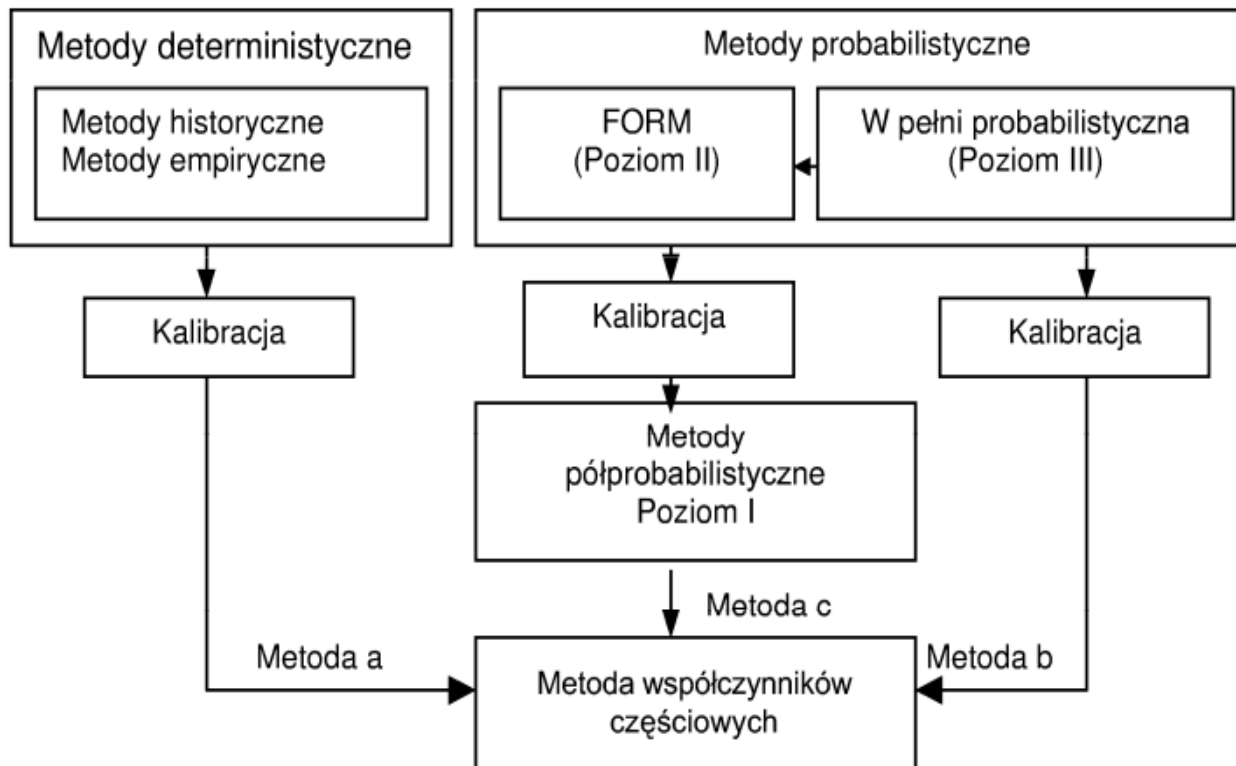


PODSTAWY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI

ĆWICZENIA PROJEKTOWE

MIARY NIEZAWODNOŚCI

MIARY NIEZAWODNOŚCI



Rysunek C1 – Przegląd metod niezawodności

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Tablica 4.1. Miary niezawodności i metody obliczeń konstrukcji

