

# PODSTAWY PROJEKTOWANIA I ODDZIAŁYWANIA NA KONSTRUKCJE

## WYKŁAD 4

*Zasady projektowania konstrukcji  
budowlanych cz. 1*

**dr inż. Paweł Niewiadomski**

pawel.niewiadomski@pwr.edu.pl

bud. G2D, pok. 5.78

<https://wbliw.pwr.edu.pl/pracownicy/pawel-niewiadomski>



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska

# Niezawodność konstrukcji i projektowy okres użytkowania

**Niezawodność konstrukcji** jest to jej zdolność do jej bezawaryjnego funkcjonowania w przewidzianym, tzw. projektowanym okresie użytkowania. Jest ona zasadniczym kryterium jakości i głównym (normatywnym) postulatem formułowanym w odniesieniu do konstrukcji.

**Projektowy okres użytkowania** jest to przyjęty w projekcie przedział czasu, w którym konstrukcja ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidzianym utrzymaniem, bez potrzeby napraw. Zgodnie z PN-EN 1990 jest on przyjmowany stosownie do rodzaju obiektu budowlanego wedle pięciu kategorii (1÷5) poczynając od konstrukcji tymczasowych (kategoria do 10 lat) a kończąc na budynkach monumentalnych (kategoria do 100 lat). W przypadku zwykłych, powszechnie stosowanych konstrukcji budowlanych zalecany projektowy okres użytkowania wynosi 50 lat. Orientacyjny projektowe okresy użytkowania podano w tabl. 1.

Tabl. 1. Orientacyjny projektowy okres użytkowania wg PN-EN 1990

Kategoria projektowego okresu użytkowania	Orientacyjny projektowy okres użytkowania [lata]	Przykłady
1	10	Konstrukcje tymczasowe*
2	od 10 do 25	Wymienialne części konstrukcji np. belki podsuwnicowe, łożyska
3	od 15 do 30	Konstrukcje rolnicze i podobne
4	50	Konstrukcje budynków i inne konstrukcje zwykłe
5	100	Konstrukcje budynków monumentalnych, mosty i inne konstrukcje inżynierskie

\* Konstrukcje lub ich części, które mogą być demontowane w celu ponownego zamontowania, nie należy uważać za konstrukcje tymczasowe

# Zasady projektowania konstrukcji

Konstrukcję należy zaprojektować oraz wykonać w taki sposób, aby w prognozowanym okresie użytkowania, z należytym poziomem niezawodności i bez nadmier-nych kosztów eksploatacji: przejmowała wszystkie oddziaływania oraz wpływy, których pojawienia się można oczekiwać podczas jej wykonania i użytkowania i pozostała przydatna do przywidzianego w projekcie okresu użytkowania. Praktycznie oznacza to, że należy zagwarantować konstrukcji należytą

- nośność (niezbędną wytrzymałość, a także odporność ogniową),
- użytkowalność (m.in. odpowiednią sztywność) oraz
- trwałość.

Rozróżnia się stany graniczne:

- nośności, związany z katastrofą lub inną formą zniszczenia konstrukcji nośnej; jest to tzw. I stan graniczny,
- użytkowalności, po przekroczeniu których konstrukcja przestaje spełniać stawiane jej wymagania użytkowe np.: deformacje, drgania; jest to tzw. II stan graniczny.

# Stany graniczne nośności SGN (ULS)

Należy sprawdzać następujące stany graniczne ULS oraz formy zniszczenia:

ULS – EQU - utrata równowagi konstrukcji lub jakiegokolwiek jej części, uważanej za ciało sztywne (np. przewrócenie),

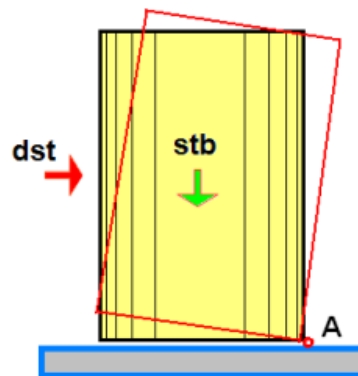
ULS – STR - zniszczenie na skutek nadmiernego odkształcenia, przekształcenia się w mechanizm, zniszczenia materiałowego, utratę stateczności konstrukcji lub jej części, łącznie z podporami i fundamentami,

ULS – GEO - zniszczenie lub nadmierne deformacje podłoża,

ULS – FAT - zniszczenie zmęczeniowe.

