

Daria Józwiak-Niedźwiedzka¹

METODY BADANIA MROZODPORNOŚCI BETONU

1. Wprowadzenie

Kraje należące do Unii Europejskiej dążą do ujednoczenia swoich norm, czego wynikiem jest przyjęta norma EN 206-1 [1], dotycząca wymagań, właściwości i produkcji betonu, która przewidywana jest do stosowania w Europie w różnych warunkach klimatycznych i geograficznych, przy różnych poziomach ochrony konstrukcji oraz przy różnych, od dawna ustalonych, regionalnych tradycjach i doświadczeniu. Aby uwzględnić rozmaite możliwe sytuacje wprowadzono w niej klasy ekspozycji betonu, Tabl. 1.

Tablica 1. Klasy ekspozycji - Agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania wg PN-EN 206-1, [2]

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady (o charakterze informacyjnym) występowania klas ekspozycji
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą, bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe wystawione na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowych konstrukcji drogowych narażonych 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 narażone bezpośrednio na działanie aerozoli zawierających środki odladzające i zamarzanie; Strefy rozbryzgu w budowlach morskich narażone na zamarzanie

¹ dr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa, e-mail: djozwiak@ippt.gov.pl

Zapewnienie trwałości konstrukcji betonowej jest podstawą Polskiej Normy PN-EN 206-1:2003 [2] wzorowanej na EN 206, jednakże w tej normie, jak również w krajowym uzupełnieniu PN-B-06265:2004 [3], dotyczącym betonu o projektowanej trwałości do 50 lat nie przewiduje się badania mrozoodporności betonu. Nie wprowadzono również pojęcia klas mrozoodporności ograniczając się do określenia wymagań w stosunku do maksymalnego wskaźnika w/c , minimalnej ilości cementu, minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie a także wymaganego napowietrzenia mieszanki betonowej, Tabl.2. Odstąpiono tu od nowoczesnego formułowania wymagań normowych w odniesieniu do właściwości (ang. *performance standard*) na rzecz wymagań w stosunku do składu (ang. *descriptive standard*).

Tablica 2. Wartości graniczne wg PN-EN 206-1 [2] określające wymagany skład oraz właściwości betonu w klasach ekspozycji XF1.. XF4

Właściwości	Klasa ekspozycji			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Maksymalny stosunek wodno-cementowy	0,55	0,55	0,50	0,45
Minimalna klasa wytrzymałości	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Minimalna zawartość cementu (kg/m ³)	300	300	320	340
Minimalne napowietrzenie (%)	–	4,0 ¹⁾	4,0 ¹⁾	4,0 ¹⁾
Inne wymagania	Kruszywo zgodne z PN-EN 12620:2004 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmarzanie			

¹⁾ Jeżeli beton nie jest napowietrzany, to jego mrozoodporność zaleca się badać odpowiednimi metodami – porównując z betonem, którego odporność na zamrażanie/rozmarzanie została potwierdzona w danej klasie ekspozycji

W krajach europejskich, gdzie konstrukcje betonowe są narażone na zmienne oddziaływania klimatyczne (np. Dania czy Austria) w krajowych arkuszach uzupełniających normę EN 206-1 [1] wprowadzono dodatkowe wymagania dotyczące napowietrzania betonu i wymagania na dobrą odporność betonu na złuszczenia, [4]. Również w Polsce dołącza obowiązująca norma PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [5] odnosi się do badania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie przy zastosowaniu soli, w przygotowaniu zaś jest norma nt. badania mrozoodporności wewnętrznej betonu - CEN/TR 15177 [6].

Z uwagi na przyczyny powstawania uszkodzeń oraz na sposób badania, zgodnie ze stosowaną praktyką można odróżnić dwa rodzaje mrozoodporności betonu, odnoszone do dominującego mechanizmu niszczenia: mrozoodporność wewnętrzną oraz mrozoodporność zewnętrzną. W literaturze anglojęzycznej używane są dwa odmienne terminy, związane z powyższymi zjawiskami, odpowiednio - *frost resistance* i *scaling resistance*.

Celem porównania warto zestawić w skrócie najważniejsze wymagania odnośnie do badań mrozoodporności wewnętrznej i powierzchniowego łuszczenia, zawarte w normach i dokumentach obowiązujących w Polsce. Z uwagi na ograniczenie objętości referatu pozostałe normy (np. amerykańskie, kanadyjskie) zostały jedynie wspomniane. Z tego samego powodu również nie opisano szczegółowo metod stosowanych

do pośredniej oceny trwałości mrozowej betonu, jak np. metody krytycznego rozstawu pęcherzyków powietrza PN-EN 480-11:2000 [7] i metody krytycznego stopnia nasączenia [8].

2. Normowe badania odporności betonu na cykliczne działanie ujemnej temperatury

2.1. Odporność na powierzchniowe łuszczenie

Obowiązująca od czerwca 2007 norma PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [5] zaleca stosowanie metody „slab test” (wzorowanej na szwedzkiej normie SS 13 72 44, tzw. metoda Borås) jako metody referencyjnej. Pozostałe dwie metody zaczerpnięte z RILEM tj. CF/CDF [9] oraz „cube test” – wzorowana na *German cube method* [10] są również możliwe do stosowania jako metody alternatywne.

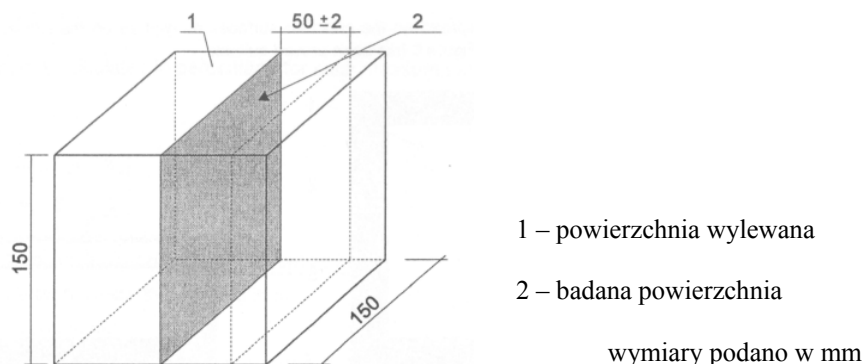
W tabelicy 3 przedstawiono porównanie podstawowych parametrów badawczych trzech metod badania odporności na powierzchniowe łuszczenie wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [5].

