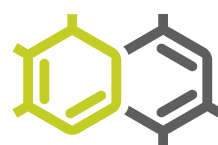
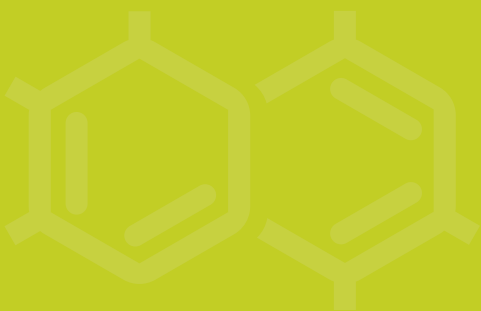




ABC produkcji betonu mrozoodpornego



spchb

Stowarzyszenie Producentów  
Chimii Budowlanej

Stowarzyszenie Producentów  
 Chemii Budowlanej  
 ul. Nowy Świat 41a  
 00-042 Warszawa  
 tel.: +48 (22) 299 06 69  
 e-mail: biuro@spchb.pl  
 www.spchb.pl

## SPIS TREŚCI

1. WROWADZENIE .....	3
2. MECHANIZMY SZKODLIWEGO DZIAŁANIA MROZU I SOLI ODLADZAJĄCEJ .....	3
3. ZASTOSOWANIE ŚRODKÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH .....	5
4. DZIAŁANIE ŚRODKÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH .....	6
5. SUROWCE DO PRODUKCJI ŚRODKÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH .....	7
6. WYMAGANIA DOTYCZĄCE MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU STWARDNIAŁEGO .....	9
7. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA TWORZENIE SIĘ PORÓW POWIETRZNYCH ORAZ LICZBĘ I STABILNOŚĆ PORÓW .....	11
8. WYTWARZANIE BETONU NAPOWIETRZANEGO .....	15
9. NADZÓR NAD PRODUKCJĄ BETONU NAPOWIETRZANEGO .....	17
10. DODATKOWE BADANIA NAPOWIETRZANEJ MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU STWARDNIAŁEGO .....	18
11. BETON MROZOODPORNY NIENAPOWIETRZONY .....	22
12. LITERATURA .....	23

Niniejszy biuletyn nie zwalnia z obowiązku przestrzegania przepisów prawnych obowiązujących w kraju stosowania. Ze względu na różnorodność stosowanych surowców i oferowanych produktów, należy zawsze stosować się do zaleceń zawartych w Kartach Technicznych Produktów wydawanych przez Producentów. Biuletyn stworzono z największą starannością i w oparciu o najlepszą wiedzę, pomimo tego Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej nie ponosi odpowiedzialności za poprawność informacji, wskazówek i zaleceń, oraz za ewentualne błędy drukarskie niniejszej broszury. Nie jest zatem zasadne zgłaszanie jakichkolwiek roszczeń dotyczących powyższych kwestii względem Stowarzyszenia Producentów Chemii Budowlanej, jak również względem autorów broszury.

## SŁOWO WSTĘPNE PROFESORA PAWŁA ŁUKOWSKIEGO Z POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ:

Zniszczenia powodowane przez destrukcyjne działanie mrozu stanowią jeden z najpoważniejszych problemów związanych z trwałością betonu. W klimacie panującym na terenie Polski, każdej zimy notuje się ponad sto przejść przez zero stopni Celsjusza. Zamarzająca woda zwiększa swoją objętość o około 9%. Tworzący się wewnątrz betonu lód wypiera ciepłą wodę w kierunku coraz mniejszych pustek powietrznych, co powoduje wzrost ciśnienia hydraulicznego. Powstałe naprężenia prowadzą do odkształceń, które pogłębiają się po ponownym zamarznięciu; cykle zamarzania odmrażania betonu dają niszczący efekt kumulacyjny. Szczególne zagrożenie dla powierzchni betonu stanowią środki odladzające (NaCl, CaCl<sub>2</sub>), które przyczyniają się do mrozowej destrukcji betonu, przejawiającej się w szczególności w złuszczeniu powierzchniowym.

Skutecznym zabezpieczeniem betonu przed destrukcją mrozową jest napowietrzenie mieszanki betonowej. Informacje zawarte w niniejszym biuletynie pomogą prawidłowo wytwarzać napowietrzony, mrozoodporny beton.



## 1. WPROWADZENIE

Celem biuletynu jest omówienie najistotniejszych mechanizmów powodowanych przez działanie mrozu i środków rozmrażających, zastosowania i działania domieszek napowietrzających oraz wyjaśnienie mechanizmu tworzenia, zawartości i stabilności wytwarzanych porów powietrznych w betonie. Biuletyn ponadto zawiera wskazówki dotyczące produkcji i kontroli betonu napowietrzanego. Omawiane zalecenia oparte są na praktycznych doświadczeniach i stanowią szczególną pomoc dla technologów i producentów, którzy nie każdego dnia mają styczność z produkcją betonu napowietrzanego. Biuletyn ten nie stanowi jedyne go wyczerpującego i kompletnego źródła informacji, ale może być rzetelnym uzupełnieniem informacji na temat betonów napowietrzanych.

Niniejsze wydanie biuletynu informacyjnego „ABC produkcji betonu mrozoodpornego” powstało na potrzeby wydarzenia Dni Betonu 2018 (08-10.10.2018 r.). Wykonawcą i pomysłodawcą projektu biuletynu jest Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej.

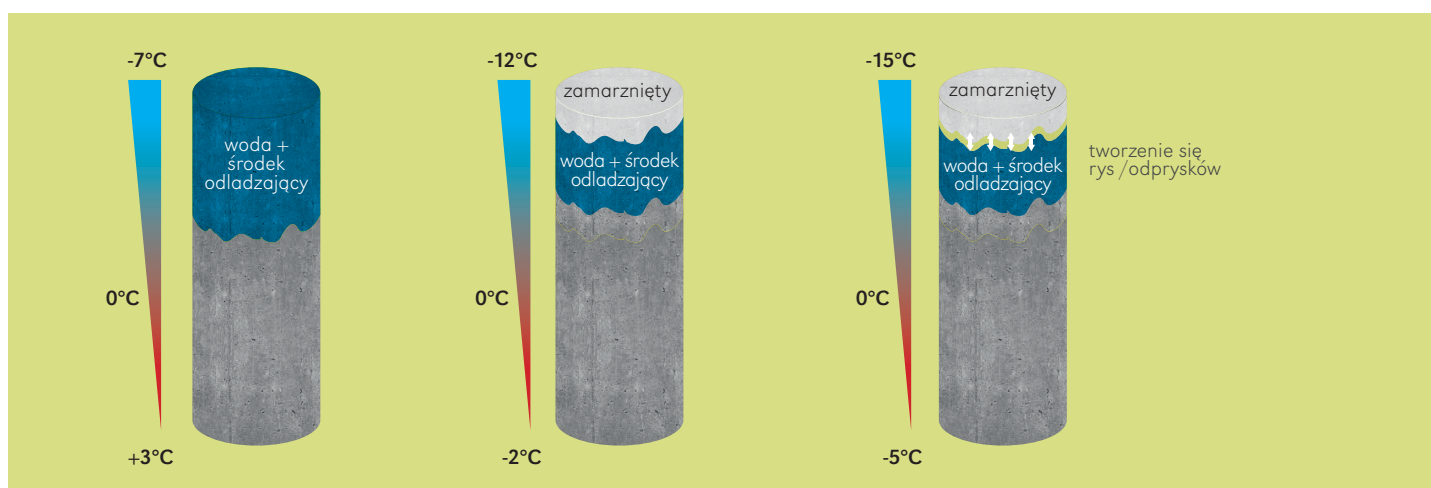
## 2. MECHANIZMY SZKODLIWEGO DZIAŁANIA MROZU I SOLI ODLADZAJĄCEJ

W celu łatwiejszego zrozumienia mechanizmów szkodliwego działania mrozu oraz soli odladzających opracowano modele makro- i mikroskopowe oraz chemiczne. Niektóre z tych modeli uwzględniają także mechanizmy migracji w obrębie systemu porów betonu.

### ■ MODEL MAKROSKOPOWY:

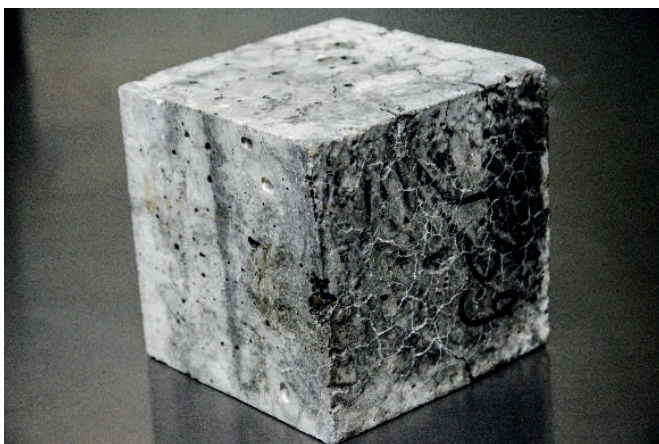
Jeden z szeroko rozpowszechnionych modeli makroskopowych (od czasów Powersa, Helmutha) opiera się na fakcie, że lód ma objętość o około 9% większą niż woda w stanie ciekłym. Gdy woda zamara, to na skutek zwiększenia jej objętości podczas przechodzenia w stały stan skupienia powstaje w betonie ciśnienie krystalizacyjne. To wewnętrzne ciśnienie może przekroczyć wytrzymałość betonu na rozciąganie i doprowadzić do pęknięć i odprysków na jego powierzchni oraz do uszkodzenia matrycy cementowej.

Rys. 1: Model makroskopowy działania mrozu i środków odladzających na beton



Przy ujemnej temperaturze najpierw zamarza woda w głębszych warstwach betonu, do których nie wniknęły chlorki. Przy niższych temperaturach zamarza, począwszy od zewnątrz, także woda zawierająca rozpuszczone sole znajdująca się w warstwach blisko powierzchni betonu (patrz rys. 1). Pojawiające się na skutek zwiększenia objętości powstającego lodu ciśnienie krystalizacyjne może przy zamarzaniu dolnej i górnej warstwy zostać zredukowane, ponieważ rozkłada się również na sąsiednie obszary. Gdy temperatura spada jeszcze bardziej, zamarza w końcu także ta warstwa wody, która znajduje się pomiędzy już zamarzniętymi warstwami. Ciśnienie w tej warstwie nie może wtedy zostać zmniejszone w analogiczny sposób. Powstające wówczas naprężenia mogą być tak duże, że powodują tworzenie się rys i pęknięć w górnej warstwie.

