

Konstrukcje stalowe - Układy konstrukcyjne, Belki



Wieża Eiffla, Paris 1889



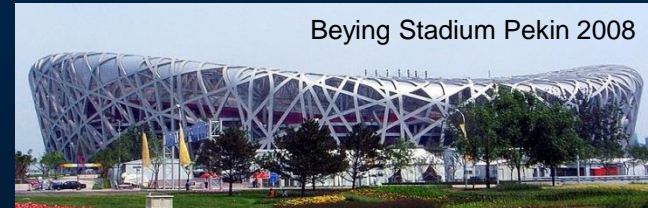
Freedom Tower NY (na miejscu WTC)



Muzeum Guggenhaima, Bilbao, 2005



Centre Pompidou, Paryż, 1971-77



Beijing Stadium Pekin 2008

Opracowano z wykorzystaniem materiałów:

[2.1] Arup O & Partners, *Worked Example for the Design of Steel Structures, Based on EuroCode 3*, SCI Publication, 1994

[2.2.] Trebilcock P, Lawson M., *Architectural Design in Steel*, Spon Press, 2004

[2.3] *Steel Designers' Manual - 6th Edition (2003)*, ed: Davison B., Owens G., W., Blackwell Publishing, 2003

[2.4] *Budownictwo ogólne*, tom 3: konstrukcje budynków, praca zbiorowa red. Wiesław Buczkowski, Arkady, 2009

[2.5] Kozłowski A. (red), *Konstrukcje stalowe, Przykłady obciążeń wg PN-EN 1993-1*, cz. Pierwsza Wybrane elementy i połączenia

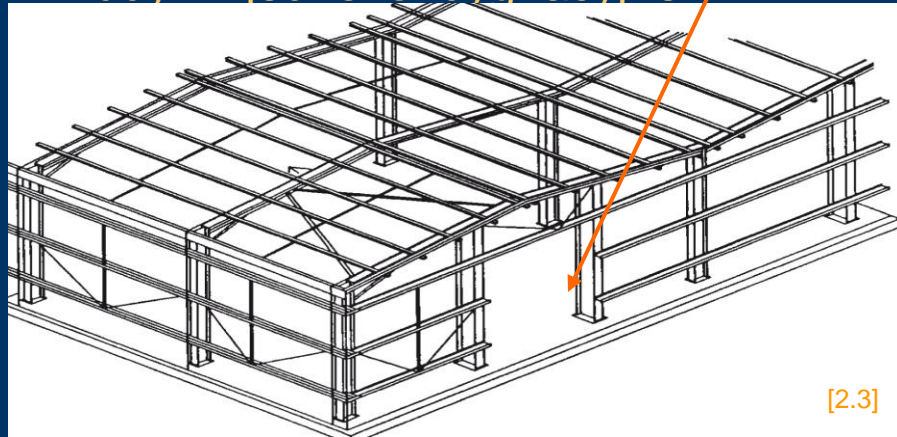
[2.6] Biegus A. *Zgodnie z Eurokodem 3 – część 5- wymiarowanie elementów*, Builder, czerwiec 2009

Leszek CHODOR, dr inż. bud, inż. arch.

leszek@chodor.co ; lch@chodor-projkt.net

Podział ustrojów konstrukcji stalowych dokonamy według obszarów zastosowań (podział dla architekta):

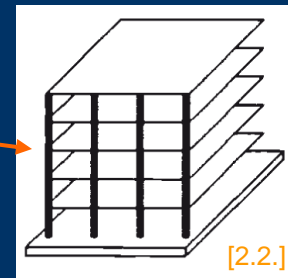
1. Budynki jednokondygnacyjne



[2.3]

2. Budynki wielokondygnacyjne

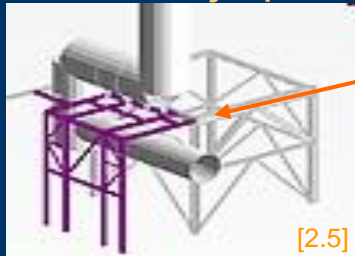
Konstrukcja najekonomiczniejsza dla budynków wysokościowych (>15k) → konstrukcja stalowa stanowi ok. 15% kosztów (a instalacje ok. 30%, panele+łamacze słońca – ok. 20%)



[2.2.]



3. Konstrukcje przemysłowe w tym urządzenia technologiczne, elektroenergetyczne



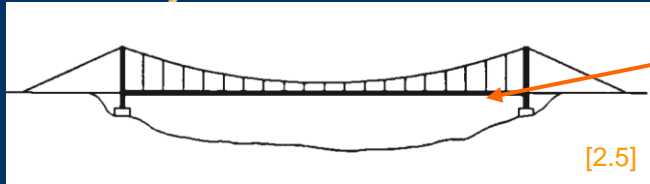
[2.5]



W przemyśle konstrukcje stalowe są niezastąpione i b. szeroko stosowane, nie tylko jako prętowe, ale również powłokowe (konstrukcje z blach)

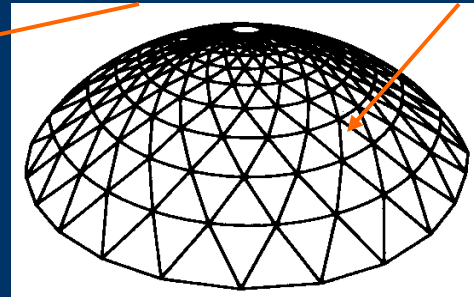
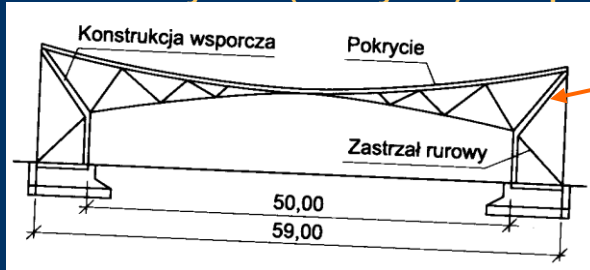
- 40% zastosowania stali w Europie
- Potocznie nazywane halami, np. : targowe, wystawowe, widowiskowe, magazynowe, produkcyjne, itd..
- Ponad 90% budynków jednokondygnacyjnych ma konstrukcję ramową.
- Łatwa zmiana funkcji podczas użytkowania. Najczęstsza rozpiętość, to ok. 30 m (supermarkety)