Tabela 3. Metody badania odporności na powierzchniowe łuszczenie wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007

	PKN-CEN/TS 12390-9:2007		
	Slab test (reference method)	Cube test (alternative method)	CF/CDF-test (alternative method)
			CF
BADANA POWIERZCHNIA	cięta	nieobrobiona, cała próbka	formowana
KIERUNEK BADANIA	jedna powierzchnia próbki, badana od góry	wszystkie boki próbki	jedna powierzchnia próbki, badana od dołu
WARUNKI PIEŁĘGNACJI	1 dzień w formach, 6 dni w wodzie, 20÷27 dni w komorze klimatycznej (20°C, 65% ww.)		
WYMIARY PRÓBEK	150x150x50 mm	100x100x100 mm	150x150x75 mm
LICZBA PRÓBEK	4		5
CIECZ ZAMRAŻANA	3% roztwór NaCl lub woda destylowana		
WSTĘPNE NASYCENIE	3 dni, destylowana woda	1 dzień, ciecz zamrażana	7 dni, ciecz zamrażana (kapilarne podciąganie)
ZAKRES TEMPERATURY	+20(±4)°C/-20(±2)°C	+20(±2)°C / -15(±2)°C	+20(±1)°C / -20(±0,5)°C
LICZBA CYKLI NA DOBĘ	1	1	2
CAŁKOWITA LICZBA CYKLI	56		28
BADANE PARAMETRY	złuszczonego materiału [kg/m ²]	ubytek masy [%]	złuszczonego materiału [kg/m ²]

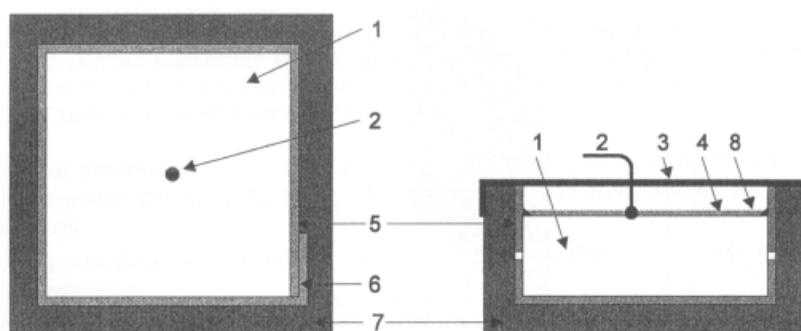
PKN-CEN/TS 12390-9:2007 – slab test

Badanie to polega na określeniu masy złuszczonego materiału z górnej powierzchni próbki po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności 3% roztworu NaCl.



Rys. 1. Kierunek cięcia i właściwa powierzchnia próbki do badania

Po 21 dniach dojrzewania cztery próbki sześciennie o boku 150 mm przygotowuje się do badania. Z sześciąt wycina się prostopadle do powierzchni wylewanej właściwe próbki do badania o wymiarach 150x150x50(±2) mm (rys.1) i następnie umieszcza się je w komorze klimatycznej. Po kolejnych czterech dniach na wszystkie powierzchnie próbek z wyjątkiem powierzchni poddanej na działanie mrozu nakleja się folię gumową i za pomocą silikonu uszczelnia się brzeg badanej powierzchni z folią gumową. Brzeg folii gumowej wystaje na wysokość 20±1 mm ponad powierzchnię poddaną na działanie mrozu. Próbki ponownie umieszcza się w komorze klimatycznej. Następnie w 28 dniu dojrzewania betonu i przez kolejne 3 dni na badanej powierzchni próbki znajduje się destylowana woda. Przed waniem właściwego 3% roztworu NaCl, niebadane boki próbki izoluje się za pomocą styropianu o grubości 20±1 mm. Tak przygotowane próbki, przykryte folią plastikową w wieku 31 dni poddaje się cyklom zamrażania i rozmrażania, (rys.2).



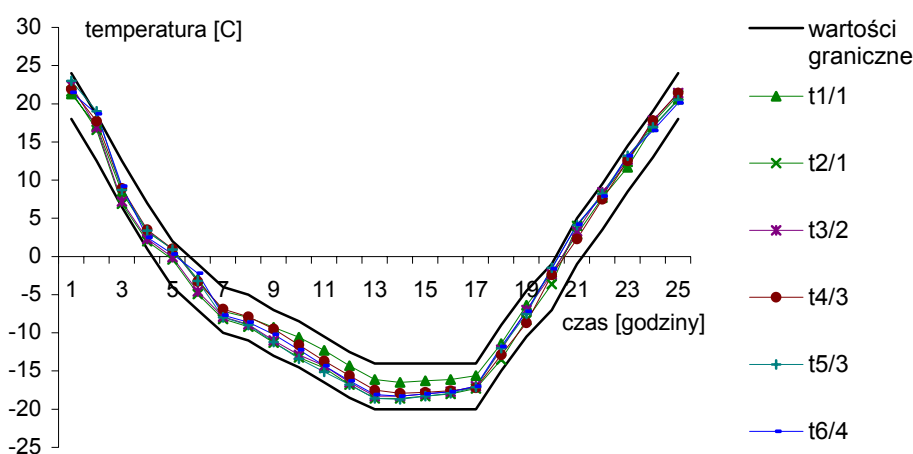
- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. powierzchnia badana | 5. uszczelnienie – folia gumowa |
| 2. pomiar temp. cieczy mrozącej - termopara | 6. zakładka |
| 3. folia plastikowa | 7. izolacja termiczna - styropian |
| 4. warstwa 3% NaCl | 8. uszczelnienie - silikon |

Rysunek 2. Schematyczny rysunek próbki przygotowanej do badania wg metody *slab test*

Jeden cykl trwa 1 dobę. Cykle temperaturowe przedstawiają się następująco:

- zamrażanie od +20°C do -4°C w czasie 4,5 godziny=5,3°C /h,
- zamrażanie od -4°C do -18°C w czasie 7,5 godz.=1,9°C /h,
- stała temperatura -18°C przez 4 godz.,
- rozmrażanie od -18°C do +20°C w czasie 8 godz.=4,8°C /h.

Monitorowanie przebiegu temperatury przeprowadza się za pomocą termopar umieszczonych w mieszaninie zamrażającej na badanej powierzchni próbek. Na rys. 3 pokazano przykładowy przebieg temperatury podczas jednego cyklu zamrażania/odmrażania. Tu temperatura na powierzchni próbek w 3% roztworze NaCl była mierzona co godzinę. Krzywe na rys. 3 określone jako t1, t2, t3, t4, t5 i t6 są wynikami z kolejnych sześciu termopar umieszczonych na czterech półkach /1, /2, /3 i /4 w komorze zamrażalniczej.