**Rys. 2: Beton bez wystarczającego systemu mikroporów zniszczony przez działanie mrozu i środków odładzających**



#### ■ MODEL MIKROSKOPOWY:

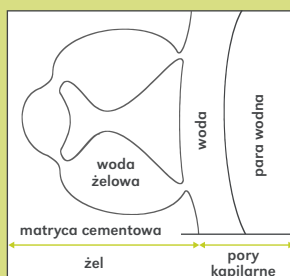
W betonie wyróżnić można makropory, pory kapilarne i żelowe (rys. 3-1). Wskutek interakcji z wewnętrzną powierzchnią porów obniża się temperatura zamarzania wody w przypadku mniejszych porów. Dlatego najpierw zamarza woda w makroporach, a dopiero później (w niższej temperaturze) w porach kapilarnych i żelowych. Ciśnienie pary wodnej jest nad cieczą wyższe niż nad lodem, dlatego woda uchodzi z porów żelowych do porów kapilarnych. Z powodu niewielkich odległości między porami proces ten przebiega bardzo szybko. W jego rezultacie pory żelowe zamykają się, powodując kurczenie się sieci macierzystej (rys. 3-2).

Przy rozmarzaniu zmniejszają się różnice w ciśnieniu pary między wodą a lodem, proces migracji zatrzymuje się i żel znowu się rozszerza. Woda, związana z lodem w porach kapilarnych, nie może wrócić do porów żelowych. Dlatego do systemu porów zostaje wchłonięta woda z zewnątrz (rys. 3-3).

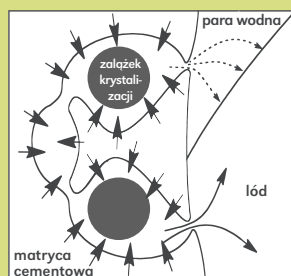
Z każdym cyklem obejmującym zamrażanie/odmrażanie pory coraz bardziej nasycają się wodą, aż w końcu nasycenie to osiąga destrukcyjny poziom. W literaturze model ten jest opisywany jako „**pompa lodowych mikrosoczewek**”. Przy narastającym mrozie brak już porów, które mogłyby pomieścić rozszerzający się lód. Powstają mikropęknięcia i w ciągu kilku dalszych cyklów mrozu i odwilży beton ulega zniszczeniu.

Wprowadzenie porów powietrznych przerywa proces migracji w systemie porów kapilarnych. Wchłanianie wilgoci podczas cykli zamrażania/odmrażania oraz ryzyko szkodliwego poziomu nasycenia zostają zmniejszone.

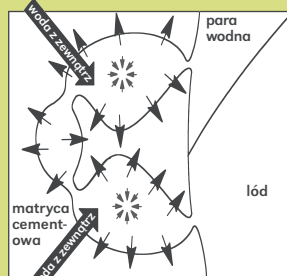
**Rys. 3: Model mikroskopowy**



Rys. 3-1:  
System porów kapilarnych  
w betonie.



Rys. 3-2:  
Migracja wody z porów żelowych  
do porów kapilarnych przy  
tworzeniu się lodu. Pory żelowe  
zamykają się (kurczenie się  
wskutek mrozu).



Rys. 3-3:  
Wsysanie mrozu przy odmrażaniu.

Rys. 3-1: System porów kapilarnych w betonie.

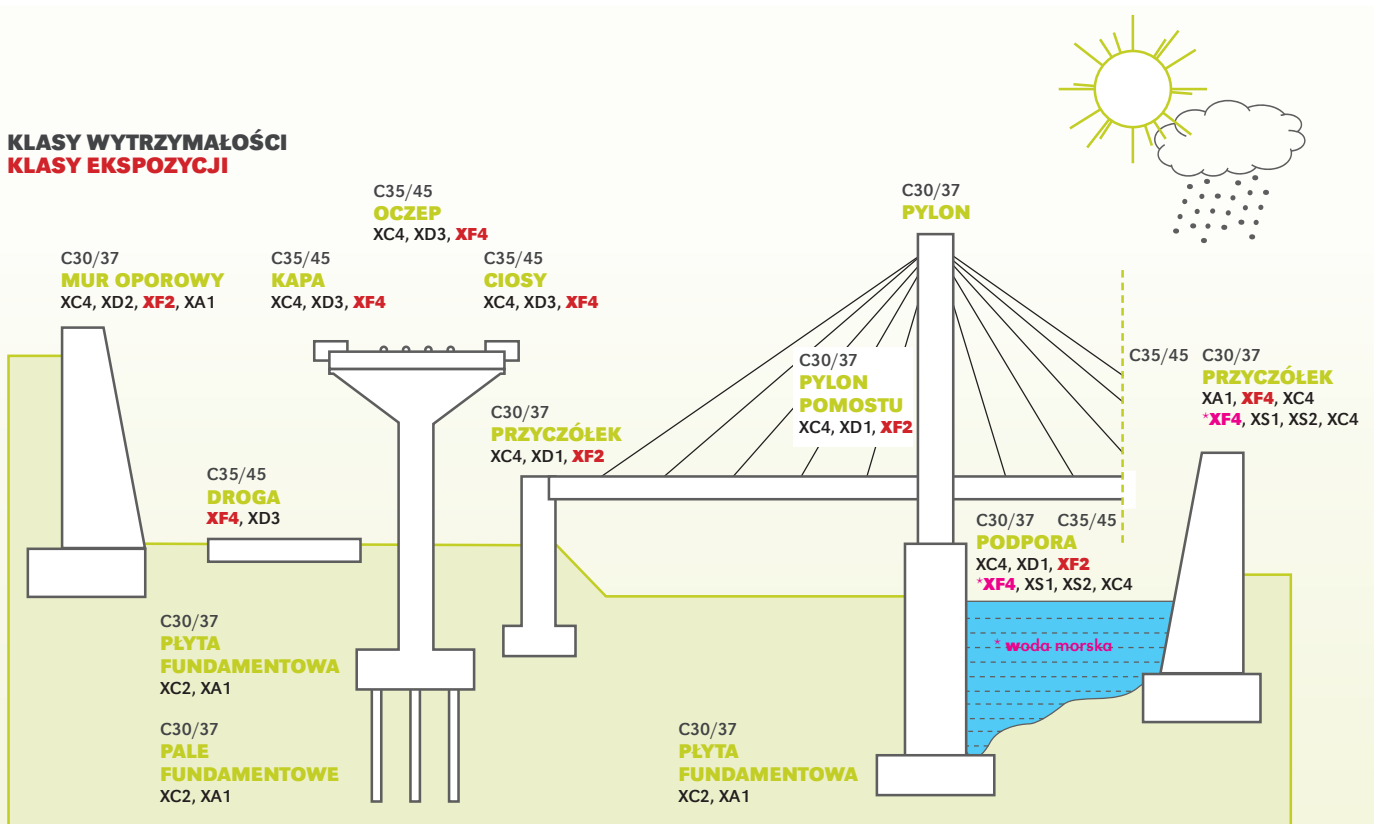
Rys. 3-2: Migracja wody z porów żelowych do porów kapilarnych przy tworzeniu się lodu. Pory żelowe zamykają się (kurczenie się wskutek mrozu).

Rys. 3-3: Wsysanie mrozu przy odmrażaniu.

### 3. ZASTOSOWANIE ŚRODKÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH

Najważniejszym i najbardziej znanym obszarem zastosowania środków napowietrzających jest zwiększenie odporności stwardniałego betonu na działanie mrozu i środków odladzających. Sztucznie wprowadzone mikropęcherzyki powietrza zwiększają trwałość betonu. Dlatego beton przeznaczony na drogi, powierzchnie lotnisk i budowle morskie powinien być wytwarzany jako beton napowietrzony. Także betonowe powierzchnie dziedzińców i parków, wystawione na działanie mrozu i środków odladzających, powinny być wykonane z betonu napowietrzonego. Beton taki sprawdza się również w budownictwie mostów oraz w przemyśle elementów prefabrykowanych, na przykład w produkcji płyt fasadowych. Zasady te nie dotyczą betonów o konsystencji wilgotnej – tzw. betonów wibroprasowanych.

**Rys. 4: Schemat obiektów z klasą ekspozycji XF (wg PN-EN 206) – agresja spowodowana przez cykliczne zamrażanie/rozmarzanie przy udziale środków odladzających lub bez ich udziału**



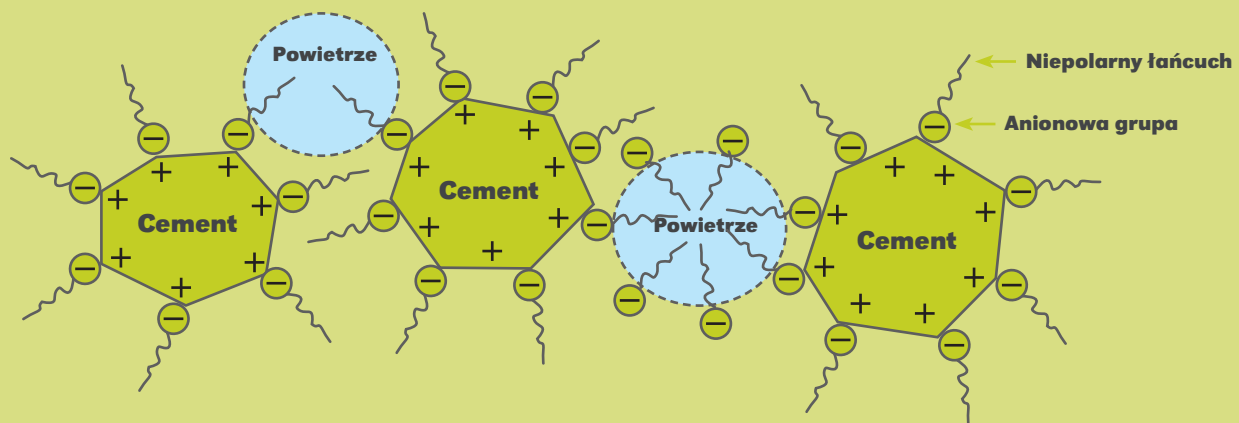
Wprowadzenie mikropęcherzyków powietrza ma korzystne działanie także w mieszance betonowej. Małe, równomiernie rozłożone pory działają w zaprawie jak łożyska kulkowe, powodując, że mieszanka jest bardziej jednorodna i plastyczna oraz łatwiej urabialna. Skłonność betonu do segregacji zostaje zredukowana. W przypadku betonów o małej zawartości drobnego kruszywa i przy zastosowaniu piasku z niewielką zawartością drobnych cząstek mineralnych, pęcherzyki powietrza zastępują brakujące drobne frakcje w mieszaninie. Wskutek tego polepsza się urabialność takich mieszanek. Mikropory zapewniają świeżo wbudowanemu betonowi ochronę przed wyschnięciem. Ten efekt nie może jednak zastąpić pielęgnacji. W wysokiej temperaturze młody beton napowietrzony jest mniej podatny do tworzenia rys aniżeli beton bez sztucznie wprowadzonych mikropęcherzyków.