Przykład schematu sprawdzania utraty równowagi konstrukcji ULS – EQU („na wywrócenie”) pokazano na rys.10.

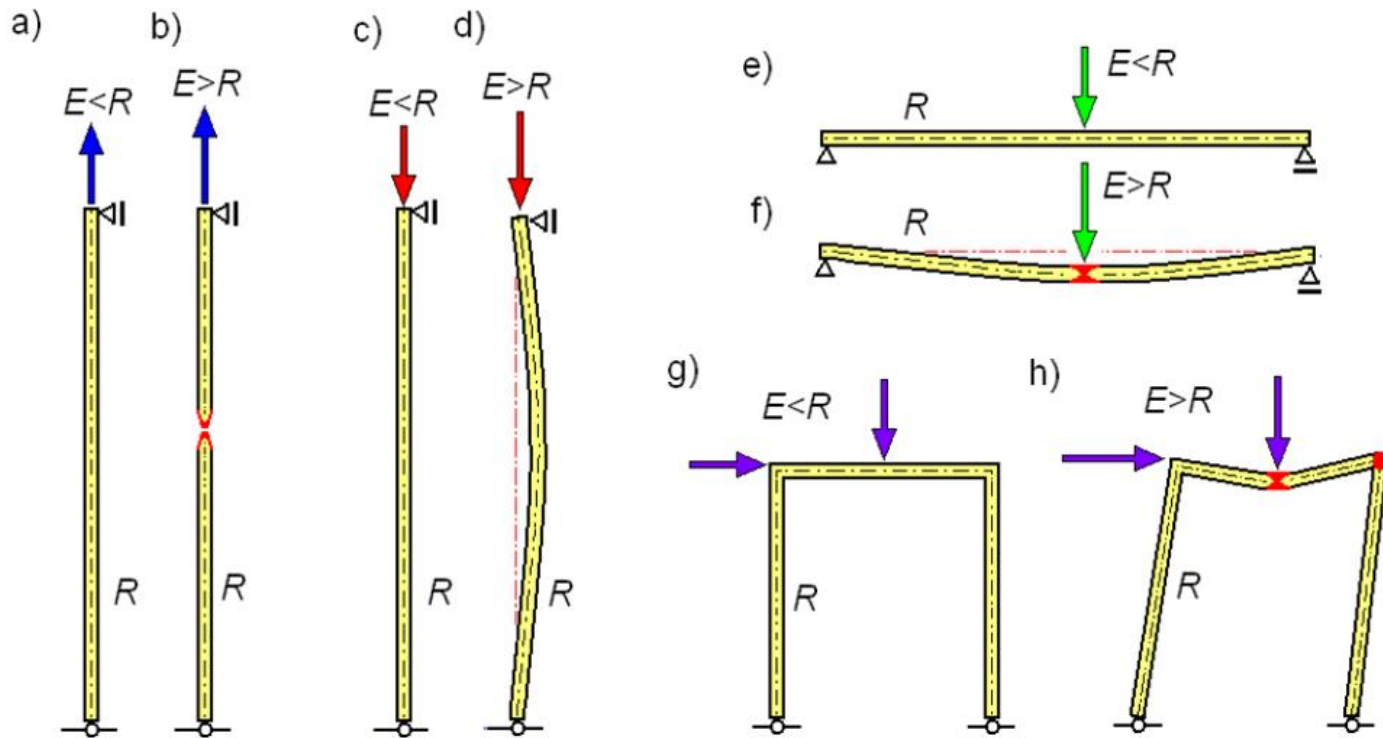
Rys. 10. Schemat sprawdzania utraty równowagi konstrukcji „na wywrócenie”



Jako miarodajne w ocenie stanu granicznego nośności ULS – EQU jest sprawdzenie warunku równowagi konstrukcji „na wywrócenie”:

$$E_{d,dest} \leq E_{d,stb} , \quad (8)$$

gdzie:  $E_{d,dest}$ ,  $E_{d,stb}$  - odpowiednio wartości obliczeniowe efektu oddziaływań destabilizujących i stabilizujących.



