektowanie składu mieszanki betonowej [%]	Zatwierdzenie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości robót [%]	
Beton nawierzchniowy			
8	5,0÷6,5	5,0÷7,0	-0,5 +1,0
16 lub 22,4	4,5÷6,0	4,5÷6,5	
31,5	4,0÷5,5	5,0÷6,5	
Beton konstrukcyjny			
16,0	4,5÷6,0	4,5÷6,5	-0,5 +1,0
22,4	4,0÷5,5	4,0÷6,0	
31,5	4,0÷5,5	4,0÷6,0	

Napowietrzenie mieszanki betonowej, czyli kontrolowane wprowadzenie porów powietrznych uzyskuje się w efekcie zastosowania domieszki napowietrzającej, jako składnika betonu. Określenie optymalnej ilości domieszki nie jest łatwe, ponieważ zalecane przez producenta przedziały dozowania są zwykle dosyć szerokie, zaś efektywność w przypadku domieszek napowietrzających zależy od wielu czynników (tabela 3). Należy przy tym pamiętać, że wprowadzenie dodatkowej ilości powietrza skutkuje obniżeniem wytrzymałości betonu na ściskanie.



Beton bez domieszki napowietrzającej



Beton z domieszką napowietrzającą

Rys. 2. Wpływ napowietrzenia na ograniczenie ciśnienia lodu przez przerwanie ciągłości porów kapilarnych

KAŻDY 1 % DODATKOWO WPROWADZONEGO POWIETRZA POWODUJE OBNIŻENIE WYTRZYMAŁOŚCI BETONU NA ŚCISKANIE DO 5%

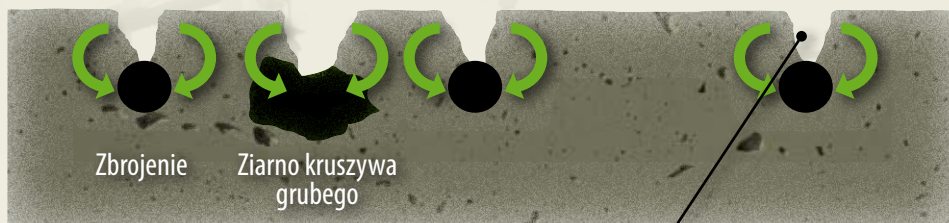
Wprowadzenie do mieszanki betonowej powietrza powoduje, przede wszystkim poprawę mrozoodporności, a dodatkowo także zwiększenie objętości zaczynu cementowego, obniżenie tarcia wewnętrznego, ułatwienie poślizgu między ziarnami kruszywa, zmniejszenie tendencji do segregacji składników, ograniczenie „bleedingu” i poprawę urabialności mieszanki betonowej.

Tabela 3. Czynniki wpływające na efektywność napowietrzenia

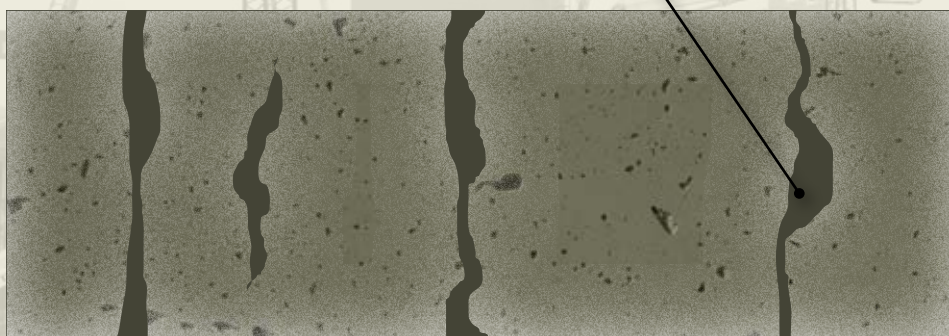
Czynnik	Zmniejsza napowietrzenie	Zwiększa napowietrzenie	Komentarz
Temperatura mieszanki	Wysoka	Niska	Przy tym samym stopniu dozowania domieszki napowietrzającej, wzrost temperatury mieszanki betonowej skutkuje obniżeniem zawartości powietrza
Rodzaj cementu	CEM II÷CEM V	CEM I	Im większa zawartość składników nieklinkerowych w cemencie, tym trudniej napowietrzyć mieszankę betonową (przy tym samym dozowaniu domieszki napowietrzającej)
Czas mieszania	Krótki	Wydłużony	Należy dobrać doświadczalnie w celu uzyskania jak najefektywniejszego napowietrzenia
Czas dozowania na węźle betoniarskim	-	-	
Klasa wytrzymałości cementu	42,5 52,5	32,5	Cementy wyższej klasy wytrzymałości zwykle wymagają większego dozowania domieszki napowietrzającej dla uzyskania tego samego poziomu napowietrzenia
Ilość cementu	Większa	Mniejsza	Im większa zawartość cementu, tym większe dozowanie domieszki napowietrzającej (dla uzyskania tego samego poziomu napowietrzenia)
Dodatki do betonu wg PN-EN 206	Tak	Nie	Stosowanie dodatków do betonu (szczególnie popiołu lotnego) utrudnia prawidłowe napowietrzenie mieszanki, a przy tym wymaga większego dozowania domieszki napowietrzającej
Zawartość frakcji 0,25÷0,5 mm w piasku	Niska	Wysoka	Wysoka zawartość frakcji 0,25÷0,5 mm w piasku powoduje zwiększenie napowietrzenia
Konsystencja betonu	Klasa S1-S2 wg PN-EN 206	Klasa S3-S4 wg PN-EN 206	Niski stopień upłynnienia mieszanki betonowej utrudnia prawidłowe napowietrzenie mieszanki. Mieszanki o konsystencji ciekłej łatwiej z kolei odpowietrzyć
Prędkość mieszania w betonomieszarce	Niska	Wysoka	Im większa prędkość mieszania, tym większe ryzyko dodatkowego napowietrzenia podczas transportu



Osiadanie i pękanie plastyczne betonu występuje, gdy mieszanka betonowa jest jeszcze plastyczna, a proces wiązania nie został rozpoczęty. Przyczyną tworzących się pęknięć jest ograniczanie swobodnego osiadania zabudowanej mieszanki betonowej przez, znajdujące się w niewielkiej odległości od powierzchni, ziarna kruszywa grubego lub pręty zbrojeniowe (rys. 1).



Rysy powstałe w skutek osiadania plastycznego betonu



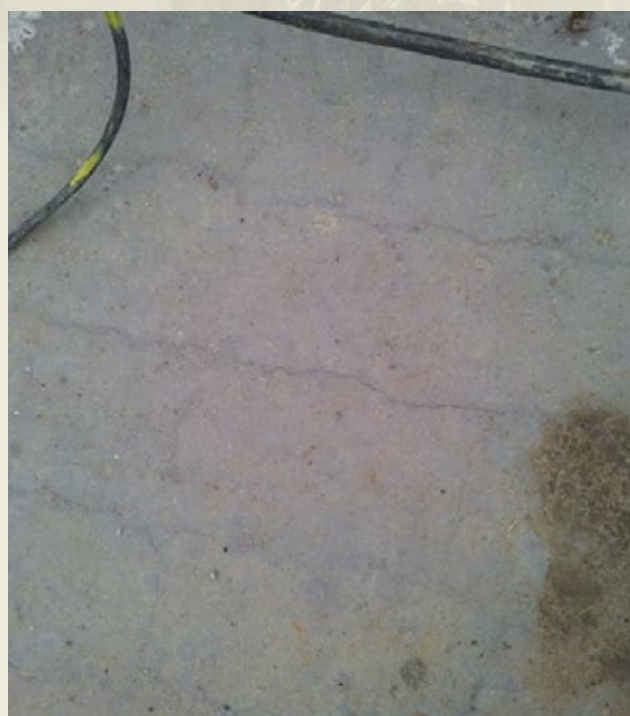
Rys. 1. Schemat zarysowania betonu wskutek osiadania plastycznego

Zarysowania powstałe wskutek osiadania plastycznego w większości przypadków występują w strefie otuliny (pomiędzy powierzchnią betonu, a górną warstwą zbrojenia), przez co nie wpływają znacząco na właściwości mechaniczne konstrukcji, aczkolwiek w znacznym stopniu obniżają trwałość betonu. Wyjątek stanowią elementy utwierdzone, w których rysy od osiadania mogą ulec propagacji wskutek wystąpienia skurczu twardnienia (rys. 3). Rysy powstałe w ten sposób przebiegają przez całą wysokość elementu niosąc ze sobą ryzyko obniżenia trwałości konstrukcji żelbetowej i pogorszenia właściwości mechanicznych betonu.

Zjawisko osiadania plastycznego wynika z wielu czynników, m.in.:

- gwałtownej utraty wody z warstw powierzchniowych betonu (niewłaściwa pielęgnacja),
- nieodpowiednio prowadzonego procesu zabudowy mieszanki betonowej (niewłaściwe, niedostateczne zagęszczenie),
- zbyt małej grubości otuliny zbrojenia,
- zbyt płynnej konsystencji mieszanki,
- znacznego bleedingu (wypływu wody z mieszanki betonowej),
- stosowania mieszanek betonowych o zbyt opóźnionym czasie wiązania.

Bardzo często przyczyną osiadania plastycznego jest przenoszenie drgań na zabudowaną w deskowaniu mieszankę betonową. Drgania, powstające w efekcie pracy urządzeń, sprzętu i maszyn budowlanych na terenie budowy, wywołują niekontrolowane przemieszczanie się świeżo ułożonej mieszanki betonowej, a przez to zmianę zabudowanej wysokości.



Rys. 2. Zarysowanie powierzchni betonu wskutek osiadania plastycznego

Obecność „przeszkód” dla osiadającej mieszanki sprawia, że w przypadku elementów zbrojonych, na powierzchni zabudowanego betonu, odzwierciedla się układ górnej, przypowierzchniowej siatki zbrojeniowej (rys. 2).

Zazwyczaj pęknięcia wywołane osiadaniem plastycznym powstają w okresie od 2 do 4 godzin od zabudowy betonu, mogą jednak pozostawać niezauważone do momentu wystąpienia skurczu plastycznego (2 do 8 godzin), który powoduje wzrost rozwartości rys oraz propagację zarysowania.



Rys. 3. Propagacja zarysowań w elementach utwardzonych

Ograniczenie zjawiska osiadania plastycznego można osiągnąć już na etapie projektowania receptury betonu, poprzez odpowiedni dobór składników betonu, ze szczególnym uwzględnieniem zakładanej klasy konsystencji. W praktyce, w celu zwiększenia klasy konsystencji powyżej projektowanej, na budowie często dodaje się wodę do mieszanki betonowej lub stosuje się domieszki chemiczne. W efekcie takich działań może wystąpić nadmierny bleeding (wydzielanie wody na powierzchnię), szczególnie gdy zawartość frakcji drobnych w mieszance betonowej jest ograniczona. Wskutek „bleedingu” dochodzi do zmian objętości zabudowanej mieszanki betonowej jeszcze przed jej stwardnieniem, co przekłada się na znaczny wzrost ryzyka zarysowania.

Podstawowymi sposobami przeciwdziałania osiadaniu plastycznemu są:

- stosowanie osłon zmniejszających odparowanie wody z zabudowanej mieszanki betonowej,
- prawidłowo przeprowadzony proces zabudowy,
- zacieranie lub powtórne zawibrowanie powierzchni betonu,
- zwiększenie grubości otuliny,
- produkcja mieszanek betonowych zgodnie z ich zakresem konsystencji,
- odpowiednia zawartość frakcji drobnych w mieszance betonowej.

