

Mrozoodporność nawierzchni betonowych – wymagania i metody badań

FREEZ-THAW RESISTANCE FOR CONCRETE PAVEMENTS – REQUIREMENTS AND TEST METHODS

Streszczenie

W artykule zestawiono wymagania w zakresie mrozoodporności nawierzchni wykonywanych z mieszanek betonowych, wbudowywanych bezpośrednio na budowie, jak również z dostarczanych na budowę elementów prefabrykowanych. Przeanalizowano najczęściej stosowane krajowe specyfikacje techniczne i normy, przedstawiając podobieństwa, jak również różnice w wymaganiach dla surowców oraz właściwości użytkowych, w kontekście odporności na działanie zamrażania i rozmrażania. Przybliżono powołane w analizowanych dokumentach bezpośrednie i pośrednie metody badania mrozoodporności (metodą zwykłą wg PN-B-06250:1988, powierzchniowego złuszczenia wg PKN-CEN/TS 12390-9, oznaczenia charakterystyki porów wg PN-EN 480-11) oraz przedstawiono klasyfikację i kryteria oceny zgodności.

Abstract

The article sets out requirements concerning freez-thaw resistance of concrete pavements made directly on construction site, as well as prefabricated elements delivered to construction site. The technical domestic standards and norms showing similarities as well as different requirements for raw materials and functional properties were analyzed in the contexts of freezing and thawing impact. Presented methods (acc. to PN-B-06250:1988, PKN-CEN/TS 12390-9:2017, PN-EN 480-11) were discussed above analysis of direct and indirect freez-thaw resistance. Research, classification and compliance assessment were shown.

1. Wprowadzenie

Odporność betonu na działanie mrozu w Polsce, jest jedną z najistotniejszych właściwości mających wpływ na trwałość wykonywanych z niego konstrukcji. Nasz kraj leży w bodajże najgorszej strefie klimatycznej z punktu widzenia możliwych destrukcji mrozowych. Ani w krajach południa Europy, bo jest tam ogólnie ciepło, ani północy, bo jest tam zimniej, nie występuje tyle przejść przez temperaturę 0°C , co w Polsce [1]. Częste zmiany temperatury w miesiącach zimowych, spowodowane naprzemiennym oddziaływaniem wilgotnego i ciepłego powietrza znad Atlantyku oraz zimnego, suchego powietrza kontynentalnego, powodują w ciągu zimy wielokrotne rozmrażanie śniegu i lodu oraz ponowne zamarzanie powstałej wody [2]. Przeciętna liczba dni w roku, w których temperatura w Polsce przechodzi przez 0°C oszacować można na około 100. Bywają jednak zimy, w których liczba ta osiąga wartości większe. Częstotliwość zmian zależy też oczywiście od regionów naszego kraju [3]. Ilość cykli ma kluczowe znaczenie przy szkodliwym oddziaływaniu mrozu na beton, zwłaszcza dla dużych poziomych powierzchni betonowych narażonych bezpośrednio na działanie czynników atmosferycznych, niejednokrotnie przy udziale środków odladzających. Szczególnym przypadkiem takich konstrukcji są nawierzchnie betonowe po których odbywa się ruch pojazdów kołowych i pieszy, dodatkowo potęgujące efekty degradacji mrozowej betonu. Zniszczenia spowodowane brakiem mrozoodporności mają wpływ na walory estetyczne nawierzchni ale także na ich właściwości użytkowe. Nierówności, uskoki, zmiana szorstkości luźne fragmenty betonu mogą być nie tylko uciążliwe dla użytkowników ruchu, ale również znacząco zagrażać ich bezpieczeństwu, co nabiera jeszcze większego znaczenia w przypadku nawierzchni lotniskowych. Odporność betonu na działanie mrozu jest bardzo ważną właściwością w kontekście nie tylko trwałości, ale również bezpieczeństwa użytkowania nawierzchni betonowych.

Degradacja betonu spowodowana cyklicznym oddziaływaniem mrozu związana jest z jego odkształceniami termicznymi oraz zachodzącymi w nim zjawiskami fizycznymi – zamarzanie wody wywołuje ciśnienie hydrauliczne w porach materiału, czego efektem są spękania i odpryski, z upływem czasu prowadzące nierzadko do całkowitego rozpadu betonu. [3]. Szczególne zagrożenie dla nawierzchni betonowych stanowią powszechnie używane zimą środki odladzające. Przyczyniają się do przyspieszonej destrukcji betonu w warunkach działania niskich temperatur, powodując zwłaszcza zjawisko złuszczenia powierzchniowego. Według niektórych oszacowań, szybkość korozji może w tej sytuacji wzrosnąć nawet cztero- lub pięciokrotnie. Mechanizm przyspieszonego niszczenia betonu podczas zamarzania i rozmrażania w obecności środków odladzających, jest wciąż przedmiotem dyskusji [4].

Liczne badania wykazały zależność uszkodzeń mrozowych od składu mieszanki betonowej, współczynnika wodno-cementowego (w/c), zawartości cementu i dodatków mineralnych, rodzaju zastosowanych kruszyw oraz od zawartości i jakości napowietrzenia betonu [5], [6]. Kluczowe znaczenie ma również sam proces wbudowania jak również pielęgnacji betonu, o czym zdarza się niekiedy zapominać na budowach i w zakładach produkcji elementów prefabrykowanych, a co niesie za sobą poważne oraz nieodwracalne skutki.

W celu zapewnienia odporności nawierzchni betonowych na oddziaływanie zamrażania i rozmrażania, również w obecności środków odladzających, w normach oraz innych specyfikacjach technicznych zostały sformułowane liczne wymagania w odniesieniu do składników i właściwości betonu. W większości z tych dokumentów wskazane są również sposoby weryfikacji mrozoodporności zarówno za pomocą metod bezpośrednich, jak i pośrednich.

