

ROZDZIAŁ 6

O sposobach zapewnienia trwałości konstrukcji z betonu w środowisku agresywnym

mgr inż. Krzysztof Falkowski

Politechnika Białostocka

Streszczenie:

W niniejszym artykule omówiono zagadnienia trwałości konstrukcji z betonu uwzględniając kategorie projektowanego okresu użytkowania, klasy ekspozycji, klasy konstrukcji, klasy wykonania i klasy pielęgnacji. Uwagę zwrócono na wzajemne powiązania norm dotyczących projektowania konstrukcji z betonu PN-EN 1992: 2008, technologii betonu PN-EN 206: 2014-04 i wykonania konstrukcji z betonu PN-EN 13670: 2011 oraz wielu norm materiałowych. Opisano zagrożenia występujące w poszczególnych klasach ekspozycji i przedstawiono sposoby dostosowania składu i struktury betonu do agresywnego środowiska w którym konstrukcja będzie użytkowana. Określono wymagania w stosunku do podstawowych składników betonu, mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Przedstawiono wnioski z badań własnych autora przeprowadzonych na kompozytach cementowych modyfikowanych domieszką asfaltu w postaci anionowej emulsji bitumicznej oraz wnioski z przeprowadzonej implementacji w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: beton, trwałość, klasy ekspozycji, klasy konstrukcji, klasy wykonania, klasy pielęgnacji, domieszka bitumiczna

Wprowadzenie

Przez wiele lat projektowanie konstrukcji z betonu ograniczało się do sprawdzenia stanów granicznych nośności, przy osiągnięciu których element ulega zniszczeniu, oraz stanów granicznych użytkowania uwzględniających dopuszczalne ugięcia i rozwarcie rys. Aspekt trwałości był marginalizowany, a przy doborze betonu koncentrowano się głównie na wytrzymałości zapewniającej stateczność ustroju nośnego, pomijając dostosowanie jego składu do przewidywanego okresu użytkowania w określonym środowisku. W konsekwencji takiego stanu rzeczy często już po kilku latach eksploatacji obiektu zachodziła konieczność przeprowadzania uciążliwych i kosztownych napraw oraz remontów konstrukcji z betonu, które uległy uszkodzeniom lub pogorszeniu pod wpływem między innymi warunków atmosferycznych, CO₂, wody, środków odladzających,

agresywnych jonów takich jak NH_4^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} oraz innych substancji destrukcyjnych w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego, czy nawet czynników biologicznych. W ostatnich latach względy praktyczne i ekonomiczne spowodowały, iż bardziej opłacalne staje się stosowanie trwałych, lecz droższych rozwiązań już na etapie projektowania i realizacji, niż ryzyko ponoszenia znacznych i często nieprzewidywalnych kosztów podczas użytkowania. Zostało to odzwierciedlenie w aktualnych normach dotyczących projektowania konstrukcji, składu betonu oraz wykonywania elementów betonowych. Zawarte w nich zalecenia mają na celu zapewnienie wymaganej trwałości w określonych warunkach i przewidywanym okresie eksploatacji.

6.1. Projektowanie z uwzględnieniem trwałości

Aktualne normy do projektowania konstrukcji betonowych objęte są Eurokodem 2 [1] oraz Eurokodami 0 i 1 [2, 3] dotyczącymi ogólnych zasad konstruowania. System Eurokodów wymaga od projektanta zapewnienia wymaganej trwałości konstrukcji już na etapie projektowania. Ma to swoje uzasadnienie ekonomiczne, gdyż pozwala uniknąć kosztownych napraw w przyszłości. Trwałość jest wymieniona w wymaganiach podstawowych określonych w normie PN-EN 1990: 2004 [2] obok nośności i użytkowości jako równie istotna. Projektowane konstrukcje żelbetowe powinny spełniać założone wymagania przez cały przewidywany okres użytkowania bez istotnego obniżenia przydatności lub ponoszenia nadmiernych i nieprzewidzianych kosztów utrzymania [1]. Trwałość konstrukcji żelbetowej przede wszystkim powinien zapewnić beton, odporny na wpływy środowiska, w którym obiekt będzie użytkowany.

Eurokod 2 [1] oraz przywoływane w nim norma technologiczna PN-EN 206 [4] i norma wykonawcza PN-EN 13670 [5] kładą szczególny nacisk na trwałość betonu w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Jest to o tyle istotne, iż ten sam beton może być trwały bądź nietrwały w zależności od otaczającego środowiska, w którym się znajdzie. W Eurokod 0 [2] zdefiniowano **pięć kategorii projektowanego okresu użytkowania**. W zależności od rodzaju konstrukcji okres ten wynosi od 10 do 100 lat. Kategorie projektowanego okresu użytkowania zamieszczono w tab. 6.1.

W praktyce najczęściej mamy do czynienia z obiektami zaliczanymi do kategorii 4, które powinny być projektowane na 50 lat użytkowania. Na każdym etapie procesu projektowanego (koncepcja, dobór materiałów, szczegóły konstrukcji, kontrola jakości itp.) obowiązkiem projektanta jest zachowanie wymagań dotyczących trwałości, chroniąc każdy element konstrukcji przed oddziaływaniami środowiska mogącymi wpłynąć niekorzystnie

na trwałość. Spełnienie tych wymagań sprowadza się do przyjęcia odpowiedniej otuliny elementów zbrojenia, zastosowanie odpowiedniego betonu i ograniczenie szerokości rozwarcia rys w zależności od spodziewanych warunków środowiskowych zdefiniowanych w postaci klasy ekspozycji [7].

Tabela 6.1. Kategorie projektowanego okresu użytkowania wg PN-EN 1990

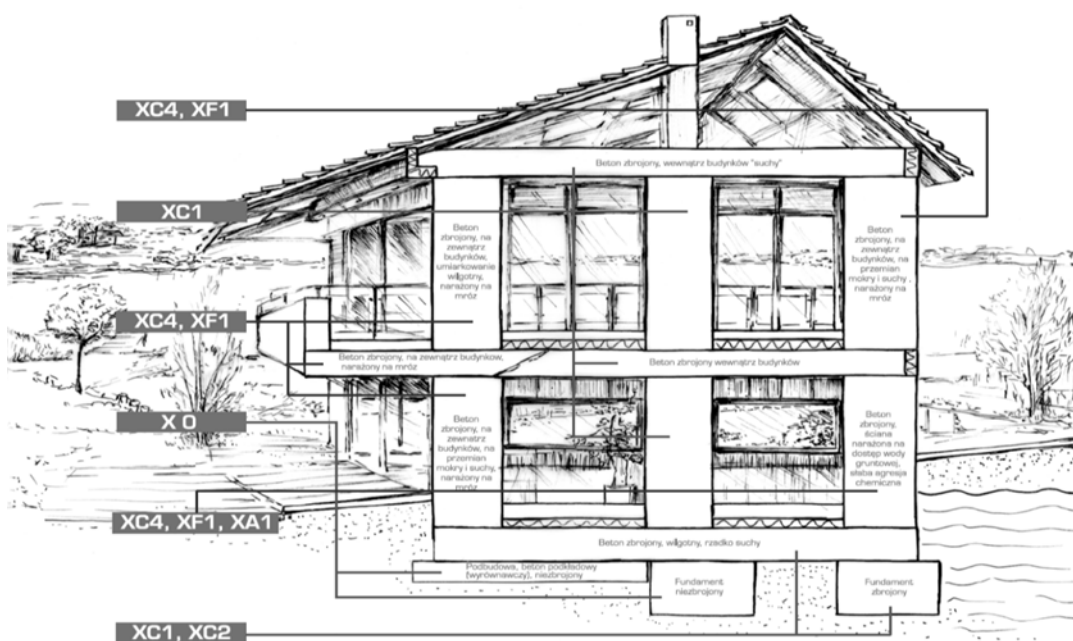
Kategoria projektowanego okresu użytkowania	Rodzaj konstrukcji	Przewidywany okres użytkowania w latach
1	Konstrukcje tymczasowe z wyłączeniem konstrukcji przeznaczonych do ponownego wykorzystania	10
2	Wymienialne części konstrukcji (np. belki podsuwnicowe)	10÷25
3	Konstrukcje rolnicze i podobne	15÷30
4	Konstrukcje budynków i inne konstrukcje zwykłe	50
5	Mosty, obiekty monumentalne i inne konstrukcje inżynierskie	100

6.1.1. Klasy ekspozycji

Eurokod 2 [1] przy określaniu rodzaju i intensywności czynników środowiskowych, w których będzie pracowała projektowana konstrukcja, mających wpływ na trwałość, przywołuje normę technologiczną dotyczącą betonu PN-EN 206-1 [4]. Zgodnie z nią oddziaływania środowiskowe powodujące uszkodzenia konstrukcji z betonu sklasyfikowano w sześciu klasach ekspozycji, natomiast uzupełnienie krajowe w postaci normy PN-B-06265 [6] wprowadziło dodatkową klasę siódmą - opisującą agresję wywołaną ścieraniem. W poszczególnych klasach wyróżniono 3 lub 4 poziomy zagrożenia agresją. Stąd w oznaczeniach oprócz literowego symbolu agresywnego oddziaływania występuje cyfra informująca o jego intensywności. Przykłady występowania różnych klas ekspozycji zamieszczono w tab. 6.2. i na rys. 6.1.

W klasie pierwszej (X0) zagrożenie agresją środowiskową lub korozją nie występuje. Klasa druga (XC1-XC4) uwzględnia zjawiska korozji spowodowane karbonatyzacją. **Karbonatyzacja** prowadzi do obniżenia pH, a w rezultacie do korozji zbrojenia i destrukcji

otuliny. Przy wartościach pH ok. 10 stal wykazuje tylko niewielką lub w ogóle żadną aktywność korozyjną, co oznacza, że stal zbrojeniowa w betonie o wartości pH ok. 12,5 nie koroduje. Przyczyną tak wysokiej wartości pH jest rozpuszczalny w cieczy znajdującej się w porach betonu wodorotlenek wapniowy ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) powstały w wyniku reakcji tlenku wapnia zawartego w cemencie i wody. $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$, w wodzie $\text{Ca}^{2+} 2\text{OH}^-$.