Należy zwrócić uwagę na jakość kruszywa drobnego stosowanego w betonie, w Polsce bardzo często stosowane są piaski o niewielkiej ilości frakcji drobnych $\leq 0,25\text{mm}$ (poniżej 7-8%). Kruszywo takie wymaga zastosowania w mieszance betonowej dodatków mineralnych lub specjalnych domieszek chemicznych zwiększających więziowość wody.

Na etapie zabudowy mieszanki betonowej należy stosować następujące zabiegi:

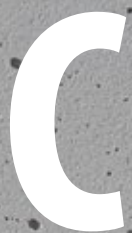
- uwzględnienie przerwy roboczej (tam gdzie jest to możliwe, dla elementów o wymiarze przekroju ponad 30cm) przed zabudową wierzchniej warstwy mieszanki betonowej (rys. 4) – poniżej górnej siatki zbrojeniowej,
- rewibracja mieszanki betonowej po zabudowaniu całej objętości,
- zacieranie powierzchni ułożonej mieszanki betonowej (rys. 5) - najskuteczniejszy i najprostszy sposób eliminacji powstałych rys, ponieważ odpowiednio przeprowadzona całkowicie i trwale zamyka powstałe pęknięcia, zapobiegając tym samym ich propagacji oraz wnikanii czynników agresywnych w strukturę betonu.



Rys. 4. Zastosowanie przerwy roboczej, poniżej górnej warstwy zbrojenia, przed zabudową wierzchniej warstwy mieszanki betonowej



Rys. 5. Zacieranie powierzchni betonu



C

BETON STWARDNIAŁY

KLASA EKSPOZYCJI – ODDZIAŁYWANIE ŚRODOWISKA NA BETON W KONSTRUKCJI. ODDZIAŁYWANIA MOGĄ MIEĆ CHARAKTER CHEMICZNY LUB FIZYCZNY (RYS. 1), MOGĄ WPŁYWAĆ NA BETON LUB NA ZBROJENIE, LUB INNE ZNAJDUJĄCE SIĘ W NIM ELEMENTY METALOWE, KTÓRE W PROJEKIE KONSTRUKCYJNYM NIE ZOSTAŁY UWZGLĘDNIONE JAKO OBCIĄŻENIA.



Rys. 1. Klasy ekspozycji wg PN-EN 206:2014

Norma PN-EN 206:2014 określa dla danej klasy ekspozycji wymagania dotyczące składu i właściwości betonu (tabela 1) tj.:

- minimalną zawartość cementu,
- maksymalny współczynnik w/c,
- minimalną klasę wytrzymałości na ściskanie betonu,
- napowietrzenie, rodzaj cementu.

PRZESTRZEGANIE ZASAD NORMOWYCH GWARANTUJE OBIEKTOM WYKONANYM Z BETONU TRWAŁOŚĆ PRZEZ OKRES UŻYTKOWANIA CO NAJMNIEJ 50 LAT.

Tabela 1. Wymagania dotyczące betonu w klasach ekspozycji wg PN-EN 206:2014

Klasa ekspozycji	Opis środowiska	Przykład przyporządkowania do danej klasy	Min. zawartość cementu [kg/m ³]	Max. współczynnik w/c	Min. klasa wytrz. na ściskanie
Brak zagrożenia korozją lub agresją środowiska					
XO	Dla betonów niezbrojonych wszystkie klasy oprócz XF, XA	Elementy betonowe wewnątrz budynków o małej wilgotności powietrza	—	—	C12/15

Tabela 1. Wymagania dotyczące betonu w klasach ekspozycji wg PN-EN 206:2014 cd.

Korozyja wywołana karbonatyzacją					
XC1	Suche lub stale mokre	Elementy betonowe wewnątrz budynków o normalnej wilgotności powietrza	260	0,65	C20/25
XC2	Mokre, sporadycznie suche	Części konstrukcji hydrotechnicznych; większość fundamentów	280	0,60	C25/30
XC3	Umiarkowanie wilgotne	Elementy betonowe wewnątrz budynków o podwyższonej wilgotności powietrza; Zewnętrzne elementy betonowe osłonięte przed deszczem;	280	0,55	C30/37
XC4	Cyklicznie: suche – mokre	Elementy narażone na kontakt z wodą, spoza klasy ekspozycji XC2	300	0,50	C30/37
Korozyja wywołana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej					
XD1	Umiarkowanie wilgotne	Elementy betonowe narażone na działanie chlorków z powietrza	300	0,55	C30/37
XD2	Mokre sporadycznie suche	Betonowe elementy basenów kąpielowych; betonowe elementy zbiorników przemysłowych gromadzących roztwory chlorków;	300	0,55	C30/37
XD3	Cyklicznie: suche - mokre	Części mostów, nawierzchnie betonowe dróg i parkingów	320	0,45	C35/45
Korozyja wywołana chlorkami pochodzącymi z wody morskiej					
XS1	Działanie soli zawartych w powietrzu	Elementy zlokalizowane w pobliżu wybrzeża	300	0,50	C30/37
XS2	Stałe zanurzenie	Zatopione części konstrukcji morskich	320	0,45	C35/45
XS3	Strefy pływów, rozbryzgów i aerozoli	Strefy rozbryzgu i obmywania konstrukcji morskich (w efekcie falowania morza)	340	0,45	C35/45
Agresja spowodowana zamrażaniem/rozmarzaniem ¹⁾					
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą	Pionowe powierzchnie narażone na deszcz i zamarzanie	300	0,55	C30/37
XF2 ²⁾	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie konstrukcji drogowych narażone na zamarzanie i działanie środków odladzających z powietrza	300	0,55	C25/30
XF3 ²⁾	Silne nasycenie wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie narażone na deszcz i zamarzanie	320	0,50	C30/37

Tabela 1. Wymagania dotyczące betonu w klasach ekspozycji wg PN-EN 206:2014 cd.

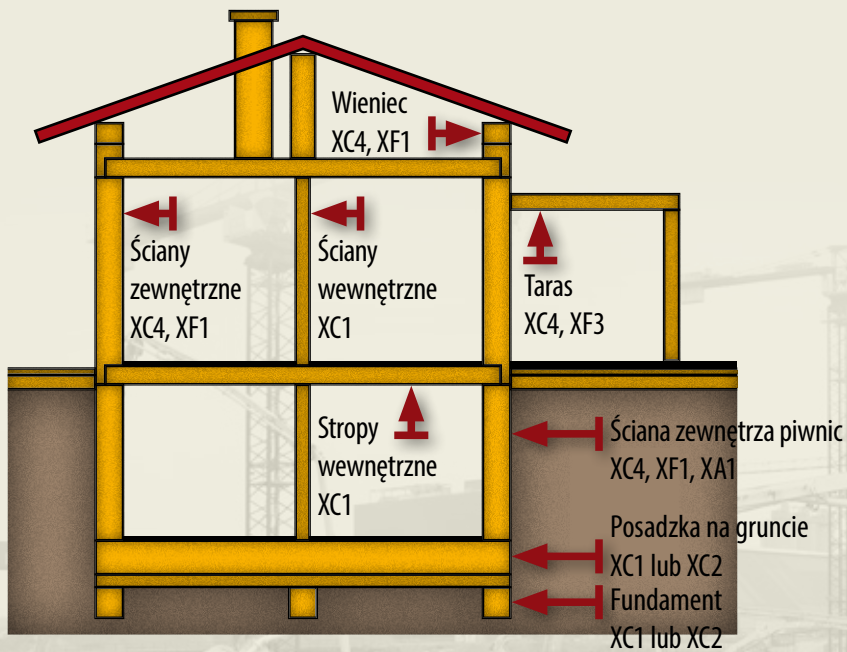
XF4 ²⁾	Silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających, Powierzchnie betonowe i strefy rozbrzygów narażone na działanie wody i zamarzanie	340	0,45	C30/37
Agresja chemiczna					
XA1	Słaba agresja chemiczna	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową zgodnie z tabelą 2	300	0,55	C30/37
XA2 ³⁾	Umiarkowana agresja chemiczna	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową zgodnie z tabelą 2	320	0,50	C30/37
XA3 ³⁾	Silna agresja chemiczna	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową zgodnie z tabelą 2	360	0,45	C35/45
1) dla klas ekspozycji XF należy stosować kruszywo zgodne z PN-EN 12620 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmarzanie 2) dla klas ekspozycji XF2–XF4 wymagany jest minimalny poziom napowietrzenia 4% i stosowanie kruszywa mrozoodpornego 3) dla klas ekspozycji XA2, XA3 wymagane jest stosowanie cementów odpornych na siarczany SR lub HSR					

Klasyfikacja agresywnych środowisk chemicznie XA (tabela 2) dotyczy gruntów naturalnych i wody gruntowej o temperaturze od 5°C do 25°C i tak wolnemu przepływowi wody, że można go określić jako warunki statyczne. Klasę determinuje najbardziej niekorzystna wartość właściwości chemicznej. Określenia klasy środowiska agresywnego chemicznie dokonujemy na podstawie przyporządkowania wartości danej charakterystyki chemicznej do przedziału wartości z tabeli 2. Gdy dwa lub więcej parametrów agresywności wskazują na tę samą klasę, środowisko należy zakwalifikować do następnej wyższej klasy, chyba że dodatkowe badanie dla określonego przypadku udowodni, że nie jest to konieczne.

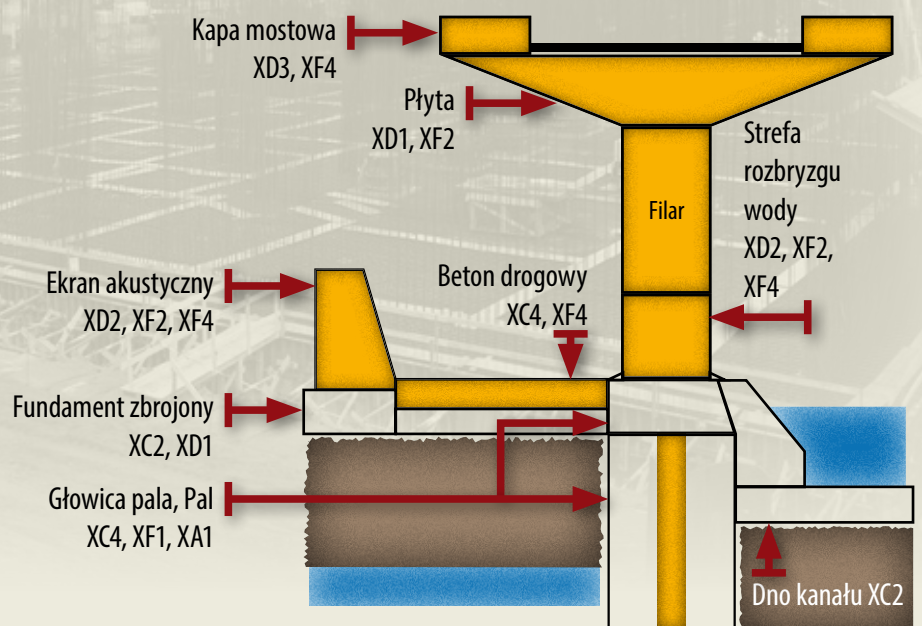
Tabela 2. Wartości graniczne dla klas ekspozycji XA