Poziom obliczeń	Miara niezawodności		Metoda obliczania
	Definicja	Nazwa	
0*	$s_1 = \sigma_{kr} / \sigma_{dop}$ $s_2 = P_{kr} / P_{max}$	globalny współczynnik bezpieczeństwa	naprężeń dopuszczalnych obciążeń krytycznych
1	$S_d / S_k \geq \gamma_f, R_d / R_k \geq \gamma_m$ $S_d - S_k \geq \Delta_S, R_d - R_k \geq \Delta_R$	częściowe (rozdzielone) współczynniki (odstęp) bezpieczeństwa	półprobabilistyczna metoda stanów granicznych
2	$\frac{1}{v_\Delta} \approx \frac{\ln \tilde{\gamma}}{v_\gamma} \geq \beta$ $\Delta = R - S$ $\gamma = R / S$	wskaźnik niezawodności	uproszczone metody probabilistyczne (metody momentów, metody bezrozkładowe, teorie wskaźnika niezawodności (β))
	$\frac{\mu_S}{S_d} \exp \beta_S \approx v_R \exp \beta_R \geq k$	skala zagrożenia	-
3	$F'_\Delta(0) = F'_\gamma(1) \geq Q$ $F(S) F(R) \geq \Omega$	niezawodność (prawdopodobieństwo nieprzekroczenia wartości granicznych)	metody probabilistyczne; analityczne lub symulacyjne (Monte Carlo)
4**	$Z_1 = R - S \geq 0$ $Z_2 = R / S \geq 1$	postulowane miary i metody uwzględniające subiektywną oraz nieprecyzyjną informację o działaniach, materiałach, modelach, błędach ludzi itp.	

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metoda obciążeń krytycznych została sformułowana w drugiej połowie XVII wieku przez Coulomba. Wyznaczał on obciążenie niszczące konstrukcję P_{\max} z warunku równowagi granicznej, do którego odnosił wartość maksymalnego obciążenia oddziałującego na analizowaną konstrukcję. Współczynnik bezpieczeństwa s ustalał zaś za pomocą obliczeń porównawczych dla konstrukcji zrealizowanych, które sprawdziły się w praktyce. Jest on stosunkiem obu tych wartości i można go opisać następującym wzorem:

$$s = \frac{P_{kr}}{P_{\max}} \quad (1)$$

gdzie:

s - globalny współczynnik bezpieczeństwa

P_{kr} - obciążenie krytyczne

P_{\max} - obciążenie maksymalne

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metoda naprężeń dopuszczalnych jest oparta na założeniu, że o bezpieczeństwie całej konstrukcji decyduje wartość naprężenia w jednym jej miejscu. Założenie to jest dyskusyjne, gdyż często prowadzi do przewymiarowania konstrukcji. Pojęcie naprężeń dopuszczalnych pojawiło się w XX wieku jako granicy, której naprężenie rzeczywiste w elemencie konstrukcyjnym nie mogą przekroczyć. Navier uważał, że sama znajomość siły niszczącej nie jest wystarczająca do bezpiecznego projektowania konstrukcji, dlatego też zalecał ustalić dopuszczalną siłę, którą można obciążyć konstrukcję tak, żeby nie wywołała w niej niepożądanych efektów. Dlatego też wprowadzono pojęcie naprężeń dopuszczalnych σ_{dop} i sformułowano nowy warunek bezpieczeństwa konstrukcji:

$$s = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{dop}} \quad (2)$$

gdzie:

s - globalny współczynnik bezpieczeństwa

σ_{dop} - naprężenie maksymalne

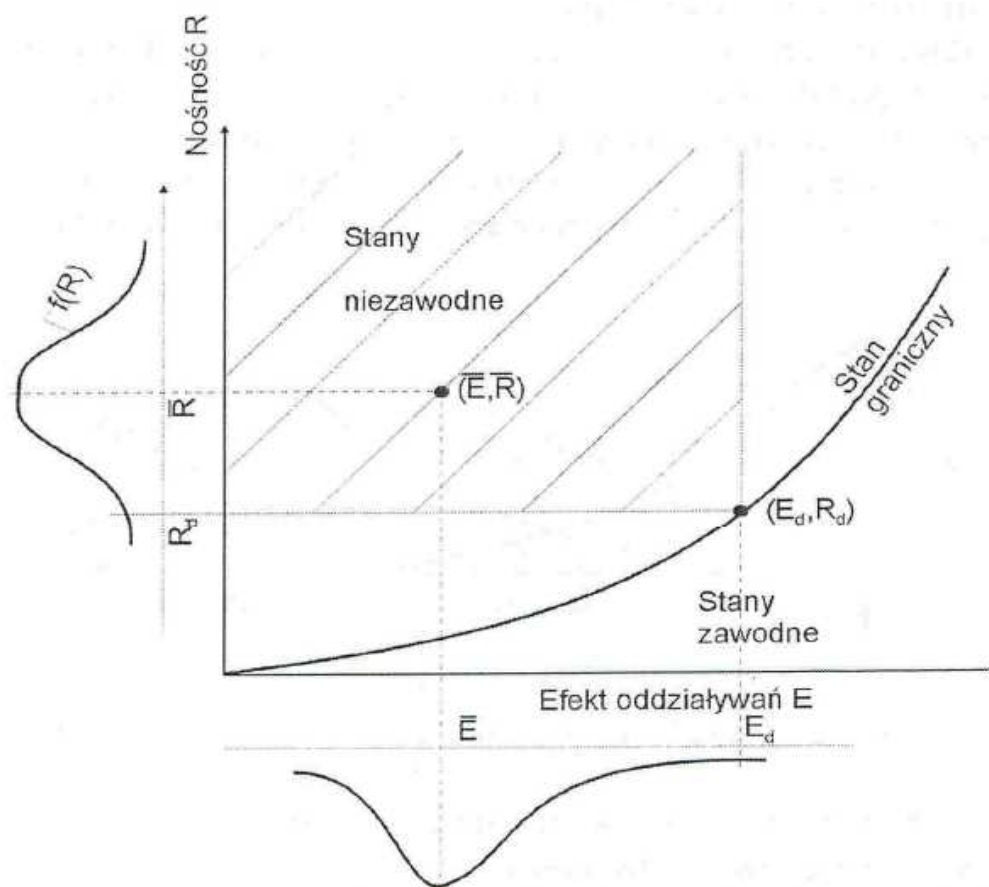
σ_{kr} - naprężenia krytyczne

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metoda stanów granicznych została sformułowana przez Streleckiego w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku. Metoda ta zakładała trójwymiarowy układ w losowej przestrzeni zdarzeń: obciążenia, wytrzymałość materiałów oraz niepewność modelu obliczeniowego. Dla zapewnienie założonego poziomu bezpieczeństwa ustalono relację między dwoma głównymi parametrami tj. obciążenia i wytrzymałość materiałów oraz wprowadzono częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla każdego z wymiarów. Metoda ta w XX wieku w Europie Wschodniej i Środkowej stała się podstawą normowych przepisów dotyczących projektowania konstrukcji.

Metoda stanów granicznych zapewnia wymagany poziom niezawodności konstrukcji i jej elementów poprzez zastosowanie **częściowych współczynników bezpieczeństwa** modyfikujących charakterystyczne lub nominalne wartości zmiennych decydujących o stanie konstrukcji. Stany graniczne to stany, po których przekroczeniu konstrukcja przestaje spełniać podstawowe wymagania. Po przekroczeniu stanów granicznych konstrukcja może ulec częściowemu lub całkowitemu zniszczeniu lub/i nie będzie spełniać wymogów użytkowania i estetyki konstrukcji.

MIARY NIEZAWODNOŚCI



MIARY NIEZAWODNOŚCI

Przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności należy wykazać, że:

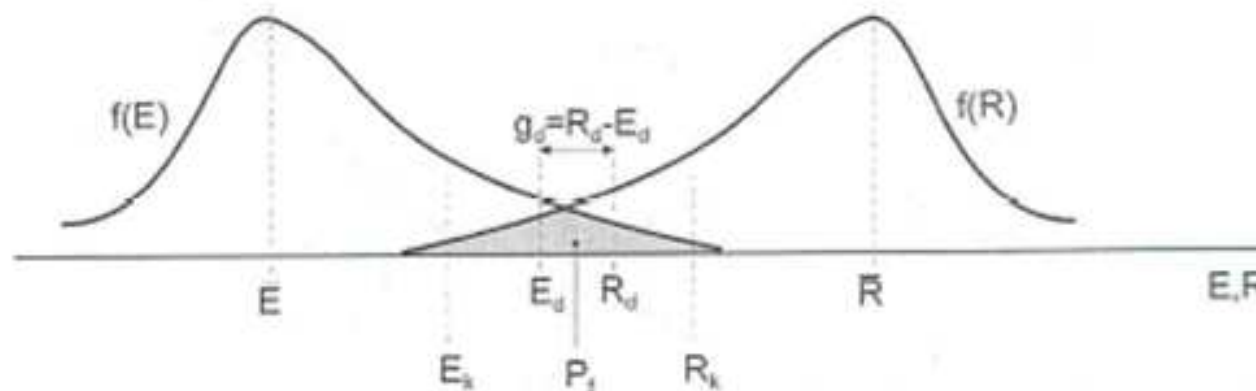
$$E_d \leq R_d$$

gdzie:

E_d - wartość obliczeniowa efektu oddziaływań

R_d - wartość obliczeniowa nośności konstrukcji

Metody poziomu I pozwalają na jedynie alternatywną ocenę niezawodności konstrukcji (zawodna lub niezawodna), bez możliwości oceny prawdopodobieństwa przekroczenia stanów granicznych.



MIARY NIEZAWODNOŚCI

Efekt oddziaływań można wyrazić w postaci ogólnej:

$$E_d = \gamma_{sd} E(\gamma_{fi} F_{rep,i}; a_d) \quad \text{dla } i \geq 1 \quad (5)$$

gdzie:

a_d - wartość obliczeniowa wielkości geometrycznej

E - efekt oddziaływań

E_d - wartość obliczeniowa efektu oddziaływań

$F_{rep,i}$ - wartość reprezentatywna oddziaływania

γ_{fi} - współczynnik częściowy dla oddziaływań, uwzględniający możliwość niekorzystnych odchyłeń wartości oddziaływań od wartości reprezentacyjnej

γ_{sd} - współczynnik częściowy uwzględniający niepewności modelu oddziaływań

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Nośność można wyrazić w postaci ogólnej:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(; a_d) = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left(\frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d\right) \text{ dla } i \geq 1 \quad (6)$$

gdzie:

a_d - wartość obliczeniowa wielkości geometrycznej

R - nośność

R_d - wartość obliczeniowa nośności

$X_{d,i}$ - współczynnik obliczeniowa właściwości materiału „i”

$X_{k,i}$ - współczynnik charakterystyczna właściwości materiału „i”

$\gamma_{m,i}$ - współczynnik częściowy dla materiału lub wyrobu, uwzględniający niekorzystne odchyłki ich właściwości od wartości charakterystycznych

γ_{Rd} - współczynnik częściowy uwzględniający niepewności modelu nośności oraz odchyłek geometrycznych

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metoda wskaźnika niezawodności należy do analitycznych metod FORM (First Order Reliability Method). Zakłada się w niej, że wszystkie losowe zmienna stanu X_i są określone za pomocą dwóch parametrów rozkładu normalnego lub ekwiwalentnego normalnego \bar{X} , σ_X :

$$X_i = N \text{ lub } LN (\bar{X}, \sigma_X) \quad (16)$$

gdzie:

X_i - wartość zmiennej losowej

\bar{X} - wartość średnia zmiennej losowej

σ_X - odchylenie standardowe zmiennej losowej

Wskaźnik niezawodności β to standaryzowana zmienna losowa wyrażająca warunek stanu granicznego $g = R - E = 0$:

$$\beta = \left| \frac{(0 - \bar{g})}{\sigma_g} \right| = \frac{\bar{g}}{\sigma_g} = \frac{1}{v_g} \quad (17)$$

gdzie:

\bar{g} - wartość średnia odstęp niezawodności

v_g - zmienność odstęp niezawodności

β - wskaźnik niezawodności

σ_g - odchylenie standardowe odstęp niezawodności

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Miara niezawodności β jest związana z prawdopodobieństwem zniszczenia (przekroczenia stanu granicznego) elementu lub konstrukcji opisaną zależnością:

$$p_f = \Phi(-\beta) = P(g \leq 0) = P(g \leq \bar{g} - \beta\sigma_g) \quad (18)$$

gdzie:

g - odstęp niezawodności

\bar{g} - wartość średnia odstęp niezawodności

p_f - prawdopodobieństwo zniszczenia elementu lub konstrukcji

β - wskaźnik niezawodności

σ_g - odchylenie standardowe odstęp niezawodności

$\Phi(\dots)$ - funkcja Laplace'a

W tej zależności zmienna g ma rozkład normalny $N(\bar{g}, \sigma_g)$. Dla innych rozkładów wskaźnik niezawodności β jest tylko umowną miarą niezawodności:

$$p_s = 1 - p_f \quad (19)$$

gdzie:

p_f - prawdopodobieństwo zniszczenia elementu lub konstrukcji

p_s - prawdopodobieństwo przetrwania elementu lub konstrukcji

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metody poziomu 3 stanowią te metody, w których obliczenia bezpieczeństwa konstrukcji są dokonywane w celu określenia matematycznie dokładnego prawdopodobieństwa awarii konstrukcji lub jej wyszczególnionego elementu strukturalnego, przy których to metodach korzysta się z pełnego opisu probabilistycznego wspólnego występowania wszelkich branych pod uwagę w procesie projektowania wartości niepewności parametrów materiałów i obciążeń.

Obliczenia te nie mają żadnych algorytmów upraszczających i odwołują się do pełnej analizy problemu, skupiającej się przede wszystkim na dostarczeniu rozciągniętego opisu możliwości awarii konstrukcji, a także na całkowaniu wielowymiarowych łącznych funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych (reprezentujących obciążenia projektowe i wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych), rozciągających się na obszarze, na którym przeprowadzana jest analiza bezpieczeństwa konstrukcji. Niezawodność określana na bazie metod poziomu trzeciego jest najczęściej wyrażana w postaci odpowiednich miar bezpieczeństwa, takich jak wskaźniki niezawodności i prawdopodobieństwo awarii.

Metody probabilistyczne III poziomu formalnie nie są używane w przepisach szacowania bezpieczeństwa konstrukcji. Najczęściej są tylko pośrednio obecne w przepisach normowych i resortowych poprzez narzucenie wymagań odnośnie trwałości projektowanych obiektów. Metody te stosowane są w takich dziedzinach budownictwa jak: dynamice konstrukcji, mechanice kruchego pęknięcia czy nośności granicznej konstrukcji. Ich zastosowanie polega na oszacowaniu prawdopodobieństwa zniszczenia konstrukcji p_f - zaistnienia stanu granicznego dla budowlanych konstrukcji inżynierskich. Ponadto stanowią podstawę do kalibracji wartości współczynników bezpieczeństwa stosowanych w metodach probabilistycznych niższych poziomów. Do metod poziomu 3 można zaliczyć następujące metody:

- metody modelowe,
- metody symulacyjne.

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Metody poziomu czwartego należą do zaawansowanych metod szacowania niezawodności konstrukcji. Są stosowane do projektów, w których z definicji zakłada się szczególną dokładność postępowania odnośnie zasad wiedzy inżynierskiej i analizy ekonomicznej. Projekty takie mają wówczas, oprócz standardowego zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji w sensie stricte inżynierskim, rozważać **koszta i korzyści z budowy w sensie społeczno – ekonomicznym**, między innymi: sensowność i możliwość zapewnienia konserwacji i napraw konstrukcji lub jej elementu, szybkości narastania odsetek od zapożyczonego kapitału inwestycyjnego w stosunku do wypracowywanego przez konstrukcję zysku, konsekwencje awarii konstrukcji lub urządzeń w niej działających dla społeczeństwa, ludności cywilnej lub środowiska, itp. Sztandarowymi obiektami inżynierskimi wymagającymi projektowania poruszającego się na poziomie czwartym analizy bezpieczeństwa konstrukcji są fundamenty specjalne dla konstrukcji wrażliwych na wpływy środowiskowe lub drgania spowodowane obciążeniami wyjątkowymi, takich jak elektrownie jądrowe, budynki wysokościowe, budynki na terenach zagrożonych sejsmiką skorupy ziemskiej, przyczółki i oparcia mostów autostradowych, wieże transmisji elektryczności, wieże i maszty radiowe i telekomunikacyjne, itd.

Do metod tej grupy można zaliczyć między innych rozmytą ocenę bezpieczeństwa konstrukcji, wielokryterialną ocenę czy metodę opartą na analizie ryzyka.