4. Mosty



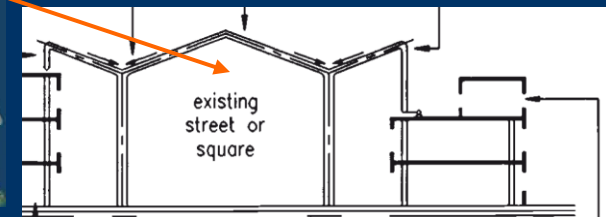
Mosty, wiadukty i kładki stalowe są ekonomiczne szczególnie dla dużych rozpiętości > 80 m. Zalety architektoniczne

5. Przekrycia (dużych) rozpiętości: struktury, cięgnowe, kopuły,



Przekrycia stalowe są ekonomiczne niezależnie od rozpiętości, ale dla dużych rozpiętości uzyskuje się szczególny efekt lekkości

6. stalowe domki (residential) ; atria = [zadaszenia atrium , dachhaus]



7. Inne: wieże, maszty, silosy

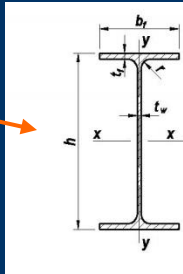


Podstawowymi elementami konstrukcji stalowych są:

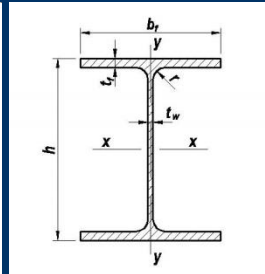
1. Belki (np. belki stropowe, podciąg, płatwie dachowe, nadproża, z których wyodrębnimy jeszcze **kratownice** (mimo, że są złożone z prętów osiowo rozciąganych, ściskanych) – są to **pręty zginane poprzecznie** z ew. równoczesnym ściskaniem lub rozciąganiem

Belka – element zginany – ważne zjawisko utraty stateczności ogólnej – **zwichrzenia**

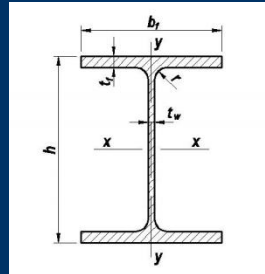
walcowane



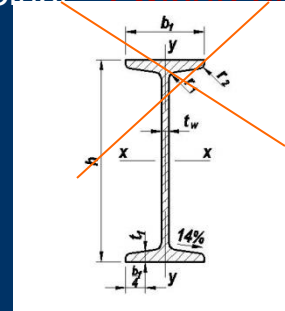
IPE h ($b=h/2$)



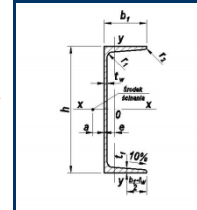
HEA b



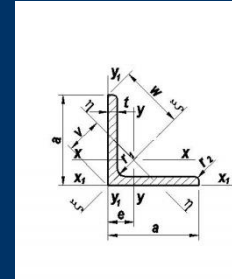
HEB $h(=b)$



IPN h ($b=h/2$)

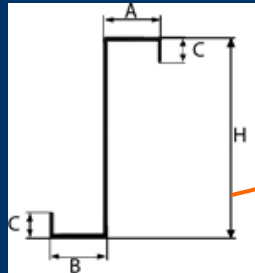


C h

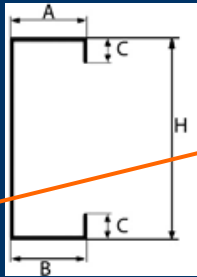


L $a(=b)$

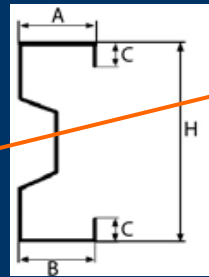
gięte na zimno



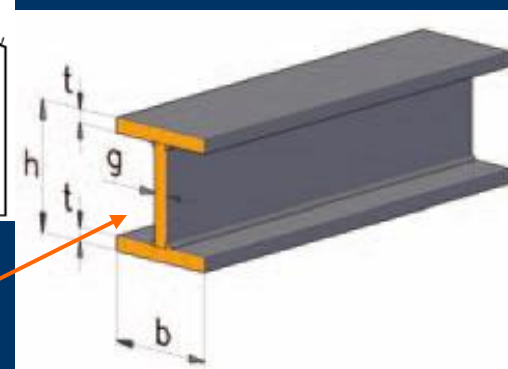
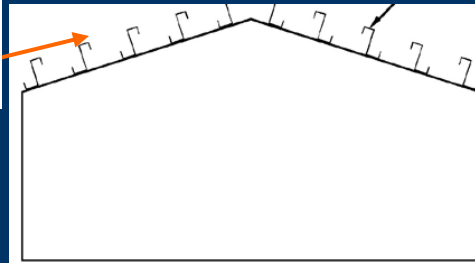
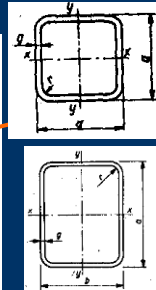
Z h