Rys. 6.1. Wybrane klasy ekspozycji na przykładzie budownictwa mieszkaniowego

W młodym betonie na powierzchni stali zbrojeniowej powstaje warstwa pasywna, którą tworzą tlenki żelaza i wapnia. Warstwa ta stanowi skuteczną przeszkodę dla przechodzenia jonów metali ze stali zbrojeniowej do elektrolitu, a tym samym zapobiega korozji. Pasywacji podlega nie tylko czysta powierzchnia, ale też pokryta niewielkim nalotem korozyjnym. Dzięki temu stosowanie zbrojenia pokrytego nalotem nie obniża jego trwałości. Proces karbonatyzacji betonu następuje w wyniku przemiany wodorotlenku wapniowego wchodzącego w reakcję z kwasem węglowym (H_2CO_3) w węglan wapniowy (CaCO_3). Kwas węglowy powstaje przy udziale dwutlenku węgla z powietrza i wody zawartej w porach betonu. $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$ (w wodzie $\text{CO}_3^{2-} 2\text{H}^+$). Znajdujący się w kamieniu cementowym lub uwodniony wodorotlenek wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz pozostały tlenek wapnia CaO reagują w obecności wody (w wyniku reakcji jonowej) w węglan wapniowy CaCO_3 . $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$. Wraz z postępującym procesem rozpuszczania i wymywania (ługowania) wodorotlenku wapniowego obniża się zasadowość warstwy powierzchniowej betonu, a gdy spadnie poniżej 10 dochodzi do utraty właściwości ochronnych wobec

zbrojenia. Proces karbonatyzacji postępuje najszybciej w warunkach naprzemiennie mokrych i suchych w obecności agresywnego dwutlenku węgla CO_2 .

W klasie trzeciej (XD1-XD3) mieszczą się zjawiska wywołane chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej. Przenikające do wnętrza elementu jony chlorkowe Cl^- uszkadzają warstwę pasywną na powierzchni zbrojenia zatopionego w betonie, przez co umożliwiają przebieg procesu korozyjnego. Chlorki występują w wielu gałęziach przemysłu, jak również są stosowane do usuwania oblodzenia jezdni. Do chlorków niebezpiecznych w stosunku do betonu zaliczane są sole słabych zasad, ponieważ ulegają hydrolizie i tworzą z wolnym wapniem łatwo rozpuszczalny chlorek wapniowy. Do tej grupy związków zaliczamy: chlorek amonowy NH_4Cl występujący w fabrykach sody, nawozów sztucznych i materiałów wybuchowych; chlorek cynkowy ZnCl_2 używany do impregnacji drewna, produkcji farb oraz farbiarniach; chlorki glinowe AlCl_3 i magnezowe MgCl_2 występujące w wodzie morskiej oraz jako produkty odpadowe w przemyśle potasowym; chlorek żelazowy występujący w farbiarniach. Natomiast chlorki: barowy BaCl_2 , strontowy SrCl_2 , sodowy bez domieszek NaCl oraz słabe roztwory chlorku rtęciowego HgCl_2 i wapniowego CaCl_2 są w stosunku do betonu na ogół nieszkodliwe. Wszystkie związki chloru zarówno bezpieczne jak i niebezpieczne w stosunku do betonu mogą powodować korozję stali. Wykonanie betonu całkowicie wolnego od chlorków jest praktycznie niemożliwe, gdyż ich ślady występują we wszystkich składnikach betonu, tj. w cemencie, kruszywie, wodzie i domieszkach.

Tabela 6.2. Klasy ekspozycji według PN-EN 206-1 i PN-B-06265 [4,6]

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
1. Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją		
X0	Dotyczy betonów niezbrojonych i niezawierających innych elementów metalowych: wszystkie środowiska z wyjątkiem przypadków występowania zamrażania/rozmrażania, ścierania lub agresji chemicznej Dotyczy betonów zbrojonych lub zawierających inne elementy metalowe: bardzo suche	Beton wewnątrz budynków o bardzo niskiej wilgotności powietrza

2. Korozja spowodowana karbonatyzacją		
XC1	Suche lub stale mokre	Beton wewnątrz budynków o niskiej wilgotności powietrza Beton stale zanurzony w wodzie
XC2	Mokre, sporadycznie suche	Powierzchnie betonu narażone na długotrwały kontakt z wodą. Najczęściej fundamenty
XC3	Umiarkowanie wilgotne	Beton wewnątrz budynków o umiarkowanej lub wysokiej wilgotności powietrza, beton na zewnątrz osłonięty przed deszczem
XC4	Cyklicznie mokre i suche	Powierzchnie betonu narażone na kontakt z wodą, ale nie jak w klasie ekspozycji XC2
3. Korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej		
XD1	Umiarkowanie wilgotne	Powierzchnie betonu narażone na działanie chlorków z powietrza
XD2	Mokre, sporadycznie suche	Baseny, beton narażony na działanie wody przemysłowej zawierającej chlorki
XD3	Cyklicznie mokre i suche	Elementy mostów narażone na działanie rozpylonych cieczy zawierających chlorki Nawierzchnie dróg, płyt parkingów
4. Korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej		
XS1	Narażenie na działanie soli zawartych w powietrzu, ale nie na bezpośredni kontakt z wodą morską	Konstrukcje zlokalizowane na wybrzeżu lub jego pobliżu
XS2	Stałe zanurzenie	Elementy budowli morskich
XS3	Strefy pływów, rozbryzgów i aerozoli	Elementy budowli morskich
5. Agresywne oddziaływanie zamrażanie/rozmarzanie bez środków odładowych lub ze środkami odładowymi		
XF1	Umiarkowanie nasycone wodą bez środków odładowych	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowanie nasycone wodą ze środkami odładowymi	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażone na zamarzanie i działanie środków odładowych z powietrza
XF3	Silnie nasycone wodą bez środków odładowych	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF4	Silnie nasycone wodą ze środkami odładowymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odładowych Powierzchnie betonowe narażone na działanie aerozoli zawierających środki odładowe i zamarzanie

		Strefy rozbryzgu w budowlach morskich narażonych na zamarzanie
6. Agresja chemiczna		
XA1	Środowisko chemiczne mało agresywne	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową
XA2	Środowisko chemiczne średnio agresywne	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową
XA3	Środowisko chemiczne silnie agresywne	Beton narażony na kontakt z gruntem i wodą gruntową
7. Agresja wywołana ścieraniem		
XM1	Umiarkowane zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pneumatycznym
XM2	Silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pełnym oraz wózki podnośnikowe z ogumieniem elastomerowym lub na rolkach stalowych
XM3	Ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie często najeżdżane przez pojazdy gaśnicowe Filary mostów Powierzchnie przelewów Ściany spustów i sztolni hydrotechnicznych

Klasa czwarta (XS1-XS3) obejmuje zjawiska korozji betonu spowodowane przez chlorki z wody morskiej. Budowle usytuowane w terenach nadmorskich narażone są na działanie wody morskiej oraz aerozoli i pyłów zawierających sole typu chlorek wapnia CaCl_2 , chlorek sodu NaCl i chlorek magnezu MgCl_2 . Chlorki te jako silne elektrolity mogą reagować z pasywną warstwą wodorotlenku żelazowego, zamieniając go na chlorek żelazowy, który już nie chroni stali przed rdzewieniem. **Rdza ma od 2 do 3 razy większą objętość niż stal, z której powstała.** Produkty korozji powodują wystąpienie naprężeń rozciągających w betonie, czego następstwem jest odpadanie otuliny zbrojenia. Penetracja chlorków w strukturę betonu i ich szkodliwe oddziaływanie nasila się w środowisku cyklicznie mokrym i suchym, podobnie jak w przypadku karbonatyzacji.

Klasa piąta (XF1-XF4) to agresywne oddziaływanie zamarzania i rozmrażania bez środków odladzających lub z ich użyciem. Zamarzająca woda w porach betonu zwiększając swoją objętość powoduje naprężenia, które przyczyniają się do spękań. Ilość uszkodzeń zwiększa się w przypadku cyklicznego zamarzania i rozmrażania betonu, co w konsekwencji prowadzi do całkowitego zniszczenia materiału [9]. Zagrożenie agresją mrozową jest potęgowane środkami odladzającymi i wzrostem nasycenia wodą. Przy działaniu soli na beton występuje wymiana jonów w spoiwie cementowym. W wyniku reakcji powstają sole

łatwo rozpuszczalne w wodzie lub krystalizujące ze zwiększeniem objętości. Najbardziej niebezpieczne są sole chlorkowe (chlorki), gdyż powstający chlorek wapnia powoduje niszczenie warstewek pasywnych chroniących zbrojenie przed korozją.

Tabela 6.3. Wartości graniczne dotyczących agresji chemicznej wg PN-EN 206 [4]

Charakterystyka chemiczna	Powołana metoda badania	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ , mg/l	EN 196-2	≥ 200 i ≤ 600	>600 i ≤ 3000	> 3000 i ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 i ≥ 5,5	>5,5 i ≥ 4,5	< 4,5 i ≥ 4,0
CO ₂ agresywny, mg/l	EN 13577	≥ 15 i ≤ 40	> 40 i ≤ 100	> 100 i do nasycenia
NH ₄ ⁺ , mg/l	ISO 7150	≥ 15 i ≤ 30	>30 i ≤ 60	> 60 i ≤ 100
Mg ²⁺ , mg/l	ISO 7980	≥ 300 i ≤ 1000	>1000 i ≤ 3000	> 3000 i do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ , mg/kg	EN 196-2	≥ 2000 i ≤ 3000	> 3000 i ≤ 12000	> 12000 i ≤ 24000
Kwasowość, ml/kg	DIN 4030-2	>200 Baumann Gully	nie spotykane w praktyce	

W klasie szóstej (XA1-XA3) mamy do czynienia z agresją chemiczną dotyczącą gruntów naturalnych i wody gruntowej o temperaturze między +5°C i +25°C, przy nieznaczej prędkości jej przepływu, umożliwiającą uznanie warunków za statyczne. Klasę ekspozycji określa najbardziej niekorzystna wartość dla dowolnej pojedynczej charakterystyki chemicznej zamieszczonej w tab. 6.3. W przypadku gdy dwie lub więcej wartości wskazują tę samą klasę, środowisko należy zakwalifikować do następnej wyższej klasy.