2. Wymagania w zakresie mrozoodporności dla nawierzchni betonowych

Nawierzchnie mogą być wykonywane z mieszanek betonowych wbudowywanych bezpośrednio na budowie, jak również z elementów prefabrykowanych produkowanych w zewnętrznych zakładach i dostarczanych na budowę jako gotowe wyroby. W obu przypadkach zostały sformułowane liczne wymagania, które swoim zakresem obejmują między innymi trwałość w warunkach zamrażania i rozmrażania. W zależności od rodzaju konstrukcji, odbywającego się po nich ruchu oraz technologii wykonywania, wymagania te zostały zawarte w różnych dokumentach. Dla nawierzchni wykonywanych na miejscu i zagęszczanych przez wibrowanie, bez względu na rodzaj przenoszonych przez nie ruchu można je znaleźć w normach PN-EN 13877-1 [11] oraz PN-EN 13877-2 [12]. Wymagania dla nawierzchni z betonu cementowego, po których odbywa się ruch samochodowy zostały doprecyzowane w Ogólnych Specyfikacjach Technicznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [24], [25], a dla betonowych nawierzchni lotniskowych w normie obronnej NO-17-A204:2015 [13]. Drobnowymiarowe elementy prefabrykowane przeznaczone do wykonywania nawierzchni objęte są normami zharmonizowanymi [14], [15], [16], a dla pozostałych w celu wprowadzenia ich do obrotu, wydawane są krajowe lub europejskie oceny techniczne (przed 2017 rokiem – aprobaty techniczne) odnoszące się między innymi do wytycznych obowiązujących w miejscu planowanego zastosowania (np. dla nawierzchni peronów – warunki techniczne Id-22 Polskich Linii Kolejowych S.A. [26]). W przypadku nawierzchni, dla których mogło by się wydawać, że nie sprecyzowano wymagań, dokumentem odniesienia może być norma PN-EN 206 [17] wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B-06265 [18], w których zawarto wskazówki ułatwiające wykonywanie trwałych konstrukcji betonowych, również narażonych na działanie mrozu.

W artykule zostały zebrane najważniejsze, zdaniem autorów, wymagania w kontekście mrozoodporności dla nawierzchni z betonu cementowego. Dodatkowo w trakcie pisania publikacji autorzy mieli wgląd w projekty dwóch dokumentów istotnych dla analizowanego zagadnienia: projektu krajowego uzupełnienia do normy PN-EN 206 [19] opracowywanego przez Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego oraz projektu Ogólnej Specyfikacji Technicznej dla nawierzchni z betonu cementowego D-05.03.04. Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [25]. Proponowane w tych dokumentach zmiany zostały uwzględnione w treści artykułu.

2.1. Wymagania wg normy PN-EN 206 oraz krajowego uzupełnienia

Według aktualnej normy PN-EN 206+A1:2016 [17] oraz krajowego uzupełnienia PN-B-06265 [16], zapewnienie trwałości konstrukcji betonowych oparto na koncepcji wartości granicznych. Zagrożenia korozyjne oddziałujące na beton zostały zdefiniowane i opisane w tych normach jako klasy ekspozycji (X0, XC, XD, XS, XF, XA, XM). Dla każdej klasy ekspozycji sformułowano zalecenia dotyczące wartości granicznych w zakresie:

- maksymalnego współczynnika woda/cement,
- minimalnej zawartości cementu,
- minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie (może być określona dodatkowo),
- minimalnej zawartości powietrza tam gdzie jest to uzasadnione (betony narażone na działanie mrozu),
- rodzaju cementu,
- rodzaju kruszywa, w przypadku betonów w klasie ekspozycji XF.

Jeżeli beton spełnia te wymagania, to według zapisów normy można uznać, że w konstrukcji ma on odpowiednią trwałość przez założony 50-letni okres użytkowania w zdefiniowanych warunkach korozyjnych, pod warunkiem, że:

- wybrano właściwą klasę ekspozycji,
- beton zapewnia minimalną otulinę zbrojenia wymaganą w danych warunkach środowiskowych,
- beton został prawidłowo ułożony, zagęszczony i był pielęgnowany,
- zapewniono odpowiednie utrzymanie betonu w okresie użytkowania.

Dla nawierzchni betonowych w normie PN-EN 206 [17], z uwagi na oddziaływania mrozu zostały wskazane klasy ekspozycji:

- 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.

Zalecane wartości graniczne dla tych klas przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości graniczne dla klas ekspozycji XF3 i XF4 [17]

	XF3	XF4
Maksymalne w/c	0,50	0,45
Minimalna klasa wytrzymałości	C30/37	C30/37
Minimalna zawartość cementu [kg/m ³]	320	340
Minimalna zawartość powietrza [%]	4,0	4,0
Inne wymagania	Kruszywo zgodne z PN-EN 12620 o odpowiedniej mrozoodporności	

W krajowym uzupełnieniu PN-B-06265 [18] dodatkowo wskazano dopuszczone do zastosowania rodzaje cementu, natomiast w projekcie krajowego uzupełnienia [19] doprecyzowano wytyczne dla kategorii mrozoodporności kruszywa oraz zawartości powietrza, uzależniając jego wartość od wymiaru ziaren kruszywa (tabela 2).