## 4. DZIAŁANIE ŚRODKÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH

Domieszki napowietrzające to roztwory związków powierzchniowo czynnych o odpowiednio dobranym stężeniu substancji aktywnej. Zbudowane są z części hydrofilowej (np.  $\text{SO}_3^-$ ) i części hydrofobowej (np. niepolarnego długiego łańcucha grup alkilowych C12 – C16). Część hydrofilowa cząsteczki łączy się z ziarnem cementu, a część hydrofobowa jest skierowana w stronę wody (rys X.). W następstwie tego procesu powierzchnia ziarna cementu ulega hydrofobizacji, pęcherzyki powietrza adsorbują się na powierzchni i są tam utrzymywane.

Zastosowanie prawidłowo dobranej domieszki umożliwia wprowadzenie bardzo drobnych pęcherzyków powietrza, otoczonych cienką błonką cieczy, zapobiegającą łączeniu się pęcherzyków w większe skupiska w czasie mieszania. Podczas twardnienia betonu pęcherzyki ulegają mineralizacji i stają się częścią końcowej struktury tworzywa.

**Rys. 5: Zasada działania domieszki napowietrzającej („Rozwój domieszek do betonów nowej generacji”  
P. Łukowski, Politechnika Warszawska)**

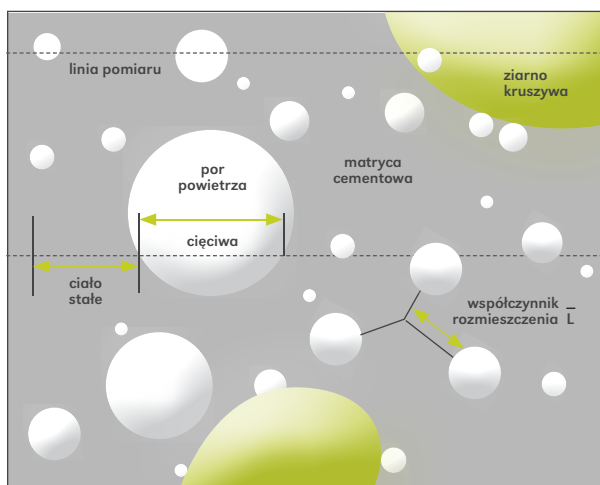


Odporność betonu na cykle zamrażania i rozmrażania jest największa, gdy w strukturę wbudowane są mikropęcherzyki powietrza o średnicy  $< 300 \mu\text{m}$ . Drobne i efektywnie rozproszone mikropory (o współczynniku rozmieszczenia  $< 200 \mu\text{m}$ ) w betonie skracają drogę zamarzającej wody. Zapobiega to tworzeniu się ciśnienia krystalizacyjnego, a dodatkowo zamykane kapilary dają efekt mniejszej chłonności wody i środków odładzających. System powietrznych mikroporów w stwardniałym betonie charakteryzowany jest za pomocą zbioru parametrów (Rys. 6), spośród których do najważniejszych należą:

- **współczynnik rozmieszczenia ( $\bar{L}$ )** - największa odległość od dowolnego miejsca w betonie do najbliższego poru powietrznego
- **„liczba mikroporów” ( $A_{300}$ )** - zawartość małych, kulistych lub zbliżonych do kulistych porów o średnicy  $< 300 \mu\text{m}$ .



**Rys. 6: Najważniejsze wielkości mierzone w procesie analizy rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie**



**Zawartość porów powietrza**

$$A = \frac{T_a}{T_s + T_a} \cdot 100$$

wyrażoną jako % objętości gdzie:

$T_s$  – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez ciało stałe

$T_a$  – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez pory powietrzne

• **Zawartość mikroporów  $A_{300}$**   
parametr obliczany, określający zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy do 0,3 mm (300  $\mu\text{m}$ )

• **Współczynnik rozmieszczenia  $\bar{L}$**   
parametr obliczany, określający maksymalną odległość dowolnego punktu zaczynu cementowego od krawędzi poru powietrznego, mierzoną wzdłuż zaczynu, wyrażony w mm.

Ocena jakościowa mrozoodporności i odporności na środki odmrażające betonów może być przeprowadzona tylko w ramach odpowiedniego procesu kontrolnego. W normach zdefiniowano badania kontrolne do określenia odporności na mróz i na środki odmrażające:

- Metoda zwykła (stopień mrozoodporności F) wg PN-B-06265
- Powierzchniowa procedura kontroli (metoda referencyjna); Slab-test
- Kostkowa procedura kontroli (metoda alternatywna); Cube-test
- Procedura CF oraz CDF (metoda alternatywna)

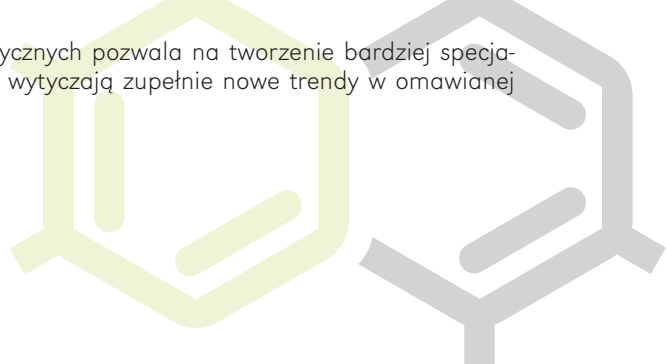
## 5. SUROWCE DO PRODUKCJI ŚRODKÓW NAPIEWIETRZAJĄCYCH

Powierzchniowo czynne substancje, surfaktanty, odpowiedzialne są za wytwarzanie stabilnych mikroporów powietrza w mieszance betonowej. Pojęcie surfaktanty obejmuje związki chemiczne, które adsorbują się na granicy faz, przez co obniżają napięcie powierzchniowe pomiędzy dwoma niemieszającymi się ze sobą fazami. W przypadku betonu lub zaprawy zjawisko to zachodzi między porami powietrznymi a zaczynem cementowym.

Wprowadzenie domieszek zawierających surfaktanty do mieszanki betonowej skutkuje także obniżeniem napięcia powierzchniowego wody, działając spieniająco, co sprzyja powstawaniu stabilnych mikropęcherzyków powietrza podczas etapu mieszania. Uzyskanie mikroporów o ściśle określonej średnicy i odpowiednim wskaźniku dyspersji wymaga zastosowania odpowiedniej mieszaniny środków napowietrzających oraz tzw. kosurfaktantów – wspomagających środków powierzchniowo czynnych.

Środki o potencjalnym działaniu napowietrzającym można podzielić na:

- **Syntetyczne** – bardzo wydajne, wymagające krótkiego czasu mieszania. Surfaktanty syntetyczne mają ogromny potencjał i stanowią największą grupę związków powierzchniowo czynnych. Wciąż wiele z nich nie zostało zbadanych w mieszaninach betonowych.
- **Naturalne** – najstarsza i najbardziej poznana grupa produktów, wykazują bardzo dobrą kompatybilność z innymi domieszkami. Składniki tych produktów są jednak coraz droższe i maleje ich dostępność na rynku. Surfaktanty naturalne są mniej wydajne od ich syntetycznych odpowiedników, jak również cechują się ograniczoną odpornością na twardą wodę.
- **Mieszane** – synergiczne działanie składników naturalnych i syntetycznych pozwala na tworzenie bardziej specjalistycznych produktów. Mieszanki oferują szersze pole manewru i wytyczają zupełnie nowe trendy w omawianej dziedzinie.



**Tab. 1: Wybrane składniki domieszek napowietrzających**

GRUPA CHEMICZNA	DZIAŁANIE
Sole laurylosiarczanów	Środki napowietrzające o bardzo dobrej kompatybilności z innymi surfaktantami syntetycznymi
Sole lauryloeterosiarczanów	Wysokowydajne środki napowietrzające. Cechują się dobrą odpornością na twardą wodę. Stanowią najczęściej stosowaną grupę związków
Sole sulfonowanych alfa-olefin	Środki napowietrzające o najwyższej odporności na twardą wodę. Mają silne działanie detergencyjne. Bardzo dobrze współdziałają z surfaktantami naturalnymi
Sole alkilobenzenosulfonianów	Środki napowietrzające o dobrej wydajności. Zawierające je domieszki mają najmniejszy wpływ na spadek wytrzymałości betonu
Etoksylogowane alkohole	Środki napowietrzająco-zwilżające. Stabilizatory pęcherzyków powietrza. Do pełnej funkcjonalności wymagają obecności laurylosiarczanów lub lauryloeterosiarczanów
Amidobetainy	Środki wspomagające napowietrzenie (kosurfaktanty). Stabilizują strukturę i trwałość pęcherzyków powietrza
Żywyce naturalne i ich sole	Małoinwazyjne, naturalne środki napowietrzające o dobrym działaniu synergicznym



Zastosowanie różnych surfaktantów może skutkować różnym efektem napowietrzenia, w zależności od pozostałych składników betonu. Dla przykładu, cement o zwiększonej zawartości alkaliów wymaga wyższego stężenia surfaktantów. Podobnie jest w przypadku twardej wody, która obniża efekt działania środków napowietrzających.