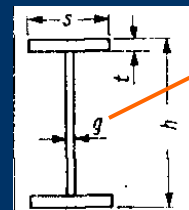
C + h



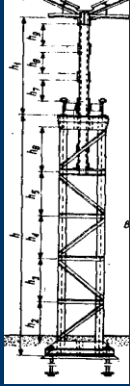
Sigma h



spawane: IKS (belki $b \approx h/2$), HKS

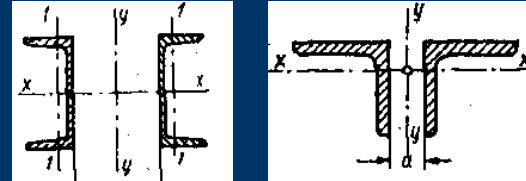


2. Słupy - najczęściej walcowane lub spawane – pręty ściskane



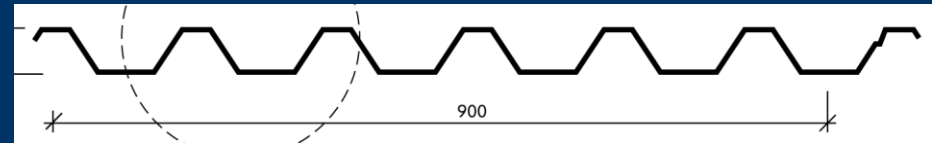
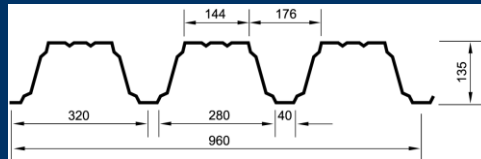
Słup – element ściskany – ważne zjawisko utraty **stateczności ogólnej** – **wyboczenie**

Profile, najczęściej . HEB, HKS lub złożone , np.



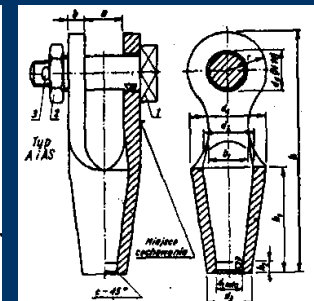
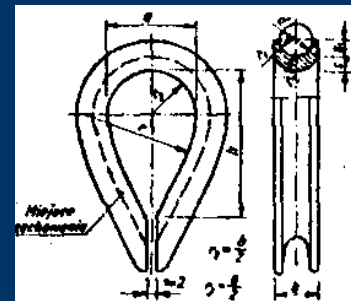
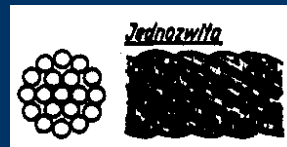
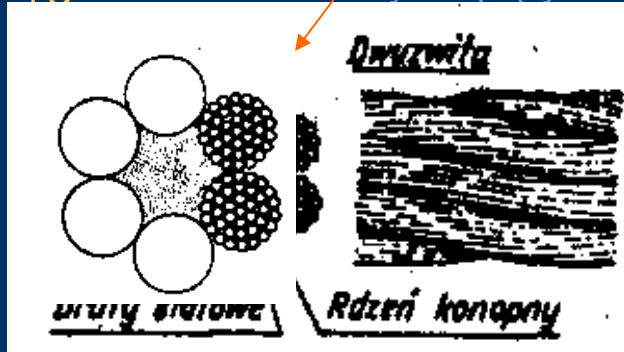
3. Blachy profilowane (np.: dachowe, blacha fałdowa stropowa, ścienne, kasety itd.) – powłoki zginane (i ew. ściskane, rozc)

Wysokość blachy $h =$
ok. 30 do 200 mm x gr
 $t = 0,75$ do 1,25 mm



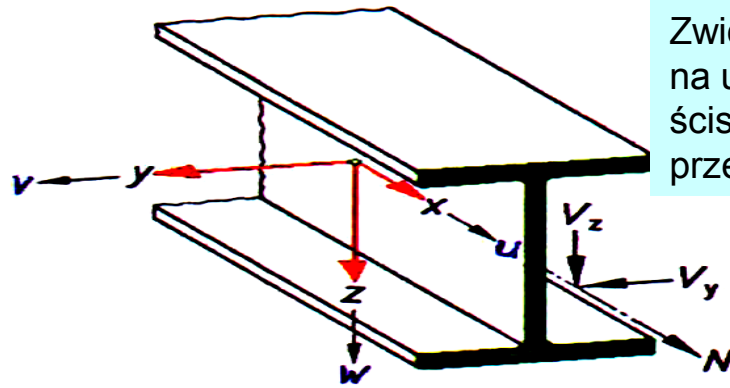
Ścianki płaskie – ściskane lub ścinane – ważne zjawisko utraty **stateczności miejscowej** – **wybrzuszenie**

