

# Seminarium dyplomowe II

## Konstrukcje stalowe

## Zagadnienia egzaminacyjne

Spotkania stacjonarne co drugi tydzień, środa, sala 218, 12:45 – 14:15

Zaliczenie na ocenę.

Ocena:

Zaliczenie sprawdzianu z pytań egzaminacyjnych

Prezentacja postępów pracy dyplomowej - styczeń

Ocena końcowa

75% oceny z kolokwium + 25% oceny z prezentacji pracy

## Plan spotkań

Data	Temat
26 II	Spotkanie wstępne, omówienie zagadnień egzaminacyjnych
12 III	Konsultacje
26 III	Kolokwium I termin
9 IV	Kolokwium II termin
23 IV	Prezentacje
7 V	Prezentacje
21 V	Termin rezerwowy

Praca dyplomowa na II stopniu (magisterska) nie różni się – oprócz stopnia złożoności tematu – niczym od pracy dyplomowej na I stopniu (inżynierskiej):

- Praca musi zawierać **stronę tytułową**, formatowaną identycznie jak w inżynierskiej.
- Tytuł angielski musi być zatwierdzony na [tytulpracy.wil.pk.edu.pl](http://tytulpracy.wil.pk.edu.pl) w identyczny sposób, jak na I stopniu.
- Do dziekanatu złożyć należy identyczny komplet dokumentów:
  - **Deklaracja wyboru tematu pracy dyplomowej;**
  - **Oświadczenie o samodzielnym wykonaniu pracy dyplomowej;**
  - **Zgoda na przetwarzanie danych osobowych;**
  - **Wniosek o wydanie kompletu dyplomu ukończenia studiów wraz z suplementem;**
  - **Wniosek o wydanie dodatkowego odpisu dyplomu w języku polskim lub języku obcym;**
  - **Oświadczenie promotora w sprawie dopuszczenia studenta do egzaminu dyplomowego;**
  - **Pierwsza strona Raportu podobieństwa;**

- Trzystronicowy ogólny "Raport z badania antyplagiatowego" w JSA;
- Oryginał opinii promotora pracy dyplomowej;
- Oryginał recenzji pracy dyplomowej;
- Opłata za dyplom;
- Zwrot legitymacji studenckiej lub oświadczenie dotyczące legitymacji (jedyna nowość w stosunku do I stopnia).
- Karta odejścia;
- Informacje o dodatkowych osiągnięciach studenta.

Dokumenty opisane na zielono są załączone do prezentacji. Dokumenty opisane na niebiesko są generowane przez Promotora w trakcie oceniania pracy i analizie w systemie antyplagiatowym.

Identycznie jak poprzednio, wgrywanie Państwo pracę do systemu antyplagiatowego

<http://antyplagiat.pk.edu.pl/>

Najlepiej: plik \*.pdf TEN SAM Z KTÓREGO WYDRUKOWANO PRACĘ, ZAWIERAJĄCY RYSUNKI KONSTRUKCJI. W pliku tekst musi być rozpoznawany jako tekst, a nie jako grafika – inaczej trzeba całą procedurę zaczynać od nowa i tracić czas.

Wszystkie dane opisowe w systemie (promotor, tytuł polski, tytuł angielski, itd.) muszą być zgodne ze sobą. Praca w języku polskim: tytuł po polsku i po angielsku. Praca w języku angielskim: 2x tytuł po angielsku.

Identycznie jak poprzednio, należy podać nazwiska dwu recenzentów, z których wybrany będzie jeden.

Rys: Autor

Promotor	dr inż. Tomasz Michałowski ( UID POLON: e45579dc-e349-4414-8f8b-be7cea7deb5e)
Recenzent 1	???
Recenzent 2	
Streszczenie	Przedmiotem pracy jest projekt konstrukcji stalowej wysokiego budynku biurowego. Sztywność zapewniona została p Structural Analysis wykonano model 3D, z którego uzyskano siły wewnętrzne w elementach stalowych, co posłużyło c

Ocena punktowa	2,0	3,0	4,0	5,0
1. Zgodność zawartości pracy z tematem:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Sformułowanie celu pracy: <hr/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Poprawność układu pracy:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. Trafność zastosowanej terminologii:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Opracowanie graficzne pracy:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. Estetyka pracy:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. Dobór literatury:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Poprawność sformułowanych wniosków: <hr/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Osiągnięcie celu pracy: <hr/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. Stylistyka i poprawność językowa:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Obecnie obowiązkową częścią pracy jest umieszczony na początku pracy punkt pt. Cele oraz na końcu punkt pt. Wnioski – podlega to ocenie w recenzji i korecenzji.

## Termin obron

Jak zwykle 2 terminy. Prawdopodobnie będzie to

ostatni piątek czerwca (26 VI 2026)

**albo**

pierwszy piątek lipca (3 VII 2026)

**oraz**

ostatni piątek września (25 IX 2026)

ale to na razie tylko terminy orientacyjne.



## Zagadnienia egzaminacyjne

Zagadnienia do egzaminu dyplomowego II stopnia są publicznie dostępne na stronie Politechniki. Określenie „zagadnienie” podpowiada, że konkretne pytanie może być zadane zupełnie innymi słowy, a mimo to nie wykroczy poza ramy zagadnienia.

W kilku przypadkach tematyka pytań, z nieznanych przyczyn, dotyczy zagadnień z I stopnia.

Skoro jednak zagadnienia te pojawiają się teraz, należy je sobie przypomnieć.

Część tematyki wykracza poza ścisły zakres Konstrukcji Metalowych / Drewnianych.

Ponieważ jednak na obronach musi być obecny ktoś spoza Katedry, więc i takie zaskakujące pytania mogą się pojawić na obronie.

1. Sposoby sformułowania zagadnień brzegowych (mocne, słabe) i koncepcje budowy rozwiązań przybliżonych.
2. Wybrane metody numeryczne (aproksymacja funkcji, rozwiązywanie: liniowych i nieliniowych równań oraz układów równań algebraicznych, algebraicznych problemów własnych, równań różniczkowych), które mają zastosowanie w komputerowych metodach mechaniki.

3. Idea dyskredytacji MES dla 1- i 2- wymiarowych zagadnień.
4. Zasadnicze podobieństwa i różnice w koncepcjach MES i MRS.
5. Klasyfikacja źródeł błędów w metodach komputerowych.
6. Zachowanie się układów prętowych przy obciążeniach termicznych i geometrycznych.
7. Drgania własne i wymuszone, rezonans i tłumienie.
8. Przegląd, właściwości i zastosowanie zaawansowanych materiałów i wyrobów budowlanych.
9. Podstawowe zagadnienia z ochrony budowli przed korozją.
10. Układy konstrukcyjne budynków, sztywność przestrzenna.
11. Konstrukcje szkieletowe, monolityczne i prefabrykowane, budynków wysokich.
12. Konstrukcje murowe, rodzaje, zasady konstruowania i metody obliczeń.
13. Konstrukcje drewniane: drewno jako materiał konstrukcyjny - charakterystyka, wady i zalety, drewno klejone i jego zastosowanie w budownictwie, budynki mieszkalne z drewna, konstrukcje przekryć z zastosowaniem dźwigarów z drewna klejonego, zasady projektowania elementów drewnianych, obliczenia łączników, rodzaje więźb dachowych ich elementy składowe oraz obliczanie. [Ochrona drewna w tym przeciwpożarowa.](#)

14. Budownictwo energooszczędne; właściwości ciepłno-wilgotnościowe materiałów i przegród budowlanych (ściany, podłogi na gruncie, dachy, stropodachy, stolarka), sposoby ograniczania strat ciepłych przez przenikanie i wentylację, pozyskiwanie energii odnawialnej. Ocena energetyczna budynków.

15. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe stalowych elementów prostych - przekrój, pojedynczy pręt, rama płaska.

16. Wpływ stateczności miejscowej na nośność blachownic stalowych.

17. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe stalowych budynków halowych / szkieletowych.

18. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe przykładowych stalowych konstrukcji z blach (np. zbiorniki, silosy, rurociągi).

19. Podstawy prefabrykacji i typizacji elementów i konstrukcji z betonu (rodzaje połączeń, warunki oparcia elementów prefabrykowanych); problemy konstrukcyjne projektowania i kształtowania ustrojów prefabrykowanych z uwzględnieniem zbiorników na ciecze.

20. Zasady projektowania i kształtowania złożonych ustrojów konstrukcyjnych (ustroje szkieletowe, ustroje płytowo-słupowe, ustroje tarczowe).

- 21. Projektowanie betonowych konstrukcji sprężonych metodą ogólną - analiza wartości siły sprężającej, zasady obliczania elementów zginanych i ścinanych.
- 22. Zasady kształtowania stropów sprężonych (strunobetonowych i kablobetonowych).
- 23. Zasady projektowania i kształtowania zbrojenia w monolitycznych zbiornikach na materiały sypkie i ciecze.
- 24. Konstrukcje przemysłowe specjalne: zasady projektowania fundamentów i konstrukcji wsporczych obciążonych maszynami.
- 25. Kształtowanie i konstruowanie żelbetowych mostów sprężonych dużych rozpiętości.
- 26. Zasady konstruowania i obliczania podpór mostowych.
- 27. Analiza statyczno-wytrzymałościowa przęseł mostów płytowych i belkowych
- 28. Diagnostyka, naprawa i wzmacnianie ustrojów konstrukcyjnych z zastosowaniem materiałów FRP i cięgien bez przyczepności.

# 1. Sposoby sformułowania zagadnień brzegowych (mocne, słabe) i koncepcje budowy rozwiązań przybliżonych.

Zagadnienie brzegowe: wybranie, spośród wielu funkcji należących do pewnej klasy, jednej konkretnej funkcji spełniającej warunki brzegowe.

Przykład:

Funkcja opisująca drgania o jednym stopniu swobody:  $x(t)'' + \omega^2 x(t) = 0$

Rozwiązanie ogólne (klasa funkcji):  $x(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)$

Warunki brzegowe:  $x(t=0) = 5 \quad x(t = \pi / 2) = 3$

Funkcja spełniająca warunki brzegowe:

$$A \sin(0) + B \cos(0) = 5$$

$$B = 5$$

$$A \sin(\pi / 2) + b \cos(\pi / 2) = 3$$

$$A = 3$$

$$\underline{x(t) = 3 \sin(\omega t) + 5 \cos(\omega t)}$$

Mocne (silne, lokalne) sformułowanie:

Równanie różniczkowe wraz z warunkami brzegowymi

$$x(t)'' + \omega^2 x(t) = 0 \quad ; \quad 0 \leq t \leq \pi / 2 \quad ; \quad x(t = 0) = 5 \quad x(t = \pi / 2) = 3$$

Słabe (globalne) sformułowanie:

Równanie zapisane w postaci funkcjonału

$$\int_0^{\pi/2} x(t)'' v(t) + \omega^2 \int_0^{\pi/2} x(t) v(t) = 0$$

gdzie  $v(t)$  – funkcja próbna

Rozwiązanie jest aproksymacją z użyciem funkcji kształtu:

$$x(t) = x_1 N_1(t) + x_2 N_2(t) + \dots$$

$$v(t) = v_1 N_1(t) + v_2 N_2(t) + \dots$$

Funkcje kształtu  $N_i(t)$  są przyjmowane wstępnie, współczynniki  $x_i$  i  $v_i$  są znajdowane po rozwiązaniu funkcjonału. Rozwiązanie jest otrzymywane w postaci zbioru wartości dyskretnych, odpowiadających pewnym punktom (węzłom) obszaru.

Przyjęcie siatki węzłów jest metodą rozwiązania przybliżonego: dokładna wartość jest w węźle, pomiędzy nimi jest przybliżana funkcjami kształtu.

## 2. Wybrane metody numeryczne (aproksymacja funkcji, rozwiązywanie: liniowych i nieliniowych...

Aproksymacja funkcji – przybliżenie funkcji  $F(x)$  (zazwyczaj opisującą zestaw dyskretnych danych pomiarowych) przez funkcję  $f(x) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \dots$  gdzie  $a_i$  to nieznane współczynniki (do wyznaczenia) zaś  $f_i(x)$  to przyjęte funkcje kształtu.

Układ równań liniowych:

- Metoda eliminacji Gaussa
- Metoda eliminacji Gaussa-Jordana
- Metoda LU
- Metoda Chleskiego-Bornachiewicza
- Metoda Jackobiego
- Metoda Gaussa-Seidla
- Metoda gradientów sprzężonych



### Układ równań nieliniowych:

- Metoda interpolacji liniowej
- Metoda siecznych
- Metoda stycznych
- Metoda bisekcji
- Metoda iteracji prostej
- Metoda Newtona

### Układ równań algebraicznych:

- Metoda eliminacji Gaussa
- Metoda eliminacji Gaussa-Jordana



Problem własny:  $[A]\{x\} = \lambda \{x\}$

- Metoda potęgowa
- Metoda iteracji odwrotnej
- Metoda przesuwania widma

Równanie różniczkowe:

- Metoda Eulera
- Metoda RK

### 3. Idea dyskretyzacji MES dla 1- i 2- wymiarowych zagadnień.

MES – Metoda Elementów Skończonych, podział analizowanego obszaru na siatkę elementów, elementom przypisane są funkcje kształtu opisujące zachowanie całości.

Zagadnienie jednowymiarowe MES: na przykład konstrukcja prętowa (wymiary poprzeczne pręta pomijalne w stosunku do jego długości), funkcje kształtu są zazwyczaj identyczne z funkcjami kształtu w Metodzie Przemieszczeń;

Zagadnienie dwuwymiarowe MES: na przykład konstrukcja powłokowa (grubość elementu pomijalna w stosunku do jego długości i szerokości); najczęściej stosuje się elementy trójkątne lub czworokątne, możliwe jest zagęszczenie siatki w rejonach „kłopotliwych”.

#### 4. Zasadnicze podobieństwa i różnice w koncepcjach MES i MRS.

MES – Metoda Elementów Skończonych, podział analizowanego obszaru na siatkę elementów, elementom przypisane są funkcje kształtu opisujące zachowanie całości.

MRS – Metoda Różnic Skończonych, nałożenie na analizowany obszar siatki węzłów, w których równania różniczkowe zastępowane są różnicami:

$$F'(x) = f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} [F(x+h) - F(x)] / h = [F(x + 0,0001) - F(x)] / 0,0001$$

Równania różnicowe tworzą układ równań algebraicznych.

- Obie metody służą do rozwiązywania problemów brzegowych;
- Podstawą dyskretyzacji jest obszar, obszar podzielony jest na węzły;
- Obie metody prowadzą do macierzowej procedury iteracyjnej;
- Uwzględniają niejednorodność materiałów.

Cecha	MES	RMS
Dyskretyzacja	Węzły i elementy	Węzły
Geometria obszaru	Dopuszczalna nieregularna	Najlepiej regularna
Sformułowanie problemu	Słabe (wariancyjne, funkcjonal)	Mocne (lokalne)
Sposób aproksymacji	Aproksymacja funkcji kształtu w elemencie	Interpolacja różniczeki różnicą
Całkowanie numeryczne	W elemencie	Nie jest potrzebne
Generacja siatki	Generator w programie, najczęściej trójkątna lub czworokątna	Trójkątna lub prostokątna
Lokalne zagęszczenia siatki	Dopuszczalne	Niedopuszczalne
Dokładność metody	Dobra dla rozwiązywania, mniejsza dla pochodnych	Znikome różnice dokładności rozwiązywania i pochodnych
Macierz układu	Symetryczna pasowa	Najczęściej niesymetryczna

## 5. Klasyfikacja źródeł błędów w metodach komputerowych.

Błąd modelowania – rozbieżność między rzeczywistym zachowaniem konstrukcji a przyjętym modelem (uproszczenia, nieznajomość istotnych cech, pominięcie istotnych elementów, błędna metoda analizy sprężysta/plastyczna, zła siatka MES, zły krok czasowy);

Błąd danych – najczęściej efekty błędów pomiarów, gdy wprowadzane dane są wynikiem pomiarów rzeczywistej konstrukcji;

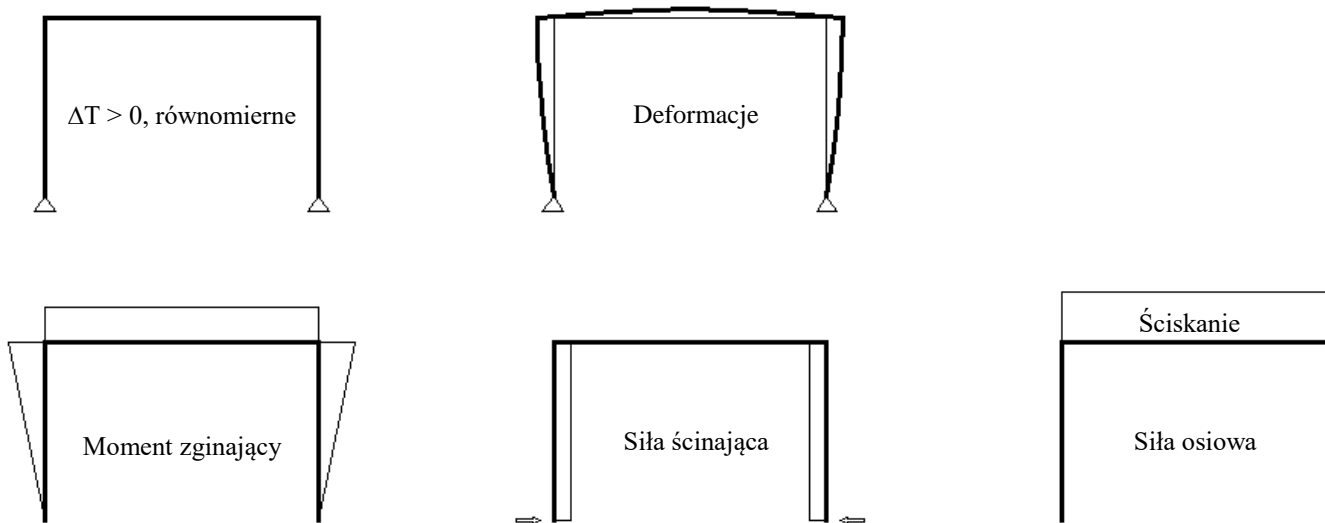
Błąd metody (błąd odcięcia) – aproksymacje, interpolacje, definiowanie granic (wartości skończone zastępują sytuacje  $X \rightarrow 0$  oraz  $X \rightarrow \infty$ );

Błąd zaokrągleń – efekt prowadzenia obliczeń o skończonej dokładności (32 lub 64 bity), sumujące się błędy w kolejnych krokach mogą prowadzić do istotnych rozbieżności.

## 6. Zachowanie się układów prętowych przy obciążeniach termicznych i geometrycznych.

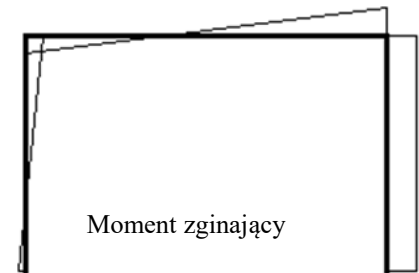
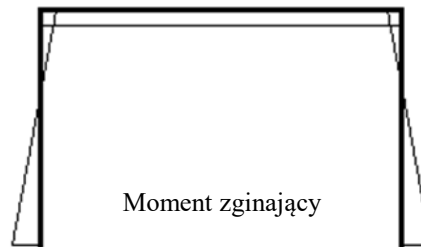
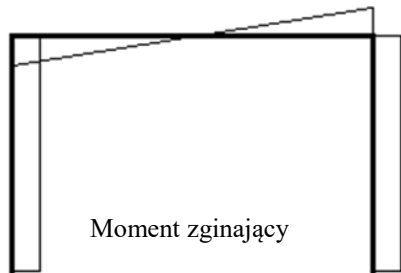
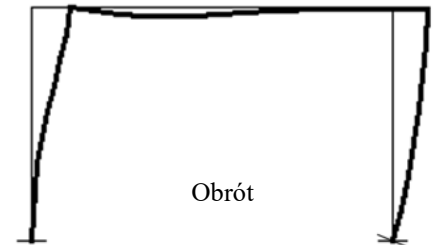
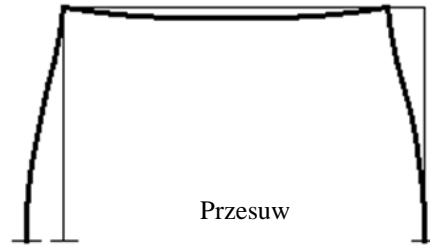
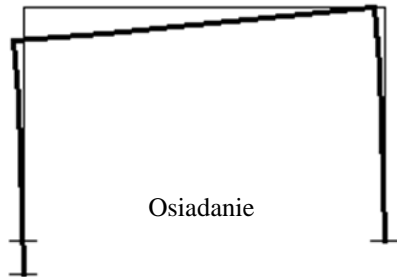
W przypadku konstrukcji statycznie wyznaczalnych, obciążenia termiczne nie powodują żadnych efektów (konstrukcja ma pełną swobodę termicznego wydłużenia / skurczu).

W przypadku konstrukcji statycznie niewyznaczalnych pojawiają się skutki „odwrotne do spodziewanych” (podniesienie temperatury → termiczne wydłużenie; spodziewane rozciąganie → sąsiednie elementy blokują → siła ściskająca).



Rys: Autor

Obciążenia geometryczne wynikają z możliwości osiadania / przesuwu / obrotu fundamentów.



Rys: Autor

## 7. Drgania własne i wymuszone, rezonans i tłumienie.

Dla jednego stopnia swobody dynamicznej (na przykład wahadła), drgania własne tłumione można opisać jak następuje:

$$m y'' + c y' + k y = 0$$

$m$  – masa [kg]

$c$  – współczynnik tłumienia [Ns / m]

$k$  – sztywność [N / m]

Rozwiązaniem równania jest:

$$y(t) = A e^{-\beta t} \sin (\omega t + \varphi)$$

$A$  – amplituda drgań [m]

$\beta$  – współczynnik tłumienia wiskotycznego [1 / s]

$\omega$  – częstość drgań tłumionych [rad / s]

$\varphi$  – przesunięcie fazowe



$\omega_0$  – częstość własna [rad / s]

$\omega$  – częstość drgań tłumionych [rad / s]

$f$  – częstotliwość [Hz]

$T$  – okres drgań [s]

$$T = 1 / f$$

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f = \sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{(k / m)}$$

$\beta$  – współczynnik tłumienia wiskotycznego [1 / s]

$\zeta$  – ułamek tłumienia krytycznego[%]

$c$  – współczynnik tłumienia [Ns / m]

$\Delta$  – logarytmiczny dekrement tłumienia drgań

$$\beta = c / 2m$$

$$\Delta = \ln [ y(t) / y(t + T) ] = \beta T$$

$$\zeta = \beta / \omega_0 = c / [2 \sqrt{(k m)}] = \Delta / [\sqrt{(4 \pi^2 + \Delta^2)}]$$

Równanie drgań wymuszonych:

$$m y'' + c y' + k y = F(t)$$

Najczęściej mamy tu postać:

$$m y'' + c y' + k y = F \sin(\theta t)$$

Rozwiązaniem jest rozwiązanie ogólne

$$y(t) = A e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi)$$

w sumie z rozwiązaniem szczególnym

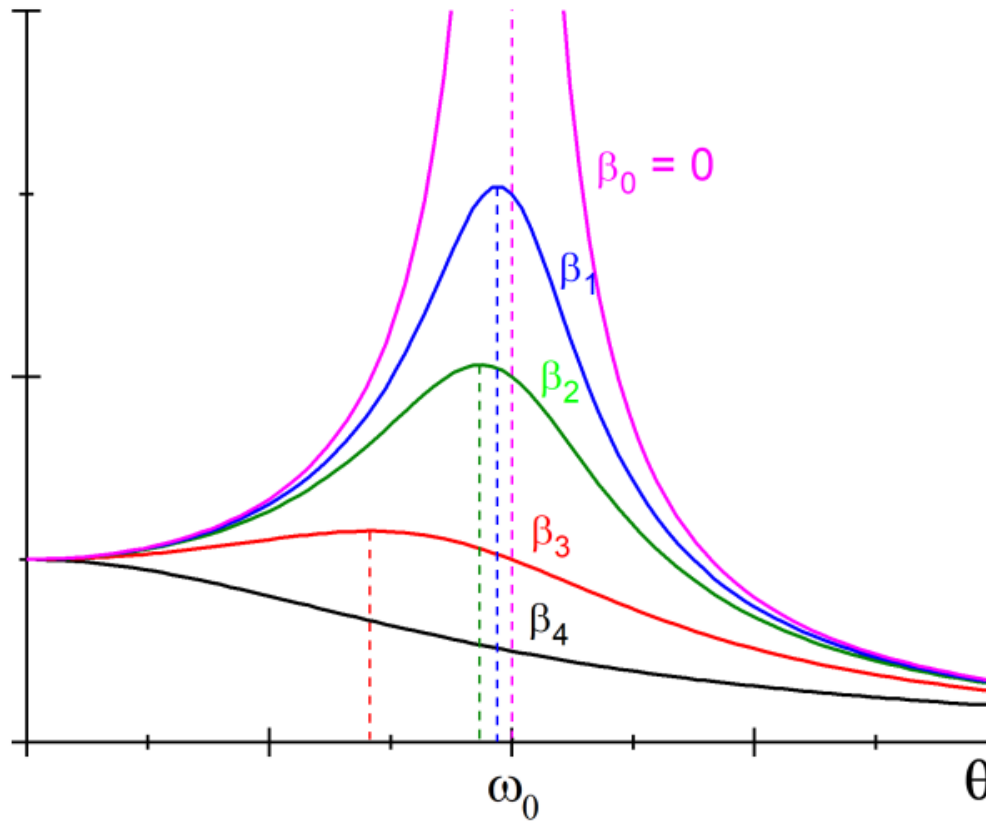
$$y(t) = a \sin(\theta t) + b \cos(\theta t)$$

Amplitudami rozwiązania szczególnego są

$$b = 2 a \beta \theta / (\theta^2 - \omega_0^2)$$

$$a = (F / m) (\omega_0^2 - \theta^2) / [(\omega_0^2 - \theta^2)^2 + 4 \beta^2 \theta^2]$$

Amplituda drgań wymuszonych  $a$  jest proporcjonalna do siły wymuszającej  $F$ , oraz zależna od masy układu  $m$ , tłumienia drgań  $\beta$  i różnicy między częstotliwością drgań własnych  $\omega_0$  i wymuszonych  $\theta$ .



Im mniejsza różnica między  $\omega_0$  i  $\theta$ , tym większa amplituda drgań. Dodatkowo im mniejsze tłumienie, tym wyższa amplituda. Zakres dużych amplitud drgań wymuszonych przez wzbudzenie harmoniczne to zakres rezonansu ( $\pm 20\% \omega_0$ ).

Jednym ze sposobów poradzenia sobie z problemem jest tzw. rozstrojenie konstrukcji: takie jej zaprojektowanie, by częstotliwości własne były odsunięte od częstotliwości wymuszenia przez obciążenie.

Największym problemem jest poprawny opis tłumienia. Wyrażenie

$c y'$

lub

$[C] \{y'\}$

jest tylko przybliżeniem; zakładamy tłumienie wiskotyczne, które jest proporcjonalne do prędkości drgań. Jest to dobre przybliżenie procesu rozpraszania energii drgań w materiałach budowlanych dla małych amplitud. W rzeczywistości proces ten jest proporcjonalny raczej do kwadratów prędkości,  $(y')^2$  lub  $(\{y'\})^2$ . Z kolei dla węzłów (zwłaszcza śrubowych) rozpraszanie energii jest proporcjonalne do przemieszczeń  $y$ ,  $\{y\}$  lub, rzadziej, mas  $m$ ,  $[M]$ .

W dodatku w rzeczywistości wartość tłumienia może się okazać różna dla różnych postaci drgań. Dodatkowo może ono być uzależnione od wartości amplitudy

Na szczęście „naturalne” tłumienie drgań ma bardzo małą wartość. Dla budynków wysokich,  $\zeta \approx 1 - 5\%$ . W związku z tym błędy związane z przyjęciem jednego globalnego współczynnika tłumienia wiskotycznego dla całej konstrukcji, są bardzo małe.

## 8. Przegląd, właściwości i zastosowanie zaawansowanych materiałów i wyrobów budowlanych.

Stal nierdzewna – duża odporność na korozję, estetyczny wygląd, brak zakresu liniowo-sprężystego (nieliniowa zależność odkształcenie-napężenie dla całego zakresu naprężeń), zależność wartości modułu Younga od naprężeń, współczynnik przenikania ciepła niższy niż dla stali „zwykłej”; zastosowanie np. w budownictwie jądrowym.

Korten / corten – stal o podwyższonej odporności na korozję, pod wpływem warunków atmosferycznych pokrywa się szczelną warstwą tlenków żelaza; zastosowanie estetyczno-architektoniczne jako okładziny zewnętrzne

Stal wysokiej wytrzymałości – stosowane do S700, w fazie badań do S1200, o wiele większa nośność niż dla stali „zwykłych”, identyczna jak dla „zwykłych” odporność na utratę stateczności; stosowana wyłącznie analiza plastyczna.

Stal na ciągna – elementy przenoszące wyłącznie rozciąganie, wytrzymałość do 2 300 MPa, całkowicie nieliniowe zależności ugięcia od obciążenia, bardzo mała sztywność, podatność na wzbudzenia dynamiczne; zastosowanie jako odciąg w masztach, mostach wiszących, podwieszonych i wstęgowych, dachach podwieszonych.

Aluminium – odporność na korozję, estetyczny wygląd, niska wytrzymałość zmęczeniowa, moduł Younga 3x niższy niż dla stali (podatność na niestateczność – dużo masywniejsze przekroje), utrata parametrów wytrzymałościowych od ok 80-100 °C (problemy podczas spawania), wysoki koszt w porównaniu ze stalą.

Beton lekki – niższa wytrzymałość, niższa gęstość, wyższa izolacyjność termiczna; konstrukcje przemysłowe.

Beton samozagęszczający – brak konieczności zabiegów zagęszczania, brak segregacji składników; konstrukcje o skomplikowanym kształcie i gęsto zbrojone.

Fibrobeton – ze zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien; dachówki, okładziny, panele, posadzki, naprawa.

Beton wysokowartościowy – wytrzymałość powyżej 60 MPa, wysoka wodoodporność, niska nasiąkliwość; mosty, wieżowce, budowle hydrotechniczne.

Beton reaktywny (ultrawysokowartościowy) – wytrzymałość powyżej 150 MPa, cement + wyłącznie drobne kruszywo, zbrojenie główne i rozporoszone; budownictwo mostowe.

Żywice epoksydowe – nowoczesne posadzki przemysłowe (grubość warstwy do 10 mm); lepsze używanie podczas naprawy i wzmacniania konstrukcji.

Taśmy FRP – taśmy z włókna węglowego w osłonie z żywic epoksydowych stosowane jako zewnętrzne sprężenie podczas wzmacniania i remontu konstrukcji.

Drewno klejone – wypiera „klasyczne” drewno z budownictwa inżynierskiego; lepsze parametry mechaniczne (ograniczenie skutków niejednorodności i anizotropowości, wyższa wytrzymałość i odporność na korozję).



## 9. Podstawowe zagadnienia z ochrony budowli przed korozją.

Korozja – powody:

biologiczna

chemiczna

elektrochemiczna (w obecności elektrolitów)

termochemiczna (bez elektrolitów; wysoka temperatura))

fizyczna

korozja naprężeniowa

korozja zmęczeniowa

korozja-erozja

erozja eoliczna\*

abrazja\*

wpływ niskich temperatur\*

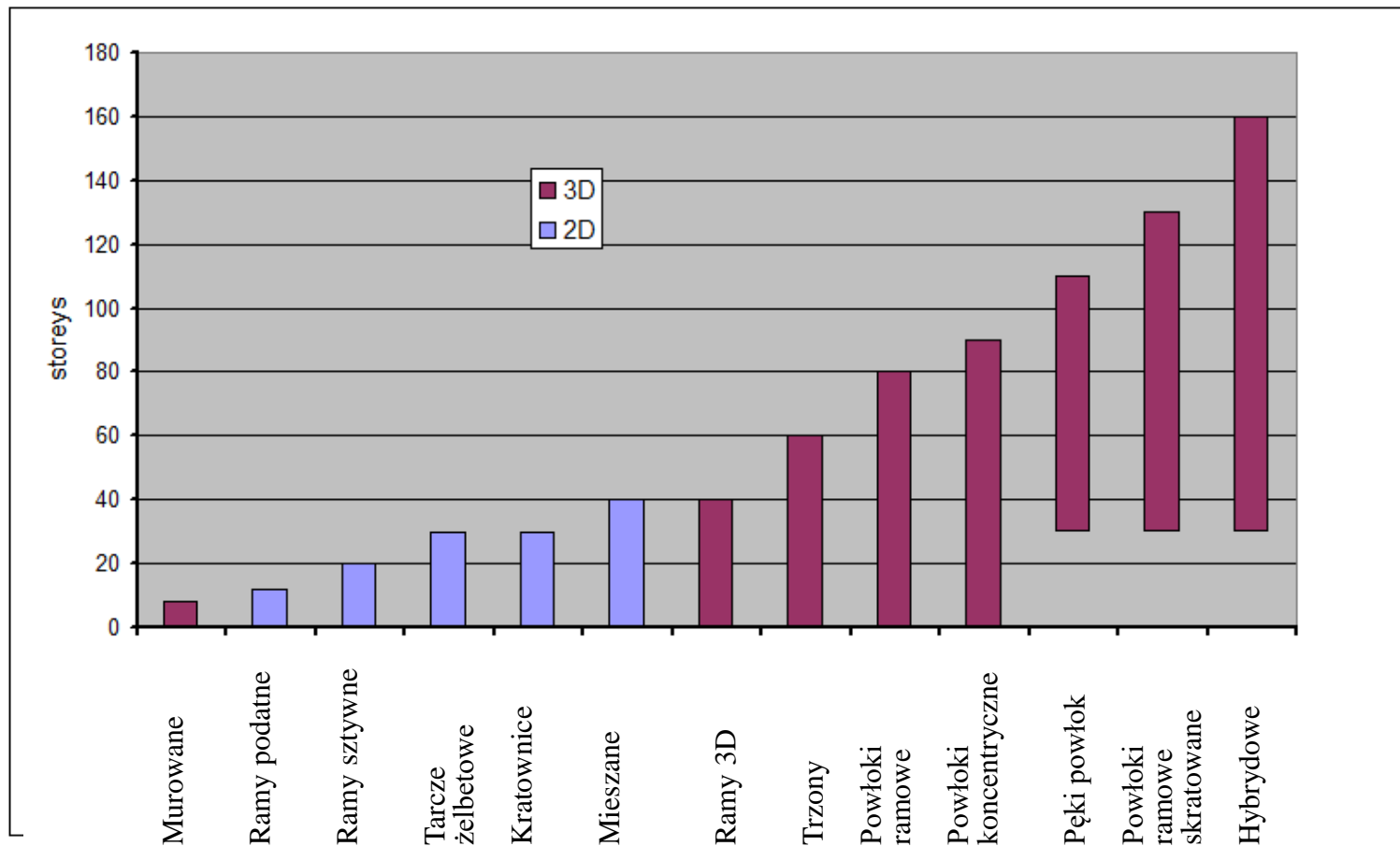
Zabezpieczenie: odcięcie dostępu wody i wpływów chemicznych, uszczelnienie struktury: farby, powłoki, domieszki do betonu, impregnaty, kształtowanie konstrukcji, ochrona katodowa, stal nierdzewna.

\* Według różnych źródeł erozja jest traktowana jako forma korozji lub jako odrębny proces

## 10. Układy konstrukcyjne budynków, sztywność przestrzenna.

Układ konstrukcyjny – schemat statyczny głównych elementów nośnych;

Sztywność przestrzenna – zapewnia uzyskanie ugięć i przemieszczeń w dowolnym kierunku w dopuszczalnym zakresie deformacji.



Rys: Autor

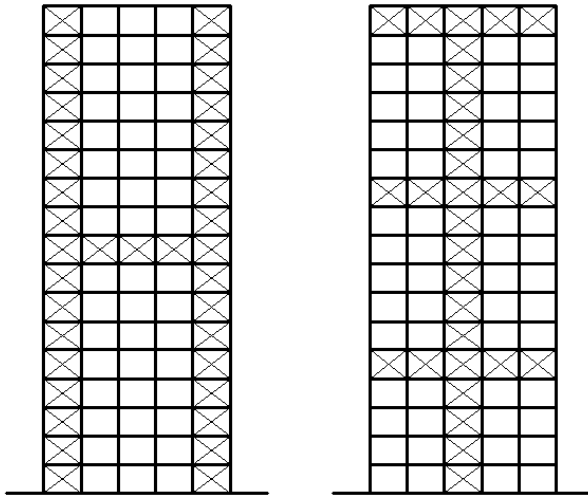
2D:

Ramy sztywne / podatne = ramy o węzłach sztywnych lub podatnych

Tarcze żelbetowe = „wielka płyta”, budownictwo prefabrykowane

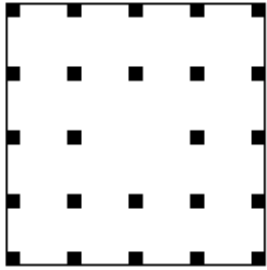
Kratownice = ramy o węzłach sztywnych wzmocnione kratownicami

Mieszane = zastosowanie równocześnie kilku rodzajów usztywnienia



Rys: Autor

3D:



1

1. Rama 3D

2. Trzon

3. Wewnętrzna powłoka ramowa

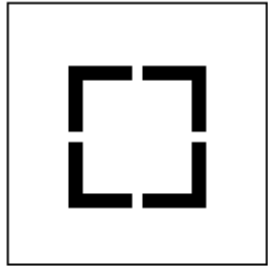
4. Zewnętrzna powłoka ramowa

5. Zewnętrzna powłoka ramowa skratowana

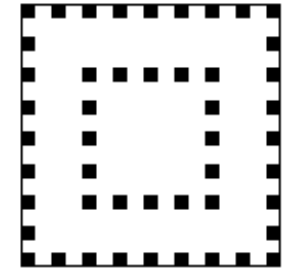
6. Powłoka ramowa koncentryczna

7. Pęk powłok ramowych

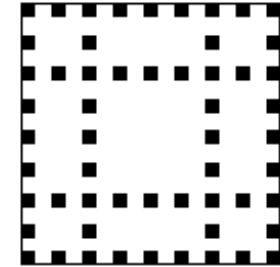
8. Hybryda



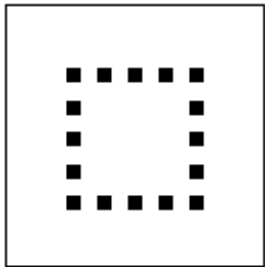
2



6



7



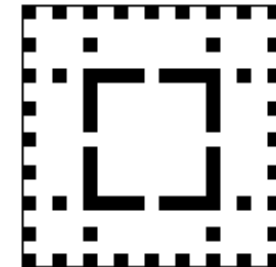
3



4



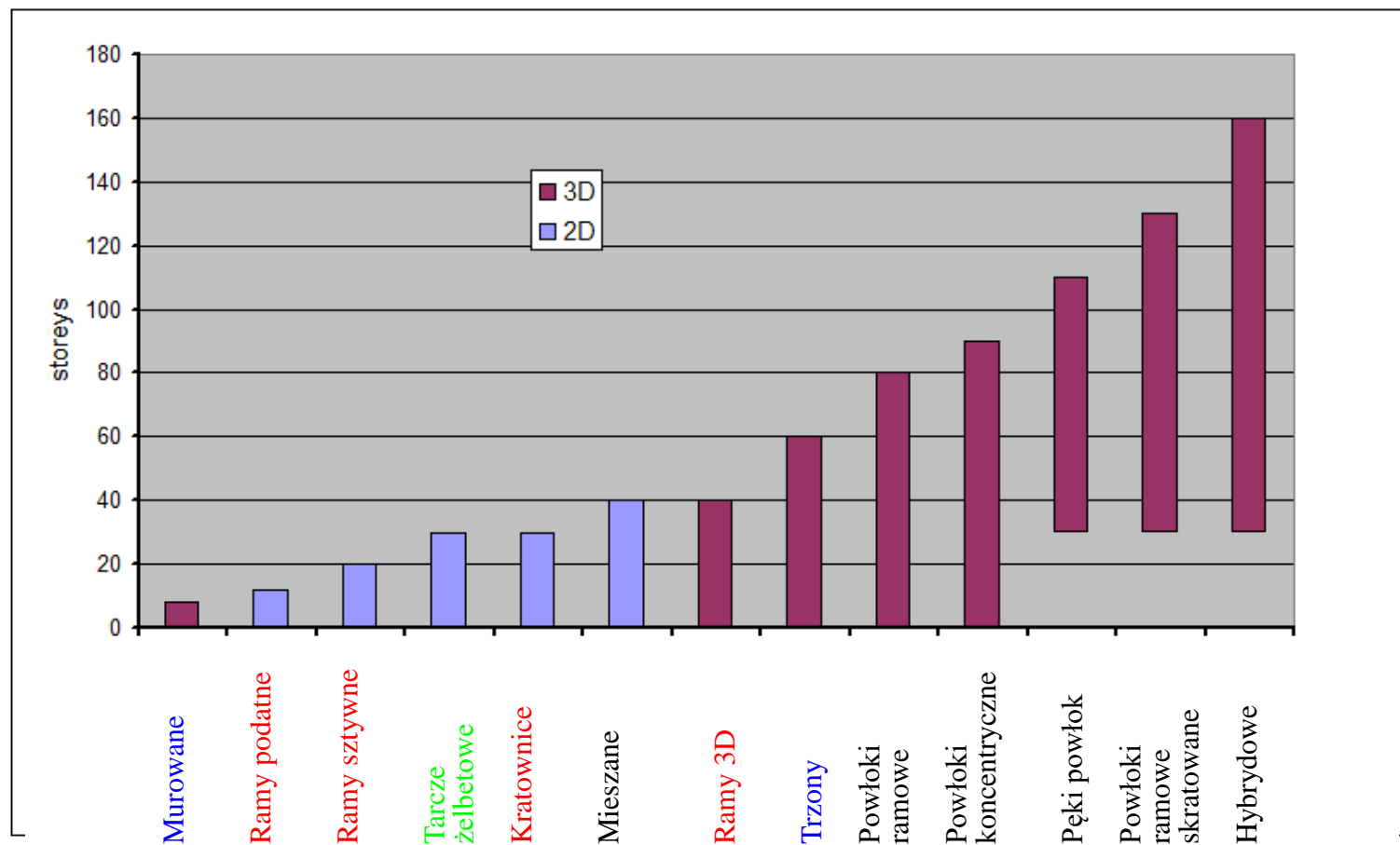
5



8

Rys: Autor

# 11. Konstrukcje szkieletowe, monolityczne i prefabrykowane, budynków wysokich.



Rys: Autor

Monolityczne Szkieletowe Prefabrykowane Mieszane i trudne do zaklasyfikowania

## 12. Konstrukcje murowe, rodzaje, zasady konstruowania i metody obliczeń.



Rys: info.ladnydom.pl

Ceramika zwykła i silikatowa, bloczki cementowe i gazobetonowe, kamień naturalny.

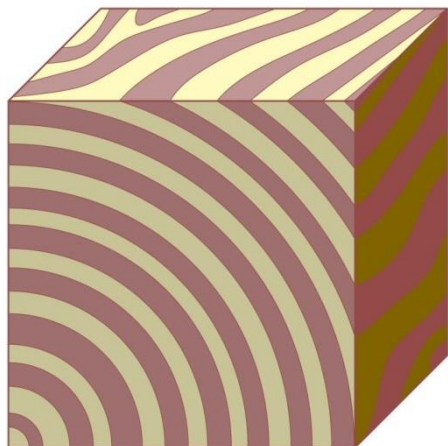
Materiał niejednorodny i anizotropowy.

Konstrukcje masywne, przejmujące obciążenia pionowe poprzez ściskanie. Zginanie i ścinanie od parcia wiatru ma drugorzędne znaczenie; nośność na zginanie i ścinanie jest dużo niższa niż na ściskanie.

Mogą być zbrojone.

### 13. Konstrukcje drewniane: drewno jako materiał konstrukcyjny - charakterystyka, wady i zalety...

- Materiał pochodzenia biologicznego; jeden z najstarszych materiałów budowlanych; wilgotność ma wielki wpływ na parametry mechaniczne; wysoka podatność na korozję biologiczną; palność; łatwość obróbki, korzystny wpływ na mikroklimat wnętrza; estetyczny wygląd;
- Materiał niejednorodny; wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie różnią się; niejednorodności lokalne (sęki);
- Materiał anizotropowy; istnieją wyróżnione kierunki i płaszczyzny; wytrzymałości mierzone równoległe, prostopadłe i po stycznej do nich są różne.