Tabela 2. Dodatkowe, zalecane wartości graniczne dla klas ekspozycji XF3 i XF4 [18], [19]

Minimalna zawartość powietrza				
Wymiar kruszywa	do 8 mm	do 16 mm	do 32 mm	do 64 mm
Minimalna zawartość powietrza	≥5,5%	≥ 4,5%	≥ 4,0%	≥ 3,5%
Kategoria mrozoodporności kruszywa				
Klasa ekspozycji	XF3		XF4	
Kategoria mrozoodporności kruszywa	F ₁		F _{NaCl} 6	
Rodzaje cementu dopuszczone do klas XF3 i XF4				
CEM I, CEM II A-S, CEM II B-S, CEM II A-V, CEM II A-LL, CEM II A-M (S-LL), CEM II A-M (S-V)*, CEM II A-M (V-LL)*, CEM II B-M (S-V)*, CEM III A**, CEM III B***				

* w składzie tylko z popiołami lotnymi o stratach prażenia ≤ 5% (LOI),

** dla XF4 klasa wytrzymałości cementu ≥ 42,5 lub klasa wytrzymałości cementu ≥ 32,5 R z zawartością granulowanego żużla wielkopieczowego ≤ 50% (masowo),

*** dla XF4 wyłącznie w przypadku elementów konstrukcji budowlanych narażonych na działanie wody morskiej, przy klasie wytrzymałości betonu C35/45.

Należy zaznaczyć, że dla koncepcji bazującej na wartościach granicznych, opracowywana jest alternatywna koncepcja oparta na właściwościach użytkowych, o czym jesteśmy informowani we wprowadzeniu do normy PN-EN 206+A1:2016 [17]. Niezależnie od tego, projektant obiektu budowlanego (specyfikujący), ma prawo ustalić dodatkowe kryteria badawcze dla betonu, również w zakresie mrozoodporności. Między innymi w tym celu, jak i z myślą o uporządkowaniu dostępnej metodologii badawczej i ułatwieniu deklarowania producentom betonu dodatkowych właściwości, w projekcie krajowego uzupełnienia do normy PN-EN 206 [19] zostały zamieszczone dwie metody weryfikacji mrozoodporności wraz z klasyfikacją i kryteriami oceny:

- badanie odporności betonu na działanie mrozu, oparte na metodzie zwykłej wg normy PN-B-06250 [20]. Klasyfikację i kryteria oceny przyjęto również wg tej normy,
- badanie odporności betonu na cykliczne zamrażanie-odmrażanie w obecności soli odladzających, oparte na metodzie wg PKN-CEN/TS 12390-9[21]. Klasyfikacja i kryteria oceny przyjęto takie same jak w normie PN-EN 13877-2 [12] (tabela 4).

Zróznicowano również czasy wykonywania badań w zależności od rodzaju zastosowanego cementu zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3. Czas wykonywania badań w zależności od zastosowanego cementu [19], [24]

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

2.2. Wymagania wg PN-EN 13877-1 oraz PN-EN 13877-2

W normach PN-EN 13877-1 [11] oraz PN-EN 13877-2 [12] określono wymagania dla nawierzchni betonowych wytwarzanych na miejscu i zagęszczonych przez wibrowanie na drogach samochodowych, lotniskach, chodnikach, ścieżkach rowerowych, placach przeładunkowych, czyli na wszystkich konstrukcjach przenoszących ruch.

Dla materiałów do wykonywania nawierzchni, w kontekście trwałości nie zamieszczono żadnych specjalnych wymagań pozostawiając takie regulacje normie PN-EN 206 [17], normom krajowym oraz dokumentom obowiązującym w miejscu wykonywania nawierzchni.

Tabela 4. Kategorie odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej [12]

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 $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik $>1,5 \text{ kg/m}^2$	Brak wymagań	Brak wymagań
FT2	Średnia $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Wartość średnia $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik $>1,5 \text{ kg/m}^2$	≤ 2

Z uwagi na mrozoodporność, w normie PN-EN 13877-2 [12] nawierzchnie sklasyfikowano w trzech kategoriach: FT2, FT1, FT0. Kryteria klasyfikacji oparto na wynikach badania odporność na zamrażanie i rozmrażanie z udziałem środków odladzających zgodnie z CEN/TS 12390-9 [21] (tabela 4). W normie nie sprecyzowano sposobu doboru kategorii w zależności od przeznaczenia nawierzchni pozostawiając to specyfikującym.

2.3. Wymagania wg Ogólnej Specyfikacji Technicznej D-05.03.04

Ogólna Specyfikacja Techniczna D-05.03.04 Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [24] reguluje wymagania dla nawierzchni dróg krajowych kategorii ruchu od KR1 do KR7, wykonywanych z betonu cementowego.

Według specyfikacji beton nawierzchniowy powinien odpowiadać klasie ekspozycji:

- XF3 – w przypadku braku stosowania chemicznych środków zimowego utrzymania dróg,
- XF4 – w przypadku stosowania chemicznych środków zimowego utrzymania dróg.

Należy jednak mieć na uwadze, że spełnienie zaleceń normy PN-EN 206 [17] dla tych klas jest niewystarczające do spełnienia wymagań specyfikacji, ponieważ zostały one zaostrzone i doprecyzowane.

Odnosnie ilości i rodzaju cementu wprowadzono dodatkowe ograniczenia:

- dla dróg kategorii ruchu KR3÷KR7 (w projekcie OST [25] KR5÷KR7) zawartość cementu w betonie $\geq 360 \text{ kg/m}^3$,
- dla nawierzchni z odkrytym kruszywem, w górnej warstwie zawartość cementu $\geq 420 \text{ kg/m}^3$,
- dla dróg w kategorii ruchu KR5÷KR7 dopuszczono stosowanie jedynie cementów CEM I, CEM II A-S i CEM II B-S,
- w niższych kategoriach ruchu KR1÷KR3 dodatkowo dopuszczono stosowanie CEM II A-LL, CEM II A-V, CEM II /A-M (S-V), a w kategorii KR1÷KR4 – CEM III A,
- w projekcie OST [25] do wykonywania nawierzchni dopuszczono tylko cementy klasy 32,5 oraz 42,5 o normalnej (N) i wysokiej (R) wytrzymałości wczesnej, pomijając klasę 52,5 wskazaną w jeszcze aktualnej OST [24] dla nawierzchni do wczesnego obciążenia ruchem,
- postawiono wymagania dla cementów w zakresie: początku czasu wiązania, zawartości alkaliów oraz stopnia zmielenia,

Niezależnie od klasy ekspozycji maksymalny wskaźnik wodno-cementowy nie może być wyższy niż 0,45.