Właściwość chemiczna	Metoda badania	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	EN 196-2	≥ 200 i ≤ 600	> 600 i ≤ 3000	> 3000 i ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 i ≥ 5,5	< 5,5 i ≥ 4,5	< 4,5 i ≥ 4,0
CO ₂ agresywny [mg/l]	EN 13577	≥ 15 i ≤ 40	> 40 i ≤ 100	> 100 aż do nasycenia
NH ⁴⁺ [mg/l]	ISO 7150-1	≥ 15 i ≤ 30	> 30 i ≤ 60	> 60 i ≤ 100
Mg ²⁺ [mg/l]	EN ISO 7980	≥ 300 i ≤ 1000	> 1000 i ≤ 3000	> 3000 aż do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ całkowite ^{a)} [mg/kg]	EN 196-2 ^{b)}	≥ 200 i ≤ 3000 ^{c)}	> 3000 ^{c)} i ≤ 12000	> 12000 i ≤ 24000
Kwasowość według Bauman-Gully'ego [ml/kg]	prEN 16502	> 200	nie spotykane w praktyce	
a) Grunty gliniaste o przepuszczalności poniżej 10 ⁻⁵ m/s mogą być przesunięte do niższej klasy. b) Metoda badania przewiduje ekstrakcję SO ₄ ²⁻ z użyciem kwasu chlorowodorowego; alternatywnie można zastosować ekstrakcję wodną, jeżeli takie badania były już wcześniej prowadzone w miejscu stosowania betonu. c) W przypadku, gdy istnieje ryzyko akumulacji jonów siarczanowych w betonie na skutek cyklicznego wysychania i nawilżania lub podciągania kapilarnego, wartość graniczną 3000 mg/kg należy zmniejszyć do 2000 mg/kg				

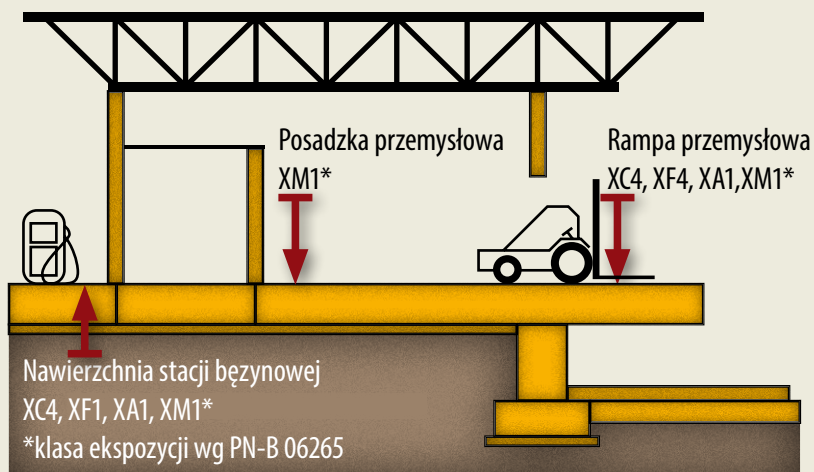
Beton może być poddany więcej niż jednemu oddziaływaniu, a zatem warunki środowiska, w których znajduje się beton, mogą wymagać określenia kombinacji klas ekspozycji. Różne powierzchnie betonowe danego elementu konstrukcyjnego mogą być narażone na różne oddziaływania środowiskowe (rys. 2).



b) obiekt mieszkalny



b) obiekt inżynierii komunikacyjnej



c) obiekt przemysłowy

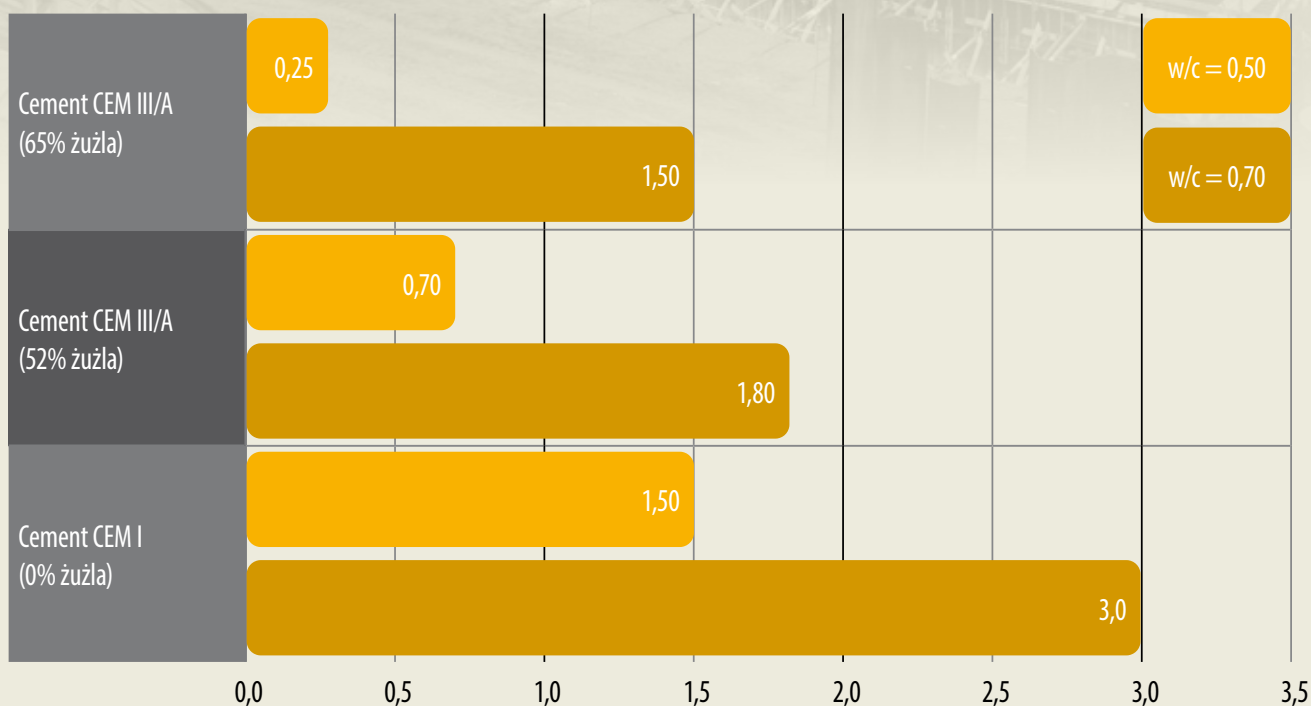
Rys. 2. Przykłady klas ekspozycji w różnych obszarach budownictwa

Beton w konstrukcji musi charakteryzować się **TRWAŁOŚCIĄ**, czyli zachowaniem właściwości w założonych warunkach środowiska, przy minimalnych nakładach na konserwację, przez zaprojektowany okres eksploatacji. Zgodnie z normą PN-EN 206:2014 warunki środowiska określa się za pomocą tzw. klas ekspozycji, a założony okres trwałości betonu wynosi 50 lat. W okresie użytkowania konstrukcje betonowe narażone są na działanie wielu czynników środowiskowych powodujących degradację betonu. Proces niszczenia betonu w wyniku oddziaływania środowiska definiuje się jako korozję. Wyróżnia się dwa rodzaje korozji betonu: wewnętrzną i zewnętrzną. Przyczyną korozji wewnętrznej mogą być składniki, z których wykonano beton (głównie alkalia obecne w cemencie lub domieszkach, a także zbyt duża zawartość gipsu CaSO_4). Korozja zewnętrzna zachodzi pod działaniem niekorzystnych czynników zewnętrznych.

NAJCZĘŚCIEJ WYSTĘPUJĄCYMI RODZAJAMI KOROZJI BETONU SĄ:

- ▶ KARBONATYZACJA,
- ▶ KOROZJA CHLORKOWA,
- ▶ KOROZJA SIARCZANOWA,
- ▶ KOROZJA SPOWODOWANA REAKCJĄ ALKALIA-KRUSZYWO.

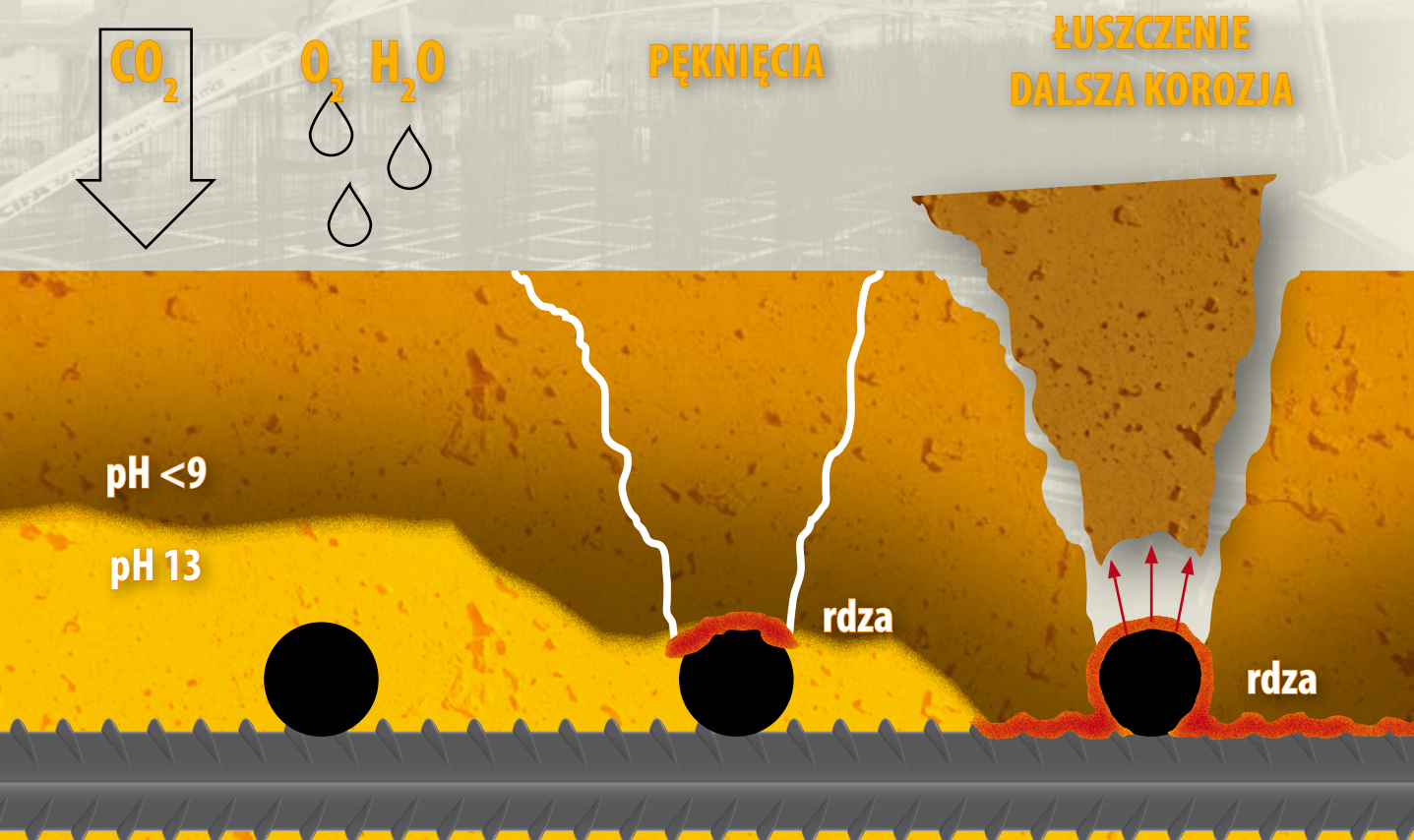
Dla zapewnienia odpowiedniej trwałości betonu w założonym środowisku, należy odpowiednio zaprojektować skład betonu (rodzaj i ilość cementu, wielkość współczynnika w/c, jakość kruszywa, rodzaj domieszek, rodzaj i ilość dodatków do betonu) tak, aby beton charakteryzował się szczelną matrycą. Kształtowanie szczelności betonu, np. poprzez ograniczenie ilości wody w mieszance betonowej lub zastosowanie cementu z dodatkami mineralnymi skutkuje, przede wszystkim ograniczeniem porowatości kapilarnej zaczynu cementowego (rys. 1). W skali „makro” wpływa to bezpośrednio na głębokość penetracji mediów agresywnych i wielkość podciągania kapilarnego, natomiast w skali „mikro” skutkuje utrudnieniem dyfuzji jonów agresywnych do wnętrza matrycy cementowej. Należy mieć na uwadze, że wysoka wytrzymałość nie gwarantuje trwałości betonu w konstrukcji.