Rys: Autor





Drewno klejone: wyselekcjonowane i wysuszone cienkie półprodukty (lamelle) są sklejane w większe elementy.

Rys: boazeria.pl

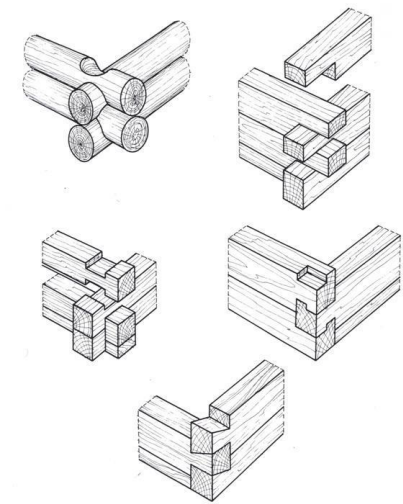
- Wyższa (w stosunku do drewna litego) wytrzymałość;
- Mniejsza skłonność do powstawania pęknięć;
- Większa jednorodność i mniejsza anizotropia, brak tendencji do skręcania;
- Wyższa odporność na zmiany wilgoci;
- Wyższa odporność na korozję biologiczną
- Wyższa ognioodporność;
- Możliwość wykonywania elementów o dużej krzywiźnie;

Współcześnie drewno klejone jako materiał konstrukcyjny coraz bardziej wypiera drewno lite.



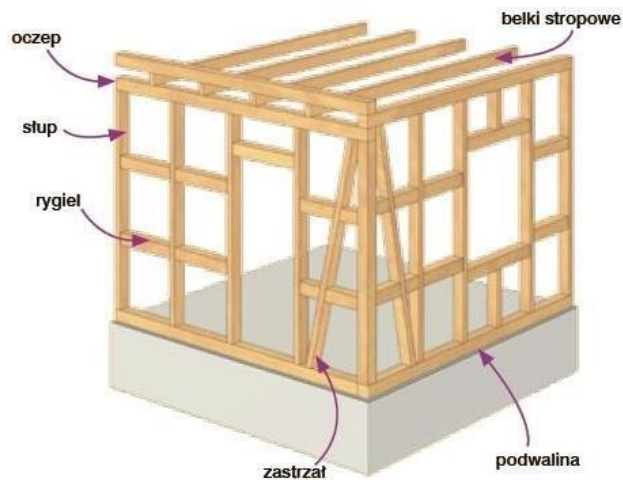
# Konstrukcje budynków:

- wieńcowa
  - blokowa (zrębowa)
  - dyłowa (sumikowo-łątkowa)
- słupowo-ryglowa (szachulec, mur pruski)
  - klasyczna (słupy wysokości jednej kondygnacji)
  - stojakowa (słupy wysokości kilku kondygnacji)
  - szkieletowa (oszalowana)

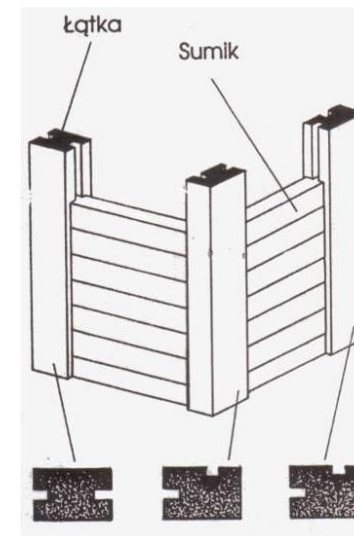


PRZYKŁADY ŁĄCZENIA BELEK ZRĘBOWYCH

Rys: urdenpl.wordpress.com



Rys: izba.centrum.zarow.pl



Rys: izbica-kujawska.com

## Konstrukcje dachów i przekryć:

- drewno lite i klejone w rozwiązaniach „klasycznych”:
  - konstrukcja krokwiowa
  - konstrukcja jętkowa
  - konstrukcja płatwiowo-kleszczowa
  - konstrukcja wieszarowa
- drewno klejone, duże rozpiętości:
  - ramy
  - dźwigary belkowe
  - łuki
  - kopuły
  - kratownice

## Połączenia:

- ciesielskie
  - wręby
  - czopy
  - gniazda
  - zamki
- metalowe
  - trzpieniowe (gwoździe, wkręty, śruby, sworznie, zszywki)
  - płytki kolczaste
  - pierścienie
- klejone

Podatne

Niepodatne

## Projektowanie

- Wzór podstawowy

$$E / R \leq 1,0$$

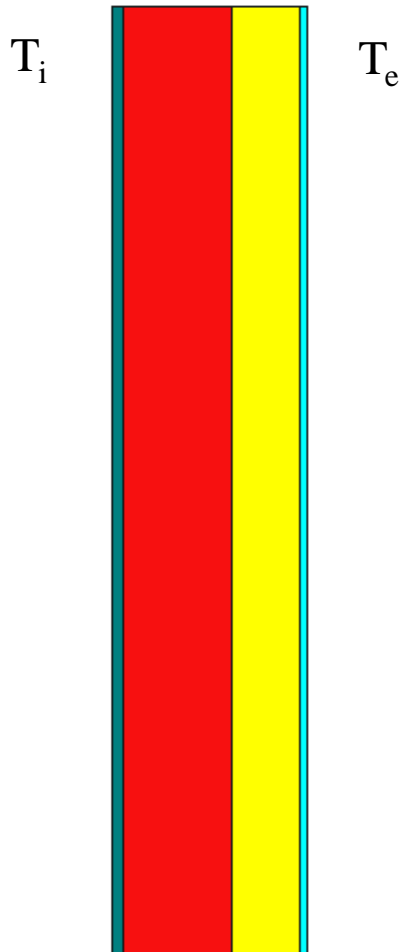
odnosi się do naprężeń w elementach i wytrzymałości drewna;

- Wytrzymałość zależy od sposobu obciążenia (zginanie, ścinanie, ściskanie, rozciąganie, przypadki łącznego obciążenia różnego rodzaju);
- Wytrzymałość zależy od kierunku obciążenia względem włókien;
- W obliczeniach pojawia się kilkanaście parametrów bezwymiarowych, opisujących stan konstrukcji; część z nich ma identyczny charakter co np. dla konstrukcji stalowych (współczynnik wyboczenia, zwichrzenia), część jest unikalna dla konstrukcji drewnianych (różnego efektów skali, korekcyjne dla dystrybucji naprężeń, dystrybucji obciążeń, korekcyjne dla naprężeń, pełzania...)

Ochrona:

Antykorozyjna	P-poż.
Impregnacja Lakierowanie	Obudowa (płyty g-k) Izolacja (wełna mineralna) Masa natryskowa Farba termopęczniejąca Impregnacja środkami opóźniającymi zapłon

## 14. Budownictwo energooszczędne; właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów i przegród budowlanych...



$$T_i > T_e$$

Elementy paroizolacyjne

Konstrukcja nośna

Termoizolacja

Wiatro- i deszczoizlacja

W przypadku chłodni przemysłowych, ocieplenie daje się od strony wnętrza konstrukcji.

Rys: Autor

## Energooszczędność:

- właściwa izolacja cieplna ścian (unikanie mostków termicznych),
- okna o niskim współczynniku przenikania ciepła,
- pasywne pozyskiwanie ciepła z otoczenia (orientacja budynku względem stron świata),
- aktywne pozyskiwanie ciepła z otoczenia (fotowoltaika, kolektory),
- inne formy energii odnawialnej (wiatr, pompa ciepła),
- wentylacja z rekuperacją.

## Audyt energetyczny:

- inwentaryzacja instalacji zużywających energię,
- ocena właściwości cieplnych budynku (charakterystyka energetyczna budynku),
- ustalenie metod zmniejszenia zużycia energii,
- ocena opłacalności tych metod,
- wskazanie optymalnych dla rozpatrywanego obiektu.

# 15. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe stalowych elementów prostych - przekrój, pojedynczy pręt, rama płaska.

Specyfika dla konstrukcji stalowych:

Poziom obliczeń:

$$\text{Punkt (spoiny): } \sigma_{\text{HMH}} / f_y \leq 1,0$$

$$\text{Przekrój (ściananie, rozciąganie): } E / R \leq 1,0 \quad ; \quad R = G f_y$$

$$\text{Element (zginanie, ściskanie): } E / R \leq 1,0 \quad ; \quad R = \chi G_{\text{kl}} f_y$$

Klasa przekroju	IV	III	II	I
$N_{\text{Rd}} =$	$A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{\text{M0}}$	$A f_y / \gamma_{\text{M0}}$		
$M_{\text{Rd}} =$	$W_{\text{eff}} f_y / \gamma_{\text{M0}}$	$W_{\text{el}} f_y / \gamma_{\text{M0}}$	$W_{\text{pl}} f_y / \gamma_{\text{M0}}$	
$M_{\text{Ed}} =$	„Normalne” obliczenia statyczne			Redystrybucja – przeliczenie do nowego schematu statycznego i nowych obciążeń



Proste formy utraty stateczności globalnej:

wyboczenie (siła ściskająca)

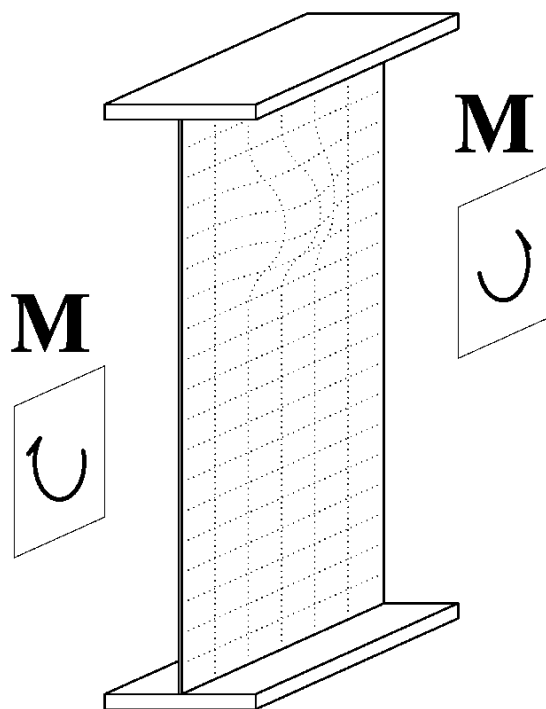
zwichrzenie (moment zginający)

Złożone formy (interakcja wyboczenia ze zwichrzeniem; słupy ram – potencjalnie duże długości wyboczeniowe w płaszczyźnie ram)

Rozmieszczenie stężeń poprzecznych

Sprawdzanie sztywności węzłów w ramach (węzły podatne zmieniają rozkład sił przekrojowych po długości elementów dochodzących do węzła podatnego)

## 16. Wpływ stateczności miejscowej na nośność blachownic stalowych.



Rys: Autor



Rys: ijird.com

Dla smukłych środników (IV klasa) zachodzi ryzyko lokalnej utraty stateczności w części ściskanej przekroju.

