

Izabela SKRZYPCZAK<sup>1</sup>  
 Lidia BUDA-OŻÓG<sup>2</sup>  
 Marta SŁOWIK<sup>3</sup>

## PROJEKTOWANIE ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH Z ZAŁOŻONĄ NIEZAWODNOŚCIĄ

Wartości docelowych poziomów niezawodności zalecane w różnych normatywach krajowych i zagranicznych nie są spójne i mogą prowadzić do różnej oceny niezawodności, bezpieczeństwa konstrukcji czy określenia prawdopodobieństwa zniszczenia. W artykule zestawiono zalecane docelowe wartości wskaźników niezawodności według różnych normatywów i zaleceń normowych, które odniesiono do poziomu niezawodności projektowanych elementów żelbetowych według podejścia probabilistycznego. Zalecane wartości wskaźników niezawodności są zazwyczaj podawane w przypadku dwóch okresów odniesienia: 1 roku oraz 50 lat (zgodnie z PN-EN 1990 czy z MC 2010) lub z uwzględnieniem zależności między docelowym poziomem niezawodności a konsekwencjami zniszczenia i kosztami zapewnienia bezpieczeństwa (zgodnie z ISO 2394 oraz zaleceniami JCSS). Prezentowane zalecenia normowe proponują różne wartości docelowego poziomu niezawodności. Wybór docelowego poziomu niezawodności to uwzględnienie możliwych skutków awarii w zakresie ryzyka dla życia lub uszkodzenia ciała, potencjalnych strat ekonomicznych, ekologicznych czy stopnia niedogodności społecznych. Wybór docelowego poziomu niezawodności uzależniony jest też od uwzględnienia kosztów i nakładów w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Przedmiotem analiz był żelbetowy słup ściskany, przyjęty jako wewnętrzny element wydzielony, usztywniony za pośrednictwem belki wieloprzęsłowej. Ze względu na duże różnice w wynikach przeprowadzonych rozważań, zwrócono szczególną uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, szczególnie dla konstrukcji, które mają być zrealizowane z betonu o niejednorodności większej niż 4 MPa.

**Słowa kluczowe:** beton, wskaźnik niezawodność, odchylenie standardowe, konstrukcje żelbetowe

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Izabela Skrzypczak, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, izas@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Lidia Buda-Ożóg, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, lida@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Marta Słowik, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, m.slowik@pollub.pl

## 1. Wprowadzenie

Docelowe poziomy niezawodności zalecane w różnych dokumentach krajowych i międzynarodowymi są niespójne w zakresie zalecanych wartości i kryteriów, według których odpowiednie wartości mają być przyjmowane. Optymalne poziomy niezawodności można uzależnić zarówno od kosztów konstrukcji i przewidywanych kosztów usunięcia awarii oraz okresu odniesienia czy projektowanego okresu użytkowania. Projektowany okres użytkowania to przyjęty w projekcie przedział czasu, w którym konstrukcja lub jej część ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem bez potrzeby większych napraw.

Wartości zalecanych okresów użytkowania ( 10 do 100 lat dla różnych rodzajów konstrukcji) są podane w EN 1990 [1]. Zalecane wartości wskaźników niezawodności podano dla dwóch referencyjnych okresów odniesienia 1 rok i 50 lat (tabela 1), bez wyraźnego rozróżnienia projektowanego okresu użytkowania, który na ogół różni się od rzeczywistego okresu odniesienia. Należy podkreślić, że okres odniesienia to wybrany przedział czasu przyjęty jako podstawa do oceny statystycznej określenia oddziaływań zmiennych w czasie i jeśli to możliwe oddziaływań wyjątkowych. Projektowany okres użytkowania rozumiany jest jako zakładany w projekcie okres czasu, w którym konstrukcja ma być eksploatowana zgodnie z jej przeznaczeniem bez większych napraw. Pojęcie okresu odniesienia jest więc zasadniczo różne od projektowanego okresu użytkowania. W analizach różnica między tymi dwoma pojęciami jest pomijana i traktowana marginalnie.

