

Konstrukcje metalowe II

Wykład I

Szkielety budynków wysokich

Spis treści

Budynki i budowle → #t / 3

Ranking → #t / 10

Charakterystyki dynamiczne → #t / 22

Wiatr i trzęsienie ziemi → #t / 39

Efekty obciążenia wiatrem → #t / 53

Rozwiązania konstrukcyjne → #t / 69

Materiały konstrukcyjne → #t / 85

Wymagania odnośnie węzłów → #t / 89

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 97

Budynki i budowle

Budynek: konstrukcja trwale związana z gruntem, wydzielona z przestrzeni ścianami i dachem;

Budowla: nie budynek, nie mała architektura;

Obiekty budowlane: budynki + budowle + mała architektura

USTAWA
z dnia 7 lipca 1994 r.

Prawo budowlane¹⁾

2) budynku – należy przez to rozumieć taki obiekt budowlany, który jest trwale związany z gruntem, wydzielony z przestrzeni za pomocą przegród budowlanych oraz posiada fundamenty i dach;

Art. 3.

Ilekroć w ustawie jest mowa o:

- 1) obiekcie budowlanym – należy przez to rozumieć:
 - a) budynek wraz z instalacjami i urządzeniami technicznymi,
 - b) budowlę stanowiącą całość techniczno-użytkową wraz z instalacjami i urządzeniami,
 - c) obiekt małej architektury;

- 3) budowli – należy przez to rozumieć każdy obiekt budowlany niebędący budynkiem lub obiektem małej architektury, jak: obiekty liniowe, lotniska, mosty, wiadukty, estakady, tunele, przepusty, sieci techniczne, wolno stojące maszty antenowe, wolno stojące trwale związane z gruntem urządzenia reklamowe, budowle ziemne, obronne (fortyfikacje), ochronne, hydrotechniczne, zbiorniki, wolno stojące instalacje przemysłowe lub urządzenia techniczne, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów, stacje uzdatniania wody, konstrukcje oporowe, nadziemne i podziemne przejścia dla pieszych, sieci uzbrojenia terenu, budowle sportowe, cmentarze, pomniki, a także części budowlane urządzeń technicznych (kotłów, pieców przemysłowych, elektrowni wiatrowych, elektrowni jądrowych i innych urządzeń) oraz fundamenty pod maszyny i urządzenia, jako odrębne pod względem technicznym części przedmiotów składających się na całość użytkową;

Budynki



Rys: wikipedia

Budowle



Rys: wikipedia, renewablesinternational.net,
powerengineeringint.com, electrek.co

Główna idea:

Wiele pięter → zwiększenie powierzchni użytkowej bez zwiększania powierzchni podstawy → dobre rozwiązanie w zatłoczonych centrach miast, gdzie cena gruntu jest bardzo wysoka.



Rys: wikipedia

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 IV 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie

Wysokość	Symbol
< 12 m; < 4 kondygnacje	N
12 - 25 m; 4- 9 kondygnacji	SW
25 - 55 m; 9 - 18 kondygnacji	W
> 55 m; > 18 kondygnacji	WW

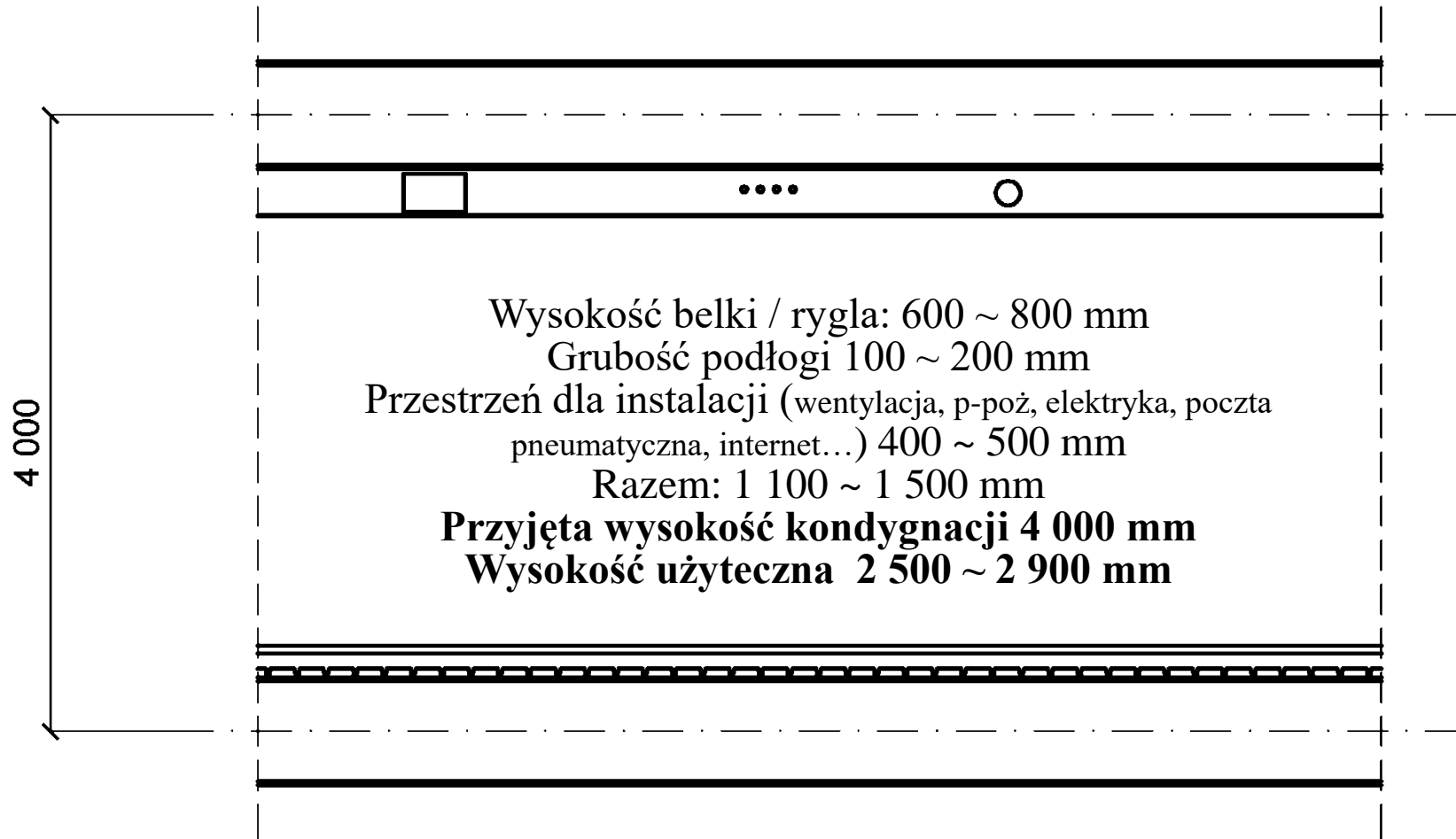
Zgodnie z tym dokumentem:

4 kondygnacje ↔ 12 m → 3,0 m / kondygnację

9 kondygnacji ↔ 25 m → 2,7 m / kondygnację

18 kondygnacji ↔ 55 m → 3,1 m / kondygnację

W rzeczywistości powinno być to nieco więcej...



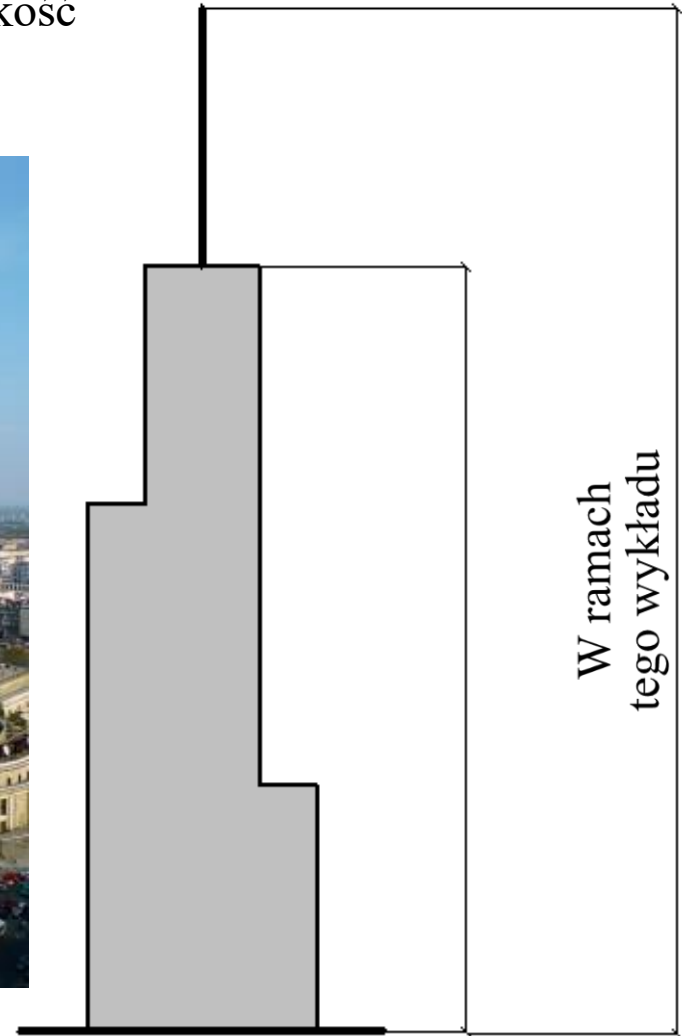
Rys: Autor

Ranking

Pytanie: co traktować jako wysokość budynku?



Rys: wikipedia

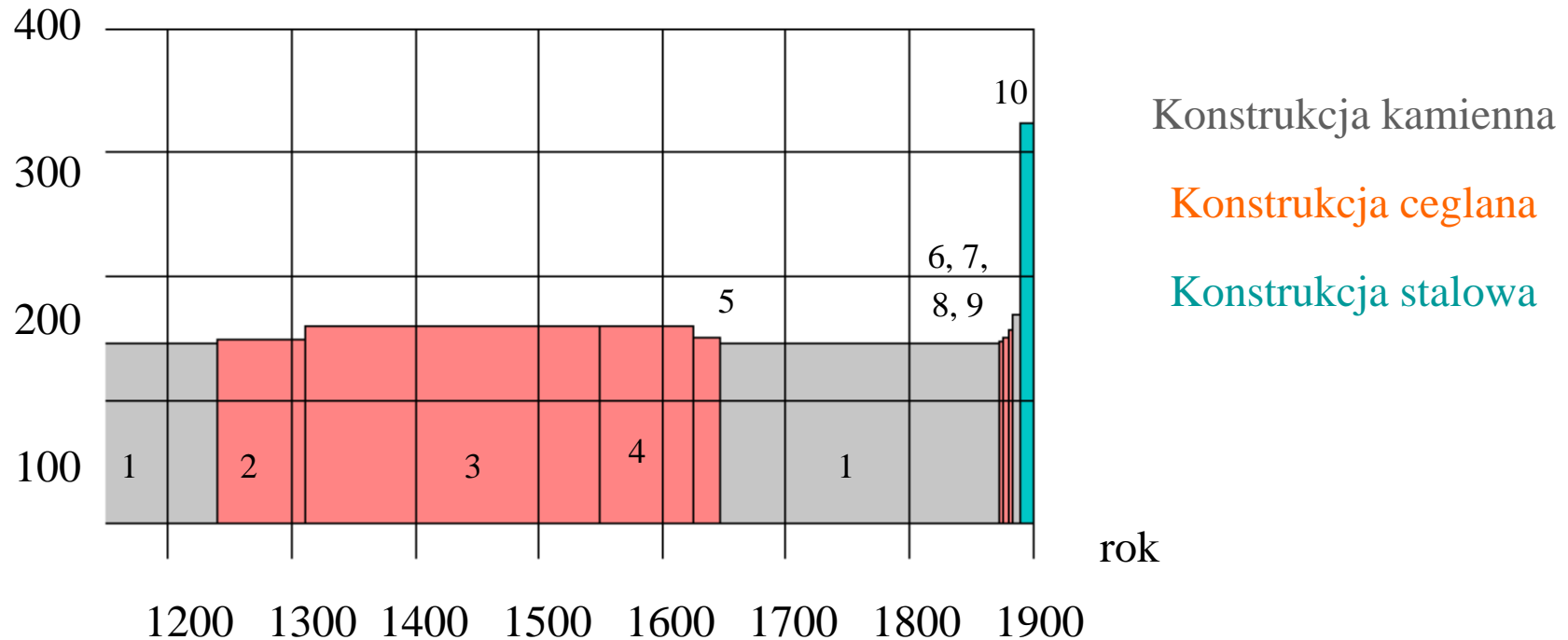


Rys: Autor

Najwyższe budowle przez wieki

wysokość [m]

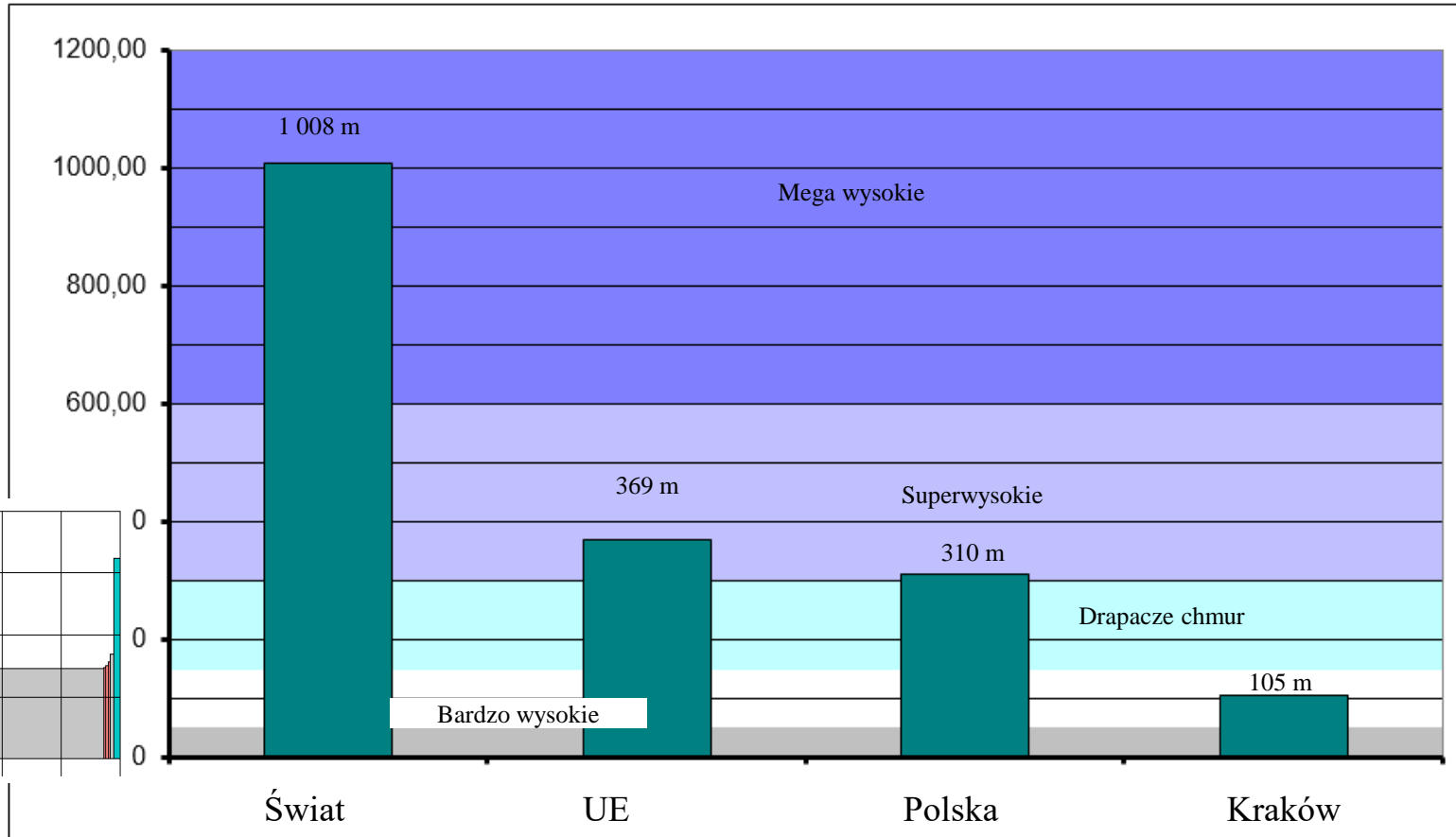
Rys: Autor



1. Piramida Cheopsa 2. Stara Katedra, Londyn 3. Katedra w Lincoln 4. Kościół Św Olafa, Tallin 5. Kościół Mariacki, Stralsund 1. Piramida Cheopsa 6. Kościół Św Mikołaja, Hamburg 7. Katedra w Rouen 8. Katedra w Kolonii 9. Obelisk Waszyngtona 10. Wieża Eiffel'a

Brak jest oficjalnej definicji pojęcia „drapacz chmur”. Według nieoficjalnej (acz często używanej), jest to budynek o wysokości co najmniej równej 150 m. Podobnie brak oficjalnej regulacji dla pojęć „superwysoki” ($h > 300$ m) i „mega wysoki” ($h > 600$ m). Budowle, zaprezentowane poniżej, można podzielić na kilka grup:

Rys: Autor



Mega wysokie (> 600 m) w świecie (8 budynków)

W budowie(2)

1. Jeddah Tower (SA), 1008 m (638); 167 pięter;

Istniejące (4)

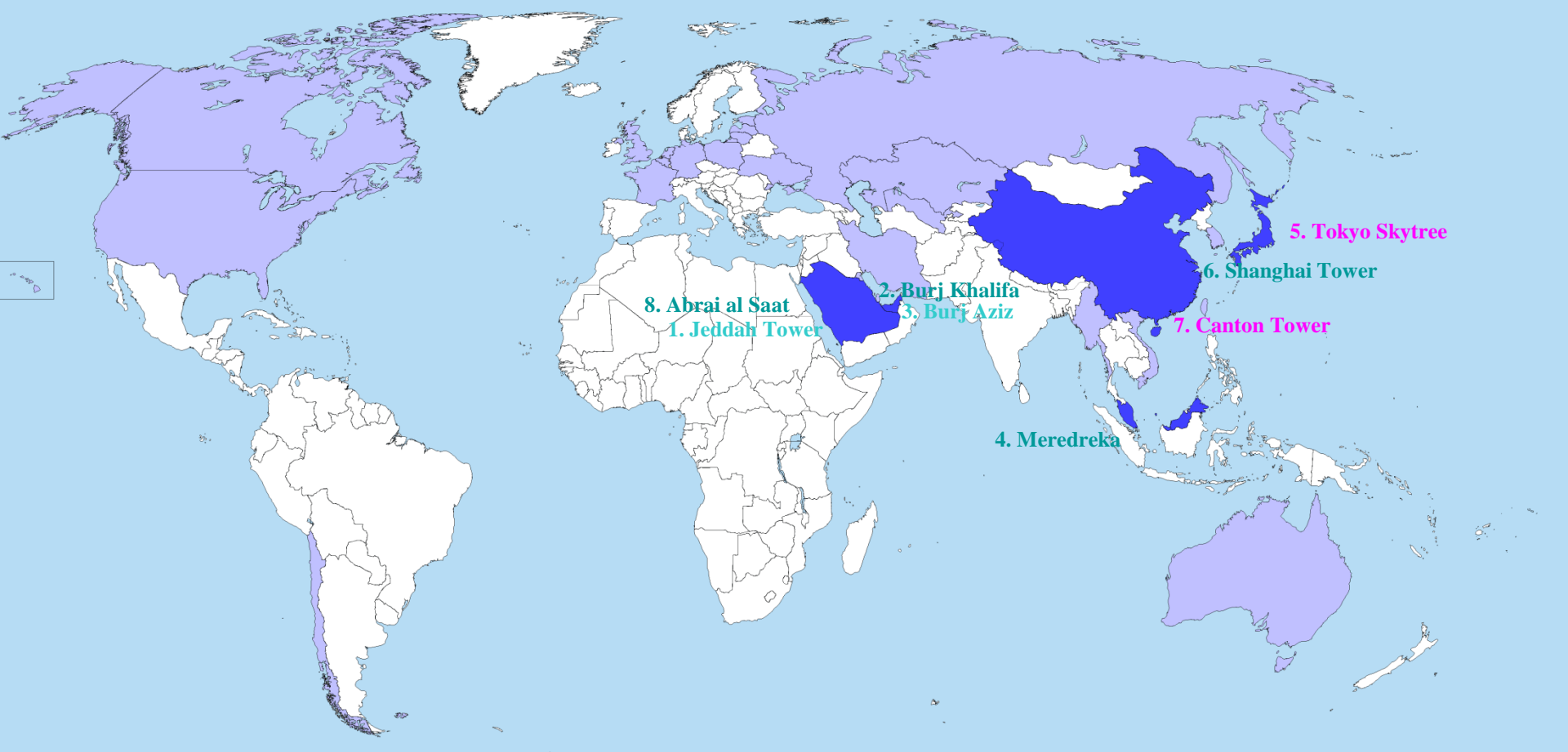
2. Burj Khalifa (UAE), 830 m (585); 163 pięter;

Wieże (2)

5. Tokyo Skytree (J), 634 m;



Rys: wikipedia



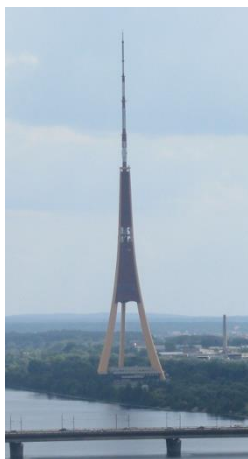
Rys: Autor

Megawysokie (istniejące / w budowie) (> 600 m; 5 krajów)

Superwysokie istniejące (300 – 600 m; 23 kraje)

Wieże (32)

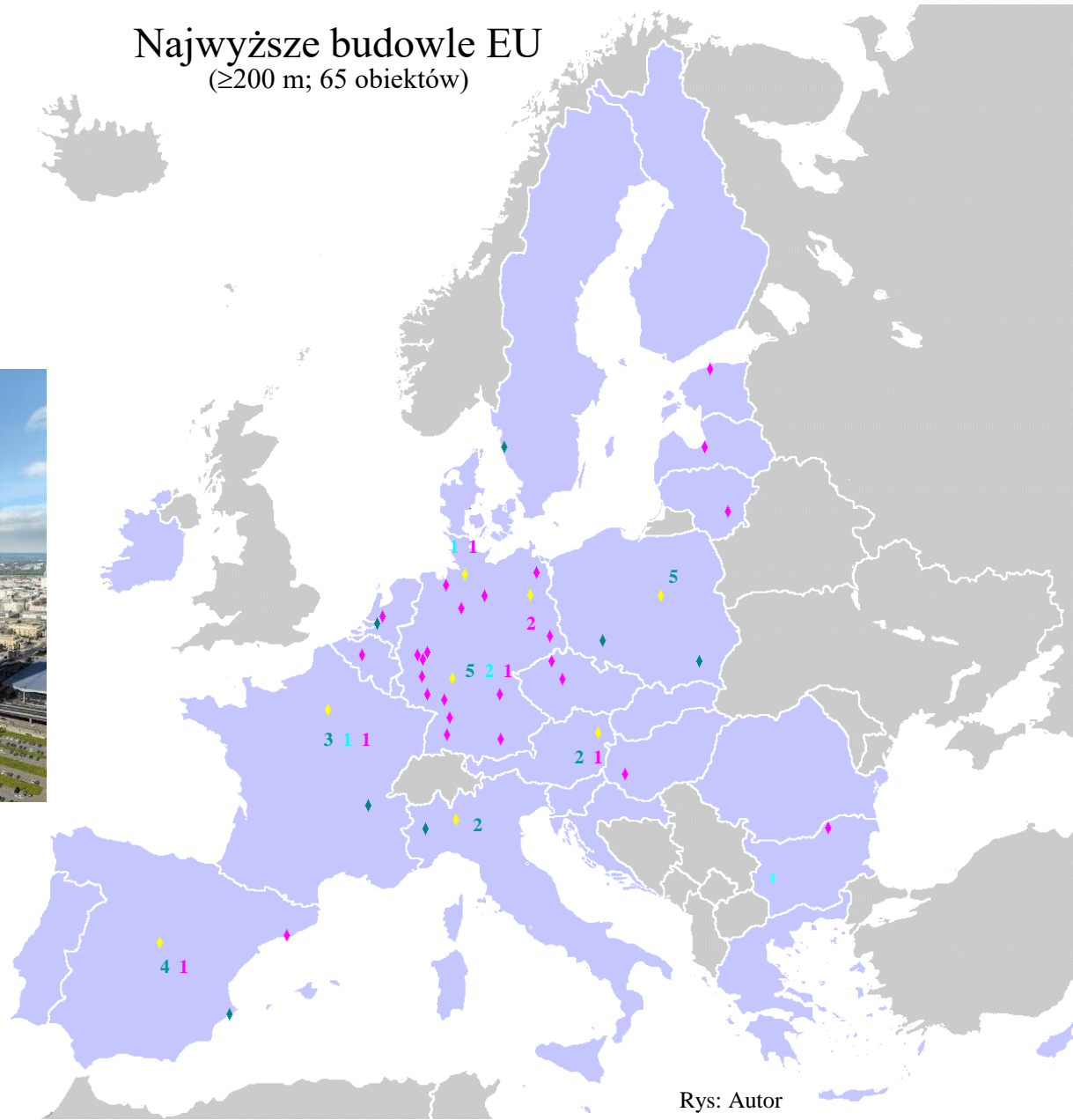
1. Riga RTV Tower, Łotwa, 369 m



Rys: wikipedia

Najwyższe budowle EU

(≥200 m; 65 obiektów)



Rys: Autor

Istniejące (28)

8. Varso, Warszawa, 310 m



Rys: elbtower.de



W budowie(5)

27. Elbtower Hamburg, Niemcy 245 m

Drapacze
chmur

Bardzo wysokie budynki w Krakowie



Rys: wikipedia



Rys: wikipedia

* K1 (Błękitek), 105 m (88), 20 pięter ;

* Unity Tower, 102 m, 27 pięter ;

* Hejnalica, 82 m ;

* Łagiewniki, 77 m ;

* Kościół św. Józefa, 74 m ;

* Kościół Bożego Ciała, 70 m ; * Ratusz, 70 m ;

* Centrum Jana Pawła II, 68 m ;

* Dom Wschodzącego Słońca, 65 m (55), 17 pięter ;

* Kosocice Watertower 63 m ; * Biprostal, 63 m (55), 14 pięter ;

* Bocianie Gniazdo (Okraślak), 62 m (60), 17 pięter ; * Quattro
Business Park, 62 m (55), 14 pięter ; * Krzemionki Radio
Tower, 62 m ;

* Rondo Business Park, 60 m (55), 15 pięter ; * Salwator
Tower, 60 m (53), 17 pięter ;

* Wieżowiec Kijowska, 55 m (55), 17 pięter ; * Vinci, 55 m (55),
12 pięter ; * Akropol, Babilon, Kapitol, Olimp, wieżowiec SPN
(5 identycznych wieżowców na terenie AGH), 55 m (55), 16 pięter
; * Szpital Rydygiera, 55 m (55), 16 pięter ; * Torre Verona, 55
m (55), 15 pięter ;

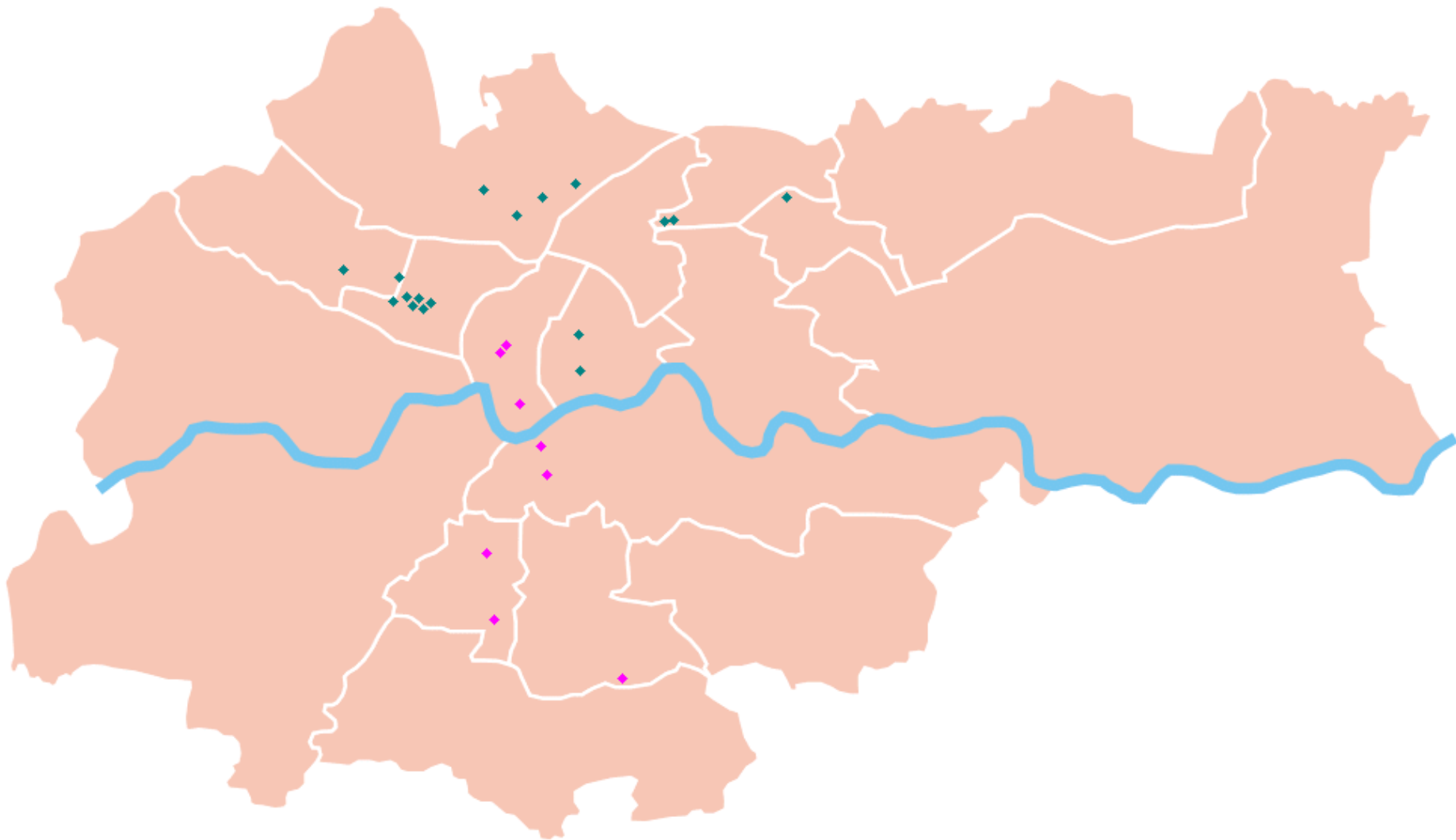
Wysokościowce

Rys: Autor

Budynki
wysokie



Rys: wikipedia

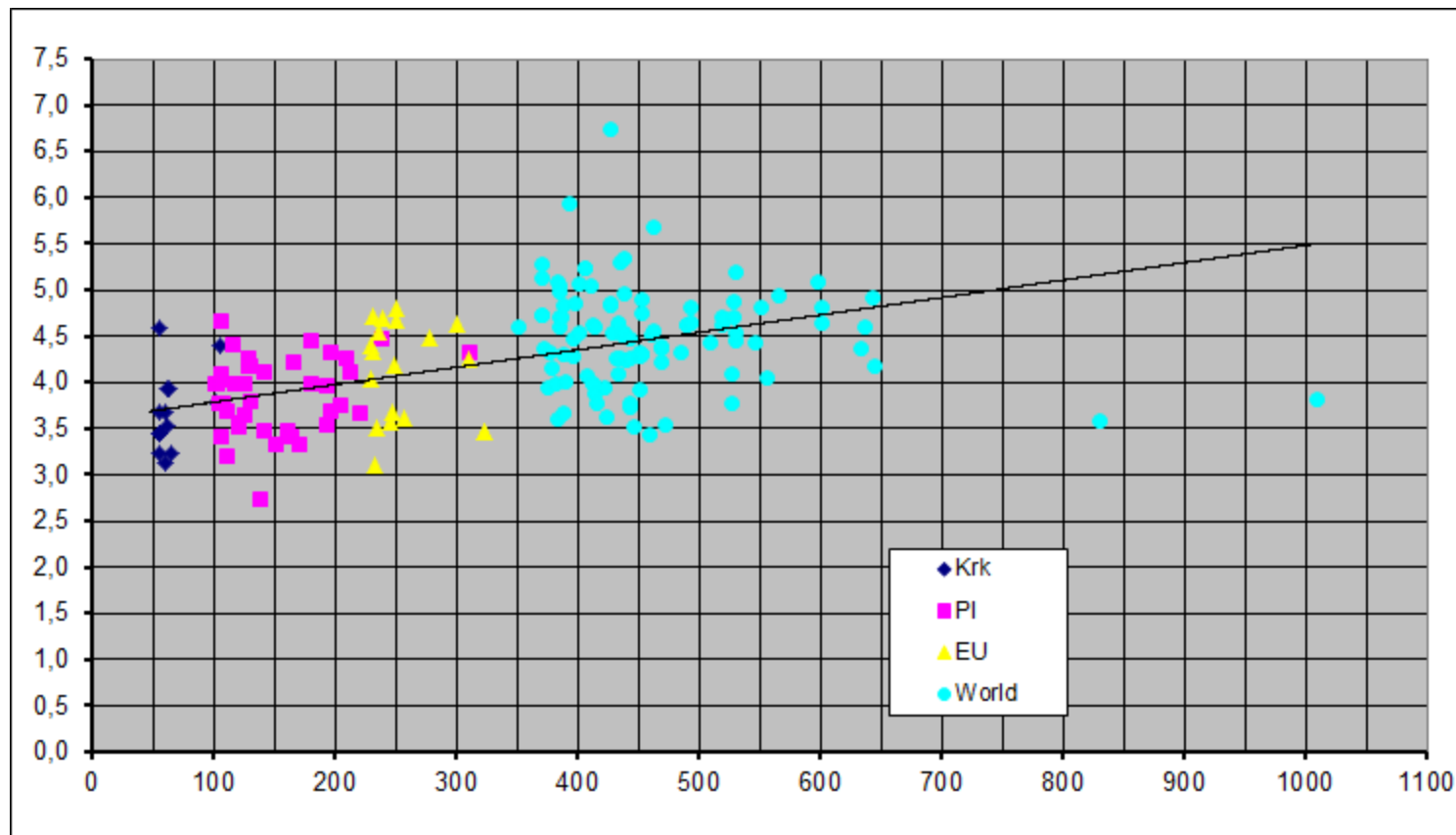


Rys: Autor

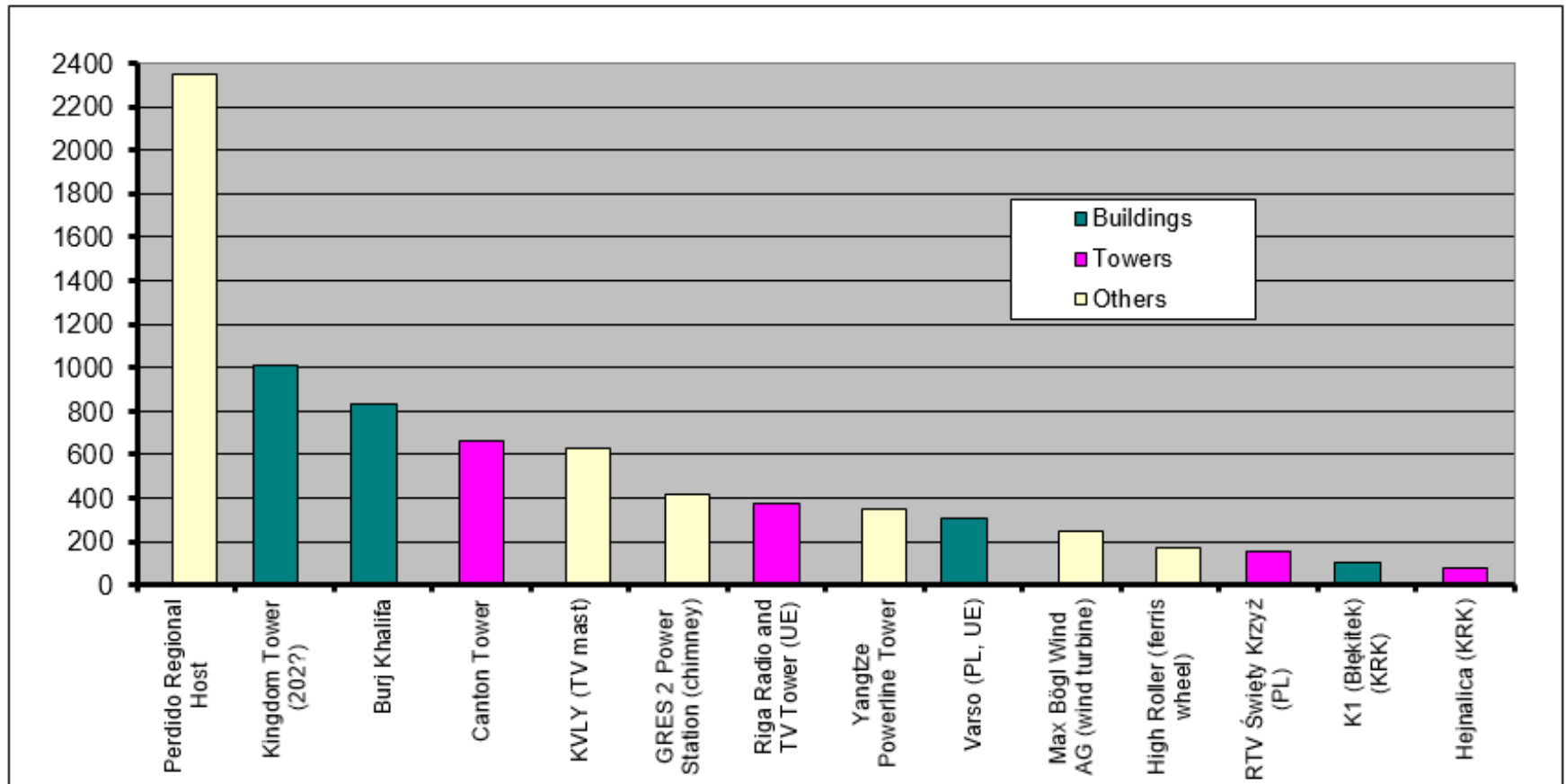
Średnia wysokość kondygnacji w funkcji całkowitej wysokości

(4,27 m)

Rys: Autor



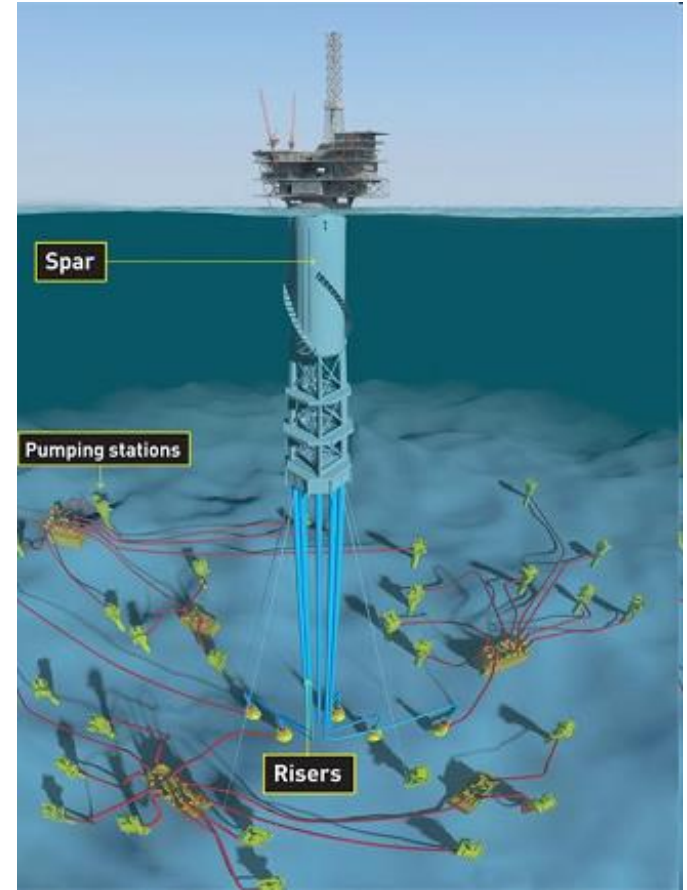
Najwyższe budowle świata (zdjęcia → #t / 6)



Rys: Autor



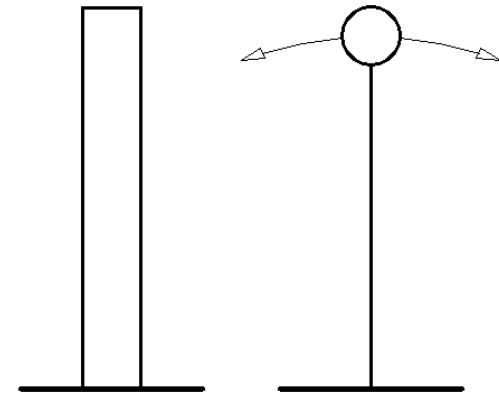
Perdido Regional Host



Rys: shell.com, industrytap.com

Charakterystyki dynamiczne

Wzbudzenia dynamiczne są dużym problemem w przypadku wysokich budowli. Zachowują się one podobnie do wahadła. Amplituda drgań i okres drgań to dwa najważniejsze parametry dynamiczne. Osobnym problemem jest tłumienie drgań



Rys: Autor

Dla jednego stopnia swobody dynamicznej (na przykład wahadła), drgania własne 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]

β – współczynnik tłumienia wiskotycznego [1 / s]

ω – częstość drgań tłumionych [rad / s]

φ – przesunięcie fazowe

ω_0 – częstość własna [rad / s]

ω – częstość drgań tłumionych [rad / s]

f – częstotliwość [Hz]

T – okres drgań [s]

$$T = 1 / f$$

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

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

β – współczynnik tłumienia wiskotycznego [1 / s]

ζ – ułamek tłumienia krytycznego [%]

c – współczynnik tłumienia [Ns / m]

Δ – logarytmiczny dekrement tłumienia drgań

$$\beta = c / 2m$$

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

$$\zeta = 100\% \beta / \omega = 100\% \Delta / 2\pi$$

Przy analizie drgań własnych nie mamy informacji na temat amplitudy drgań:

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

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

$$A = ?$$

Amplitudę jesteśmy w stanie wyliczyć w przypadku drgań wymuszonych:

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

Zazwyczaj musimy wziąć pod uwagę wiele stopni swobody:

drgania własne:

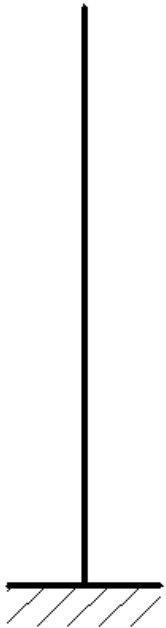
$$[M] \{y_f''\} + [C] \{y_f'\} + [K] \{y_f\} = \{0\}$$

drgania wymuszone:

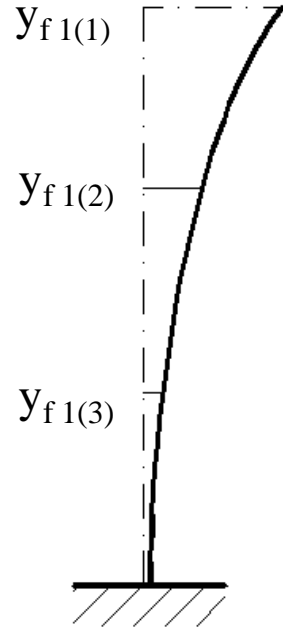
$$[M] \{y_e''\} + [C] \{y_e'\} + [K] \{y_e\} = \{F\}$$

[] - macierz

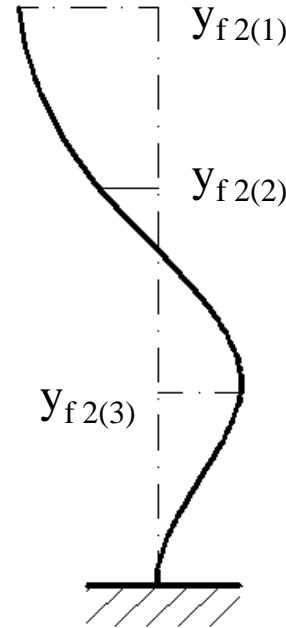
{ } - wektor



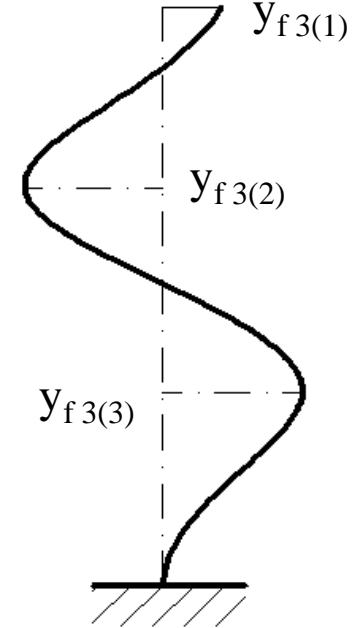
Rys: Autor



$$\cdot A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$



$$\cdot A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$



$$\cdot A_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3)$$

Wymuszone drgania konstrukcji możemy przedstawić jako rozwinięcie w szereg:

$$\{y_e\} = \{y_1\} + \{y_2\} + \dots + \{y_i\} + \dots = \Sigma [A_i \{y_{fi}\} \sin(\omega_i t + \varphi_i)]$$

$$\{y_{fi}\} = \{y_{fi(1)}, y_{fi(2)}, \dots, y_{fi(j)}, \dots, y_{fi(n)}\}$$

y_{fij} – drgania własne, postać drgań i , punkt j

A_i - amplituda

$$\{y_e\} = \Sigma [A_i \{y_{fi}\} \sin (\omega_i t + \varphi_i)]$$

$$\{y_e'\} = \Sigma [A_i \{y_{fi}\} \omega_i \cos (\omega_i t + \varphi_i)]$$

$$\{y_e''\} = \Sigma [- A_i \{y_{fi}\} \omega_i^2 \sin (\omega_i t + \varphi_i)]$$

$$[M] \{y_e''\} + [C] \{y_e'\} + [K] \{y_e\} = \{F\}$$

$$[M] \Sigma [- A_i \{y_{fi}\} \omega_i^2 \sin (\omega_i t + \varphi_i)] + [C] \Sigma [A_i \{y_{fi}\} \omega_i \cos (\omega_i t + \varphi_i)] + \\ + [K] \Sigma [A_i \{y_{fi}\} \sin (\omega_i t + \varphi_i)] = \{F\}$$

Znane: $[M]$, $[K]$, $\{F\}$, $\{y_{fi}\}$, ω_i

Oszacowane: $[C]$, φ_i

Nieznane A_i

A_i są obliczane numerycznie przez całkowanie numeryczne powyższego wzoru. Na ich podstawie obliczane są siły przekrojowe i odkształcenia.

Największym problemem jest poprawny opis tłumienia. Wyrażenie

$$c y'$$

lub

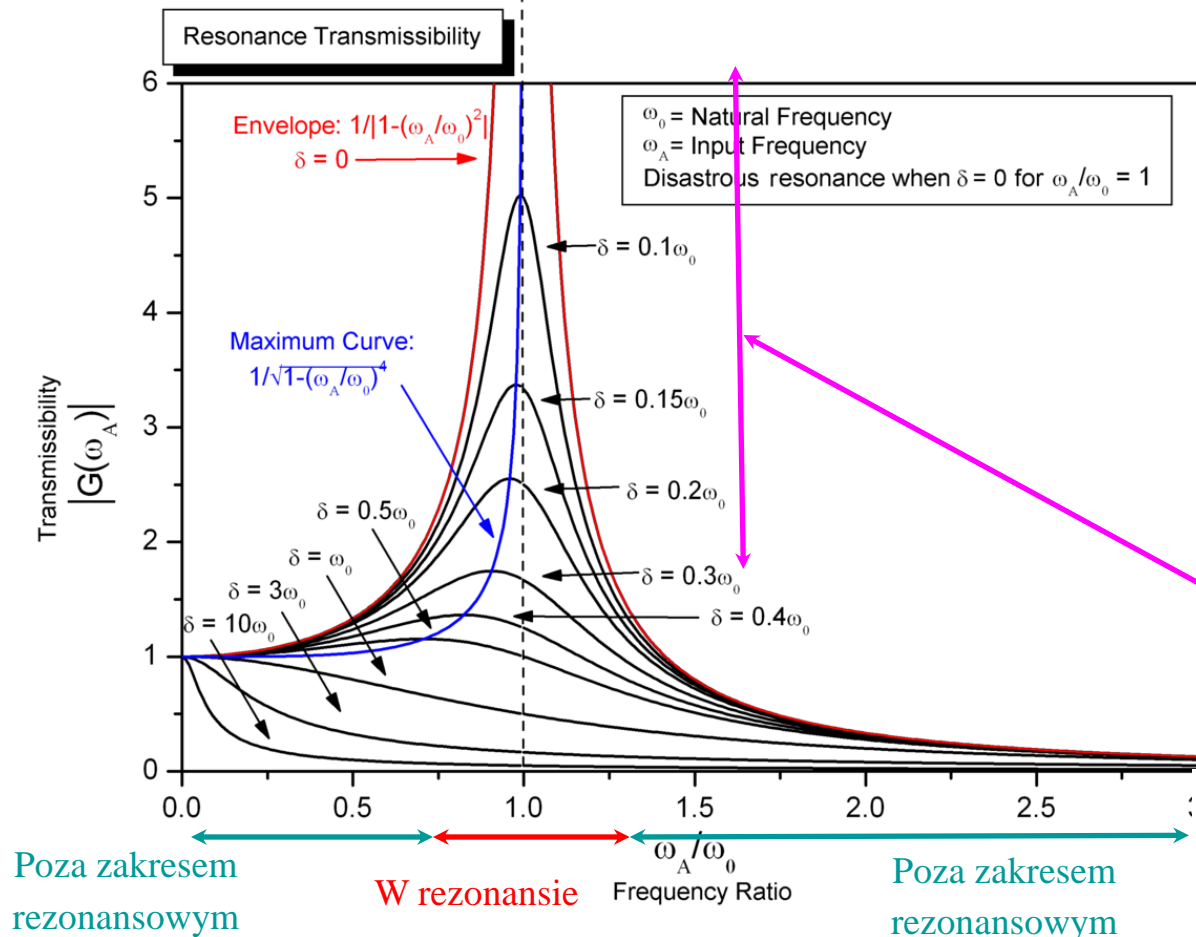
$$[C] \{y'\}$$

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.

W przypadku każdego wzbudzenia dynamicznego bardzo ważne jest, czy jego częstotliwość pokrywa się z częstotliwością drgań własnych konstrukcji. Jeśli wzbudzenie mieści się **w zakresie rezonansu**, amplitudy drgań i siły bezwładności szybko rosną. Może to łatwo doprowadzić do zniszczenia konstrukcji (przekroczenie SGN \rightarrow #t / 31). **Poza zakresem rezonansu** wzbudzenie może prowadzić do przekroczenia SGU (\rightarrow #t / 32).



Rys: wikipedia

δ = Damping coefficient

$\zeta \approx 1 \div 5\%$ oznacza
 $\delta \approx 0,05 \div 0,30 \omega_0$

Zatem efekt dynamiczny \geq
 $1,7 \cdot$ efekt statyczny



Rys: sanandreasfault.org

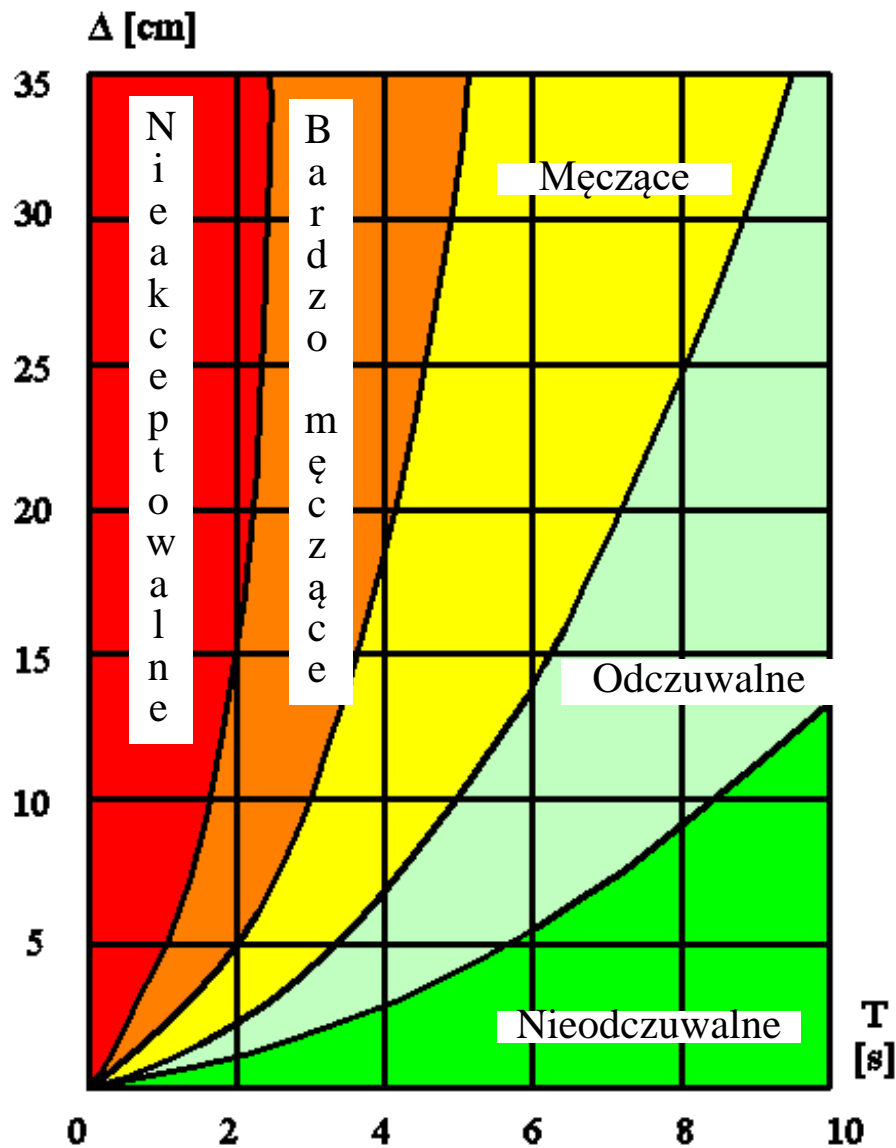


Rys: eu.gainesville.com



Rys: shine.cn

Przekroczenie SGN: niebezpieczeństwo uszkodzenia, zniszczenia i zawalenia się konstrukcji na skutek zbyt dużych wartości sił bezwładności.

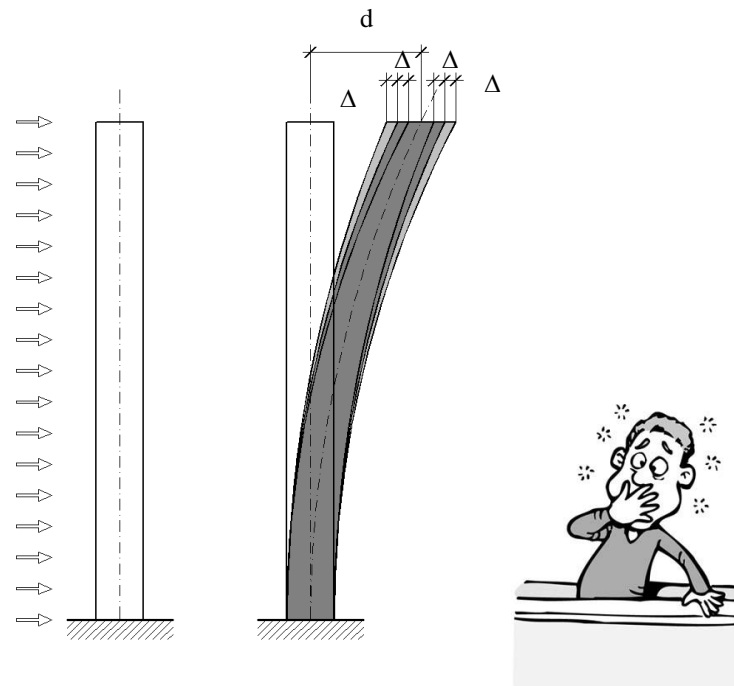


Rys: "Konstrukcje metalowe, tom II", M. Łubiński, W. Żółtowski, A. Filipowicz

W Eurokodach brak informacji na temat komfortu, czy parametrów częstości i amplitud drgań. Należy odwołać się do literatury i badań.

d – przemieszczenie statyczne (położenie równowagi)

Δ – drgania wokół położenia równowagi.



Rys: Autor

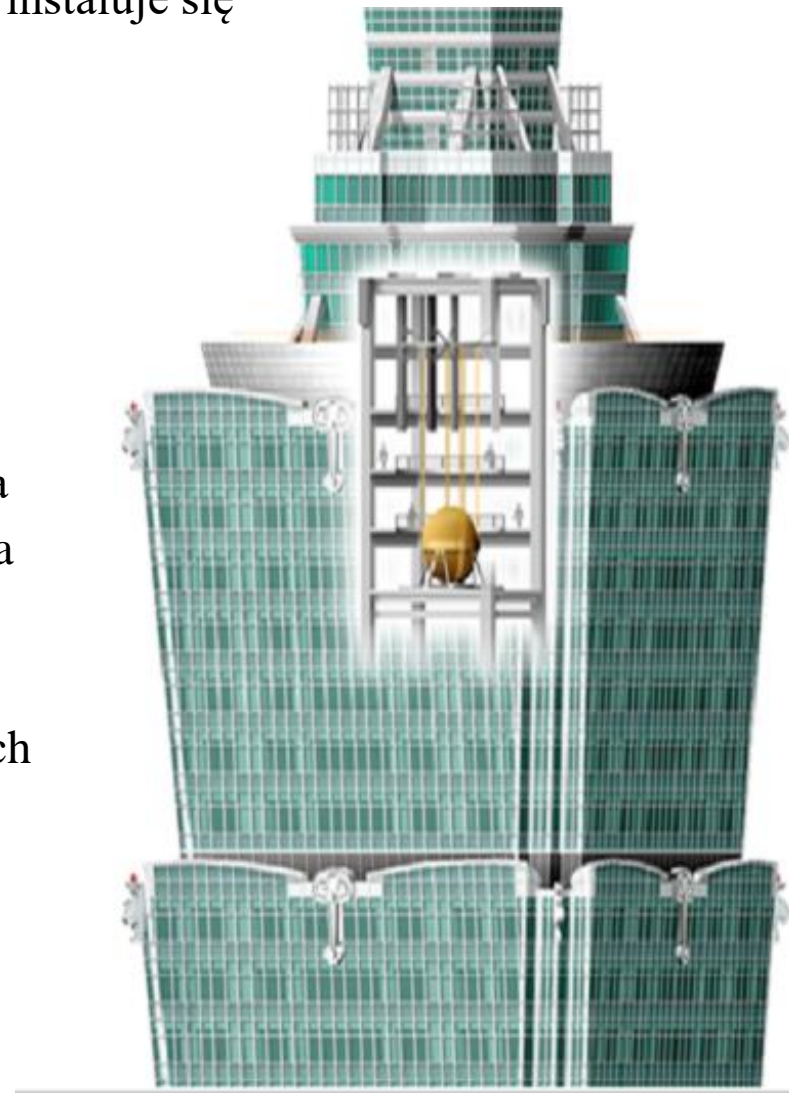
Rys: tightwadcruises.wordpress.com

Czasami, w celu zwiększenia „naturalnego” tłumienia, instaluje się dodatkowe urządzenia.

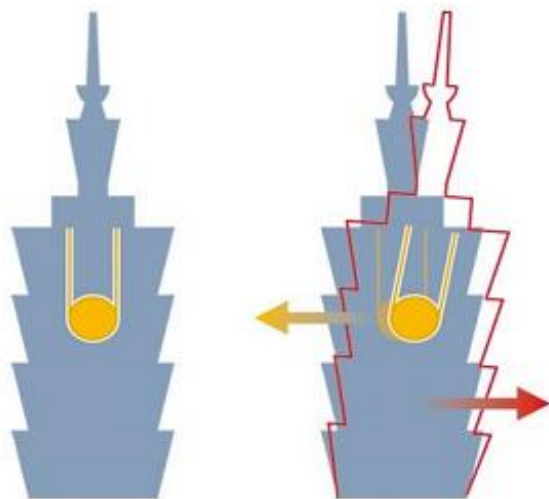


Przykładem jest konstrukcja na szczycie Taipei 101 – masywna stalowa kula (masa = 1 / 1000 masy wieżowca). Kula zawieszona jest na 16 stalowych linach ϕ 10 cm.

Rys: wikipedia



Charakterystyki dynamiczne wieżowca i wahadła dobrano tak, że wychylenie kuli jest zawsze przeciwnie skierowane do wychylenia wieżowca.

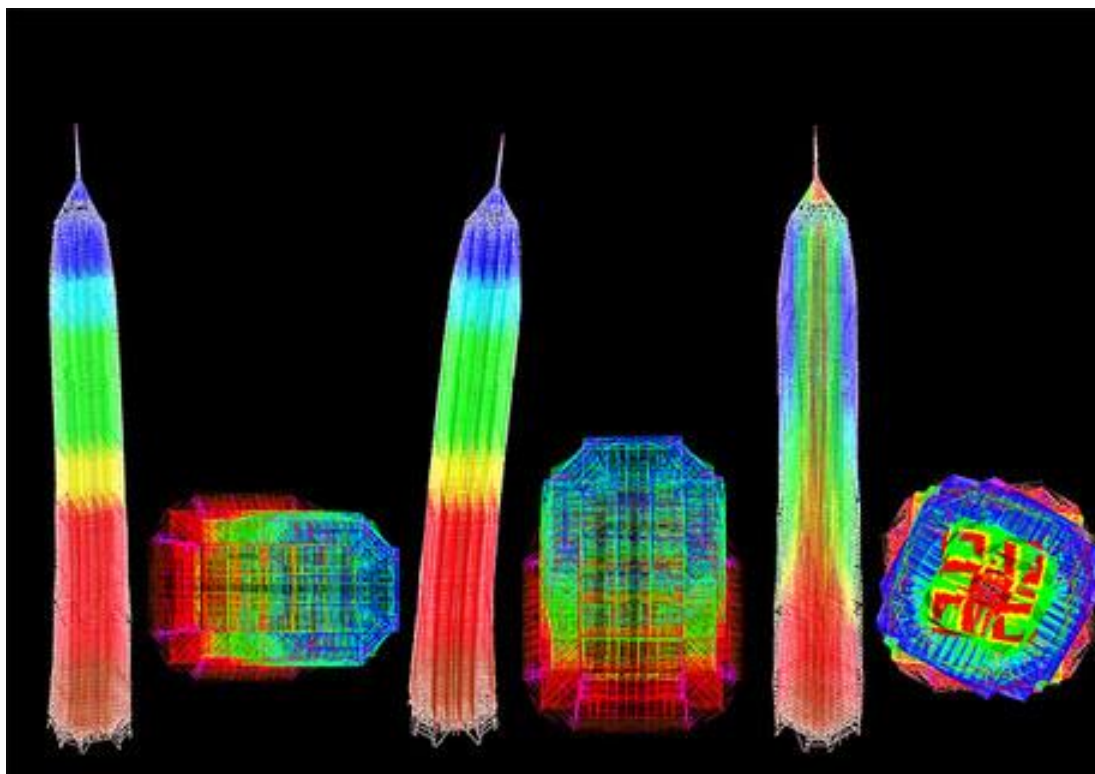


Rys: wikipedia



Dzięki temu amplitudy drgań wywołanych wiatrem lub trzęsieniem ziemi są redukowane o 45 %.

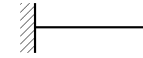
Zwykle najważniejsza jest I postać drgań. Jej częstotliwość jest obliczana przy pomocy pełnego modelu 3D lub szacowana wzorami przybliżonymi.



Rys: skyscrapercity.com

1. Wzór Geigera:

$f = (1 / 2\pi) \sqrt{(g / \Delta)}$; Δ – jak dla poziomego wspornika; ugięcie pod wpływem ciężaru własnego



2. Pierwsza postać drgań wspornika,

$EJ = \text{const}$, μ [kg / m] = const:

$$f = 0,560 \sqrt{(EJ / \mu) / H^2}$$

Rys: Autor

3. T. Tatar, "Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych", PK 2012

$f = 1 / (A n)$; $A = 0,045$ [s], n – ilość kondygnacji

4. PN / B 2011:

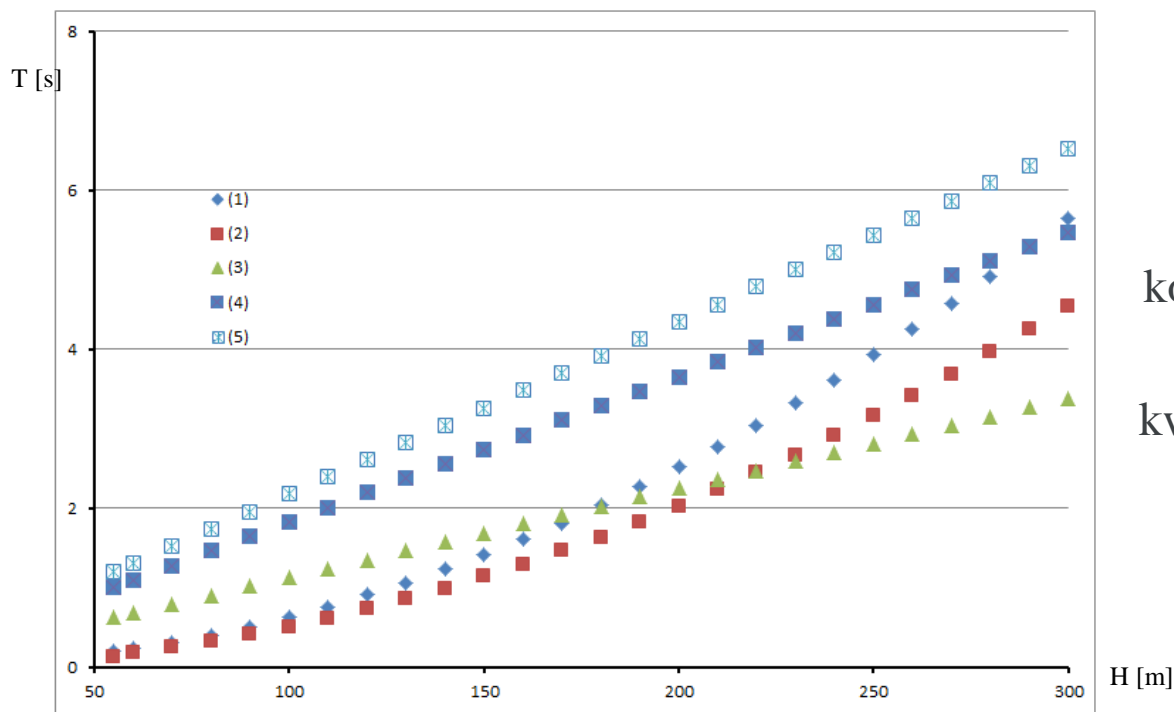
$f = (A \sqrt{B}) / H$; $A = 10$ [Hz \sqrt{m}],

B – szerokość budynku || kierunku wiatru

5. EN 1991-1-4:

$f = A / H$; $A = 46$ [Hz m]

Najdokładniejszy jest oczywiście model MES. Metoda **1** jest najbardziej skomplikowana spośród innych uproszczonych. Pozwala ona na uwzględnienie zróżnicowanego rozkładu masy i sztywności wzdłuż budynku. Metoda **2** pozwala uzyskać różne wyniki dla różnych budynków o tej samej geometrii, ale różnym stałym rozkładzie masy i sztywności wzdłuż budynku. Jeśli rozkład masy lub sztywności wzdłuż budynku jest silnie zmienny, wzór ten daje jedynie przybliżone wyniki. Metody **3, 4, 5** są najszybsze i najprostsze. Częstotliwość drgań jest funkcją tylko geometrii, ale wynik będzie taki sam dla różnych budynków o tej samej geometrii.



Dla metod **1** i **2** analizowana jest konstrukcja przedstawiona na #t / 53.
Dla metody **4** budynek o rzucie kwadratowym 30x30 m (tak samo jak dla metody **1** i **2**).

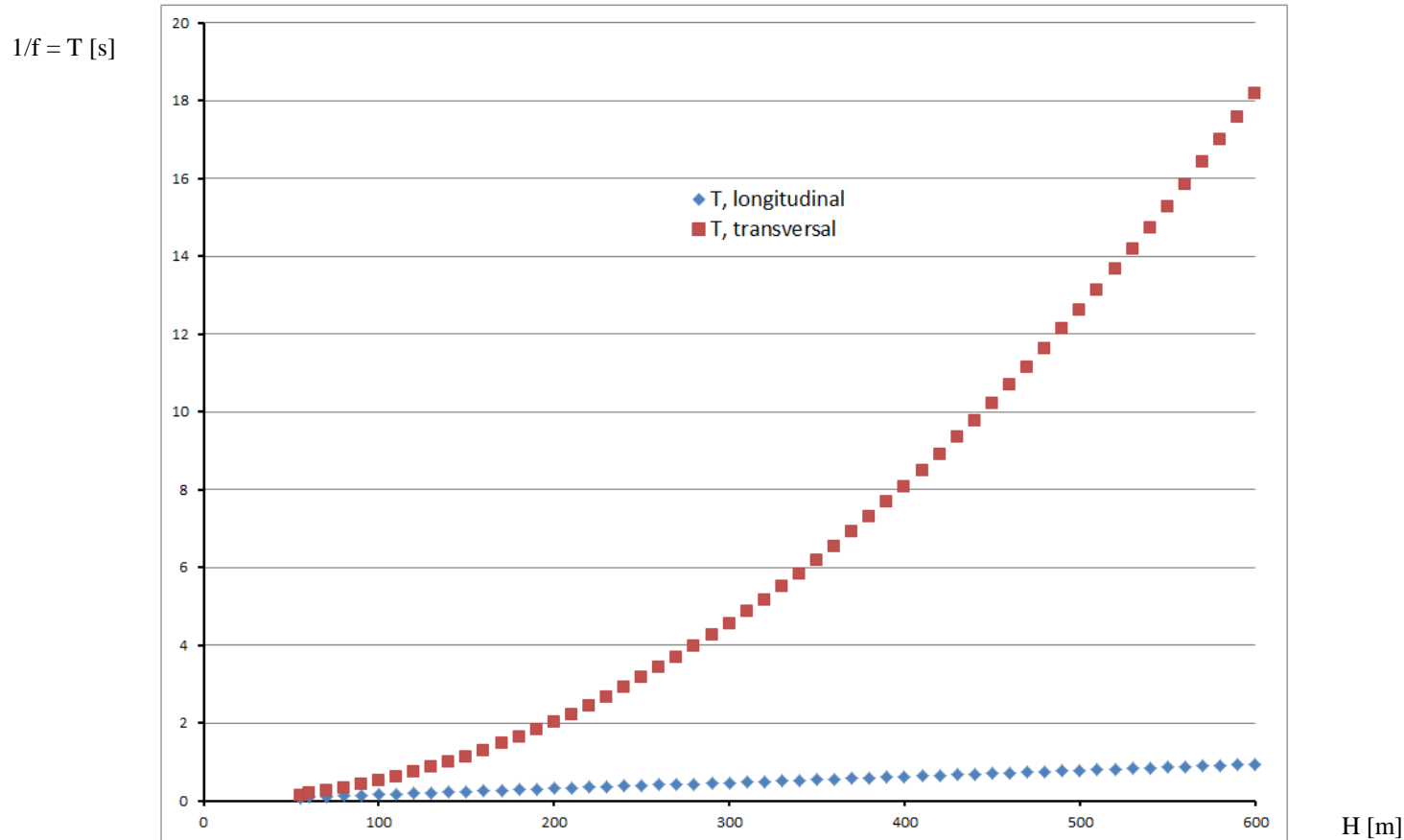
Rys: Autor

Oprócz drgań poprzecznych, istotne mogą być drgania podłużne. Na przykład dla wspornika w przypadku $EJ = \text{const}$, $EA = \text{const}$, $\mu \text{ [kg / m]} = \text{const}$, (metoda 2):

$$f_{\text{transv}} = 0,560 \sqrt{(EJ / \mu) / H^2}$$

$$f_{\text{long}} = 0,250 \sqrt{(EA / \mu) / H}$$

Analizowana jest konstrukcja przedstawiona na #t / 53:

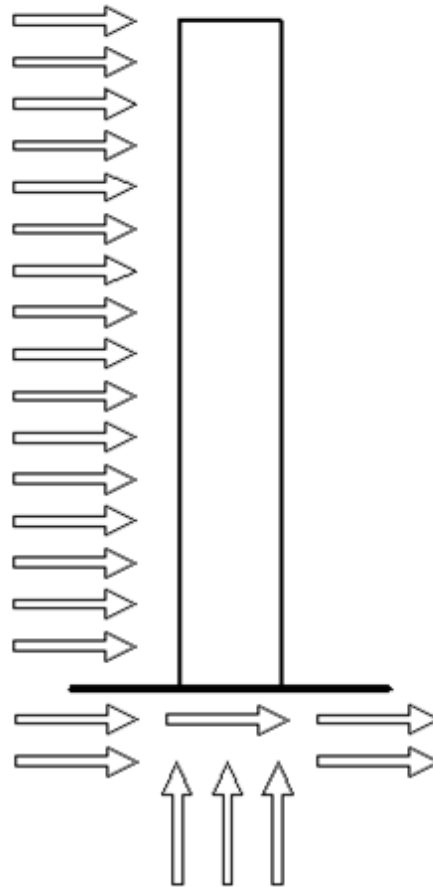


Rys: Autor

Wiatr i trzęsienie ziemi

Dwa najważniejsze rodzaje wzbudzenia drgań to wiatr i trzęsienie ziemi (lub wzbudzenie parasejsmiczne)

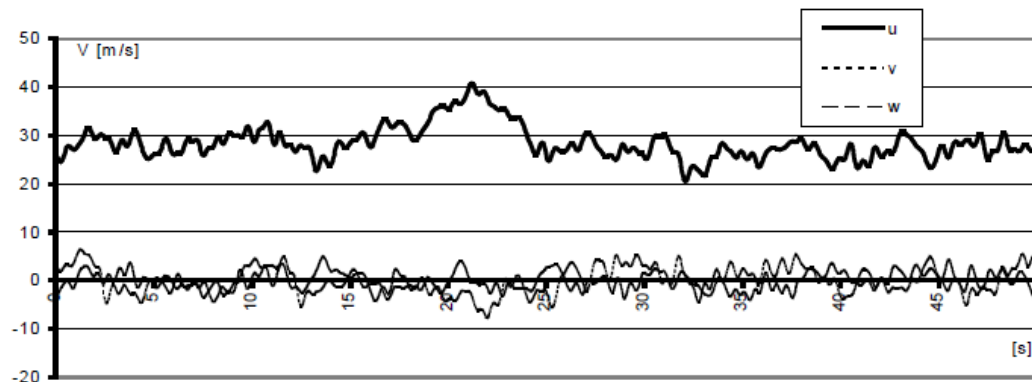
Wiatr: wzbudzenie przez obciążenie dynamiczne



Trzęsienie ziemi: wzbudzenie przez ruch gruntu

Rys: Autor

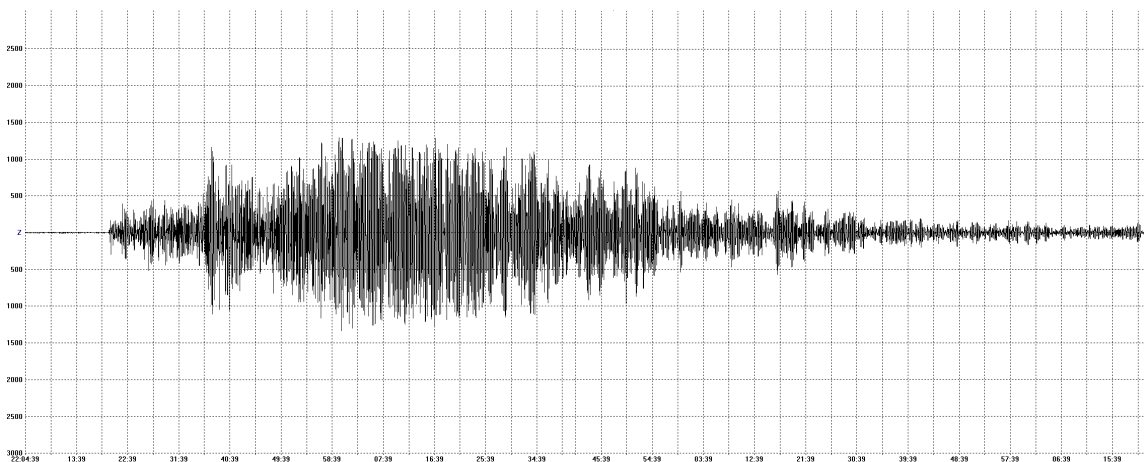
Oba rodzaje wymuszenia mają stochastyczny charakter. Oba mogą być przedstawione w postaci szeregu Fouriera:



Rys: Autor

$$E(t) = \sum [A_i \sin(i \psi)], \quad i = 1, 2, \dots$$

Jeżeli
 $i \psi \approx \omega_n$
 następuje rezonans



Rys: geosci.ipfw.edu

Obciążenie wiatrem rozłożyć można na trzy składowe:

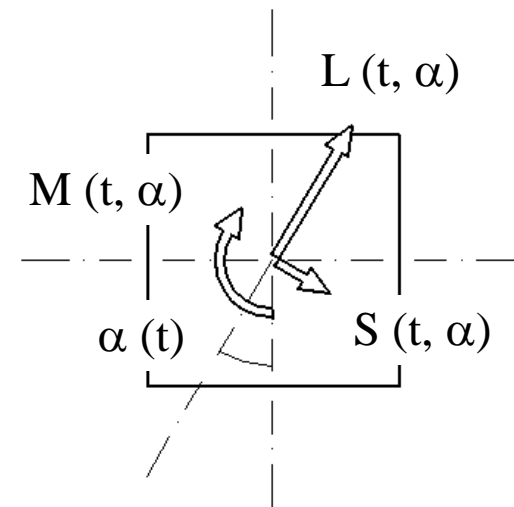
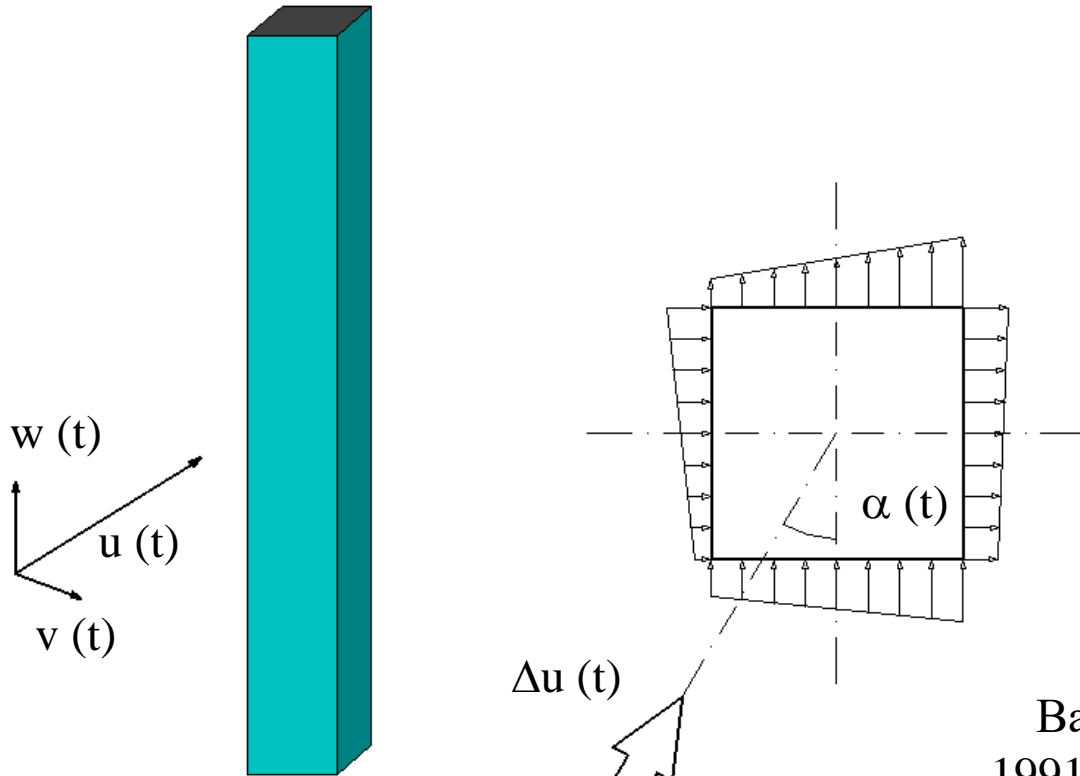
- poziomą, równoległą do średniego kierunku wiatru (u);
- poziomą, prostopadłą do średniego kierunku wiatru (v);
- pionową (w);

Pionowa może być pominięta przy analizie wysokich budynków.

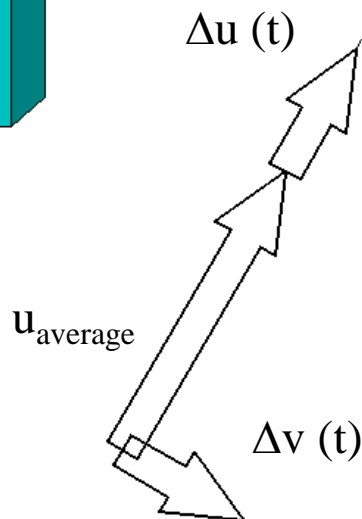
W przypadku trzęsienia ziemi pod uwagę należy wziąć cztery rodzaje fal, rozchodzących się w podłożu:

- podłużne (rozchodzące się w całej objętości planety);
- poprzeczne (rozchodzące się w całej objętości planety);
- Rayleigh'a (powierzchniowe podłużno-poprzeczne – występują tylko w pobliżu powierzchni, zanikają na głębokości równej długości fali);
- Love'a (powierzchniowe poprzeczne – występują tylko w pobliżu powierzchni, zanikają na głębokości równej długości fali);

Najniebezpieczniejsze dla budynków są oba rodzaje fal powierzchniowych.



Bazując na informacjach podanych w EN 1991-1-4, wystarczy wziąć pod uwagę średnie (statyczne) wartości obciążenia.



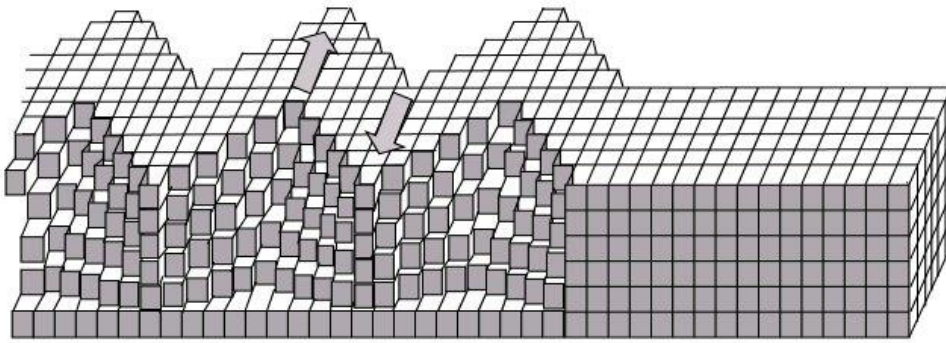
$$u(t) = u_{\text{średnie}} + \Delta u(t)$$

$$v(t) = 0 + \Delta v(t)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{średnie}} + \Delta \alpha(t)$$

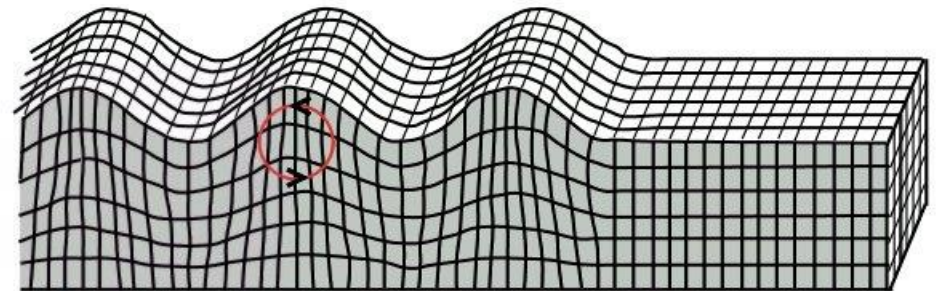
$$\Delta \alpha(t) = \arctan \left\{ \frac{\Delta u(t)}{[u_{\text{średnie}} + \Delta u(t)]} \right\}$$

Fale Love'a



Wymuszenie poziome → drgania poziome.

Fale Rayleigh'a



Wymuszenie poziome i pionowe → drgania poziome i pionowe.

Sztywność poprzeczna (pozioma) budynków wysokich jest znacznie niższa niż sztywność podłużna (pionowa). Drgania poprzeczne są znacznie bardziej niebezpieczne.

Dla wzbudzenia wiatrowego – rodzaju obciążenia – bardzo użyteczna jest analiza spektralna wiatru. Analiza spektralna podaje informację na temat struktury wzbudzenia wiatrowego (szereg Fouriera):

$$E(t) = \Sigma [A_i \sin (i \psi)], \quad i = 1, 2, \dots$$

jaka jest proporcja między amplitudami A_i a różnymi częstościami składowych wymuszeń ($i \psi$).

Dla trzęsienia ziemi – rodzaju wzbudzenia kinematycznego – bardziej użyteczna jest analiza spektralna odpowiedzi konstrukcji. Pokazuje ona związek między przyspieszeniem, jakiemu podlega konstrukcja a jej częstościami drgań własnych. Obciążenia przyłożone do konstrukcji liczone są jako:

$$F = a m$$

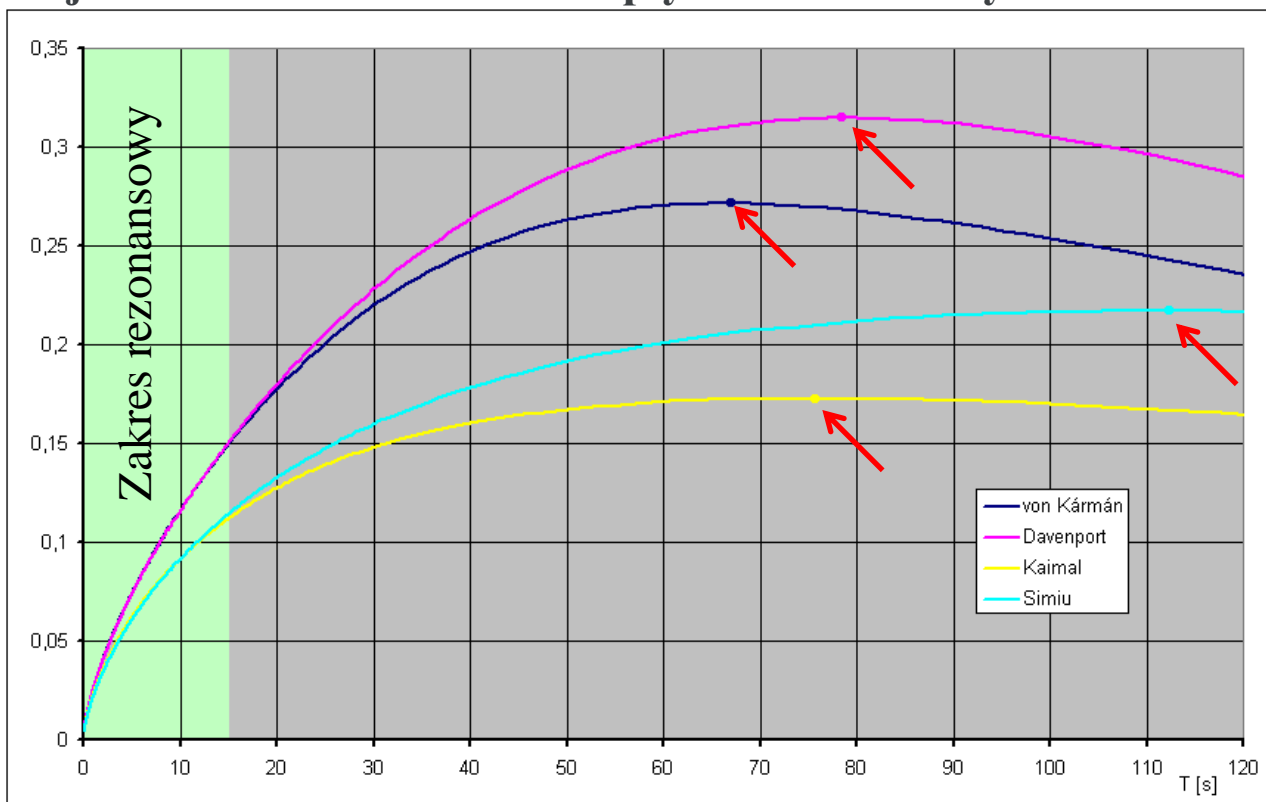
a – przyspieszenie konstrukcji

m – masa konstrukcji

Dla analizy wymuszeń para / sejsmicznych przeznaczona jest seria Eurokodów 1998.

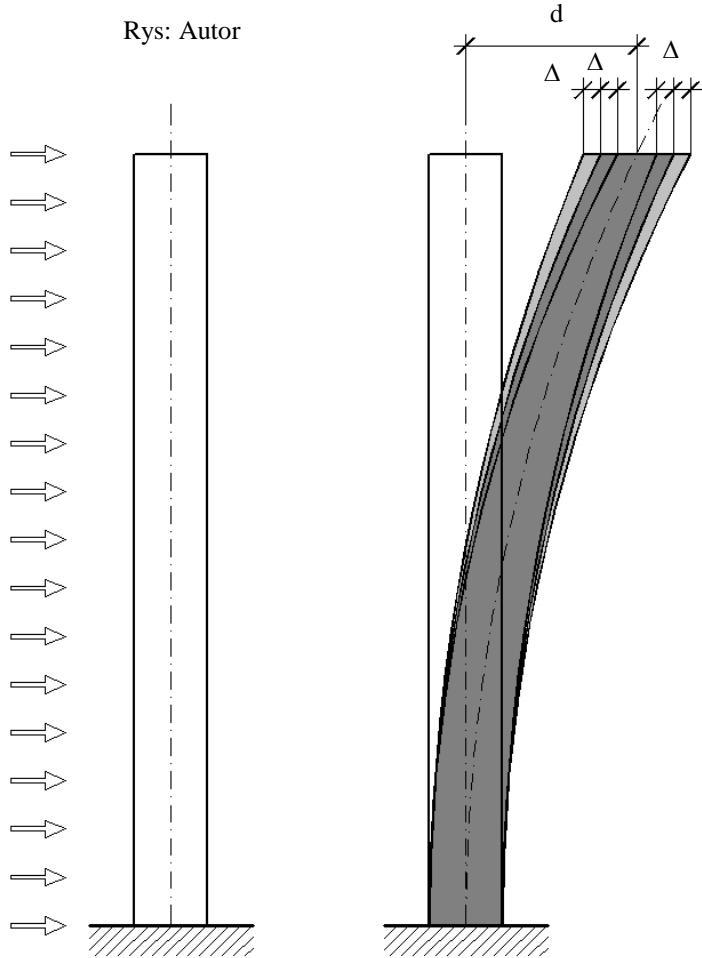
Dynamiczny efekt oddziaływania wiatru

Z różnych analiz widma wiatru wynika, że wzbudzenie wiatrem osiąga maksimum dla okresu $T = 60 \div 120$ s (rezonans dla konstrukcji z pierwszym okresem drgań $60 \div 120$ s). Z informacji przedstawionych na #t / 37, 38 wynika, że dla budynków wysokich ich okres drgań swobodnych jest krótszy niż 15 s. **W zakresie rezonansowym wysokich budynków wzbudzenie wiatrem jest bardzo małe. Nie ma wpływu na SGUN tylko na SGU.**



Rys: Autor

Rys: Autor



Analiza wiatru SLS (analiza okres-amplituda).

d jest efektem obciążenia od średniej prędkości wiatru. Wartość d oblicza się zgodnie z normą EN 1993-1-4. Obliczanie Δ jest znacznie bardziej skomplikowane. Jest to efekt rozwiązania równania:

$$[M] \{y_e''\} + [C] \{y_e'\} + [K] \{y_e\} = \{F\}$$

Wartość współczynnika dynamicznego $c_s c_d$ (EN 1991-1-4 p. 6.1, 6.2, 6.3) może zostać użyta do zgrubnego oszacowania Δ :

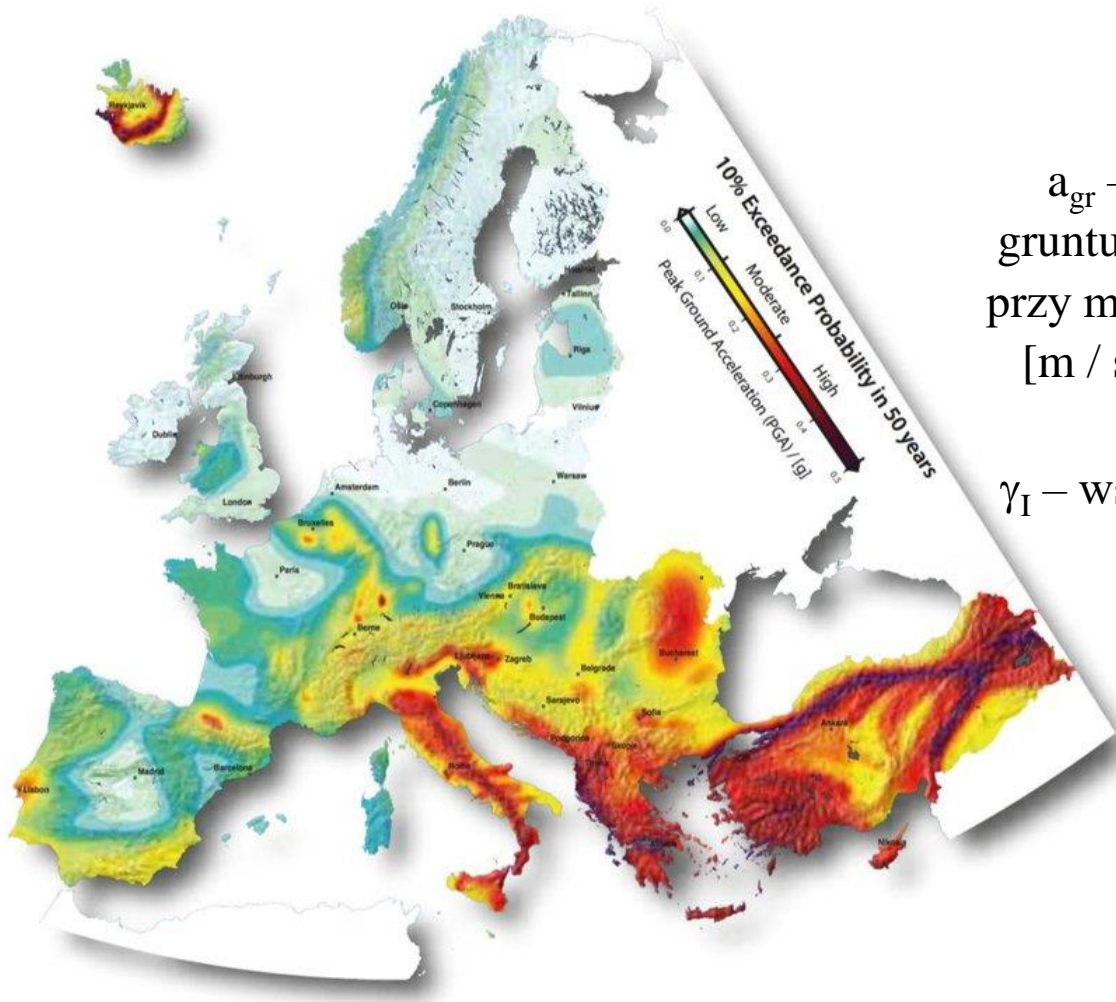
jeżeli $c_s c_d > 1,0$ wówczas

$$c_s c_d \approx (d + \Delta) / d \rightarrow \Delta = d (c_s c_d - 1,0)$$

Na podstawie T (okresu drgań) z analizy dynamicznej i amplitudy Δ możliwa jest analiza komfortu ludzi wewnątrz budynku ($\rightarrow \#t / 32$).

Dynamiczny efekt trzęsienia ziemi

Rys: Seismic Hazard Model 2015 for
Switzerland , S. Wiemer & all.



$$a_g = a_{gr} \gamma_I$$

a_g – przyspieszenie gruntu

a_{gr} – przyspieszenie odniesienia dla gruntu (strefa sejsmiczna; od 0,0 [m / s²] przy małej aktywności sejsmicznej do 3,0 [m / s²] w rejonach bardzo aktywnych sejsmicznie

γ_I – współczynnik znaczenia konstrukcji

γ_I może być powiązany z klasami konsekwencji:

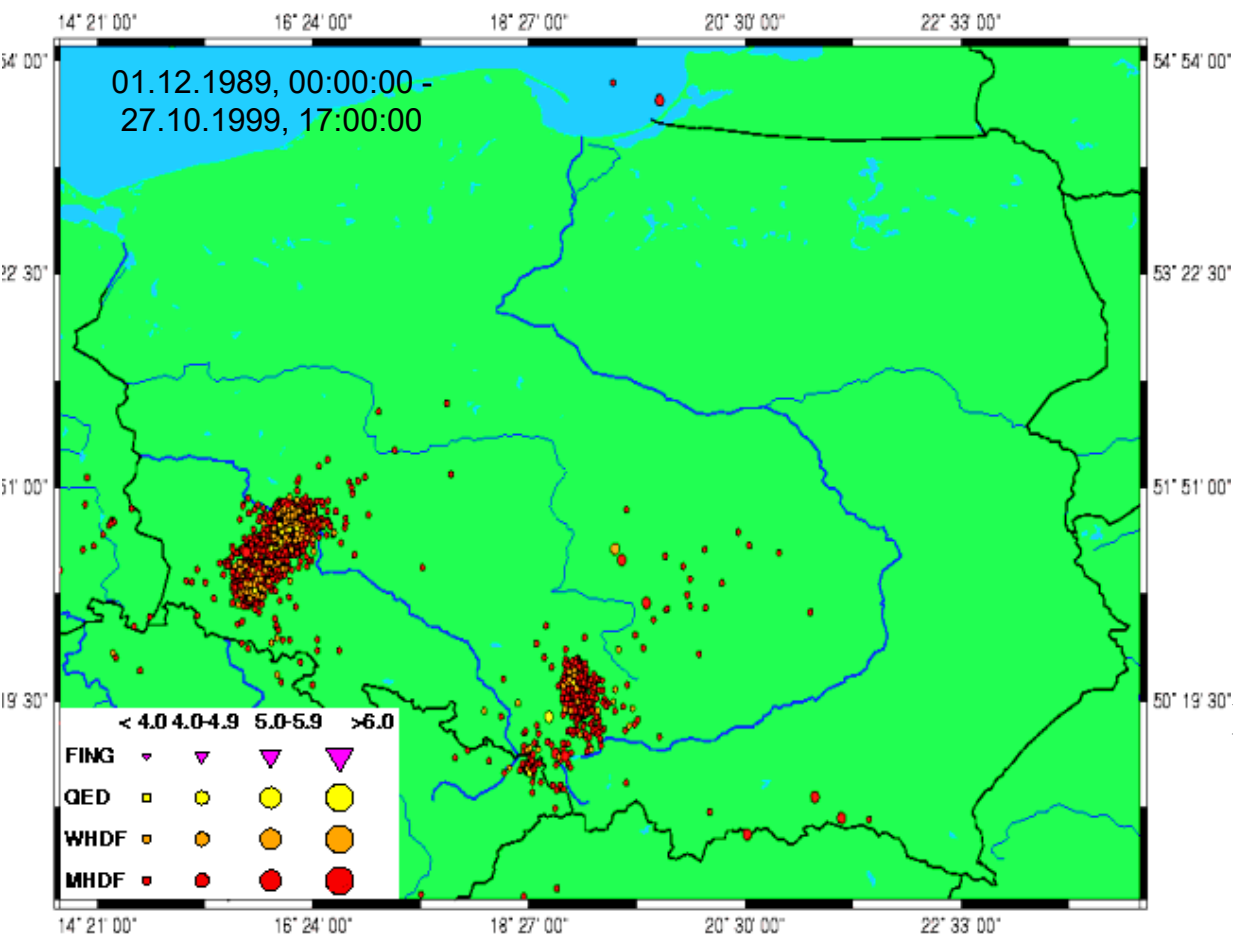
0,8 dla CC1;

1,0 dla CC2

1,2 dla „niskiego” CC3

1,4 dla „wysokiego” CC3

W przeciwieństwie do obciążenia wiatrem, wymuszenia para / sejsmiczne nie są specjalnie częste w Polsce.



Są to przede wszystkim efekty działalności człowieka (tąpięcia w kopalniach) na terenach GZW, ROW i LGOM. Oprócz tego zdążają się nieliczne przypadki naturalnych wstrząsów sejsmicznych.

Wzбудzenia parasejsmiczne charakteryzują się specyficznymi wartościami referencyjnego przyspieszenia gruntu a_{gr} ; innego niż dla klasycznego” trzęsienia ziemi.

Rys: sgp.org.pl

Wpływ przyspieszenia gruntu na konstrukcję:

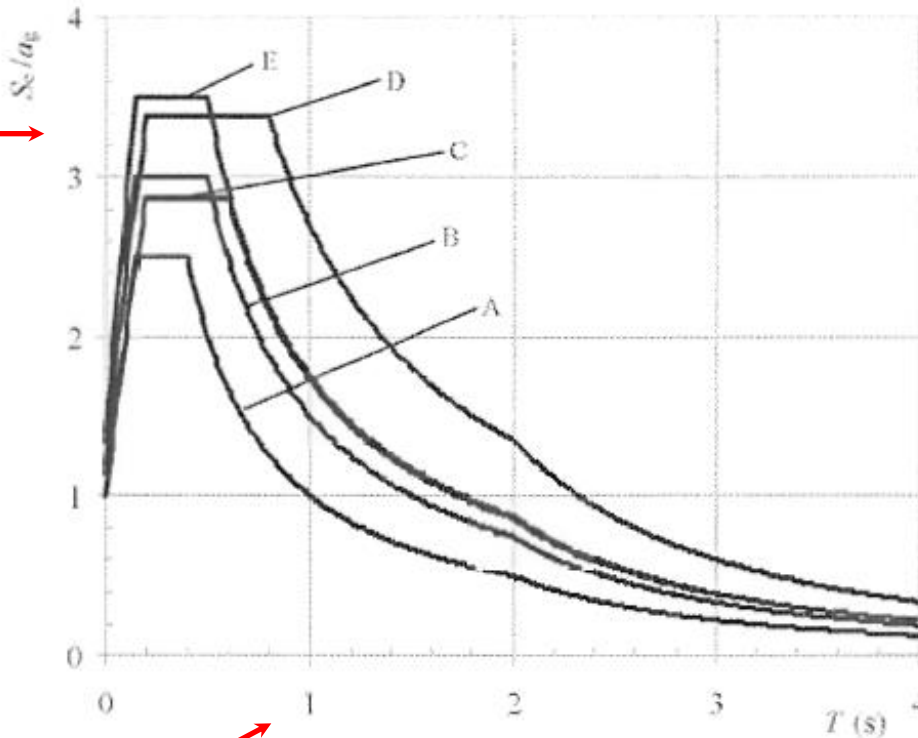
A, B, C, D, E – warunki gruntowe (A – skała; E – grunty osadowe)

Rys: EN 1998-1 fig. 3.2

Proporcja między
przyspieszeniem
konstrukcji i
przyspieszeniem gruntu

**Największy wpływ jest dla konstrukcji, których pierwszy okres drgań własnych $< 2,5$ s.
Zgodnie z #t / 37, 38, dla budynków wysokich ich okres drgań własnych przeważnie mieści się w tym przedziale.**

Okres pierwszej częstości drgań konstrukcji



(Przykładowy wykres dla poprzecznych drgań sejsmicznych; dla sejsmicznych podłużnych i obu parasejsmicznych należy przeanalizować inne wykresy).

Największe wartości parametru S_c / a_g ($\rightarrow \#t / 49$) są różne zarówno dla różnych kierunków wymuszenia sejsmicznego, jak i parasejsmicznego i mogą osiągać wartości $1,35 \div 4,50$.

Przykład:

$a_{gr} = 0,50$ [m / s²] (mała aktywność sejsmiczna);

$\gamma_I = 1,0$ (CC2);

$S_c / a_g = 3,0$

Przyspieszenie przyłożone do konstrukcji (w kierunku poziomym i pionowym) jest równe:

$0,50 \cdot 1,0 \cdot 3,0 = 1,50$ [m / s²]

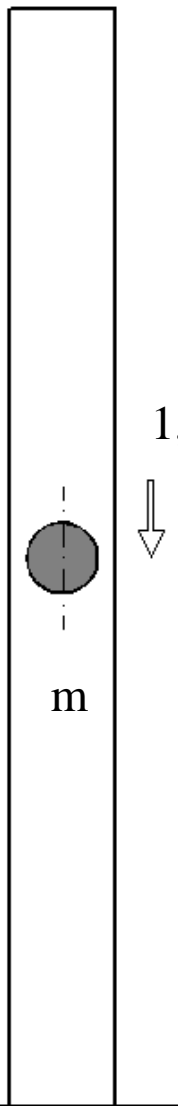
W porównaniu do g (przyspieszenie ziemskie, $9,81$ [m / s²]), jest to 15% ($0,153 g$ czyli $0,153$ ciężaru własnego)

Aby lepiej zrozumieć wagę tego faktu, warto porównać go z działaniem wiatru. Przykładowo dla Krakowa działanie wiatru na wysokości 10 m nad poziomem gruntu (wartość charakterystyczna) wynosi $0,186$ kPa; 600 m nad ziemią wynosi $0,497$ kPa. Dla konstrukcji przedstawionej na slajdzie $\#t / 53$ (wysokość kondygnacji $4,0$ m, rzut $30,0 \times 30,0$ m) całkowita wartość oddziaływania wiatru dla kondygnacji ($4,0 \cdot 30,0$) wynosi od $22,320$ kN do $59\,640$ kN. Wartość charakterystyczna ciężaru własnego jednej kondygnacji wynosi $4\,493\,686$ kN.
 $(22,320 \text{ kN} \div 59,640 \text{ kN}) / 4\,493,686 \text{ kN} = 0,005 \div 0,013$

Zatem efekt obciążenia wiatru w porównaniu do ciężaru konstrukcji to $0,5 \div 1,3\%$.

Bez trzęsienia
ziemi, sam wiatr

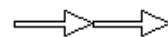
$(0,005 \div 0,013) \text{ g m}$



$1,0 \text{ g m}$



$(0,005 \div 0,013) \text{ g m}$



$0,153 \text{ g m}$

Siły poziome wzrosły $12 \div 30$ razy; **budynek może zostać kompletnie zniszczony przez siły bezwładności.**

Rys: Autor

Wiatr i trzęsienie ziemi
w postaci sił
bezwładności, **niska**
aktywnośćsejsmiczna:

$1,0 \text{ g m}$



$0,153 \text{ g m}$

Vertical forces Siły
pionowe wzrosły tylko
o 15%; prawdopodobnie
**nośność słupów na siły
osiowe nie będzie
jeszcze przekroczona.**

Wnioski

- Oba zjawiska (wiatr, trzęsienie ziemi) mają chaotyczny charakter;
 - Mogą być przedstawione jako szeregi Fouriera;
 - Wiatr jest wzbudzeniem przez obciążenie, trzęsienie ziemi wzbudzeniem kinematycznym;
 - Wiatr lepiej analizować przez spektrum obciążenia, trzęsienie ziemi przez spektrum odpowiedzi konstrukcji.
-
- Wiatr nie wchodzi w rezonans z budynkami;
 - Drgania podłużne nie są niebezpieczne;
 - Drgania poprzeczne (momenty zginające, sily ścinające) w przypadku wiatru mogą prowadzić do przekroczenia SGU;
 - W szczególnych przypadkach elementy drugorzędne (elewacje) mogą zostać uszkodzone przez działanie wiatru.
-
- Trzęsienie ziemi może zniszczyć konstrukcję w skutek drgań poprzecznych;
 - Wpływ drgań podłużnych raczej nie jest groźny;
 - Trzęsienie ziemi trwa zbyt krótko (kilka-kilkanaście sekund), by był sens analizy SGU.

Efekty obciążenia wiatrem

Obciążenie zmienne 2,50
kN / m²

Płyta żelbetowa 10 cm

Słupy: 2x HLR+ 1100

Dźwigary: HEA 700

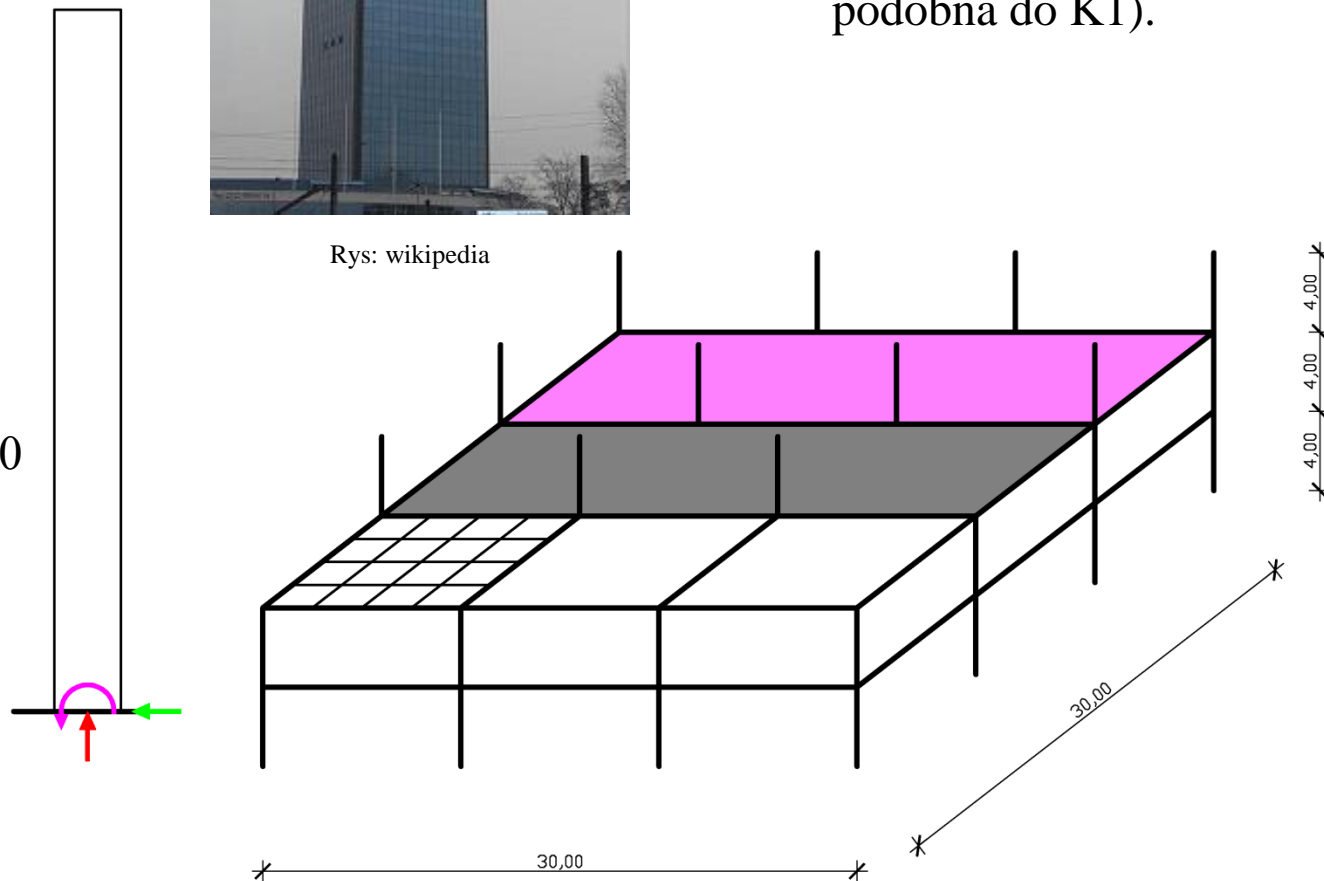
Belki drugorzędne: IPE 500



Rys: wikipedia

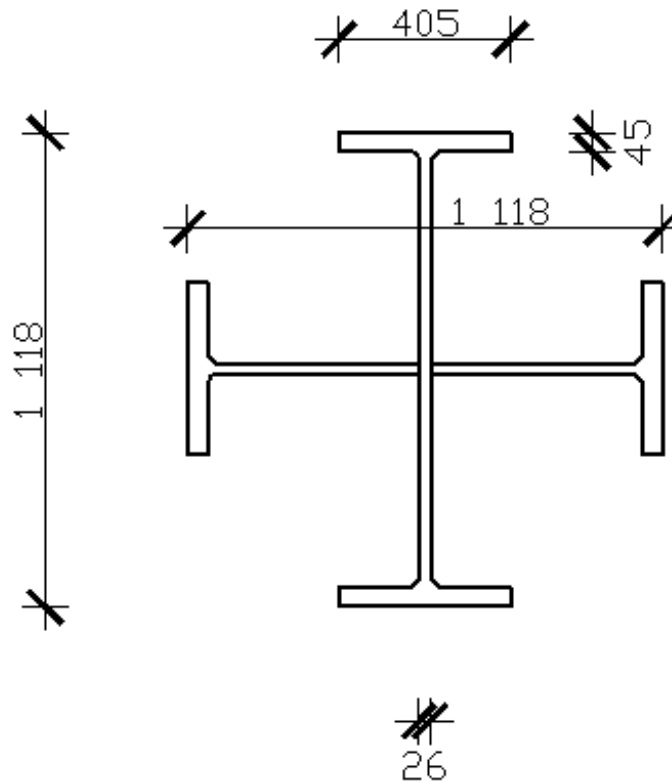
Kraków, budynek biurowy

Model pierwszy (konstrukcja podobna do K1).



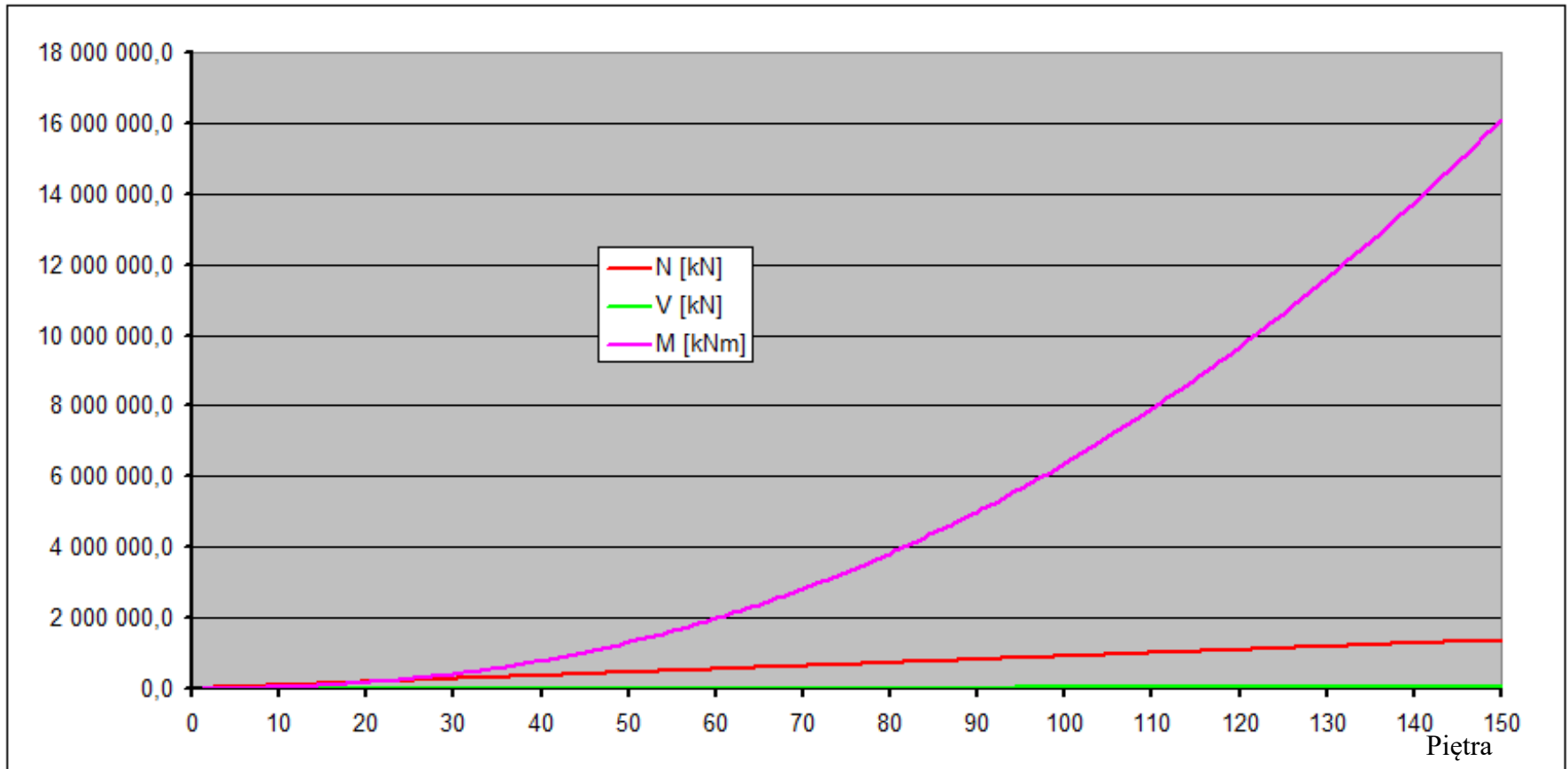
Rys: Autor

Słupy: 2x HLR+ 1100



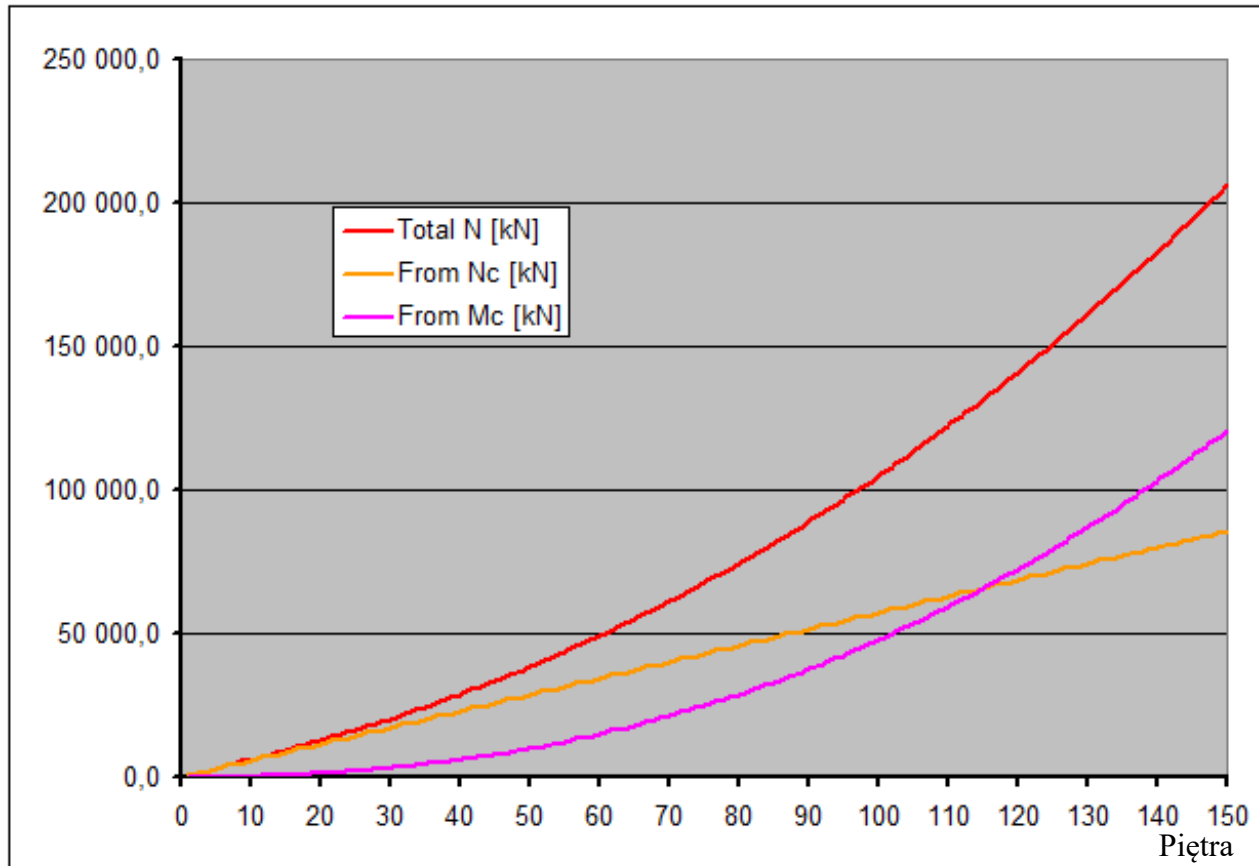
Rys: Autor

Reakcje



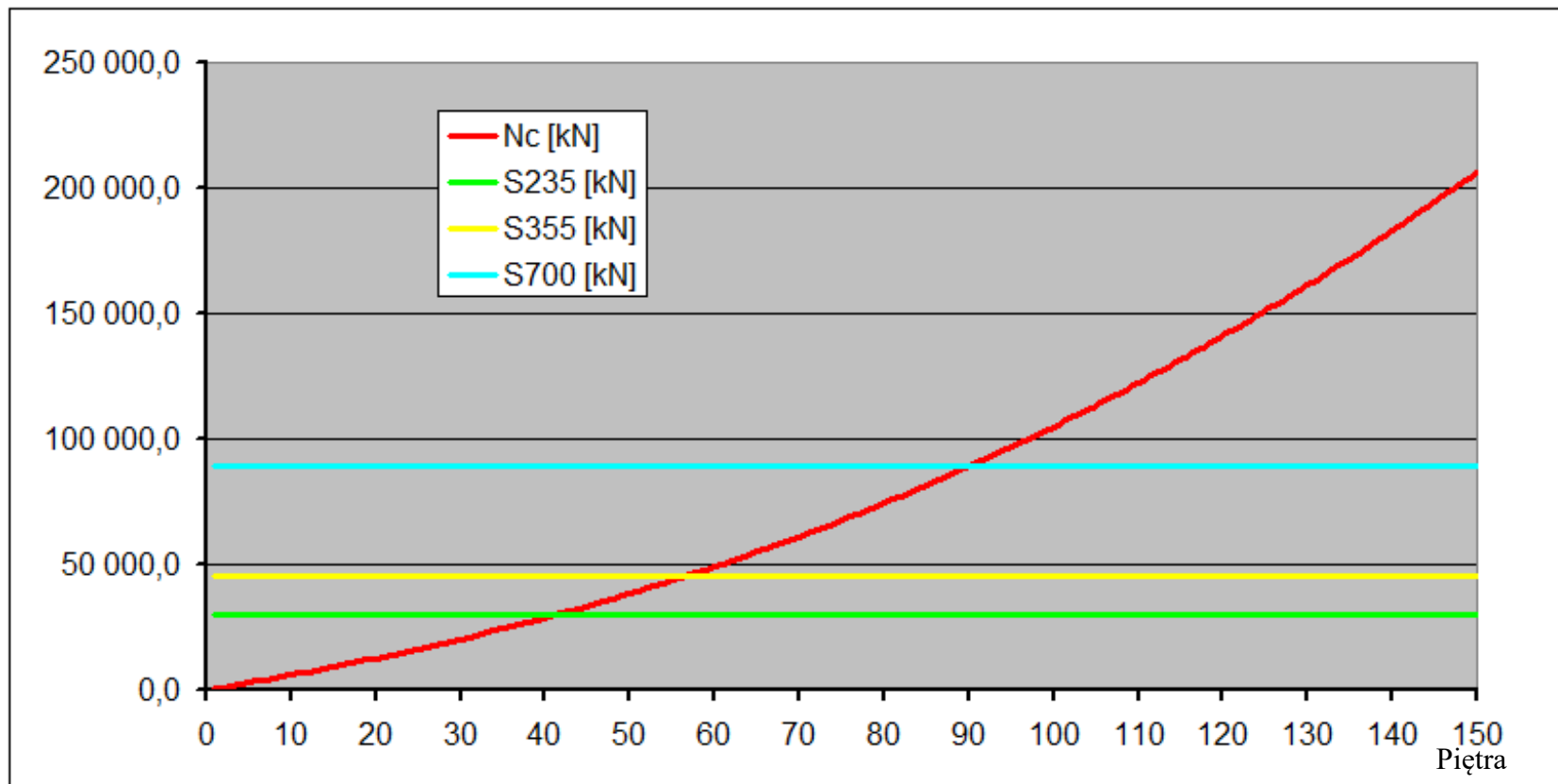
Rys: Autor

Siły osiowe w słupach

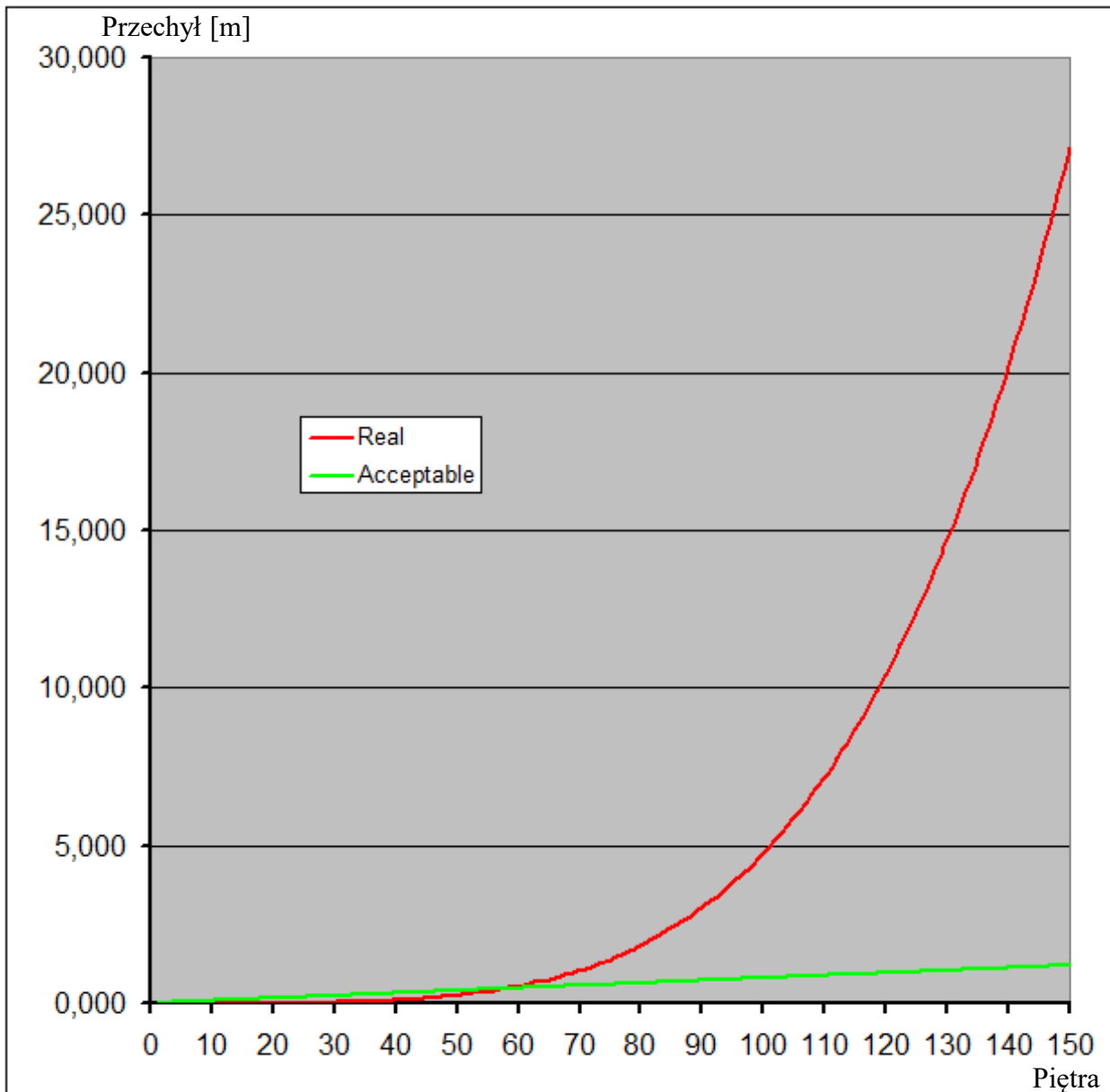


Rys: Autor

Siła osiowa i nośność słupa (bez uwzględnienia wyboczenia)



Rys: Autor

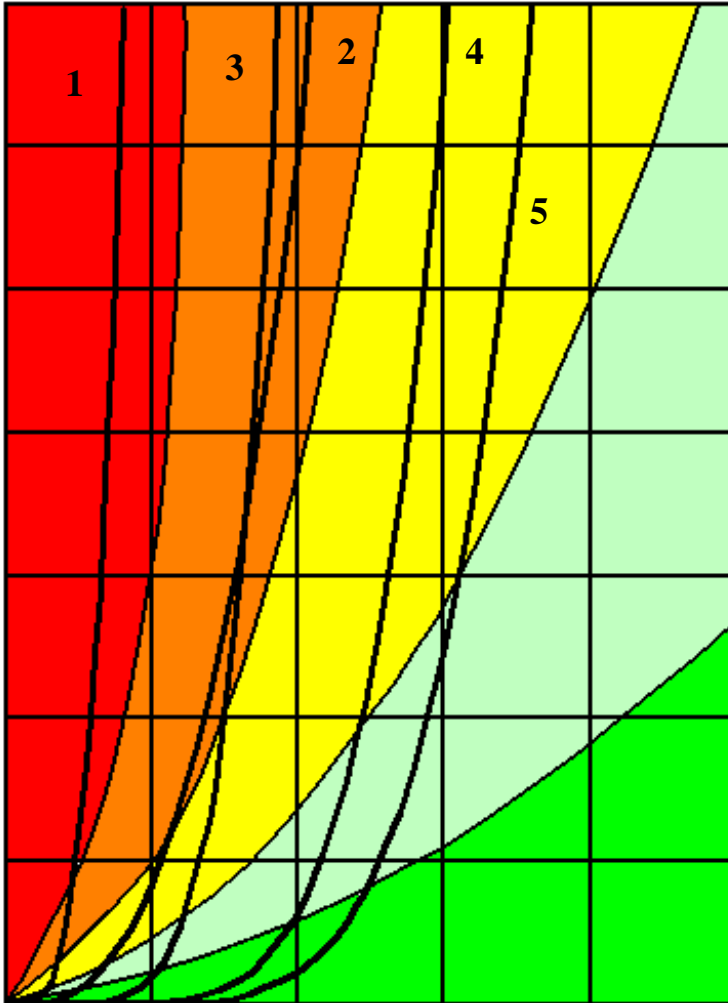


Rys: Autor

Przechył wierzchołka

Wartość dopuszczalna: $H / 500$
EN 1993-1-1 NA.23

Drgania wierzchołka



Rys: Autor

1. Geiger (max 37 kondygnacji);
2. Wspornik (max 40 kondygnacji);
3. Tataro (max 45 kondygnacji);
4. Stara norma (max 55 kondygnacji);
5. Nowa norma (max 58 kondygnacji);

Średnia: 47 kondygnacji

Wnioski

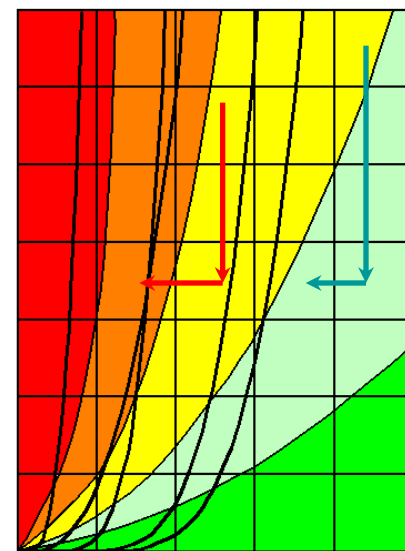
Dla tak przyjętej konstrukcji, spełnienie SGN i SGU jest możliwe tylko dla ograniczonej liczby kondygnacji:

Warunek	Max ilość kondygnacji
Nośność słupów (S700)	89
Przechył wierzchołka	57
Drgania wierzchołka (przybliżenie)	47

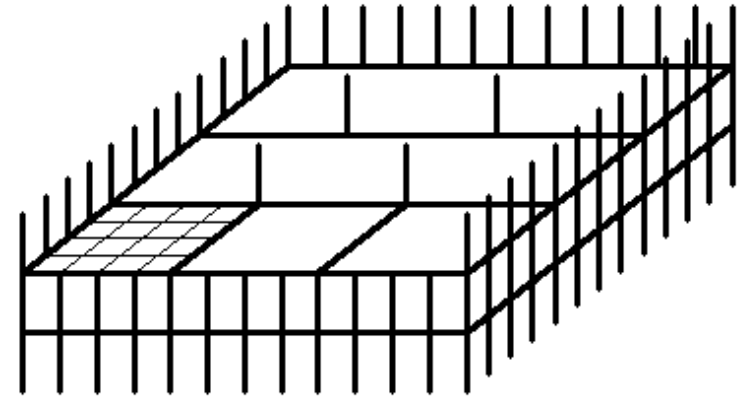
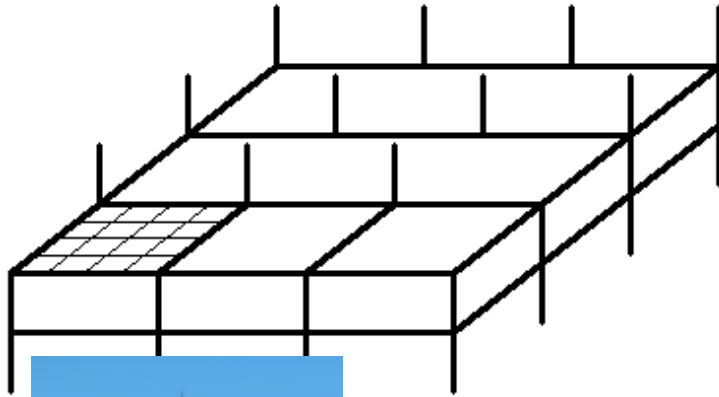
Przy większej liczbie pięter należy zastosować inne rozwiązania konstrukcyjne.

Obliczenia dynamiczne to najbardziej skomplikowana część projektu. W pierwszym przybliżeniu dobrym rozwiązaniem wydaje się zwiększenie sztywności poziomej i nośności. Jednakże efektem zmiany sztywności będzie też zmiana okresu drgań własnych. Zwiększenie sztywności zwiększa też masę konstrukcji. W efekcie mamy zmianę okresów i amplitud drgań ($T \sim \sqrt{m / EJ}$; $\Delta \sim 1 / EJ$) w kierunku, który trudno przewidzieć. Istnieje spore prawdopodobieństwo, że bez zmiany jakościowej (inne rozwiązanie konstrukcyjne), sam kształt krzywej $T \leftrightarrow \Delta$ nie ulegnie znaczącej zmianie.

Dodatkowo, w przypadku konstrukcji narażonych na wymuszenia para / sejsmiczne, lepszym rozwiązaniem jest obniżenie sztywności konstrukcji.



Rys: Autor



Rys: Autor

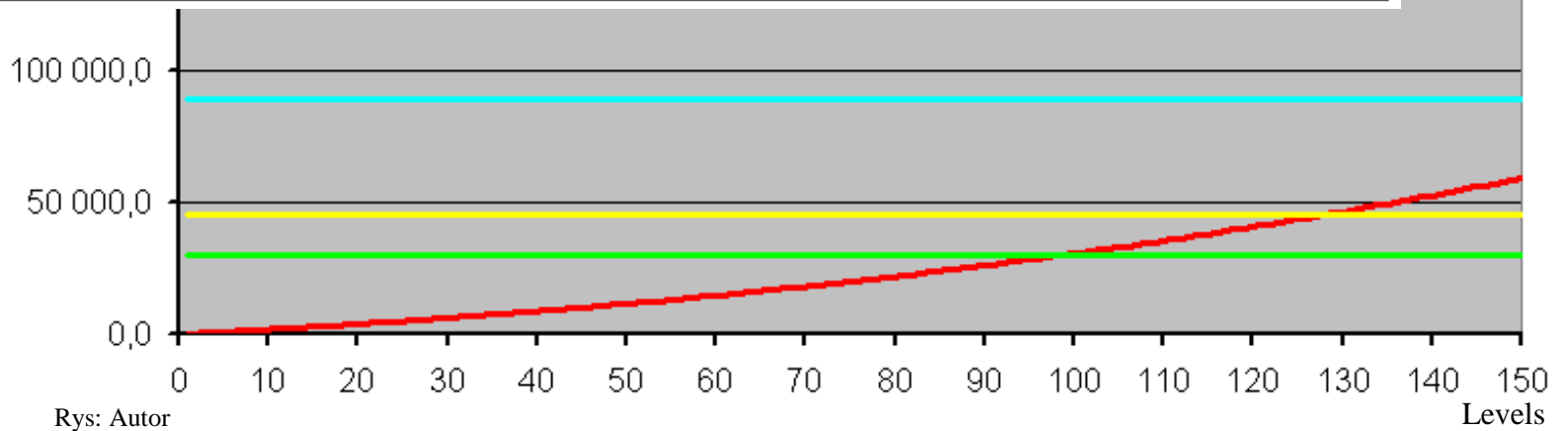
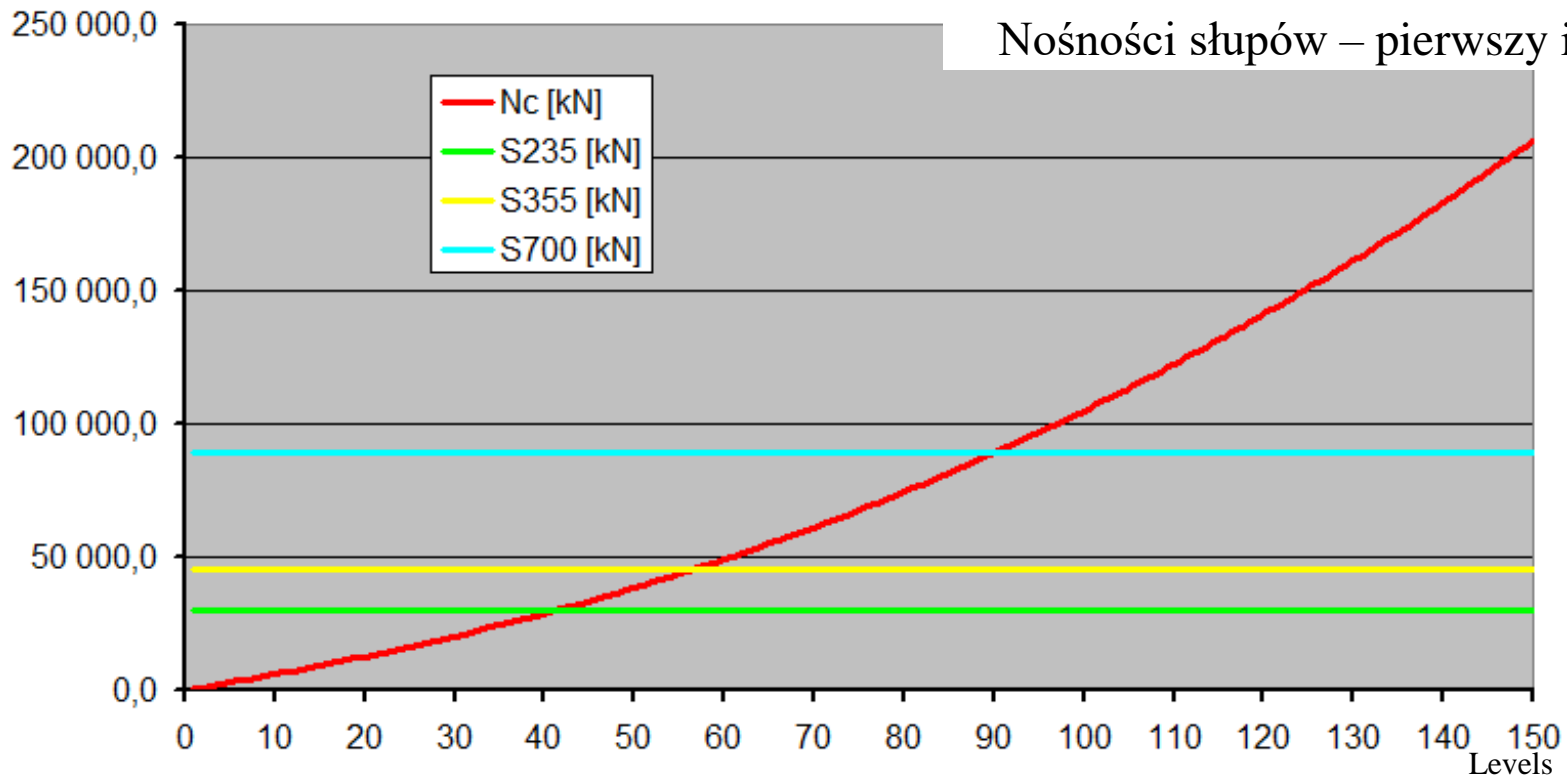


Drugi model: słupy po obwodzie co 2,5 m, w części centralnej tak jak poprzednio c o 10,0 m.

Konstrukcja podobna do Empire State Building.

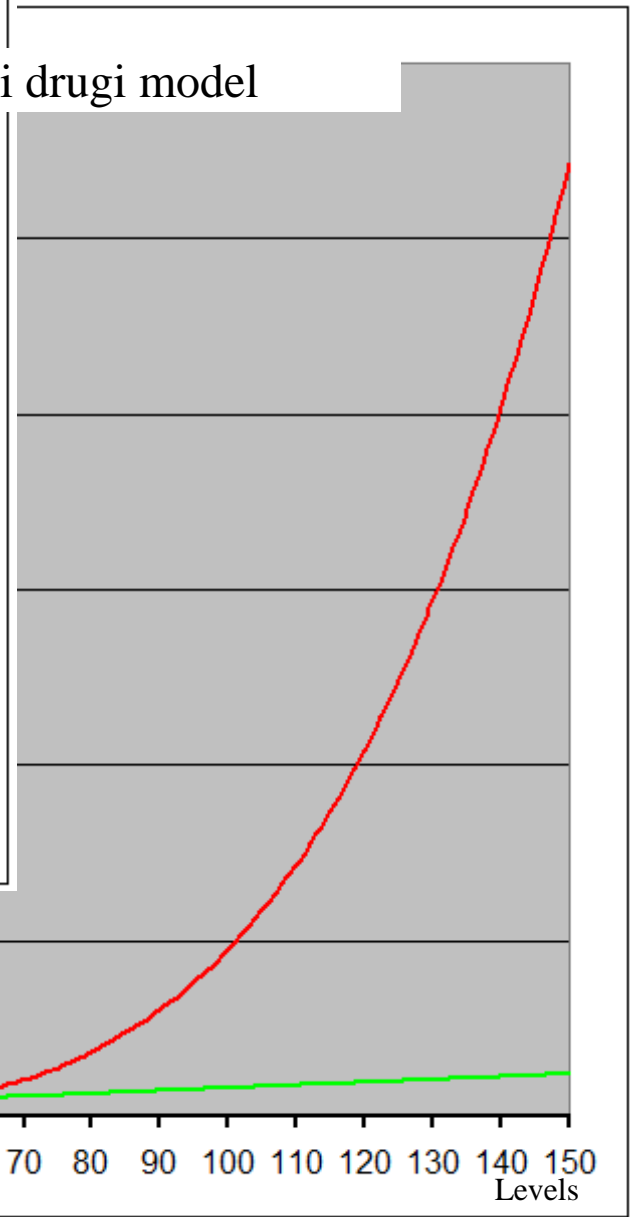
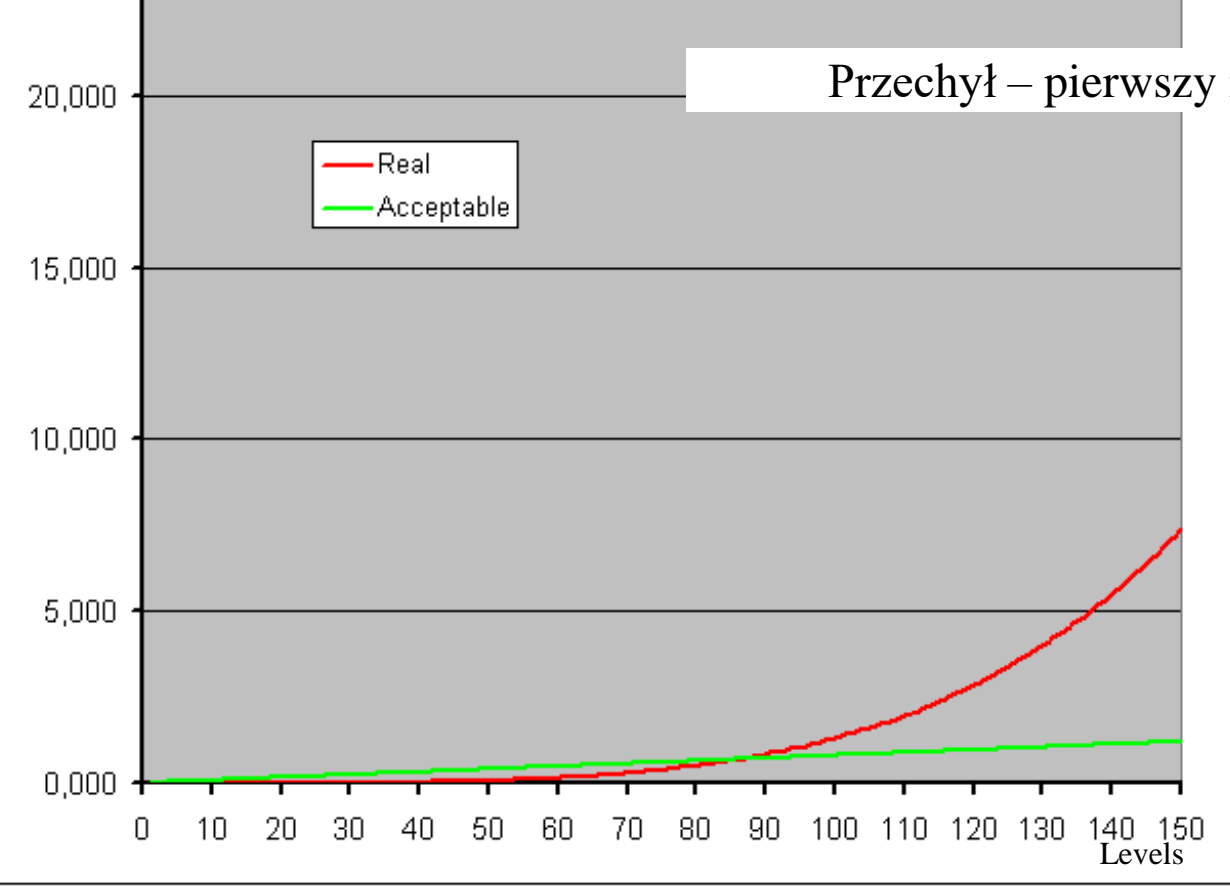
Rys: wikipedia

Nośności słupów – pierwszy i drugi model.



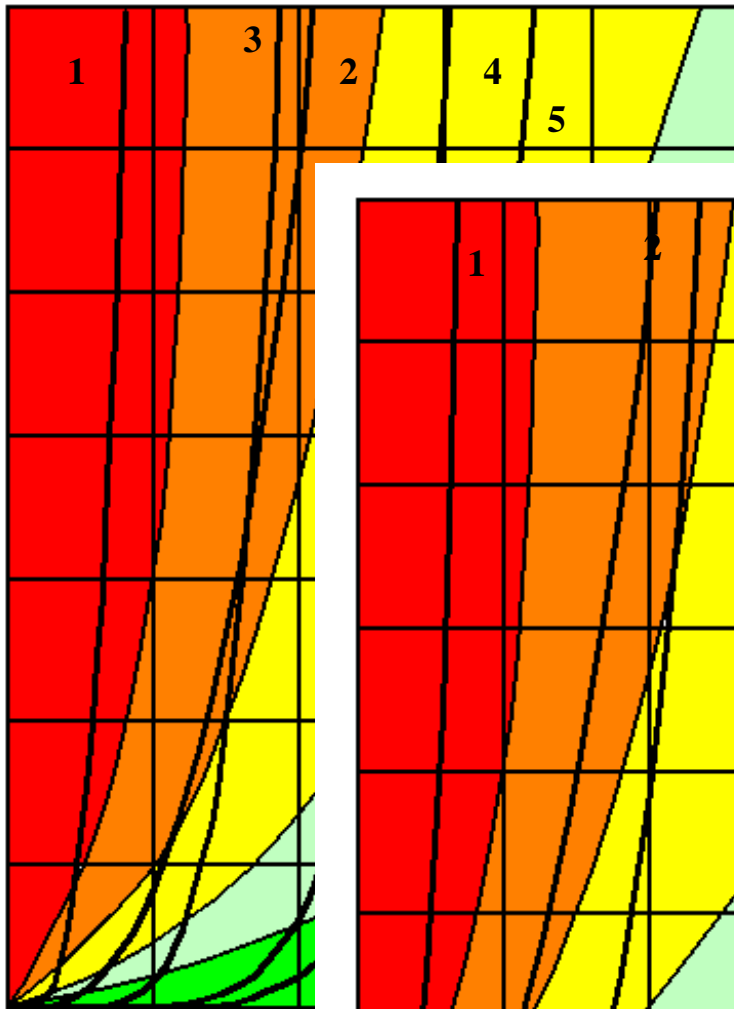
Rys: Autor

Przechyl – pierwszy i drugi model



Rys: Autor

Drgania wierzchołka – pierwszy i drugi model



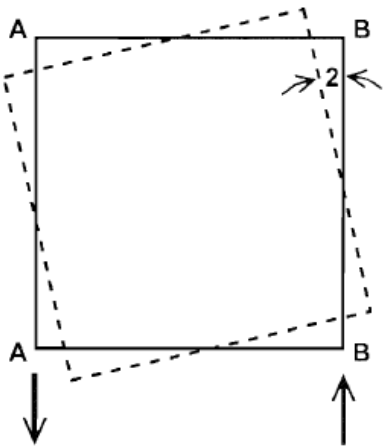
1. Geiger (max 45 kondygnacji);
2. Wspornik (max 52 kondygnacje);
3. Tatarą (max 71 kondygnacji);
4. Stara norma (max 61 kondygnacji);
5. Nowa norma (max 81 kondygnacji);

Średnia 62 piętra

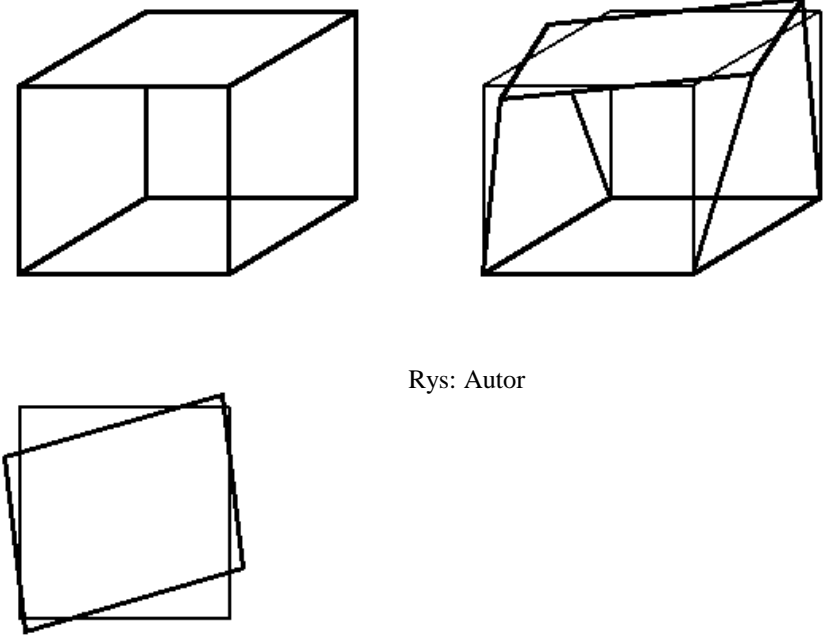
Rys: Autor

Warunek	Max ilość kondygnacji	
	I model	II model
Nośność słupów (S700)	89	> 150
Przechył wierzchołka	57	86
Drgania wierzchołka (przybliżenie)	47	62

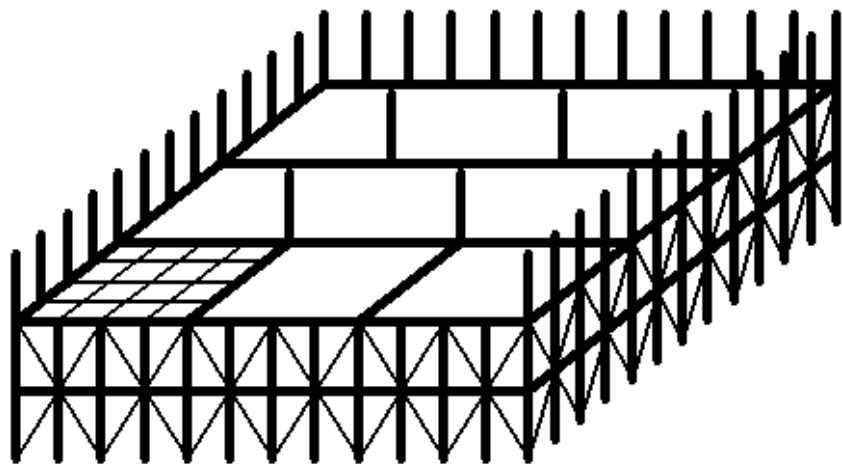
Kolejnym problemem jest skręcanie budowli (aerodynamiczny moment skręcający $\rightarrow \#t / 42$). Sztywność w ramach jednej kondygnacji jest zapewniona przez żelbetowe płyty stropowe i ich belki i podciągi. Potrzebny jest jednak dodatkowy układ stężeń pionowych, zabezpieczający przez skręcaniem się kolejnych kondygnacji względem siebie.



Rys: EN 1993-1-1 fig 5.5



Rys: Autor



Rys: Autor

Model trzeci: masywne stężenia na elewacji.
Zwiększają sztywność konstrukcji, zabezpieczają
przed skręcaniem.

Konstrukcja podobna do John Hancock Center.



Rys: wikipedia

Rozwiązania konstrukcyjne

Konstrukcja budynku wysokiego może być, ze względu na swoją pracę, podzielona umownie na dwie części:

system grawitacyjny – przenoszenie obciążeń pionowych (ciężar własny, obciążenie użytkowe, śnieg...);

system poprzeczny – zapewnienie sztywności przestrzennej; obciążenia poziome, przenoszenie skręcania i zginania globalnego;

System grawitacyjny = słupy

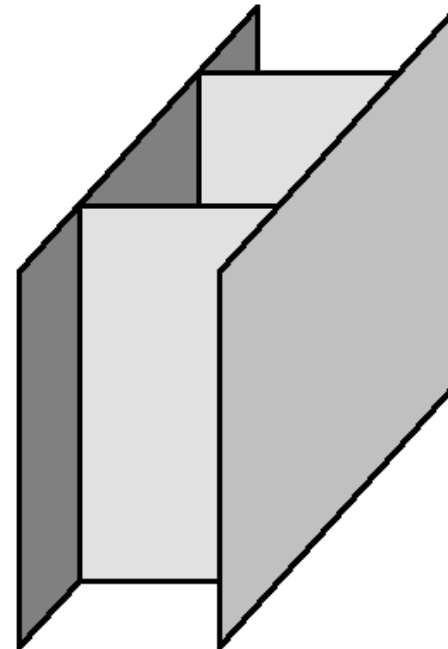
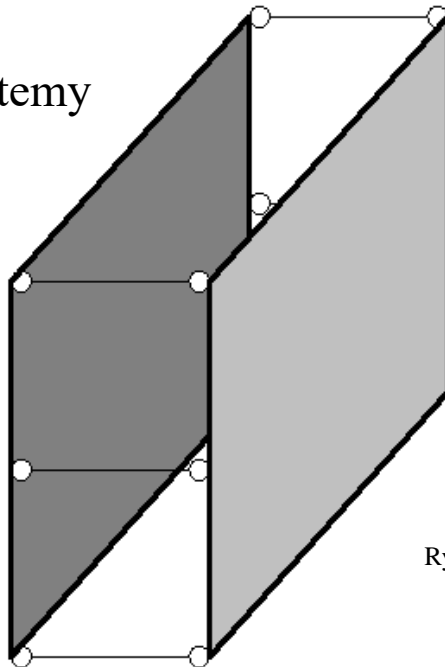
System poprzeczny (poziomy) = rozmaite rozwiązania

Systemy poprzeczne można podzielić na dwie grupy:

2D

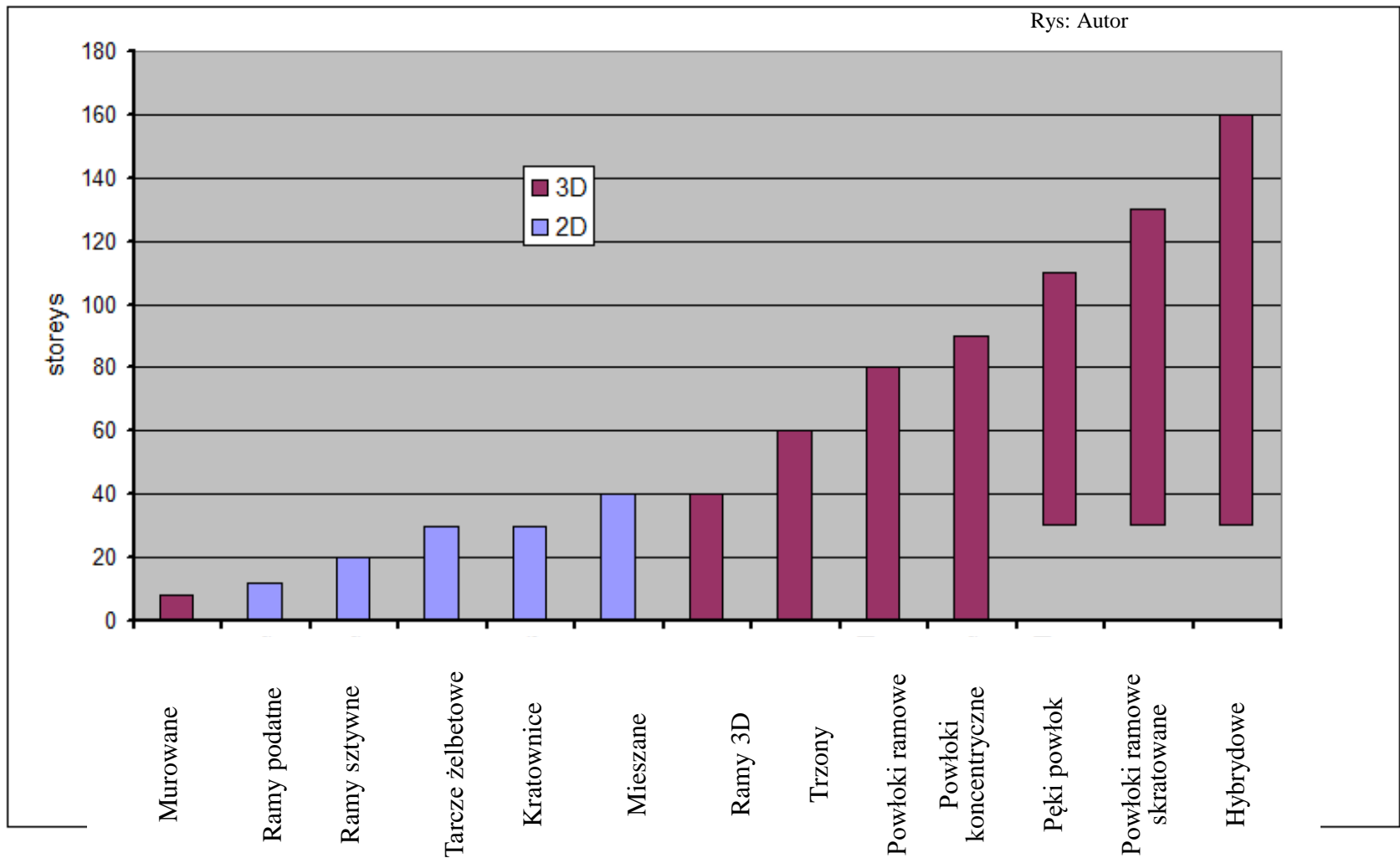
3D

Główne systemy
nośne



Rys: Autor

Stężenia między głównymi
systemami



Różne sposoby zapewnienia budynkom sztywności przestrzennej.

Ściany murowane

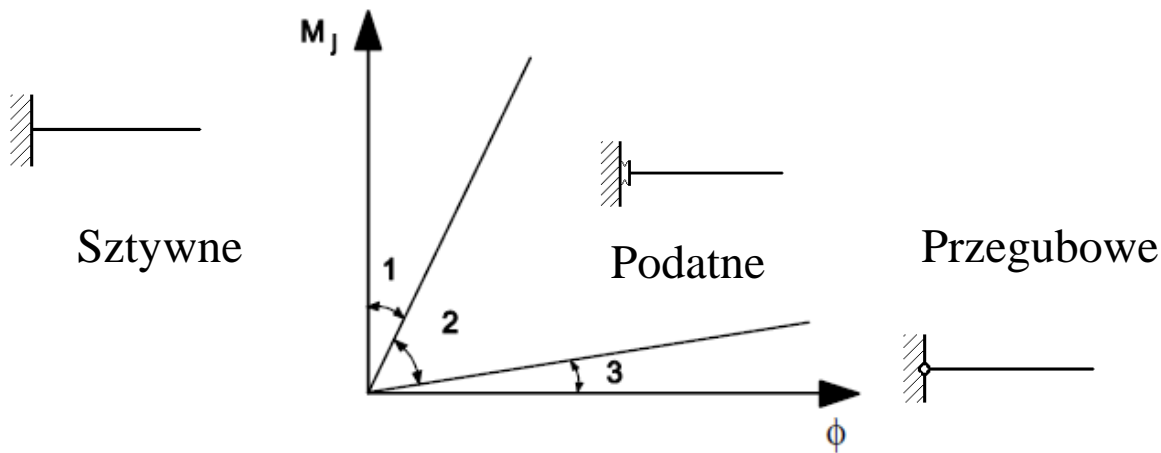
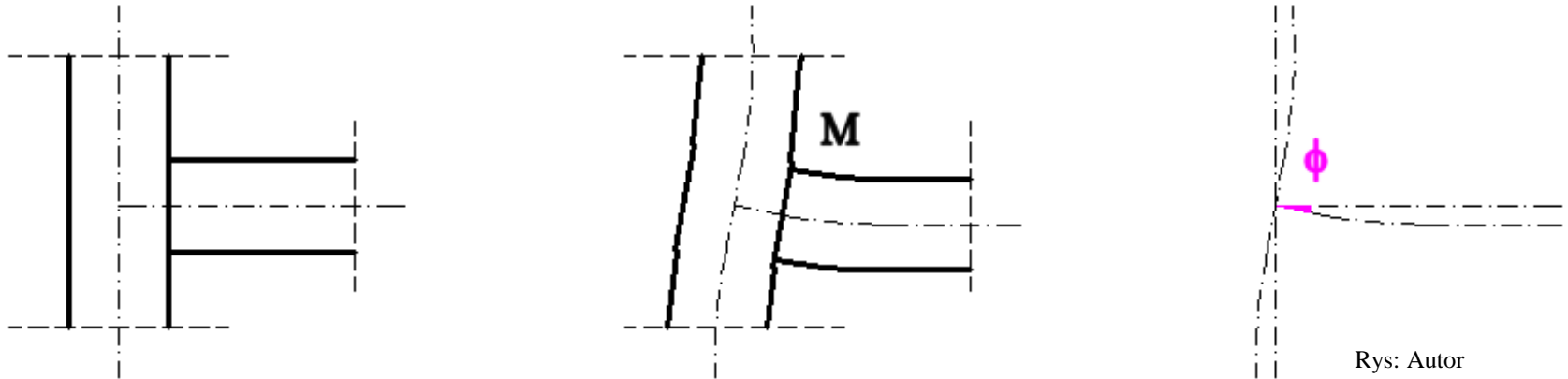


Najstarsze rozwiązanie przypadku budynków wysokich. Ściany przecinają się ze sobą prostopadle, tworząc system 3D

Philadelphia City Hall, najwyższy na świecie budynek murowany, 167 m.
Max grubość ścian: 6,7 m.

Rys: wikipedia

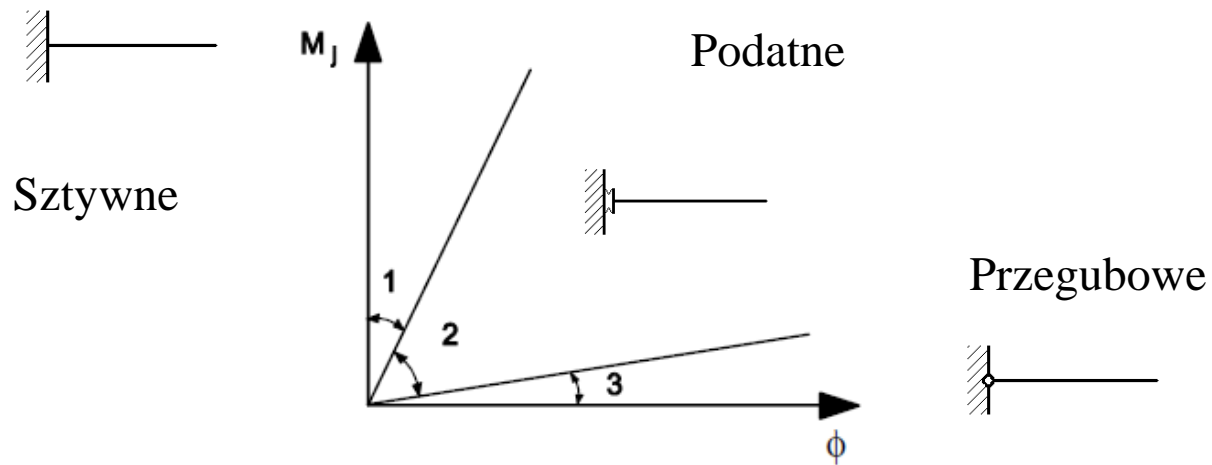
2D Rama stalowa o węzłach podatnych



Główny system nośny =
rama stalowa

Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

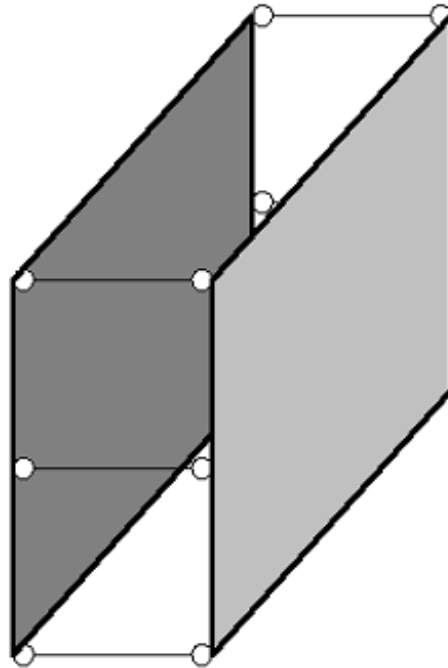
2D Rama stalowa o węzłach sztywnych



Rys: Autor

Główny system nośny =
rama stalowa

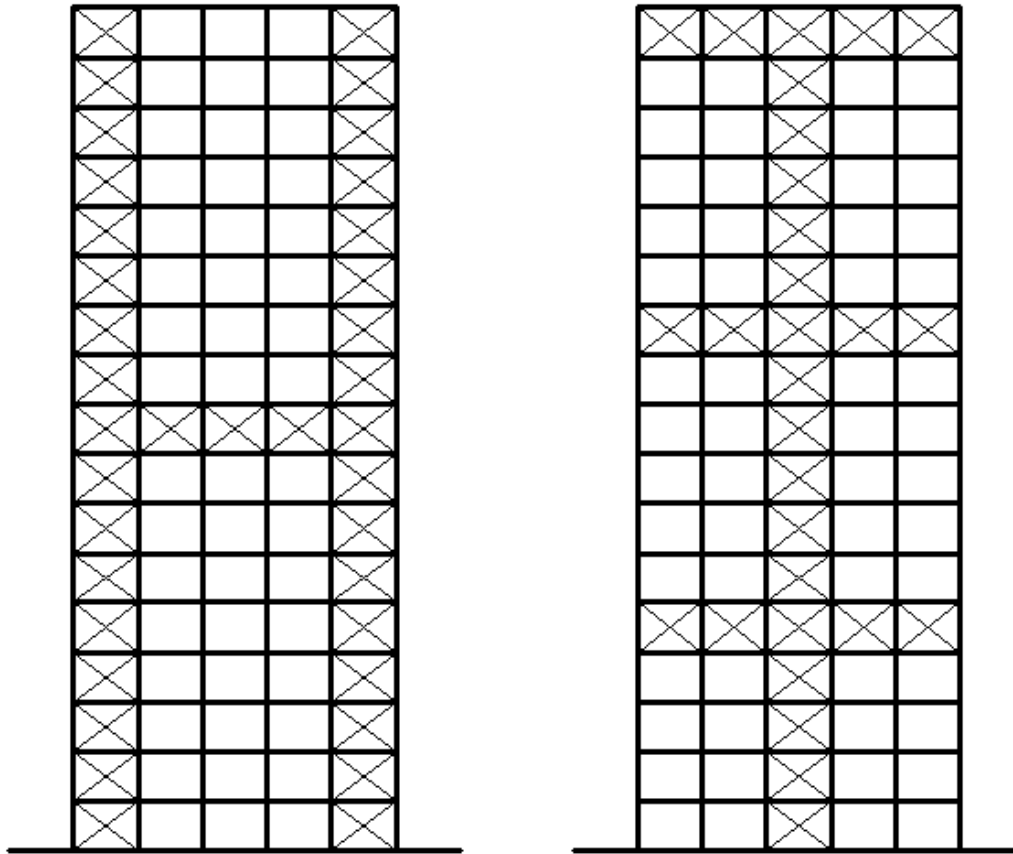
2D Tarcze żelbetowe



Rys: Autor

Główny system nośny =
układ tarcz żelbetowych

2D Kratownica = rama z dodatkowymi stężeniami w jej płaszczyźnie



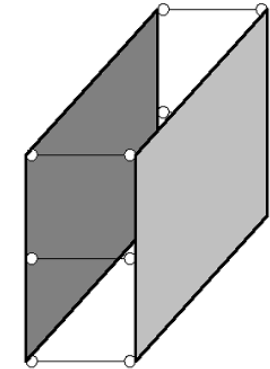
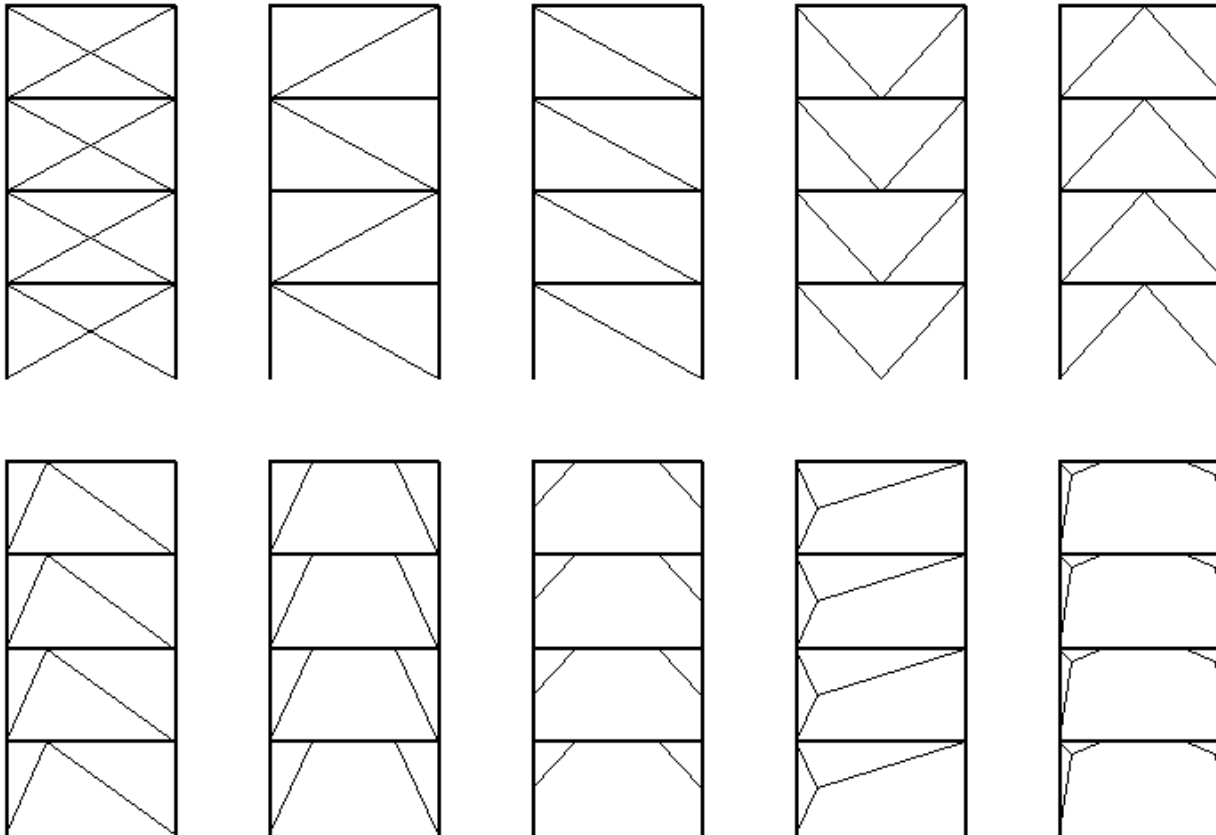
Główny system nośny =
rama skratowana

Rys: Autor

2D Mieszane

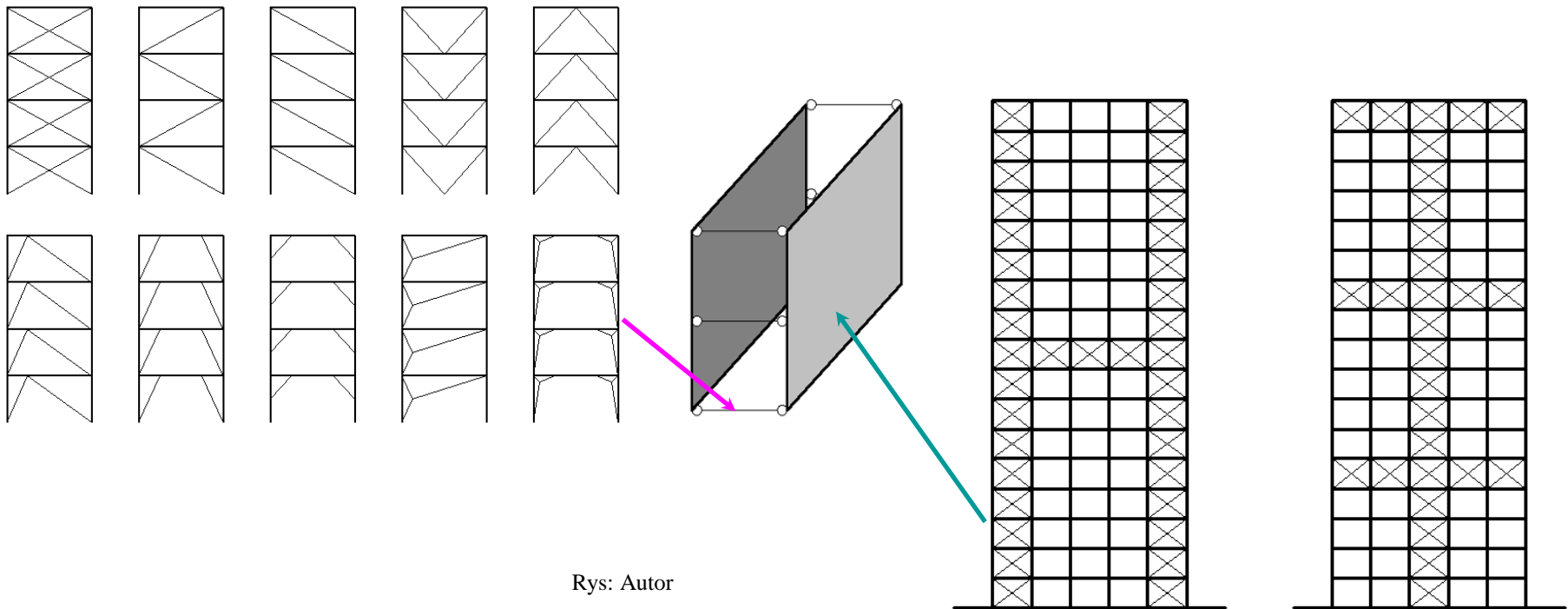
Połączenie różnych systemów (tarcze żelbetowe + kratownica, tarcze żelbetowe + rama stalowa)

Ponadto należy pamiętać o układzie stężeń pomiędzy płaszczyznami głównych systemów nośnych, Stężenia te nie powinny utrudniać komunikacji wewnętrznej.



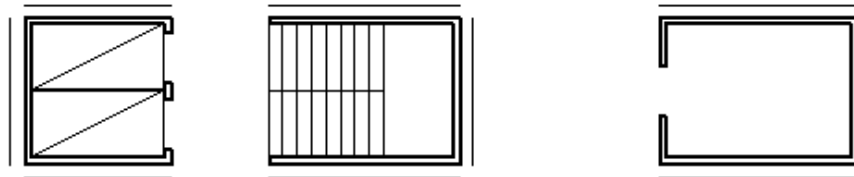
Rys: Autor

Stężenia **między** głównymi płaszczyznami nośnymi nie mogą być mylone ze skatowaniem **w** głównej płaszczyźnie.



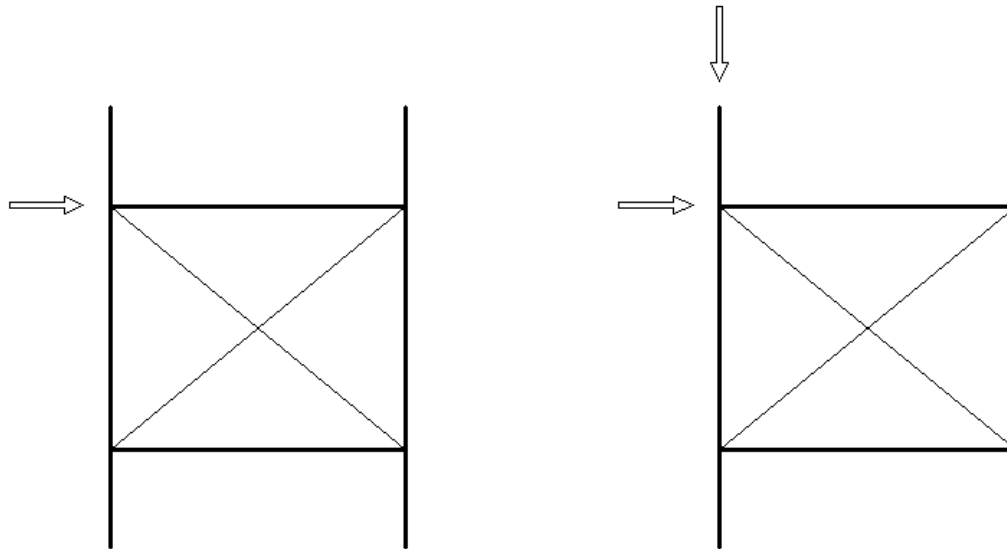
Rys: Autor

Stężenia i skratowania są zazwyczaj lokalizowane w miejscu, w którym nie utrudniają komunikacji: po obrysie zewnętrznym, wokół szybów windowych, schodów i węzłów sanitarnych.

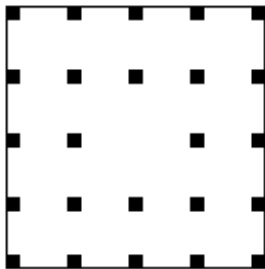


Rys: Autor

Stężenia i skratowania w budynkach wysokich powinny teoretycznie pracować wyłącznie na obciążeniach poprzecznych. W rzeczywistości narażone są dodatkowo na pasożytnicze obciążenia, pochodzące od skrócenia słupów pod siłami ściskającymi.

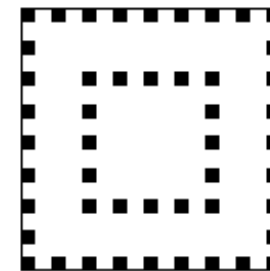


Rys: Autor



1

3D



5

1. Rama 3D (→ I model)

2. Trzon

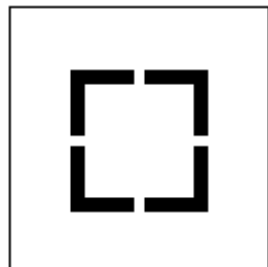
3. Wewnętrzna powłoka ramowa

4. Zewnętrzna powłoka ramowa (→ II model)

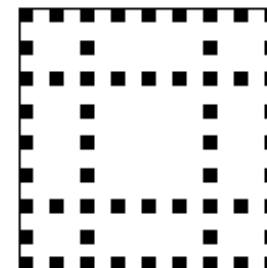
5. Powłoka ramowa koncentryczna

6. Pęk powłok ramowych

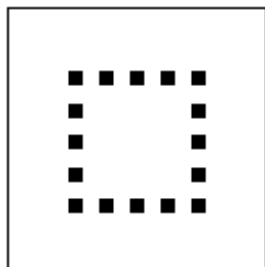
7. Hybryda



2



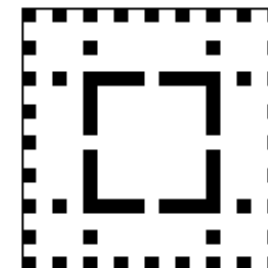
6



3



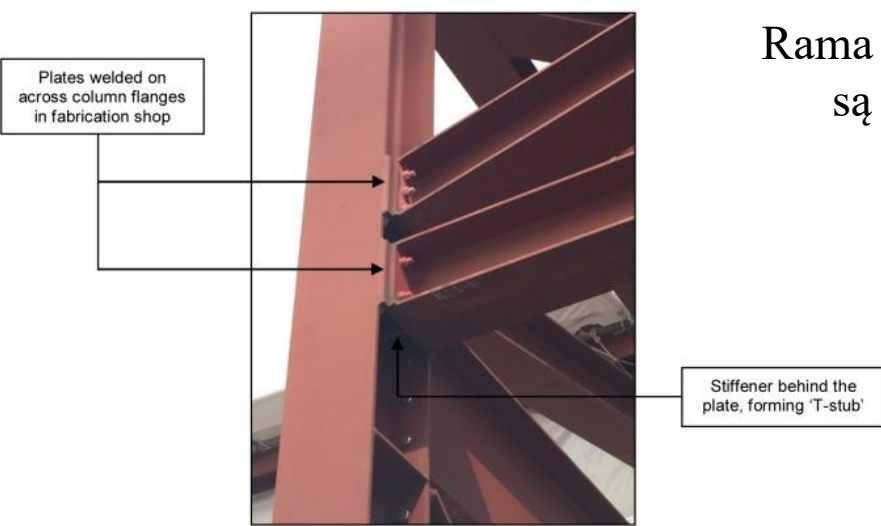
4



7

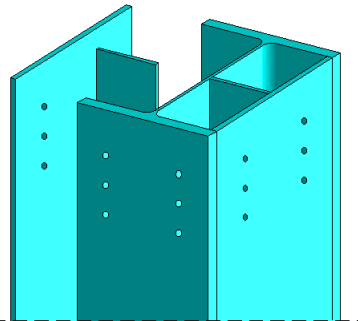
Rys: Autor

Rama 3D oznacza, że węzły sztywne rygiel-słup położone są w obu kierunkach. Stosuje się powszechnie dwa rozwiązania techniczne.