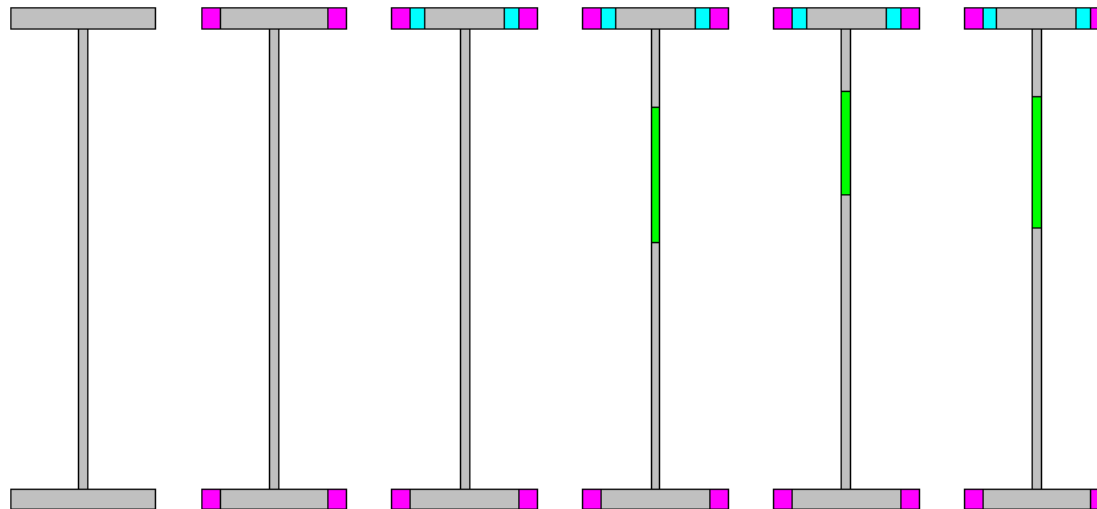
Kroki redukcji dla przekrojów stalowych spawanych:

**Redukcja szerokiej półki** (dokonywane w jednym kroku obliczeń, obie półki w identyczny sposób, przekrój jest nadal symetryczny, zachodzi konieczność przeliczenia na nowo jego charakterystyk geometrycznych)

**Redukcja półki ściskanej** (dokonywane w jednym kroku obliczeń, zazwyczaj każda półka winny sposób, przez co przekrój jest niesymetryczny, zachodzi konieczność policzenia nowego środka ciężkości i przeliczenia na nowo charakterystyk geometrycznych)

**Redukcja ściskanej części środknika** (kilka kroków iteracyjnych, przekrój jest niesymetryczny, zachodzi konieczność policzenia nowego środka ciężkości i przeliczenia na nowo charakterystyk geometrycznych)

Rys: Autor



Forma		Zabezpieczenie
Niestateczność środnika ściskanego		Żebra podłużne, geometria efektywna
Niestateczność półki ściskanej  Rys: Saliba, N. Gardner, L. Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders. Engineering Structures. 1 / 2013		Żebra poprzeczne, proporcje półka:środnik
Niestateczność środnika ścinanego  Rys: Saliba, N. Gardner, L. Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders. Engineering Structures. 1 / 2013		Żebra poprzeczne, nośność na ścinanie
Niestateczność środnika przy docisku  Rys: Local Web Buckling in Tapered Composite Beams - A Parametric Study, R. Hobbs, P. Vellasco, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences 23-4/2001		Żebra poprzeczne, nośność na ściskanie poprzeczne

## 17. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe stalowych budynków halowych/szkieletowych.

Budynek halowy : parterowy, jedni- lub wielonawowy, bez ścian wewnętrznych. Konstrukcja nośna – powtarzalna rama płaska o węzłach sztywnych, w kierunku poprzecznym spięta stężeniami, płatwami i rygielkami. Stal, żelbet, drewno.

Budynek szkieletowy : wielopiętrowy, ze ścianami wewnętrznymi. Konstrukcja nośna – rama płaska lub przestrzenna o węzłach sztywnych. Układ nośny jest umownie dzielony na grawitacyjny (siły pionowe) i sztywnościowy (zginanie, siły poziome). Stal, żelbet, drewno.

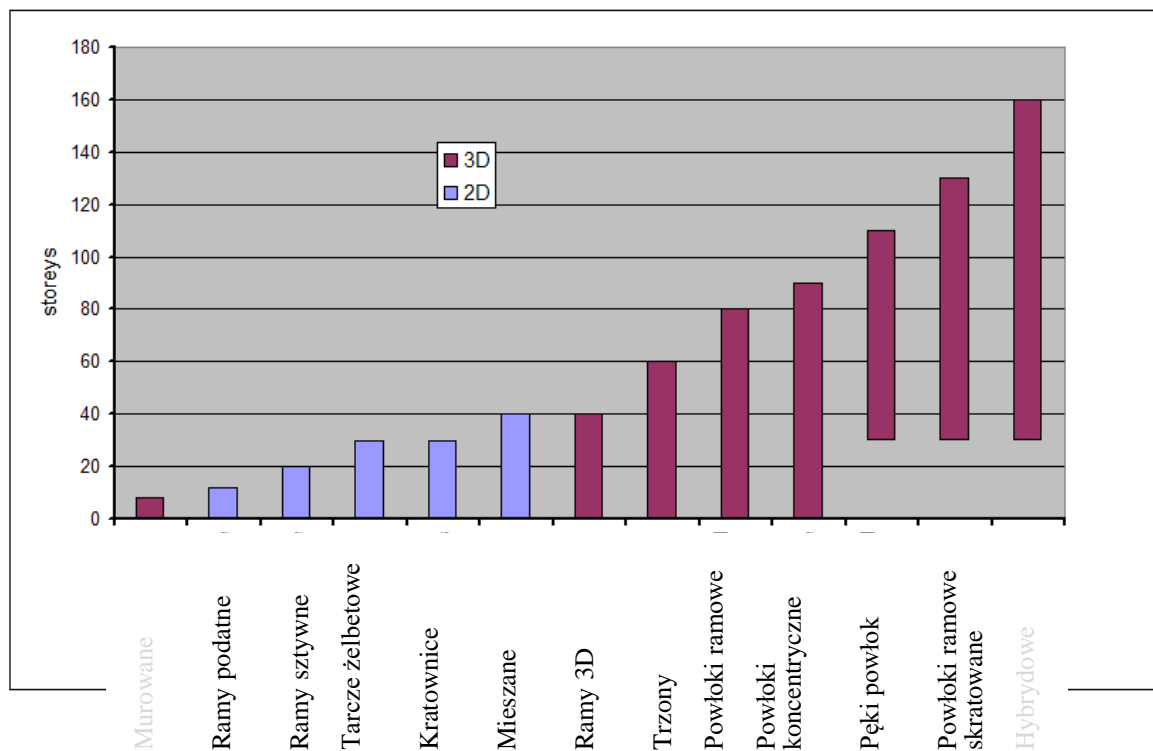
Rys: syrek.com.pl



Rys: ocmer.com.p

Hale: rygle pełnościennie, rygle kratowe; rozmieszczenie stężeń poprzecznych o podłużnych; współpraca z obudową; długość wyboczeniowa słupów; współpraca z obudową; rodzaje płatwii.

Szkielety: układy stężające (ramowe, kratowe, płytowe, mieszane), zależność między wysokością a zalecanym rodzajem stężenia, współpraca z przeponami stropów (konstrukcje zespolone, konstrukcje słupowo-płytowe), sztywność węzłów (szkielety o węzłach podatnych lub sztywnych).



Rys: Autor



## 18. Zagadnienia konstrukcyjne i obliczeniowe przykładowych stalowych konstrukcji z blach (np. zbiorniki, silosy, rurociągi).

### Stany graniczne

Typ	Według EN 1990	Uściślenie dla powłok stalowych EN 1993-1-6	Przykład
SGN	SG EQU	SG EQU	Przesunięcie pustego zbiornika przez wiatr
	SG STR	LS1, SL3	Nośność, stateczność
	SG GEO	SG GEO	Problemy z fundamentami
	SG FAT	LS2, LS4	Zmęczenie nisko- i wysokocyklowe
SGU	SGU	SGU	Deformacje

## LS1 Zniszczenie plastyczne (EN 1993-1-6 6)

$$\sigma_{x, Ed} = (n_{x, Ed} / t) \pm [m_{x, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \sigma_{\theta, Ed} = (n_{\theta, Ed} / t) \pm [m_{\theta, Ed} / (t^2 / 4)]$$

$$\tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) \pm [m_{xq, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \tau_{xn, Ed} = (q_{xn, Ed} / t) \quad ; \quad \tau_{\theta n, Ed} = (q_{\theta n, Ed} / t)$$

$$\tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) E[m_{x\theta, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \tau_{xn, Ed} = (q_{xn, Ed} / t) \quad ; \quad \tau_{\theta n, Ed} = (q_{\theta n, Ed} / t)$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)]} \leq f_{eq, Rd} = f_{yd}$$

Jest tu pełna analogia z warunkami

$$N_{Ed} / N_{Rd} \leq 1,0 \quad \text{lub} \quad M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$$

dla pręta.



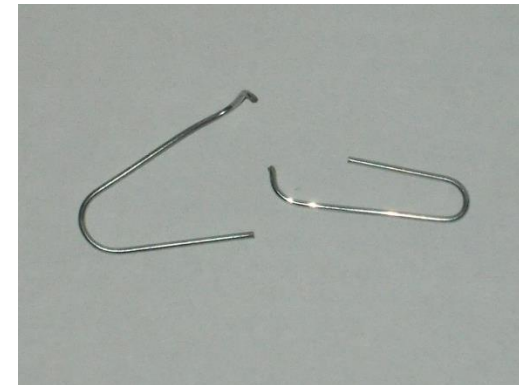
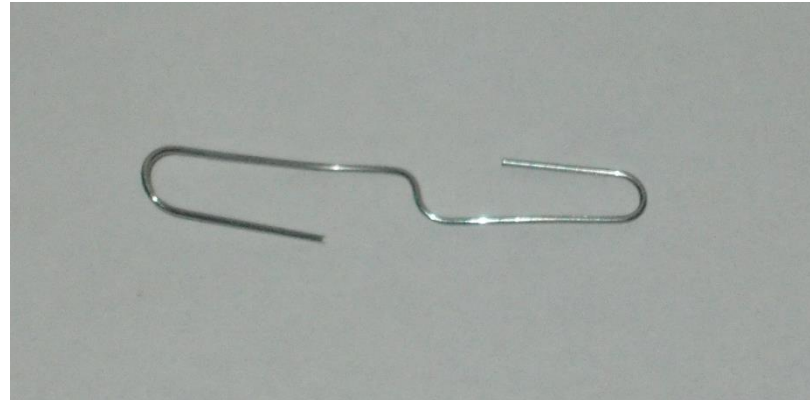
## LS2 Nieprzystosowanie plastyczne (EN 1993-1-6 7)

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{[\Delta\sigma_{1,i}^2 + \Delta\sigma_{2,i}^2 - \Delta\sigma_{1,i} \Delta\sigma_{2,i} + 3\Delta\tau_{12,i}^2]} \leq \Delta f_{eq,Rd,i} = 2f_{yd}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{1,i} &= |\sigma_{1i,T}| + |\sigma_{1i,C}| \\ \Delta\tau_{1,i} &= |\tau_{1i,T}| + |\tau_{1i,C}|\end{aligned}$$

Tu brak jest analogii do obliczeń elementów prętowych

Rys: Autor



Przykładem może być zabawa w zginanie spinacza

### LS3 Niestateczność (EN 1993-1-6 8)

$$(\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Rd})^{k_x} - k_i (\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Rd}) (\sigma_{q,Ed} / \sigma_{q,Rd}) + (\sigma_{q,Ed} / \sigma_{q,Rd})^{k_q} + (\tau_{xq,Ed} / \tau_{xq,Rd})^{k_t} \leq 1,0$$