Rys. 1. Udział porów kapilarnych w 12-letnim betonie o różnym współczynniku w/c i wykonanym z cementu o różnej zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego

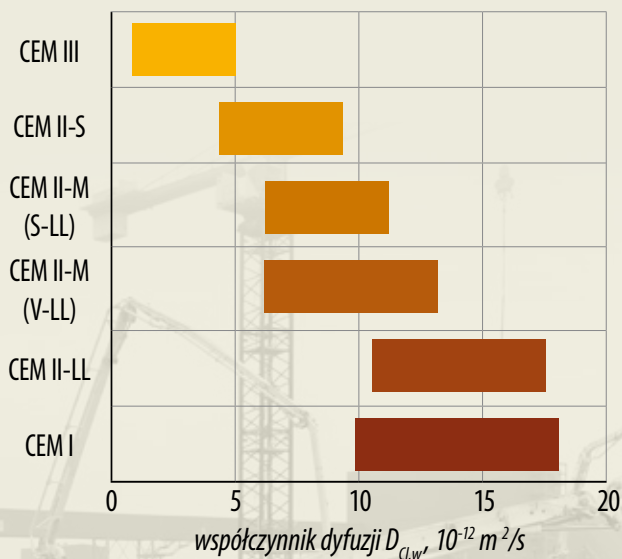
KARBONATYZACJA jest procesem korozyjnym, zachodzącym stopniowo od zewnętrznej strony konstrukcji betonowej wystawionej na działanie dwutlenku węgla. CO_2 z powietrza reagując z produktami hydratacji faz klinkierowych, tworzy się węglan wapnia CaCO_3 . Obecność CaCO_3 nie powoduje zniszczenia betonu, ale prowadzi do obniżenia pH betonu z poziomu ok. 13 do wartości poniżej 9. Wskutek obniżania pH stopniowo zanika cienka warstwa ochronna (pasywacyjna) na powierzchni stali zbrojeniowej. Karbonatyzacja przebiega najszybciej w warunkach przemiennie wilgotno–suchych. Gdy front karbonatyzacji (obszar betonu o $\text{pH} < 9$) osiągnie poziom prętów zbrojeniowych, przy jednocześnie wysokiej wilgotności betonu, następuje szybka korozja stali zbrojeniowej (rys. 2). Powstająca rdza ma większą objętością niż stal, co skutkuje powstaniem naprężeń rozciągających, a w efekcie prowadzi do zarysowania betonu. Wraz z postępem karbonatyzacji może dojść do złuszczenia betonowej otuliny i całkowitego odsłonięcia prętów zbrojeniowych. Dodatkowo, gdy beton narażony jest na działanie jonów chlorkowych, korozja stali znacznie przyspiesza.

Rys. 2. Mechanizm niszczenia betonu w wyniku karbonatyzacji



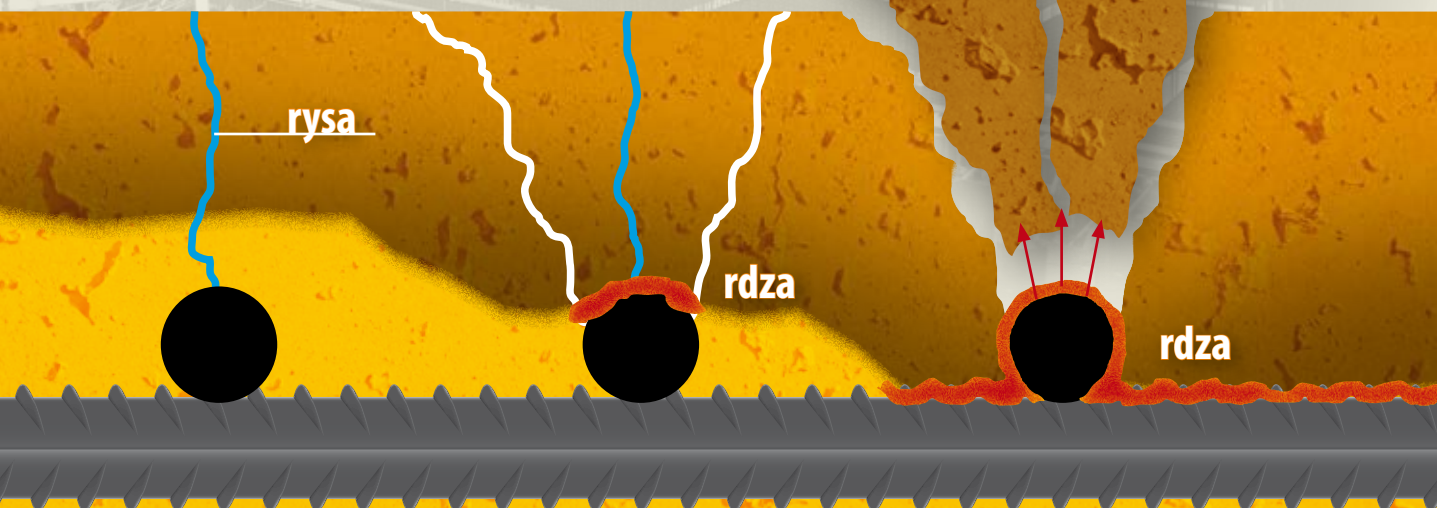
CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE KARBONATYZACJĘ:

- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH KARBONATYZACJI XC1÷XC4 WG NORMY PN-EN 206:2014 (MINIMALNA ILOŚCI CEMENTU, MAKSYMALNY WSPÓŁCZYNNIK W/C),
- ▶ WŁAŚCIWY DOBÓR GRUBOŚCI OTULINY ZBROJENIA,
- ▶ ODPOWIEDNIO DOBRANA I PROWADZONA PIELĘGNACJA BETONU W KONSTRUKCJI.



Rys. 3. Współczynniki dyfuzji betonów wykonanych z różnych cementów

Rys. 4. Mechanizm niszczenia betonu w wyniku korozji chlorkowej



CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE AGRESJĘ CHLORKOWĄ:

- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH AGRESJI SPOWODOWANEJ CHLORKAMI NIEPOCHODZĄCYMI Z WODY MORSKIEJ XD1, XD2, XD3 I/LUB AGRESJI SPOWODOWANEJ CHLORKAMI Z WODY MORSKIEJ XS1, XS2, XS3 WG NORMY PN-EN 206:2014,
- ▶ PRZESTRZEGANIE KLAS ZAWARTOŚCI CHLORKÓW W BETONIE W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU KONSTRUKCJI BETONOWEJ (SPRĘŻANE, ZBROJONE, NIEZBROJONE),
- ▶ OGRANICZENIE WSPÓŁCZYNNIKA W/C W CELU ZMNIJSZENIA PRZEPUSZCZALNOŚCI BETONU,
- ▶ ZASTOSOWANIE CEMENTÓW Z DODATKAMI MINERALNYMI, NP.: CEMENTÓW HUTNICZYCH CEM III LUB CEMENTÓW WIELOSKŁADNIKOWYCH CEM V,
- ▶ ODPOWIEDNI DOBÓR GRUBOŚCI OTULINY ZBROJENIA.

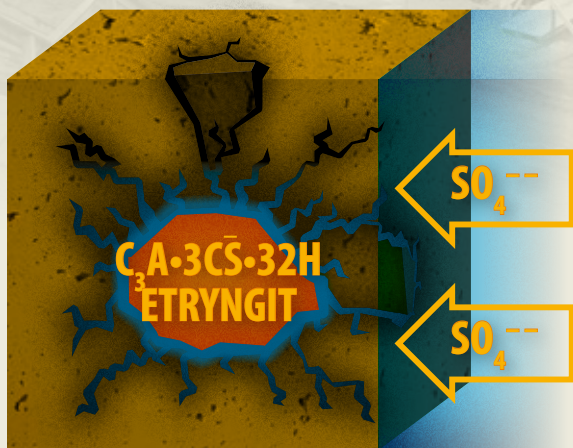
KOROZJA CHLORKOWA - spośród wszystkich jonów, jony chlorkowe najszybciej wnikają w głąb matrycy cementowej, z tego względu korozja betonu poddanego działaniu roztworu chlorków postępuje z dużą szybkością. Agresja chlorkowa prowadzi do obniżenia pH betonu oraz powstawania ekspansywnych związków, które mogą powodować spękanie betonu. Równie groźnym skutkiem oddziaływania jonów chlorkowych jest korozja stali zbrojeniowej. Przebieg korozji jest bardzo zbliżony do niszczenia betonu w wyniku procesu karbonatyzacji (rys. 4). Korozja chlorkowa może być spowodowana działaniem m.in. wód kopalnianych lub wody morskiej, jednak najpowszechniejsza jest korozja wywołana środkami odladzającymi. Czynniki wpływającymi na wnikanie chlorków są: cykliczne nasycanie i wysychanie oraz działanie mrozu, co może prowadzić do złuszczenia powierzchniowej warstwy betonu. Betony z dodatkami wykazują wyższą odporność na korozyjne działanie chlorków. Na rys. 3 przedstawiono współczynniki dyfuzji jonów chlorkowych w betonach wykonanych z użyciem różnych cementów po 28 dniach twardnienia ($w/c=0,5$, zawartość cementu 320 kg/m^3 , dojrzewanie w wodzie).

KOROZJA SIARCZANOWA

jest jedną z najgroźniejszych korozji występujących w trakcie cyklu życia konstrukcji betonowej. Korozja siarczanowa występuje najczęściej w konstrukcjach narażonych na działanie wód gruntowych, ścieków lub wody morskiej. Siarczany w wodzie gruntowej są zazwyczaj pochodzenia naturalnego, ale ich źródłem mogą być również nawozy sztuczne i ścieki przemysłowe. W wodzie morskiej jonom siarczanowym towarzyszą duże ilości jonów chlorkowych, sodowych i magnezowych, co potęguje jej niszczące oddziaływanie na beton.

Wyróżnia się dwa rodzaje agresji siarczanowej: wewnętrzną (ISA) i zewnętrzną (ESA) - rys. 5. Wewnętrzna zachodzi w betonach, w których zastosowano cement o wysokiej zawartości gipsu (regulatora czasu wiązania), w związku z czym wprowadzono nadmierną ilość jonów siarczanowych. Do korozji o charakterze wewnętrznym może dojść w przypadku betonów poddawanych obróbce termicznej w temperaturze wyższej niż 60°C. Do korozji o charakterze zewnętrznym dochodzi, gdy beton poddawany jest działaniu roztworów siarczanowych. Jony siarczanowe z otoczenia reagują z matrycą cementową, tworząc gips i/ lub ettringit (rys. 6). W czasie powstawania obu związków dochodzi do zwiększenia objętości, w przypadku ettringitu aż o 168%!