Chemiczne procesy niszczące należą do jednej z trzech zasadniczych grup. Pierwsza grupa obejmuje rozpuszczanie i wylugowanie wodorotlenku wapniowego z betonu, np. w skutek działania wody miękkiej. Do drugiej grupy należą zjawiska podczas których zachodzi wymiana jonów Ca²⁺ w spoiwie na inne jony. W wyniku reakcji wymiany tworzą się związki niewykazujące właściwości wiążących lub ulegające łatwemu wymyciu. W skład tej grupy wchodzi: korozja kwasowa powodowana przez wodne roztwory mocnych kwasów mineralnych oraz kwasy organiczne; korozja węglanowa wywołana działaniem wód zawierających znaczne ilości wolnego CO₂; korozja magnezowa zachodząca w środowisku zawierającym jony Mg²⁺; korozja amonowa pod wpływem obecności w

środowisku jonów NH_4^+ oraz korozja zasadowa powodowana reakcją składników betonu z silnym zasadowym środowiskiem zewnętrznym. Do trzeciej grupy zaliczane są procesy podczas których powstają krystaliczne, trudno rozpuszczalne sole. Sole krystalizując, powiększają swoją objętość, co w początkowym okresie może uszczelniać beton i zwiększać jego wytrzymałość, ale w miarę upływu czasu prowadzi do powstania naprężeń rozciągających, które powodują niszczenie ścianek porów i zmniejszenie wytrzymałości betonu. Typowym przykładem jest korozja siarczanowa, powodowana często przez wody gruntowe i poprodukcyjne [10].

Klasie siódma (XM1-XM3) to agresja wywołaną ścieraniem. Występuje ona w przypadku filarów mostowych oraz posadzek i nawierzchni eksploatowanych przez pojazdy. Intensywność tego rodzaju zagrożenia zależy od sposobu przekazywania obciążeń wywołujących tarcie, np. poprzez koła na ogumieniu pneumatycznym, pełnym, rolkach stalowych i gąsienicach.

6.1.2. Klasy wykonania

Norma PN-EN 13670 [5] wprowadza 3 klasy wykonania w celu uregulowania sposobów zarządzania jakością przy realizacji konstrukcji z betonu. Wymagana dokładność wzrasta od klasy 1 do klasy 3. Klasa wykonania określa poziom jakości w zależności od 3 czynników, tj. ryzyka zniszczenia konstrukcji lub jej elementu (konsekwencja), charakteru obciążeń (użytkowanie) oraz technologii użytych w procesie realizacji. Klasa wykonania 1 może być stosowana jedynie w odniesieniu do konstrukcji, gdzie konsekwencje awarii są małe lub pomijalne. Obejmuje budynki o niskim ryzyku dla ludzkiego życia, nieznacznym ryzyku finansowym i dla środowiska, np. bardzo prosty budynek magazynowy lub gospodarczy w którym rzadko przebywają ludzie. Kontrola w pierwszej klasie wykonawstwa ogranicza się samokontroli ekipy wykonawczej i jest przeprowadzana po wykonaniu prac. Większość budynków można zaliczyć do drugiej klasy wykonania, co oznacza średnie ryzyko. Dokładność wykonania i kontroli w 2 klasie spełniają założenia projektowe normy PN-EN 1992 [1] w tym wymagany poziom bezpieczeństwa odniesiony do współczynników materiałowych. Stąd, jeżeli w projekcie nie jest sprecyzowany poziom wykonawstwa należy przyjąć 2 klasę wykonania, dla której powinno się uwzględniać systematyczną kontrolę wewnętrzną wszystkich elementów konstrukcyjnych. Kontrola ta powinna obejmować poszczególne etapy prac tj. np. roboty zbrojeniowe i betonowe w zakresie zależnym od znaczenia danego elementu dla nośności i trwałości. Natomiast budynki o wysokim ryzyku są zaliczane do 3 klasy wykonania. Są to np. hale sportowe, obiekty inżynierskie (np. mosty),

budynki wystawiennicze, które mogą pomieścić ponad 5000 osób lub budynki zawierające niebezpieczne substancje (np. elektrownie jądrowe). W tej klasie wykonania mamy do czynienia, oprócz samokontroli i kontroli wewnętrznej przeprowadzanej przez wykonawcę, z kontrolą rozszerzoną, którą należy przeprowadzać stosownie do krajowych przepisów i specyfikacji wykonawczej. Powinna ona uwzględniać wszystkie czynności mające znaczenie dla nośności i trwałości konstrukcji, tj.: deskowanie zbrojenie, oczyszczenie przed betonowaniem, betonowanie, pielęgnację. Rozszerzona kontrola, jako kontrola niezależna może być przeprowadzona przez inną firmę. Zakres tej kontroli powinien być przynajmniej taki jak w przypadku systematycznej kontroli wewnętrznej w 2 klasie wykonania.

6.1.3. Klasy pielęgnacji

Norma PN-EN 13670 [5] wyróżnia 4 klasy pielęgnacji definiowane czasem pielęgnacji lub procentem wymaganej wytrzymałości (tab. 6.4.).

Klasa pielęgnacji jest ustalana przez projektanta. Klasa pierwsza dotyczy konstrukcji, które w okresie dojrzewania nie są obciążane i będą pracowały w środowisku wcale lub mało agresywnym (X0, XC1). Klasa druga i trzecia dotyczy konstrukcji nieznacznie obciążanych, a zróżnicowanie zależy od ich ekspozycji. Natomiast klasa czwarta najbardziej rygorystyczna dotyczy konstrukcji znacznie obciążanych w trakcie dojrzewania betonu niezależnie od warunków w których będą pracować.

Tabela 6.4. Klasy pielęgnacji betonu według PN-EN 13670:2011

Klasa pielęgnacji	Cecha kryterialna	Wartość kryterium
Klasa 1	Czas trwania pielęgnacji w godzinach, przy założeniu, że czas wiązania nie przekracza 5 godzin, a temp. powierzchni betonu nie spada poniżej +5 °C	12 godzin
Klasa 2	Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	35%
Klasa 3		50%
Klasa 4		70%

Im wyższa klasa tym dłuższy okres pielęgnacji. Dla klas pielęgnacji od 2 do 4 norma PN-EN 13670 [5] podaje minimalne okresy pielęgnacji wyrażone w dniach w zależności od przyrostu wytrzymałości i temperatury powierzchni betonu. Wynoszą one odpowiednio: od 1 do 11 dni dla 2 klasy pielęgnacji, od 1,5 do 18 dni dla 3 klasy i od 3 do 30 dni dla 4 klasy pielęgnacji. Norma PN-EN 13670 [5] uzasadnia konieczność pielęgnacji i ochrony betonu

we wczesnym okresie dojrzewania wyszczególniając cele zorientowane na trwałość konstrukcji. Zabiegi pielęgnacyjne pozwalają zminimalizować skurcz plastyczny oraz chronią przed zamarzaniem, szkodliwymi warunkami atmosferycznymi. Ponadto przyczyniają się do zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości powierzchniowej i mają zdecydowany wpływ na trwałość konstrukcji w środowisku agresywnym. Świeży beton wymaga ochrony przed szkodliwymi drganiami, uderzeniami lub uszkodzeniami. Aspekt pielęgnacji powinien być uwzględniony w specyfikacji technicznej w odniesieniu do wymogów stawianych wykonywanej konstrukcji. Uwzględniając rodzaj konstrukcji, skład betonu i warunki atmosferyczne należy określić metody pielęgnacji oraz czas ich trwania. Przyjęty sposób pielęgnacji powinien zapewnić niskie tempo odparowywania wody z powierzchni betonu lub utrzymywać powierzchnię cały czas w stanie wilgotnym. Spełnienie tego wymagania jest możliwe przez pozostawienie betonu w deskowaniu lub pokrycie powierzchni folią PE albo preparatami błotwórczymi. Inne metody polegają na zraszaniu betonu we wczesnej fazie, a następnie polewanie i zatrzymanie wody przy użyciu włókien. Dopuszczalne jest też zalewanie całej powierzchni wodą i stałe utrzymywanie warstwy wody. W czasie dojrzewania temperatura powierzchni betonu nie powinna spadać poniżej 0°C dopóki powierzchnia betonu nie osiągnie wytrzymałości na ściskanie przynajmniej 5MPa. Równie istotna jest, aby najwyższa temperatura wewnątrz elementu nie przekraczała 70°C. Natomiast czas trwania pielęgnacji zależy od tempa przyrostu wytrzymałości na ściskanie, temperatury powierzchni betonu i klasy pielęgnacji. Rozwój wytrzymałości na ściskanie jest określany jako stosunek wytrzymałości dwudniowej $f_{cm,2}$ do wytrzymałości 28-dniowej $f_{cm,28}$ ustalany na etapie badań wstępnych w warunkach laboratoryjnych przy temperaturze 20°C. Zgodnie z normą PN-EN 206 [4] może być on szybki, umiarkowany, wolny lub bardzo wolny (tab. 6.5.).

Tabela 6.5. Rozwój wytrzymałości betonu w temperaturze +20 °C wg PN-EN 206

Rozwój wytrzymałości	Ocena współczynnika
	średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 2 dniach/ średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach/ $f_{cm,2}/f_{cm,28}$
szybki	$\geq 0,5$
umiarkowany	$\geq 0,3$ do $< 0,5$
wolny	$\geq 0,15$ do $< 0,3$
bardzo wolny	$< 0,15$

6.1.4. Normowe sposoby zapewnienia trwałości

Zgodnie z Eurokodem 2 [1] oprócz czynników związanych z technologią betonu na trwałość konstrukcji żelbetowej ma wpływ grubość otulenia prętów zbrojeniowych i szerokość rozwarcia rys. Stąd też norma podaje minimalne grubości otulenia w zależności od klas ekspozycji (X) oraz **sześciu klas konstrukcji S1-S6**, przy czym projektowany 50 letni okres użytkowania odpowiada klasie konstrukcji S4. W przypadku projektowania dłuższego czasu eksploatacji według Eurokodu 2 [1] należy zwiększyć klasę konstrukcji i przyjąć odpowiednio większe minimalne grubości otulenia, bez konieczności zmiany minimalnej klasy betonu.

