

**prof. dr hab. inż. Anna Halicka**

Politechnika Lubelska

**prof. dr hab. inż. Paweł Łukowski**

Politechnika Warszawska

## **Projektowanie konstrukcji betonowych ze względu na trwałość według nowelizacji PN-EN 206 i PN-EN 1992-1**

Design of concrete structures with respect of durability in accordance with PN-EN 206 and PN-EN 1992-1 standards

### **Streszczenie**

Jednym z kierunków nowelizacji norm EN 206 i EN 1992-1 jest nowe podejście do trwałości konstrukcji z betonu i ich projektowania ze względu na trwałość. Znowelizowana norma PN-EN 1992-1 została już wprowadzona przez Polski Komitet Normalizacyjny do katalogu norm aktualnych i jako taka winna być podstawą projektowania konstrukcji z betonu. Natomiast nowelizacja normy EN 206 jest wciąż na etapie uzgodnień na szczęblu Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego. W artykule omówiono czynniki korozyjne i klasyfikację środowisk w dokumentach normalizacyjnych oraz założenia projektowania konstrukcji ze względu na trwałość ze szczególnym uwzględnieniem karbonatyzacji i agresji chlorkowej. Przedstawiono zastosowaną w normie metodę Exposure Resistance Classes (ERC) oraz przedyskutowano związek składu betonu z jego klasą odporności.

### **Abstract**

An important direction of amendment of the European Standards EN 206 and EN 1992-1 is a new approach to the durability of concrete structures and their design towards durability. The amended Eurocode EN 1992-1 has already been introduced by the Polish Committee for Standardisation and should be a base for concrete structures' design. However, the amendment of EN 206 is still in the process of searching for consensus within the European Committee for Standardisation. The paper presents the corrosion factors and environment categorisation in the European Standards and the assumptions for structures' design towards durability, with particular attention paid to carbonation and chloride aggression. The exposure Resistance Classes (ERC) approach is described, and the relation between concrete composition and its resistance class is discussed.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z kierunków nowelizacji norm EN 206 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* [1] i EN 1992-1 *Projektowanie konstrukcji z betonu* [2] jest nowe podejście do trwałości konstrukcji z betonu i ich projektowania ze względu na trwałość. Znowelizowana EN 1992-1 została już w 2024 r. wprowadzona przez PKN do katalogu norm aktualnych i jako taka jest (do 2028 r. równolegle z poprzednią wersją) podstawą projektowania konstrukcji z betonu. Natomiast nowelizacja EN 206 jest na etapie uzgodnień i poszukiwania konsensusu w obrębie KT104 Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN). W czasie przygotowania niniejszego artykułu sprawa ta wydaje się wciąż jeszcze daleka od skutecznej finalizacji.

Norma PN-EN 1992-1 [2] podniosła rangę trwałości konstrukcji żelbetowej, uznając ją za „stan graniczny trwałości” (*condition limit state* lub *durability limit state*), który powinien być rozważany dodatkowo do sprawdzenia stanów granicznych nośności i użyteczności. Przyjęto, że koniec projektowanego okresu „życia” konstrukcji następuje wtedy, gdy korozja zbrojenia albo ubytek pola przekroju lub/i wytrzymałości betonu osiągnie poziom uniemożliwiający dalsze użytkowanie. Ten stan graniczny zidentyfikowano jako sytuację, gdy wskutek karbonatyzacji nastąpi zmniejszenie średnicy pręta o 50  $\mu\text{m}$  lub gdy wskutek wniknięcia chlorków powstaną w zbrojeniu wżery o głębokości 500  $\mu\text{m}$ .