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Definicja klas konsekwencji [PN-EN 1990]

Klasa konsekwencji	Opis klasy	Przykłady konstrukcji budowlanych i inżynierskich
CC3	Wysokie zagrożenie życia ludzkiego lub bardzo duże konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	Widownie, budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są wysokie
CC2	Przeciętne zagrożenie życia ludzkiego lub znaczne konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	budynki mieszkalne i biurowe oraz budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są przeciętne
CC1	Niskie zagrożenie życia ludzkiego lub małe lub nieznaczne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	budynki rolnicze, w których ludzie zazwyczaj nie przebywają oraz szklarnie

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Minimalne wartości wskaźnika niezawodności dla stanów granicznych nośności i maksymalne prawdopodobieństwa zniszczenia [PN-EN 1990]

Klasa niezawodności	Minimalne wartości β / maksymalne wartości P_f	
	okres odniesienia 1 rok	okres odniesienia 50 lat
RC3	$\beta = 5,2; P_f \cong 9,9 \cdot 10^{-8}$	$\beta = 4,3; P_f \cong 8,5 \cdot 10^{-6}$
RC2	$\beta = 4,7; P_f \cong 1,3 \cdot 10^{-6}$	$\beta = 3,8; P_f \cong 7,1 \cdot 10^{-5}$
RC1	$\beta = 4,2; P_f \cong 1,2 \cdot 10^{-5}$	$\beta = 3,3; P_f \cong 4,8 \cdot 10^{-4}$

MIARY NIEZAWODNOŚCI

Tablica 4.73. Typowe wartości współczynników zmienności właściwości materiałów, wymiarów geometrycznych i nośności wybranych elementów z betonu

Materiał/element	Właściwość lub rodzaj elementu	Współczynnik zmienności
Beton	wytrzymałość na ściskanie	0,06–0,18
	wytrzymałość na rozciąganie	0,15–0,25
	moduł sprężystości	0,07–0,26
	odkształcenie graniczne (ściskanie)	0,15–0,33
	energia pękania (rozciąganie)	0,06–0,33
Stal zbrojeniowa	granica plastyczności	0,02–0,09
Stal sprężająca	wytrzymałość na rozciąganie	0,01–0,05

Na podstawie wyników badań statystycznych w literaturze i normach projektowania przyjmuje się najczęściej, że podstawowe oddziaływania na budynki można uznać za zmienne losowe o rozkładach (rys. 4.132) i współczynnikach zmienności v :

- stałe i quasi-stałe; rozkład normalny (N), $v = 0,06–0,10$,
- zmienne długotrwałe; rozkład gamma (Γ), $v = 0,18–0,40$,
- zmienne krótkotrwałe; rozkład wykładniczy (E), $v = 0,20–0,80$,
- śnieg, wiatr; rozkład Gumbela (G), $v = 0,40–1,00$.

MIARY NIEZAWODNOŚCI

(1) Wartość obliczeniową właściwości X uzyskuje się z wzoru:

$$X_d = \eta_d \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} m_X \{1 - k_n V_X\} \quad X_m = X_k / (1 - 1,645 v_X) \quad (D.1)$$

gdzie:

η_d – wartość obliczeniowa współczynnika konwersji.

UWAGA Ocena danej wartości współczynnika konwersji bardzo zależy od rodzaju badań i rodzaju materiału.

Wartość k_n można znaleźć w tablicy D1.

(2) Przy korzystaniu z tablicy D1 należy rozważyć jeden z dwóch następujących przypadków:

- Wiersz „ V_X znane” zaleca się stosować jeśli współczynnik zmienności V_X , albo jego rzeczywista górna granica, jest znana na podstawie informacji wcześniejszych.

UWAGA Informacje wcześniejsze mogą być uzyskane z oceny poprzednich badań w porównywalnych sytuacjach. Co jest „porównywalnym”, wymaga określenia na podstawie oceny inżynierskiej (patrz D7.1(3)).

- Wiersz: „ V_X nieznane” zaleca się stosować jeśli współczynnik zmienności V_X a priori na podstawie wcześniejszych badań i jest estymowany z próby według wzoru:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2 \quad (D.2)$$

$$V_x = s_x / m_x \quad (D.3)$$

(3) Współczynnik częściowy γ_m zaleca się ustalać zgodnie z zakresem zastosowania wyników badań.

Tablica D1 – Wartości k_n dla 5 % wartości charakterystycznej

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X znane	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_X nieznane	–	–	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

UWAGA 1 Tablicę opracowano przy założeniu rozkładu normalnego.



POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
Im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ!