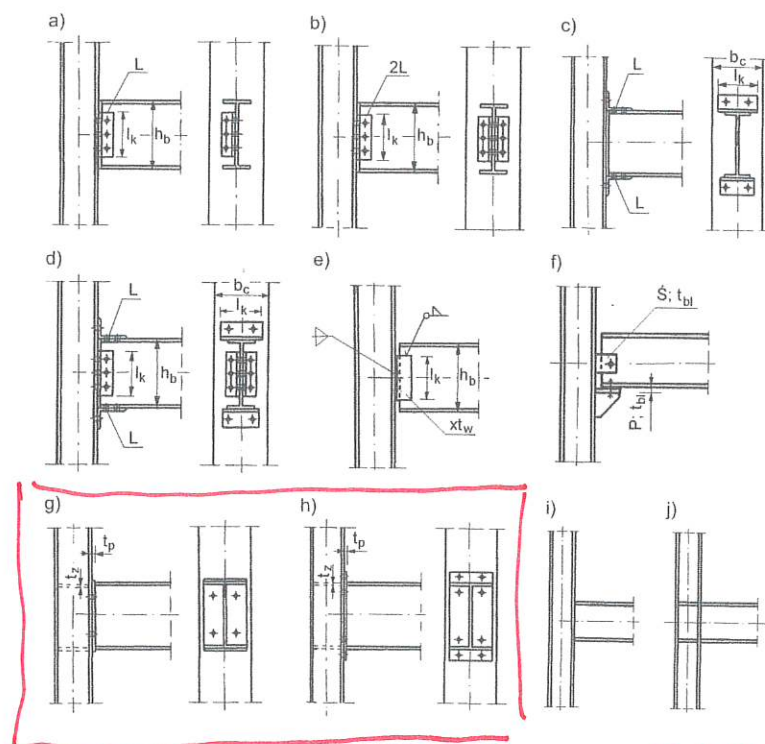


## Algorytm postępowania przy projektowaniu ramy niestężonej z węzłami podatnymi

- przyjąć typ węzła, wg rys. 1 (zalecenie: w ramach niestężonych należy przyjmować węzły raczej "mocne", tzn. z rys. 1 g-j),



Rys. 1. Podatne węzły stalowe

RYS →

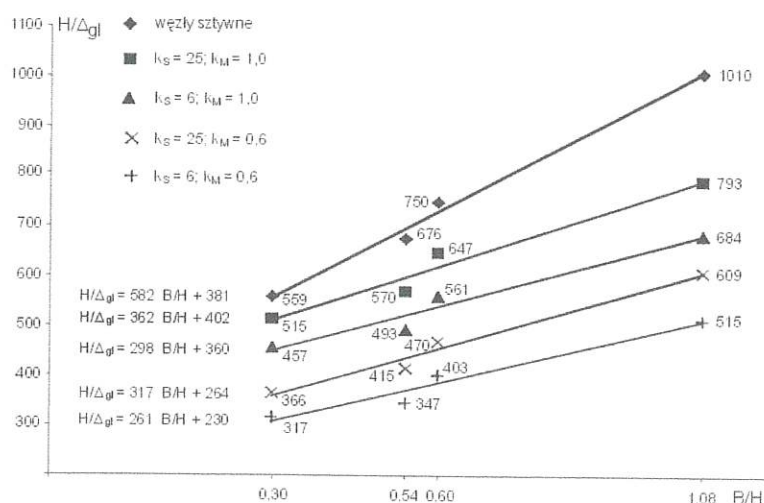
- korzystając z tabl. 1 określić parametry węzła, tzn. wybrać D, S lub G (zalecenie: im wyższa rama tym wyższe parametry węzła), odczytać z tabl. 1 geometryczne cechy węzła:  $t_p$ , liczba śrub itp.

Tabl. 1. Parametry stalowych węzłów podatnych

Lp.	węzły według rys.	Parametry	km	ks
	<b>! Rys. 1</b>			
1	<b>1a</b>	<b>D</b> L 60 x 6, $l_k = 0,5 h_b$ , 3M16	0,03	0,3
		<b>S</b> L 90 x 9, $l_k = 0,65 h_b$ , 4M16	0,1	0,6
		<b>G</b> L 120 x 12, $l_k = 0,8 h_b$ , 5M20	0,16	1,1
2	<b>1b</b>	<b>D</b> 2 L 60 x 6, $l_k = 0,5 h_b$ , 3M16	0,06	0,6
		<b>S</b> 2 L 90 x 9, $l_k = 0,65 h_b$ , 4M16	0,16	1,2
		<b>G</b> 2 L 120 x 12, $l_k = 0,8 h_b$ , 5M20	0,32	2,2
3	<b>1c</b>	<b>D</b> L 80 x 8, $l_k = 0,7 b_c$ , 2M16	0,18	2,3
		<b>S</b> L 120 x 12, $l_k = 0,85 b_c$ , 3M20	0,41	3,8
		<b>G</b> L 150 x 15, $l_k = b_c$ , 4M20	0,57	6,3
4	<b>1d</b>	<b>D</b> P; L 80 x 8, $l_k = 0,7 b_c$ , 2M16 Ś; 2L60 x 6, $l_k = 0,5 h_b$ , 3M16	0,26	3,3

		<b>S</b>	P; L120 x 12, l <sub>k</sub> = 0,8b <sub>c</sub> , 3M20 Ś; 2L90 x 9, l <sub>k</sub> = 0,6h <sub>b</sub> , 4M20	0,45	5,7
		<b>G</b>	P; L150 x 15, l <sub>k</sub> = b <sub>c</sub> , 4M20 Ś; 2L120 x 12, l <sub>k</sub> = 0,8h <sub>b</sub> , 5M20	0,65	8,7
		<b>D</b>	t <sub>w</sub> = 8 mm, h <sub>w</sub> = 0,5 h <sub>b</sub>	0,05	0,7
5	2e	<b>S</b>	t <sub>w</sub> = 12 mm, h <sub>w</sub> = 0,65 h <sub>b</sub>	0,12	1,38
		<b>G</b>	t <sub>w</sub> = 16 mm, h <sub>w</sub> = 0,8 h <sub>b</sub>	0,25	2,75
		<b>D</b>	P; t <sub>bl</sub> = 8 mm, 2M16 Ś; t <sub>bl</sub> = 6 mm, 2M16	0,11	1,0
6	2f	<b>S</b>	P; t <sub>bl</sub> = 10 mm, 4M16 Ś; t <sub>bl</sub> = 9 mm, 3M16	0,28	1,9
		<b>G</b>	P; t <sub>bl</sub> = 12 mm, 4M20 Ś; t <sub>bl</sub> = 12 mm, 4M20	0,37	2,75
7	2g nieuźebrowane	<b>D</b>	t <sub>p</sub> = 15 mm, 4M16	0,43	6,3
		<b>S</b>	t <sub>p</sub> = 20 mm, 6M20	0,55	9,9
		<b>G</b>	t <sub>p</sub> = 24 mm, 6M4	0,67	12,8
8	2g uźebrowane	<b>D</b>	t <sub>p</sub> = 15 mm, 4M16, t <sub>z</sub> = 15mm	0,51	7,8
		<b>S</b>	t <sub>p</sub> = 20 mm, 6M20, t <sub>z</sub> = 15mm	0,65	15,5
		<b>G</b>	t <sub>p</sub> = 24 mm, 6M24, t <sub>z</sub> = 15mm	0,76	22,2
9	2h nieuźebrowane	<b>D</b>	t <sub>p</sub> = 15 mm, 6M16	0,6	10,5
		<b>S</b>	t <sub>p</sub> = 20 mm, 8M20	0,83	17,9
		<b>G</b>	t <sub>p</sub> = 24 mm, 8M24	0,95	21,4
10	2h uźebrowane	<b>D</b>	t <sub>p</sub> = 15 mm, 6M16, t <sub>z</sub> = 15mm	0,73	20,0
		<b>S</b>	t <sub>p</sub> = 20 mm, 8M20, t <sub>z</sub> = 15mm	1,23	33,5
		<b>G</b>	t <sub>p</sub> = 24 mm, 8M24, t <sub>z</sub> = 15mm	1,5	49,2
11	2i	<b>D</b>	h <sub>c</sub> < 300 mm	0,75	21,5
		<b>G</b>	h <sub>c</sub> ≥ 300 mm	0,9	22,3
12	2j		t <sub>z</sub> = 20 mm	1,23	∞

- sprawdzić wstępnie przechył ramy, według rys. 2



Rys. 2

- z tabl.2; dla liczby kondygnacji n<sub>s</sub> stosunku B/H i wybranego typu węzła odczytać wartości sił wewnętrznych do wstępnego zwymiarowania belek i słupów,

Tablica 2. Wartości sił wewnętrznych do wstępnego wymiarowania przekrojów prętów ram niestężonych

Rama	Węzły według tabl. 1	Rygle		Słupy	
		$M_p = \alpha_p \cdot M_0$	$M_w = \alpha_w \cdot M_0$	$M_s$	$N$
		$\alpha_p$	$\alpha_w$	$[\cdot M_0]$	
$n_s = 2$  $\frac{B}{H} = 1,5 - 3,0$		0,77	0,3	0,1	$n_k q L_b$
		0,76	0,39	0,1	$n_k q L_b$
		0,71	0,46	0,1	$n_k q L_b$
	4G	0,69	0,52	0,1	$n_k q L_b$
	7G 8S 9D	0,65	0,57	0,1	$n_k q L_b$
	10D	0,61	0,66	0,1	$n_k q L_b$
	8G 9S 11D	0,57	0,71	0,1	$n_k q L_b$
	9G 11G	0,56	0,72	0,1	$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,48	0,82	0,1	$n_k q L_b$
$n_s = 6$ $\frac{B}{H} = 0,5$	9S	0,53	0,84	górne: 0,16 dolne: 0,4	$n_k q L_b$
	9G 11G	0,5	0,92		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,41	1,1		$n_k q L_b$
$n_s = 6$  $\frac{B}{H} = 1,1$	4G	0,62	0,44	górne: 0,12 dolne 0,29	$n_k q L_b$
	↗ 7G 9D ↘	↗ 0,52 ↘	0,67		$n_k q L_b$
	8S	0,51	0,71		$n_k q L_b$
	8G	0,5	0,72		$n_k q L_b$
	9S 10D	0,49	0,74		$n_k q L_b$
	11G	0,48	0,77		$n_k q L_b$
	↗ 9G ↘	↗ 0,46 ↘	0,8		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,44	0,92		$n_k q L_b$
$n_s = 11$ $\frac{B}{H} = 0,3$	10S 10G 12	0,32	1,75	**	$n_k q L_b$
$n_s = 11$  $\frac{B}{H} = 0,6$	10D	0,55	0,89	górne: 0,12 śr. górne: 0,29 śr. dolne: 0,42 dolne: 0,6	$n_k q L_b$
	9S	0,53	0,95		$n_k q L_b$
	11G	0,5	1,05		$n_k q L_b$
	9G	0,48	1,1		$n_k q L_b$
	10S 10G 12	0,34	1,22		$n_k q L_b$

$M_0 = 0,125 p L^2$  moment w rygla obliczony jak dla belki wolnopodpartej

$M_p$  – moment przęsłowy,

$M_w$  – moment przywęzłowy,

$M_s$  – moment w słupie,

$E$  – moduł Younga stali,

$I_b$  – moment bezwładności belki stalowej,

$L$  – rozpiętość belki stalowej,

$n_k$  – liczba kondygnacji obciążających słup,

$p$  – łączne obciążenie rygla,

\*  $a = 1,1$  dla górnych kondygnacji,

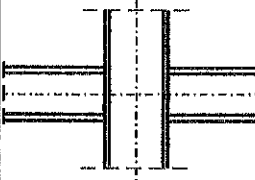

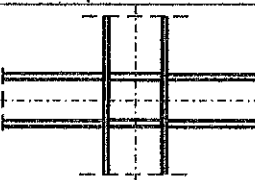
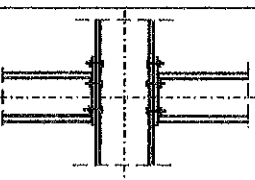
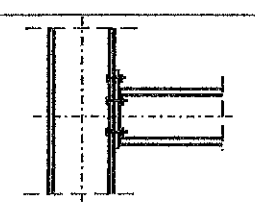
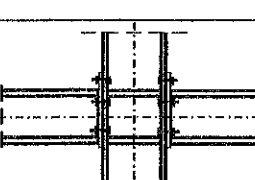
= 1,2 dla dolnych kondygnacji,

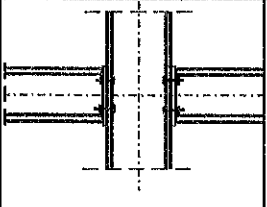
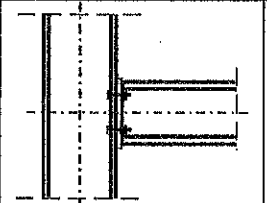
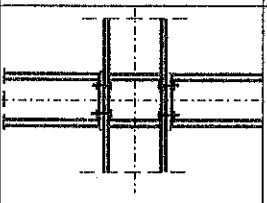
\*\* słupy górne: 0,16, słupy środkowe górne: 0,37, słupy środkowe dolne:

0,67, słupy dolne: 1,1.

- określić nośność i sztywność węzłów; dla węzłów doczołowych wg tabl. 3

Tablica 3. Wzory do obliczania nośności i sztywności początkowej węzłów stalowych

Rysunek	Rodzaj węzła	Wzory do obliczania:	
		$M_{j,Rd}$ [kN·m]	$S_{j,ini}$ [kN·m/rad]
	Połączenie spawane dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 8,2 \cdot 10^{-7} h_c^{0,9} h_b^{2,3} + 20$	$S_{j,ini} = 0,39 h_c^{-0,06} h_b^{2,2} + 2293$
	Połączenie spawane jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 6,5 \cdot 10^{-7} h_c^{1,2} h_b^{2,04} + 18$	$S_{j,ini} = 0,0251 h_c^{0,82} h_b^{1,7} + 2765$
	Połączenie spawane uzebrowane	$M_{Rd} = 2,5 \cdot 10^{-4} h_b^{2,3} - 12$	$S_{j,ini} = \infty$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 4,8 \cdot 10^{-4} h_c^{0,24} h_b^{1,31} t_p^{0,32} d^{0,9} - 21$	$S_{j,ini} = 0,44 h_c^{-0,22} h_b^{2,10} t_p^{0,5} d^{-0,1} - 4896$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 7,4 \cdot 10^{-5} h_c^{0,62} h_b^{1,2} t_p^{0,4} d^{0,85}$	$S_{j,ini} = 1,5 h_c^{0,44} h_b^{1,2} t_p^{0,35} d^{0,005} - 19211$
	Połączenie śrubowe z blachą wystającą uzebrowane	$M_{Rd} = 5 \cdot 10^{-5} h_c^{0,16} h_b^{1,6} t_p^{0,36} d^{1,1}$	$S_{j,ini} = 0,0563 h_c^{-0,54} h_b^{2,49} t_p^{0,99} d^{0,09} + 12714$

	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną dwustronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 1,4 \cdot 10^{-5} h_c^{0,09} h_b^{1,7} t_p^{0,63} d^{1,1} + 7$	$S_{j,ini} = 0,13 h_c^{-0,32} h_b^{2,3} t_p^{0,51} d^{-0,13} - 6261$
	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną jednostronne nieuzębrowane	$M_{Rd} = 4,6 \cdot 10^{-5} h_c^{0,35} h_b^{1,5} t_p^{0,49} d^{0,81}$	$S_{j,ini} = 0,012 h_c^{-0,38} h_b^{2,6} t_p^{0,6} d^{-0,03} + 1074$
	Połączenie śrubowe z blachą wpuszczoną uzębrowane	$M_{Rd} = 3,4 \cdot 10^{-5} h_c^{-0,05} h_b^{1,77} t_p^{0,63} d^0$	$S_{j,ini} = 0,0355 h_c^{-0,4} h_b^{2,5} t_p^{0,75} d^{0,4} - 5377$

Lub według tablicy 4

Tablica 4. Zestawienie wzorów do szacowania nośności przy zginaniu i sztywności węzłów

Typ węzła	Gatunek stali	Nośność $M_{j,Rd}$	Sztywność początkowa $S_{j,ini}$
Skrajny (zewnątrzny), z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 1,2h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{68}$
	S355	$(3,4h_2 + 2,1h_3)t^2 f_y$	
Dwustronny (wewnętrzny) z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 3,7h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{39}$
	S355	$(3,4h_2 + 3,2h_3)t^2 f_y$	
Skrajny (zewnątrzny) z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 2,9h_2)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t_k}{40}$
	S355		
Dwustronny (wewnętrzny) z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 4,3h_2 + 1,1h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{18}$
	S355	$(2,6h_1 + 3,4h_2 + 2,0h_3)t^2 f_y$	
Stryk belek, z blachą wpuszczoną	S235	$(4,3h_2 + 3,7h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{23}$
	S355	$(3,4h_2 + 3,2h_3)t^2 f_y$	

Styk belek, z blachą wystającą	S235	$(2,6h_1 + 4,3h_2 + 1,1h_3)t^2 f_y$	$\frac{h_b^2 t}{11}$
	S355	$(2,6h_1 + 3,4h_2 + 2,0h_3)t^2 f_y$	

Uwagi:  $h_1, h_2, h_3$  – odpowiednio odległości od śrub szeregu zewnętrznego (nad pasem), pod pasem i kolejnego do środka ściskania.

$t = \min(t_p, t_r)$ .

Nośność przy zginaniu obliczana jest w jednostkach stosownych do jednostek podstawianych do wzoru wielkości, zaś sztywność węzłów obliczana jest w [kN-m/rad], pod warunkiem wstawienia wartości wejściowych do wzoru w [mm].

- sprawdzić, czy przy założonych sztywnościach węzłów spełniony jest SGU:

Przesuw ramy jest zależny od sztywności słupów, rygli oraz podatności węzłów. Łączny przesuw kondygnacji ramy o węzłach półsztywnych wynosi:

$$\Delta_k = \frac{V h_k^2}{12E} \left( \frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12E}{\sum S_{j,s}} \right),$$

gdzie:

$$S_c = \sum \frac{I_c}{h_k}; \quad S_b = \sum \frac{I_a}{l_b}; \quad ,$$

- modelowanie węzłów:

- model liniowy:  $S_{j,s} = S_{j,ini} / 2$  (PN-EN 1993-1-8), lub
- model nieliniowy:

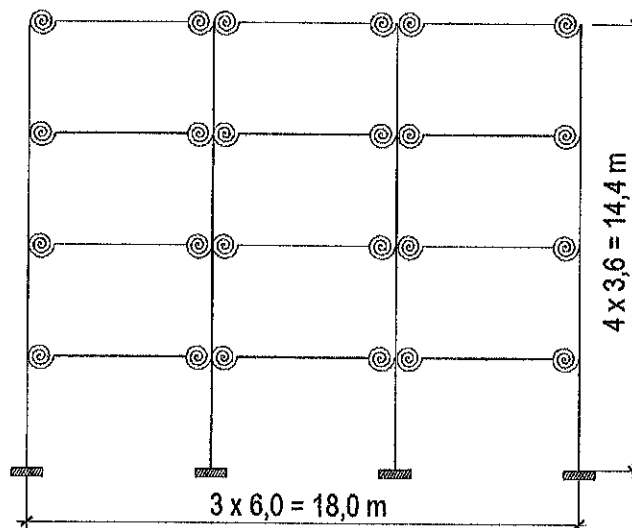
wzór Chena:

$$M = \frac{S_{j,ini} \Phi}{\left\{ 1 + \left( \frac{S_{j,ini} \Phi}{M_{j,Rd}} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}}$$

należy obliczyć wartości  $M$  dla założonych  $\Phi$ .

- obliczenia statyczne z uwzględnieniem węzłów podatnych

## 1. Schemat analizowanej ramy



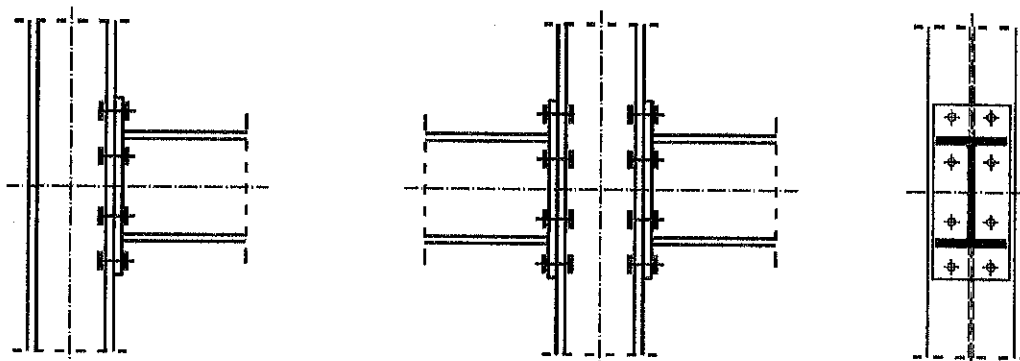
Rys. 3. Schemat statyczny poprzecznego układu nośnego z węzłami podatnymi

Rozpiętość rygla:  $L = 6,0\text{ m}$ ,

Wysokość kondygnacji:  $h_k = 3,6\text{ m}$ ,

Rozstaw układów nośnych:  $a = 6,0\text{ m}$ .

## Wstępne przyjęcie węzłów



Rys. 4. Połączenia śrubowe z blachą wystającą, z czterema rzędami śrub M 20

Zastosowano połączenia śrubowe z blachą wystającą, nieuźebrowane, wg tab. 1, wiersz 9 S:

→ grubość blachy czołowej:  $t_p = 20\text{ mm}$ ,  
 → średnica i liczba śrub: 8 M 20.

## 2. Oddziaływania oraz kombinacje obciążeń

Zestawienia obciążeń dokonano w przykładzie P2.

## 3. Projektowanie wstępne

## 3.1 Przyjęcie przekroju rygli pośrednich R1

Obciążenie obliczeniowe rygli:

$$p_1 = 1,35 \cdot 31,62 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 16,8 = 60,33\text{ kN/m.}$$

$$p_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 31,62 + 1,5 \cdot 16,8 = 61,48\text{ kN/m.}$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie  $p_2$ .

\* \* \*

Wyznaczenie wartości sił przekrojowych w ryglu, wg tab. 2.

Wyznaczenie wartości współczynników  $\alpha_p$  oraz  $\alpha_w$  dla węzła 9 S (wartość oszacowano):

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha_p = \frac{0,57 + 0,49}{2} = 0,53, \quad \alpha_w = \frac{0,71 + 0,74}{2} = 0,73.$$

Wartości momentów zginających w przęśle oraz w węźle wynoszą odpowiednio:

$$M_{p,Ed} = \alpha_p \cdot M_{Ed}^0 = 0,53 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 146,63 \text{ kNm},$$

$$M_{w,Ed} = \alpha_w \cdot M_{Ed}^0 = 0,73 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 201,96 \text{ kNm}, \text{ zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{w,Ed}}{f_y} = \frac{201,96 \cdot 10^6}{235} = 859,47 \text{ cm}^3,$$

Przyjęto dwuteownik IPE 360:  $W_y = 904 \text{ cm}^3$ ,  $I_y = 16270 \text{ cm}^4$ .

Wyteżenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{201,96 \cdot 10^6}{235 \cdot 904 \cdot 10^3} = 0,951 \leq 1,0.$$

### 3.2 Przyjęcie przekroju rygli dachowych R2

Obciążenie obliczeniowe rygli:

$$p_1 = 1,35 \cdot 26,04 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 5,76 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,90 = 40,28 \text{ kN/m}.$$

$$p_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 26,04 + 1,5 \cdot 5,76 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,90 = 39,33 \text{ kN/m}.$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie  $p_1$ .

Wyznaczenie wartości współczynników  $\alpha_p$  oraz  $\alpha_w$  dla węzła 9 S (wartość oszacowano):

$$\frac{B}{H} = \frac{18,0}{14,4} = 1,25 \rightarrow \alpha_p = \frac{0,57 + 0,49}{2} = 0,53, \quad \alpha_w = \frac{0,71 + 0,74}{2} = 0,73.$$

Wartości momentów zginających w przęśle oraz w węźle wynoszą odpowiednio:

$$M_{p,Ed} = \alpha_p \cdot M_{Ed}^0 = 0,53 \cdot \frac{40,28 \cdot 6,0^2}{8} = 96,08 \text{ kNm},$$

$$M_{w,Ed} = \alpha_w \cdot M_{Ed}^0 = 0,73 \cdot \frac{40,28 \cdot 6,0^2}{8} = 132,33 \text{ kNm}, \text{ zatem:}$$

$$W_y \geq \frac{M_{w,Ed}}{f_y} = \frac{132,33 \cdot 10^6}{235} = 563,12 \text{ cm}^3,$$

Przyjęto dwuteownik IPE 300:  $W_y = 557 \text{ cm}^3$ ,  $I_y = 8360 \text{ cm}^4$ .

Wyteżenie przekroju:

$$\frac{M_{Ed}}{W_y \cdot f_y} = \frac{132,33 \cdot 10^6}{235 \cdot 557 \cdot 10^3} \approx 1,0.$$

### 3.3 Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego najniższej kondygnacji S1

Założono zmianę przekrojów słupów co dwie kondygnacje.

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny najniższej kondygnacji

$$\rightarrow \text{stała } G = (3 \cdot g_{r,k1} + g_{r,k2}) \cdot L = (3 \cdot 31,62 + 26,04) \cdot 6,0 = 725,4 \text{ kN},$$

→ zmienne użytkowe  $Q = 3 \cdot q_{r,k} \cdot L = 3 \cdot 16,8 \cdot 6,0 = 302,4 \text{ kN}$ ,

→ obciążenie śniegiem  $S = s_k \cdot L = 5,76 \cdot 6,0 = 34,56 \text{ kN}$ ,

→ parcie wiatru  $W = w_{lk} \cdot L = 0,90 \cdot 6,0 = 5,4 \text{ kN}$ .

\* \* \*

Obciążenie obliczeniowe słupa S<sub>1</sub>:

$$P_1 = 1,35 \cdot 725,4 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 302,4 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 1327,59 \text{ kN},$$

$$P_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 725,4 + 1,5 \cdot 302,4 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 1316,78 \text{ kN},$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie P<sub>1</sub>.

\* \* \*

Wartość momentu zginającego panującego w przekroju słupa najniższej kondygnacji, S<sub>1</sub>:

→ przyjęto współczynnik jak dla budynku sześciokondygnacyjnego:

$$M_{y,Ed} = 0,29 \cdot M_{Ed}^0 = 0,29 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 78,73 \text{ kNm}.$$

\* \* \*

Komentarz:

*Analiza współczynnika wyboczeniowego słupów ram przechyłowych niestężonych prowadzi do wniosku, że jego wartość waha się w przedziale  $\chi = (0,5 \div 0,8)$ .*

*Ponadto słup jest elementem ściskanym mimośrodowo i powinien spełnić wymagania dane wzorami (6.61) i (6.62) normy PN-EN 1993-1-1.*

Wstępne przyjęcie przekroju słupa z zależności:

$$A_{s1} \geq \frac{N_{c,Ed}}{\chi \cdot f_y} = \frac{1327,59 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 235} = 86,91 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 = 86,91 \text{ cm}^2, \text{ stąd przyjęto}$$

dwuteownik HEB 220:  $A = 91 \text{ cm}^2$ ,  $I_y = 8090 \text{ cm}^4$ ,  $i_y = 9,43 \text{ cm}$ ,  $i_z = 5,59 \text{ cm}$ .

### 3.4 Przyjęcie przekroju słupa wewnętrznego na trzeciej kondygnacji S<sub>2</sub>

Obciążenie przypadające na słup wewnętrzny trzeciej kondygnacji

→ stałe  $G = (g_{k1} + g_{k2}) \cdot L = (31,62 + 26,04) \cdot 6,0 = 345,96 \text{ kN}$ ,

→ zmienne użytkowe  $Q = q_k \cdot L = 16,8 \cdot 6,0 = 100,8 \text{ kN}$ ,

→ obciążenie śniegiem  $S = s_k \cdot L = 5,76 \cdot 6,0 = 34,56 \text{ kN}$ ,

→ parcie wiatru  $W = w_{lk} \cdot L = 0,90 \cdot 6,0 = 5,4 \text{ kN}$ .

\* \* \*

Obciążenie obliczeniowe słupa S<sub>2</sub>:

$$P_1 = 1,35 \cdot 345,96 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 100,8 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 603,67 \text{ kN},$$

$$P_2 = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 345,96 + 1,5 \cdot 100,8 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 34,56 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 5,4 = 578,97 \text{ kN}.$$

Jako bardziej niekorzystne przyjmuje się obciążenie P<sub>1</sub>.

\* \* \*

Wartość momentu zginającego panującego w przekroju słupa na trzeciej kondygnacji, S<sub>2</sub>:

→ przyjęto współczynnik jak dla budynku sześciokondygnacyjnego:

$$M_{y,Ed} = 0,12 \cdot M_{Ed}^0 = 0,12 \cdot \frac{61,48 \cdot 6,0^2}{8} = 32,58 \text{ kNm}.$$

\* \* \*

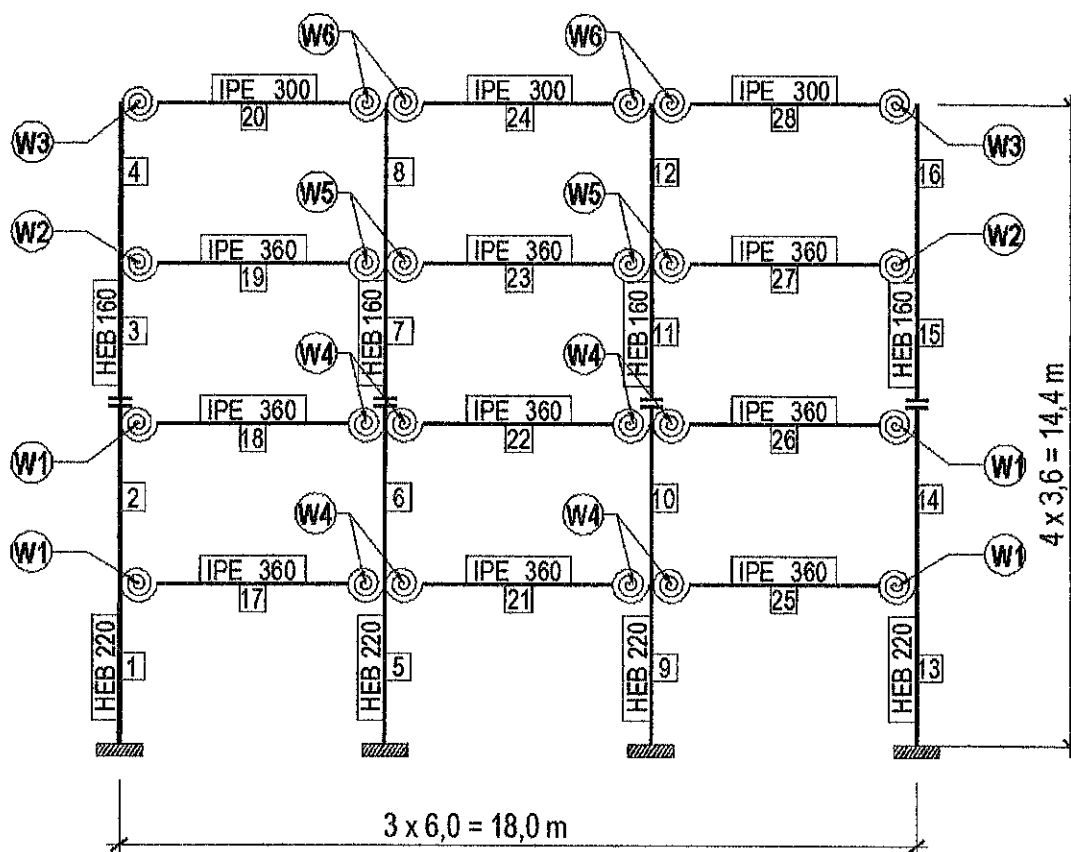
Założono współczynnik wyboczeniowy  $\chi=0,65$ .

Wstępne przyjęcie przekroju słupa z zależności:

$$A_{s2} \geq \frac{N_{c,Ed}}{\chi \cdot f_y} = \frac{603,67 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 235} = 39,52 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 = 39,52 \text{ cm}^2, \text{ stąd przyjęto}$$

dwuteownik HEB 160:  $A = 54,3 \text{ cm}^2$ ,  $I_y = 2492 \text{ cm}^4$ ,  $i_y = 6,8 \text{ cm}$ ,  $i_z = 4,05 \text{ cm}$ .

#### 4. Określenie sztywności i nośności początkowych węzłów



Rys. 3. Schemat ramy wraz z oznaczeniem prętów, kształtowników oraz węzłów podatnych

#### Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W1 (według tablicy 3)

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 220, rygiel IPE 360, blacha czołowa  $t_p = 20 \text{ mm}$ , 8 śrub M 20,

$$\begin{aligned} M_{j,Rd,1} &= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} = \\ &= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 220^{0,62} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 114,0 \text{ kNm}, \end{aligned}$$

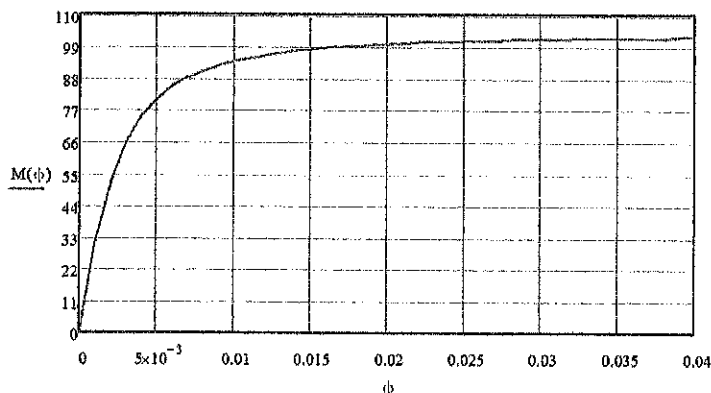
$$\begin{aligned} S_{j,ini,1} &= 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 = \\ &= 1,5 \cdot 220^{0,44} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 35263 \text{ kNm/rad}. \end{aligned}$$

$$k_{M,1} = \frac{M_{j,Rd,1}}{M_{b,Rd}} = \frac{114,0}{212,4} = 0,49, \quad k_{s,1} = \frac{S_{j,ini,1}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{35263 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 6,2.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:

$$M_1(\phi) = \frac{S_{j,ini,1} \cdot \phi}{\left\{ 1 + \left( \frac{S_{j,ini,1} \cdot \phi}{M_{j,Rd,1}} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}}, \text{ gdzie } n = 1,5.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



#### Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W2

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 360, blacha czołowa  $t_p = 20$  mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,2} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} =$$

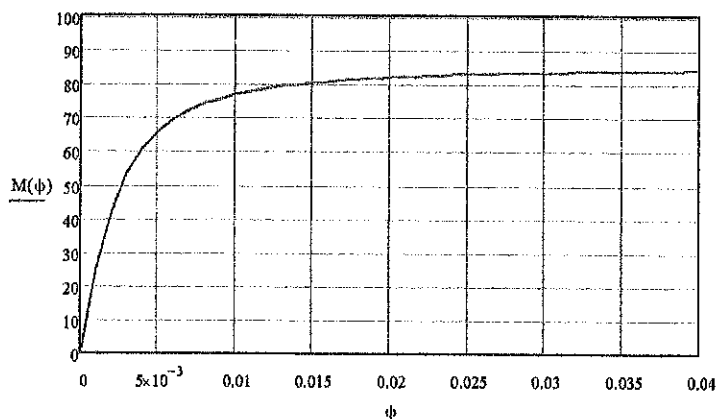
$$= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 160^{0,62} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 85,0 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,2} = 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 =$$

$$= 1,5 \cdot 160^{0,44} \cdot 360^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 28140 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,2} = \frac{M_{j,Rd,2}}{M_{b,Rd}} = \frac{85,0}{212,4} = 0,4, \quad k_{s,2} = \frac{S_{j,ini,2}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{28140 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 4,9.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



#### Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W3

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, jednostronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 300, blacha czołowa  $t_p = 20$  mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,3} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot h_c^{0,62} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,4} \cdot d^{0,85} =$$

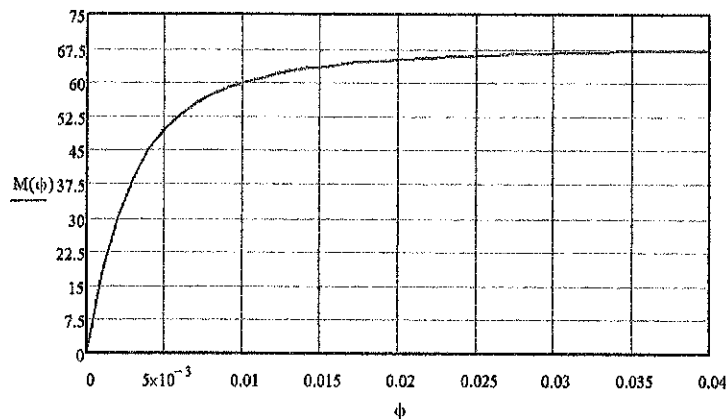
$$= 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot 160^{0,62} \cdot 300^{1,2} \cdot 20^{0,4} \cdot 20^{0,85} = 68,3 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,3} = 1,5 \cdot h_c^{0,44} \cdot h_b^{1,2} \cdot t_p^{0,35} \cdot d^{0,005} - 19211 =$$

$$= 1,5 \cdot 160^{0,44} \cdot 300^{1,2} \cdot 20^{0,35} \cdot 20^{0,005} - 19211 = 18836 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,3} = \frac{M_{j,Rd,3}}{M_{b,Rd}} = \frac{68,3}{130,9} = 0,5, \quad k_{s,3} = \frac{S_{j,ini,3}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{18836 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 8360 \cdot 10^4}{6000}} = 6,4.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



**Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W4**

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 220, rygiel IPE 360, blacha czołowa  $t_p = 20$  mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,4} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

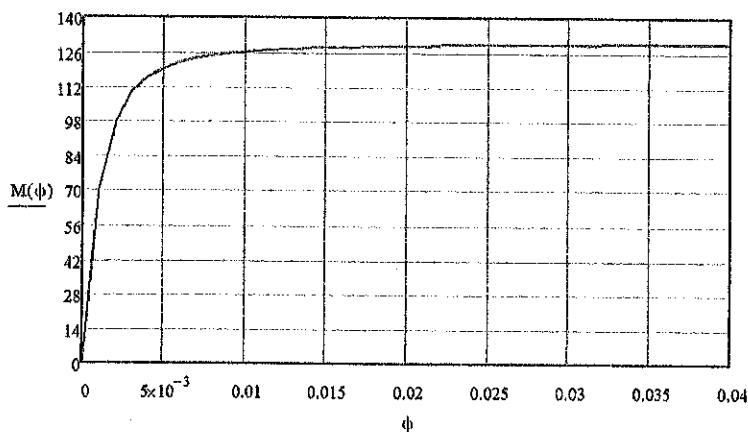
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 220^{0,24} \cdot 360^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 130,2 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,4} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 220^{-0,22} \cdot 360^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 99040 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,4} = \frac{M_{j,Rd,4}}{M_{b,Rd}} = \frac{130,2}{212,4} = 0,61, \quad k_{s,4} = \frac{S_{j,ini,4}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{99040 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 17,4.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



### Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W5

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 360, blacha czołowa  $t_p = 20$  mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,5} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

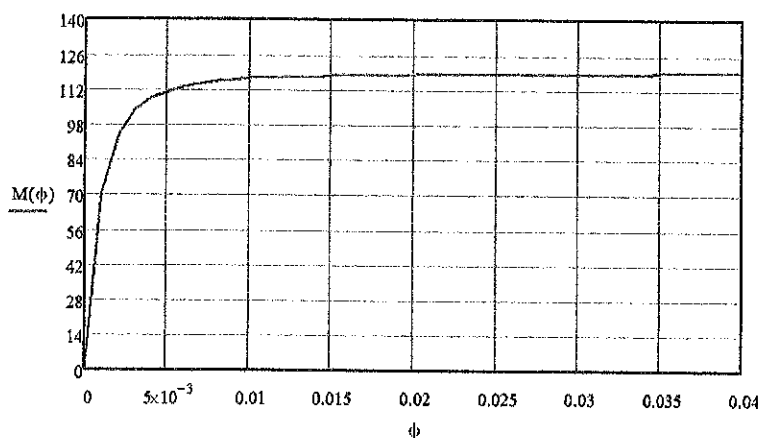
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 160^{0,24} \cdot 360^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 119,04 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,5} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 160^{-0,22} \cdot 360^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 106583 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,5} = \frac{M_{j,Rd,5}}{M_{b,Rd}} = \frac{119,04}{212,4} = 0,56, \quad k_{s,5} = \frac{S_{j,ini,5}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{106583 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 16270 \cdot 10^4}{6000}} = 18,7.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu modelu Chena:



### Obliczenie nośności i sztywności początkowej węzła W6

→ połączenie śrubowe z blachą wystającą, dwustronne **nieuźebrowane**,

→ słup HEB 160, rygiel IPE 300, blacha czołowa  $t_p = 20$  mm, 8 śrub M 20,

$$M_{j,Rd,6} = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot h_c^{0,24} \cdot h_b^{1,31} \cdot t_p^{0,32} \cdot d^{0,9} - 21 =$$

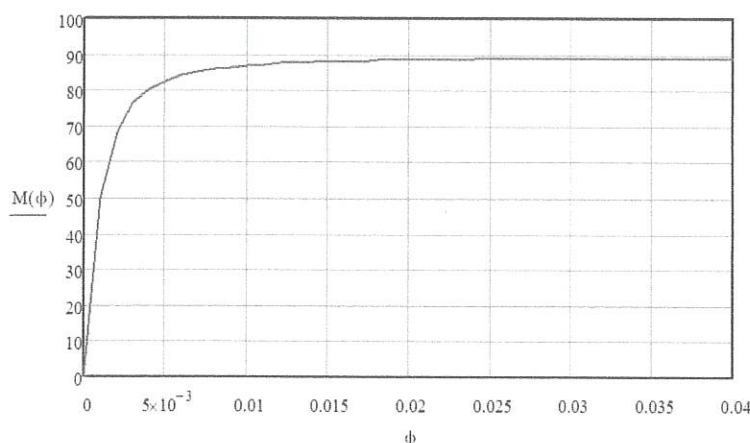
$$= 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 160^{0,24} \cdot 300^{1,31} \cdot 20^{0,32} \cdot 20^{0,9} - 21 = 89,3 \text{ kNm},$$

$$S_{j,ini,6} = 0,44 \cdot h_c^{-0,22} \cdot h_b^{2,1} \cdot t_p^{0,5} \cdot d^{-0,1} - 4896 =$$

$$= 0,44 \cdot 160^{-0,22} \cdot 300^{2,1} \cdot 20^{0,5} \cdot 20^{-0,1} - 4896 = 71121 \text{ kNm/rad}.$$

$$k_{M,6} = \frac{M_{j,Rd,6}}{M_{b,Rd}} = \frac{89,3}{130,9} = 0,68, \quad k_{s,6} = \frac{S_{j,ini,6}}{\frac{E \cdot I_b}{L_b}} = \frac{71121 \cdot 10^6}{\frac{210 \cdot 10^3 \cdot 8360 \cdot 10^4}{6000}} = 12,5.$$

Nieliniowa charakterystyka węzła przy założeniu Chena:



## 5. Sprawdzenie SGU

Sprawdzenie SGU polega na weryfikacji czy przemieszczenie wierzchołka ramy, wskutek działania sił poziomych od wiatru, spełni warunek:

$$\Delta = \sum \Delta_{k,i} \leq \frac{H}{500}, \text{ gdzie } \Delta_{k,i} \text{ jest przemieszczeniem } i\text{-tego stropu.}$$

Wychylenie kondygnacji najniższej, przy słupach utwierdzonych w stopach fundamentowych oblicza się następująco:

$$\Delta_{k,i} = \frac{\sum V_{k,i} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{\frac{2}{3S_b} + \frac{1}{S_c}}{1 + \frac{S_c}{6S_b}} \right).$$

Dla kondygnacji pośredniej wychylenie wynosi:

$$\Delta_{k,i} = \frac{\sum V_{k,i} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right), \text{ gdzie:}$$

$\sum V_{k,i}$  - suma charakterystycznych obciążeń poziomych,

$h_k$  - wysokość kondygnacji,

$S_b$  - sztywność rygli,

$S_c$  - sztywność słupów,

$S_{j,s} = S_{j,ini}$  - sztywność węzłów.

Przyjęto, że słupy skrajne każdej kondygnacji są wykonane z takiego samego kształtownika jak słupy pośrednie.