## 2. Minimalne wartości wskaźników niezawodności według różnych zaleceń normowych

Wartości miar niezawodności powinny być ustalane tak, aby minimalizować zagrożenie życia i zdrowia ludzi przebywających w rozważanym obiekcie i otoczeniu oraz ekonomiczne, społeczne i ekologiczne straty spowodowane zniszczeniem tego obiektu [5].

Wartości miar niezawodności w Eurokodach zostały określone na podstawie praktyki i tradycji budowlanej oraz na podstawie statystycznej analizy wyników badań. Kalibracje współczynników częściowych opiera się na wykorzystaniu metody wskaźnika niezawodności. Zadanie sprowadza się do takiego doboru zestawu współczynników częściowych, aby zachować docelową wartość wskaźnika niezawodności, którą dla stanów granicznych nośności uzależniono od klasy niezawodności konstrukcji i okresu odniesienia (tabela 1) [1].

Tabela 1. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg PN-EN 1990

Table 1. Recommended values of reliability index according to PN-EN 1990

Klasy niezawodności	Minimalne wartości wskaźnika niezawodności / prawdopodobieństwa zniszczenia	
	Okres odniesienia 1 rok	Okres odniesienia 50 lat
RC3	5,2 / 9,96E-08	4,3 / 8,54E-06
RC2	4,7 / 1,30E-06	3,8 / 7,23E-05
RC1	4,2 / 1,33E-05	3,3 / 0,00048

Należy zauważyć, że wartości prawdopodobieństwa zniszczenia w przypadku (1 roku i 50 lat), podane w tabeli 1, dla każdej klasy niezawodności odpowiadają tym samym poziomom niezawodności. Praktyczne zastosowanie tych wartości jest jednak znaczące dla określenia bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji i jest uzależnione od rozpatrywanego w okresie odniesienia, który może być związany z dostępnymi informacjami dotyczącymi statystycznego określenia oddziaływań zmiennych i wyjątkowych podstawowych (przyjęte obciążenia np. wiatr, trzęsienie ziemi itp.). Na przykład, biorąc pod uwagę konstrukcję klasy niezawodności RC2 i okres odniesienia 50 lat zalecany minimalny wskaźnik niezawodności to 3,8 i ta wartość może być stosowana pod warunkiem, że probabilistyczne modele zmiennych podstawowych są dostępne dla tego okresu odniesienia. Poziom niezawodności RC2 może być również osiągnięty, gdy okres odniesienia przyjęto dla 1 roku i minimalnej wartości wskaźnika niezawodności 4,7 przy założeniu modeli teoretycznych.

Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg Model Code 2010 [2] dla projektowanych konstrukcji według stanów granicznych nośności są zbieżne z zaleceniami PN-EN 1990 [1].

Tabela 2. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg MC 2010

Table 2. Recommended values of reliability index according to MC2010

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Wartość wskaźnika niezawodności 1rok / 50 lat
Wysokie	5,1/4,3
Średnie	4,7/3,8
Niskie	4,1/3,1

Wybór docelowego poziomu niezawodności to uwzględnienie możliwych skutków awarii w zakresie ryzyka dla życia lub uszkodzenia ciała, potencjalnych strat ekonomicznych, ekologicznych czy stopnia niedogodności społecznych. Wybór docelowego poziomu niezawodności uwzględnia koszty i nakłady

w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Ze względu na duże różnice w wynikach takich rozważań, należy zwrócić należytą uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, w zależności czy mają być projektowane czy modernizowane. Należy podkreślić, że wymagania i postulaty zrównoważonego rozwoju (np. recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów, zmniejszenia ilości odpadów) mogą być lepiej spełnione w przypadku projektowania nowych konstrukcji.

Bardziej szczegółowe zalecenia dotyczące przyjmowania docelowych wartości wskaźnika niezawodności zawarto w PN ISO 2394 [3] gdzie wartości docelowej niezawodności są odniesione do całego projektowanego okresu użytkowania (bez ograniczeń) i wiążą się nie tylko ze skutkami zniszczenia, ale również z względnymi kosztami środków zabezpieczających (tabela 2).

Tabela 3. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg ISO 2394

Table 3. Recommended values of reliability index according to ISO 2394

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Konsekwencje zniszczenia			
	małe	zauważalne	umiarkowane	duże
Wysokie	0,0	1,5	2,3	3,1
Średnie	1,3	2,3	3,1	3,8
Niskie	2,3	3,1	3,8	4,3

Szczególnie trudnym i ważnym zagadnieniem jest ocena skutków katastrofy konstrukcji, a próby jej wyceny w jednostkach monetarnych budzi wiele kontrowersji. W szczególności dotyczy to oceny wartości życia potencjalnych ofiar katastrofy budowlanej [5, 6].

Podobne wymagania do prezentowanych powyżej znajdują się w zaleceniach JCSS (Joint Committee on Structural Safety) i normie probabilistycznej [4] (tabela 3). Podane docelowe wskaźniki niezawodności związane są zarówno z konsekwencjami jak i ewentualnymi kosztami środków zapewnienia bezpieczeństwa, jednak są one ustalone dla okresu odniesienia 1 rok. Konsekwencje zniszczenia sformułowane w [4] są spójne z zaleceniami zawartymi w EN 1990 [1]). Oznaczane są symbolem  $p$  i zdefiniowane jako stosunek całkowitych kosztów (koszt konstrukcji powiększony o bezpośrednie koszty usunięcia awarii) do kosztów konstrukcji np:

- Klasa 2: Umiarkowane konsekwencje,  $p$  wynosi od 2 do 5 ; w przypadku wystąpienia awarii nastąpi przeciętne zagrożenie życia ludzkiego lub wystąpią znaczne konsekwencje ekonomiczne (np. budynki biurowe, budynki przemysłowe, budynki mieszkalne);
- Klasa 3: Duże konsekwencje:  $p$  wynosi od 5 do 10 ; biorąc pod uwagę awarię zagrożenie dla życia ludzkiego jest wysokie, lub konsekwencje ekonomiczne są znaczące ( np. głównie mosty, teatry, szpitale, budynki wysokie).

Zalecane wartości wskaźników niezawodności w normatywach [3] i [4] są niższe niż podane w EN 1990 [1] oraz MC 2010 [2], nawet dla "małych kosztów względnych" zapewnienia bezpieczeństwa. Należy zauważyć, że w PN-EN 1990 [1] podane są minimalne wartości wskaźników niezawodności dla dwóch okresów odniesienia 1 i 50 lat, które mogą być przyjęte jako wartości wskaźnika niezawodności dla projektowanego okresu użytkowania.

W ISO 2394 [3] zalecane są wartości wskaźników niezawodności, które powiązane są z projektowanym okresem użytkowania projektowania oraz badaniami i analizami probabilistycznymi. W zaleceniach JCSS [4] wartości wskaźnika niezawodności są zależne od okresu odniesienia 1 rok.

Tabela 4. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg JCSS (Probabilistic Model Code - Part 1)

Table 4. Recommended values of reliability index according to JCSS (Probabilistic Model Code - Part 1)

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Konsekwencje zniszczenia		
	małe	zauważalne	duże
Wysokie	3,1	3,3	3,7
Średnie	3,7	4,2	4,4
Niskie	4,2	4,4	4,7

W zaleceniach normowych brak jest jednak wyraźnego rozróżnienia między projektowanym okresem użytkowania i okresem odniesienia dla jednoznacznego przyjęcia docelowego poziomu niezawodności. Powstaje zatem pytanie jaki docelowy wskaźnik niezawodności należy stosować dla projektowanego okresu użytkowania innego niż 50 lat (na przykład 20 lat).

### 3. Przykład obliczeniowy

Przedmiotem analiz jest żelbetowy słup ściskany, przyjęty jako wewnętrzny element wydzielony, usztywniony za pośrednictwem belki wieloprzęsłowej, wysokości  $l = 2,8$  m. Słup obciążony jest podłużną siłą ściskającą pochodzącą od obciążeń stałych i zmiennych, o następujących parametrach:

**Obciążenia stałe:** współczynnik zmienności  $v_g = 5\%$ , obciążenie charakterystyczne -  $P_k = 2222$  kN, obciążenie średnie -  $\bar{P} = g_k/(1+1,645 \times v_g) = 2053$  kN, obciążenie obliczeniowe -  $P_d = 1,35 \times 2222 = 3000$  kN, odchylenie standardowe  $\sigma_p = 102,65$  kN.