## 2. Czynniki korozyjne i klasyfikacja środowisk

W normie EC2-1 [2] wymieniono następujące czynniki korozyjne:

- AAR – reakcja alkalia-kruszywo,
- czynniki biologiczne: algi, wegetacja roślin,
- czynniki chemiczne z gruntu, wody gruntowej i procesów technologicznych (kwasy, miękka woda, siarczany, inne),
- opóźniona formacja etryngitu,
- czynniki fizyczne (abrazja, zmiany temperatury, w tym zamrażanie/rozmarzanie, penetracja wody),
- korozja zbrojenia wskutek karbonatyzacji lub wniknięcia chlorków,
- korozja zbrojenia wskutek chlorków zawartych w mieszance betonowej,
- spękania wskutek naprężeń korozyjnych.

Klasyfikacja środowisk w nowelizacji normy [2] jest analogiczna jak w dotychczasowej normie [3], z tym że obok klas X0 – brak korozji, XC – korozja spowodowana przez karbonatyzację (XC1÷XC4), XD (korozja spowodowana przez chlorki nie pochodzące z wody morskiej) (XD1÷XD3), XS – korozja spowodowana przez chlorki z wody morskiej (XS1÷XS3), XF – zamrażanie/rozmarzanie (XF1÷XF3), XA – korozja chemiczna (XA1÷XA3), dodano korozję mechaniczną spowodowaną przez abrazję XM (XM1÷XM3). Nieco różnią się opisy środowisk odpowiadających klasom X0 i XC. Klasie X0 odpowiadają jedynie konstrukcje betonowe niezbrojone, podczas gdy dotychczas w normie [3] podawano, że odpowiadają jej konstrukcje niezbrojone w budynkach i znajdujące się w warunkach niskiej wilgotności powietrza. Klasy ekspozycji związane z karbonatyzacją opisane są w normie [2] następująco:

- XC1: środowisko suche (wewnątrz budynków o niskiej wilgotności); podczas gdy dotychczas: środowisko suche lub permanentnie mokre (wewnątrz budynków o niskiej wilgotności, konstrukcje stale zanurzone w wodzie),
  - XC2: środowisko mokre lub o permanentnie wysokiej wilgotności, rzadko suche (powierzchnie narażone na długotrwały kontakt z wodą, konstrukcje trwale zanurzone w wodzie, stale narażone na wysoką wilgotność, wiele fundamentów i zbiorników nie-zewnętrznych); podczas gdy dotychczas: środowisko mokre, rzadko suche (narażone na długotrwały kontakt z wodą, wiele fundamentów).
- W przypadku klas XC3, XC4, XD, XS, XF i XA nie ma różnic pomiędzy normą [3] i jej nowelizacją [2].

### 3. Projektowanie konstrukcji z betonu ze względu na trwałość w warunkach karbonatyzacji i agresji chlorkowej

Podstawowym sposobem zapewnienia trwałości konstrukcji żelbetowej i sprężonej poddanej karbonatyzacji i agresji chlorkowej na jest betonowa otulina tę trwałość zapewniającej. Dotychczas stosowana była metoda *klas konstrukcji*, a nowa norma wprowadza metodę *klas odporności na agresję środowiska* ERC.

#### 3.1 Dotychczasowa metoda klas konstrukcji

Dotychczas, według normy [3] określenia grubości otuliny  $c_{min,dur}$  ze względu na trwałość dokonuje się w zależności od tzw. klasy konstrukcji, ustalonej następująco. Przyjmuje się wstępnie klasę konstrukcji „4” i modyfikuje się ją dodając lub odejmując „1” zależnie od klasy ekspozycji projektowanej konstrukcji, przewidywanego okresu użytkowania, założonej klasy betonu, oraz od tego, czy konstrukcja jest płytą i czy stosowano specjalne zasady kontroli w czasie jej wykonania. Po ustaleniu klasy konstrukcji grubość otuliny określana jest w zależności od klasy ekspozycji (tablica 1), przy czym jest to ekspozycja jedynie na karbonatyzację i agresję chlorkową.