Tabela 6.6. Minimalna grubość otulenia stali zbrojeniowej wg Eurokodu 2 [1]

Wymagane otulenie ze względu na środowisko $c_{\min, \text{dur}}$ [mm]							
Klasy konstrukcji	Klasy ekspozycji						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Minimalna grubość otulenia ze względu na trwałość stali zbrojeniowej zamieszczono w tab. 6.6. Dla podstawowej klasy konstrukcji S4 grubość otuliny zbrojenia wynosi od 10 mm w klasie X0 do 55mm w środowisku, w którym zachodzi korozja wywołana chlorkami (XD3 i XS3).

Zarysowanie należy ograniczać do poziomu, który nie pogarsza stosowanego rozwiązania lub trwałości konstrukcji i nie powoduje, że wygląd konstrukcji nie nadaje się do akceptacji. Dla klas ekspozycji X0, XC1, szerokości rys nie wpływają na trwałość i ograniczenia są ustalone do zagwarantowania akceptowanego wyglądu. W przypadku braku takich warunków ograniczenia te można złagodzić. Dla klas ekspozycji XC2-XC4, XS1-XS3, XD1-XD2 zaleca się dodatkowo sprawdzenie dekompresji przy quasi-stałej kombinacji obciążeń. W przypadku elementów narażonych na działanie środowiska klasy XD3 może być konieczne podjęcie specjalnych kroków. Wybór odpowiednich kroków będzie zależał od właściwości mogących wystąpić agresywnych czynników. **Maksymalne rozwarcie rys** zamieszczono w tab. 6.7.

Tabela 6.7. Dopuszczalne rozwarście rys wg Eurokodu 2 [1]

	Rozwarście rys $w_{\max}$ [mm]	
Klasa ekspozycji	Elementy zbrojone i sprężone z ciągnami bez przyczepności	Elementy sprężone z ciągnami z przyczepnością
	Prawie stała kombinacja obciążeń	Częsta kombinacja obciążeń
X0, XC1	0,4	0,2
XC2 XC3 XC4	0,3	0,2
XD1 XD2 XS1 XS2 XS3		Dekompresja

W normie PN-EN 206, w zależności od przyjętych klas ekspozycji, zdefiniowane są parametry, jakie musi spełniać beton, w celu zapewnienia trwałości przez okres co najmniej 50 lat. Zalecane wartości graniczne składu oraz właściwości betonu, gwarantujące wymaganą trwałość betonu w poszczególnych klasach ekspozycji podane są w tab. 6.8. Dotyczą one **maksymalnego wskaźnika w/c, minimalnej zawartości cementu, minimalnej wytrzymałości na ściskanie oraz dla niektórych klas środowiskowych minimalnego napowietrzenia i wymagań odnośnie materiałów.**

Tabela 6.8. Zalecane wartości graniczne składu oraz właściwości betonu wg PN-EN 206 [4]

		Klasa ekspozycji	Max w/c	Min. klasa wytrzymałości	Min. zawartość cementu (kg/m ³)	Min. zawartość CEM I 32,5 i CEM II/A 32,5	Min. zawartość CEM I 42,5 i CEM II/A 42,5	Min. zawartość napowietrzenia (%)	Inne wymagania
Brak zagrożenia agresją środowiska		X0	-	C12/15	-	-	-	-	
Agresywne oddziaływanie środowiskowe na konstrukcje z	Agresja wywołana ścieraniem	XM3	0,45	C35/45	320	300	280	-	Kruszywo odporne na ścieranie
		XM2	0,55	C30/37	300	280	260	-	Pielęgnacja powierzchni
		XM1	0,55	C30/37	300	280	260	-	
	Środowisko chemiczne	XA3	0,45	C35/45	360	330	300	-	Cement odporny na siarczany
		XA2	0,50	C30/37	320	300	270	-	

		XA1	0,55	C30/37	300	280	260	-	
	Zamrażanie/ rozmrażanie	XF4	0,45	C30/37	340	Dopuszcza się stosowanie dodatków typu II do produkcji betonu, lecz nie jako ekwiwalent zawartości cementu bez możliwości uwzględniania tego dodatku przy określaniu w/c		4,0	Kruszywo zgodne z PN-EN 12620 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/ rozmrażanie
		XF3	0,50	C30/37	320			4,0	
		XF2	0,55	C25/30	300			4,0	
		XF1	0,55	C30/37	300	280	270	-	
	Chlorki nie pochodzące z wody	XD3	0,45	C35/45	320	300	270	-	
		XD2	0,55	C30/37	300	280	270	-	
		XD1	0,55	C30/37	300	280	270	-	
	Woda morską	XS3	0,45	C35/45	340	310	280	-	
		XS2	0,45	C35/45	320	300	270	-	
		XS1	0,50	C30/37	300	280	270	-	
	Korozja spowodowana karbonatyzacją	XC4	0,50	C30/37	300	280	270	-	
		XC3	0,55	C30/37	280	260	250	-	
		XC2	0,60	C25/30	280	260	250	-	
		XC1	0,65	C20/25	260	250	240	-	

Od odpowiedniego doboru składników w ramach zbioru określonego normą dokonuje się stosownie do zagrożenia. W przypadku zagrożenia korozją mrozową (XF) wymagane jest stosowanie kruszywa o odpowiedniej mrozoodporności zgodnie z normą PN-EN 12620 [18], a także napowietrzenia mieszanki betonowej min. 4%. Ponadto, w przypadku zagrożenia korozją mrozową ze środkami odladzającymi np. jezdnie dróg i mostów (klasa ekspozycji XF4), wymagana jest minimalna klasa betonu C30/37, maksymalny współczynnik w/c $\leq 0,45$ oraz minimalna zawartość cementu 340 kg/m³.

W sytuacji, gdy obecność siarczanów w środowisku wskazuje na klasy ekspozycji XA2 lub XA3 należy zastosować cement odporny na siarczany, zgodny z normą europejską PN-EN 197-1 [11] lub przepisami krajowymi PN-B 19707 [12]. W warunkach eksploatacji powierzchni przez wózki na rolkach stalowych lub pojazdy gaśnicowe dla klasy ekspozycji XM2 i XM3 zaleca się stosowanie dodatku ziarnistych opiłków stalowych lub

granulowanego śrutu żeliwnego. Norma PN-EN 206 [4] ogranicza również całkowitą zawartość jonów chlorkowych w betonie w odniesieniu do masy cementu. Betony niezbrojone mogą zawierać Cl^- w ilości do 1% jonów chlorkowych w stosunku do masy cementu. Natomiast elementom ze zbrojeniem przyporządkowane zostały cztery klasy zawartości chlorków. W przypadku zbrojenia zwykłego dopuszczalne wartości wynoszą odpowiednio 0,2 i 0,4 %, a w przypadku zbrojenia sprężającego są dwukrotnie mniejsze, tj. 0,1 i 0,2 % w stosunku do masy cementu. Klasy zawartości chlorków zamieszczono w tab. 6.9.

Tabela 6.9. Klasy zawartości chlorków w betonie wg PN-EN 206

Zastosowanie betonu	Klasa zawartości chlorków	Maksymalna zawartość Cl^- odniesiona do masy cementu
Niezbrojony	Cl 1,00	1%
Ze zbrojeniem stalowym	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
Ze zbrojeniem sprężającym	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%

Elementy budowlane z betonu mogą być eksploatowane w warunkach oddziaływania kilku środowisk jednocześnie, w związku z tym dla jednego elementu może być przyporządkowanych kilka klas ekspozycji. W takiej sytuacji norma [4] nie podaje dodatkowych wymogów. Jednak z uwagi na możliwość współdziałania różnych oddziaływań bezpiecznym jest przyjęcie rozwiązania materiałowego jak dla klasy o stopień wyższej od najostrzejszej spośród wymaganych [8]. Dla właściwie dobranych jakościowo składników betonu dostosowanych do danej klasy ekspozycji wyróżnia się trzy sposoby sterowania trwałością na etapie receptury, tj.: przez zmianę współczynnika w/c , przez zmianę minimalnej zawartości cementu, $C_{\min}$ i przez właściwy dobór klasy wytrzymałości. Zmniejszenie w/c powoduje poprawę szczelności, a w konsekwencji podnosi mrozoodporność (XF). Zwiększenie minimalnej zawartości cementu, $C_{\min}$ wpływa na poprawę odporności chemicznej szczególnie istotną przy zagrożeniu karbonatyzacją (XC), chlorkami (XD, XS), a także związkami chemicznymi zawartymi w gruncie i wodzie gruntowej (XA).

Zgodnie z założeniami normy PN-EN 206 można oczekiwać, że beton wykonany według wymagań podanych w tablicy 8 będzie trwały w środowisku do jakiego został

zaprojektowany, pod warunkiem właściwego ułożenia, zagęszczenia i pielęgnacji oraz zapewnienia otulenia zbrojenia. Dodatkowo konstrukcja powinna być zaprojektowana zgodnie z wymaganiami dla rzeczywistych warunków środowiskowych i eksploatowana w warunkach dla jakich została zaprojektowana, z przestrzeganiem właściwej konserwacji [9].

6.1.5. Dobór składników

Norma PN-EN 206 wprowadza ogólne zasady dotyczące stosowania poszczególnych rodzajów składników objętych normami europejskimi, jednak pozostawia także możliwość zastosowania składników, których nie uwzględniono w normach europejskich. Składniki nieujęte w normach europejskich mogą być stosowane w oparciu o przepisy krajowe, obowiązujące w miejscu stosowania betonu. Według ogólnej zasady przy doborze składników należy uwzględniać: technologię i sposób wykonanie, transport, technologię zabudowy, sposób zagęszczania, ułożenie zbrojenia i pielęgnację. Natomiast wymagania szczegółowe zostały zredagowane dla każdego składnika z osobna.