**Obciążenia zmienne:** współczynnik zmienności  $v_q = 30\%$ , obciążenie charakterystyczne -  $Q_k = 952$  kN, obciążenie średnie -  $\bar{Q} = q_k/(1+1,645 \times v_q) = 637$  kN, obciążenie obliczeniowe -  $Q_d = 1,5 \times 0,7 \times 952 = 1000$  kN, odchylenie standardowe  $\sigma_Q = 191$  kN/m.

Ciężar własny słupa: współczynnik zmienności  $v_g = 5\%$ ,  $\bar{g} = g_k/(1+1,645 \times v_g) = 23,1 \text{ kN/m}$ ,  $g_k = 25 \text{ kN/m}$ ,  $g_d = 1,35 \times 25 = 33,75 \text{ kN/m}$ ,  $\sigma_g = 1,1 \text{ kN/m}$ .

Wymiar geometryczny: współczynnik zmienności  $v_d = 5\%$ ,  $h = h_m$ ,  $d = d_m$ ,  $b = b_m$ .

Cechy materiałowe:

Stal zbrojeniowa: współczynnik zmienności  $v_y = 8\%$ ,  $f_{ym} = f_{yk}/(1-1,645 \times v_y) = 575 \text{ MPa}$ ,  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ ,  $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_y = 46 \text{ MPa}$ .

Beton: C20/25,  $f_{cm} = 28 \text{ MPa}$ ,  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ ,  $f_{cd} = 14,29 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_c = 1,5 \text{ do } 5 \text{ MPa}$

W obliczeniach probabilistycznych posłużono się programem komputerowym Matlab. Z uwagi na smukłość słupa  $\lambda \leq \lambda_{lim}$ , pominięto wpływ efektów II rzędu a zdefiniowana funkcja stanu granicznego Z przyjmuje postać:

$$Z = N - N_d \quad (1)$$

gdzie:  $N_d = Q_{ds} + P_d + Q_d$

$Q_{ds} = b \times h \times l \times g_d$  - siła ściskająca wywołana ciężarem własnym słupa.

$N$  - nośność słupa określona przy założeniu ściskania „technicznie osiowego”.

Wg [7] przy mimośrodku  $e_0 = 0$  wzór na nośność słupa zmierza do wartości brzegowej określonej wzorem:

$$N = 0,98 \times b \times d \times f_{cm} + 2 \times A_s \times f_{ym} \quad (2)$$

Otrzymane wartości wskaźnika niezawodności, zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartość wskaźnika niezawodności  $\beta$  dla słupa żelbetowego

Table 5. Reliability index  $\beta$  for reinforced concrete column

Odchylenie standardowe (MPa)	Wartość wskaźnik niezawodności
1,5	7,61
2	6,83
3	5,49
4	4,48
4,86	3,84
5	3,76

Przyjęta klasa niezawodności zgodnie z PN-EN 1990 to RC2. Przyjęto średnie koszty zapewnienia bezpieczeństwa oraz zauważalne konsekwencje zniszczenia.

Tabela 6. Wartość wskaźnika niezawodności dla słupa ściskanego a spełnienie wymagań dla przyjętych poziomów niezawodności

Table 6. Reliability index  $\beta$  for reinforced concrete column and the requirements for the adopted reliability levels

Odchylenie standardowe [MPa]	C20/25 b=h=50 cm	Spełnienie wymagań dla niezawodności i różnych zaleceń normowych			
		PN-EN 1990 $\beta = 3,8$	MC 2010 $\beta = 3,8$	PN-ISO 2394 $\beta = 2,3$	JCSS-PMC $\beta = 4,2$
1,5	7,61	+	+	+	+
2	6,83	+	+	+	+
3	5,49	+	+	+	+
4	4,48	+	+	+	+
4,86	3,84	+	+	+	-
5	3,76	-	-	+	-

W zależności od funkcji i przeznaczenia budynku czy konstrukcji, konsekwencje jak i koszty zniszczenia mogą być różnie zdefiniowane.