Stosowanie domieszek napowietrzających łącznie z superplastyfikatorami może wywoływać skrajne, a zarazem trudne do przewidzenia rezultaty, dlatego należy ściśle kontrolować wzajemne interakcje, m.in. zmiany konsystencji oraz napowietrzenia mieszanki. Podczas kontrolowanego napowietrzenia należy zwracać szczególną uwagę na kolejność dozowania tych domieszek. Podobne zależności można zaobserwować, stosując dodatki o dużej powierzchni właściwej (np. popiół lotny zawierający koksik), powodujące nadmierną adsorpcję surfaktantów, a w efekcie osłabiające ich skuteczność lub tworzące niepożądane strefy o zróżnicowanej zawartości powietrza. Należy zwrócić uwagę, że nawet właściwie wprowadzone powietrze obniża średnią wytrzymałość na ściskanie o około 3 N/mm<sup>2</sup> w przeliczeniu na 1% wprowadzonego do betonu powietrza. Z tego względu podczas projektowania należy dobrać odpowiednie surfaktanty i przewidzieć ich właściwe dozowanie, co pozwala uzyskać dobrą kompatybilność domieszki z konkretnym betonem. Przydatność różnych środków napowietrzających opisana jest przez ogólne wymagania Normy Europejskiej dotyczącej wymagań podstawowych wobec domieszek, EN 934-1, oraz przez dodatkowe wymagania sformułowane w normie EN 934-2 (tabela 2), które stanowią podstawę projektowania współczesnych domieszek napowietrzających.



**Tab. 2: Wymagania zawarte w normie PN-EN 934-2**

WŁAŚCIWOŚĆ	RODZAJ BETONU	METODA	WYMAGANIE
Zawartość powietrza w mieszance betonowej	Beton wzorcowy III wg EN 480-1	wg EN 12350-7	Całkowita zawartość powietrza 4 - 6% (objętościowo), $\geq 2,5\%$ względem próbki kontrolnej
Charakterystyka porów w betonie stwardniałym	Beton wzorcowy III wg EN 480-1	wg EN 480-11	Współczynnik rozmieszczenia $\leq 0,200$ mm
Wytrzymałość na ściskanie	Beton wzorcowy III wg EN 480-1	wg EN 12390-3	Po 28 dniach: $\geq 75\%$ wytrzymałości względem próbki kontrolnej

## 6. WYMAGANIA DOTYCZĄCE MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU STWARDNIAŁEGO

W tabeli 4 podano wartości graniczne dotyczące składu i cech betonu napowietrzonego. Betony, które mają spełniać wymagania klas ekspozycji XF2 do XF4 powinny być wytwarzane jako betony napowietrzone.

**Tab. 3: Klasy ekspozycji związane z agresją spowodowaną zamrażaniem/rozmarzaniem przy udziale środków odladzających lub bez ich udziału zgodnie z PN-EN 206+A1**

OZNACZENIE KLASY	OPIS ŚRODOWISKA	PRZYKŁADY WYSTĘPOWANIA KLAS EKSPOZYCJI
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażone na zamarzanie i działanie środków odladzających z powietrza
XF3	Silne nasycenie wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF4	Silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających. Powierzchnie betonowe bezpośrednio narażone na działanie aerozoli zawierających środki odladzające i zamarzanie. Strefy rozbryzgu w budowlach morskich narażonych na zamarzanie.

Wymagana minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa.

**Tab. 4: Zalecane wartości graniczne dotyczące składu oraz właściwości betonu dla klas ekspozycji związanych z zamrażaniem/rozmarzaniem zgodnie z PN-B-06265**

	KLASA EKSPOZYCJI			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Maksymalne w/c <sup>a</sup>	0,55	0,55	0,50	0,45
Minimalna klasa wytrzymałości	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Minimalna zawartość cementu <sup>a</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	300	300	320	340
Minimalna zawartość CEM I lub CEM II/A przy stosowaniu dodatku mineralnego (kg/m <sup>3</sup> )	280	b	b	b
Minimalna zawartość powietrza (%)	-	Zawartość objętościowa powietrza w mieszance betonowej przed jej wbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i powinna wynosić dla kruszywa: do 8 mm ≥ 5,5%; do 16 mm ≥ 4,5%; do 32 mm ≥ 4,0%; do 64 mm ≥ 3,5%	Zawartość objętościowa powietrza w mieszance betonowej przed jej wbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i powinna wynosić dla kruszywa: do 8 mm ≥ 5,5%; do 16 mm ≥ 4,5%; do 32 mm ≥ 4,0%; do 64 mm ≥ 3,5%	Zawartość objętościowa powietrza w mieszance betonowej przed jej wbudowaniem zależy od maksymalnego wymiaru ziaren zastosowanego kruszywa i powinna wynosić dla kruszywa: do 8 mm ≥ 5,5%; do 16 mm ≥ 4,5%; do 32 mm ≥ 4,0%; do 64 mm ≥ 3,5%
Inne wymagania	F <sub>2</sub> <sup>f</sup>	F <sub>1</sub> <sup>f</sup>	F <sub>1</sub> <sup>f</sup>	F <sub>NaCl</sub> 6 <sup>i</sup>

<sup>a</sup> W przypadku stosowania koncepcji współczynnika *k* maksymalny współczynnik w/c oraz minimalną zawartość cementu modyfikuje się zgodnie z PN-EN 206+A1:2016-12 p.5.2.5.2

<sup>b</sup> Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II do produkcji betonu, lecz nie jako ekwiwalent dla minimalnej ilości cementu

<sup>f</sup> Kruszywo o mrozoodporności odpowiadającej kategorii (F) wg PN-EN 12620

<sup>i</sup> Kruszywo o mrozoodporności w roztworze NaCl (F<sub>NaCl</sub>) odpowiadającej wartości deklarowanej, określonej na podstawie badania wg PN-EN 1367-6

W produkcji liczby te mogą być niższe odnośnie do pojedynczej wartości, ale o nie więcej niż 0,5% objętości. (Według normy EN 206 górną granicą zawartości powietrza jest ustalona wartość minimalna plus 4%).

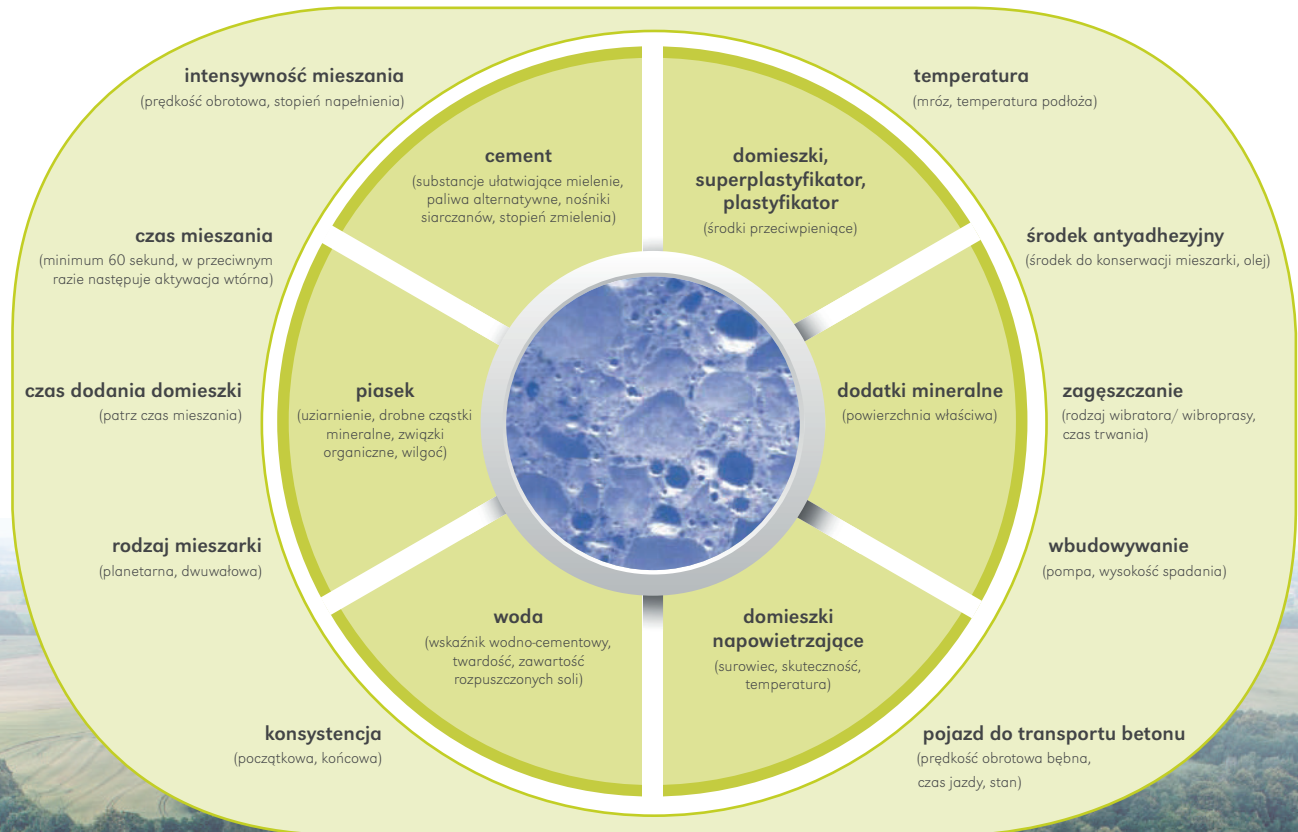
Dodanie środków napowietrzających może pozwolić na odpowiednie dostosowanie poziomu średniej zawartości powietrza w mieszance betonowej, stosownie do powyższych wymagań.