Rys. 11. Przykłady wyczerpania stanu granicznego nośności prętów: rozciąganego (b), ściskanego (d), zginanego (f) oraz ramy (h)

# ULS – STR i ULS – GEO

W przypadku oceny stanów granicznych ULS – STR oraz ULS – GEO kryteria nośności mają następującą postać:

$$E_d(F_d) \leq R_d, \quad (9)$$

gdzie:

$E_d(F_d)$  – wartość obliczeniowa efektu oddziaływań tj. sił wewnętrznych w konstrukcji (np.  $M_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$ ) obliczonych dla obciążeń obliczeniowych  $F_d$ ,

$R_d$  – wartość obliczeniowa odpowiedniej nośności konstrukcji (przekroju, elementu).

Ocenę bezpieczeństwa konstrukcji (8) oblicza się jako stopień wyłączenia (wykorzystania) nośności jej przekrojów lub elementów ze wzoru:

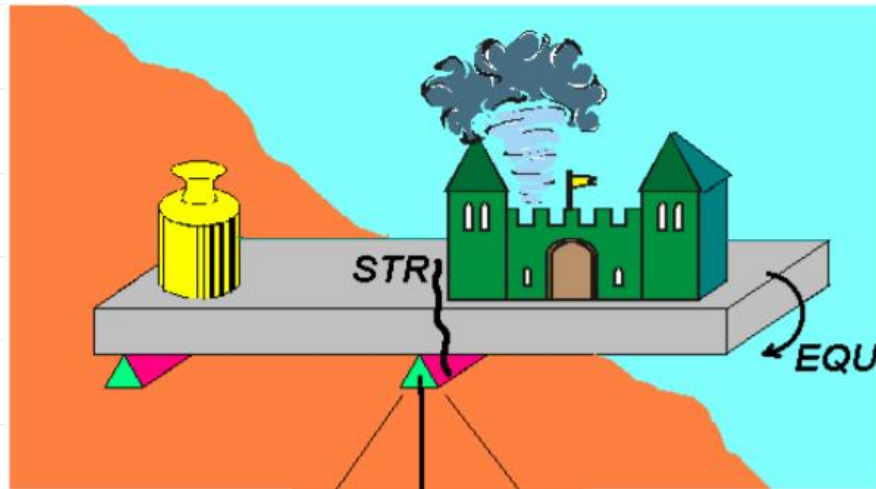
$$\frac{E_d}{R_d} \leq 1. \quad (10)$$



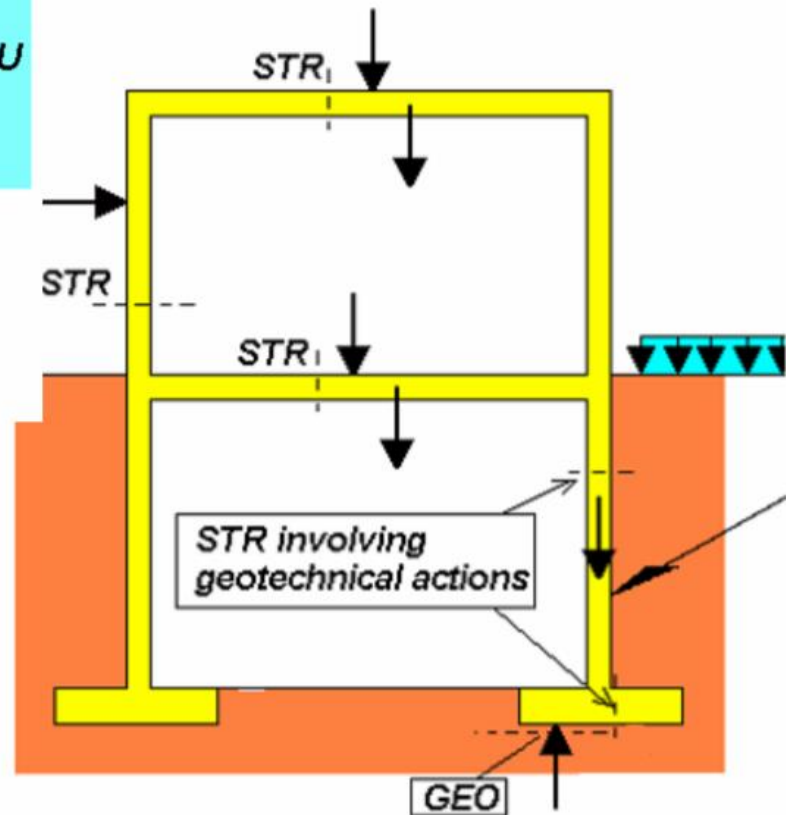
Stan graniczny nośności zniszczenia zmęczeniowego ULS – FAT sprawdza się analizując wytężanie materiału  $(\Delta\sigma, \Delta\tau)$  w punkcie:

$$\Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_R, \quad \Delta\tau_E \leq \Delta\tau_R. \quad (11)$$

# Stany graniczne nośności SGN (ULS)



**Ultimate limit states**



# Stan graniczny użytkowości SGU (SLS)

Rozpatrując stany graniczne użytkowości należy wykazać, że spełnione są odpowiednie kryteria dotyczące ugięć i deformacji, drgań i lokalnych uszkodzeń konstrukcji. Rozróżnia się odwracalne i nieodwracalne stany graniczne użytkowości.

Nieodwracalne stany graniczne użytkowości – stany graniczne, w których pewne konsekwencje oddziaływań, przekraczające określone wymagania użytkowe, pozostają po ustąpieniu tych oddziaływań.

Odwracalne stany graniczne użytkowości – stany graniczne, w których nie pozostają konsekwencje oddziaływań, przekraczające określone wymagania użytkowe po ustąpieniu tych oddziaływań.

Rozpatrując stany graniczne użytkowości należy wykazać, że spełnione są odpowiednie kryteria sztywności konstrukcji. Stany graniczne dotyczące:

- funkcji konstrukcji lub jego elementu w warunkach zwykłego użytkowania,
- komfortu użytkowników,
- wyglądu (ugięcia, rysy) obiektu budowlanego,

są stanami granicznymi użytkowości, które w PN-EN 1990 oznaczono SLS (skrót SLS od angielskiego *serviceability limit states* – stan graniczny użytkowości).

# Stan graniczny użyteczności SGU (SLS)

W ocenie stanu granicznego użyteczności należy analizować kryteria:

- ugięć, deformacji (wpływających na wygląd, komfort użytkowników lub funkcję konstrukcji – w tym funkcjonowanie urządzeń, np. „klinowanie się suwnicy”),
- drgań (powodujących dyskomfort ludzi lub/i ograniczających przydatność użytkową konstrukcji),
- lokalnych uszkodzeń (wpływających negatywnie na wygląd, trwałość lub funkcjonowanie konstrukcji).

Związane z użytecznością konstrukcji kryteria sztywności (ugięcia, deformacje, częstości drgań, lokalne uszkodzenia) sprawdza się ze wzoru

$$E_{k,ser}(F_k) \leq C_d, \quad (12)$$

gdzie:

$E_{k,ser}(F_k)$  – wartość efektu oddziaływań (parametry sztywnościowe obliczone dla obciążeń charakterystycznych  $F_k$ ),

$C_d$  – graniczna wartość obliczeniowa odpowiedniego parametru dotyczącego użyteczności.