6.1.5.1. Cement

Przy specyfikowaniu receptury na beton zgodnie z normą PN-EN 206:2014 [4] należy dobierać rodzaj spoiwa spośród cementów o określonej przydatności, biorąc pod uwagę: realizację robót, przeznaczenie betonu, warunki pielęgnacji, wymiary konstrukcji, klasę ekspozycji i potencjalną reaktywność kruszywa z alkalią zawartymi w składnikach. Dobór cementu powinien uwzględniać warunki wykonania betonu takie jak: temperaturę otoczenia, szybkość rozformowania elementów i czas transportu mieszanki betonowej, a także wymagane właściwości betonu, tj. klasę wytrzymałości, klasę ekspozycji, cechy betonu i stosowane dodatki, np. pigmenty. Ogólną przydatność cementu ustala się zgodnie z PN-EN 197-1:2012 [11]. W normie tej sklasyfikowano 27 cementów powszechnego użytku z podziałem na pięć głównych grup w zależności od składu. Są to: cement portlandzki (CEM I), cement portlandzki z dodatkami (CEM II), cement hutniczy (CEM III), cement pucolanowy (CEM IV) i cement wieloskładnikowy (CEM V). Ponadto wyodrębniono 7 cementów **odpornych na działanie środowisk agresywnych (SR)**, 3 cementy hutnicze o niskiej wytrzymałości wczesnej (L) i 2 cementy hutnicze o niskiej wytrzymałości wczesnej odporne na siarczany (L, SR). Dodatkowo określone zostały wymagania dotyczące cementów o niskim cieple hydratacji (LH).

Wśród cementów odpornych na siarczany (SR) wyróżniono 3 podstawowe grupy (tab. 6.10).

Tabela 6.10. Cementy powszechnego użytku odporne na siarczany wg PN-EN 197-1

Rodzaj cementu odpornego na siarczany		Udział w % masy				
		Składniki główne				Składniki drugorzędne
		Klinkier	Granulowany żużel wielkopiecowy	Pucolana naturalna	Popiół lotny krzemionkowy	
		K	S	P	V	
CEM I	CEM I-SR 0	95-100	-	-	-	0-5
	CEM I-SR 3					0-5
	CEM I-SR 5					0-5
CEM III	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	0-5
	CEM III/C-SR	5-19	81-95	-	-	0-5
CEM IV	CEM IV/A-SR	65-79	-	21-35		0-5
	CEM IV/B-SR	45-64	-	36-55		0-5

Grupę pierwszą stanowią cementy portlandzkie odporne na siarczany, oznaczane symbolami w zależności od zawartości w klinkierze glinianu trójwapniowego: CEM I-SR 0 przy zerowej zawartości C_3A , CEM I-SR 3 – z zawartością $C_3A \leq 3\%$ oraz CEM I-SR 5 – z zawartością $C_3A \leq 5\%$. Grupa druga to cementy hutnicze odporne na siarczany CEM III/B-SR i CEM III/C-SR. W tym wypadku norma nie ogranicza zawartości C_3A w klinkierze. Siarczano odpornymi są również cementy hutnicze CEM III/B i CEM III/C o niskiej wytrzymałości wczesnej (L). Do grupy 3 zostały zaliczone cementy pucolanowe odporne na siarczany CEM IV/A-SR i CEM IV/B-SR z zawartością C_3A w klinkierze $\leq 9\%$. Wg wymagań normy PN-EN 206-1 cementy odporne na korozję siarczanową SR są zalecane w klasie ekspozycji XA2 i XA3.

PN-EN 197-1 [11] rozróżnia trzy klasy wytrzymałości normowej: 32,5; 42,5; 52,5. Odpowiadają one wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach wyrażonej w MPa. Natomiast wytrzymałość wczesna oznaczana jest po 2 lub 7 dniach, zgodnie z PN-EN 196-1 [13]. Dla każdej klasy wytrzymałości normowej przyporządkowane są trzy klasy wytrzymałości

wczesnej oznaczone literami: N – normalna, R- wysoka i L – niska (tab. 6.11.). Klasa L odnosi się tylko do cementów hutniczych CEM III.

Tabela 6.11. Wymagania mechaniczne i fizyczne cementów powszechnego użytku wg PN EN 197-1

Klasa wytrzymał ości	Wytrzymałość na ściskanie, MPa		Początek czasu wiązania, min	Stalość objętości (rozszerzal- ność) mm		
	Wytrzymałość wczesna				Wytrzymałość normowa	
	2 dniami	7 dniami			po 28 dniach	
32,5 L	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≥ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				

Cementy powszechnego użytku od CEM I do CEM V o niskim cieple hydratacji oznaczane są symbolem LH. W takim przypadku ciepło hydratacji nie może przekroczyć wartości 270 J/g oznaczanej po 41 godzinach wg PN-EN 196-9 [15] lub po 7 dniach oznaczanej wg PN-EN 196-8 [14]. Cementy o niskim cieple hydratacji LH umożliwiają projektowanie i wykonywanie konstrukcji masywnych i wielkogabarytowych o małej egzotermii twardnienia bez obawy powstania naprężeń termicznych wywołujących spękania i destrukcję betonu [17].

Natomiast w znowelizowanej normie krajowej PN-B-19707:2013 [12] uwzględniono szereg nowych cementów specjalnych siarczano odpornych HSR z grupy cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A, B, hutniczych CEM III/A i wieloskładnikowych CEM V/A, B (tab. 6.12.). oraz określono wymagania dotyczące cementu specjalnego o niskiej zawartości alkaliów NA (tab. 6.13.).

Tabela 6.12. Wymagania dotyczące cementu specjalnego odpornego na siarczany HSR wg PN-B 19707:2013

Rodzaj cementu HSR	Wymagania		
	Udział składnika nie klinkierowego [%]	Odporność na siarczany	Klinkier
CEM II/A-V CEM II/A-S CEM II/A-M (S-V) CEM II/B-S	Brak wymagań	wartość ekspansji w roztworze Na_2SO_4 po 52 tygodniach $X_t \leq 0,5\%$ metoda badania wg załącznika A do normy PN-B 19707:2013	$C_3A \leq 5\%$
CEM II/B-V	Popiół lotny krzemionkowy $\geq 25\%$		-
CEM II/B-M (S-V)	Popiół lotny krzemionkowy $V \geq 20\%$		-
CEM III/A	Granulowany żużel wielkopiecowy $S \leq 49\%$		$C_3A \leq 9\%$
CEM III/A	Granulowany żużel wielkopiecowy $S \geq 50\%$		-
CEM V/A (S-V) CEM V/B (S-V)	PN-EN 197-1		-

Do celów porównawczych w tab. 6.13. zamieszczono dodatkową kolumnę z zawartością alkaliów czynnych w poszczególnych cementach oznaczonych wg. ASTM C 114-04 [16]. Z przeprowadzonych badań wynika, iż cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/A-M (S-V) produkowane na bazie klinkieru specjalnego, zawierającego poniżej 5% C_3A i poniżej 0,6% Na_2O_{eq} oraz cementy wieloskładnikowe CEM V/A (S-V) i CEM V/B (S-V) wyprodukowane na bazie zwykłego klinkieru portlandzkiego OPC spełniają wymagania aktualnej normy krajowej [17]. Cementy odporne na siarczany SR i cementy niskoalkaliczne NA umożliwiają projektowanie i wykonywanie konstrukcji trwałych w warunkach agresji siarczanowej i odpornych na oddziaływanie korozji alkalicznej w betonie przy stosowaniu kruszyw reaktywnych.

6.1.5.2. Kruszywo

Kruszywo stanowi ok. 75 % objętości betonu i jego jakość ma bardzo duży wpływ na wytrzymałość i trwałość betonu w konstrukcji. Norma PN-EN 206 [4] dobór kruszywa pozostawia technologom i producentom betonu. Dopuszcza stosowanie kruszyw naturalnych, sztucznych oraz z odzysku i recyklingu. Odzysk polega na wypłukaniu kruszywa z mieszanki betonowej lub na przekruszeniu niewbudowanego betonu, zaś recykling dotyczy materiału zastosowanego w konstrukcji budowlanej.

Tabela 6.13. Wymagania dotyczące cementu specjalnego niskoalkalicznego NA wg PN-B 19707: 2013, oraz zawartość alkaliów czynnych w cementach oznaczonych wg ASTM C 114-04

Rodzaj cementu NA	wymagania		Alkalia aktywne $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [%]
	Udział składnika nie klinkierowego [%]	Całkowita zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [%]	
CEM I CEM II/A-LL	Brak wymagań	$\leq 0,60$	0,30-0,47
CEM II/A-V	Żużel S + popiół V $\geq 14\%$	$\leq 1,20$	0,51
CEM II/A-S		$\leq 0,70$	0,48
CEM II/A-M (S-V)		$\leq 1,20$	0,47
CEM II/B-V	Popiół lotny krzemionkowy V $\geq 25\%$	$\leq 1,50$	0,52
CEM II/B-S	PN-EN 197-1	$\leq 0,80$	0,48
CEM II/B-M (S-V)	Popiół lotny krzemionkowy V $\geq 20\%$	$\leq 1,30$	0,51
CEM III/A	Granulowany żużel wielkopiecowy S $\leq 49\%$	$\leq 0,95$	0,28
	Granulowany żużel wielkopiecowy S $\geq 50\%$	$\leq 1,10$	0,34
CEM III/B-C	PN-EN 197-1	$\leq 2,00$	0,18-0,25
CEM IV/A (V)	Popiół lotny krzemionkowy V $\geq 25\%$	$\leq 1,50$	0,48
CEM IV/B (V)	PN-EN 197-1	$\leq 2,00$	0,36
CEM V/A (S-V)	Żużel S + popiół V $\leq 49\%$	$\leq 1,60$	0,28
	Żużel S + popiół V $\geq 50\%$	$\leq 2,00$	0,16
CEM V/B (S-V)	PN-EN 197-1	$\leq 2,00$	0,16-0,21

Jedynie w klasach ekspozycji XF wymagane jest zastosowania **kruszywa o odpowiedniej mrozoodporności** zgodnie z normą PN-EN 12620 [18]. Załącznik F do wymienionej normy zawiera wskazówki dotyczące oceny mrozoodporności kruszyw. W badaniach petrograficznych przeprowadzonych zgodnie z normą PN-EN 932-3 [19] można wykryć obecność ziaren słabych i o dużej nasiąkliwości podatnych na uszkodzenia przy zamrażaniu i rozmrażaniu. Wrażliwe kruszywa z bardzo zwietrzałych skał oraz pewne konglomeraty i brekcje mogą zawierać np.: łupkę, łupkę mikową, łupkę ilasto-mikową,

krede, margiel, iłołupek, porowaty krzemień lub ziarna scementowane minerałami ilastymi. Gdy nasiąkliwość kruszywa oznaczona wg EN 1097-6 [20] nie przekracza 1%, kruszywo może być uznane za mrozoodporne. Jednakże szereg dobrych kruszyw wykazuje większą wartość nasiąkliwości np. wapienie, piaskowce i dolomity. W takich przypadkach mrozoodporność można ocenić za pomocą oznaczania zamrażania-rozmrażania wg PN-EN 1367-1 [21] lub z użyciem siarczanu magnezu wg. PN-EN 1367-2 [22], gdy kruszywo może być narażone na działanie wody morskiej lub soli odladzających. W badaniach tych określany jest procentowy ubytek masy spowodowany cyklicznym zamrażaniem służący do określania kategorii mrozoodporności. W kruszywach mogą też znajdować się niektóre składniki chemiczne o niekorzystnym wpływie na trwałość betonu, takie jak chlorki, siarczany i reaktywna krzemionka. Badania chemicznych właściwości kruszyw należy przeprowadzać zgodnie norma PN-EN 1744 [23].

Tabela 6.14. Właściwości kruszyw do betonu oraz zakres badań

Właściwości kruszyw				
geometryczne	mechaniczne i fizyczne	cieplne	chemiczne	podstawowe
PN-EN 933	PN-EN 1097	PN-EN 1367	PN-EN 1744	PN-EN 932
- skład ziarnowy - kształt ziaren - zawartość pyłów - wskaźnik piaskowy - zawartość ziaren przekruszonych i muszli, - stan powierzchni	- gęstość - nasiąkliwość - jamistość - ścieralność, - rozdrobnienie - reaktywność - radioaktywność	- mrozoodporność - skurecz - odporność na szok termiczny - zgorzel bazaltowa	- zawartość chlorków, siarki, węglanu wapnia - zawartość siarczanów - zawartość substancji niebezpiecznych - ilość uwalnianych węglowodorów aromatycznych	- opis petrograficzny

Chlorki w kruszywach mogą występować zazwyczaj w postaci soli sodu i potasu w ilościach zależnych od źródła pochodzenia kruszywa. W celu zminimalizowania ryzyka korozji zbrojenia ogranicza się całkowitą zawartość jonów chlorkowych ze wszystkich składników betonu do wartości określonych w PN-EN 206 [4]. Siarczany w kruszywach mogą zwiększać ryzyko pęknięcia betonu. Znaczna część siarczanów jest zamknięta w ziarnach krystalicznego żużla wielkopieczowego i dlatego nie uczestniczy w procesie hydratacji cementu. Niektóre kruszywa mogą reagować z wodorotlenkami znajdującymi się

w porach betonu. W pewnych niesprzyjających warunkach i w obecności wilgoci może to prowadzić do pęcznienia a następnie do pęknięcia lub rozerwania betonu. Najczęściej zdarza się reakcja pomiędzy alkaliowymi związkami pochodzącymi z cementu i reaktywną krzemionką zawartą w kruszywie. Zapobiec temu można używając cement z małą zawartością alkaliów lub stosować mieszaniny niereaktywnego kruszywa, albo ograniczyć stopień nasycenia betonu wodą. Na szybkość hydratacji cementu, a w efekcie na zmianę czasu wiązania i twardnienia betonu mogą niekorzystnie wpływać inne składniki kruszywa. Materiały typu humus i cukier to dwa przykłady substancji wywierających taki właśnie wpływ. Niektóre ilaste minerały wpływają również niekorzystnie na narastanie wytrzymałości i trwałość betonu, do którego zostały wprowadzone. Właściwości kruszyw do betonu oraz normy i zakres badań zamieszczono w tab. 6.14.

W celu prawidłowego zaprojektowania mieszanki betonowej należy dobrać odpowiednie proporcje kruszywa grubego i piasku, tak aby tworzyły w betonie szkielet, który powinien maksymalnie wypełniać objętość, tak aby ilość pustek była możliwie mała. Jednocześnie całkowita powierzchnia szkieletu powinna być jak najmniejsza, aby minimalizować zużycie cementu. Wzorcowe krzywe uziarnienia obejmują kruszywa o uziarnieniu do 8 mm, 16 mm, 31,5 mm oraz do 63 mm. Badanie geometrycznych właściwości kruszyw należy wykonywać zgodnie z normą PN-EN 933 [24]. Stosowane kruszywo powinno być o jak największym wymiarze. Przy doborze krzywej uziarnienia należy uwzględniać ograniczenia wynikające z grubości betonowanego elementu i stosowanego zbrojenia. Maksymalny rozmiar ziaren nie powinien być większy niż $\frac{1}{3}$ najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu i $\frac{3}{4}$ odległości pomiędzy prętami. Ponadto należy pamiętać, że niedobór poszczególnych frakcji prowadzi do pogorszenia urabialności i szczelności betonu. Natomiast zbyt duży udział frakcji drobnych zwiększa zapotrzebowanie na cement. Nawet kształt ziaren ma wpływ na właściwości zarówno mieszanki betonowej jak i stwardniałego betonu. Mieszanka betonowa z kruszywem łamanym jest trudniejsza w pompowaniu i zagęszczaniu niż w przypadku żwirów, natomiast korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne betonu, w tym na wytrzymałość na zginanie, która jest szczególnie istotna w nawierzchniach betonowych. Kruszywa różnią się też ciężarem właściwym oraz parametrami mechanicznymi takimi jak wytrzymałość na ściskanie czy moduł sprężystości. Dobierając kruszywo nie należy pomijać aspektu ekonomicznego, chociaż nie może on być priorytetem. W wewnętrznych konstrukcjach budynków możemy z powodzeniem stosować kruszywa wapienne, które z reguły są wyraźnie tańsze od grysów granitowych czy bazaltowych. Stosowanie granitów czy bazaltów jest uzasadnione w przypadku betonów o wysokich

obostrzeniach co do wytrzymałości i trwałości, np. do budowy mostów, dróg, lotnisk itp. Parametry fizyczno-mechaniczne wybranych kruszyw naturalnych zamieszczono w tab. 6.15.

Tabela 6.15. Właściwości fizyko-mechaniczne kruszyw naturalnych

Kruszywo	Gęstość właściwa kg/m ³	Wytrzymałość na ściskanie N/mm ²
kruszywo kwarcowe	2,60 do 2,70	70 do 240
kruszywo wapienne	2,65 do 2,85	80 do 180
granit	2,60 do 2,80	160 do 240
gabro	2,80 do 3,00	170 do 300
diabaz	2,80 do 2,90	180 do 250
bazalt	2,90 do 3,05	250 do 400

6.1.5.3. Woda

PN-EN 206 do ustalania ogólnej przydatności wody zarobowej przywołuje normę EN 1008 [25]. Z jej treści wynika, że woda pitna może być stosowana w procesie produkcyjnym bez żadnych ograniczeń i wcześniejszych badań w zakresie przydatności jako składnik mieszanki betonowej. Oprócz wody pitnej, która nie wymaga badań norma dopuszcza inne rodzaje, np. odzyskaną z procesu produkcji, ze źródeł podziemnych lub naturalną wodę powierzchniową. Inny rodzaj wody niż pitna podlega wymaganiom wskazanym w normie. W pierwszej kolejności należy dokonać wstępnej oceny. Dopuszcza się barwę bladożółtą lub jaśniejszą, ale nie dotyczy to wody z produkcji betonu. Zawartość olejów i tłuszczów nie powinna być większa niż widoczne ślady, a zawartość detergentów na tyle mała aby piana zanikała w ciągu dwóch minut. Dopuszczalna jest kwasowość $\text{pH} \geq 4$, a zapach zbliżony do wody pitnej, bez zapachu H_2S po dodaniu HCl . Zawartość substancji humusowych uznaje się za akceptowalną, jeżeli po dodaniu NaOH woda przybiera barwę żółtawobrazową lub jaśniejszą. Po dokonaniu wstępnej oceny norma wymaga analizy chemicznej wody pod kątem zawartości chlorków, siarczanów, alkaliów i innych szkodliwych zanieczyszczeń. Dopuszczalna zawartość chlorków w wodzie zarobowej zależy od przeznaczenia betonu. W przypadku betonów niezbrojonych wynosi ona 4500mg/l wody, zaś w betonach zbrojonych próg został obniżony do poziomu 1000mg/l. Najsurowszy wymóg do 500mg/l dotyczy betonów sprężonych i zaczynów iniekcyjnych do kanałów kablowych. Natomiast zawartość siarczanów jako jonów SO_4^{2-} nie powinna przekraczać 2000mg/l wody. Ilość alkaliów w przeliczeniu na NaOH powinna być mniejsza niż 1500mg/l, chyba że wykaże się brak szkodliwej reakcji krzemionki z alkaliami. Norma ponadto wymaga sprawdzenia czy inne

substancje zawarte w wodzie zarobowej, takie jak cukry, azotany, fosforany, ołów i cynk nie wywierają negatywnego wpływu na czas wiązania i wytrzymałość oraz trwałość betonu.

6.1.5.4. Domieszki

Domieszki odgrywają istotną rolę w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Uzyskanie trwałej mikrostruktury betonu, odpornej na agresywne oddziaływania środowiskowe, bez zastosowania domieszek jest trudne a w większości przypadków praktycznie niemożliwe. Norma PN-EN 206 [4] ponosi ogólne kwestie technologiczne przy stosowaniu domieszek. Zgodnie z nią całkowita ilość domieszek, o ile są stosowane, nie powinna przekraczać dopuszczalnej największej ilości zalecanej przez producenta oraz nie powinna być większa niż 5% masy cementu, chyba że znany jest wpływ większego dozowania na właściwości i trwałość betonu. Stosowanie domieszek w ilościach mniejszych niż 2 g/kg cementu dopuszcza się wyłącznie w przypadku wcześniejszego ich wymieszania z częścią wody zarobowej. Jeżeli całkowita ilość płynnych domieszek przekracza 3 l/m³ betonu, zawartą w nich wodę należy uwzględnić przy obliczeniu współczynnika w/c. W przypadku stosowania więcej niż jednej domieszki, kompatybilność tych domieszek należy sprawdzić w badaniach wstępnych. Ponadto zaleca się, aby mieszanka betonowa o konsystencji większej od S4, C3 lub F4 była wykonywana z użyciem domieszek znacznie redukujących ilość wody (upłynniacze). Natomiast ogólną przydatność domieszek ustala się zgodnie z normą PN-EN 934-2 [26]. Domieszki zostały w niej sklasyfikowane ze względu na skutki modyfikacji. Wg tego kryterium norma wyróżnia następujące rodzaje domieszek: redukujące ilość wody (uplastyczniające i upłynniające); zwiększające więźliwość wody, napowietrzające, przyspieszające wiązanie, przyspieszające twardnienie, opóźniające wiązanie i zwiększające wodoodporność. W przypadku, gdy dana domieszka oddziałuje na więcej niż jedną cechę, jest traktowana jak wielofunkcyjna. Ponadto norma PN-EN 934-2 [26] określa szereg wymagań wobec domieszek do betonu. Między innymi ogranicza zawartość substancji szkodliwych takich jak chlorki czy alkalia. Wymaga od domieszki uplastyczniającej zmniejszenia wody o minimum 5%, a od domieszki upłynniającej o co najmniej 12%. Przy tym zawartość powietrza w mieszance nie powinna wzrosnąć o więcej niż 2%. W przypadku stosowania **domieszek napowietrzających**, co jest zalecane w klasach ekspozycji XF2, XF3, XF4, zawartość powietrza w mieszance powinna wzrosnąć przynajmniej o 2,5%, tak aby całkowita jego zawartość mieściła się w przedziale od 4 do 6%. Dodatkowo wskaźnik rozmieszczenia porów powinien być mniejszy niż 0,200 mm, a spadek wytrzymałości w wyniku

napowietrzenia betonu nie powinien przekroczyć 25% w stosunku do betonu kontrolnego. Jednocześnie norma PN-EN 206 [4] dopuszcza zastosowanie betonu nienapowietrzonego, ale w takim przypadku zaleca badanie jego właściwości użytkowych odpowiednią metodą i porównanie z betonem, którego mrozoodporność w warunkach danej klasy ekspozycji została potwierdzona.

6.2. Kompozyty cementowe z domieszką bitumiczną

Najczęstszym mechanizmem destrukcji betonu w krajowych warunkach klimatycznych jest korozja mrozowa spowodowana cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem wody w porach betonu w połączeniu z oddziaływaniem środków odladzających. Efektem korozji mrozowej są spękania betonu powstałe w wyniku zwiększenia objętości wody (o 9%) podczas jej zamarzania, a w rezultacie ubytek masy i spadek wytrzymałości. Beton całkowicie szczelny byłby również całkowicie mrozoodporny, jednakże każdy beton jest materiałem porowatym [8]. W warunkach korozji mrozowej zwłaszcza w klasie ekspozycji XF2, XF3, i XF4 zgodnie z normą PN-EN 206-1 [4] zalecane jest między innymi zmniejszenie w/c i napowietrzenie betonu. Zmniejszenie w/c to zmniejszenie porowatości, a więc korzystna poprawa szczelności materiału. Napowietrzenie – odwrotnie – to wprowadzenie dodatkowej porcji porów, jednakże o odmiennej strukturze. W czasie mieszania składników betonu wprowadzona domieszka tworzy zamknięte i równomiernie rozłożone pęcherzyki powietrzne w kształcie kulistym wielkości 0,01 do 0,3 mm [8]. Zgodnie z wymaganiem normy PN-EN 934-2 [26] wskaźnik rozmieszczenia powinien być nie większy niż 0,2 mm, stąd minimalna ilość powietrza wg zaleceń PN-EN 206-1 [4] wynosi 4%. Pęcherzyki te w stwardniałym betonie przerywają ciągłość kapilar i pełnią rolę komór kompensacyjnych, przez co podnoszą odporność materiału na działanie mrozu. Woda w kapilarach zwiększając swoją objętość, podczas zamarzania, może wciskać się do pustych pęcherzyków, co zapobiega rozsadzaniu betonu. Właściwe napowietrzenie betonu powoduje poprawę mrozoodporności, ale odbywa się to kosztem zmniejszenia szczelności i znacznym spadkiem wytrzymałości (20-30%) [8]. W praktyce jednak uzyskanie zalecanego napowietrzenia betonu przysparza wiele problemów i nie przesądza o jego mrozoodporności [27,28,29]. Dodatkowe problemy wynikają z konieczności spełnienia obostrzonych wymogów obniżenia nasiąkliwości $n_{w} \leq 4\%$, jakie są stawiane w SST w budownictwie komunikacyjnym w trosce o trwałość konstrukcji. Stąd właśnie zrodziła się potrzeba poszukiwań alternatywnych rozwiązań, które pozwolą sprostać stawianym wymaganiom w

zakresie mrozoodporności, nasiąkliwości i wodoszczelności betonu z zachowaniem wysokich parametrów wytrzymałościowych.

Przeprowadzone dotychczas badania wykazały, że wyraźną poprawę mrozoodporności betonu można uzyskać w wyniku modyfikacji mikrostruktury betonu przez wprowadzenie do mieszanki betonowej dodatku asfaltu w postaci roztworu w wysokowrzącym rozpuszczalniku organicznym (pasty asfaltowej wg patentu RP nr 136449) [30]. Wprowadzając do mieszanki betonowej pastę bitumiczną dochodzi do blokady połączeń między kapilarami w betonie oraz pokrycia ich powierzchni hydrofobowym materiałem organicznym co znacznie utrudnia wnikanie w strukturę porów agresywnych jonów takich jak NH_4^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} oraz innych substancji destrukcyjnych w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego [31]. Betony z pastą bitumiczną ($p/c=0,02$) formowane poprzez wibrowanie z wibroprasowaniem po 112 dniach dojrzewania stawały się praktycznie nieprzepuszczalne dla jonów chlorkowych [32]. Również korzystny wpływ domieszki bitumicznej, w postaci emulsji, na kształtowanie mrozoodpornej struktury betonu potwierdzają badania strukturalne opisane w Construction and Building Materials [33].

6.2.1. Badania stosowane na próbkach przygotowanych w laboratorium

W realizowanej pracy postawiono za cel główny wykazanie, że dzięki zastosowaniu domieszki bitumicznej w postaci anionowej emulsji oraz superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksyłanowych można uzyskać betony o korzystnej strukturze porowatości i podwyższonej odporności na oddziaływania środowiskowe przy ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg i jednoczesnym zmniejszeniu ilości domieszki bitumicznej do 2% w stosunku do masy cementu. Dane techniczne zastosowanej emulsji bitumicznej zamieszczono w tab. 6.16.

Takie podejście w rozwiązywaniu postawionego celu wymagało zastosowania planowania doświadczeń eksperymentalnych, w wyniku których można było optymalizować zarówno ilość domieszki bitumicznej jak również superplastyfikatora i wody. Czynnikiem zmiennymi w badaniach były: czynnik X1 – zawartość anionowej emulsji bitumicznej $0 \div 4$ [%], czynnik X2 – zawartość upłynniacza na bazie eterów polikarboksyłanowych $0 \div 1,1$ [%] oraz czynnik X3 – stosunek w/c $0,3 \div 0,44$ [-]. Optymalizowanymi cechami (wielkościami wyjściowymi) w eksperymencie były: konsystencja Ve-Be [s], zawartość powietrza pp [%] i gęstość mieszanki betonowej ρ [kg/dm³] oraz wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ [MPa], gęstość pozorna ρ_c [kg/dm³],

mrozoodporność $\Delta_{fcm,F200}$ [%] oraz nasiąkliwość masowa n_w [%] betonu po 28 dniach twardnienia (dojrzewania) w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 6.16. Dane techniczne anionowej emulsji bitumicznej

Anionowa emulsja bitumiczna	
Baza	asfalt podestylacyjny o temp mięknięcia 50-60 °C
Stopień rozdrobnienia	< 1µm
Rozpuszczalnik	nie występuje
Barwa	czarna, brunatna
Konsystencja	ciekła
Gęstość	ok. 1,0kg/dm ³
Sucha pozostałość	ok. 60%
Zakres temperatur podczas stosowania	od +4 °C
Współczynnik oporu dyfuzyjnego dla pary wodnej μ :	Ok. 800
pH (w 20°C)	Ok. 10

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych uzyskano innowacyjny materiał konstrukcyjny o podwyższonej odporności na agresywne oddziaływania środowiskowe w klasach ekspozycji XF4, XD3 i XA3 ze szczególnym przeznaczeniem do budownictwa komunikacyjnego, rolniczego i hydrotechnicznego. Uzyskany kompozyt cementowy odpowiada klasie betonu C35/45 i charakteryzuje się wysoką mrozoodpornością F200, niską nasiąkliwością $n_w \leq 3,0\%$, przy jednoczesnym ograniczeniu zawartości cementu do 360kg/m³. Pozwoli to na prognozowanie co najmniej 50 letniej trwałości, definiowanej wg Eurokodu 2 [1] jako zapewnienie stanu użyteczności konstrukcji w określonych warunkach, bez istotnego obniżenia przydatności lub ponoszenia nadmiernych i nieprzewidzianych kosztów utrzymania. Na podstawie badań kompleksowych zrealizowanych w ramach eksperymentu, ustalono optymalne receptury betonów i technologię ich wykonywania w warunkach przemysłowych a następnie dokonano implementacji w warunkach przemysłowych [34].

6.2.2. Implementacja i badania na próbkach przygotowanych w warunkach przemysłowych

Przeprowadzona implementacja przy realizacji nawierzchni drogowych opisana została w publikacji [35]. Potwierdziła ona rzeczywistą możliwość stosowania kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych.