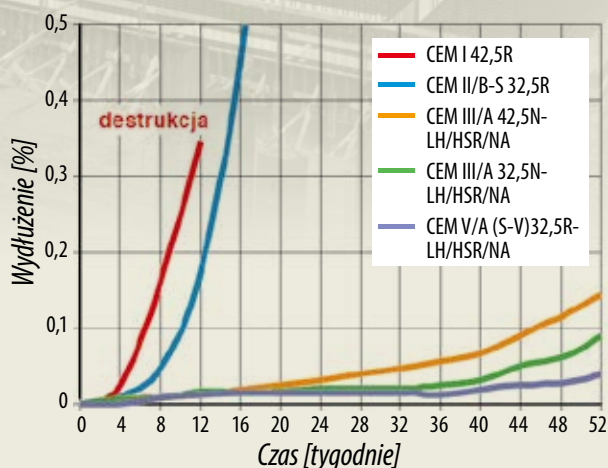
Doskutków fizycznych agresji siarczanowej należy zaliczyć ekspansję, spękania, łuszczenie czy spadek wytrzymałości, a w przypadku silnej korozji może dojść nawet do całkowitej destrukcji betonu w konstrukcji.



Rys. 6. Niszczenie betonu spowodowane powstaniem ekspansywnego ettringitu



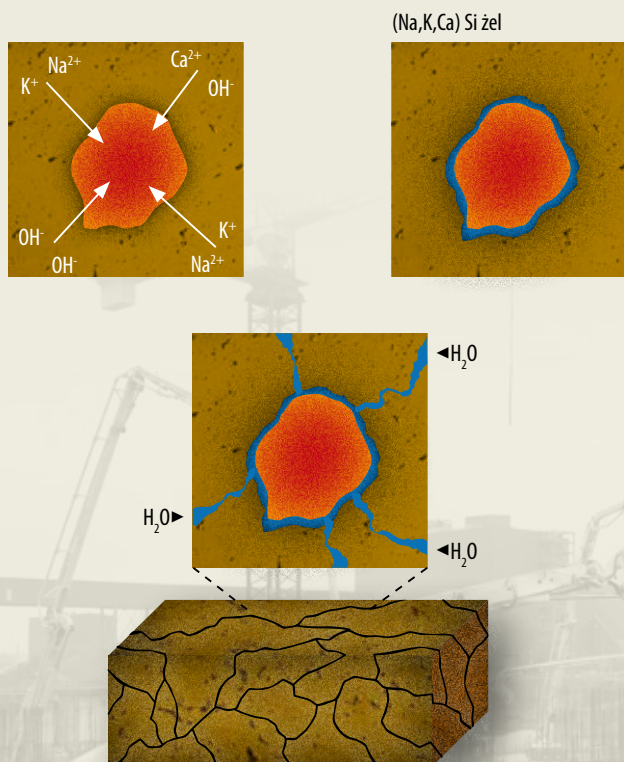
Rys. 5. Rodzaje i przyczyny korozji siarczanowej



Rys. 7. Odporność na korozję siarczanową

CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE AGRESJĘ SIARCZANOWĄ:

- ▶ STOSOWANIE CEMENTU ODPORNEGO NA SIARCZANY SR WG PN-EN 197-1:2012 LUB HSR WG PN-B-19707:2013 (RYS. 7),
- ▶ ZAPEWNIENIE WYSOKIEJ SZCZELNOŚCI BETONU (NISKIE W/C, STOSOWANIE DODATKÓW TYPU II),
- ▶ PROJEKTOWANIE BETONU WG WYMAGAŃ DLA KLAS EKSPOZYCJI DOTYCZĄCYCH AGRESJI CHEMICZNEJ XA1, XA2 I XA3 WG NORMY PN-EN 206:2014.



Rys. 8. Mechanizm reakcji alkalia – reaktywna krzemionka

Rys. 9. Skutki reakcji alkalia-kruszywo



KOROZJA SPOWODOWANA REAKCJĄ ALKALIA-KRUSZYWA

W praktyce dwa rodzaje kruszyw najczęściej reagują z alkaliami pochodzącymi z cementu, kruszywa, wody zarobowej i/lub domieszek chemicznych:

- kruszywa bogate w reaktywną krzemionkę (opal, chalcedon, trydymit) – reakcja alkalia-krzemionka ASR,
- kruszywa węglanowe (zdolomityzowane wapnienie) – reakcja alkalia-węglany ACR.

Tylko w obecności wody kruszywa te mogą reagować z alkaliami obecnymi w porach betonu. W wyniku tej reakcji powstaje żel alkaliczny (rys. 8), który chłonec wodę pęcznieje praktycznie bez ograniczeń i lokuje się w porach betonu. Wokół aktywnych ziaren powstają żelowe otoczki o grubości nawet 2 mm. Ponieważ żel ograniczony jest stwardniałym zaczynem cementowym, powstają naprężenia wewnętrzne, które powodują spękanie i rozpad betonu, w skrajnych przypadkach prowadząc do całkowitego zniszczenia konstrukcji betonowej (rys. 9).

CZYNNIKI OGRANICZAJĄCE NEGATYWNE SKUTKI SPOWODOWANE REAKCJĄ KRUSZYWA Z ALKALIAMI:

- ▶ STOSOWANIE CEMENTÓW O NISKIEJ ZAWARTOŚCI ALKALIÓW (NA) ZGODNYCH Z NORMĄ PN-B-19707:2013,
- ▶ STOSOWANIE KRUSZYW NIEREAKTYWNYCH,
- ▶ STOSOWANIE CEMENTÓW ZAWIERAJĄCYCH NIEKLINKIEROWE SKŁADNIKI GŁÓWNE (GRANULOWANY ŻUŻEL WIELKOPIECOWY, POPIOŁY LOTNE).

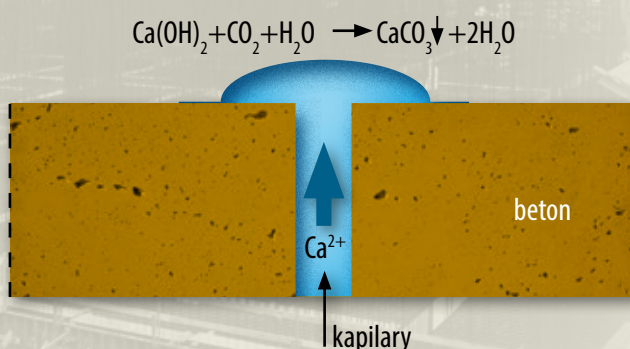


Wykwity węglanowe, nazywane także wapiennymi, powstają w wyniku karbonatyzacji wodorotlenku wapnia – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, czyli portlandyt lub potocznie „wapno”, jest jednym z produktów hydratacji cementu (faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego). Wykwity węglanowe powstają, gdy transportowany systemem porów kapilarnych wodorotlenek wapnia dostanie się na powierzchnię elementu betonowego (rys.1).



Rys. 1. Wykwity węglanowe na powierzchni kostki brukowej

W pierwszym etapie, jako produkt reakcji karbonatyzacji wodorotlenku wapnia, powstaje trudno rozpuszczalny węglan wapnia (kalcyt) CaCO_3 (rys. 2). Na szybkość i intensywność karbonatyzacji wpływ ma zarówno stężenie CO_2 , jak i wilgotność otoczenia. W betonie nasyconym wodą proces karbonatyzacji praktycznie nie występuje, zaś w przypadku betonu wysuszonego, karbonatyzacja zachodzi bardzo powoli. Najlepsze warunki do przebiegu karbonatyzacji zachodzą wtedy, gdy na powierzchni kapilar występuje warstewka wody, w której szybko dyfundujący CO_2 rozpuszcza się i reaguje z jonami wapnia. Maksymalna szybkość karbonatyzacji występuje w zakresie od 50% do 70% wilgotności względnej powietrza.



Rys. 2. Schemat przebiegu reakcji karbonatyzacji – powstanie wykwitów wapiennych pierwotnych

Powstawanie wykwitów nie jest efektem złej jakości cementu lub betonu. Obecność wykwitów węglanowych, w szczególności na galerii betonowej, głównie kostce brukowej, wpływa na estetykę wyrobu. Wymagania zawarte w normach i aprobatkach technicznych nie definiują wykwitu węglanowego jako kryterium oceny jakości wyrobu. Zapisy zawarte w normie PN-EN 1338 „Betonowa kostka brukowa. Wymagania” stanowią, że „ewentualne wykwity nie mają szkodliwego wpływu na właściwości użytkowe kostek brukowych i nie są uważane za istotne”. Nie oznacza to jednak, że nie należy podejmować działań technologicznych w kierunku ograniczania występowania wykwitów węglanowych na powierzchni elementów betonowych.

Problem wykwitów węglanowych najbardziej odczuwalny jest dla producentów kostki brukowej. W zależności od okresu powstania, wyróżnia się trzy rodzaje wykwitów węglanowych – tabela 1.

Tabela 1. Rodzaje wykwitów węglanowych

Rodzaj	Okres powstania	Czynnik decydujący
Pierwotne	w czasie dojrzewania kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • szybkość reakcji cementu • warunki w komorze dojrzewania • szczelność betonu (w stopniu ograniczonym)
Wtórne	w trakcie składowania i po ułożeniu kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • szczelność betonu • szybkość reakcji cementu (w niewielkim stopniu)
Trzeciorzędne	po ułożeniu kostki brukowej	<ul style="list-style-type: none"> • sposób ułożenia wyrobów • jakość wyrobów • sposób użytkowania nawierzchni

Prawidłowe rozpoznanie rodzaju wykwitów węglanowych, stanowi podstawę do rozpoczęcia działań w kierunku mającym na celu jego usunięcie lub ograniczenie występowania.

Wykwity węglanowe pierwotne powstają, gdy woda skrapla się na powierzchni np. dojrzewających wyrobów betonowych, w wyniku czego dochodzi do kontaktu wody na powierzchni z wodą kapilarną z dużą zawartością wapnia. Wodorotlenek wapnia przenika do wody powierzchniowej, zaś przy parowaniu wody krystalizuje w górnej powierzchni wyrobu betonowego i ulega karbonatyzacji. Schemat powstania wykwitów pierwotnych przedstawiono na rys. 3.

Wykwity węglanowe wtórne powstają w późniejszym okresie dojrzewania betonu, gdy w strukturze betonu ukształtował się system porów kapilarnych o dużej średnicy. Schemat przebiegu reakcji powstawania wykwitów wtórnych jest analogiczny jak dla wykwitów pierwotnych. Poprzez system porów kapilarnych transportowany jest, na wilgotną powierzchnię betonu, wodorotlenek wapnia (Ca(OH)_2), który następnie ulega karbonatyzacji. Decydującym czynnikiem ograniczającym powstawanie wykwitów węglanowych wtórnych jest szczelność matrycy betonowej.

Wykwity węglanowe trzeciorzędne powstają w trakcie użytkowania wyrobów, zasadniczo o możliwości ich wystąpienia decyduje jakość wyrobu, sposób ułożenia i użytkowania. Układając nawierzchnię z betonowej kostki brukowej należy zwrócić uwagę na przepuszczalność warstw podbudowy. Niewystarczająca przepuszczalność podłoża, prowadzi do stałego nasiąkania wyrobów prefabrykowanych wodą, co w efekcie skutkuje transportem wodorotlenku wapnia na powierzchnię betonu i widocznym wykwitem.

Sposób użytkowania w dużym stopniu wpływa na możliwość powstania wykwitów węglanowych na powierzchni betonu. Warunki w jakich użytkowany jest beton, mogą prowadzić na przykład do powstania mikrorys. Zarysowanie struktury wpływa na przyspieszenie transportu wody w głąb betonu, a tym samym wylugowywania wodorotlenku wapnia.