# Stan graniczny użytkowości SGU (SLS)



# Wartości obliczeniowe nośności

W uproszczonym ujęciu aplikacyjnym, nośność obliczeniową elementu według zasad przyjętych w Eurokodach można przedstawić w następującej postaci

$$R_d = a \cdot C \cdot \frac{f_k}{\gamma_{Rd}}, \quad (13)$$

gdzie:

$C$  – charakterystyka geometryczna przekroju pręta; np.  $C = A$  – w przypadku rozciągania ( $A$  – pole przekroju pręta),  $C = W$  – w przypadku zginania ( $W$  – wskaźnik zginania przekroju pręta),

$a$  – współczynnik modelu wyężenia elementu np. współczynnik wyboczeniowy,

$f_k$  – wartość charakterystyczna parametru wytrzymałościowego materiału,

$\gamma_{Rd}$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający niepewność modelu nośności i odchyłek geometrycznych (do oceny stanu granicznego nośności).

# Wartości obliczeniowe nośności

Wartości charakterystyczne parametrów wytrzymałościowych materiałów  $f_k$  (np. wytrzymałość betonu  $f_{ck}$ , wytrzymałości stali zbrojeniowej  $f_s$ , granicy plastyczności stali  $f_y$ , wytrzymałości stali na rozciąganie  $f_u$ ) podano w PN-EN 1991÷PN-EN 1999.

Współczynnik częściowy bezpieczeństwa  $\gamma_{Rd}$  dotyczy przede wszystkim materiału. Jest on przyjmowany stosownie do zastosowanego rodzaju materiału (beton, stal, drewno itd.) oraz w zależności od analizowanego stanu wyężenia konstrukcji - według postanowień PN-EN 1992÷PN-EN 1999. Współczynnik częściowy bezpieczeństwa  $\gamma_{Rd}$  na przykład w przypadku konstrukcji:

- betonowych wg PN-EN 1992 przyjmuje się jako  $\gamma_C = 1,4$ ,
- stalowych wg PN-EN 1993 przyjmuje się jako  $\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}, \dots, \gamma_{M7} = 1,0 \div 1,25$ .

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

Zależnie od zmienności w czasie i sposobu działania, oddziaływania konstrukcji budowlanych według PN-EN 1990 dzieli się na:

- stałe  $G$  - w tym ciężar własny, a także oddziaływania pośrednie (np. nierównomierne osiadanie, skurcz  $P$ ),
- zmienne  $Q$  - użytkowe, technologiczne, śnieg, wiatr,
- wyjątkowe  $A$  - wybuchy, uderzenia, trzęsienie ziemi itp.

**Obciążenia stałe** to obciążenia, których wartość, kierunek i położenie pozostają niezmiennie w czasie użytkowania budowli, jej montażu lub remontu. Pochodzą one nie tylko od ciężaru konstrukcji, ale także przegród budowlanych, warstw izolacyjnych, wykończeniowych i stałych elementów wyposażenia. Określone je w PN-EN 1991-1-1.



# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

**Obciążenia zmienne** mogą zmieniać wartość, kierunek lub położenie w czasie użytkowania budowli bądź w innym określonym okresie. Są określone w PN-EN 1991.

Zależnie od długości okresów działania, obciążenia dzieli się na:

- w całości długotrwałe (np. ciężar własny urządzeń związanych na stałe z użytkowaniem budowli),
- w części długotrwałe (np. obciążenia stropów w pomieszczeniach mieszkalnych, magazynowych, przemysłowych),
- w części krótkotrwałe (np. obciążenia śniegiem, wiatrem, temperaturą pochodzenia klimatycznego).

**Obciążenia wyjątkowe**, to obciążenia, które mogą wystąpić w wyniku mniej prawdopodobnych zdarzeń w czasie użytkowania budowli. Zalicza się do nich obciążenia i oddziaływania spowodowane pożarem, wybuchem, powodzią, uderzeniem pojazdu, wstrząsami sejsmicznymi, itp.

Wartości charakterystyczne obciążeń  $F_k$  (stałych  $G_k$ , zmiennych  $Q_k$ , wyjątkowych  $A_k$ ) określono w PN-EN 1991 lub są ustalone na podstawie wymiarów elementów i ciężarów objętościowych poszczególnych materiałów bądź wg danych producenta.

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

Dla potrzeb oceny prognozowanego wyężenia konstrukcji, w kontekście oddziaływań oraz ich **kombinacji** bada się **sytuacje obliczeniowe**.