Minimalną zawartość powietrza w mieszance betonowej, uzależniono od wielkości ziaren kruszywa (tabela 5), definiując również kryterium maksymalnej zawartości, inaczej niż w projekcie krajowego uzupełnienia PN-B-06265 [19] (tabela 2).

Dla dróg kategorii KR5÷KR7 podniesiono wymaganie dla minimalnej wytrzymałości na ściskanie, na klasę C35/45 (wyższą niż to wynika z zaleceń dla XF3 i XF4).

Do klas ekspozycji przypisano kategorie mrozoodporności wg PN-EN 13877-2 [11] oraz wymagania dotyczące struktury napowietrzenia betonu (tabela 6). W przypadku nawierzchni z odkrytym kruszywem, w projekcie OST [25] zaproponowano w zależności od strefy rozpoczęcia sezonu zimowego w Polsce, różne kryteria oceny zgodności mrozoodporności, badanej wg CEN/TS 12390-9 [21] (rys. 1 i tabela 7).

Dla dolnej warstwy nawierzchni lub w przypadku nawierzchni jednowarstwowych, beton powinien spełniać wymagania dla stopnia mrozoodporności F150 ocenianego zgodnie z normą PN-B-06250 [20].

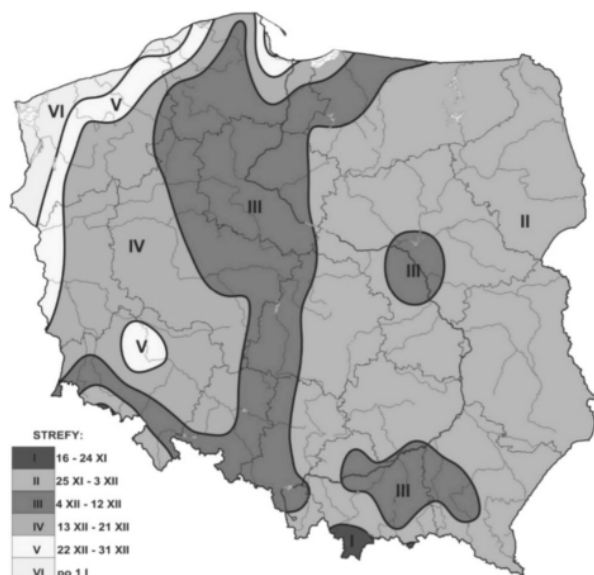
Terminy badań betonów podobnie jak w projekcie uzupełnienia krajowego uzależniono od rodzaju użytego cementu (tabela 3).

Tabela 5. Wymagania dla betonu nawierzchniowego w zakresie mrozoodporności [24]

Maksymalny wymiar ziaren kruszywa	Etap wykonywania badań	
	Projektowanie składu mieszanki betonowej	Zatwierdzanie recepty, próba technologiczna, kontrola jakości robót
mm	% objętości	% objętości
8,0	5,0÷6,5	Wartości z projektowania składu mieszanki z uwzględnieniem tolerancji pomiarowej : -0,5; +1,0
16,0; 22,4	4,5÷6,0	
31,5	4,0÷5,5	

Tabela 6. Wymagania dla betonu nawierzchniowego w zakresie mrozoodporności [24]

Właściwości projektowanego betonu nawierzchniowego	Dla betonów w klasie ekspozycji XF3	Dla betonów w klasie ekspozycji XF4
Kategoria mrozoodporności wg PN-EN 13877-2 (dla GWN oraz JWN), nie niższa niż:	FT1	FT2
Charakterystyka porów powietrznych w betonie określana wg PN-EN 480-11: – zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A_{300}), % – wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie, mm	$\geq 1,5$ $\leq 0,250$	$\geq 1,5$ $\leq 0,200$



Rys 1. Strefy rozpoczęcia sezonu zimowego w Polsce [25]

Tabela 7. Wymagania dla mrozoodporności nawierzchni z odkrytym kruszywem [25]

Lokalizacja nawierzchni betonowej	Ubytek masy po 28 cyklach (m_{28})	Ubytek masy po 56 cyklach (m_{56})	Stopień ubytku m_{56}/m_{28}
nawierzchnia betonowa w strefie I÷II	brak wymagań	wartość średnia $\leq 0,375 \text{ kg/m}^2$	brak wymagań
nawierzchnia betonowa w strefie III÷VI	wartość średnia $\leq 0,250 \text{ kg/m}^2$	wartość średnia $\leq 0,50 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,0 \text{ kg/m}^2$	≤ 2

2.4. Wymagania wg normy obronnej NO-17-A204:2015

Wymagania stawiane nawierzchniom lotniskowym zarówno na obiektach cywilnych, jak i wojskowych są znacznie wyższe niż kryteria stosowane dla nawierzchni drogowych [7].

Po wycofaniu normy PN-V-83002:1999 [22], wymagania dla nowobudowanych, modernizowanych i remontowanych nawierzchni lotniskowych są formułowane głównie na podstawie normy obronnej NO-17-A204:2015 [13]. Zawiera ona oprócz wymagań również szczegółowy opis metodologii badawczych, wg których należy weryfikować wyspecyfikowane właściwości betonu.

W normie zidentyfikowano zagrożenie korozyjne oddziaływające na beton jako klasę ekspozycji XF4. W stosunku do zaleceń PN-EN 206 [17] oraz krajowego uzupełnienia PN-B-06265 [18], zaostrzono wymaganie dla maksymalnego wskaźnika wodno-cementowego na 0,40 oraz ograniczono zakres stosowanych materiałów. Do wykonywania nawierzchni dopuszczono jedynie cementy portlandzkie CEM I o zawartości alkaliów $\leq 0,6 \text{ Na}_2\text{O}_{eq}$ (nisko alkaliczne) oraz kruszywa granitowe. Autorzy normy [13] przewidzieli jednak możliwość użycia cementów z większą zawartością alkaliów oraz innych kruszyw ze skał głębinowych pod warunkiem pełnej weryfikacji przydatności do budowy lotniskowych nawierzchni betonowych. Oprócz informacji związanych ze składem w normie zawarto wymagania dla właściwości użytkowych betonu, w tym również dla mrozoodporności. Wymagania zróżnicowano w zależności od klasy wytrzymałości betonu na ściskanie (tabela 8).

Tabela 8. Wymagania dla nawierzchni lotniskowych w zakresie mrozoodporności [13]

Wymaganie	Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie			
	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
Mrozoodporność				
a) Ubytek masy próbki przy oznaczaniu metodą bezpośrednią po 200 cyklach, wartość średnia, nie więcej niż:	5,0%	4,9%	4,8%	4,7%
b) Ubytek wytrzymałości na ściskanie próbek po 200 cyklach, wartość średnia, nie więcej niż:	20,0%	19,0%	18,0%	17,0%
c) Na powierzchniach próbek nie powinny występować mikrorysy	+	+	+	+
Stopień mrozoodporności*	F200	F200	F200	F200
Odporność na powierzchniowe łuszczenie*, wartość średnia, nie więcej niż	0,01 kg/m^2			

* badanie zgodnie normą NO-17-A205:2015, załącznik B (normalny)

2.5. Wymagania dla elementów prefabrykowanych

W przypadku drobnowymiarowych elementów prefabrykowanych (betonowe kostki, krawężniki i płyty brukowe) objętych normami zharmonizowanymi PN-EN 1338 [14], PN-EN 1339 [15], PN-EN 1340 [16], odporność na warunki atmosferyczne określa się za pomocą badań odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzającej lub nasiąkliwości. Przewidziano trzy klasy przedstawione w tabeli 9. Procedury badania do oceny tych klas zostały zawarte w załącznikach do norm [14], [15], [16].

Tabela 9. Klasy odporności na warunki atmosferyczne elementów brukowych [14], [15], [16]

Klasa	Znakowanie	Kryterium
1	A	Brak wymagań
2	B	Wartość średnia nasiąkliwości masowej $\leq 6\%$
3	D	Wartość średnia ubytku masy po badaniu zamrażania/rozmrażania $\leq 1 \text{ kg/m}^2$, przy czym żaden pojedynczy wynik nie wyższy niż $1,5 \text{ kg/m}^2$

Klasy powinno się dobierać w zależności od warunków w jakich będą użytkowane wyroby. W normie zasugerowano, że w celu zapewnienia trwałości wymagania powinny być określone w przepisach obowiązujących w kraju zastosowania wyrobu. Trudno znaleźć takie formalne wymagania w Polsce. Niemniej jednak w przypadku kiedy mają one częsty kontakt z solą odładzającą w warunkach mrozu, powinna to być klasa 3.

Zdarzają się przypadki podczas badania mrozoodporności, zwłaszcza elementów wykonywanych dwuwarstwowo, że powierzchnia górna (warstwa ścieralna) nie wykazuje żadnych złuszczeń i ubytku masy podczas gdy warstwa dolna, konstrukcyjna nie jest mrozoodporna i ulega degradacji [8]. Należy zwrócić na to uwagę ponieważ efekt taki może powtórzyć się również podczas użytkowania wyrobów.

Nie wszystkie rodzaje prefabrykowanych wyrobów betonowych, przeznaczonych do wykonywania nawierzchni, doczekały się własnej normy europejskiej lub krajowej. Dotyczy to m.in. wielkogabarytowych prefabrykowanych płyt peronowych. Chcąc wprowadzić takie wyroby na rynek producenci muszą uzyskać między innymi europejską lub krajową ocenę techniczną (EOT, KOT) od jednej z upoważnionych jednostek oceny technicznej (JOT).

Przy formułowaniu wymagań w ocenie technicznej dla płyt peronowych powinno kierować się Warunkami Technicznymi Budowy i Odbioru Peronów Pasażerskich Id-22 wydanymi przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. [26]. Według tych wytycznych do wykonania peronowych krawędzi dostępu na nowych obiektach dopuszczone są wyłącznie płyty kamienne granitowe (standard podwyższony), płyty betonowe z odkrytym kruszywem (standard podstawowy) oraz płyty betonowe klasyczne (standard dostateczny). Małogabarytowe kostki brukowe zostały dopuszczone tylko w wyjątkowych sytuacjach, w standardzie dostatecznym, wyłącznie do peronów niskich lub prac odtworzeniowych przy naprawach starych obiektów. Wymagany okres trwałości dla nawierzchni betonowych w przypadku płyt peronowych betonowych wynosi 50 lat, a dla kostki brukowej 30. W wytycznych [26] zostały przedstawione wymagania dotyczące odporności betonu na działanie mrozu (tabela 10). W standardzie dostatecznym dla betonowych płyt peronowych zostało postawione wymaganie spełnienia przez beton stopnia mrozoodporności F150, bez wymagania dla odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli od-

ładujących (takie wymaganie zostało postawione tylko dla płyt z odkrytym kruszywem oraz ścianek peronowych). Może być to niewystarczające do zapewnienia trwałości przez wymagany okres 50 lat.

Tabela 10. Wymagania dla prefabrykowanych peronów w zakresie mrozoodporności [26]

Właściwości	Płyty peronowe z odkrytym kruszywem	Ścianka peronowa/płyty peronowe betonowe	Metoda badania
Odporność betonu na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających 3% NaCl-ubytek masy z powierzchni przeznaczonej do ruchu w kg/m ²	Po 112 cyklach średnia $\leq 0,1$ pojedynczy wynik $\leq 0,2$	-	PN-CEN/TS 12390-9
Mrozoodporność	-	F150 (dotyczy tylko płyt peronowych betonowych)	PN-CEN/TS 12390-9*
Odporność betonu na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających 3% NaCl-ubytek masy z powierzchni eksponowanej w kg/m ²	-	Po 28 cyklach średnia $\leq 1,0$ pojedynczy wynik $\leq 1,5$ (tylko dla ścianek peronowych)	PN-CEN/TS 12390-9

* prawdopodobnie błąd w zapisie metody badawczej. Mrozoodporność F150 występuje w normie PN-B-06250:1988

3. Metody badania mrozoodporności

W analizowanych w poprzednim rozdziale normach i specyfikacjach, w kontekście mrozoodporności pojawiają się trzy metody badawcze:

- bezpośrednie – metoda zwykła oraz powierzchniowego złuszczenia,
- pośrednia – charakterystyki porów powietrznych.

Metody bezpośrednie polegają na cyklicznym zamrażaniu i rozmrażaniu w ustalonych warunkach, próbek betonowych oraz ocenie skutków niszczącego działania mrozu. Badaniu poddawane są całe próbki lub jej określone powierzchnie.

Metoda pośrednia polega na ocenie innej właściwości beton (w tym przypadku jego napowietrzenia) o potwierdzonej zależności z mrozoodpornością.

3.1 Metoda zwykła badania mrozoodporności wg PN-B-06250:1988

Metoda zwykła badania mrozoodporności wg PN-B-06250:1988 [20] została powołana w wymaganiach dla nawierzchni betonowych lub na jej podstawie zostały opisane metody badawcze w dokumentach odniesienia [13], [19].

Metoda polega na przeprowadzeniu badań porównawczych pomiędzy próbkami poddawanymi cyklicznemu zamrażaniu w powietrzu i rozmrażaniu w wodzie, a próbkami świadkami dojrzewającymi w tym czasie, w warunkach laboratoryjnych.

Badanie to od kilkudziesięciu lat stanowi w Polsce podstawową metodę oceny mrozoodporności betonu. Ten sposób realizacji badania ma odwzorowywać warunki oddziaływania środowiska na konstrukcje w okresie zimowym: beton ma możliwość

okresowego wysychania, nasączaany jest wodą, a po zamrożeniu na powierzchni próbek przeważnie nie powstaje warstewka lodu. Jak widać takie podejście nie do końca odzwierciedla rzeczywiste warunki użytkowania nawierzchni betonowych. Podczas tego badania zniszczenie następuje zazwyczaj w postaci spękań wewnątrz i na powierzchni betonu. Typowy przebieg degradacji betonu związany jest z rozwojem mikrorys, czemu towarzyszy początkowo przyrost masy próbek, o ile nie nastąpiły wcześniej wykruszenia narożników i odpryski betonu nad niemrozoodpornymi ziarnami kruszyw. W bardziej zaawansowanej fazie rysy przekształcają się w głębokie spękania, a mocno uszkodzone fragmenty próbek odpadają, co powoduje, że ich masa gwałtownie maleje. Rozwojowi rys towarzyszy również spadek wytrzymałości, wzrost odkształceń podłużnych oraz spadek częstotliwości rezonansowej [9].

Badanie wykonuje się na dwunastu formowanych próbkach sześciennych lub na próbkach rdzeniowych pobranych z konstrukcji (sześć poddawanych zamrażaniu i sześć jako próbki świadki). Dobrym zwyczajem praktykowanym w niektórych laboratoriach, jest pobranie dodatkowych trzech próbek w celu określenia wytrzymałości na ściskanie przed rozpoczęciem mrożenia, w celu porównania z wytrzymałością próbek świadków badanych w późniejszym terminie. Należy zwrócić uwagę na to, że w OST GDDKiA [24], [25], dopuszczają tylko badanie na próbkach formowanych o wymiarach 100x100x100 mm.

Temperatura zamrażania próbek w tej metodzie wynosi $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ natomiast rozmrażania $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Ilość cykli zamrażania i rozmrażania przyjmuje się w zależności od wymaganego stopnia mrozoodporności betonu, np. dla F150 jest to 150 cykli, a dla F200 jest to 200 cykli.

Do oceny stopnia mrozoodporności przyjęto trzy kryteria:

- na próbkach po cyklach zamrażania i rozmrażania nie mogą występować spękania,
- różnica pomiędzy masą próbek nasączonych wodą przed badaniem, a masą próbek po założonej ilości cykli zamrażania i rozmrażania nie może być większa niż 5%,
- spadek wytrzymałości na ściskanie pomiędzy próbkami świadkami i próbkami zamrażanymi nie może być większy niż 20%.

W betonach o dużej zawartości cementu i niskim wskaźniku wodno-cementowym, można czasami zauważyć nieznaczny przyrost wytrzymałości próbek poddawanych cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu w porównaniu do próbek świadków. Ma to prawdopodobnie związek z dostarczeniem wody do niezhydratyzowanych ziaren cementu (reliktów) poprzez mikrospeknięcia powstające w trakcie badania i spowodowanie efektu tzw. samoleczenia się betonu.