4. Ciężna i wieszaki - liny lub pręty rozciągane

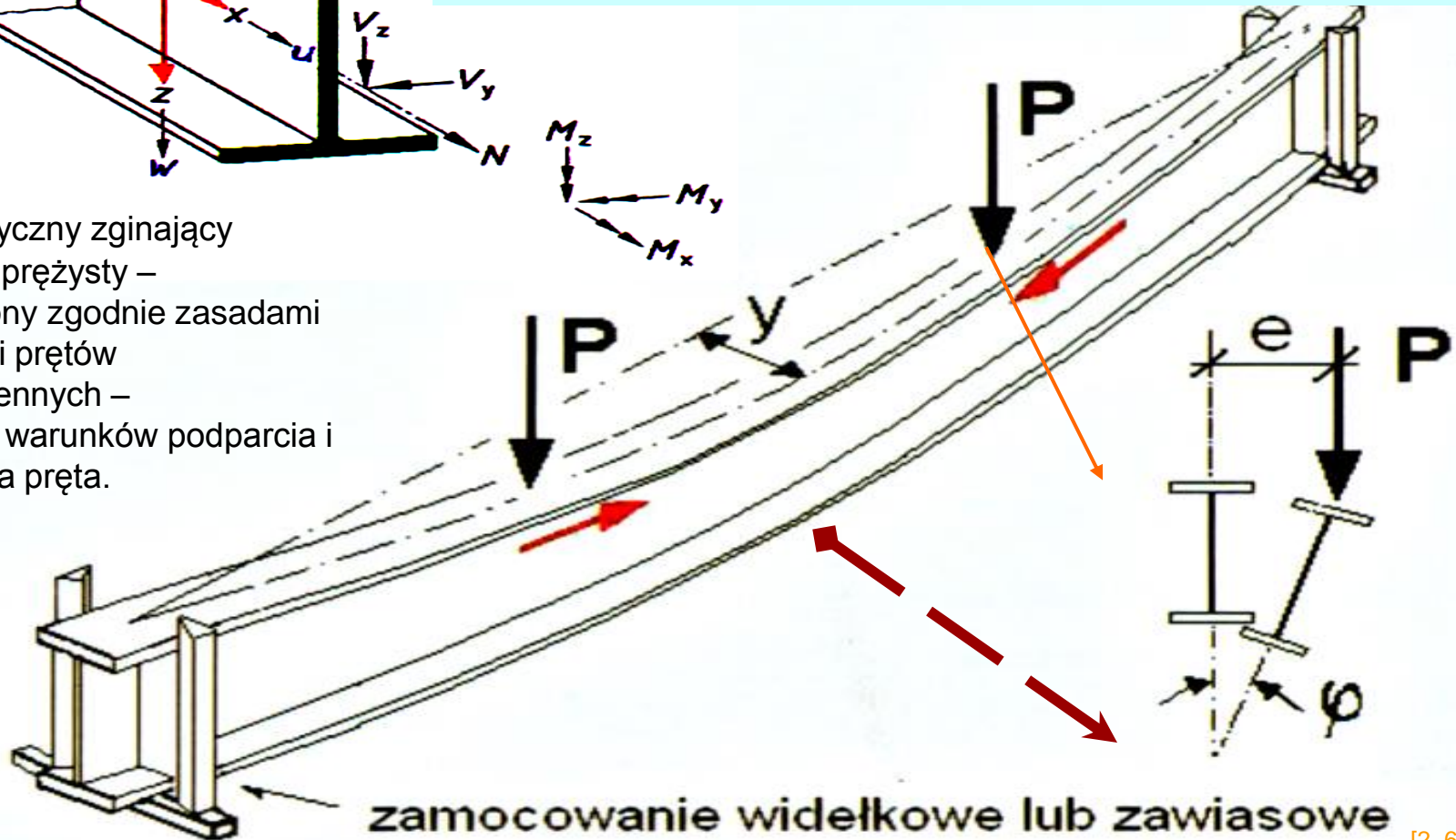


Belki {1}: Pojęcie zwichrzenia belki

Zwichrzenie jest to postać niestateczności ogólnej belki, polegająca na utracie płaskiej postaci zgięcia. Związana z wyboczeniem pasa ściskanego i skręceniem przekroju belki. Następuje po przekroczeniu przez siłę przy $M(=M_y \text{ lub } M_z) > M_{cr}$



M_{cr} – krytyczny zginający moment sprężysty – wyznaczony zgodnie z zasadami mechaniki prętów cienkościennych – zależy od warunków podparcia i obciążenia pręta.



[2. 6]

W aspekcie wytrzymałościowym wyróżniamy **klasy przekroju**, którym odpowiadają **nośności przekroju**:

Klasa 1 – nośność plastyczna M_{pl} (pełne uplastycznienie przekroju- przegub plastyczny),

Klasa 2 - nośność plastyczna M_{pl} (pełne uplastycznienie przekroju- przegub plastyczny o ograniczonej zdolności do obrotu z powodu niestateczności ścianek),

Klasa 3 - nośność sprężysta lub sprężysto-plastyczna M_{el} (nośność ograniczona początkiem uplastycznienia strefy ściskanej – nie osiąga nośności plastycznej)

Klasa 4 - nośność nadkrytyczna, efektywna lub wyboczeniowa M_{eff} (nośność z uwzględnieniem stateczności miejscowej ścianek)

Klasyfikację przekroju dokonuje się na podstawie proporcji geometrycznych przekrojów poprzecznych (półek i średniców) stalowych elementów zginanych i ściskanych.

Podstawowe rodzaje przekrojów elementów stalowych, to:

grubościenne, cienkościenne.

Przekroje kształtowników walcowanych na gorąco zostały tak dobrane, że są one na pewno grubościenne, tj nie są klasy 4. (nie zajdzie utrata stateczności miejscowej ścianek)

Przekroje cienkościenne, mają profile gięte na zimno (z blach) i zwykle są klasy 4

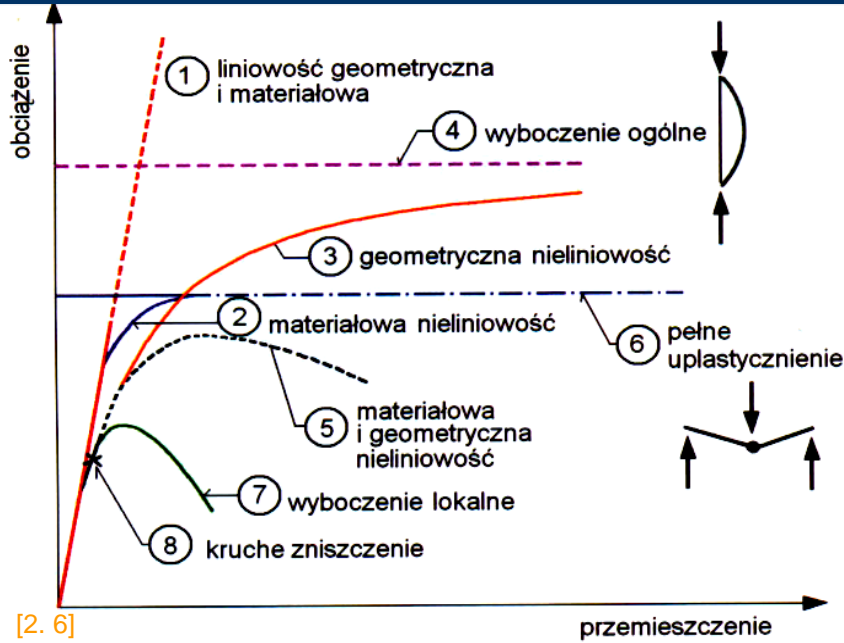
Graniczne smukłości ścianek dla poszczególnych klas przekrojów podano w tab. 5.2. EC3 (PN-EN 1993-1-1).