Tablica 1. Minimalne grubości otuliny  $c_{min,dur}$  ze względu na trwałość w zależności od klasy konstrukcji i klasy ekspozycji wg EN 1992-1-1 [3]

| Wymagania środowiskowe dla $c_{min,dur}$ [mm] |    |     |         |     |         |         |         |
|-----------------------------------------------|----|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Klasa konstrukcji                             | X0 | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XD2 | XD3/XS3 |
| S1                                            | 10 | 10  | 10      | 15  | 20      | 25      | 30      |
| S2                                            | 10 | 10  | 15      | 20  | 25      | 30      | 35      |
| S3                                            | 10 | 10  | 15      | 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      |

#### 3.2 Metoda Exposure Resistance Classes ERC

W normie PN-EN 1992-1 [2] metoda klas konstrukcji została przeniesiona do załącznika P jako alternatywna, natomiast jako podstawową wprowadzono metodę Exposure Resistance Classes ERC. Metoda alternatywna może zostać wybrana jako podstawowa w załączniku krajowym.

Metoda ERC pozwala na określenie minimalnej grubości otuliny ze względu na trwałość  $c_{min,dur}$  w warunkach karbonatyzacji i penetracji chlorków. Jej podstawą jest stwierdzenie, że na trwałość wpływa klasa ekspozycji, klasa odporności betonu i grubość otuliny. Aby zapewnić założoną trwałość przy danej klasie ekspozycji, otulina zbrojenia wykonana z betonu o klasie odporności XR winna być nie cieńsza  $c_{min,dur}$ . To znaczy, że już na etapie projektowania konstrukcji należy przyjąć, tak jak klasę wytrzymałości betonu, także klasę odporności XR betonu. Do decyzji projektanta pozostaje więc, czy przyjąć grubą otulinę i beton o niższej klasie odporności czy przyjąć cieńszą otulinę i beton o wyższej klasie odporności.

Tablica 2. Minimalna grubość otuliny  $c_{min,dur}$  [mm] ze względu na trwałość, zależna od klasy odporności betonu na karbonatyzację i klasy ekspozycji wg PN-EN 1992-1 [2]

| Klasy ekspozycji z uwagi na karbonatyzację |                                |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ERC                                        | XC1                            |     | XC2 |     | XC3 |     | XC4 |     |
|                                            | Przewidywany czas życia [lata] |     |     |     |     |     |     |     |
|                                            | 50                             | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 |
| XRC 0,5                                    | 10                             | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| XRC 1                                      | 10                             | 10  | 10  | 10  | 10  | 15  | 10  | 15  |
| XRC 2                                      | 10                             | 15  | 10  | 15  | 15  | 25  | 15  | 25  |
| XRC 3                                      | 10                             | 15  | 15  | 20  | 20  | 30  | 20  | 30  |
| XRC 4                                      | 10                             | 20  | 15  | 25  | 25  | 35  | 25  | 40  |
| XRC 5                                      | 15                             | 25  | 20  | 30  | 25  | 45  | 30  | 45  |
| XRC 6                                      | 15                             | 25  | 25  | 35  | 35  | 55  | 40  | 55  |
| XRC 7                                      | 15                             | 30  | 25  | 40  | 40  | 60  | 45  | 60  |

Tablica 3. Minimalna grubość otuliny  $c_{min,dur}$  [mm] ze względu na trwałość, zależna od klasy odporności betonu na chlorki i klasy ekspozycji wg PN-EN 1992-1 [2]