Na konstrukcję może działać równocześnie kilka różnych rodzajów obciążeń. Należy dokonać wyboru możliwych układów różnych obciążeń uwzględniając przy tym, że niektóre z nich mogą nie występować jednocześnie lub zmieniać miejsce przyłożenia. Obliczenia statyczne wykonuje się z uwzględnieniem najbardziej niekorzystnych kombinacji obciążeń, które wyznacza się na podstawie zaleceń podanych w PN-EN 1990.

**Kombinacja oddziaływań** – to zbiór wartości obliczeniowych przyjętych do sprawdzenia niezawodności konstrukcji, kiedy w rozpatrywanym stanie granicznym występują jednocześnie różne oddziaływania (w celu wyznaczenia np. maximum-maximorum sił wewnętrznych w przekrojach krytycznych ustroju).

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

**Sytuacje obliczeniowe** – to zbiór warunków fizycznych, reprezentujących rzeczywiste warunki w określonym przedziale czasowym, dla którego wykazuje się w obliczeniach, że odpowiednie stany graniczne nie zostały przekroczone.

Rozróżnia się sytuacje obliczeniowe:

- **trwałą** (użytkowanie obiektu zgodne z przeznaczeniem) – której miarodajny czas trwania jest tego samego rzędu co planowany okres eksploatacji ustroju,
- **przejściową** (chwilowe warunki podczas budowy i naprawy) – o dużym prawdopodobieństwie wstąpienia, której czas trwania jest znacznie krótszy niż przewidziany okres użytkowania konstrukcji,
- **wyjątkową** (wyjątkowe warunki: pożar, uderzenie, wybuch) – odnosząca się do wyjątkowych warunków użytkowania konstrukcji lub jej eksploatacji,
- **sejsmiczną** – uwzględniająca trzęsienie ziemi.

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

Rzeczywiste obciążenia działające na konstrukcję mogą się różnić od wartości charakterystycznych. Różnice te mogą być spowodowane np. wykonaniem elementów konstrukcji o wymiarach, nieco różniących się od projektowanych, zastosowaniem materiałów o ciężarze objętościowym różnym od przewidywanego, zużyciem maszyn i urządzeń obciążających dynamicznie konstrukcję bądź wystąpieniem dużych opadów śniegu, wiatrów huraganowych, itp. Tę losowość oddziaływań uwzględnia się w analizie stanu granicznego nośności przyjmując wartości obliczeniowe obciążeń.

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

**Wartości obliczeniowe obciążeń**  $F_d$  uwzględniają wymienione różnice możliwe do wystąpienia w przewidywanym czasie użytkowania konstrukcji. Według PN-EN 1990 są określone zależnościami

$$F_d = \gamma_{F,i} F_{rep,i}, \quad (14)$$

gdzie:

$F_{rep,i}$  – odpowiednia wartość reprezentatywna oddziaływania obliczona ze wzoru

$$F_{rep,i} = \psi_i F_{k,i}, \quad (15)$$

$F_{k,i}$  – wartość charakterystyczna oddziaływania,

$\gamma_{F,i}$  – współczynnik częściowy dla oddziaływań, uwzględniający możliwość niekorzystnych odchyłeń wartości oddziaływań od wartości reprezentatywnych,

$\psi_i$  – współczynniki kombinacyjne oddziaływań zmiennych:  $\psi_i = 1,0$  lub  $\psi_0$  - dla wartości kombinacyjnej,  $\psi_1$  - dla wartości częstej i  $\psi_2$  - dla wartości prawie stałej.

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

W kombinacji oddziaływań wyróżnia się jedno główne (wiodące) oddziaływanie zmienne  $Q_{k,1}$  i związane oddziaływania zmienne (inne niż główne)  $Q_{k,i}$ .

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

Reprezentatywną wartością oddziaływania głównego (wiodącego) jest jego wartość charakterystyczna  $Q_{k,1}$  (dla której należy przyjąć  $\psi = 1,0$ ).

Reprezentatywne wartości związanych (towarzyszących obciążeniu głównemu) oddziaływań zmiennych, są odniesione do wartości charakterystycznej oddziaływania głównego  $Q_{k,i}$ , za pomocą współczynników jednoczesności działania obciążeń  $\psi_i$  (o charakterze redukcyjnym; tabl. 2). Wartościami reprezentatywnymi obciążenia zmiennego są:

- wartość kombinacyjna:  $\psi_0 Q_k$  – stosowana przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności i nieodwracalnych stanów granicznych użyteczności,
- wartość częsta:  $\psi_1 Q_k$  – stosowana przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności z uwzględnieniem oddziaływań wyjątkowych i przy sprawdzaniu odwracalnych stanów granicznych,
- wartość quasi-stała:  $\psi_2 Q_k$  – stosowana przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności z uwzględnieniem oddziaływań wyjątkowych STR i przy sprawdzaniu nieodwracalnych stanów granicznych użyteczności. Wartości quasi-stałe są stosowane w obliczeniach efektów długotrwałych.

# Rodzaje oddziaływań i ich współczynniki częściowe

Tabl. 2. Zalecane wartości współczynników kombinacyjnych  $\psi_i$  wg PN-EN 1990

Oddziaływania	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Obciążenie zmienne w budynkach mieszkalnych	0,7	0,5	0,3
Obciążenie zmienne w budynkach biurowych	0,7	0,5	0,3
Obciążenie powierzchni magazynowych	1,0	0,9	0,8
Obciążenie śniegiem w miejscowościach położonej na wysokości $H > 1000$ m ponad poziomem morza	0,7	0,5	0,2
Obciążenie śniegiem w miejscowościach położonej na wysokości $H < 1000$ m ponad poziomem morza	0,5	0,2	0
Obciążenie wiatrem	0,6	0,2	0