Rysunek 3. Przykład pomiaru temperatury – wyniki otrzymane podczas trwania 21cyklu, *slab test*

Po 7, 14, 28 i 42 cyklach w czasie fazy rozmrażania złuszczonego materiał wypłukuje się za pomocą rozpylacza i następnie dolewa się brakujący 3% roztwór NaCl. Złuszczonego materiał suszy się w temp. 110±10°C i następnie waży się z dokładnością do 0,1g. Łączną masę złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania określa się wg równania (1):

$$m_{s,n} = m_{s,przed} + (m_{v+s} - m_v) \quad (1)$$

tu oznaczono:

$m_{s,n}$ – skumulowana masa złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania

$m_{s, przed}$ – skumulowana masa złuszczonego materiału badana przy poprzednim odczycie

m_{v+s} – masa pojemnika zawierającego złuszczonego materiał

m_v – masa pustego pojemnika

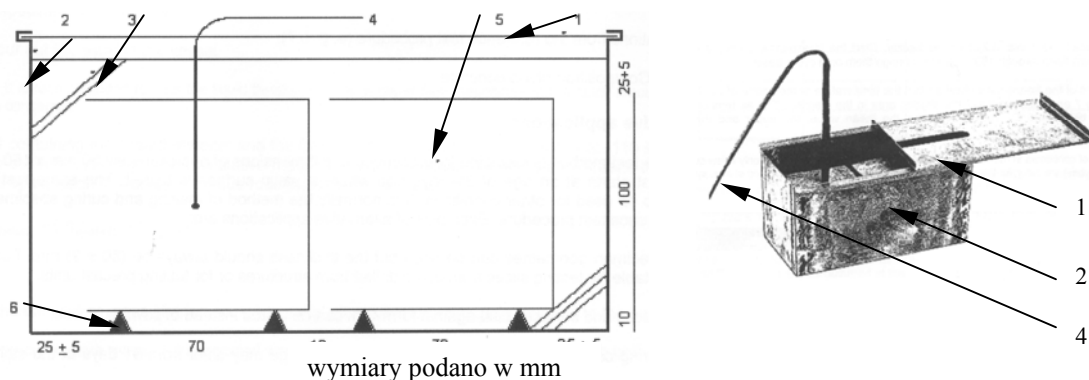
Jako wynik podaje się masę złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania i odmrażania, w kg/m² odniesioną do powierzchni próbki.

PKN-CEN/TS 12390-9:2007 – cube test

Próbki betonowe całkowicie zanurzone w 3% roztworze NaCl lub destylowanej wodzie poddawane są 56 cyklom zamrażania/odmrażania. Rejestrowana jest całkowita masa

złuszczonego materiału po zakończeniu badania i wyrażona w procentowym ubytku masy.

Po 27 dniach dojrzewania cztery próbki sześciennie o boku 100 mm przygotowuje się do badania (dwie formy po dwie próbki betonowe). Następuje określenie masy każdej z próbek i na okres jednej doby próbki w formach - rys. 4, są zalane cieczą zamrażającą (w zależności NaCl lub woda destylowana). Próbki umieszcza się w ten sposób, aby wierzchnia powierzchnia próbki była prostopadła do podstawy formy. Po 24 godz. próbki są powtórnie ważone w celu określenia ilości zaabsorbowanej cieczy mrożącej. W 28 dniu dojrzewania próbki są umieszczane w komorze zamrażalniczej. Zamrażanie w powietrzu trwa 16 godz., odmrażanie w wodzie – 8 godz.



- | | |
|--|--------------------------|
| 1. wysuwana pokrywa | 4. termopara |
| 2. pojemnik do przeprowadzenia badania | 5. badana próbka |
| 3. zamrażana ciecz | 6. podpórka o wys. 10 mm |

Rys. 4. Schematyczny rysunek oraz zdjęcie formy do badania próbek wg metody *cube test*

Po 7, 14, 28 i 42 cyklach w czasie rozmrażania przeprowadza się ocenę wizualną, oraz zbiera się złuszczonego materiału. Złuszczonego materiału suszy się w temp. $110 \pm 10^\circ\text{C}$ i następnie waży z dokładnością do 0,1g. Łączną masę złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania określa się wg równania (2):

$$m_{s,n} = m_{s,przed} + m \quad (2)$$

tutaj:

$m_{s,n}$ – masa złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania

$m_{s, przed}$ – masa złuszczonego materiału badana przy poprzednim odczycie

m – masa złuszczonego materiału badana przy obecnym odczycie

Przy każdym pomiarze oblicza się procentowy ubytek masy P dwóch kostek 100 mm w każdym pojemniku (wzór 3) i określa średnią wielkość dla dwóch pojemników z dokładnością 0,1%.

$$P = \frac{m_{s,n}}{m_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

tutaj:

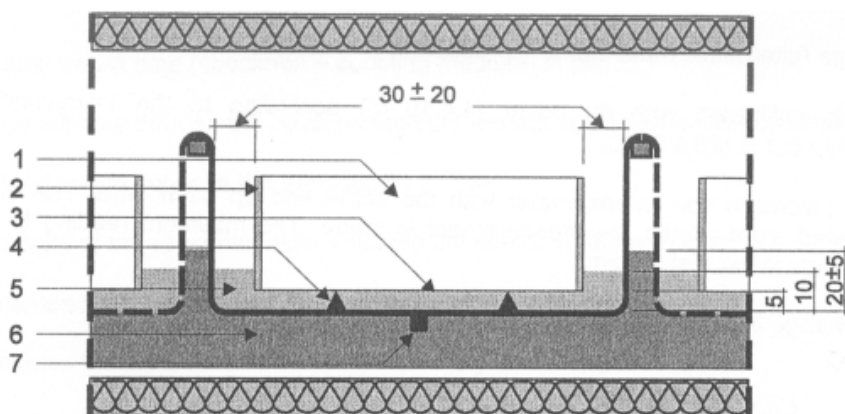
$m_{s,n}$ – masa złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania wg równania (2)

m_0 – masa dwóch kostek 100mm – warunki powietrzno-suche (z jednego pojemnika) mierzona w 27 dniu dojrzewania betonu, w gramach

Za wynik końcowy przyjmuje się procentowy ubytek masy po 56 cyklach zamrażania/odmrażania.

PKN-CEN/TS 12390-9:2007 – CF/CDF-test

Metoda polega na określaniu masy materiału złuszczonego z dolnej powierzchni próbki betonowej (150x150x70mm) po 28 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności destylowanej wody (metoda CF) lub 3% roztworu NaCl (metoda CDF).



wymiary podano w mm

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1. badana próbka | 5. ciecz badawcza |
| 2. uszczelnienie powierzchni bocznej | 6. ciecz zamrażana i odmrażana |
| 3. badana powierzchnia | 7. punkt odniesienia |
| 4. podpórka o wys. 5 mm | |

Rys. 5. Schematyczny rysunek próbki przygotowanej do badania wg metody CF/CDF

Do przygotowania próbek betonowych stosuje się formy sześciennie o boku 150 mm oraz przekładki o hydrofobowych powierzchniach grubości 5 mm. Z jednej formy otrzymuje się dwie próbki betonowe, badana powierzchnia próbki ma wymiary 140x150 mm.