W normie obronnej NO-17-A204:2015 [13] procedura badania betonu nawierzchniowego metodą zwykłą, opisana w załączniku B, jest tożsama z metodą zwykłą wg PN-B-06250 [20], z wyjątkiem badania na próbkach pobranych z konstrukcji nawierzchni (badanie odbiorcze), dla którego to autorzy normy obronnej ograniczyli wymaganą ilość próbek do sześciu rdzeni o średnicy 150 mm i wysokości równej grubości nawierzchni (trzy poddawane zamrażaniu i trzy jako próbki świadki). Dodatkowo w normie [13] przedstawiono trzy warianty modyfikacji tej metody, dostosowując ją do badania odporności betonu nawierzchniowego na działanie środków odladzających. Modyfikacja polega na użyciu podczas badania w miejsce wody środka odladzającego z tym, że:

- w metodzie A zamrażanie następuje w powietrzu, a rozmrażanie w środku odladzającym,
- w metodzie B dodatkowo po każdym 50 cyklach próbkę poddaje się nasączeniu w środku odladzającym przez okres 5 dni,
- w metodzie C próbkę zarówno zamraża się, jak i rozmraża w środku odladzającym.

Należy również zwrócić uwagę na to, że zmodyfikowano również kryteria oceny stopnia mrozoodporności, uzależniając je od klasy wytrzymałości betonu (tabela 8).

3.2. Metoda złuszczenia powierzchniowego wg PKN-CEN/TS 12390-9

Metoda powierzchniowego złuszczenia wg PKN-CEN/TS 12390-9 [21], podobnie jak metoda przedstawiona powyżej, została bezpośrednio powołana w wymaganiach dla nawierzchni lub w dokumentach odniesienia zostały opisane metody o podobnej procedurze badania.

Metoda polega na poddawaniu powierzchni próbki pokrytej 3 mm warstwą dejonizowanej wody lub 3% roztworu chlorku sodu (NaCl), cykлом zamrażania i rozmrażania. W przypadku zmodyfikowanej w normie obronnej NO-17-A204:2015 [13] metodzie, badanie wykonuje się z zastosowaniem środków odladzających, rzeczywiście używanych do zimowego utrzymania nawierzchni.

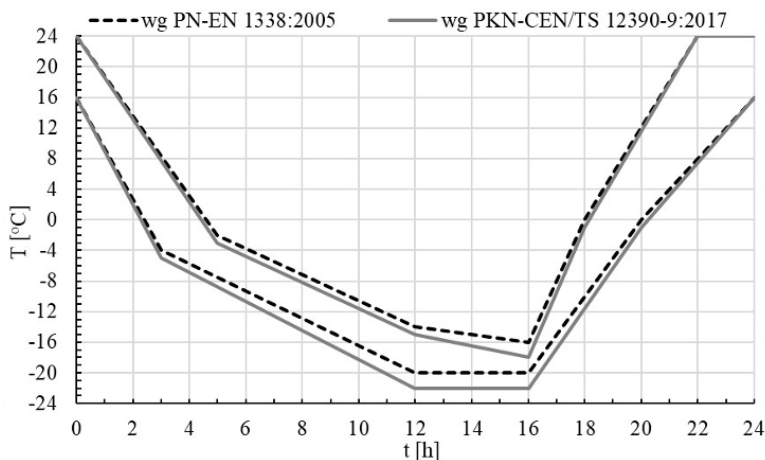
Badanie odwzorowuje w sposób przybliżony warunki na jakie narażone są nawierzchnie betonowe w okresie zimowym. Degradacja betonu następuje poprzez złuszczenie kolejnych warstw z powierzchni próbki, a w przypadku występowania w składzie betonu kruszyw nie posiadających wystarczającej mrozoodporności, również przez odpryski ziaren kruszywa.

Standardowo badanie wykonuje się na czterech betonowych plastrach grubości 50 mm, wyciętych prostopadle do powierzchni zacieranej ze środka czterech próbek sześciennych o boku 150 mm.

Odporność betonu jest oceniana na podstawie łącznej masy złuszczonego materiału po zadanej ilości cykli zamrażania i rozmrażania. Kryteria oceny przedstawiono w zależności od dokumentu odniesienia, w tabeli 4, 7, 8, 9 i 10. Według normy PKN-CEN/TS 12390-9 [21] standardowa ilość cykli wynosi 56, natomiast wg procedury opisanej w normach dla prefabrykowanych elementów brukowych [14], [15], [16], oceny dokonuje się po 28 cyklach, a w przypadku wymagań dla płyt peronowych z odkrytym kruszywem wg Id-22 [26] nawet po 112 cyklach.

Różnice polegają nie tylko na liczbie cykli, ale również na ilości, rodzaju i sposobie przygotowania próbek do badań. W przypadku elementów brukowych badanie wykonuje się na trzech wyrobach lub wyciętych z nich próbkach pod warunkiem, że powierzchnia każdej z nich nie jest mniejsza niż 7 500 mm² i większa niż 25 000 mm², a grubość nie przekracza 103 mm. Różnica dotyczy również powierzchni poddawanej badaniu. W przypadku badań odbiorczych nawierzchni lotniskowych na próbkach rdzeniowych o średnicy 150 mm, pobranych z konstrukcji oraz elementów brukowych zamrażaniu i rozmrażaniu podlega ta powierzchnia, która podczas użytkowania jest rzeczywiście narażona na działanie czynników atmosferycznych.

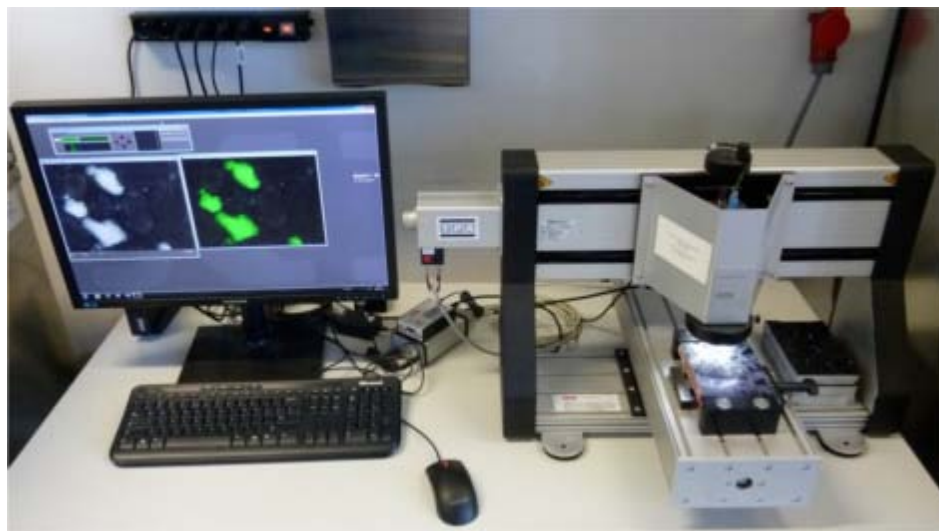
Zakres temperatur w których odbywa się badanie przedstawiono na rysunku 2. Należy zwrócić uwagę na to, że temperatury te różnią się w zależności od tego czy badanie jest wykonywane wg normy PKN-CEN/TS 12390-9 [21], czy wg norm dla elementów brukowych [14], [15], [16].