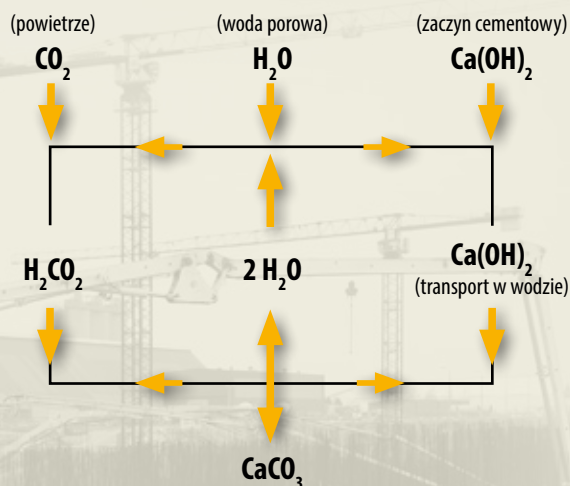
Działania ograniczające powstanie oraz intensywność wykwitów węglanowych można podzielić na trzy obszary - rys. 4.

Działania na etapie projektowania składu mieszanki betonowej:

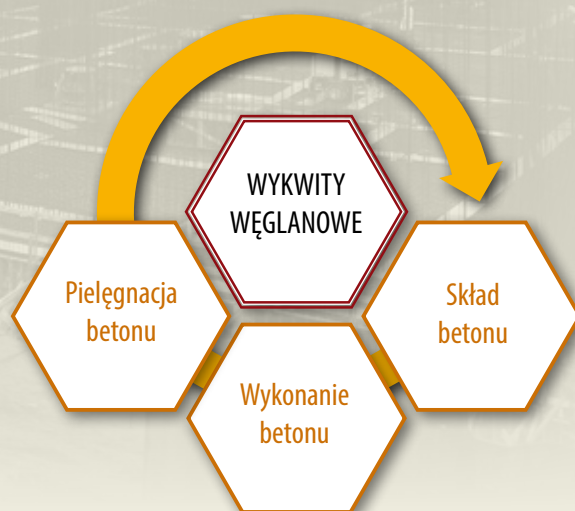
- stosowanie cementów zawierających nieklinkierowe składniki główne, np. granulowany żużel wielkopiecowy – CEM II i CEM III,
- optymalizacja (obniżenie) współczynnika w/c ,
- dobór kruszywa zapewniający optymalną krzywą uziarnienia,
- stosowanie dodatków do betonu,
- stosowanie domieszek hydrofobizujących.

Działania na etapie wykonawstwa - układanie betonu:

- prawidłowe – szczelne wykonanie deskowania,
- naniesienie środka antyadhezyjnego na poszycie deskowania lub formy,
- właściwe zagęszczanie mieszanki betonowej.



Rys. 3. Schemat przebiegu reakcji powstania wykwitów



Rys. 4. Obszary działań dla ograniczenia powstania wykwitów węglanowych

Działania na etapie pielęgnacji:

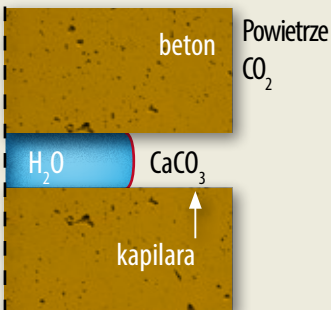
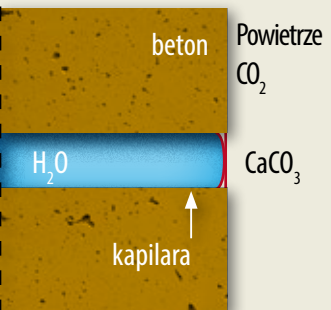
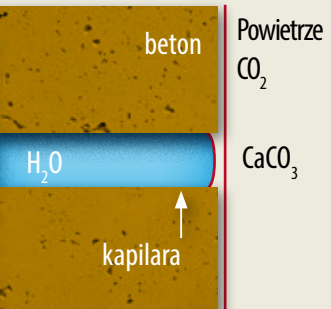
- zapewnienie optymalnych warunków dojrzewania (temperatura i wilgotność powietrza),
- zapewnienie optymalnego czasu trwania pielęgnacji,
- zapewnienie prawidłowych warunków składowania i magazynowania wyrobów.

Występowanie wykwitów węglanowych na betonowych wyrobach wibroprasowanych jest problemem natury estetycznej. Z tego względu optymalizacja produkcji kostki brukowej powinna być także prowadzona w kierunku ograniczania pojawiania się wykwitów węglanowych. Uwagi dotyczące produkcji kostki brukowej:

- widoczny wykwit pierwotny powstaje w komorze dojrzewalni tylko w przypadku, gdy pory kapilarne wyrobu betonowego, podczas pierwszej fazy dojrzewania, wypełnione są wodą; odpowiednie sterowanie temperaturą i wilgotnością powietrza przy sezonowaniu wyrobów – utrzymywanie suchej powierzchni betonu (istnieje ryzyko zbytowego przesuszenia wierzchniej warstwy kostki brukowej, co utrudni hydratację cementu), może spowodować powstanie tzw. niewidocznych wykwitów węglanowych – powstaną one tuż pod powierzchnią wyrobu,
- warunki sezonowania można optymalizować poprzez zastosowanie technologii VAPOR – naporzanie niskoprężne z przyspieszonym procesem karbonatacji betonu (w efekcie wyrób po 24 godzinach dojrzewania osiąga wytrzymałość na poziomie 70% wytrzymałości końcowej, podwyższone stężenie CO_2 powoduje przyspieszenie procesu przejścia wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 w węglan wapnia CaCO_3 , czego rezultatem jest zwiększenie szczelności powierzchni betonu, poprzez zmniejszenie wymiaru i zamknięcie kapilar),
- istotnym czynnikiem jest dobór cementu o szybkiej dynamice narastania wytrzymałości – zapewnia wysoki stopień zhydratyzowania cementu w wierzchniej warstwie,
- w celu ograniczania ryzyka powstania wykwitów węglanowych wtórnych, zalecane jest stosowanie domieszki hydrofobizującej,
- stosowanie tzw. kapturowania, czyli przykrywania ułożonych na palecie wyrobów gotowych, folią PE, pomaga ograniczyć ryzyko powstania wykwitów (skuteczność zależy jednak od tego czy pakowane wyroby są mokre czy suche, w przypadku pakowania wyrobów mokrych występuje możliwość powstania wykwitów węglanowych).

W produkcji betonowych wyrobów wibroprasowanych, kluczowy jest nadzór nad prawidłową wilgotnością betonu w wierzchniej warstwie wyrobu. Uwzględnienie wilgotności i nasiąkliwości kruszyw oraz prawidłowy dobór cementu i domieszek chemicznych (kompatybilność) jest decydujące dla zapewnienia optymalnego efektywnego współczynnika w/c (tabela 2). Wpływ wilgotności betonu w warstwie wierzchniej na powstawanie wykwitów przedstawiono na tabeli 2.

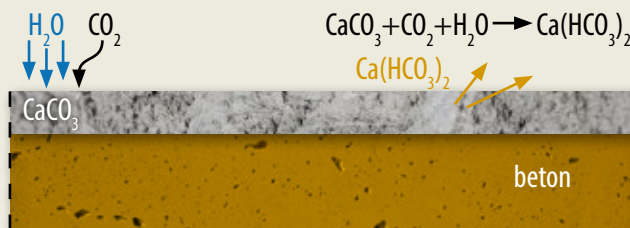
Tabela 2. Wpływ współczynnika w/c przy produkcji kostki brukowej na powstawanie wykwitów.

	Efektywny współczynnik w/c		
	Niski	Optymalny	Wysoki
Wykwity pierwotne	niewidoczny	słabe	silne
Wykwity wtórne	niewidoczny	typowe dla materiałów budowlanych	silne
Miejsce powstania wykwitów			

W okresie użytkowania, trudno rozpuszczalny węglan wapnia CaCO_3 w wyniku dalszej reakcji z CO_2 zawartym w powietrzu, przechodzi w łatwo rozpuszczalny w wodzie kwaśny węglan wapnia (rys. 5), który może być następnie spłukiwany przez deszcz oraz ścierany przy użytkowaniu betonu. Proces ten przyczynia się do zanikania wykwitów węglanowych na powierzchni elementów betonowych.

W przypadku bardzo rozległych wykwitów można podjąć działania w kierunku ich usunięcia. Metody usuwania wykwitów węglanowych można podzielić na dwie grupy (tabela 3):

- mechaniczne – polegające na usunięciu wykwitów przez piaskowanie lub szlifowanie powierzchni,
- chemiczne – polegające na usunięciu wykwitów przez ługowanie powierzchni betonu niskoprocentowym roztworem kwasów nieorganicznych i organicznych.



Rys. 5. Schemat przebiegu reakcji karbonatyzacji w okresie eksploatacji

Tabela 3. Metody usuwania wykwitów węglanowych

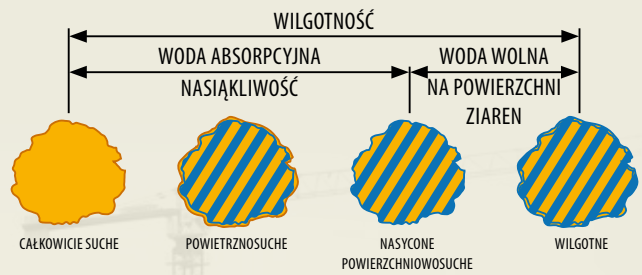
Metoda	Uwagi
Mechaniczna	<ul style="list-style-type: none"> • metoda pracochłonna, wymagająca odpowiedniego sprzętu oraz materiałów, np. hydropiaskowanie (ciśnienie wody nie powinno przekraczać 3 bar, średnica ziaren wykorzystwanego piasku powinna być jak najmniejsza)
Chemiczna	<ul style="list-style-type: none"> • powoduje otwarcie porów powietrznych, co może doprowadzić do powstania nowych wykwitów węglanowych, • powierzchnia betonu staje się bardziej szorstka – zdolność powierzchni do oczyszczania ulega pogorszeniu

Według zapisów normy PN-EN 206:2014 "Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność" współczynnik woda/cement (w/c) jest to stosunek efektywnej zawartości wody do zawartości cementu w mieszance betonowej. Przez efektywną zawartość wody należy rozumieć różnicę pomiędzy całkowitą ilością wody, a ilością wody zaabsorbowaną przez kruszywo, co w praktyce traktuje się jako różnicę ilości wody wynikającej z wilgotności i nasiąkliwości kruszywa (rys. 1).