Między 21 a 26 dniem dojrzewania powierzchnie boczne próbek są uszczelniane za pomocą aluminiowej folii i kauczuku butylowego lub żywicy epoksydowej. Po tym zabiegu próbki ponownie umieszcza się w komorze klimatycznej. Proces cyklicznego zamrażania i odmrażania rozpoczyna się po 28 dniach dojrzewania betonu.

Jeden cykl trwa 12 godzin:

- zamrażanie – 4 godzin;
- stała, ujemna temperatura – 3 godziny;
- rozmrażanie – 4 godziny;
- stała, dodatnia temperatura – 1 godzina.

Badana powierzchnia jest skierowana w dół, ciecz mrozącą wlewa się do wysokości max. 11 mm tak aby nie zamoczyć górnej powierzchni próbki, rys. 5.

Po 4, 6, 14 i 28 cyklach (metoda CDF) lub po 14, 28, 42 i 56 cyklach (metoda CF) zbiera się złuszczonego materiał za pomocą papierowego filtra. Masę złuszczonego materiału określa się wg wzoru 4:

$$m_{s,n} = m_{s,przed} + (m_{s+f} - m_f) \quad (4)$$

oznaczono:

$m_{s,n}$ – masa złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania

$m_{s, przed}$ – masa złuszczonego materiału badana przy poprzednim odczycie

m_{s+f} – masa filtra zawierającego złuszczonego materiału

m_f – masa pustego filtra

Podobnie jak w metodzie *slab test*, jako wynik końcowy podaje się masę złuszczonego materiału odniesioną do powierzchni po 28 cyklach (metoda CDF) lub po 56 cyklach (metoda CF) zamrażania i odmrażania, w kg/m^2 .

Norma ASTM C 672

Określenie mrozoodporności badanej zgodnie z normą ASTM C 672, [11] polega na wizualnej ocenie górnej powierzchni próbek po 50 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności roztworu CaCl_2 . Na każde 100 ml roztworu przypada 4g CaCl_2 .

Skala oceny jakościowej obejmuje zakres od 0 do 5, przy czym przyjęto:

0 – brak łuszczenia,

1 – nieznaczne łuszczenie, (max. 3,2 mm głębokości, niewidoczne kruszywo grube),

2 – łuszczenie przechodzące od nieznacznego do średniego,

3 – średnie łuszczenie (zaczyna być widoczne kruszywo grube),

4 – łuszczenie przechodzące od średniego do poważnego,

5 – poważne łuszczenie (kruszywo grube jest widoczne na całej powierzchni).

W normach dotyczących prefabrykatów betonowych (krawężników [12], płyt brukowych [13] oraz kostki brukowej [14]) badanie odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odładzającej przeprowadza się podobnie jak w przypadku normy na powierzchniowe łuszczenie [5] wg metody tzw. *slab test*, przy czym badanie prowadzi się do 28 cykli zamrażania/rozmrażania.

2.2. Mrozoodporność wewnętrzna

W dotychczas obowiązującej polskiej normie (do 2004 roku) PN-88/B-06250, [15] opisane były dwie metody badania mrozoodporności betonu, metoda zwykła i metoda przyspieszona. Poniżej pokrótce opisane są główne założenia badania mrozoodporności wg. „starej” normy z uwagi na liczne do niej odniesienia obowiązujących norm np. PN-V-83002:1999 [16] czy PN-S-10040:1999 [17].

Wymagania mrozoodporności określanej metodą zwykłą w normie definiowano według wskaźnika N równego liczbie przewidywanych lat użytkowania konstrukcji (od $N25$ do $N200$ i $N>200$). Wymagana liczba lat zwiększa się, jeżeli beton narażony jest na kapilarne podciąganie wody, działanie środków odładzających lub gdy beton znajduje się w strefie zmieniającego się poziomu wody. Wskaźnikom N odpowiadają stopnie mrozoodporności F (od $F25$ do $F300$). Jest to liczba cykli zamrażania i odmrażania, wykonanych według trybu podanego w normie, które powinien wytrzymać beton nie wykazując pęknięć, ubytków masy większych niż 5%, ani obniżenia wytrzymałości większego niż 20% w stosunku do wytrzymałości próbek nie zamrażanych.

W przypadku stosowania metody przyspieszonej głównym kryterium trwałości jest stopień zewnętrznej destrukcji, określany wizualnie i ubytkiem objętości próbki. Badany beton uznaje się za mrozoodporny, jeśli po badaniu metodą przyspieszoną próbki nie wykazują pęknięć, a ubytek objętości betonu, w postaci złuszczeń,

odłamków i odprysków, nie przekracza w żadnej próbce wartości $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ powierzchni zanurzonej w wodzie.

O ile badanie odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie jest już znormalizowane – 29 krajów europejskich, w tym Polska przyjęły jedną normę - (PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [5]), to do tej chwili nie ma jednolitych norm europejskich dotyczących badania mrozoodporności wewnętrznej betonu. Raport techniczny CEN/TR 15177:2006 [6] nie zastępuje norm krajowych związanych z mrozoodpornością betonu - sposobu jej badania i oceny - jedynie odnosi się do normy austriackiej (ÖNORM B 3303 „Testing of concrete”) i zaleceń RILEM („Test methods of frost resistance of concrete” RILEM TC 176 IDC). Raport ten, będący wkrótce europejską normą, opisuje trzy metody badania mrozoodporności wewnętrznej betonu tj. *beam test*, *slab test* i *CIF test* bez wyróżniania którejkolwiek z nich, tabl. 4.

CEN/TR 15177:2006

Podstawowe zasady badania zniszczenia struktury wewnętrznej betonu

a) Względny dynamiczny moduł sprężystości

$$E_{dyn} = (X)^2 \times l^2 \times \rho \times C \quad (4)$$

tu:

E_{dyn} - dynamiczny moduł sprężystości, kN/mm^2

X – mierzona wielkość częstotliwości poprzecznej podstawowej (częstotliwość własna, Hz) - *FF* (*fundamental frequency*) lub czas przejścia impulsu ultradźwiękowego, μs – *UPTT* (*ultrasonic pulse transit time*)

l – długość próbki, mm

ρ – gęstość, kg/m^3

C – mnożnik poprawkowy (zawiera wsp. Poissona μ)

Wewnętrzne zniszczenia betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania/odmrażania jest obliczane jako względny dynamiczny moduł sprężystości (*RDM – relative dynamic modulus of elasticity*). Z tego też powodu wielkości l , ρ i C mogą być pominięte, więc wzór przybiera postać:

$$RDM_n = \left(\frac{X_n}{X_0} \right)^2 \times 100[\%] \quad (5)$$

tu:

RDM – względny dynamiczny moduł sprężystości, %

index n – pomiar po n -tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania

index 0 – początkowy pomiar przed cyklami zamrażania/odmrażania

b) Zmiana długości

Wewnętrzne niszczenie betonu wynikające z cyklicznego działania ujemnej temperatury może być określone przez pomiar zmiany długości próbki, wg równania (6):

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100[\%] \quad (6)$$

tu:

ε_n - rozszerzenie próbki po n cyklach zamrażania/odmrażania, %

Δl - zmiana długości po n cyklach zamrażania/odmrażania, mm

l_0 - początkowa długość, mm

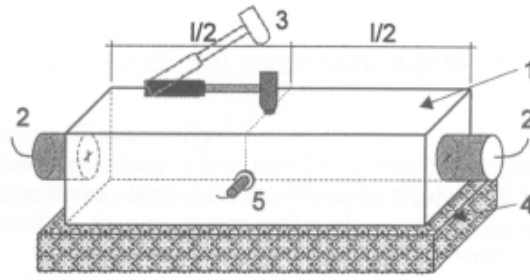
Tablica 4. Metody badania mrozoodporności wewnętrznej wg CEN/TR 15177:2006, [6]

	CEN/TR 15177		
	Beam test	Slab test	CIF test
BADANA POWIERZCHNIA	cała próbka	cięta powierzchnia	formowana
WARUNKI PIELĘGNACJI	1dzień w formach, 6 dni w plastikowych torbach, 21 dni w wodzie (20±2°C)	1dzień w formach, 6 dni w wodzie, 21 dni w komorze klimatycznej (20°C, 65% ww.)	
WYMIARY PRÓBEK	400x100x100 mm	150x150x50 mm	150x150x70 mm
LICZBA PRÓBEK	4		5
CIECZ ZAMRAŻANA	destylowana woda		3% roztwór NaCl lub woda destylowana
WSTĘPNE NASYCENIE	21 dni w wodzie	3 dni, destylowana woda	7 dni, ciecz zamrażana (kapilarne podciąganie)
ZAKRES TEMPERATURY	+22°C / -22°C zamrażanie w powietrzu – 8h rozmarzanie w wodzie – 4h	+20(±4)°C/-20(±2)°C	+20(±1)°C / -20(±0,5)°C
LICZBA CYKLI NA DOBĘ	2	1	2
CAŁKOWITA LICZBA CYKLI	56		
BADANE PARAMETRY	E_{dyn}	Δl (sugerowane) lub E_{dyn} (alternatywnie)	Δl (alternatywnie) lub E_{dyn} (sugerowane)

CEN/TR 15177 – beam test

Metoda polega na określeniu względnego dynamicznego modułu sprężystości próbki betonowej (400x100x100 mm) po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności destylowanej wody.

Określenie względnego dynamicznego modułu sprężystości przeprowadza się na podstawie pomiaru częstotliwości poprzecznej podstawowej, wzór 7, lub za pomocą pomiaru czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego, wzór 8, rys. 6.



- | | |
|---|-------------------------|
| 1. próbka betonowa | 4. podkładka pod próbkę |
| 2. przetwornik impulsu ultradźwiękowego | 5. przyspieszeniomierz |
| 3. młotek (do wzbudzenia impulsu) | |

Rys. 6. Schematyczny rysunek próbki przy badaniu wg metody CEN/TR 15177 – beam test

Częstotliwość poprzeczna podstawowa:

$$RDM_{FF,n} = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 \times 100[\%] \quad (7)$$

oznaczono:

$RDM_{FF,n}$ – względny dynamiczny moduł sprężystości w % określony po n-tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania przy pomocy *FF*

f_n – podstawowa częstotliwość po n-tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania, Hz

f_0 – początkowa częstotliwość podstawowa, Hz

Czas przejścia impulsu ultradźwiękowego:

$$RDM_{UPTT,n} = \left(\frac{t_{S,0}}{t_{S,n}} \right)^2 \times 100[\%] \quad (8)$$

oznaczono:

$RDM_{UPTT,n}$ – względny dynamiczny moduł sprężystości w % określony po n-tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania przy pomocy *UPTT*

$t_{S,0}$ – początkowy czas przejścia impulsu ultradźwiękowego, μ s

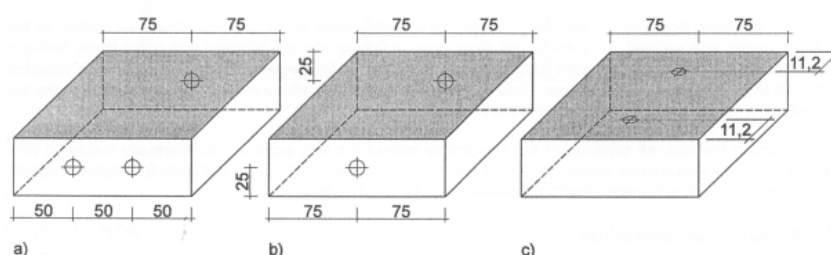
$t_{S,n}$ – czas przejścia impulsu ultradźwiękowego po n-tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania, μ s

Po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania/odmrażania próbki betonowe są ważone i zależnie od zastosowanej metody pomiaru *FF* lub *UPTT* następuje odczyt odpowiednich parametrów. Przeprowadza się również ocenę wizualną, tj. czy nie występują rysy powierzchniowe, odłupywanie części zaczynu/zaprawy, odpryskiwanie kruszywa.

Jako wynik końcowy przy ocenie mrozoodporności badanego betonu podaje się średnią oraz dla każdej badanej próbki wielkość względnego dynamicznego modułu sprężystości w % po 56 cyklach zamrażania/odmrażania.

CEN/TR 15177 – slab test

Badanie to polega na określeniu względnej zmiany długości (zalecana procedura) lub zmiany względnego dynamicznego modułu sprężystości próbki betonowej poddanej naprzemiennemu zamrażaniu i odmrażaniu w roztworze 3% NaCl lub destylowanej wody. Próbka do badania jest wycięta z kostki betonowej o boku 150 mm, rys. 1. Badanie przeprowadza się po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i odmrażania. Podobnie jak w przypadku badania odporności na powierzchniowe łuszczenie (PKN-CEN/TS 12390-9:2007 – slab test) w 21 dniu dojrzewania próbki wycina się z kostek betonowych (rys. 1). Po kolejnych 4 dniach na próbkach zaznacza się punkty pomiarowe, zależnie od przyjętej metody pomiaru, rys. 7. Uszczelnienie próbki przeprowadza się analogicznie jak przy powierzchniowym łuszczeniu, rys. 2.