Rys. 2. Przebieg temperatur w czasie cyklu badania odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających [21], [14]

3.3. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w betonie wg PN-EN 480-11

Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w betonie wg PN-EN 480 [23] jest pośrednią metodą określania mrozoodporności, na podstawie ilościowego opisu charakterystyki porów [10]. Wykonanie badania rozpoczyna się od wycięcia ze środka dwóch betonowych próbek, plastrów o wymiarach 150x100x20 mm, równoległe do kierunku formowania. Powierzchnie plastrów szlifuje się i poleruje, a następnie kontrastuje się pory powietrzne występujące na powierzchni zglądów. Tak przygotowane próbki poddawane są analizie wzdłuż serii równoległych linii pomiarowych, rejestrując liczbę porów powietrznych przeciętych przez te linie oraz długość każdej cięciwy poru. W wyniku badania otrzymuje się m. in. informacje o całkowitej zawartości powietrza (A), powierzchni właściwej systemu pęcherzyków powietrznych (α), zawartości porów o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}) oraz wskaźnik rozmieszczenia (σ). Właśnie te dwa ostatnie parametry zostały wskazane jako wymagane w OST [24], [26] dla nawierzchni betonowych, w kasie ekspozycji XF3 i XF4 (tabela 6). Metoda ta jest bardzo wrażliwa na sposób przygotowania próbek, dlatego wymaga od osoby wykonującej badanie dużego doświadczenia. Powinno się również zachować dużo staranności już na etapie formowania próbek, zwłaszcza przy użyciu laboratoryjnej buławy vibracyjnej, ponieważ złym zagęszczeniem można zaburzyć wynik badania. Metoda posiada wiele zalet, z czego najważniejszą jest czas trwania badania w porównaniu z czasem badania metodami bezpośrednimi.



Fot. 1. Urządzenie do badania rozmieszczenia porów w Laboratorium Badawczym TPA w Pruszkowie

4. Podsumowanie

Mrozoodporność nawierzchni betonowych w naszych warunkach klimatycznych ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia trwałości konstrukcji i bezpieczeństwa użytkowania. Wymagania dla betonu w zakresie mrozoodporności powinny być tak formułowane, żeby jak najrealniej odzwierciedlały rzeczywiste warunki użytkowania wykonanych z niego konstrukcji. Aktualizowanie dokumentów zawierających wymagania, w tym zakresie jest bardzo ważne i potrzebne, a wprowadzane do nich zmiany powinny być zgodne z rozwojem technologii betonu i aktualną metodologią badawczą.

Literatura

- [1] Bajorek G., Pielęgnacja betonu w okresie dojrzewania, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2017
- [2] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2002
- [3] Radomski W., Glinicki A., Diagnostyka mrozoodporności betonu w drogowych obiektach mostowych, Drogownictwo 9/2013
- [4] Łukowski P., Modyfikacja materiałowa betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2016
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010
- [6] Neville A.M., Właściwości betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012
- [7] Poświata A., Pietruszewski P., Wpływ stanu równości nawierzchni lotniskowych na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych, Autobusy 12/2016
- [8] Konopska-Piechurska M., Jackiewicz-Rek W., Cechy prefabrykowanych betonowych elementów nawierzchniowych, Inżynier Budownictwa 4/2013
- [9] Wawrzeńczyk J., Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2002
- [10] Babińska J., Badania porowatości w ocenie mrozoodporności betonów napowietrzanych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik 4(160), Warszawa 2011

- [11] PN-EN 13877-1:2013-08 Nawierzchnie betonowe. Część 1: Materiały
- [12] PN-EN 13877-2:2013-08 Nawierzchnie betonowe. Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych
- [13] NO-17-A204:2015 Lotniskowe nawierzchnie betonowe. Wymagania i metody badań nawierzchni z betonu cementowego
- [14] PN-EN 1338:2005 Betonowe kostki brukowe. Wymagania i metody badań
- [15] PN-EN 1339:2005 Betonowe płyty brukowe. Wymagania i metody badań
- [16] PN-EN 1340:2004 Krawężniki betonowe. Wymagania i metody badań
- [17] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [18] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienie PN-EN 206-1:2004 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [19] prPN-B-06265:2017 Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [20] PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- [21] PKN-CEN/TS 12390-9:2017 Badania betonu. Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających. Złuszczenie
- [22] PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań
- [23] PN-EN 480-11:2008 Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [24] Ogólne Specyfikacje Techniczne OST Prace konstrukcyjne 06.01 Nawierzchnia z betonu cementowego, Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, 2014
- [25] Ogólna Specyfikacja Techniczna, Nawierzchnia z betonu cementowego D-05.03.04. Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa 2018 (projekt z 19.03.2018)
- [26] Id – 22, Warunki techniczne budowy i odbioru peronów pasażerskich, aspekty: peronowe krawędzie dostępu, nawierzchnie i korpus peronu, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2015