Zgodnie z definicją do prawidłowego obliczenia współczynnika w/c należy wziąć pod uwagę ilość wody którą do składu mieszanki betonowej wniesie kruszywo oraz wodę zarobową dodaną do składu mieszanki. Efektywną zawartość wody obliczamy ze wzoru:

$$W_{ef} = K \cdot (W_g - N_w) + W_d$$

$$W_d = W - K \cdot (W_g - N_w)$$



Rys. 1. Zawartość wody w kruszywie

gdzie:

W – ilość wody w recepturze mieszanki betonowej

W_{ef} – efektywna zawartość wody [kg]

K – masa kruszywa [kg]

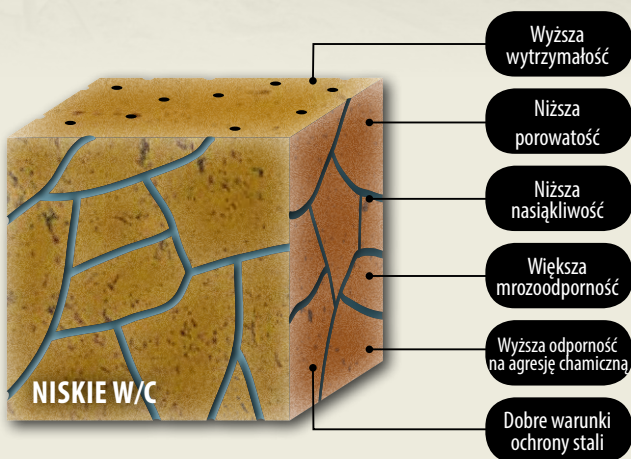
W_g – wilgotność kruszywa [%]

N_w – nasiąkliwość wagowa kruszywa [%]

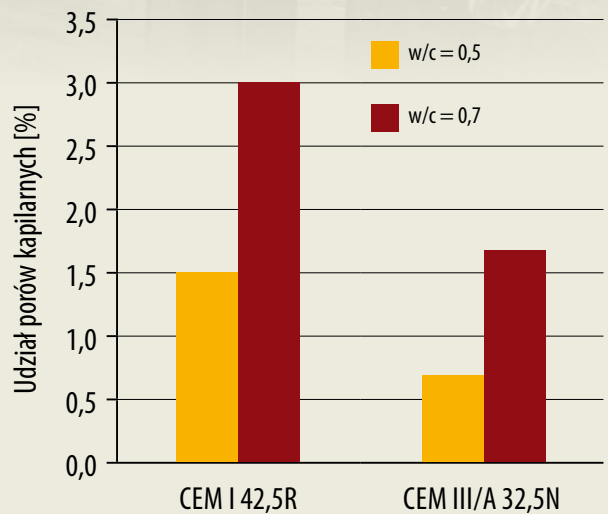
W_d – woda dodana [kg]

PRZY OBLICZENIU WSPÓŁCZYNNIKA W/C KONIECZNE JEST UWZGLĘDNIENIE ILOŚCI DODANYCH DOMIESZEK CHEMICZNYCH W POSTACI PŁYNEJ, JEŚLI ICH ILOŚĆ PRZEKRACZA 3 L/M³ BETONU.

Dopuszczalny, maksymalny współczynnik wodno-cementowy dla betonu w poszczególnych klasach ekspozycji (oddziaływanie środowiska na beton w cyklu życia) określony jest w normie PN-EN 206:2014. Kształtowanie współczynnika w/c na odpowiednim (niskim) poziomie zapewnia korzystny wpływ na właściwości betonu, ze szczególnym uwzględnieniem trwałości (rys. 2).



Rys. 2. Wpływ współczynnika w/c na właściwości betonu

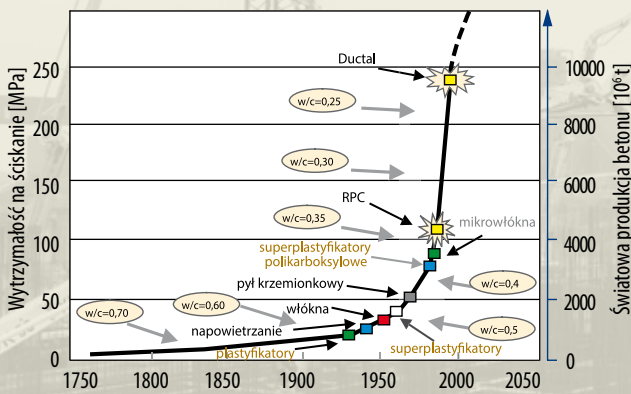


Rys. 3. Porowatość 12-letniego betonu

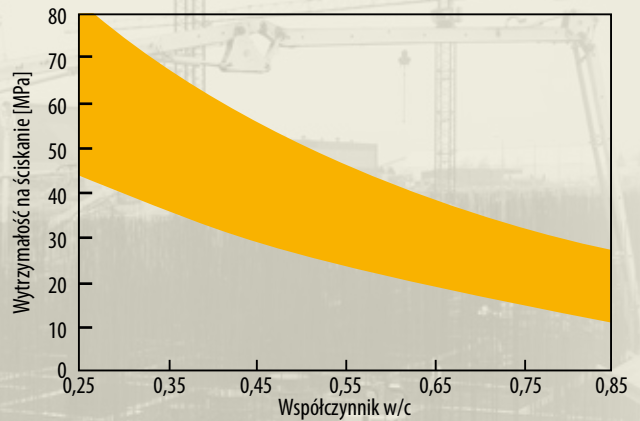
W stwardniałym betonie, wraz ze spadkiem współczynnika w/c, zmniejsza się porowatość (głównie kapilarna) - rys. 3, co utrudnia migrację agresywnych mediów ciekłych i gazowych do wnętrza struktury betonu.

Zwiększenie współczynnika w/c w mieszance betonowej skutkuje większą ilością porów w betonie, a więc obniżeniem wytrzymałości na ściskanie (wzrost porowatości o 5% przekłada się na blisko 30% spadek wytrzymałości). Z tego względu dążenie do obniżenia współczynnika w/c jest jednym z głównych trendów rozwojowych w technologii betonu - rys. 4.

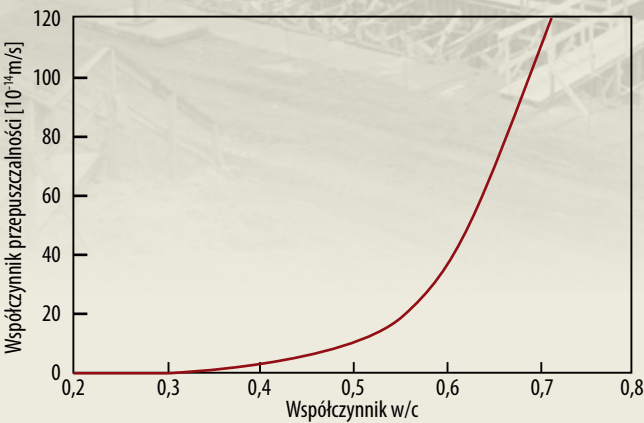
Szczelniejsza struktura matrycy betonowej przekłada się na wyższą wytrzymałość betonu (rys. 5), a także zapewnia podwyższoną odporność na agresję chemiczną (rys. 6). Ponadto, obniżenie współczynnika w/c skutkuje mniejszym skurczem - rys. 7. Nie bez znaczenia jest wpływ współczynnika w/c na konsystencję – im wyższy współczynnik w/c tym większy stopień upłynnienia mieszanki betonowej (rys. 8). Należy przy tym pamiętać, że zbyt wysoki współczynnik w/c zwiększa tendencje mieszanki betonowej do segregacji oraz „bleedingu”, co skutkuje nierównomiernym rozmieszczeniem składników pogarszając tym samym jakość stwardniałego betonu.



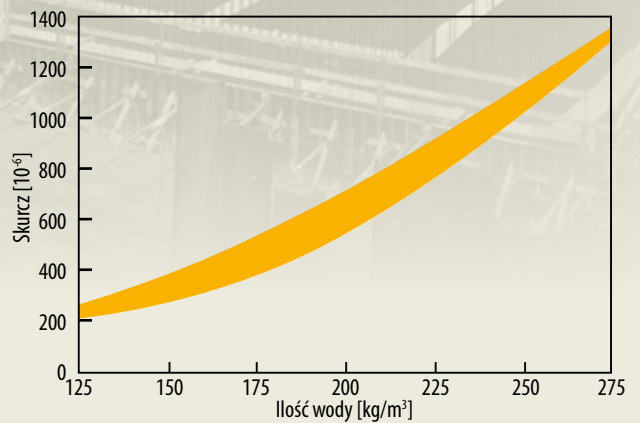
Rys. 4. Rozwój technologii betonu na przestrzeni lat z uwzględnieniem roli obniżania współczynnika w/c jako tendencji i czynnika poprawiającego właściwości betonu



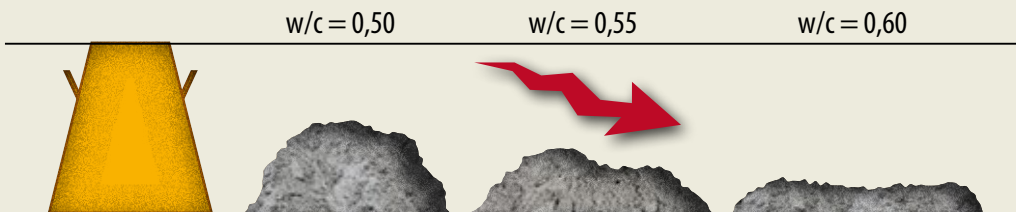
Rys. 5. Wpływ współczynnika w/c na 28-dniową wytrzymałość betonu na ściskanie



Rys. 6. Przepuszczalność jonów chlorkowych w zależności od współczynnika w/c



Rys. 7. Wpływ zawartości wody na skurcz betonu



Rys. 8. Wpływ współczynnika w/c na konsystencję mieszanki betonowej

NISKI WSPÓLCZYNNIK W/C PRZEKŁADA SIĘ NA WYŻSZĄ WYTRZYMAŁOŚĆ I SZCZELNOŚĆ, A TYM SAMYM WIELOLETNIA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI I OBIEKTÓW BETONOWYCH.

Norma PN-EN 13670:2009 „Wykonywanie konstrukcji betonowych” w wytycznych odnośnie pielęgnacji i ochrony betonu zaleca, aby po zagęszczeniu i wykończeniu powierzchni betonu, bezzwłocznie podać ją pielęgnacji.

PIELĘGNACJA BETONU – OGÓL ZABIEGÓW PODEJMOWANYCH OD CHWILI UŁOŻENIA I ZAGĘSZCZENIA MIESZANKI BETONOWEJ, MAJĄCYCH NA CELU ZAPEWNIENIE PRAWIDŁOWEGO PRZEBIEGU PROCESU HYDRATACJI CEMENTU, A W EFEKCIE, OTRZYMANIE W OKREŚLONYM CZASIE, BETONU O PROJEKTOWANYCH WŁAŚCIWOŚCIACH (WYTRZYMAŁOŚĆ I TRWAŁOŚĆ). ZABIEGI TE OBEJMUJĄ UTRZYMANIE ODPOWIEDNIEJ TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI BETONU ORAZ JEGO OCHRONĘ PRZED SZKODLIWYM ODDZIAŁYWANIEM CZYNNIKÓW ATMOSFERYCZNYCH.

Pielęgnacja betonu ma na celu:

- zapewnienie optymalnych warunków termiczno-wilgotnościowych w dojrzewającym betonie (dostarczenie odpowiedniej ilości wody do przebiegu procesów hydratacji oraz zachowanie odpowiedniego zakresu temperatur dojrzewania),
- ochrona wykonanego elementu betonowego przed szkodliwym działaniem czynników atmosferycznych (promieniowanie słoneczne, wiatr, opady atmosferyczne) i zamarzaniem,
- przeciwdziałanie skurczowi spowodowanemu utratą wilgoci z betonu,
- ograniczenie naprężeń termicznych wywołanych gradientem temperatur pomiędzy powierzchnią a wnętrzem dojrzewającego elementu betonowego (naprężenia mogą skutkować zarysowaniem i spękaniem konstrukcji – obniżeniem trwałości),
- zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości powierzchniowej,
- zapewnienia odpowiedniej trwałości strefy powierzchniowej,
- zabezpieczenia przed drganiami, uderzeniami lub uszkodzeniami.