$\sigma_{x,Ed}, \sigma_{q,Ed}, \tau_{xq,Ed}$  – efekty obciążenia

$\sigma_{x,Rd}, \sigma_{q,Rd}, \tau_{xq,Rd}$  – nośności krytyczne

$$\sigma_{x,Rd} = \chi_x f_{yk} / \gamma_{M1}$$

$$\sigma_{q,Rd} = \chi_q f_{yk} / \gamma_{M1}$$

$$\tau_{xq,Rd} = \chi_t f_{yk} / (\gamma_{M1} \sqrt{3})$$

$\chi_f$  – współczynniki wyboczeniowe;  $\chi_f = \chi_f$  (smukłość, imperfekcje)

$k_x, k_q, k_t, k_i$  – współczynniki interakcji;  $k_f = k_f (\chi_f)$ ,

Analogia – stateczność interakcyjna elementu prętowego:

EN 1993-1-1 6.3.3

$$N_{Ed} / N_{Rd, cr} + k_{yi} M_{yEd} / M_{yRd, cr} + k_{zi} M_{zEd} / M_{zRd} \leq 1,0 \quad i = y, z$$

$N_{Ed}$ ,  $M_{yEd}$ ,  $M_{zEd}$  – efekty obciążenia

$N_{Rd, cr}$ ,  $M_{yRd, cr}$ ,  $M_{zRd}$  – nośności krytyczne

$$N_{Rd, cr} = \chi_i N_{Rd}$$

$$M_{yRd, cr} = \chi_{LT} M_{yRd}$$

$\chi_y$ ,  $\chi_z$ ,  $\chi_{LT}$  – współczynniki wyboczeniowe;  $\chi_{gh} = \chi_{gh}$  (smukłość, imperfekcje)

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$  – współczynniki interakcji;  $k_{ij} = k_{ij} (\chi_{gh} R_{rd})$ ,

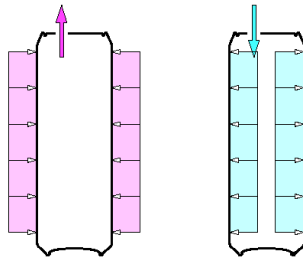
## Zmęczenie LS4 (EN 1993-1-6 9)

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E / (\sigma_R / \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$
$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_E / (\tau_R / \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$

$\sigma_R$  ,  $\tau_R$  – nośność zmęczeniowa, uzależniona od liczby cykli obciążenia i rodzaju imperfekcji

Identyczne zasady obowiązują dla konstrukcji prętowych (np. estakad podsuwnicowych)

## Dwa przypadki: ssanie (LS3) i wdmuchiwanie powietrza do puszki (LS1)



Rys: T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019

Warunek  $LS2 \neq 2 \cdot (\text{warunek } LS1)$ :

$$LS2 = LS1_T + LS1_C \pm \Delta$$

LS2 – zmęczenie niskocyklowe ( $< 100\ 000$ ); bierze się pod uwagę „zwykłą” wytrzymałość materiału

LS4 – zniszczenie wysokocyklowe ( $> 100\ 000$ ); bierze się pod uwagę wytrzymałość zmęczeniową materiału

## Obciążenia:

Parcie hydrostatyczne (zbiorniki)

Złożone schematy w przypadku materiału sypkiego (silosy – obciążenia uzależnione od smukłości silosu i parametru AAC; rozkład liniowy i teoria Janssena)

Nad- i podciśnienie (zbiorniki, silosy, rurociągi)

Wiatr statycznie (kominy, silosy, zbiorniki, rurociągi)

Wiatr dynamicznie (kominy – wiry)

Sytuacje wyjątkowe (wybuch gazu w zbiornikach i rurociągach, wybuch pyłu w silosach, kolizja z pojazdem mechanicznym)

Niezawodność, ogólny wpływ na obliczenia:

Klasa konsekwencji	Obliczenia, wykonanie	
CC3	Tylko MES	Zmiana współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń; poziom nadzoru przy projektowaniu i budowie, klasy wykonania
CC2	MES lub wzory uproszczone	
CC1	Wzory uproszczone	

Niezawodność, wpływ dodatkowy:

Klasa konsekwencji	Obliczenia
Kominy	Limit amplitudy drgań przy wzbudzeniu wirowym, określenie dopuszczalnego poziomu imperfekcji wykonawczych
Silosy	Określenie dopuszczalnego poziomu imperfekcji wykonawczych
Zbiorniki	

## 19. Podstawy prefabrykacji i typizacji elementów i konstrukcji z betonu...

Żelbetowe elementy prefabrykowane:

- Belki
- Słupy
- Płyty stropowe
- Ściany oporowe
- Stopy kielichowe
- Elementy zbiorników

Każdorazowo należy rozważyć 3 fazy pracy:

- Podczas wyjmowania z formy
- Transportu i montażu
- Eksploatacji



Typizacja: powtarzalne moduły o ujednoliconych wymiarach

Kwestia uciąglenia elementów na budowie (obetonowanie węzłów, spawanie zbrojenia w węzłach)

Zbiorniki prefabrykowane: kwestia szczelności (na skutek zarysowania oraz na styku elementów prefabrykowanych), kwestia oparcia cylindra zbiornika na dnie (przesuwana w fazie montażu, przegubowa lub utwierdzona w fazie eksploatacji), wpływy parasejsmiczne (drgania drogowe).

## 20. Zasady projektowania i kształtowania złożonych ustrojów konstrukcyjnych (ustroje szkieletowe, ustroje płytowo-słupowe, ustroje tarczowe).

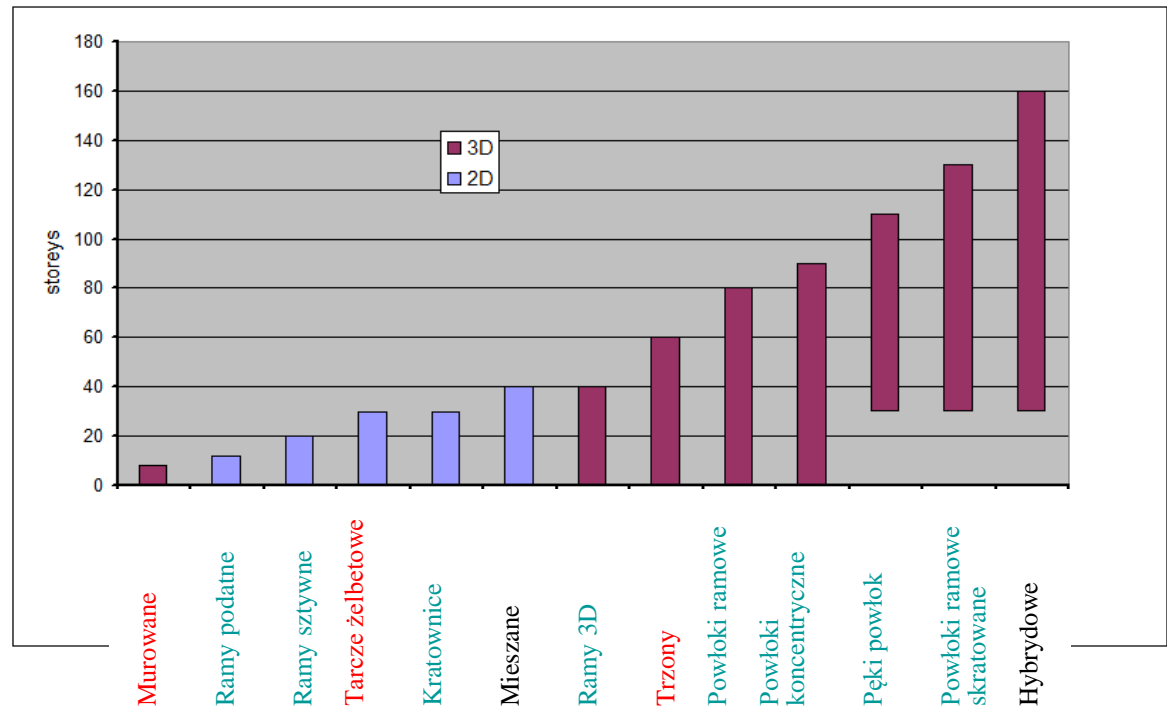
Przekazanie sił na fundamenty możliwie najkrótszą drogą;  
Unikanie nie osiowego przekazywania siły ze słupów;  
Obciążenie wiatrem i siłami parasejsmicznymi powinno być przejmowane przez elementy o dużej sztywności;  
Unikanie skręcania elementów;  
Szerokie wykorzystanie układów stężających

**Szkieletowe** – sztywność pozioma dzięki belkom, pionowa dzięki słupom

**Płytowo-słupowe** – sztywność pozioma dzięki stropom, pionowa dzięki słupom

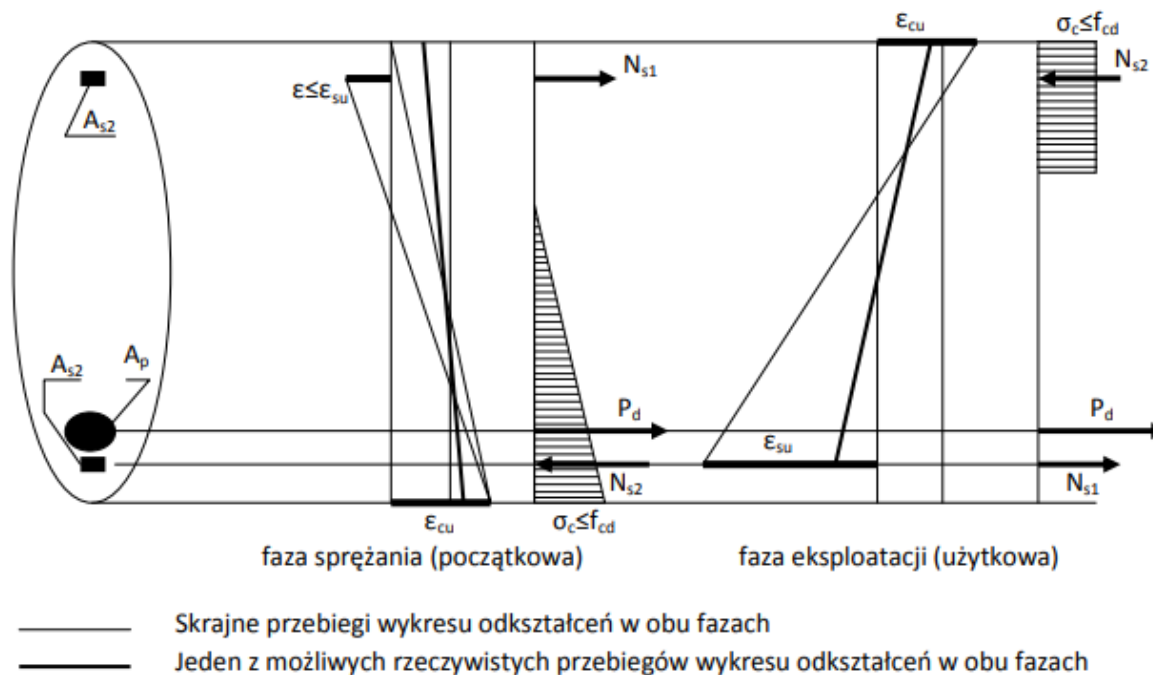
**Tarczowe** – sztywność pionowa i pozioma dzięki elementom tarczowym

Rys: Autor



## 21. Projektowanie betonowych konstrukcji sprężonych metodą ogólną - analiza wartości siły sprężającej, zasady obliczania elementów zginanych i ścinanych.