Otrzymane rezultaty badań są spójne z uzyskanymi podczas badań stosowanych i świadczą, iż również w warunkach przemysłowych, w wyniku zastosowania domieszki bitumicznej możliwe jest obniżenie nasiąkliwości poniżej 4% przy jednoczesnym ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg/m^3 . Pozwala to na zastosowanie uzyskanego kompozytu w najsurowszych klasach ekspozycji. Tak korzystny wpływ emulsji na obniżenie nasiąkliwości i podwyższenie szczelności betonów jest wynikiem hydrofobizujących właściwości zastosowanej domieszki. W efekcie zhydrofobizowane zostają powierzchnie porów wewnątrz struktury betonu, co powoduje, że beton staje się trudno zwilżalny. Utrudnia to penetrację wody a wraz z nią szkodliwych w stosunku do matrycy cementowej substancji takich jak jony chlorkowe Cl^- , amonowe NH_4^+ , magnezowe Mg^{2+} i siarczanowe SO_4^{2-} . Dokonana implementacja oraz otrzymane wyniki badań potwierdziły przydatność kompozytów modyfikowanych emulsją bitumiczną w budownictwie komunikacyjnym, szczególnie w przypadku nawierzchni mocno obciążonych jak place kontenerowe, gdzie istotną rolę oprócz odporności na oddziaływania środowiskowe odgrywają parametry mechaniczne. Ponadto mogą mieć one zastosowanie w środowisku silnie agresywnym chemicznie np. w budownictwie rolniczym przy realizacji zbiorników na gnojówkę, płyt do składowania obornika, posadzek w obiektach inwentarskich, jak również w infrastrukturze komunalnej do budowy oczyszczalni ścieków i składowisk odpadów oraz w budownictwie hydrotechnicznym do wznoszenia obiektów narażonych na działanie wód agresywnych.

6.2.3. Wdrożenie i badania przy realizacji placu manewrowego

W trakcie realizacji nawierzchni placu manewrowego na terenie terminala kontenerowego uzyskano beton wdrożono kompozyt cementowy z domieszką bitumiczną. Szczegółowy opis projektowania i realizacji zawiera publikacja [36]. W trakcie wdrożenia pobierano próbki do badań. Analiza ich wyników potwierdza, iż uzyskany w warunkach przemysłowych kompozyt odpowiada klasie betonu klasy C35/45 i spełniający wymagania stawiane betonom stosowanym w najsurowszych klasach ekspozycji XF4, XD3, XC4, XA3, XM3. Badania laboratoryjne przeprowadzone na próbkach pobieranych w trakcie betonowań potwierdziły wysoką wytrzymałość na ściskanie $f_{\text{cm},28}=49,74\div 58,20 \text{ MPa}$ i zginanie $f_{\text{ctm},\text{fl}}=5,55\div 5,72 \text{ MPa}$ (w dwupunktowym układzie obciążenia), wysoką mrozoodporność F200 i wodoszczelność (średnia głębokość penetracji wody 14,33 mm, a maksymalna 26 mm przy ciśnieniu 0,8 MPa) oraz obniżoną w wyniku zastosowania domieszki bitumicznej nasiąkliwość masową do 3,62%. Zrealizowana nawierzchnia betonowa o powierzchni 11076 m^2 jest wykorzystywana jako plac manewrowo-składowy

i przenosi zakładane obciążenia od żurawi kontenerowych (nacisk na oś 1015 kN, tj. ok 10 razy więcej niż dopuszczalne na drogach UE) oraz układanych w stosy kontenerów o masie do 120t (rys. 6.2.).



Rys. 6.2. Terminal kontenerowy z nawierzchnią z kompozytów cementowych modyfikowanych domieszką bitumiczną

Podsumowanie

Z treści ustawy o normalizacji z dnia 12 września 2002 roku (Dz. U. 2002 nr 169 poz. 1386) wynika iż stosowanie polskich norm jest dobrowolne. W świetle tego zapisu projektant przy wykonywaniu projektu konstrukcyjnego nie ma obowiązku stosowania norm do projektowania, a paradoksalnie ma on możliwość posługiwania się zarówno aktualnymi jak i wycofanymi już normami. Niezależnie od tego projektant podając rozwiązania konstrukcyjne powinien określić wszystkie wymagane właściwości betonu nie tylko uwzględniając nośność i bezpieczeństwo konstrukcji, ale również ze względu na jej trwałość. W tym celu, na etapie projektowania, konieczne jest sprecyzowanie: klasy konstrukcji (od S1 do S6, przy czym domyślną jest S4 o przewidywanym okresie użytkowania równym 50 lat), klasy ekspozycji (X... oddziaływania środowiska na konstrukcję), klasy wykonania (od 1 do 3) i klasa pielęgnacji (od 1 do 4). Stosownie do klasy konstrukcji i klasy ekspozycji należy określić wymaganą otulinę i wyspecyfikować właściwości betonu, a wręcz dokonać doboru jego składników. Normowe zapewnienie trwałości konstrukcji z betonu polega na właściwym (jakościowym i ilościowym) doborze materiałów i ukształtowaniu odpowiedniej mikrostruktury betonu. Jest ona wynikiem reakcji chemicznych i procesów fizykochemicznych zachodzących pomiędzy składnikami w procesie wytwarzania zwanym technologią na którą składa się: receptura, dozowanie,

wymieszanie, transport, układanie, zagęszczanie, pielęgnacja i utrzymanie (konserwacja). Przeprowadzone przez autora badania potwierdzają, iż modyfikacja mikrostruktury betonu asfaltem w postaci anionowej emulsji bitumicznej stanowi skuteczną ochronę materiałowo-strukturalną betonów cementowych przed agresją środowiska. Uzyskany w wyniku zastosowanej domieszki układ struktury porowatości pozwala osiągnąć wyraźnie niższą nasiąkliwość przy zachowaniu wysokiej mrozoodporności i sprawia, że beton staje się praktycznie nieprzepuszczalny dla wody pod ciśnieniem.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1: 2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu- Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-EN 1990: Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] PN-EN 1991: Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcję.
- [4] PN-EN 206-1: 2014-04 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] PN-EN 13670: 2011 Wykonywanie konstrukcji z betonu.
- [6] PN-B 06265: 2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1: 2003 Beton -- Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność,
- [7] Dawczyński Sz.: Zapewnienie trwałości konstrukcji z betonu – wymagania wg Eurokodu 2. Materiały budowlane 10/2012, s. 34–37.
- [8] Czarnecki L. z zespołem: Beton wg normy PN-EN 206-1 – Komentarz, Polski Cement, Kraków 2004.
- [9] Bajorek G. z zespołem: Beton Wymagania Produkcja i Zgodność, SPBT w Polsce, Kraków 2014.
- [10] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo nr 10/2010, s. 519–525.
- [11] PN-EN 197-1: 2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [12] PN-EN 19707: 2013 Cement, Cement specjalny - Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [13] PN-EN 196-1: 2006 Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [14] PN-EN 196-8: 2010 Metody badania cementu -- Część 8: Ciepło hydratacji -- Metoda rozpuszczania.
- [15] PN-EN 196-9: 2010 Metody badania cementu -- Część 9: Ciepło hydratacji -- Metoda semiadiabatyczna.
- [16] ASTM C114-04 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
- [17] Garbacik A., Giergiczny Z.: Cementy specjalne – nowe kryteria klasyfikacji, wymagań i oceny zgodności. Budownictwo Technologie Architektura 2/2014, s. 54-57.
- [18] PN-EN 12620: 2013-08E Kruszywa do betonu.

- [19] PN-EN 932-3: 1999/A1: 2004 Badanie podstawowych właściwości kruszyw. Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego.
- [20] PN-EN 1097-6: 2013-11 Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6. Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości.
- [21] PN-EN 1367-1: 2007 Badanie właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 1: Oznaczanie mrozoodporności.
- [22] PN-EN 1367-2: 2010 Badanie właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 2: Badanie w siarczenie magnezu.
- [23] PN-EN 1744-1+A1: 2013-5 Badania chemicznych właściwości kruszyw. Część 1. Analiza chemiczna.
- [24] PN-EN 933-1: 2012 Badania geometryczne właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczenie składu ziarnowego – metoda przesiewowa.
- [25] PN-EN 1008: 2004 Woda zarobowa do betonu - Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu.
- [26] PN-EN 934-2+A1: 2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu -- Część 2: Domieszki do betonu - Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie.
- [27] Jasiczak J., Ślosarczyk A., Wołowicki W.: Przypadki braku mrozoodporności betonu w nowych wiaduktach drogowych wykonanych w latach 2002-2012. Konferencja Dni Betonu, Wisła 2014, s. 871–880.
- [28] Czarnecki L., Deja J., Flaga K., Jasiczak J., Kurdowski W., Małolepszy J., Radomski W., Śliwiński J.: Mrozoodporność betonu w konstrukcjach mostowych, Budownictwo technologia architektura 1/2015, s. 66–69.
- [29] Flaga K.: O mrozoodporności betonów mostowych. Trwałość obiektów mostowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012, s. 499–511.
- [30] Wieczorek G.: Ochrona materiałowo-strukturalna betonu przez jego modyfikację asfaltem. Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA 2006 „Ochrona przed korozją” nr 5, 2006, s. 185–192.
- [31] Bołtryk M., Pawluczuk E.: Properties of recycled aggregate concretes modified by asphalt paste. Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius Gediminas Technical University, 2010.

- [32] Falkowski K.: Technologia ochrony materiałowo strukturalnej betonów cementowych w środowisku agresywnym, Budownictwo I Inżynieria Środowiska, 2012 Vol. 3 No. 1.
- [33] Bołtryk M., Małaszkiwicz D.: Application of anionic asphalt emulsion as an admixture for concrete. Constuction and Building Materials 40, 2013, s. 556–565.
- [34] Falkowski K.: Kompozyty cementowe modyfikowane emulsją bitumiczną, Materiały Budowlane 12/2014, s. 45–49,
- [35] Falkowski K.: Implementacja kompozytów cementowe modyfikowane emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych, Materiały Budowlane 4/2015, s. 50–53,
- [36] Falkowski K.: Projektowanie i realizacja placu manewrowego z kompozytów cementowych, Budownictwo Technologie Architektura 2/2015, s. 50–53.

The methods to ensure the sustainability of concrete structures in aggressive environments.

Abstract:

This article discusses the issues of durability of concrete structures taking into account the categories of projected useful life exposure class, the class structure, class performance and class care. The attention paid to the interrelation of standards for the design of concrete structures BS EN 1992: 2008, concrete technology BS EN 206: 2014-04 and execution of concrete structures BS EN 13670: 2011, and many material standards. Describes the hazards that may exist in individual exposure classes and shows you how to adjust the composition and structure of concrete to aggressive environment in which design will be used. It sets out requirements in relation to the basic components of concrete, concrete and hardened concrete. It presents the findings of research conducted on the author's own cement composites modified asphalt in the form of an admixture of anionic bitumen emulsion and conclusions of the implementation in industrial environments.

Key words: concrete, durability, exposure class, structure class, execution class, care class, admixture of bitumen