Rysunek 7. Umiejscowienie punktów pomiarowych w zależności od badania a) zmiany długości, b) czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego, c) częstotliwości poprzecznej podstawowej

Zmianę długości próbki betonowej po n cyklach zamrażania/odmrażania oblicza się ze wzoru 9:

$$\varepsilon_{L,n} = \frac{l_n - l_0}{L_0} \times 100[\%] \quad (9)$$

tu:

$\varepsilon_{L,n}$ - rozszerzenie próbki po n cyklach zamrażania/odmrażania, %

l_n - długość po n cyklach zamrażania/odmrażania, mm

l_0 - początkowa długość, mm

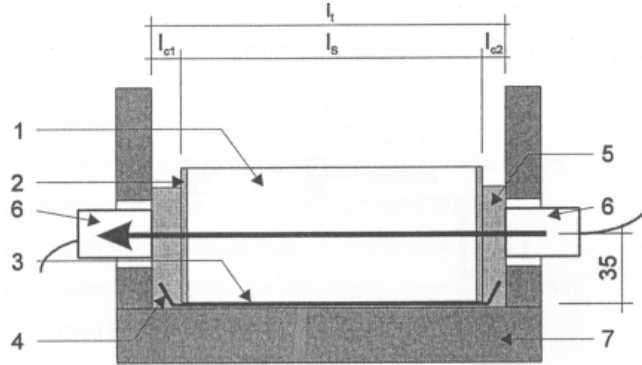
L_0 - początkowa długość próbki $L_0 = 150 + l_0$, mm

W zależności od tego, która z metod badawczych była stosowana (pomiar zmiany długości próbki - zalecana procedura, wzór 9) czy też zmiany względnego dynamicznego modułu sprężystości (wzór 7, 8) zniszczenie struktury wewnętrznej jest określone po n cyklach zamrażania/odmrażania w procentach dla każdej próbki. Średnia wartość z czterech próbek, poszczególne wyniki z każdej z próbek oraz odchylenie standardowe są podawane po 56 cyklach zamrażania/odmrażania.

CEN/TR 15177 – CIF test

Metoda polega na określeniu zmiany względnego dynamicznego modułu sprężystości próbki (zalecana procedura) lub określeniu względnej zmiany długości w obecności destylowanej wody lub 3% NaCl, na próbkach o wymiarach 150x150x70 mm po 56 cyklach zamrażania/odmrażania.

Przygotowanie próbek do badań (formowanie, warunki pielęgnacji) jest takie samo jak przy badaniu odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007 – CF/CDF-test. Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie próbkę do badania mrozodporności wg metody CIF.



- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. próbka | 5. ośrodek łączący (<i>coupling medium</i>) |
| 2. uszczelnienie boków próbki | 6. przetwornik |
| 3. badana powierzchnia | 7. naczynie pomiarowe |
| 4. stalowa płytka/elektroda | |

Rysunek 8. Schematyczny rysunek próbki przygotowanej do badania wg metody CEN/TR 15177 – CIF test

Zgodnie z założeniami normy określenie modułu dynamicznego metodą *UPTT* (referencyjna procedura) przeprowadza się wg wzoru 10:

$$RDM_{UPTT,n} = \left(\frac{l_{t,n}}{l_{t,0}} \times \frac{t_{t,0} \times l_{t,0} - t_{cm,0} \times l_{t,0} + t_{cm,0} \times l_s}{t_{t,n} \times l_{t,n} - t_{cm,n} \times l_{t,n} + t_{cm,n} \times l_s} \right)^2 \times 100[\%] \quad (10)$$

tu:

$RDM_{UPTT,n}$ – względny dynamiczny moduł sprężystości w % określony za pomocą *UPTT*

t_t – całkowity czas przejścia (próbka + ośrodek łączący), μs

t_{cm} – czas przejścia przez ośrodek łączący bez próbki znajdującej się w pojemniku, μs

l_t – całkowita odległość pomiędzy przetwornikami, mm

l_s – długość próbki przed uszczelnieniem bocznych powierzchni, mm

index n – pomiar po n -tej liczbie cykli zamrażania /odmrażania

index 0 – początkowy pomiar przed cyklami zamrażania/odmrażania

Określenie względnego dynamicznego modułu sprężystości na podstawie pomiaru częstotliwości poprzecznej podstawowej (alternatywna metoda) przeprowadza się wg wzoru 7, natomiast zmianę długości – wzór 11.

$$\varepsilon_L = \frac{l_{C,0} - l_{C,n} + l_n - l_0}{L_0} \times 100[\%] \quad (11)$$

tu:

ε_L - rozszerzenie próbki, %

$l_{C,0}$ – długość pręta wzorcowego przed pierwszym cyklem zamrażania/odmrażania, mm
 $l_{C,n}$ – długość pręta wzorcowego po n cyklach zamrażania/odmrażania, mm
 l_n - długość próbki po n cyklach zamrażania/odmrażania, mm
 l_0 - początkowa długość próbki przed cyklami zamrażania/odmrażania, mm
 L_0 - początkowa długość próbki przed uszczelnieniem powierzchni bocznych, mm

W zależności od stosowanej metody pomiaru zniszczenie struktury wewnętrznej betonu po 56 cyklach zamrażania/odmrażania przedstawia się w postaci procentowej zmiany względnego dynamicznego modułu sprężystości lub długości.

ASTM C 671

W metodzie tej próbki betonowe są poddawane powolnemu zamrażaniu, podczas którego zmiana długości próbek jest mierzona w sposób ciągły. Odporność betonu na działanie ujemnej temperatury określa się na podstawie kształtu krzywej wydłużenie-temperatura charakteryzującej proces zamrażania. Beton uznaje się za nieodporny na działanie mrozu, jeśli na krzywej tej jest obserwowana nieciągłość przy temperaturze poniżej punktu zamrażania. Za rozsądne kryterium może być przyjęta wartość odkształcenia pęknięcia lub przełomu (skok na wykresie odkształcenia), jak podaje Fagerlund w opracowaniu HETEK [18], np. 0,005% lub 0,01%.

ASTM C 666 A lub B

Dwie amerykańskie metody określania mrozoodporności ASTM C 666 A lub B, [19] polegają na wyznaczeniu wartości współczynnika trwałości DF (*Durability Factor*) betonu. Próbki poddawane są cyklicznemu zamrażaniu według jednego z dwóch możliwych sposobów: w wodzie według tzw. metody A lub w powietrzu według metody B, z następującym rozmrażaniem w wodzie. Po 300 cyklach zamrażania i odmrażania określana jest względna wartość dynamicznego modułu sprężystości P próbki, chyba, że wcześniej – po N cyklach – obniży się ona do 60% wartości początkowej. Współczynnik DF wyznacza się ze wzoru 12:

$$DF = \frac{PN}{300} \quad (12)$$

Umownie uznaje się, że mrozoodporny jest taki beton, dla którego stwierdzono $DF > 80$ oraz, że beton jest niemrozoodporny, gdy $DF < 60$.

3. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie

Związek między trwałością mrozową, a strukturą porowatości stwardniałego zaczynu cementowego najlepiej określa wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} (*spacing factor*), interpretowany jako parametr powiązany z maksymalną odległością przypadkowego punktu w zaczynie cementowym do brzegu najbliższego pora, Powers [20]. Innymi parametrami charakteryzującymi strukturę napowietrzenia betonu oprócz całkowitej porowatości i wskaźnika \bar{L} są: powierzchnia właściwa układu porów powietrznych α oraz zawartość mikroporów A_{300} . Powierzchnia właściwa przedstawia wynik podzielenia całkowitej powierzchni porów powietrznych przez ich objętość i jest

wyrażona w $\text{mm}^2/\text{mm}^3 = \text{mm}^{-1}$. Parametr A_{300} określa zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy 0,3 mm (300 μm) lub mniejszej jako najbardziej skutecznych w ochronie przeciw uszkodzeniu betonu podczas cykli zamrażania i odmrażania, [21].

Dzięki wprowadzeniu normy PN-EN 480-11:2000, [7] istnieje standardowy instrument badawczy, pozwalający oceniać strukturę porowatości stwardniałego zaczynu cementowego. Jednak, cytując za [22], w uchwalonej w 2004 roku normie PN-B-06265:2004 [3], nie znalazły się postulowane uzupełnienia wymagań w stosunku do betonu w klasie środowiska XF. Natomiast w nowych normach uzupełniających normę EN 206-1 w innych krajach europejskich umieszczono określenia mikrostruktury porów powietrznych, wymaganych do zapewnienia trwałości w środowiska XF. A zatem znane są dokumenty odniesienia pozwalające określić „właściwą” mikrostrukturę porów parametrami ilościowymi.

4. Kryteria oceny trwałości mrozowej betonu

Obowiązujące normy badania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie oraz przygotowywane do wprowadzenia normy badania mrozoodporności wewnętrznej betonu nie wyjaśniają całkowicie problemu związanego z trwałością mrozową konstrukcji betonowych. Wprawdzie metody są czy też za chwilę będą obowiązujące jednak nie ma jasnych kryteriów oceny tychże betonów.

W normie na nawierzchnie betonowe [23] w p. 4.5. podana jest tabela z opisanymi kategoriami mrozoodporności (tutaj tab. 5). Jednak istnieje pewna nieścisłość gdyż wg normy określenie mrozoodporności betonu na nawierzchnie betonowe powinno opierać się na badaniach podanych w prEN 12390-9, [5] a te z kolei są badaniami odporności na powierzchniowe łuszczenie (*scaling*).

Tablica 5. Kategorie mrozoodporności wg PN-EN 13877-2, [23]

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 $> 1,5 \text{ kg/m}^2$	$\leq 2,0$

W tablicy 5 widnieją trzy kategorie mrozoodporności betonu, przy czym w kategorii FT2 znajdują się betony zarówno o bardzo dobrej odporności na powierzchniowe łuszczenia jak i o dopuszczalnej odporności. W szwedzkiej normie [24] tzw. metoda Borås, która w normie PKN-CEN/TS 12390-9:2007, [5] odpowiada metodzie referencyjnej – *slab test*, wyróżnia się cztery kategorie betonów, w zależności od ilości złuszczonego materiału oraz od szybkości postępujących złuszczeń:

- beton bardzo dobrej jakości: $m_{56} \leq 0,10 \text{ kg/m}^2$,
- beton dobrej jakości: $m_{56} \leq 0,20 \text{ kg/m}^2$
lub $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} \leq 2$
- beton dopuszczalnej jakości: $m_{56} \leq 1,00 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} < 2$
- beton niedopuszczalnej jakości: $m_{56} > 1,00 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} > 2$

Trzy kategorie mrozoodporności wg [23] nie precyzują jaką metodą spośród trzech zawartych w normie PKN-CEN/TS 12390-9:2007, [5] był badany beton.

Normy dotyczące prefabrykatów betonowych (krawężników [12], płyt brukowych [13] oraz kostki brukowej [14]) podają, że przy zaistnieniu specjalnych warunków np. częstego kontaktu powierzchni z solą odladzającą w warunkach mrozu, może być konieczne spełnienie wymagań klasy 3, oznaczenie D tj. tak jak dla kategorii FT1 po 28 cyklach zamrażania/odmrażania, tabl. 5.

Norma na obiekty mostowe [17] lub na nawierzchnie lotniskowe [16] odnosi się do badania i oceny mrozoodporności betonów wg nieaktualnej normy na beton zwykły. Zgodnie z [17] beton do budowy konstrukcji mostowych powinien charakteryzować się stopniem mrozoodporności co najmniej F150 (z wyjątkiem betonów w fundamentach o niezmiennym nawodnieniu), natomiast beton na lotniskowe nawierzchnie – F200, tab. 6.

Tablica 6. Kryterium mrozoodporności wg PN-V-83002:1999, [16], fragment tablicy

Lp.	Właściwości betonu klasy B35	Jednostka miary	Wymaganie
6	Mrozoodporność, ubytek masy próbki przy oznaczeniu:		
	a) metodą bezpośrednią po 200 cyklach, nie więcej niż	%	5,0
	b) stopień mrozoodporności zwykłej H ₂ O (określany zgodnie z PN-88/B-06250)		F200

Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} powinien być mniejszy od 0,25 mm (0,20 mm przy stosowaniu środków rozmrażających), jeżeli napowietrzenie ma w istotnej mierze zwiększać odporność betonu na cykliczne zamrażanie i odmrażanie, Powers, [20]. Dokładniejsze kryterium dotyczące zależności \bar{L} od stosunku wodno-cementowego oraz sugerowaną liczbę cykli przy badaniu mrozoodporności lub odporności na powierzchniowe łuszczenie w betonach wysokowartościowych podane są w Tabl. 7 wg Aitcin [25]. Aby zabezpieczyć się przed nazbyt optymistycznym prognozowaniem odporności mrozowej przyjęto, że dla betonu dobrze zabezpieczonego przed wpływem działania mrozu wskaźnik rozmieszczenia porów powinien być mniejszy niż 0,20 mm – wg GDDKiA, [26] a powierzchnia właściwa kształtować się na poziomie 16-24 mm⁻¹, [27]. W przypadku parametru A₃₀₀ zalecana minimalna zawartość mikroporów wynosi 1,5%, [28].