| ERC      | Klasy ekspozycji z uwagi na wnikanie chlorków |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | XS1                                           |     | XS2 |     | XS3 |     | XD1 |     | XD2 |     | XD3 |     |
|          | Przewidywany czas życia [lata]                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|          | 50                                            | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 | 50  | 100 |
| XRDS 0,5 | 20                                            | 20  | 20  | 30  | 30  | 40  | 20  | 20  | 20  | 30  | 30  | 40  |
| XRDS 1   | 20                                            | 25  | 25  | 35  | 35  | 45  | 20  | 25  | 25  | 35  | 35  | 45  |
| XRDS 1,5 | 25                                            | 30  | 30  | 40  | 40  | 50  | 25  | 30  | 30  | 40  | 40  | 50  |
| XRDS 2   | 25                                            | 30  | 35  | 45  | 45  | 55  | 25  | 30  | 35  | 45  | 45  | 55  |
| XRDS 3   | 30                                            | 35  | 40  | 50  | 55  | 65  | 30  | 35  | 40  | 50  | 55  | 65  |
| XRDS 4   | 30                                            | 40  | 50  | 60  | 60  | 80  | 30  | 40  | 50  | 60  | 60  | 80  |
| XRDS 5   | 35                                            | 45  | 60  | 70  | 70  | -   | 35  | 45  | 60  | 70  | 70  | -   |
| XRDS 6   | 40                                            | 50  | 65  | 80  | -   | -   | 40  | 50  | 65  | 80  | -   | -   |
| XRDS 8   | 45                                            | 55  | 75  | -   | -   | -   | 45  | 55  | 75  | -   | -   | -   |
| XRDS 10  | 50                                            | 65  | 80  | -   | -   | -   | 50  | 65  | 80  | -   | -   | -   |

W przypadku betonu poddanego karbonatyzacji, klasy odporności betonu XRC mają wymiar szybkości karbonatyzacji ( $\text{mm}/\sqrt{rok}$ ). W tablicy 2 podane są minimalne grubości otuliny  $c_{min,dur}$  ze względu na karbonatyzację dla różnych klas XRC, które zostały ustalone w założeniu, że karbonatyzacja osiągnie grubość otuliny po 50 latach w warunkach referencyjnych (400 ppm CO<sub>2</sub>, RH=65%, 20°C).

W przypadku korozji spowodowanej chlorkami, klasy odporności betonu XRDS mają wymiar współczynnika dyfuzji ( $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ). W tablicy 3 zestawiono minimalne grubości otuliny  $c_{\min, \text{dur}}$  ze względu na penetrację chlorków dla różnych klas XRDS, które zostały ustalone w założeniu, że głębokość penetracji chlorków osiągnie grubość otuliny po 50 latach w warunkach referencyjnych (zawartość chlorków - 6% masy spoiwa łącznie z dodatkami II typu), przy jednostronnej ekspozycji na referencyjną wodę morską (30 g NaCl / liter w temp. 20°C).

W pracy [4] podsumowano metodę ERC stwierdzeniem, że co prawda metoda ta zwiększa transparentność, zapewnia unifikację wymagań co do klasyfikacji betonu oraz ułatwia stosowanie nowych rozwiązań materiałowych, jednak jej wprowadzenie do praktyki wymaga zapewnienia, że istnieją wiarygodne metody badawcze, oraz że znane są skutki długotrwałego zachowania się betonów, zwłaszcza nowych, w warunkach agresywnych. Jeśli nie – stosowane będzie podejście konserwatywne, co może ograniczyć wprowadzanie nowości materiałowych. Autorzy [4] postulują też, aby w przypadku wielkoskalowych konstrukcji pracujących w warunkach silnej agresji i wysokich wymagań co do niezawodności, stosować podejście w pełni probabilistyczne, jakie zaprezentowane jest w *fib Model Code* [5,6].

Tablica 4. Podstawowe elementy normowych procedur badania odporności betonu na karbonatyzację

| Norma / procedura                                    | Próbki                                                                              | Pielęgnacja                                                                                                 | Czas badania po pielęgnacji                                                                                                   |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EN 12390-10 / Karbonatyzacja w komorze klimatycznej  | 2 beleczki o minimalnej długości 350 mm                                             | 24 ± 2 h w formach pod folią + 27 dni w war. normowych + 16 ± 2 h w war. laboratoryjnych powietrzno-suchych | Badanie po 3, 6 i 12 mies. Jeśli po 1 roku głębokość karbonatyzacji jest mniejsza niż 5 mm, czas badania wydłuża się do 2 lat |
| EN 12390-10 / Karbonatyzacja w warunkach naturalnych |                                                                                     | 24 ± 2 h w formach pod folią + 2 to 7 dni w szczelnym opakowaniu, do osiągnięcia 50% wytrzymałości proj.    |                                                                                                                               |
| EN 12390-12 / Karbonatyzacja przyspieszona           | 2 beleczki min. 280mm lub 8 kostek lub 5 walców o boku ≥ 3 x maks. rozmiar kruszywa | 20 ± 4 h w formach pod folią + 28 dni w war. normowych + 14 dni w war. laboratoryjnych powietrzno-suchych   | Badanie po 7, 28 i 70 dniach w komorze karbonatyzacyjnej o stężeniu CO <sub>2</sub> 3,0 ± 0,5%                                |