Prezentowane zalecenia normowe proponują różne wartości docelowego poziomu niezawodności. Wybór docelowego poziomu niezawodności uzależniony jest od uwzględnienia kosztów i nakładów w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Ze względu na duże różnice w wynikach przeprowadzonych rozważań (Tabela 6), należy zwrócić szczególną uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, dla konstrukcji, które mają być zrealizowane z betonu o niejednorodności większej niż 4 MPa.

#### 4. Wnioski

Projektowanie elementów żelbetowych z założoną niezawodnością wiąże się z określeniem klasy niezawodności konstrukcji (tzn. dopuszczalnego prawdopodobieństwa zniszczenia), liczby potencjalnych ofiar i konsekwencji finansowych, społecznych i ekologicznych. Szczególnie trudnym i ważnym zagadnieniem jest ocena skutków katastrofy konstrukcji, a próby jej wyceny w jednostkach monetarnych budzi wiele kontrowersji.

W zaleceniach normowych brak jest wyjaśnienia zależności między projektowanym okresem użytkowania, okresem odniesienia i poziomem niezawodności oraz nie ma wytycznych pozwalających na sprecyzowanie poziomu niezawodności dla przyjętego projektowanego okresu użytkowania innego niż 50 lat.

Metody probabilistyczne umożliwiają praktyczne i efektywne projektowanie i ocenę niezawodności konstrukcji, zwłaszcza, gdy zachowanie konstrukcji jest opisane funkcją nieliniową gdyż wówczas metoda linearyzacji statystycznej może prowadzić do znacznych błędów.

## Literatura

- [1] PN-EN 1990:2004 Eurokod . Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] Model Code 2010, Volume 1, March 2010.
- [3] PN-ISO 2394:kwiecień 2000, Ogólne zasady niezawodności konstrukcji budowlanych.
- [4] Probabilistic Model Code - Part 1, Basis of Design, JCSS, [http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic\\_Model\\_Code.aspx](http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx)
- [5] Woliński Sz., Projektowanie elementów z założoną zawodnością, XLVI Krynica-Wrocław 2000, s. 159-166.
- [6] Woliński Sz., Ryzyko w projektowaniu konstrukcji z betonu, ZN PG, LII Krynica-Gdańsk 2000, s. 55-61.
- [7] Pawlikowski J: Podstawy projektowania probabilistycznego konstrukcji z betonu, Prace naukowe ITB, WITB, Warszawa 2004.

## DESIGN OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH ASSUMED RELIABILITY

### Summary

The target values of reliability levels recommended in various domestic and foreign standards are not consistent and they may lead to a different assessment of the reliability of structures. The paper summarizes the recommended target values for indicators of reliability according to different standards which refer to the level of reliability of reinforced concrete members according to the probability approach. Recommended values of reliability indicators are usually applied for two reference periods: 1 year and 50 years (in accordance with PN-EN 1990, or MC, 2010) or with regard to the relationship between the target level of reliability, the consequences of the damage and the cost of safety-security (according to ISO 2394 and recommendations JCSS). Presented standard recommendations proposed the different target values of reliability levels. The selection of the target values of reliability levels is connected with taking into account the possible consequences of damage connected with life injury, potential economic losses, as well as the degree of inconvenience. When selecting the target values of reliability levels, the costs and inputs are also taken into account in order to ensure the required values of reliability levels and to reduce the risk. In the performed analysis, a concrete column was considered. The column was defined as the separated, internal element, stiffened by a multi-span continuous beam. Due to the large differences in the obtained results of the analysis, the particular attention has been paid for the diversity of reliability levels for concrete structures, especially when standard deviation of concrete is greater than 4 MPa.

**Keywords:** concrete, reliability index, standard deviation, reinforced concrete structures

DOI:10.7862/rb.2014.116

*Przesłano do redakcji: 26.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*