Stosowanie się do normowych wymagań dotyczących zawartości powietrza w mieszance betonowej z reguły umożliwi także osiągnięcie parametrów wymaganych wobec stwardniałego betonu napowietrzonego (patrz tabela 2).

## 7. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA TWORZENIE SIĘ PORÓW POWIETRZNYCH ORAZ LICZBĘ I STABILNOŚĆ PORÓW

Na tworzenie się porów wpływa duża liczba czynników, na które składają się czynniki związane ze składem mieszanki (tab. 5) oraz technologiczne (tab. 6).

**Rys. 7: Wpływ różnych czynników na zawartość powietrza w betonie napowietrzonym**



## ■ SKŁAD MIESZANKI

Tab. 5: Wpływ składu mieszanki na napowietrzenie betonu i sposoby minimalizacji niepożądanych efektów

	CECHA	EFEKT	DZIAŁANIE
<b>CEMENT PORTLANDZKI</b>	Zawartość alkaliów	<p>Zawartość powietrza w mieszance wzrasta wraz ze wzrostem ilości alkaliów w cemencie.</p> <p>Potrzeba mniej domieszki napowietrzającej, jeśli stosowany jest cement o dużej zawartości alkaliów.</p> <p>System porów może być niestabilny przy niektórych kombinacjach ilości alkaliów i domieszki napowietrzającej.</p>	<p>Zmiana zawartości alkaliów w cemencie wymaga dopasowania dozowania domieszki napowietrzającej.</p> <p>Cementy o dużej zawartości alkaliów wymagają zmniejszenia dozowania domieszki napowietrzających nawet o 40%.</p>
	Powierzchnia właściwa	Zmniejszenie zawartości powietrza wraz ze wzrostem powierzchni właściwej cementu.	Cementy o dużym stopniu rozwinięcia powierzchni właściwej wymagają zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej nawet o 100%.
	Zawartość cementu w mieszance	<p>Spadek ilości powietrza wraz ze zwiększeniem udziału cementu w mieszance betonowej.</p> <p>Zmniejszenie ilości cementu umożliwia uzyskanie większej liczby porów o mniejszych średnicach.</p>	Zwiększenie ilości cementu w mieszance wiąże się z koniecznością zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej.
	Zanieczyszczenia	Zawartość powietrza w mieszance może się zmieniać w zależności od poziomu zanieczyszczeń cementu olejami.	Należy sprawdzić, ile powietrza zawiera zaprawa bez domieszki napowietrzającej.
<b>DODATKI</b>	Popiół lotny	Na ilość powietrza w mieszance betonowej ma wpływ ilość niespalonego węgla obecnego w popiele lotnym. Im jest go więcej, tym trudniej napowietrzyć mieszankę.	Dozowanie domieszki napowietrzającej musi być dostosowane do wysokości strat prażenia popiołu lotnego.
	Granulowany żużel wielkopiecowy	Wraz ze wzrostem powierzchni właściwej żużla spada zawartość powietrza.	Żużle o dużym rozdrobnieniu wymagają zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej nawet o 100%.
	Pył krzemionkowy	Spadek ilości powietrza wraz ze zwiększeniem udziału pyłu krzemionkowego w mieszance betonowej.	Zwiększenie udziału pyłu krzemionkowego o 10% wymaga zwiększenia dozowania domieszki o 100%.
<b>DOMIESZKI</b>	Plastyfikatory	Mały wpływ na napowietrzenie betonu.	Przygotowanie zarobów próbnych i analiza rozmieszczenia porów.
	Superplastyfikatory	Domieszki polikarboksyłanowe mogą zwiększać ilość powietrza w mieszance.	Sprawdzenie wpływu domieszki PCE na napowietrzenie oraz dostosowanie ilości domieszki napowietrzającej.
	Opóźniacze/Przyspieszacze	Wartość współczynnika rozmieszczenia porów może się zmieniać.	Dostosowanie ilości domieszki napowietrzającej.

<b>KRUSZYWO</b>	Maksymalny wymiar ziarna	Wymagana ilość powietrza w mieszance spada wraz ze wzrostem maksymalnego wymiaru ziarna.	Obniżenie zawartości powietrza, mniejsze dozowanie domieszki.
	Stosunek zawartości piasku do całkowitej zawartości kruszywa	Ilość powietrza w mieszance wzrasta wraz ze zwiększeniem udziału piasku w stosie okrucowym.	Zmniejszenie ilości domieszki napowietrzającej w mieszankach o dużej zawartości piasku.
	Uziarnienie piasku	Środkowe frakcje (0,25 – 1,00 mm) piasków ułatwiają napowietrzenie mieszanek.	Wykonanie analizy sitowej i dostosowanie ilości dozowanej domieszki.
<b>ILOŚĆ I JAKOŚĆ WODY</b>	Woda zarobowa	Twardość wody wpływa na ilość powietrza w mieszance betonowej.	Sprawdzenie twardości i dostosowanie rodzaju i ilości domieszki napowietrzającej.
	Konsystencja	Łatwiej napowietrzyć mieszankę betonową o konsystencji S2 i S3. Trudniej napowietrzyć mieszanki betonowe o konsystencji S4 i wyżej oraz S1.	Dostosowanie ilości domieszki napowietrzającej.

#### ■ CZYNNIKI TECHNOLOGICZNE

Tab. 6: Wpływ czynników technologicznych na napowietrzenie betonu i sposoby minimalizacji niepożądanych efektów

	<b>CECHA</b>	<b>EFEKT</b>	<b>DZIAŁANIE</b>
<b>PRODUKCJA</b>	Kolejność dozowania składników	Jednoczesne dodawanie składników powoduje trudności w uzyskaniu stabilnych i powtarzalnych rezultatów napowietrzenia.	Zalecana kolejność dozowania: kruszywo, cement, woda zarobowa, domieszka napowietrzająca, domieszki uplastyczniające i upłynniające.
	Czas mieszania	Zbyt krótki czas mieszania może powodować niepełną aktywację domieszki napowietrzającej oraz wzrost napowietrzenia w trakcie transportu.	Ustalenie optymalnego czasu mieszania (minimum 90 sekund).
<b>PRODUKCJA</b>	Rodzaj mieszalnika	Typ mieszalnika wpływa na efektywność napowietrzania.	Ustalenie optymalnego rodzaju mieszalnika.
	System dozowania domieszki	Rodzaj oraz dokładność dozowania maszyn dozujących ma wpływ na ilość wprowadzanego powietrza.	Unikanie manualnego dozowania domieszki. Stosowanie urządzeń dozujących o odpowiednio wysokiej dokładności oraz stosowanie się do zalecanego dozowania podanego przez producenta.

<b>TRANSPORT</b>	Transport i dostawa	Środki transportu, w których mieszanka betonowa nie jest dodatkowo wzruszana, przyczyniają się do większej utraty napowietrzenia.	Zabiegi prowadzące do poprawy konsystencji po zakończonym transporcie zwiększają również udział powietrza w mieszance.
	Czas przewozu	Długie czasy przewozu mogą powodować zmianę zawartości powietrza zwłaszcza w podwyższonej temperaturze.	Optymalizacja logistyki dostaw mieszanki betonowej.
<b>UKŁADANIE</b>	Podajnik taśmowy	Może powodować zmiany zawartości powietrza.	Unikanie używania podajników taśmowych na długich odcinkach.  Zredukowanie wysokości na końcu taśmy, z której spada beton.
	Natryskiwanie	Redukcja zawartości powietrza przy użyciu mokrej metody natryskiwania.	Zawartość powietrza w mieszance betonowej powinna zostać dobrana w ramach wcześniejszych prób.
<b>UKŁADANIE</b>	Pompowanie	Redukcja zawartości powietrza od 2% do 3%.  Nie wpływa znacząco na system porów.	Odpowiednio dobrana receptura zapewnia stabilny system porów.  Stosować jak najniższe ciśnienie podczas pompowania.
<b>WYKOŃCZENIE</b>	Zagęszczanie	Prawidłowe wibrowanie nie wpływa na jakość napowietrzenia.	Nie należy przewibrowywać mieszanki betonowej.
	Temperatura	Zawartość powietrza spada wraz ze wzrostem temperatury otoczenia.  Zmiany temperatury nie wpływają znacząco na jakość napowietrzenia.	Zwiększenie ilości dodawanej domieszki.



## 8. WYTWARZANIE BETONU NAPOWIETRZANEGO

Projektowanie betonu odpornego na mróz i środki odładzające powinno odbywać się zgodnie z wymaganiami normowymi, opisanymi w rozdziale 6. Dodatkowo, oprócz tych regulacji opracowuje się wymagania technologiczne dotyczące określonego zastosowania i wykonywanych konstrukcji.

Szczególnie istotne jest opracowanie receptury betonu napowietrzanego przeznaczonego na elementy masywne, wykorzystywane w budownictwie wodnym. W przypadku takich prac ważna jest minimalizacja ciepła hydratacji, co osiąga się przez zmniejszenie zawartości cementu i współczynnika woda/cement. Produkcja tego typu betonów napowietrzanych stawia bardzo wysokie wymagania co do jakości i powtarzalności składników, wchodzących w skład betonu, oraz optymalizacji operacji jednostkowych składających się na proces technologiczny. Bardzo ważne jest przeprowadzenie wstępnych prób technologicznych oraz stała kontrola jakości. Szczególne znaczenie ma ścisła współpraca wszystkich zaangażowanych stron.

Zastosowanie domieszek napowietrzających wymaga szczególnej dokładności i doświadczenia. W celu uzyskania pożądanego napowietrzenia mieszanki niejednokrotnie wystarczająca jest niewielka zawartość domieszki. Dokładność dozowania domieszek do betonu, wynosząca  $\pm 5,0\%$  w odniesieniu do wymagań normowych, w szczególnych przypadkach może okazać się niewystarczająca.

W związku z powyższym, producenci oferują domieszki napowietrzające o różnej charakterystyce. Często konieczne jest odpowiednie dostosowanie rodzaju oraz wielkości dozowania indywidualnie do każdego przypadku. W celu dokonania właściwego doboru zaleca się konsultację z producentami.