Tablica 5. Podstawowe elementy normowych procedur badania odporności betonu na wnikanie jonów chlorkowych

| Norma / procedura                      | Próbki                                    | Pielęgnacja                                                       | Czas do badania po pielęgnacji             |
|----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| EN 12390-11 / Dyfuzja jednokierunkowa  | Kostka, walec lub rdzeń                   | 28 dni w war. normowych lub dłużej, odpowiednio do rodzaju spoiwa | 90 dni w 3% NaCl                           |
| EN 12390-18 / Oznaczanie wsp. migracji | 5 walców 50 ± 1 mm lub 3 walce 100 ± 1 mm | 28 dni w warunkach normowych                                      | 6 h do 7 dni w ~5% NaCl przy napięciu 30 V |



### 3.3 Procedury badania odporności betonu na karbonatyzację i chlorki

Metody oznaczania odporności betonu na karbonatyzację są opisane w PN-EN 12390-10 [10] – badanie w warunkach atmosferycznego stężenia CO<sub>2</sub> i PN-EN 12390-12 [11] – badanie w warunkach karbonatyzacji przyspieszonej. Miarą odporności betonu jest szybkość postępu karbonatyzacji [mm/ $\sqrt{\text{lata}}$ ]. Głębokość karbonatyzacji oznacza się metodą fenoloftaleinową. Badanie przy naturalnym stężeniu dwutlenku węgla, które w standardowych warunkach (temperatura 20°C, wilgotność względna 65%) wynosi około 400 ppm, tj. 0,04% obj., można prowadzić w środowisku naturalnym lub w komorze klimatycznej; jest to badanie długotrwałe (minimum 1 rok). Badanie przyspieszone wymaga zastosowania specjalnej komory karbonatyzacyjnej, w której utrzymuje się stężenie CO<sub>2</sub> wynoszące ok. 3% obj. (tablica 4).

Metody badania odporności betonu na wnikanie jonów chlorkowych są opisane w PN-EN 12390-11 [12] – wnikanie w warunkach dyfuzji jednokierunkowej i PN-EN 12390-18 [13] – oznaczanie współczynnika migracji chlorków (tablica 5). Miarą odporności betonu jest współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych [m<sup>2</sup>/s], z uwzględnieniem wskaźnika starzenia określanego dla wieku 50 lat na podstawie przyjętego modelu. Dopuszcza się stosowanie alternatywnych metod badawczych i kryteriów, obowiązujących w miejscu stosowania, pod warunkiem ich skalibrowania z metodami i kryteriami odniesienia. Po przeprowadzeniu badania typu, alternatywne metody i kryteria mogą być również stosowane do oceny zgodności.

### 3.4 Skład betonu a jego klasa odporności ERC

Dla prawidłowego zastosowania metody ERC niezbędne jest zapewnienie, że beton o przewidzianej w projekcie klasie XRC lub XRSD taką klasę wykaże w rzeczywistości. Według dostępnych projektów nowelizowanej normy [1], odporność betonu (szybkość karbonatyzacji lub współczynnik dyfuzji), charakterystyczną dla danej klasy, można osiągnąć przez:

- zgodność z odpowiednimi wartościami granicznymi składu betonu (mają być one podane w normie EN 206 lub dokumentach krajowych),
- i/lub potwierdzenie standaryzowanymi badaniami, że dana klasa jest osiągnięta.