Analizę plastyczną można prowadzić dla elementów z przekrojami klasy 1, Natomiast analizę sprężystą dla można prowadzić dla elementów z przekrojami wszystkich klas.

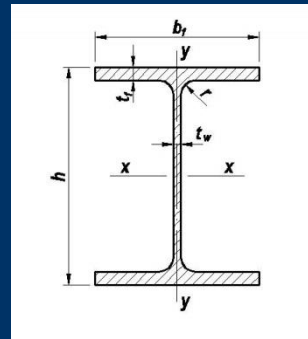
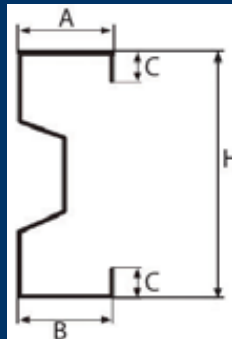
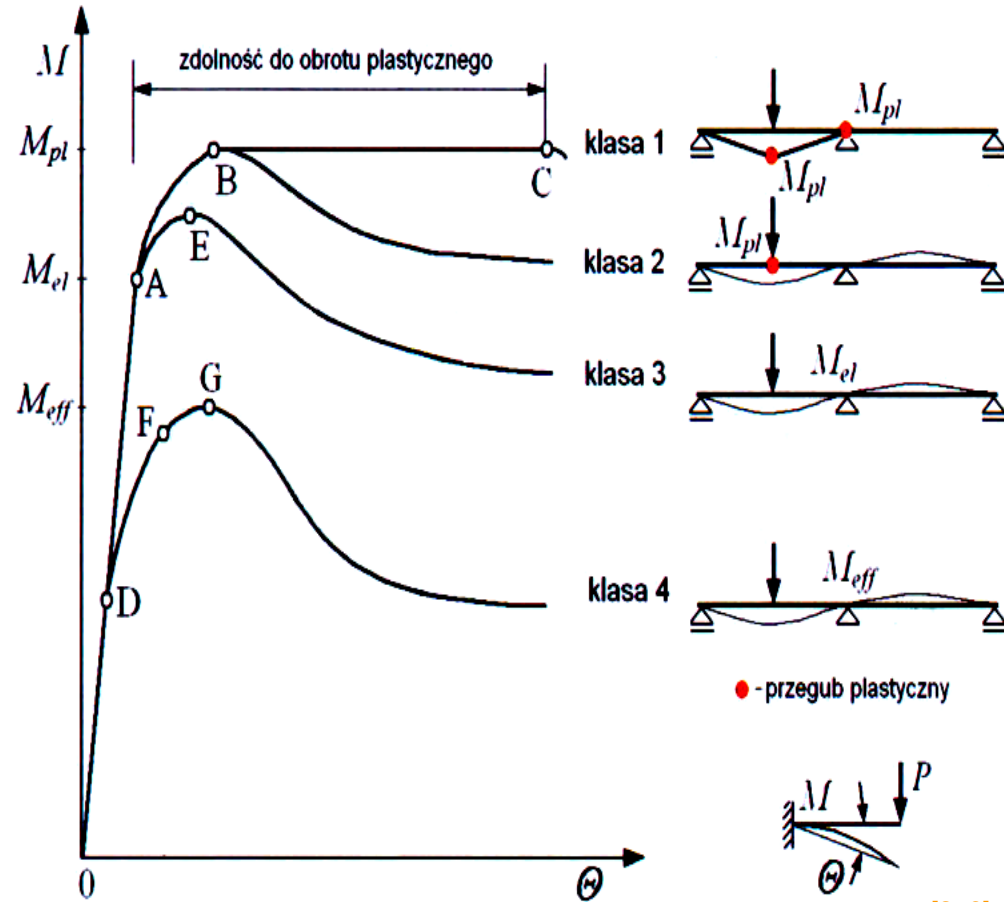
Ponieważ $M_{pl} > M_{el}$, więc zaleca się, by architekci stosowali analizę w zakresie sprężystym, a jeśli ponadto ograniczają się do profili walcowanych tablicowych”, to mogą również nie sprawdzać smukłości ścianek przekroju.

W innych przypadkach należy stosować stosowne procedury EC3 lub zwrócić się do konstruktora.

Belki {3} Klasy przekrojów, a ścieżki równowagi



Rys. 1. Ścieżki równowagi statycznej elementów zginanych klas 1., 2., 3. i 4.