Obliczenie wartości naprężeń i sił przekrojowych na podstawie odkształceń przekroju, przy założeniu że w przynajmniej jednym punkcie przynajmniej jednego materiału (beton – stal zbrojeniowa – stal sprężająca) osiągnięto odkształcenie graniczne.



Rys: Stany graniczne nośności przekrojów sprężonych, P. Gwoździewicz, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 1 / 2015

Obliczenie wartości naprężeń i sił przekrojowych na podstawie odkształceń przekroju, przy założeniu że w przynajmniej jednym punkcie przynajmniej jednego materiału (beton – stal zbrojeniowa – stal sprężająca) osiągnięto odkształcenie graniczne.

Przyjęcie wstępnego wykresu odkształcenia przekroju wraz z założeniem odkształceń krawędziowych betonu i stali → Wyliczenie wysokości strefy ściskanej → Wyliczenie przyrostów odkształceń stali sprężającej → Określenie naprężeń w stali zbrojeniowej → Wyliczenie przyrostu naprężeń w stali sprężającej w stanie granicznym nośności na zginanie → Wyliczenie wypadkowej siły normalnej dla materiałów w przekroju → Porównanie wyliczonej siły normalnej z siłą zewnętrzną  $P_d$  i w razie potrzeby korekta wykresu odkształcenia (tolerancja wyników 5%) → Po korekcie ponowne obliczenia → Na podstawie zadowalającej zgodności wartości obciążenia siłą i wypadkowej, dla tego samego diagramu odkształcenia wyznacza się moment sił wewnętrznych względem pasywnego zbrojenia rozciąganego, który jest przyjmowany jako nośność przekroju na moment zginający → Nierówność  $M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$  potwierdza spełnienie warunku nośności przekroju na zginanie → Zbrojenie „klasyczne” na ścinanie.

## 22. Zasady kształtowania stropów sprężonych (strunobetonowych i kablobetonowych).

Kablobetonowe: wykonywane in situ według zasad dla konstrukcji sprężonych, sprężane kablami lub taśmami; krzywoliniowy przebieg sprężenia odwzorowujący przebieg momentów zginających.

Strunobetonowe – prefabrykaty, prostoliniowy przebieg sprężenia; płyty HC (kanałowe), belki TT (sprężenie w środkach).

Sprężenie belek ukrytych w siatce słupów i przęseł płyt.

Zbrojenie pomocnicze (ścięcie, przebicie).

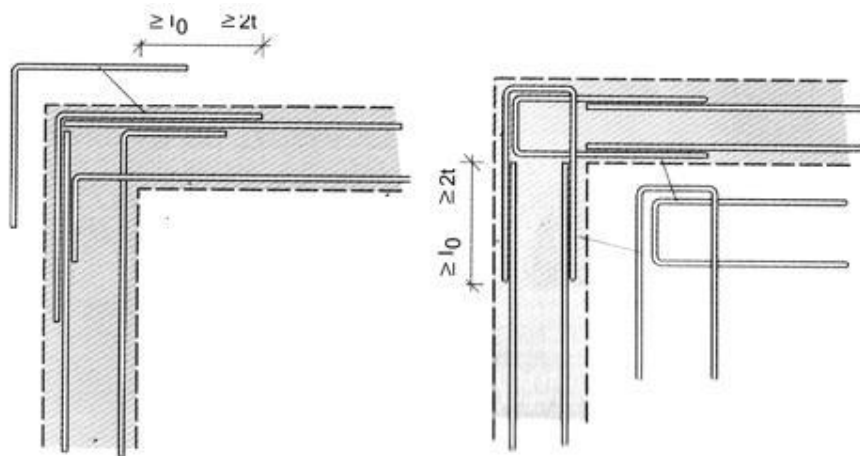
## 23. Zasady projektowania i kształtowania zbrojenia w monolitycznych zbiornikach na materiały sypkie i ciecze.

Silos: rozkład obciążenia od parcia materiału zależy od smukłości silosu (liniowy dla niskich, teoria Janssena dla smukłych).

Zbiornik: parcie hydrostatyczne (rozkład liniowy).

Zbrojenie obwodowe na zewnątrz w stosunku do południkowego; zbrojenie przy licu zewnętrznym i wewnętrznym.

Miejsca wrażliwe: połączenie ściany i dna zbiornika, ściany i leja silosu, dwu ścian zbiornika lub silosu (jeśli prostopadłościenne). Długości zakotwieniowe prętów.



Rys: chodor-projekt.net

## 24. Konstrukcje przemysłowe specjalne: zasady projektowania fundamentów i konstrukcji wsporczych obciążonych maszynami.

Rolą fundamentu pod maszynę jest przekazanie obciążeń na grunt i ograniczenie amplitud drgań. Problemem są tutaj:

- Możliwość wystąpienia rezonansu między siłami wzbudzanymi a częstotliwością drgań własnych fundamentu;
- Niebezpieczeństwo uszkodzenia / zniszczenia maszyny;
- Poziom wibracji nieakceptowany przez pracowników;
- Przekazywanie drgań przez grunt na sąsiednie budynki.

Środek ciężkości układu fundament-maszyna-instalacje może dać względem geometrycznego środka podstawy mimośród nie przekraczający 3%.

Wyróżniamy dwa rodzaje fundamentów:

- Blokowe (pod maszyny wzbudzające duże wartości sił bezwładności; są liczone jako bryła sztywna na podłożu sprężystym);
- Ramowe (pod maszyny wzbudzające małe siły bezwładności; konstrukcja sprężysta na podłożu sprężystym).



## 25. Kształtowanie i konstruowanie żelbetowych mostów sprężonych dużych rozpiętości.

Duża rozpiętość przęsła → duża odległość między podporami → zazwyczaj brak możliwości wykonania podpór montażowych; potrzeba dużej sztywności przęsła w fazie użytkowania.

Przęsła najczęściej skrzynkowe;

Mosty wznoszone metodą wspornikową.

Kable sprężające umieszczane w ściankach przekrojów skrzynkowych;

Konieczność uwzględniania zmian schematu statycznego (coraz dłuższy wspornik, finalnie pełne przęsło) i sposobu obciążenia (do współpracy włączają się kable kolejnych segmentów).



## 26. Zasady konstruowania i obliczania podpór mostowych.

Podpory mostów dzielimy na:

- Skrajne (przyczółki);
- Pośrednie (filary).

Oprócz umiejscowienia w konstrukcji i sposobu budowania, podstawową różnicą są obciążenia.

W przypadku filarów istotną rolę może odegrać obciążenie „rzeczne”: parcie wody, wypór, parcie kry, uderzenie przez statek.

Dla przyczółków z kolei ważnymi rodzajami obciążenia jest obciążenie gruntem otaczającym przyczółek, obciążenie naziomu tego gruntu i siły hamowania pojazdów na moście.

## 27. Analiza statyczno-wytrzymałościowa przęseł mostów płytowych i belkowych.

Mosty płytowe: płyta lita lub drażona, maksymalna rozpiętość do ok 40 m, maksymalna grubość 1,0 m (lita) – 1,5 m (kanałowa). Materiał żelbet. Model statyczny: długa płyta podparta na podporach.

Mosty belkowe: płyta żelbetowa lub stalowa ortotropowa oparta na belkach i poprzecznicach; stalowych lub żelbetowych. Grubość płyty o wiele mniejsza w porównaniu z mostem płytowym, wysokość belek większa niż grubość mostu płytowego. Rozpiętości 80 – 150 m. Model obliczeniowy: płyta utwierdzona na obwodzie w belkach i poprzecznicach; jedna krawędź swobodna w przypadku płyt skrajnych. Analizę rozkładu obciążenia z płyt na belki można prowadzić przy użyciu linii wpływu i współczynników rozkładu obciążenia.

## 28. Diagnostyka, naprawa i wzmacnianie ustrojów konstrukcyjnych z zastosowaniem materiałów FRP i cięgien bez przyczepności.

Diagnostyka: ocena stanu konstrukcji (deformacje, pęknięcia, uszkodzenia) w sytuacji zużycia eksploatacyjnego, awarii lub katastrofy budowlanej.

Katastrofa budowlana: niezamierzone, gwałtowne zniszczenie obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań, elementów urządzeń formujących, ścianek szczelnych i obudowy wykopów. Nie jest katastrofą budowlaną: 1) uszkodzenie elementu wbudowanego w obiekt budowlany, nadającego się do naprawy lub wymiany; 2) uszkodzenie lub zniszczenie urządzeń budowlanych związanych z budynkami; 3) awaria instalacji. (Prawo budowlane, rozdział 7, art. 73.1)

Awaria budowlana: zdarzenie, w wyniku którego konstrukcja obiektu uległa uszkodzeniom (np. rysy, pęknięcia, nadmierne ugięcia) lub przemieszczeniom w stopniu utrudniającym lub uniemożliwiającym dalszą bezpieczną eksploatację całości lub fragmentu obiektu. (orzecznictwo ITB).

Naprawa – polepszenie warunków pracy co najmniej jednego fragmentu (węzeł, element) przez wzmocnienie lub wymianę na nowy.

Naprawa bierna – brak zmiany rozkładu sił wewnętrznych

Naprawa czynna – zmiana rozkładu dotychczasowego rozkładu sił wewnętrznych (zmiana schematu statycznego, sprężenie dodatkowymi cięgnami, zwiększenie przekroju wybranych elementów).

Wzmocnienie – zapewnienie możliwości przenoszenia większych sił przekrojowych bez negatywnych skutków (rozbudowa przekroju, sprężenie cięgnami).

FRP (Fibre Reinforced Polymers) – kompozyt, włókna niemetaliczne (węglowe, szklane, aramidowe) w osłonie z żywicy epoksydowej.

Bardzo wysoka wytrzymałość na rozciąganie Wysoka odporność na korozję Niski ciężar Szybki montaż Niski koszt	Zniszczenie bez wyraźnych sygnałów ostrzegawczych Wrażliwość na temperaturę
--	--

Żelbet, beton, stal, mur, drewno

Elementy rozciągane i ścinane

Zastępują dodatkowe zbrojenie

Stropy uszkodzone sejsmicznie bez konieczności zwiększania ich masy

Konstrukcje uszkodzone pożarem lub wybuchem

Przy zmianie sposobu użytkowania

Cięgno bez przyczepności – cięgno pracujące w warunkach braku liniowego kontaktu z konstrukcją. Najczęściej jest z nią połączone przez układ sztywnych dewiatorów, zapewniających odpowiednie ramie działania. Siła sprężająca w cięgnie wywołuje w konstrukcji odpowiednio umiejscowiony i zorientowany układ momentów zginających, poprawiających pracę statyczną.

Konstrukcje dużych rozpiętości (ciągna, przerycia dużych rozpiętości).

Wznoszenie nowych konstrukcji (mosty *extradosed*) i wzmacnianie istniejących.

Dziękuję za uwagę

© 2026 Tomasz Michałowski

[tmichal@pk.edu.pl](mailto:tmichal@pk.edu.pl)