Precyzja dozowania domieszek napowietrzających powinna być zapewniona przy pomocy precyzyjnych urządzeń dozujących. Należy zwrócić uwagę, że zgodnie z PN-EN 206, rozdział 5.2.6 „Stosowanie domieszek”, domieszka wprowadzana w ilości mniejszej niż 0,2% masy cementu powinna być rozpuszczona w wodzie zarobowej przed dodaniem do mieszanki betonowej. Nie dotyczy to sytuacji, w których niemożliwe jest jednorodne rozprowadzenie domieszki w wodzie. Należy przy tym przestrzegać zalecanego przez producenta zakresu dozowania domieszek.

Równie istotna jest kolejność dozowania surowców, moment dozowania domieszki napowietrzającej oraz zalecany czas mieszania. Wymienione czynniki mają decydujący wpływ na jakość napowietrzenia i stabilność porów. Zaleca się dozowanie napowietrzacza razem z wodą zarobową, a następnie pozostałych domieszek. Optymalny czas mieszania po dodaniu domieszki napowietrzającej, a przed wprowadzeniem pozostałych domieszek, mieści się w granicach od 15 do 30 sekund.

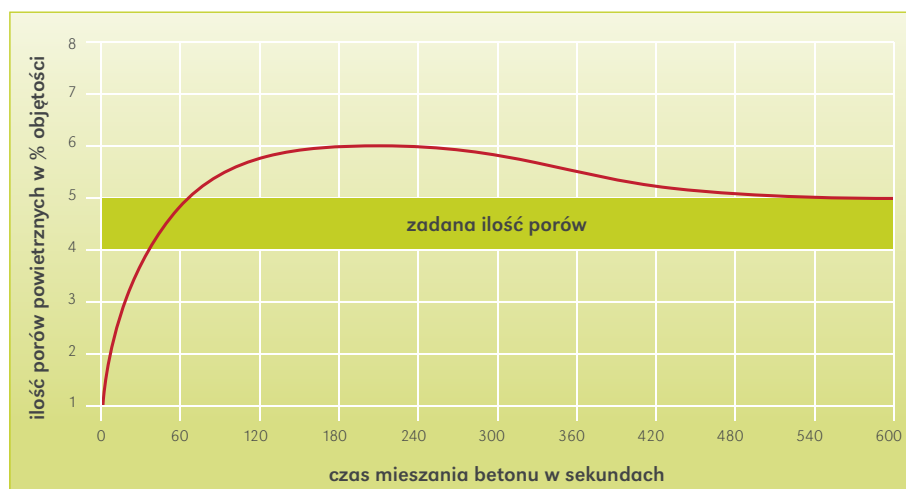
**Rys. 8: Zalecenia odnośnie do kolejności dozowania**



Przy jednoczesnym stosowaniu więcej niż jednej domieszki, ich kompatybilność należy sprawdzić w badaniach wstępnych.

Beton należy mieszać w wydajnych mieszarkach odpowiednio długo, tak aby cała domieszka napowietrzająca uległa aktywacji. Po dodaniu wszystkich składników czas mieszania nie powinien być krótszy niż 60 sekund, a nawet 90 sekund. Zbyt krótkie okresy mieszania prowadzą do niekompletnej aktywacji domieszki napowietrzającej. Na efektywność napowietrzenia wpływa energia mieszania. Im jest ona większa lub pochodzi z dodatkowych źródeł, tym efektywność napowietrzenia jest większa. Wynikiem tego może być wzrost zawartości powietrza podczas transportu mieszanki betonowej (aktywacja wtórna; patrz rys. 9).

**Rys. 9: Tworzenie się porów w zależności od czasu mieszania betonu (cykl mieszarki laboratoryjnej, zoptymalizowane dodawanie środka napowietrzającego)**



Aby zapobiec niekontrolowanemu napowietrzeniu betonu podczas transportu, należy drogą badań wstępnych ustalić skutki takiego transportu (konsekwencje aktywacji wtórnej). Ważne jest, aby transport odbywał się w wolno obracającym się bębnie (gruszce) betonowozu. Ponadto należy ocenić, jaki wpływ na efektywność napowietrzenia ma proces wbudowania betonu (patrz rozdział 6), szczególnie pompowanie betonu.

Oprócz kontroli zawartości powietrza w betonie należy także prowadzić kontrolę innych parametrów mieszanki, takich jak zmiana konsystencji w czasie. Zmiany konsystencji (urabialności) mogą mieć znaczący wpływ na liczbę oraz jakość porów powietrznych. Jeżeli w wyniku zaistniałych okoliczności konieczne będzie wtórne dozowanie domieszki upłynniającej w miejscu wbudowania betonu (dozowanie wtórne w betonowozie), to należy również zbadać wpływ tej operacji na zawartość porów.

Oprócz wstępnego badania kontrolnego w laboratorium, zaleca się badanie w miejscu produkcji betonu. Odpowiednie wskazówki dotyczące między innymi skutków mieszania podano w rozdziale 8. Zawartość domieszki napowietrzającej w praktyce może się znacznie różnić od wyników badań w laboratorium.

Wbudowanie napowietrzonego betonu powinno być przeprowadzone najszybciej jak to możliwe po jego wytworzeniu, najlepiej w ciągu 90 minut od wymieszania składników.

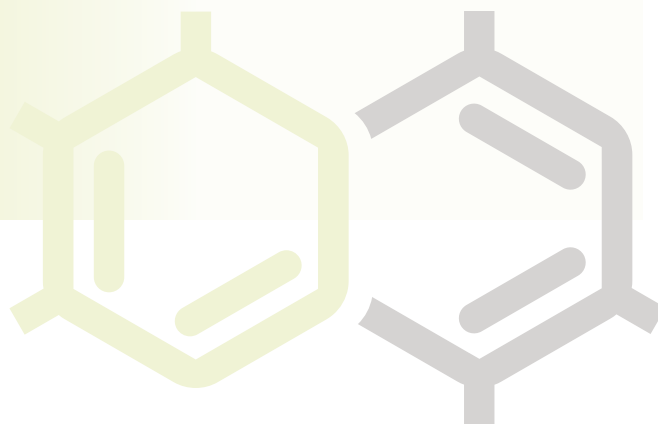
Jeżeli w toku prac wbudowanie betonu następuje powoli, należy zoptymalizować czas dostawy kolejnych partii betonu na miejsce budowy.

W celu zapewnienia maksymalnej stabilności i jakości napowietrzenia zaleca się, aby System Zakładowej Kontroli Produkcji uwzględniał czynniki mające wpływ na zawartość powietrza w mieszance betonowej i podawał zasady działań i kontroli przy produkcji betonów napowietrzanych.

W procedurach i formularzach systemowych powinny się znaleźć między innymi szczegółowe opisy sposobów kontroli i badań tych czynników, zarówno badań wstępnych jak i kontroli bieżącej.

Są to między innymi:

- czas od wyprodukowania mieszanki,
- konsystencja i jej zmiany w czasie,
- czas mieszania,
- temperatura,
- sposób transportu,
- ilość domieszki,
- sposób zagęszczenia,
- wpływ urządzenia mieszającego.





## 9. NADZÓR NAD PRODUKCJĄ BETONU NAPOWIETRZANEGO

Specyfikacja betonu napowietrzanego wymaga od producenta dodatkowych nakładów pracy, zarówno w kwestii przygotowania takiego betonu, jak również podczas jego produkcji. Konieczne jest wykonanie dodatkowych badań, mających na celu sprawdzenie liczby oraz w niektórych przypadkach jakości porów powietrznych w mieszance betonowej.

Dokument odniesienia, którym jest norma PN-EN 206, zobowiązuje producenta do wykazania napowietrzenia mieszanki betonowej. Warto pamiętać, że napowietrzenie to może się różnić pomiędzy miejscem produkcji a miejscem w budowywania betonu.

Zagadnienia związane z betonem napowietrzonym dotyczą nie tylko liczby i jakości porów w nim zawartych, ale również sposobu pobrania oraz przechowywanie próbek betonu do momentu badania. Należy zwrócić szczególną uwagę na sposób pobierania betonu z betonowozu oraz na sposób formowania betonu. Aby próbka mieszanki betonowej była reprezentatywna, należy pamiętać o przemieszaniu betonu w betonowozie przed pobraniem przez ok. 3 minuty. Następnie próbkę taką pobiera się z kilku miejsc betonowozu i ponownie intensywnie miesza kielnią lub łopatką.

Przed przystąpieniem do wykonywania oraz dostaw betonu napowietrzonego wskazana jest rozszerzona kontrola produkcji przez producenta. Dla producenta istotnymi informacjami są między innymi: czas mieszania betonu w mieszalniku, napowietrzenie mieszanki betonowej na węźle, napowietrzenie mieszanki betonowej na budowie - możliwa jest oczywiście symulacja czasu dostawy. Dzięki tym podstawowym informacjom możliwa jest korekta procesu produkcji, a finalnie ograniczenie dostaw wadliwego betonu o niewłaściwej liczbie i strukturze porów na miejsce w budowywania.

Podczas wykonywania i dostarczania betonu napowietrzonego zaleca się następujące działania:

- Zapewnienie wszystkich surowców wsadowych na całe betonowanie
- Stały kontakt pomiędzy miejscem produkcji betonu, a miejscem w budowywania, tak aby możliwie szybko wdrażać wszelakie korekty
- Kontrola konsystencji oraz ilości powietrza w mieszance betonowej
- Kontrola procesu transportu oraz w budowywania mieszanki, tak aby ograniczyć niepożądane opóźnienia na budowie

Należy również pamiętać o prawidłowej pielęgnacji betonu napowietrzonego. W zależności od warunków atmosferycznych czas pielęgnacji może być różny, choć zawsze konieczny do uzyskania wymaganych właściwości w strefie przypowierzchniowej. Miarodajne wskazówki dotyczące pielęgnacji i czasu jej trwania znaleźć można w normie PN-EN 13670.



## 10. DODATKOWE BADANIA NAPOWIETRZANEJ MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU STWARDNIAŁEGO

### ■ MIESZANKA BETONOWA

Badanie zawartości porów powietrznych (% obj.) w mieszance betonowej przeprowadza się zgodnie z PN-EN 12350-7. Określenie zawartości powietrza odbywa się metodą ciśnieniową.

Przy wykonywaniu badania zawartości powietrza w pojemniku pomiarowym, jak również każdorazowo przy wykonywaniu próbek betonowych w formach, istotna jest intensywność zagęszczania mieszanki betonowej. Niewystarczająco zagęszczona mieszanka betonowa oprócz porów powietrznych wprowadzonych w sposób celowy poprzez użycie domieszki napowietrzającej może zawierać niewłaściwe, duże pory powietrzne, zawyżające wynik pomiaru metodą ciśnieniową.

Nie ponosząc znacznych nakładów pracy, można dodatkowo oznaczyć gęstość objętościową mieszanki betonowej. Badanie gęstości objętościowej mieszanki wykonuje się zgodnie z PN-EN 12350-6. Odniesienie zawartości porów powietrznych do rezultatu badania gęstości objętościowej ułatwia zrozumienie zachodzących zjawisk i tendencji w napowietrzeniu. Warto zauważyć, że rozrzut danych z pojedynczych pomiarów gęstości objętościowej mieszanki betonowej jest często mniejszy niż przy badaniu zawartości porów.

Porównanie gęstości objętościowej mieszanki betonowej z gęstością betonu, wynikającą z jego receptury (gęstość projektowana), również wskazuje na tendencje i dostarcza informacji na temat zawartości porów.

**W normie PN-B-06265: Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12** wprowadza się metodę badania odporności betonu na działanie mrozu, w której stopień mrozoodporności F należy przyjmować w zależności od wskaźnika N. Wartość ta odpowiada przewidywanej liczbie lat eksploatacji, przy założeniu że:

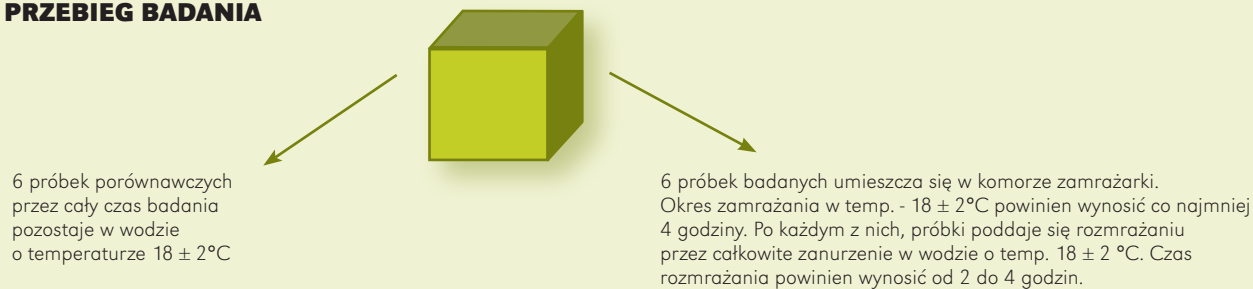
- wskaźnik N należy zwiększyć o 50, jeżeli beton jest narażony na kapilarne podciąganie wody,
- wskaźnik N należy zwiększyć o 100, jeżeli beton znajduje się w strefie wahań poziomu wody lub środków odladzających.

### ■ STOPIEŃ MROZOODPORNOŚCI

Metoda badawcza pozwala ocenić odporność na działanie mrozu, z uwzględnieniem zarówno wewnętrznego zniszczenia betonu, charakteryzowanego przez wytrzymałość próbki, jak również destrukcji zewnętrznej, określonej wizualnie i na podstawie ubytku masy próbki. Metoda ta polega na kolejnym zamrażaniu całej próbki w powietrzu i rozmrażaniu jej w wodzie, a okres trwania pełnego cyklu wynosi co najmniej 6 godzin.

Badania prowadzi się na 12 próbkach sześciennych lub walcowych, jak do badania wytrzymałości na ściskanie, o minimalnym wymiarze boku (lub średnicy walca) 100 mm, pobranych z jednego ładunku. Przed rozpoczęciem badania próbki powinny być nasycone wodą, a czas nasycania nie może być krótszy niż 7 dni.

#### PRZEBIEG BADANIA



Badanie obejmuje określoną liczbę cykli zamrażania-rozmrażania (np. 150 cykli = stopień mrozoodporności F150), po których próbki waży się w stanie nasycenia wodą oraz przeprowadza badanie wytrzymałości na ściskanie próbek zamrażanych i niezamrażanych.

## ■ KRYTERIA ZGODNOŚCI DO OCENY ODPORNOŚCI BETONU NA DZIAŁANIE MROZU

Stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej w jego symbolu liczbie cykli zamrażania-rozmrażania próbek betonowych spełnione są następujące warunki:

- próbki nie wykazują pęknięć,
- łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków kruszywa itp. nie przekracza 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania-rozmrażania,

Średni ubytek masy próbek po badaniu,  $\Delta m_p$ , należy obliczyć w procentach ze wzoru:

$$\Delta m_F = \frac{m_{F1} - m_{F2}}{m_{F1}} \times 100$$

w którym

$m_{F1}$  średnia masa próbek przed ich pierwszym zamrażaniem, w stanie nasycenia wodą; [kg]

$m_{F2}$  średnia masa próbek po ich ostatnim rozmrażaniu, w stanie nasycenia wodą; [kg]

- obniżenie wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych, nie jest większe niż 20%

Średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu,  $\Delta f_p$ , należy obliczyć w procentach ze wzoru:

$$\Delta f_F = \frac{f_{F1} - f_{F2}}{f_{F1}} \times 100$$

w którym

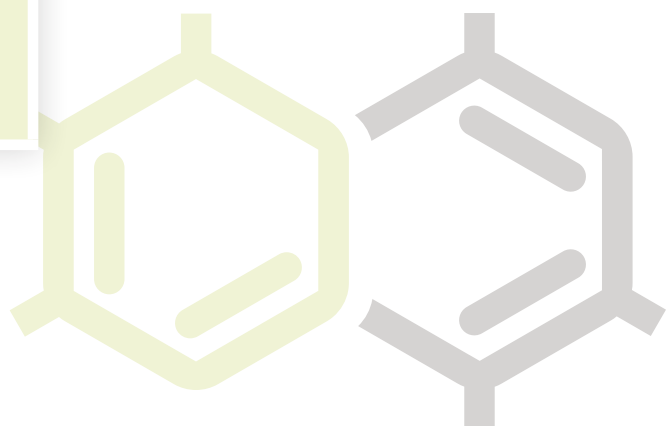
$f_{F1}$  średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych, niezamrażanych, nasyconych wodą; [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{F2}$  średnia wytrzymałość na ściskanie próbek badanych, po ich ostatnim rozmrażaniu, nasyconych wodą; [N/mm<sup>2</sup>]

Badania stopnia mrozoodporności betonu rozpoczyna się zgodnie z normą PN-B-06265 po czasie równoważnym, który zależy od rodzaju użytego cementu zgodnie z poniższą tabelą. Czasu równoważnego nie stosuje się do badań wytrzymałości betonu.

**Tab. 7: Czas wykonywania badań w zależności od rodzaju zastosowanego cementu**

RODZAJ CEMENTU	CZAS RÓWNOWAŻNY [DNI]
CEM I (R), CEM II/A (R)	28 dni
CEM I (N), CEM II/A (N) CEM II/B (N,R) CEM IV/A	56 dni
CEM III CEM IV/B CEM V	90 dni



Oprócz mrozoodporności wewnętrznej betonu występuje również **mrozoodporność powierzchniowa**, która oceniana jest na podstawie powierzchniowego ubytku masy złączonego betonu na próbce poddanej badaniu. Według aktualnej normy PN-EN 13877-2:2013-08 „Nawierzchnie betonowe, cz. 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych”, wyróżnia się 3 kategorie odporności próbek betonu na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odładzających (Tabela 8).

**Tab. 8: Kategorie odporności na zamrażanie-rozmrażanie zgodnie z PN-EN 13877-2:2013-08**

Kategoria	Ubytek masy po 28 cyklach ( $m_{28}$ )	Ubytek masy po 56 cyklach ( $m_{56}$ )	Stopień ubytku $m_{56}/m_{28}$
FT0	Brak wymagań	Brak wymagań	Brak wymagań
FT1	Wartość średnia $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ Żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$	Brak wymagań	Brak wymagań
FT2	Wartość średnia $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Wartość średnia $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ Żaden pojedynczy wynik $> 1,5 \text{ kg/m}^2$	$\leq 2,0$

Metodyka badań betonu na złączenie powierzchniowe zawarta jest w dokumencie PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07.

Wytyczne te dopuszczają wykonanie badań 3 metodami:

1. „Slab test”
2. „Cube test”
3. „CF/CDF”

**Metoda „Slab test”** to badanie masy złączonego materiału z powierzchni próbek betonu pokrytych 3 mm warstwą 3% roztworu NaCl, poddanych łącznie 56 cyklom zamrażania/rozmrażania. Badanie wykonuje się na 4 wyciętych próbkach o wymiarach  $150 \times 150 \times 50 (\pm 2) \text{ mm}$ . Po dojrzewaniu (25 dni  $\pm$  1) brzegi próbek badanej powierzchni izoluje się materiałem wodoszczelnym. W 28 dniu rozpoczyna się badanie poprzez nasycenie powierzchni wodą destylowaną o grubości ok 3 mm przez czas  $72 \pm 2 \text{ h}$ . W 31 dniu nakłada się warstwę 3% roztworu NaCl na próbki, poddając je cyklom zamrażania i rozmrażania wg poniższych kryteriów. Jeden cykl trwa 24 h. Wymagane temperatury oraz czasy cyklu przedstawia poniższa tabela.

**Tab. 9: Wymagane temperatury oraz czasy cyklu**

	CZAS W GODZINACH	TEMPERATURA
Zamrażanie	4,5	+20°C do - 4°C
Zamrażanie	7,5	- 4°C do -18°C
Stała temperatura	4	- 18°C
Rozmrażanie	8	- 18°C do 20°C

Po 7, 14, 28, 42 oraz 56 cyklach dokonuje się pomiaru masy złuszczonego materiału z powierzchni próbek. Jako wynik ostateczny oznacza się złuszczenie materiału na powierzchnię jednostki,  $n$ , podając wynik w  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

**Metoda „Cube test”** polega na całkowitym zanurzeniu próbek betonowych w wodzie destylowanej bądź 3% roztworze NaCl. Badanie przeprowadza się na 4 próbkach o wymiarach 100 x 100 x 100 mm. Próbki pozostawia się w formie przez pierwszą dobę, następnie przez 7 dni przechowuje się je w wodzie o temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Kolejnym etapem jest pielęgnacja próbek w komorze klimatycznej w temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i parowaniu  $45 \pm 15 \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  przez okres 20 dni. W wieku 27 dni określa się masę próbek i umieszcza je w pojemnikach, zalewając wodą destylowaną lub 3% roztworem NaCl. Dzień później ponownie określa się masę próbek celem sprawdzenia ilości zaabsorbowanego środka mrozącego. Próbki ponownie trafiają do pojemników i rozpoczyna się proces zamrażania/ odmrażania. Jeden cykl trwa 24 h i obejmuje 16 godzin zamrażania w powietrzu i 8 godzin odmrażania w wodzie. Podobnie jak w metodzie „Slab test”, po 7, 14, 28, 42 oraz 56 cyklach dokonuje się pomiaru masy materiału złuszczonego z powierzchni próbek. Wynik końcowy to stosunek masy wysuszonego złuszczonego materiału po  $n$  cyklach zamrażania i odmrażania do masy 2 próbek w stanie powietrzno-suchym z jednego pojemnika w wieku 27 dni.

**Metoda „CF/CDF”** polega na określeniu masy złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania/odmrażania w wodzie destylowanej (**metoda CF**), bądź po 28 cyklach w 3% roztworze NaCl (**metoda CDF**). Badana powierzchnia próbki wynosi 150 x 140 mm. Badaniu poddaje się 5 próbek. Proces pielęgnacji próbek jest prawie identyczny jak w metodzie „Cube test”, jedynie między 21 a 26 dniem powierzchnie boczne próbek należy pokryć folią aluminiową, przyklejoną gumą kauczukową lub butylową, bądź pokryć bezrozpuszczalnikową żywicą epoksydową. W 28 dniu rozpoczyna się proces nasączenia wodą destylowaną bądź 3% roztworem NaCl i trwa 7 dni. W 35 dniu następuje proces zamrażania/odmrażania. W odróżnieniu od metod poprzednich, tu jeden cykl trwa 12 godzin i obejmuje 4h zamrażania do  $-20^\circ\text{C}$ , 3 h utrzymywania w stałej temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , 4 h rozmrażania do  $+20^\circ\text{C}$  i 1 h utrzymywania w stałej temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ . W metodzie CF pomiaru masy złuszczonej dokonuje się po 14, 28, 42 i 56 cyklach, a w metodzie CDF po 4, 6, 14 i 28 cyklach. Jako wynik ostateczny przyjmuje się złuszczenie materiału na powierzchnię jednostki,  $n$ , podając wynik w  $\text{kg}/\text{m}^2$ .



## 11. BETON MROZOODPORNY NIENAPOWIETRZONY

Betony o niskim współczynniku woda/cement ( $w/c < 0,4$ ) cechują się zredukowanym systemem porów kapilarnych, a zatem wysoką szczelnością. Ograniczenie wnikania wody, jak również rozpuszczonych w niej soli odladzających do wnętrza elementu betonowego może znacząco poprawić jego mrozoodporność i ogólną odporność na korozję.

Uszczelnieniu mikrostruktury betonu i redukowaniu systemu porów kapilarnych sprzyja stosowanie cementów zawierających popioły lotne, względnie dodawanie popiołów lotnych krzemionkowych jako składnika mieszanki betonowej. Podobny w działaniu, a z uwagi na rozmiar cząstek uznawany za bardzo efektywny, składnik mieszanki betonowej - mikrokrzemionka - może wydatnie zwiększyć szczelność betonu stwardniałego. Podciąganie kapilarne można również zmniejszyć przez stosowanie hydrofobizujących domieszek chemicznych.

Pozytywne doświadczenia z badań mrozoodporności betonów nienapowietrzonych, cechujących się niskimi wartościami współczynnika  $w/c$  i ograniczonym systemem porów kapilarnych, do których zaliczają się niektóre betony samozagęszczalne i betony wysokiej wytrzymałości, znalazły swoje odzwierciedlenie w zapisach normowych. Zgodnie z PN-EN 206:2016-12, w przypadku betonu nienapowietrzonego, stosowanego w klasach agresji spowodowanej zamrażaniem i rozmrażaniem od XF2 do XF4, zaleca się badanie jego właściwości odpowiednią metodą i porównywanie z betonem, którego mrozoodporność była w warunkach danej klasy ekspozycji potwierdzona.



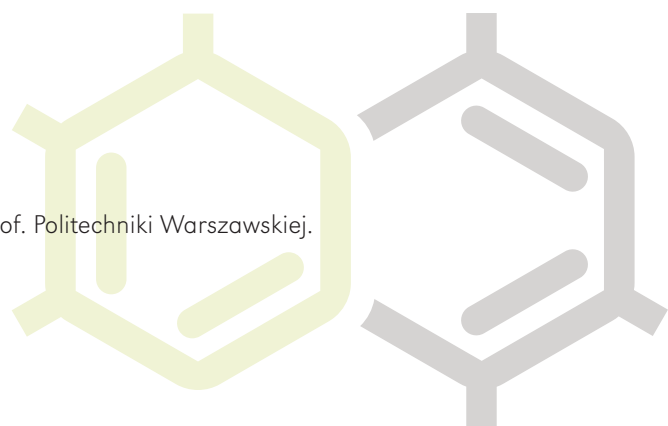
## 12. LITERATURA:

1. Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu. Polski Cement, Kraków / PWN, Warszawa, 2010
2. Herstellen von LP-Beton, Deutsche Bauchemie, Wydanie 2, 2013
3. Neville A.M.; Właściwości Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2012
4. Łukowski P.: Modyfikacja materiałowa betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
5. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków, 2002
6. Aitcin P.C., Flatt R.J.; Science and Technology of Concrete Admixtures, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Numer 59, 2016
7. PN-EN 934-1:2009 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 1: Wymagania podstawowe
8. PN-EN 934-2+A1:2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie
9. PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
10. PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
11. PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe
12. PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu – Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie
13. PN-B-06265: Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12 (projekt, marzec 2018)
14. PN-EN 13877-2:2013-08 Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych

Niniejsze wydanie biuletynu informacyjnego „ABC produkcji betonu mrozoodpornego” zostało opracowane przez zespół składający się z przedstawicieli członków Stowarzyszenia, w skład którego wchodzi:

1. Augustyn Jakub (MAPEI Polska Sp. z o.o.)
2. Badziąg Bartosz (CEMEX Polska Sp. z o.o.)
3. Brandys Rafał (PCC Exol SA)
4. Jakób Alina (PCC Exol SA)
5. Oleksik Michał (ATLAS Sp. z o.o.)
6. Pełczyński Cyprian (STACHEMA Polska Sp. z o.o.)
7. Rutkowski Dariusz (Ha-Be Polska Sp. z o.o.)
8. Ślusarczyk Kamil (MC-Bauchemie Sp. z o.o.)
9. Wrzecion Krzysztof (MAPEI Polska Sp. z o.o.)

Recenzentem powyższego biuletynu jest dr hab. inż. Paweł Łukowski, prof. Politechniki Warszawskiej.

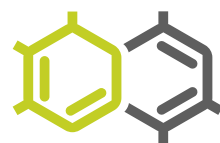




Dane zawarte w niniejszym opracowaniu mają charakter wyłącznie informacyjny i zostały opracowane z największą starannością w oparciu o aktualną wiedzę Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej. Informacje zawarte w broszurze należy traktować wyłącznie jako pomoc w celu bezpiecznego postępowania podczas pracy z domieszkami do betonu. Ponieważ poprawność wykorzystania informacji, wskazówek i zaleceń są poza naszą kontrolą, nie mogą stanowić gwarancji w sensie prawnym. Nie jest zatem zasadne zgłaszanie jakichkolwiek roszczeń dotyczących powyższych kwestii względem SPChB, jak również względem autorów broszury. Nie dotyczy szkód wyrządzonych świadomie lub będących wynikiem rażącego zaniedbania ze strony Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej lub osób działających w jej imieniu.

Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej powstało w 2012 roku. Aktualnie zrzesza 11 firm: Atlas, BASF, Borregaard, Cemex, Ha-Be, Mapei, MC-Bauchemie, Remei, Sika, Stachema, PCC Rokita. Siedziba SPChB znajduje się w Warszawie. Inicjatywa utworzenia SPChB zrodziła się wśród producentów domieszek do betonu. Na wzór zagranicznych stowarzyszeń SPChB zamierza powiększać swoją strukturę o kolejne grupy producentów chemii budowlanej, działających w różnych sektorach budownictwa.

Członkowie Stowarzyszenia Producentów Chemii Budowlanej, to nie tylko producenci domieszek do betonu. Niemniej, to właśnie problemy związane z chemią stosowaną do betonu stały się bezpośrednim powodem inspirującym do współpracy firmy, które na co dzień ze sobą konkurują. Dlatego tworząc statut SPChB jako główne cele zapisano reprezentowanie interesów zrzeszonych w nim członków oraz wszechstronne działanie na rzecz podnoszenia poziomu produkcji, jakości i zbytu chemii budowlanej w Polsce. SPChB jest inicjatorem i/lub uczestnikiem przeróżnych przedsięwzięć, szczegóły można zobaczyć na stronie [www.spchb.pl](http://www.spchb.pl) – zapraszamy do odwiedzania naszej strony.


**spchb**

 Stowarzyszenie Producentów  
 Chemii Budowlanej

 ul. Nowy Świat 41a  
 00-042 Warszawa  
 tel.: +48 (22) 299 06 69  
 e-mail: [biuro@spchb.pl](mailto:biuro@spchb.pl)  
[www.spchb.pl](http://www.spchb.pl)