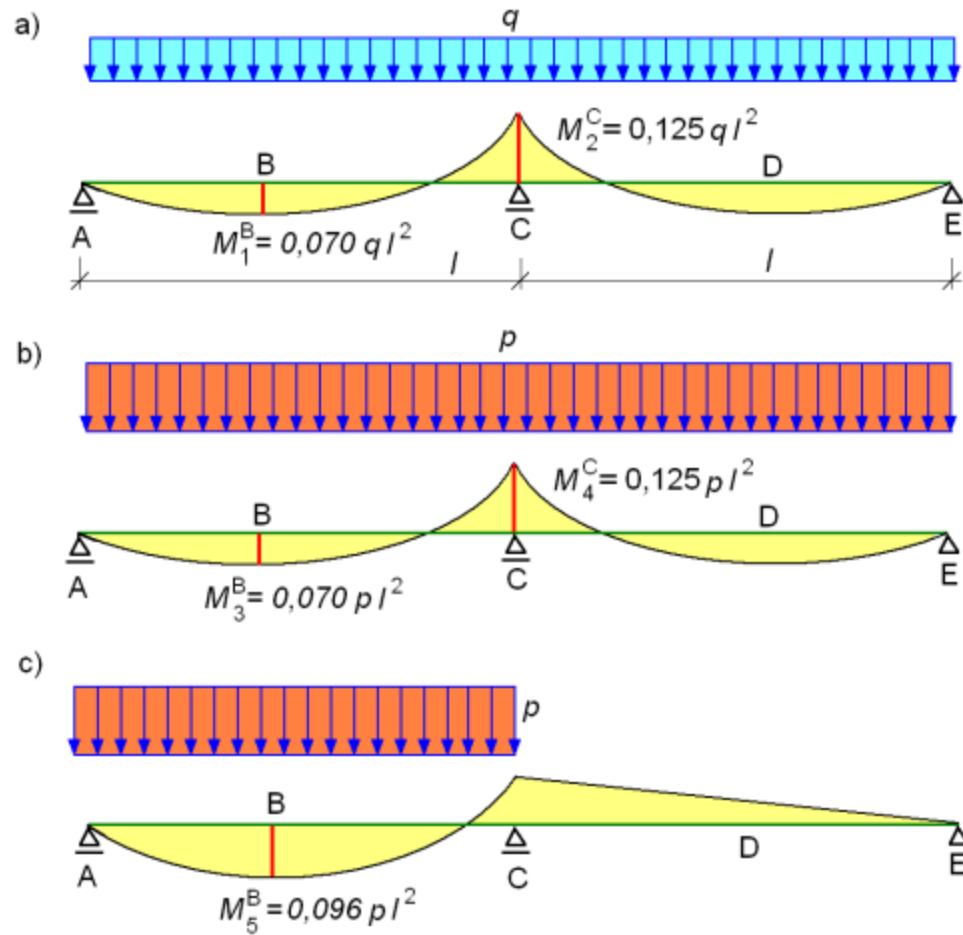


# Kombinacje oddziaływań

Przypadki obciążeń konstrukcji obejmują szczególne usytuowanie obciążeń zmiennych (oraz stałych), które są uwzględniane w obliczeniach (na konstrukcję może działać równocześnie kilka różnych rodzajów obciążeń). W ocenie wyężenia oddziaływania zmienne powinny być tak usytuowane, aby wywołać najniekorzystniejsze skutki w konstrukcji, w analizowanym stanie granicznym. Dlatego należy dokonać wyboru możliwych układów różnych obciążeń uwzględniając przy tym, że niektóre z nich mogą nie występować jednocześnie lub zmieniać miejsce przyłożenia. Obliczenia statyczne wykonuje się z uwzględnieniem najbardziej niekorzystnych kombinacji obciążeń.

Kombinacja oddziaływań stanowi zbiór wartości obliczeniowych do sprawdzenia niezawodności konstrukcji, pod równoczesnym wpływem różnych oddziaływań.

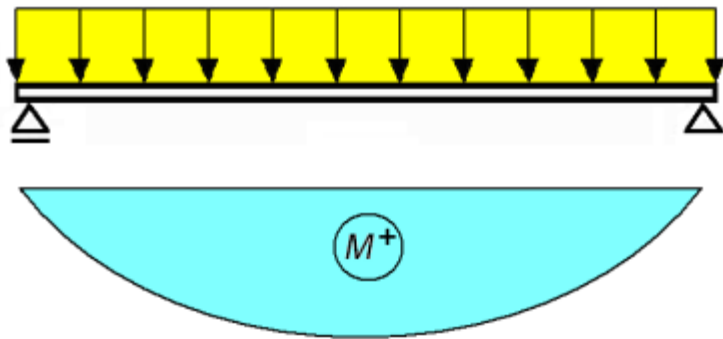
# Kombinacje oddziaływań



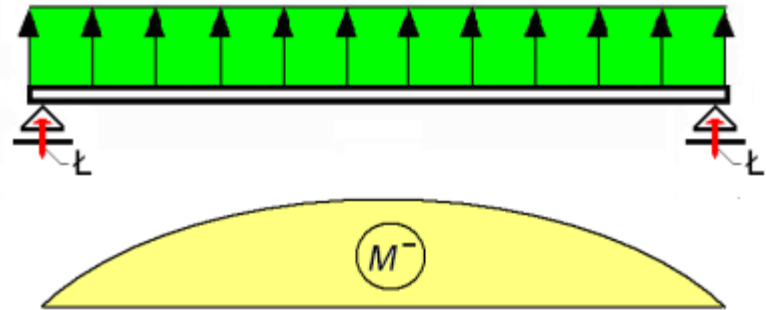
Rys. 12. Schematy obciążeń dwuprzęsłowej belki

# Kombinacje oddziaływań

a)  
obciążenie stałe + obciążenia śniegim + "parcie" wiatru



b)  
obciążenia stałe + "ssanie" wiatru (unoszące)



Rys. 13. Schematy obciążeń dachowej blachy faldowej;  $\zeta$  - połączenie

# PODSTAWY PROJEKTOWANIA I ODDZIAŁYWANIA NA KONSTRUKCJE

## WYKŁAD 4

*Zasady projektowania konstrukcji  
budowlanych cz. 1*

**dr inż. Paweł Niewiadomski**

pawel.niewiadomski@pwr.edu.pl

bud. G2D, pok. 5.78

<https://wbliw.pwr.edu.pl/pracownicy/pawel-niewiadomski>



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wroclawska