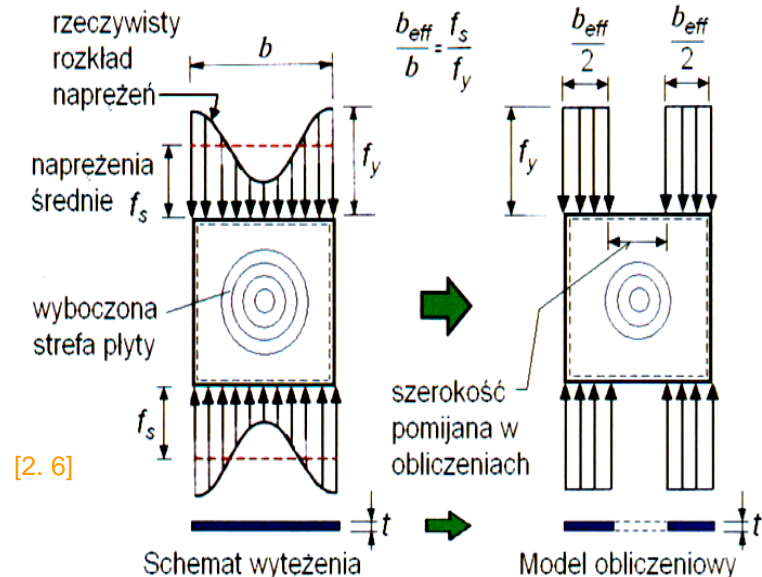
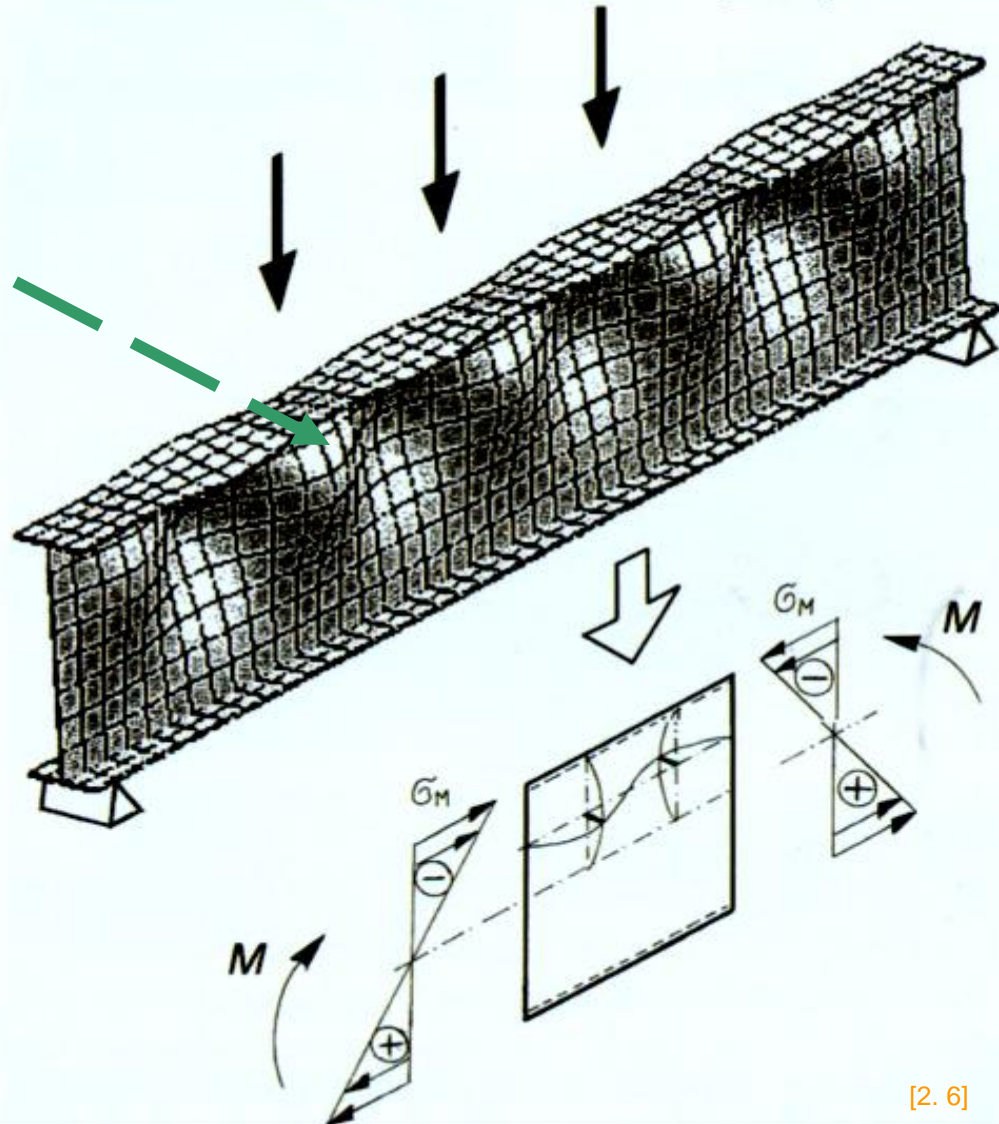
Fazy wyłączenia: OA- sprężyste; BC-plastyczne; DG nadkrytyczne

Belki {4} Pojęcie niestateczności lokalnej belki

Lokalna utrata stateczności belki, to utrata stateczności jej składowej – ścianki zginanej, ściskanej bądź ścinanej, polegająca na lokalnym „wybrzuszeniu” uprzędnio płaskiej płyty → utrata stateczności płyt lub tarcz. Dotyczy przekrojów klasy 4.

Uwzględnienie LUS można zilustrować podejściem nośności nadkrytycznej, tzn przyjmowaniem zastępczej szerokości, współpracującej przekroju ścianki klasy 4

Lokalna utrata stateczności środnika zginanej belki



[2. 6]

Belki {5} Nośność obliczeniowa przekroju , a elementu zginanego

Nośność obliczeniowa przekroju (ogólnie wg EC)

$$R_d = C \cdot \frac{f_k}{\gamma_{Mi}}$$

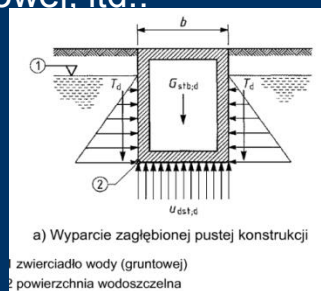
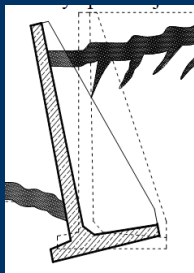
Nośność obliczeniowa elementu (ogólnie wg EC)

$$R_d = a \cdot C \cdot \frac{f_k}{\gamma_{Mi}}$$

Nośność przekroju, mierzona siłą przekrojową, jest szacowana z uwzględnieniem stateczności lokalnej składowych przekroju (stateczności lokalne)-nośność plastyczna, sprężysta, efektywna.

Natomiast nośność elementu uwzględnia również niestateczność globalną, czyli w przypadku belek – zwichrzenie, a w przypadku słupów – wyboczenie.

Można jeszcze wyróżnić nośność konstrukcji, uwzględniające niestateczność globalną konstrukcji, (lub jej części) – np. przeskok węzła układu małowyniosłych prętów w przestrzeni , wypór przez wodę konstrukcji skrzyniowej, itd..