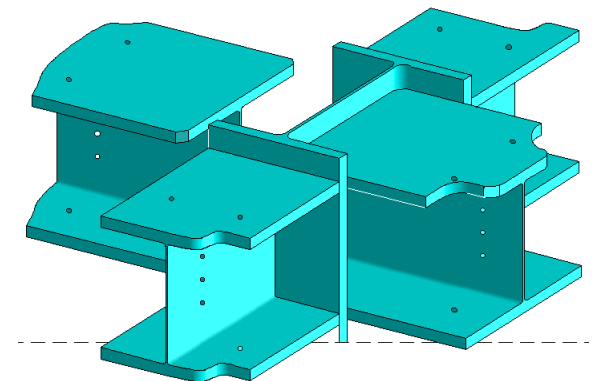
Rys: Current UK trends in the use of simple and/or semi-rigid steel connections, M. Kidd, R. Judge, S.W. Jones, Case Studies in Structural Engineering 6 / 2016

Rys: prefabmarket.com



Rys: Auttur

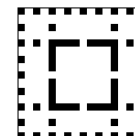
Rys: resources.scia.net



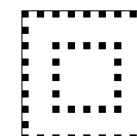
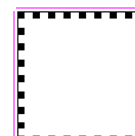
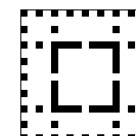
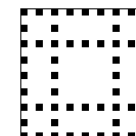
Rys: Auttur

Najwyższa istniejąca piętnastka

Burj Khalifa	Hybrydowy
Shanghai Tower	Hybrydowy
Abraj Al Bait	Hybrydowy
Ping An International Finance	Hybrydowy
Lotte World Premium Tower	Hybrydowy
One World Trade Center	Hybrydowy
CTF Financial Centre	Hybrydowy
Willis Tower	Pęk powłok ramowych
Taipei 101	Hybrydowy
World Financial Centre	Hybrydowy
International Commerce Centre	Hybrydowy
Tianjin R&F Guangdong Tower	Hybrydowy
John Hancock Centre	Zewnętrzna powłoka ramowa skratowana
Petronas Tower 1	Koncentryczna powłoka ramowa
Petronas Tower 2	Koncentryczna powłoka ramowa



Rys: Autor



Materiały konstrukcyjne

Stal Żelbet

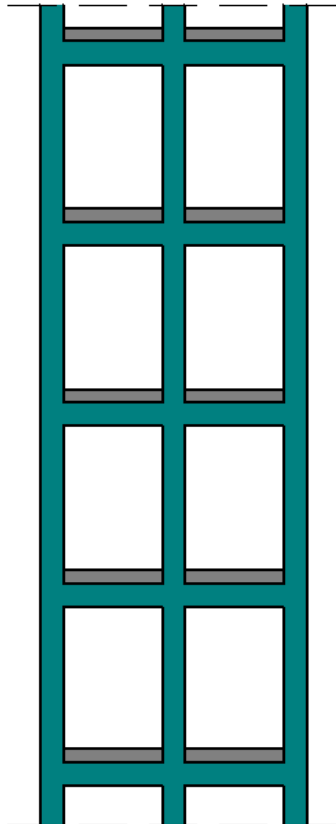
Budynek stalowy – słupy i dźwigary stropowe wykonane z elementów stalowych (do niedawna najpopularniejsze rozwiązanie).

Budynek żelbetowy – słupy i dźwigary stropowe wykonane z elementów żelbetowych (obecnie najpopularniejsze rozwiązanie).

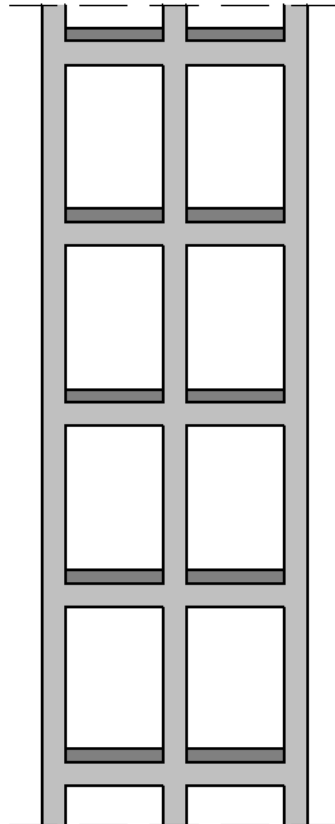
Budynek kompozytowy (zespolony) – najczęściej ustrój grawitacyjny stalowy, zaś poprzeczny żelbetowy; zespolone do warunków pełnej współpracy.

Budynek o konstrukcji mieszanej (mix) – dolna część budynku wykonana w inny sposób, niż górna (np. dolna – żelbet, górna – stal; najmniej popularne rozwiązanie).

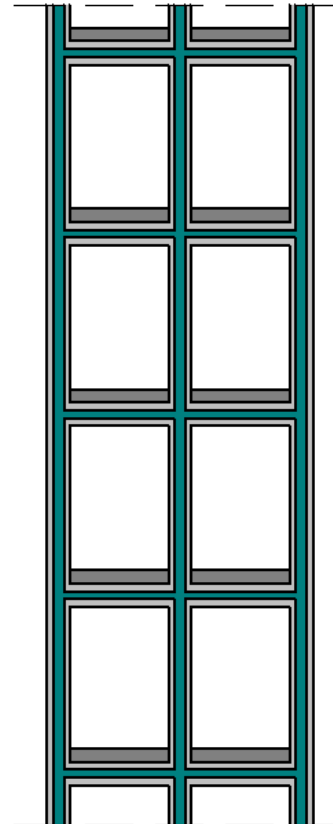
Stal



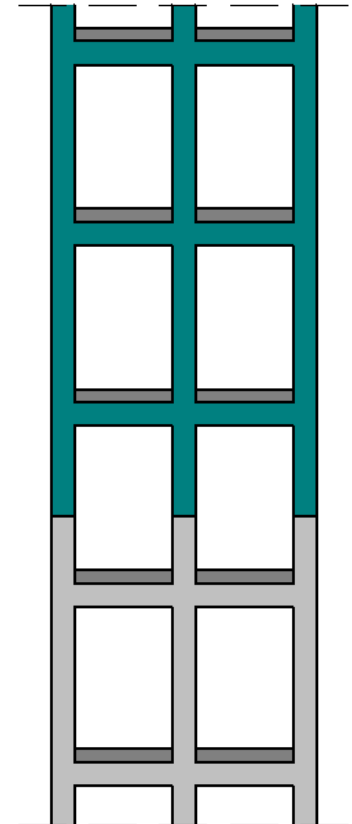
Żelbet



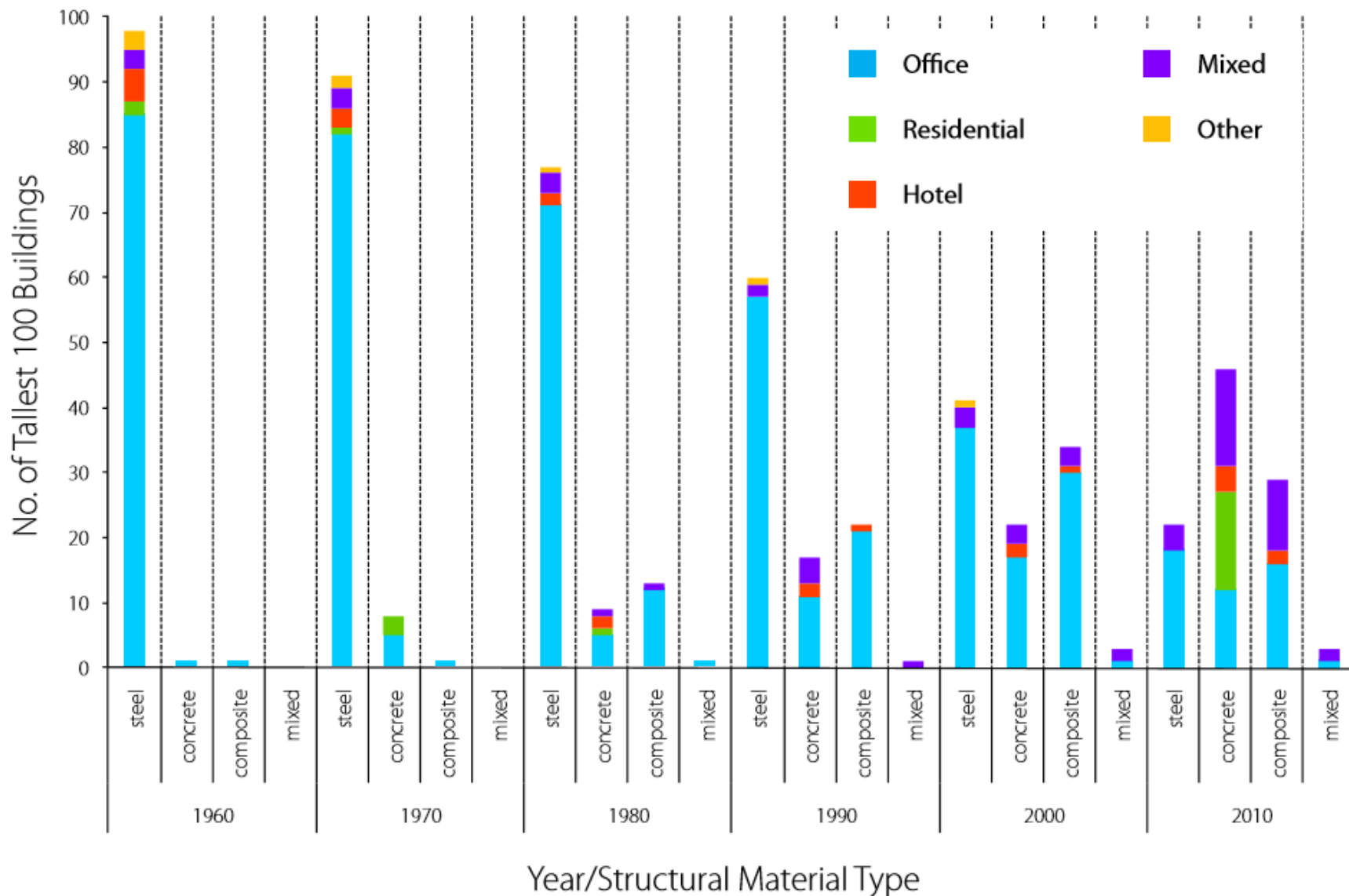
Kompozyt



Mix



Rys: Autor



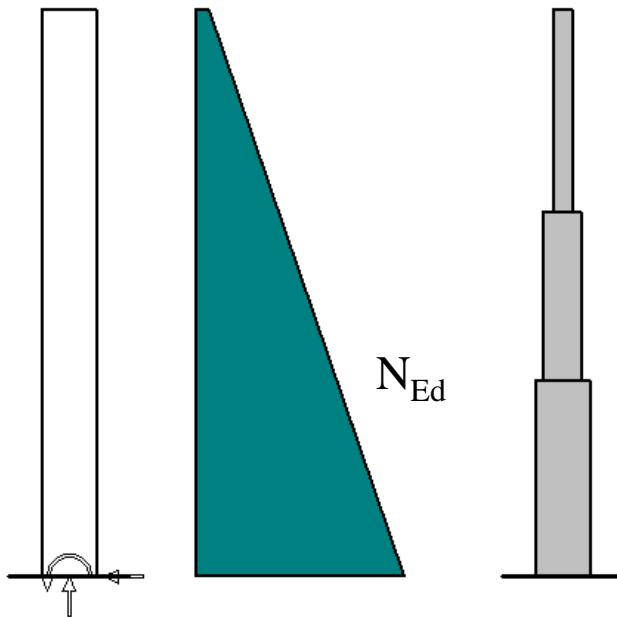
Rys: ctbuh.org

Najwyższa istniejąca piętnastka:

Burj Khalifa	Mix
Shanghai Tower	Zespolony
Abraj Al Bait	Mix
Ping An International Finance	Zespolony
Lotte World Premium Tower	Zespolony
One World Trade Center	Zespolony
CTF Finacial Centre	Zespolony
Willis Tower	Stalowy
Taipei 101	Zespolony
World Finansial Centre	Zespolony
International Commerce Centre	Zespolony
Tianjin R&F Guangdong Tower	Zespolony
John Hancock Centre	Stalowy
Petronas Tower 1	Żelbetowy
Petronas Tower 2	Żelbetowy

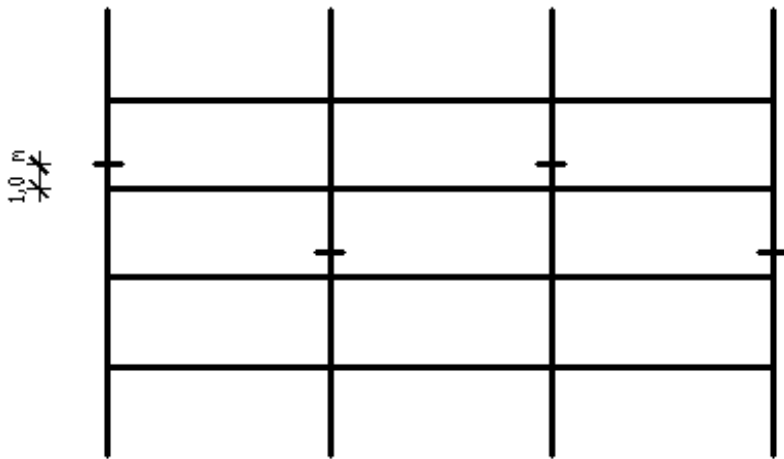
Wymagania odnośnie węzłów

Doświadczenie podpowiada kilka dodatkowych wymogów dla słupów w budynkach wysokich.



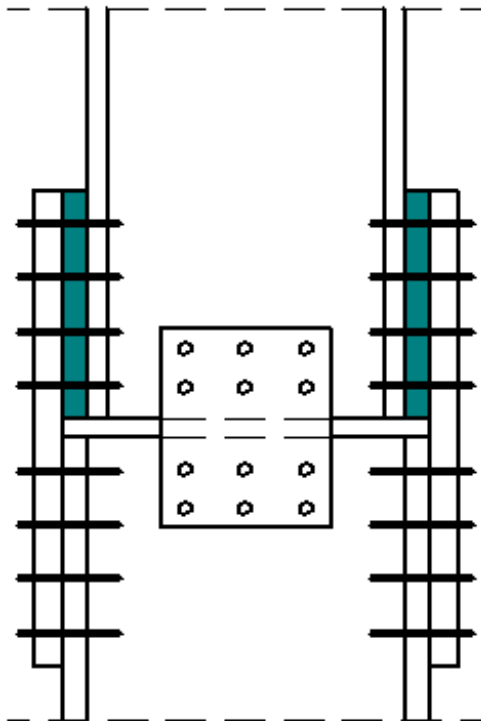
Rys: Autor

Siła osiowa szybko rośnie z długością słupów. Zalecana jest zmiana przekrojów po wysokości budynku. Długość segmentów wysyłkowych nie powinna przekraczać 12 m (skrajnia transportowa).



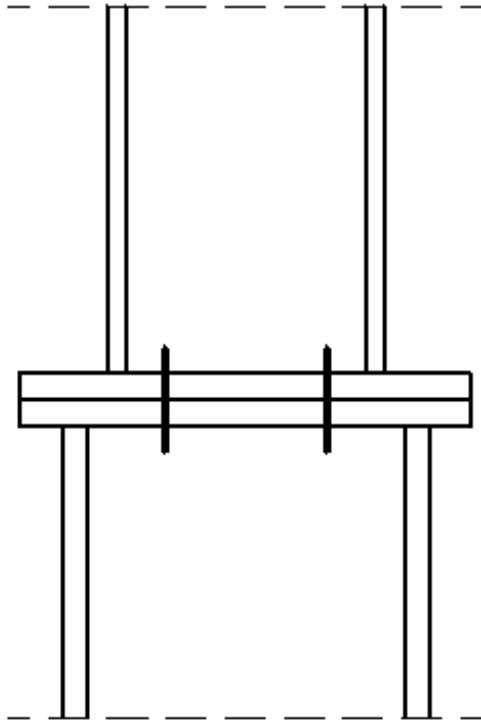
Rys: Autor

Styki kolumn powinny być umieszczone około 1 m nad poziomem kondygnacji. Styki sąsiednich kolumn powinny być przesunięte o jedną kondygnację.



W przypadku niewielkiej różnicy przekrojów (do 30 mm) obu części słupa, można użyć dodatkowych przekładek dla skompensowania różnicy wymiarów.

Rys: Autor



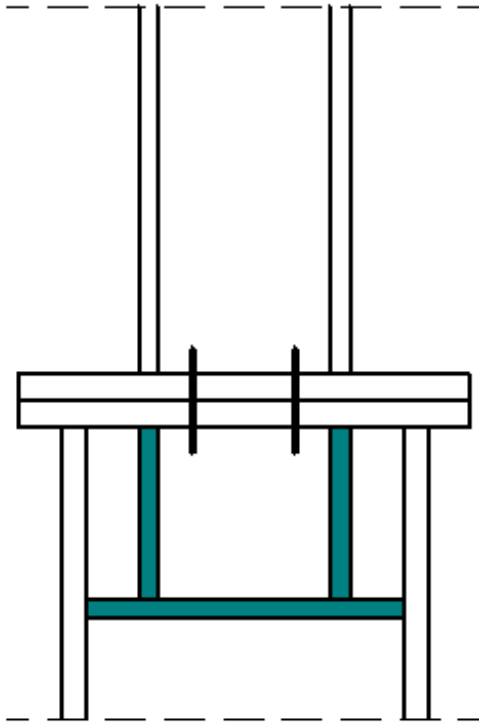
Rys: Autor

Przy większej różnicy przekrojów konieczne jest zastosowanie styku doczołowego.



Rys: hoverdale.com

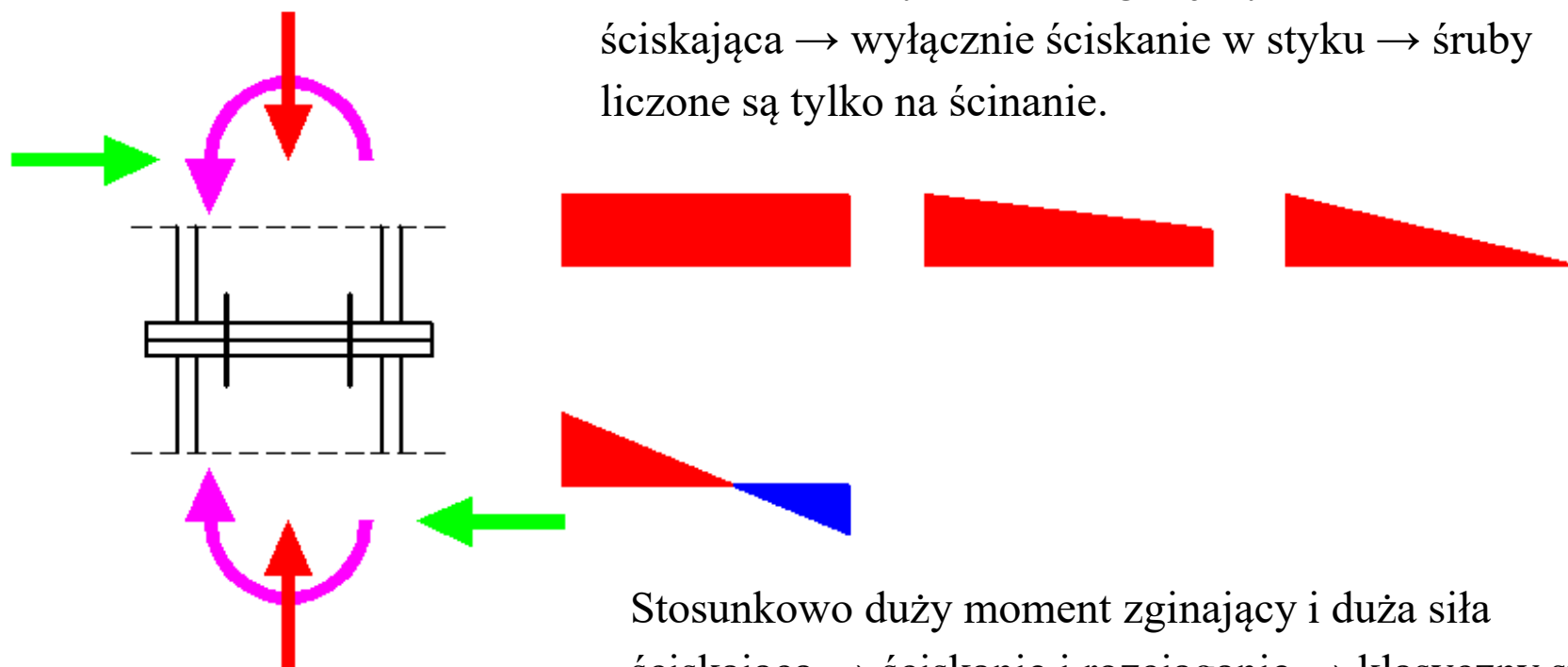
Obie powierzchnie powinny być dopasowane przez zeszlifowanie, by zapewnić pełne przekazanie sił poprzez docisk



Przy bardzo dużej różnicy przekrojów konieczne są dodatkowe żebra dla usztywnienia środnika w dolnej części.

Rys: Autor

Obliczenia zależą od rozkładu naprężeń w styku.

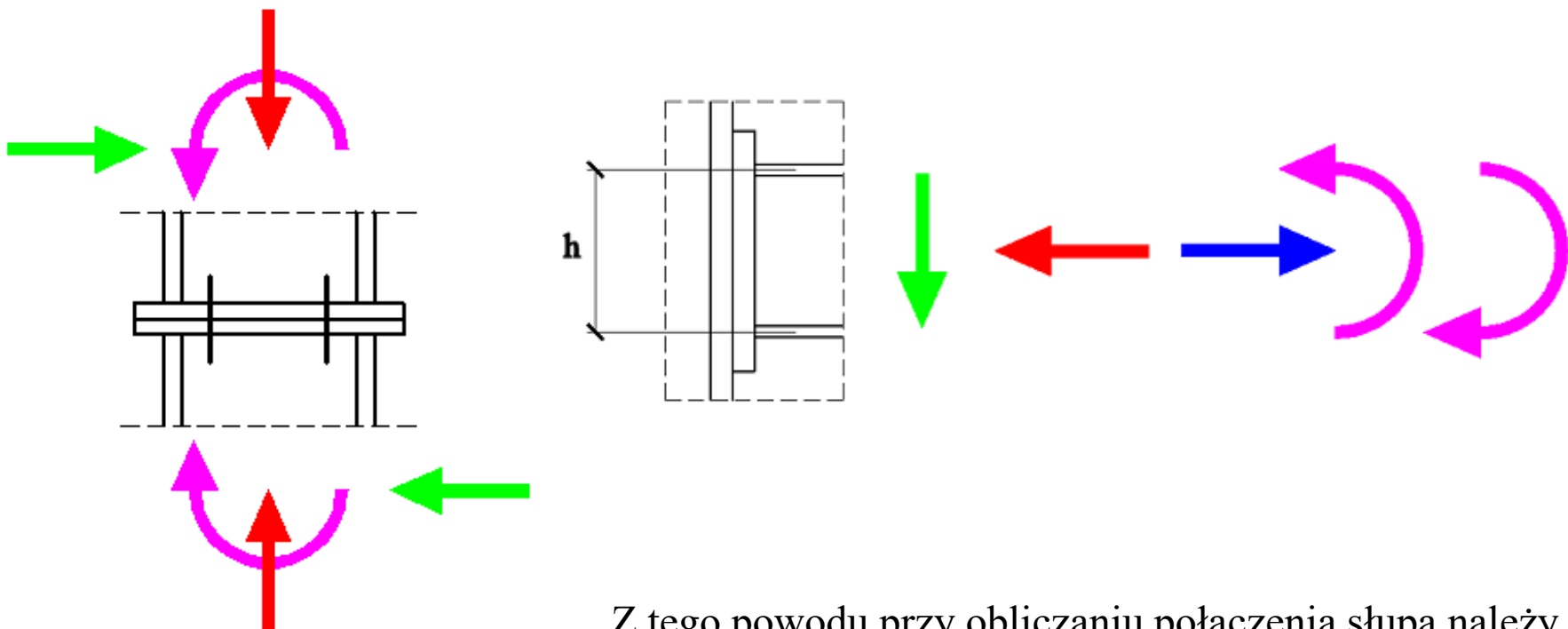


Stosunkowo mały moment zginający i duża siła ściskająca → wyłącznie ściskanie w styku → śruby liczone są tylko na ścinanie.

Stosunkowo duży moment zginający i duża siła ściskająca → ściskanie i rozciąganie → klasyczny styk doczołowy → część śrub jest rozciągana a część ściskana.

Rys: Autor

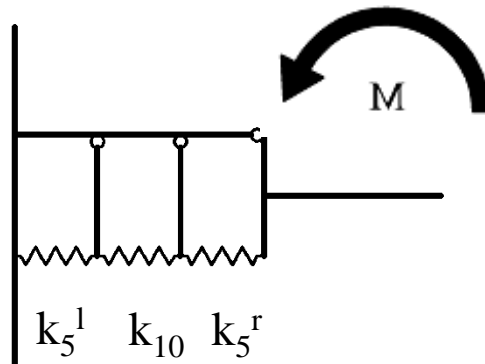
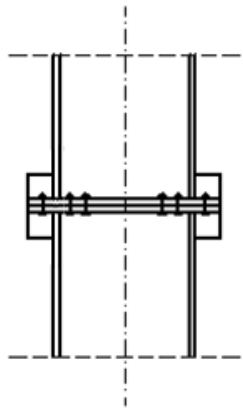
Siły przekrojowe są przyłożone do słupów w styku w taki sam sposób, jak do rygla w styku śrubowym rygiel-słup.



Z tego powodu przy obliczaniu połączenia słupa należy stosować wzory dla belki w klasycznym połączeniu doczołowym.

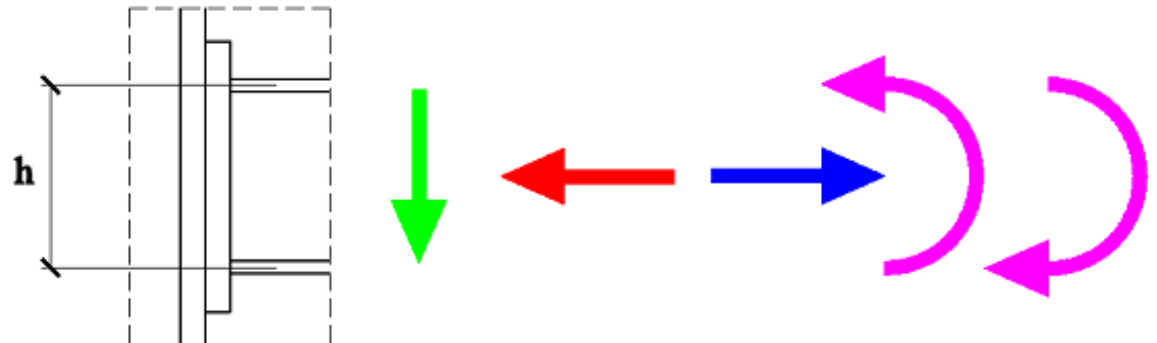
Rys: Autor

Rys: Autor



W sztywności węzła należy uwzględnić:

- górną blachę czołową zginaną;
- trzpienie śrub;
- dolną blachę czołową zginaną;



W nośności węzła uwzględnić należy:

- półkę ściskaną, liczoną jak ściskana półka słupa;
- rozciągany środek liczony jak środek belki;
- zginaną blachę czołową;

Zagadnienia egzaminacyjne

Rzeczywiste tłumienie i idealizacja

Obliczanie wymuszenia dynamicznego

Wzbudzenie wiatrowe i para / sejsmiczne, podobieństwa i różnice

Usztywnienia poziome budynków wysokich

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@pk.edu.pl