Wydaje się, że o jednoznaczne rekomendacje normowe będzie trudno, szczególnie ze względu na dużą różnorodność stosowanych cementów [5], zatem to producenci betonu będą musieli wykazać na podstawie badań, że zastosowane przez nich receptury zapewnią żądaną klasę odporności betonu.

Badacze wskazują na zależność klasy odporności od wielu czynników. Poniżej zostaną przytoczone te zależności dla odporności na karbonatyzację.

W publikacji [7], bazując na zaleceniach hiszpańskiego Min. Transportu, założono, że szybkość karbonatyzacji zależy od wytrzymałości charakterystycznej betonu i zawartości powietrza i sporządzono tablicę zależności klasy odporności XRC od tych czynników. I tak dla przykładu:

- beton na cem. portlandzkim o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5, jeśli  $f_{ck}=80\text{MPa}$ , a klasę XRC 7, jeśli  $f_{ck}=26\text{MPa}$ ,
- beton na cem. portlandzkim z 25% dodatkiem popiołu lotnego o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5 przy  $f_{ck}=128\text{MPa}$ , a klasę XRC 7 przy  $f_{ck}=27\text{MPa}$ ,
- beton na cem. portlandzkim z 9% dodatkiem mikrokrokrzemionki o zaw. powietrza < 4,5% zapewnia klasę XRC 0,5 przy  $f_{ck}=139\text{MPa}$ , a klasę XRC 7 przy  $f_{ck}=29\text{MPa}$ .

Wydaje się jednak, że uzależnienie klasy odporności betonu od wytrzymałościowej jest uproszczeniem, a wytrzymałość na ściskanie mogłaby być traktowana jedynie jako „parametr zastępczy” będący wynikiem wieloparametrowego składu betonu. Naszym zdaniem, nie jest to więc zależność w pełni miarodajna.

Pewną orientację co do składów betonów odpornych na karbonatyzację znaleźć można w pracy [8]. Zaprezentowano tu badania szybkości karbonatyzacji w zależności od typu cementu i jego zawartości oraz wskaźnika w/c. Stwierdzono, że szybkość ta wyniosła w przypadku cementu CEM I ok.  $1 \div 3 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$ , jeśli użyto cementu CEM II –  $1 \div 4 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$ , przy cemencie CEM IIb –  $2 \div 7 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$ , a przy CEM III –  $3 \div 9 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{rok}}}$ .

Badano też zależność szybkości karbonatyzacji od w/c oraz zawartości klinkieru. I tak szybkość karbonatyzacji waha się:

- od ok.  $4 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $250 \text{ kg/m}^3$  do ok.  $9 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $150 \text{ kg/m}^3$ , jeśli  $w/c=0,64 \div 0,65$ ;
- od ok.  $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $320 \text{ kg/m}^3$  do ok.  $6 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $170 \text{ kg/m}^3$ , jeśli  $w/c=0,59$ ;
- od ok.  $2 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $300 \text{ kg/m}^3$  do ok.  $5 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $170 \text{ kg/m}^3$ , jeśli  $w/c=0,54$ ;
- od ok.  $2 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru ok.  $350 \text{ kg/m}^3$  do  $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  przy zaw. klinkieru  $180 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c=0,46$ ;
- od ok.  $0 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$  do  $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{rok}}$ , jeśli  $w/c=0,30$ .

W pracy [9] przebadano 4 składy betonów CEM II/AM i CEM II/AS o różnych zawartościach żużla i wapienia w ilości  $280 \div 470 \text{ kg/m}^3$  oraz wskaźnikach  $w/c = 0,36 \div 0,61$ . Betony badano w wieku 7, 28, 90, 180 i 365 dni. Metodą najmniejszych kwadratów dobrano współczynniki proporcjonalności pomiędzy głębokością karbonatyzacji a pierwiastkiem z wieku betonu i na tej podstawie oszacowano szybkość karbonatyzacji w wieku 50 i 100 lat. Stwierdzono, że wszystkie składy betonów zapewniają osiągnięcie klas od XRC2 do XCR7, przy czym im większe w/c tym wyższa klasa. Ta liniowa zależność jest odwrotna do zależności „w/c- wytrzymałość” i w takim sensie wytrzymałość może być „zastępczą miarą” odporności na karbonatyzację, ale tylko w obrębie jednego składu betonu. Najniższą odporność wykazał beton na cemencie CEM II/AM(SLL)32,5R o nie dobranej ściśle zawartości składników, a najwyższą beton na tym samym cemencie ale przy zawartości 14 lub 17% żużla i 4 lub 3 % wapienia. Beton na cemencie CEM II/AS 32,5R miał pośrednie odporności.