, gdzie $R = [N, M, V] = [\text{siła osiowa, moment zginający, siła poprzeczna}]$

C- sprawcza charakterystyka geometryczna przekroju, np.. $C=A$ (pole przekroju pręta) w przypadku rozciągania ($R=N$) , $C=W$ (wskaźnik zginania pręta) w przypadku zginania ($R=M$),

fk - wytrzymałość charakterystyczna materiału, np. granica plastyczności f_y stali, wytrzymałość na rozciąganie f_u ,

Współczynnik częściowy nośności γ_M (współczynnik materiałowy) zależy od badanego stanu granicznego i wynosi:

$\gamma_{M0}=1,00$ przy ocenie nośności przekroju niezależnie od klasy

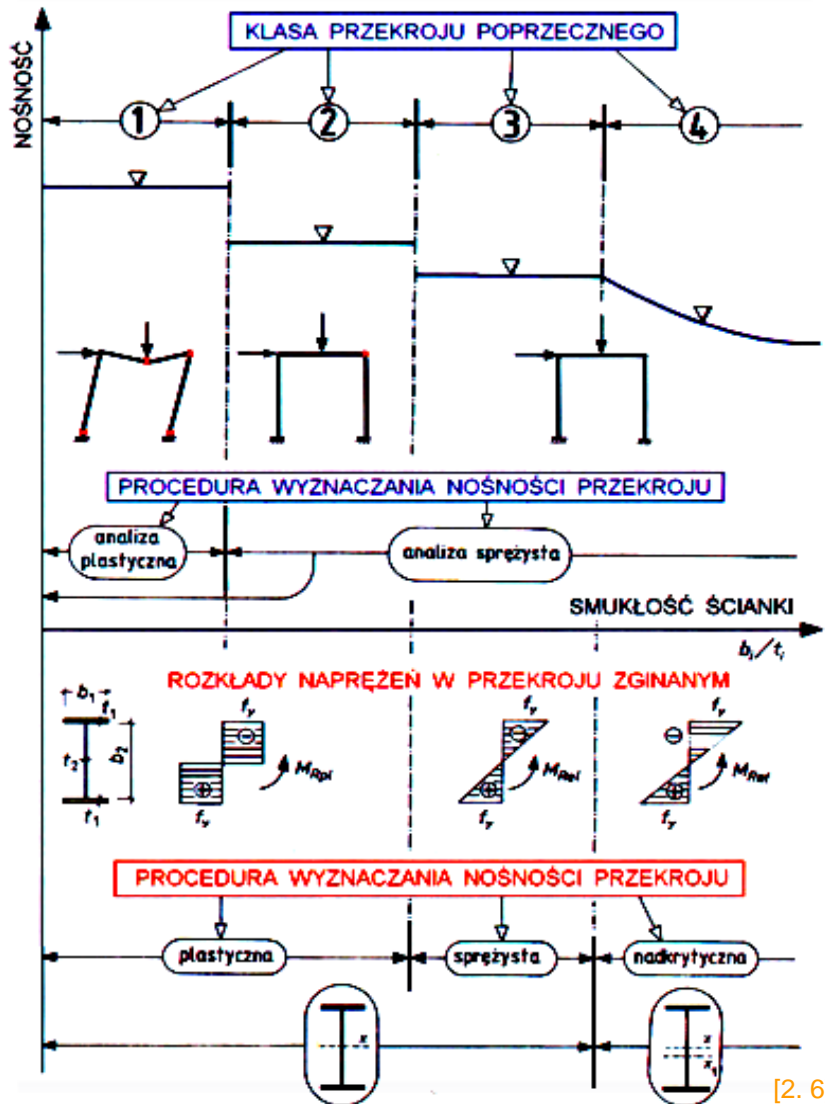
$\gamma_{M1}=1,00$ przy ocenie nośności elementu z uwzględnieniem stateczności

$\gamma_{M2}=1,25$ przy ocenie nośności na rozerwanie przekrojów z otworami

Dla nośności węzłów wg EC3-1-8

a- współczynnik niestateczności ogólnej elementu, np. wyboczeniowy χ , wsp. zwichrzenia χ_{LT}

Belki {6} Procedura wyznaczania nośności przekroju, wytrzymałość materiału



[2. 6]

355 – granica plastyczności N/mm² dla grubości < 16 mm

Stale stopowe drobnoziarniste
N – normalizowana lub walcowana normalizująco,
M – walcowana termomechanicznie
Q – hartowana i odpuszczana,
A – utwardzana wydzieleniowo

S 355 J2 + M

[2. 6]

S – stal konstrukcyjna

Warianty stali:

- niestopowe (podstawowa S235)
- stopowe drobnoziarniste (jakościowe S275, S355) (specjalne S460)

J2 – symbol określający pracę lamania

Warianty

- stale stopowe (**JR** – ud. 27 J przy + 20°C)
- J0** – ud. 27 J przy 0°C)
- J2** – ud. 27 J przy - 20°C)
- stale stopowe drobnoziarniste
- (**N** – ud. 40 J przy - 20°C)
- (**NL** – ud. 27 J przy - 50°C)

W praktyce w konstrukcjach stalowych stosuje się dwa gatunki stali: **S 235** (dawniej St3S) oraz **S355** (dawniej 18G2A)

Uwaga: Stal do zbrojenia betonu oznacza się symbolem **B**, np. B500

Norma i gatunek stali	$f_y = \min R_{eH}$ w przypadku grubości t [mm]		$f_u = \min R_m$ w przypadku grubości t [mm]	
	t ≤ 40	40 < t ≤ 80	t ≤ 40	40 < t ≤ 80
PN-EN10025-2				
S235 JR/J0/J2	235	215	360	360
S275 JR/J0/J2	275	255	430	410
S355 JR/J0/J2/K2	355	335	510	470