Jak podaje Glinicki [29] sugerowanym krokiem w celu ujednoczenia kryteriów oceny trwałości mrozowej betonów byłyby międzylaboratoryjne badania porównawcze ze szczególnym uwzględnieniem następujących zagadnień:

- czy pozostawić kryterium F150, z możliwością ewentualnego zastąpienia przez F200;
- czy zmienić definicję mrozoodporności (tak jak miało to miejsce w normie litewskiej LST 1974:2005, [30]), gdzie:

$$\Delta f_c = (f_{c28} - f_c^{N_{cykl}}) / f_{c28} \quad (13)$$

tu:

$f_c^{N_{cykl}}$ – wytrzymałość na ściskanie betonu badanego po N cyklach zamrażania i odmrażania (dla klasy XF4 - min. $N_{cykl} = 300$);

f_{c28} – wytrzymałość betonu na ściskanie mierzona po 28 dniach dojrzewania;

– czy w zależności od klasy ekspozycji XF2, XF3 oraz ewentualnie XF4 wprowadzić jasne i czytelne wymagania:

- mrozoodporność: zmiana modułu sprężystości badana wg [6];
- powierzchniowe łuszczenie: masa złuszczeń powierzchniowych mierzona wg [5];
- rozmieszczenie porów badane wg [7].

Tablica 7. Proponowane wartości wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} oraz sugerowana liczba cykli zamrażania/odmrażania, zależnie od w/c betonów wysokowartościowych, Aïtcin, [25].

Współczynnik w/c	Zalecany średni wskaźnik rozmieszczenia porów	Dopuszczalny maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów	Odporność na cykle zamrażania i odmrażania
$> 0,40$	230 μm	260 μm (przy badaniu odporności na powierzchniowe łuszczenie)	300 cykli ASTM C 666 50 cykli ASTM C 672
$0,35 \div 0,40$	350 μm	400 μm (przy badaniu odporności na powierzchniowe łuszczenie)	300 cykli ASTM C 666 50 cykli ASTM C 672
$0,30 \div 0,35$	450 μm	550 μm	500 cykli ASTM C 666
$< 0,30$	Brak danych, dopuszczalne są powyższe kryteria		

5. Wnioski

Wybór metody badawczej ma podstawowe znaczenie przy ocenie otrzymywanych wyników i ich późniejsze analizy. Ostatecznie wybór ten wpływa bezpośrednio na przyjmowane rozwiązania materiałowe tj. rodzaj cementu, kruszywa, dodatki czy domieszki, technologiczne – konieczność napowietrzania, a także na uwarunkowania ekonomiczne – koszty jednostkowe betonu, koszty późniejszej eksploatacji czy napraw. Przyjęcie ostrzejszych warunków badania betonu stwarza większe wymagania w stosunku do jakości jego struktury i podwyższa koszty, ale wzrasta prawdopodobieństwo, że dana konstrukcja będzie pracowała niezawodnie przez założony okres eksploatacji.

Obserwacje in-situ wskazują na występowanie dwóch niezależnych rodzajów zniszczenia. W wynikach badań trzeba zawsze wyraźnie zaznaczyć wykorzystywaną metodę badawczą, dotyczącą mrozoodporności wewnętrznej, bądź odporności na powierzchniowe łuszczenie.

Choć w Polsce obowiązuje już norma na badanie betonu ze względu na odporność na powierzchniowe łuszczenie a norma na badanie mrozoodporności jest w przygotowaniu to jednak nie ma jasnych kryteriów oceny badanych betonów. Dlatego wydaje się celowe opracowanie wytycznych, dokumentów branżowych czy też inne uzupełnienie normy PN-EN 206-1:2003, [3] o brakujące szczegółowe kryteria trwałości mrozowej.

5. Bibliografia

1. EN 206. Concrete. Specification, performance, production and conformity.
2. PN-EN 206-1:2003, Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
3. PN-B-06265:2004, Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003 Beton, Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
4. Glinicki M.A., Cieśla J., Fordoński K., Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich, Międzynarodowa Konferencja EKO-MOST 2006, Kielce, 16-17 maja 2006, 115-124.
5. PKN-CEN/TS 12390-9:2007, Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling (*oryg.*).
6. CEN/TR 15177, Testing the freeze-thaw resistance of concrete – Internal structural damage, Technical Report, April 2006.
7. PN-EN 480-11:2000, Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, Warszawa 2000.
8. Fagerlund G., The critical degree of saturation method assessing the freeze/thaw resistance of concrete, *Materials and Structure*, Vol. 10, No. 58.
9. RILEM: CDF - *RILEM draft recommendation for the test method for the freeze-thaw resistance of concrete. Tests with sodium chloride solution (CDF)*, *Materials and Structures*, 1995, 28, 175-182.
10. RILEM: cube test - *RILEM draft recommendation for the test method for the freeze-thaw and deicing resistance of concrete. Cube test*, *Materials and Structures*, 1995, 28, 366-371.
11. ASTM C 672, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, *Annual Book of ASTM Standards*, 1991.
12. PN-EN 1340, Krawężniki betonowe. Wymagania i metody badań. Wrzesień 2004.
13. PN-EN 1339, Betonowe płyty brukowe. Wymagania i metody badań. Marzec 2005.
14. PN-EN 1338, Betonowe kostki brukowe. Wymagania i metody badań. Kwiecień 2005.
15. PN-88/B-06250, Beton zwykły.
16. PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.
17. PN-S-10040:1999, Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania.
18. HETEK *Method for test of the frost resistance of HPC*, Supplementary research, Report no. 55, 1996, pp. 68.
19. ASTM C 666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *Annual Book of ASTM Standards*, 1991.
20. Powers T.C., Brownyard T.L., Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. Res. Labs of the PCA. Bulletin 22, Chicago 1948.
21. Józwiak-Niedźwiedzka D., Zapobieganie łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego. Cz. I – stan wiedzy, *Drogi i Mosty*, 2/2006, p.37-54.

22. Glinicki M. A., Zieliński M., Diagnostyka mikrostruktury porów w betonie wbudowanym w konstrukcje i nawierzchnie, Konferencja Dni Betonu Konferencja– tradycja i nowoczesność, Wisła, 9-11.10.2006.
23. PN-EN 13877-2:2007, Nawierzchnie betonowe, cz.2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych.
24. SS 13 72 44, Concrete testing; Hardened concrete; Scaling at freezing, Swedish Standard, 1995.
25. Aïtcin P.-C., The influence of the spacing factor on the freeze-thaw durability of high-performance concrete, International Symposium on High-Performance and Reactive powder Concretes, Université de Sherbrooke, August 16-20, 1998, 419-433.
26. Ogólne specyfikacje techniczne. D-05.03.04, Nawierzchnia betonowa. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2003.
27. Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
28. ZTV Beton – StB 93, Uzupełniające techniczne warunki kontraktów i wytyczne w zakresie budowy betonowych nawierzchni dróg, Federalne Ministerstwo Komunikacji, Niemcy, 1993.
29. Glinicki M. A., Widmo nasiąkliwości, Budownictwo-Technologie-Architektura, nr 3/2007, 50-53.
30. LST 1974:2005 „Nurodymai, kaip taikyti LST EN 206-1“ (“Instructions on applying LST EN 206-1”).