## 6. Projektowanie konstrukcji z betonu ze względu na trwałość w warunkach innych agresji

Według znowelizowanej normy PN-EN 1992-1 [2], odporność betonów w innych klasach ekspozycji niż karbonatyzacja i agresja chlorkowa, winna być zapewniona przez dobrany celowo skład, a w szczególności w przypadku:

- zamrażania/rozmarzania - skład winien być zgodny z rekomendacjami znowelizowanej normy EN 206 [1],
- agresji chemicznej - winien być użyty beton o udokumentowanym składzie zapewniającym odporność na dany czynnik, a w przeciwnym przypadku należy zastosować wykładziny lub powłoki.

- ścierania – należy zastosować beton o składzie, który jest udokumentowany jako odporny na ścieranie w planowanym okresie użytkowania (w tym przypadku należy dodatkowo zwiększyć grubość otuliny ustalonej z innych warunków w zależności od klasy ekspozycji: dla XM1 o 5 mm, dla XM2 o 10 mm, dla XM3 o 15 mm), a w przeciwnym przypadku należy zastosować okładziny.

## 7. Podsumowanie

Wprowadzenie metody ERC do praktyki wymagać będzie obszernych badań betonów o typowych składach, wykonanych na polskich cementach. Ze względu na założoną trwałość konstrukcji 50 lub 100 lat konieczne będzie zastosowanie wiarygodnego przejścia od wyników badań krótkoterminowych do przewidywanego zasięgu korozji w ciągu tego właśnie długiego okresu. Zwrócić też trzeba uwagę na konieczność wykonywania znacznej liczby powtórzeń pozwalających na określenie miarodajnych, opracowanych statystycznie wartości XRC i XRS.

## Literatura

- [1] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [2] PN-EN 1992-1-1:2024 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu .Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków,
- [4] Geiker M.R., Hendriks M.A.N., Elsner B., Durability-based design: the European perspective, Sustainable and Resilient Infrastructure, 2023, vol. 8 no 2, 169-184
- [5] fib Model Code for Service life design, Bulletin 34, 2006
- [6] fib Model Code 2010, Bulletin 56, 2012
- [7] Gil-Martin L.M., Hdz-Gil L., Molero E., Hernández-Montes E., The relationship between concrete strength and classess of resistance against corrosion induced by carbonatisation: a proposal for the design of extreamly durable structures in accordance with Eurocode 2, *Sustainability* 2023, 15, 7976
- [8] Müller Ch.: How standards suport sustainability of cement and concretein Europe, *Cement and Concrete Research* 173 (2023) 107288
- [9] Georgescu D., Vacareanu R., Aldea A., Apostu A., Arion C., Assessment of the sustainability of concreto by ensuring performance during structure service life, *Sustainability* 2022, 14, 617
- [10] PN-EN 12390-10:2019-02 Badania betonu, Cz.10: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację w warunkach stężeń CO<sub>2</sub> na poziomie atmosferycznym
- [11] PN-EN 12390-12:2020-06 Badania betonu –, Cz. 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Przyspieszona metoda karbonatyzacji
- [12] PN-EN 12390-11:2015-09 Badania betonu – Cz. 11: Oznaczanie odporności betonu na wnikanie chlorków w warunkach jednokierunkowej dyfuzji
- [13] PN-EN 12390-18+A1:2025-04 Badania betonu – Cz. 18: Oznaczanie współczynnika migracji chlorków