Belki {7} Nośność belki

Warunek nośności przekroju zginanego momentem zginającym M_{Ed} →

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

gdzie: W_{pl} – plastyczny wskaźnik zginania przekroju,

Obliczeniowa nośność przekroju jednokierunkowo zginanego $M_{c,Rd}$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$W_{el,min}$ – najmniejszy sprężysty wskaźnik zginania przekroju,

dla przekrojów 1 i 2 klasy (nośność plastyczna)

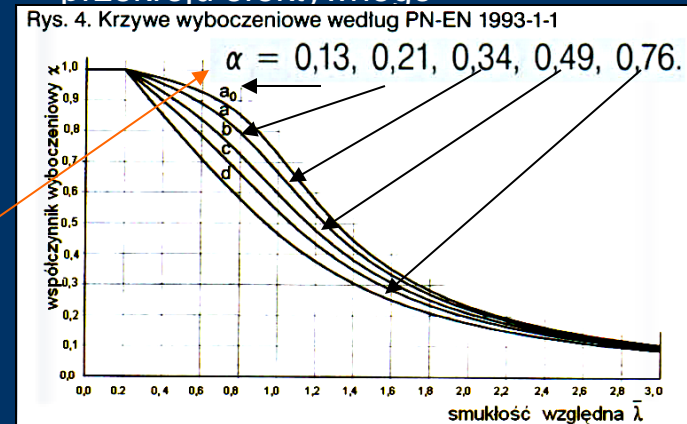
$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}$$

dla przekrojów 3 klasy (nośność sprężysta)

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$W_{eff,min}$ – najmniejszy wskaźnik przekroju efektywnego

Dla przekrojów 4 klasy (nośność efektywna – lub wyboczeniowa (niestateczność miejscowa))



Warunek nośności elementu zginanego

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

Nośność elementu zginanego nie stężonego w kierunku bocznym

M_{cr} – krytyczny moment sprężysty – obliczyć wg zasad mechaniki

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

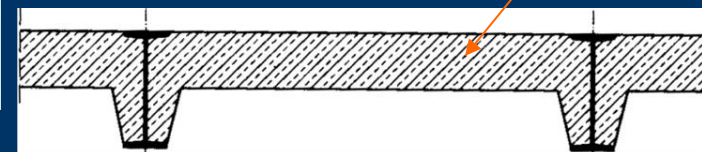
gdzie χ_{LT} -wsp. zwichrzenia,

Jeśli element jest zabezpieczony przed zwichrzeniem, to $\chi_{LT} = 1,00$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ lecz } \chi_{LT} \leq 1,0$$

$W_y = W_{pl,y}$ (1,2), $W_{el,y}$ (3), $W_{eff,y}$ (4)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

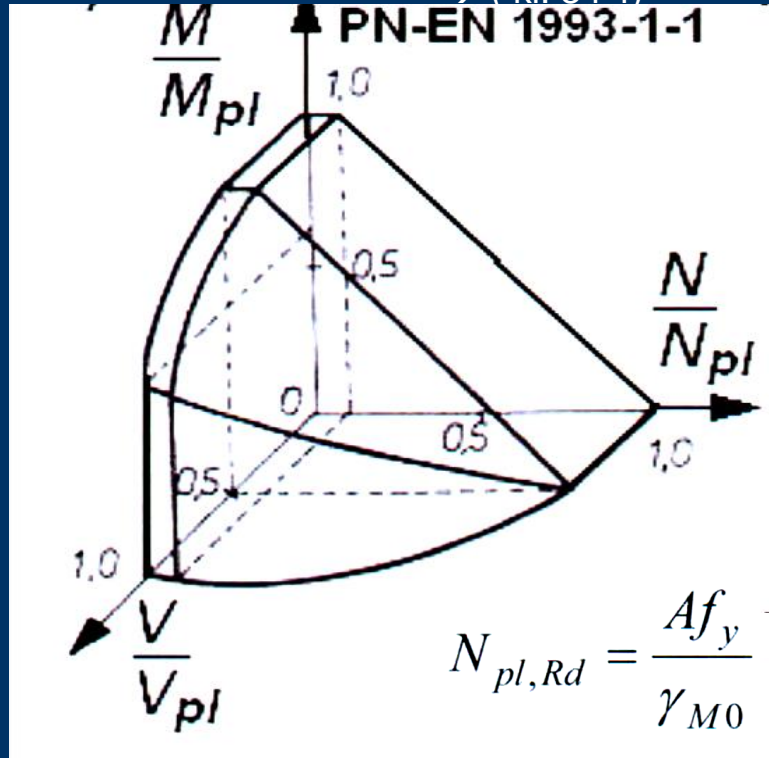


$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

Belki {8} Nośność przekrojów ścinanych i interakcja (M,V,N)

Warunek nośności przekroju ścinanego
siła poprzeczną V_{Ed} → (kl.1 i 2)

→ (kl. 3 i 4)



Powierzchnie interakcji (M,V,N) przekroju dwuteowego

Uwaga: W przypadku interakcji zginania i ścinania i obciążenia siłą skupioną → EC3

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

gdzie: A_v – pole przekroju czynnego środnika

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}$$

gdzie: S – moment statyczny względem osi głównej przekroju części przekroju między punktem, w którym oblicza się naprężenia, a brzegiem przekroju; I moment bezwładności przekroju, t grubość w rozpatrywanym punkcie

W przypadku zginania ze ścinaniem należy brać pod uwagę wpływ siły poprzecznej V_{Ed} na nośność przekroju przy zginaniu.

Można go pominąć, gdy nośność przekroju nie ulega redukcji wskutek wyboczenia przy ścinaniu, a siła poprzeczna nie przekracza 50% nośności plastycznej $V_{pl,Rd}$ przy ścinaniu.

W przeciwnym przypadku przyjmuje się zredukowaną nośność przekroju $M_{y,V,Rd}$ wyznaczoną dla $f_{y,red} = (2 - \rho) f_y$.

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w}}{\gamma_{M0}}, \text{ lecz } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$$

$A_w = h_w \cdot t_w$

---|---| dwuteowników symetrycznych