Pielęgnacja betonu jest zabiegiem często pomijanym lub lekceważonym w praktyce budowlanej, choć o kluczowym znaczeniu dla jakości i trwałości betonu w konstrukcji.

Czas trwania pielęgnacji jest powiązany z rozwojem wytrzymałości w strefie powierzchniowej betonu. Określony został poprzez klasy pielęgnacji zdefiniowane przez czas lub procent wytrzymałości charakterystycznej - 28 dniowej, przy którym możliwe jest zakończenie procesu pielęgnacji (tabela 1).

Tabela 1. Klasy pielęgnacji

	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4
Czas [h]	12 ^{a)}	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	nie dotyczy	35%	50%	70%

a) Jeżeli czas początku wiązania nie przekracza 5 godzin oraz temperatura powierzchni betonu jest równa bądź wyższa niż 5°C

Długość okresu pielęgnacji należy dobrać w zależności temperatury – tabela 2, warunków atmosferycznych oraz rodzaju i właściwości zastosowanego cementu – tabela 3. Czas pielęgnacji można określić dokonując pomiaru temperatury powierzchni betonu i odnosząc się do wytycznych zawartych w normie PN-EN 13670 „Wykonywanie konstrukcji z betonu”.

Tabela 2. Minimalny okres pielęgnacji w zależności od klasy pielęgnacji i temperatury powierzchni betonu

Temperatura (t) powierzchni betonu [°C]	Minimalny okres pielęgnacji [dni] ^{a)}								
	Rozwój wytrzymałości betonu ^{c),d)} $(f_{cm2} / f_{cm28}) = r$								
	szybki $r \geq 0,50$			średni $0,50 > r \geq 0,30$			wolny $0,30 > r \geq 0,15$		
	Klasa pielęgnacji			Klasa pielęgnacji			Klasa pielęgnacji		
	2	3	4	2	3	4	2	3	4
$t \geq 25$	1	1,5	3	1,5	2,5	5	2,5	3,5	6
$25 > t \geq 15$	1	2	5	2,5	4	9	5	7	12
$15 > t \geq 10$	1,5	2,5	7	4	7	13	8	12	21
$10 > t \geq 5$ ^{b)}	2	3,5	9	5	9	18	11	18	30

a) W przypadku czasu początku wiązania przekraczającego 5 godzin różnice należy doliczyć do czasu pielęgnacji.

b) W przypadku gdy temperatura spadnie poniżej 5°C, okres ten należy doliczyć do czasu pielęgnacji.

c) Rozwój wytrzymałości betonu rozumiany jest jako stosunek wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.

d) Dla betonów o bardzo wolnym rozwoju wytrzymałości specyfikacje wykonawcze powinny zawierać specjalne wymagania.

Tabela 3. Minimalny czas pielęgnacji betonu w zależności od zastosowanego rodzaju cementu

Warunki atmosferyczne			Minimalny czas pielęgnacji [dni]		
Nasłonecznienie	Wiatr	Wilgotność względna powietrza	CEM I	CEM II	CEM III
silne	silny	<50%	2	4	5
średnie	średni	50-80%	1	3	4
słabe	słaby	>80%	1	2	3

Równie ważny, jak czas trwania, jest dobór odpowiedniej metody pielęgnacji:

- pielęgnacja mokra,
- stosowanie osłon,
- stosowanie preparatów do pielęgnacji betonu.

PIELĘGNACJA MOKRA

Założeniem tej metody jest zapewnienie kontaktu powierzchni betonu z wodą, od momentu uzyskania wystarczającej twardości powierzchni – rys. 1. oraz przeciwdziałanie skurczowi wysychania – rys. 2. Pielęgnację mokrą powszechnie stosuje się w okresie wysokich temperatur powietrza, silnego nasłonecznienia oraz silnych, ciepłych wiatrów. W takich warunkach, powierzchnia betonu może ulec przesuszeniu w krótkim okresie czasu. W efekcie może dojść do zakłócenia przebiegu hydratacji w powierzchniowej warstwie betonu oraz zarysowania powierzchni w wyniku skurczu plastycznego lub skurczu od wysychania. Z praktycznego punktu widzenia, betony o $w/c \geq 0,50$ powinny być chronione przed odparowaniem wody, natomiast betony o $w/c < 0,50$ należy, nie tylko chronić przed odparowaniem wody, lecz należy jej jeszcze dostarczyć (zraszanie powierzchni).

Prowadząc pielęgnację mokrą, należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie dopuścić do „szoku” termicznego, tj. aby nagrzejonej powierzchni betonu, nie polewać zbyt zimną wodą (rys. 3).



Rys. 1. Zraszanie powierzchni betonu wodą



Rys. 2. Rysy skurczowe powstałe w wyniku nieprawidłowo prowadzonej pielęgnacji



Rys. 3. Uszkodzenie powierzchni betonu na skutek „szoku” termicznego

STOSOWANIE OSŁON ZEWNĘTRZNYCH

Pielęgnacja tym sposobem polega na zastosowaniu osłon pełniących rolę bariery zapewniającej utrzymanie ciepła wydzielanego przez twardniejący beton i zapobiegającej odparowaniu wody z betonu.

Najczęściej, pielęgnację tą metodą realizuje się poprzez:

- okrywanie betonu folią (rys. 4a, 4b), należy mieć na względzie, że stosowanie osłon foliowych może powodować wystąpienie miejscowych przebarwień powierzchni betonu (wykwitów) na skutek nierównomiernej kondensacji pary wodnej na powierzchni folii przylegającej do betonu, ponadto przy intensywnym nasłonecznieniu zalecane jest stosowanie folii jasnej, odbijającej promieniowanie, jesienią i zimą można stosować folię czarną,
- ochrona miejsca wbudowania betonu specjalnym namiotem (rys. 4c), najczęściej stosowana w celu ochrony przed intensywnym deszczem, silnym nasłonecznieniem i wiatrem, a także w warunkach zimowych, kiedy dodatkowo stosuje się nadmuch ciepłego powietrza.



Rys. 4. Stosowanie osłon a), b) przykrywanie powierzchni betonu folią, c) stosowanie namiotów

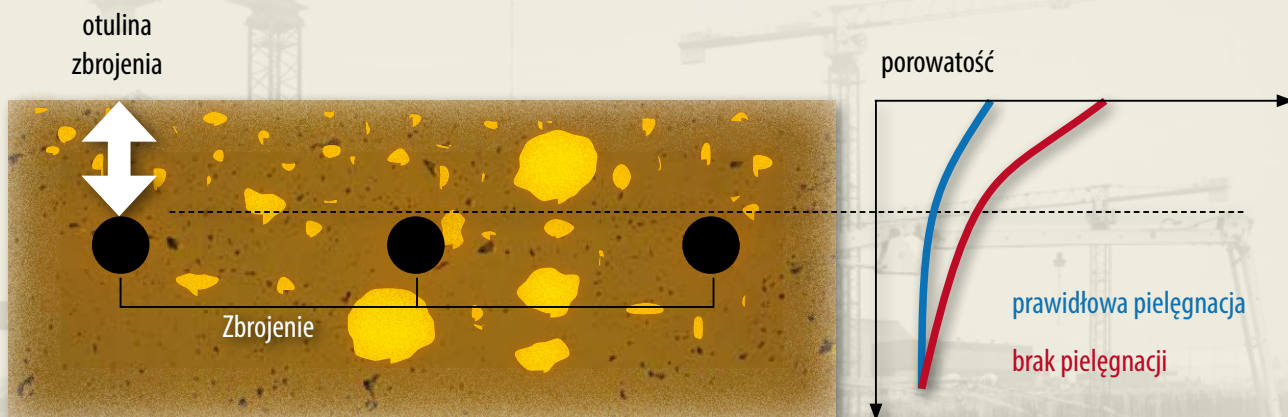
STOSOWANIE PREPARATÓW DO PIELĘGNACJI BETONU

Metoda ta polega na naniesieniu filmu ochronnego na powierzchnię świeżo ułożonego betonu (rys. 5). Główną zaletą preparatów do pielęgnacji jest możliwość stosowania na dużych powierzchniach, praktycznie zaraz po ułożeniu i zagęszczeniu mieszanki betonowej.



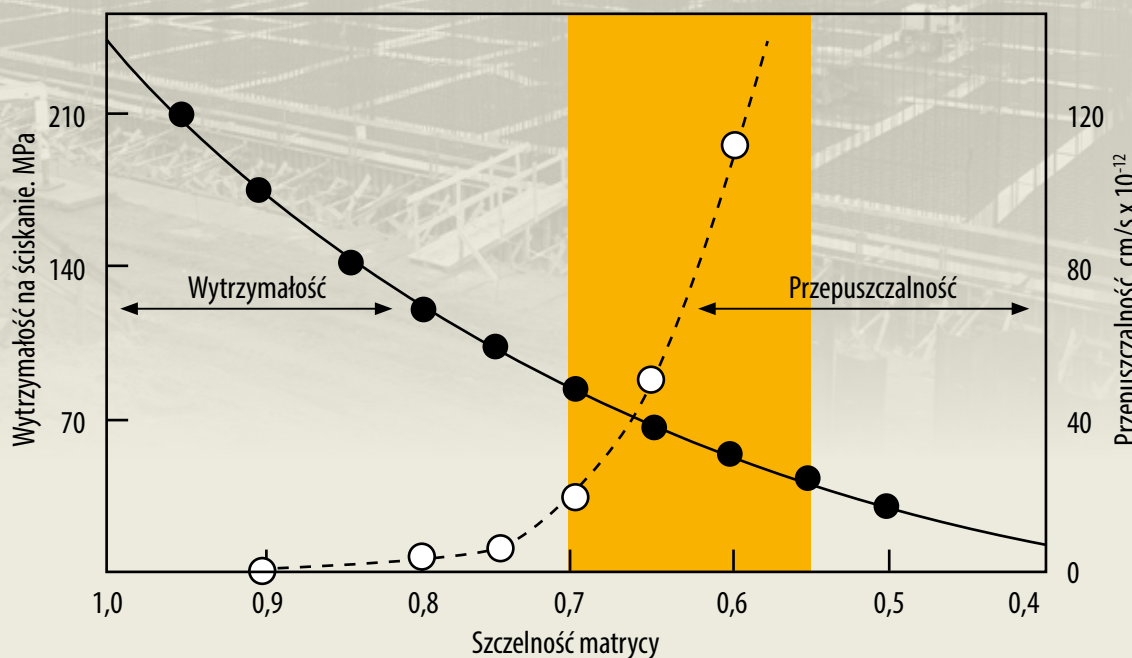
Rys. 5. Pielęgnacja betonu poprzez nanoszenie powłoki ochronnej

Preparaty ochronne nanosi się natryskowo. Istotne jest staranne wykonanie powłoki, aby uszczelnić powierzchnię betonu. W przypadku nanoszenia na powierzchnie pionowe, natrysk należy prowadzić tak, aby nie doprowadzić do spływania preparatu z powierzchni betonu. Prawidłowo pielęgnowany beton posiada bardziej zwartą i mniej porowatą powierzchnię co się przekłada na zwiększenie trwałości betonu (rys. 6)



Rys. 6. Wpływ pielęgnacji na porowatość betonu w strefie powierzchniowej

Szczelność matrycy betonowej w strefie powierzchniowej, bezpośrednio przekłada się na wytrzymałość i trwałość betonu. Im szczelniejszy beton, tym wyższa wytrzymałość i odporność na wnikanie korozyjnych mediów ciekłych i gazowych (rys. 7).



Rys. 7. Wpływ szczelności matrycy na wytrzymałość i przepuszczalność betonu