\* \* \*

Wychylenie kondygnacji najniższej:

$$\sum V_{k,1} = 3,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 3,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 61,08 kN.$$

$$\text{Sztynność słupów HEB 220: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{8090}{360} = 89,89 cm^3,$$

$$\text{Sztynność rygli IPE 360: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 cm^3, \text{ zatem:}$$

$$\Delta_{k,1} = \frac{\sum V_{k,1} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{\frac{2}{3S_b} + \frac{1}{S_c}}{1 + \frac{S_c}{6S_b}} \right) =$$

$$= \frac{61,08 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left( \frac{\frac{2}{3 \cdot 81,35 \cdot 10^3} + \frac{1}{89,89 \cdot 10^3}}{1 + \frac{89,89 \cdot 10^3}{6 \cdot 81,35 \cdot 10^3}} \right) = 5,1 mm.$$

\* \* \*

Wychylenie kondygnacji drugiej:

$$\sum V_{k,2} = 2,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 2,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 43,63 kN.$$

$$\text{Sztynność słupów HEB 220: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{8090}{360} = 89,89 cm^3,$$

$$\text{Sztynność rygli IPE 360: } S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 cm^3,$$

Sztynność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,1} + 4 \cdot S_{j,ini,4} = 2 \cdot 35263 + 4 \cdot 99040 = 466686 kNm / rad,$$

zatem:

$$\Delta_{k,2} = \frac{\sum V_{k,2} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) =$$

$$= \frac{43,63 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left( \frac{1}{89,89 \cdot 10^3} + \frac{1}{81,35 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{466686 \cdot 10^6} \right) = 6,5 mm.$$

\* \* \*

Wychylenie kondygnacji trzeciej:

$$\sum V_{k,3} = 1,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 1,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 26,18 kN.$$

$$\text{Sztynność słupów HEB 160: } S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{2492}{360} = 27,69 cm^3,$$

Sztywność rygli IPE 360:  $S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{16270}{600} = 81,35 \text{ cm}^3$ ,

Sztywność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,2} + 4 \cdot S_{j,ini,5} = 2 \cdot 28140 + 4 \cdot 106583 = 134724 \text{ kNm/rad},$$

zatem:

$$\begin{aligned} \Delta_{k,3} &= \frac{\sum V_{k,3} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) = \\ &= \frac{26,18 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left( \frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{81,35 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{134724 \cdot 10^6} \right) = 7,2 \text{ mm}. \end{aligned}$$

\* \* \*

Wychylenie kondygnacji czwartej:

$$\sum V_{k,4} = 0,5 \cdot (W_{Dk} + W_{Ek}) = 0,5 \cdot (11,02 + 6,43) = 8,73 \text{ kN}.$$

Sztywność słupów HEB 160:  $S_c = 4 \cdot \frac{I_c}{h} = 4 \cdot \frac{2492}{360} = 27,69 \text{ cm}^3$ ,

Sztywność rygli IPE 300:  $S_b = 3 \cdot \frac{I_b}{L} = 3 \cdot \frac{8360}{600} = 41,8 \text{ cm}^3$ ,

Sztywność węzłów:

$$\sum S_{j,s} = 2 \cdot S_{j,ini,3} + 4 \cdot S_{j,ini,6} = 2 \cdot 18836 + 4 \cdot 71121 = 322157 \text{ kNm/rad},$$

zatem:

$$\begin{aligned} \Delta_{k,4} &= \frac{\sum V_{k,4} \cdot h_k^2}{12 \cdot E} \cdot \left( \frac{1}{S_c} + \frac{1}{S_b} + \frac{12 \cdot E}{\sum S_{j,s}} \right) = \\ &= \frac{11,88 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}{12 \cdot 210 \cdot 10^3} \cdot \left( \frac{1}{27,69 \cdot 10^3} + \frac{1}{41,8 \cdot 10^3} + \frac{12 \cdot 210 \cdot 10^3}{322157 \cdot 10^6} \right) = 3,0 \text{ mm}. \end{aligned}$$

\* \* \*

Globalny przesuw górnego wierzchołka ramy:

$$\Delta = \sum \Delta_{k,i} = 5,1 + 6,5 + 7,2 + 3,0 = 21,8 \text{ mm} < \frac{H}{500} = \frac{14400}{500} = 28,8 \text{ mm}.$$

Stan graniczny użytkowalności jest spełniony.

\* \* \*

W sposób przybliżony, sprawdzenia stanu granicznego użytkowalności ramy przechyłowej można dokonać na podstawie rys. 2.

Parametry węzłów analizowanej ramy o węzłach przesuwnych, wyrażone współczynnikami nośności  $k_M$  i sztywności  $k_S$ , są następujące:

W1:  $k_M = 0,49$ ,  $k_S = 6,2$ ,

W2:  $k_M = 0,40$ ,  $k_S = 4,9$ ,

W3:  $k_M = 0,50$ ,  $k_S = 6,4$ ,

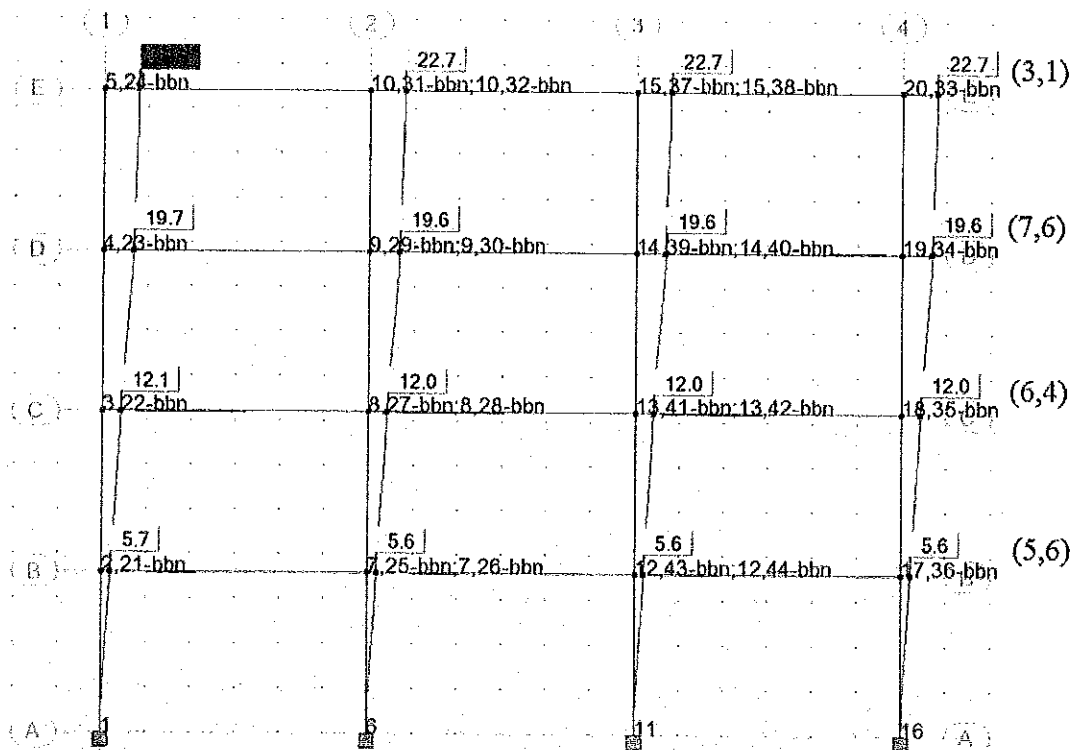
W4:  $k_M = 0,61$ ,  $k_S = 17,4$ ,

W5:  $k_M = 0,56$ ,  $k_S = 18,7$ ,

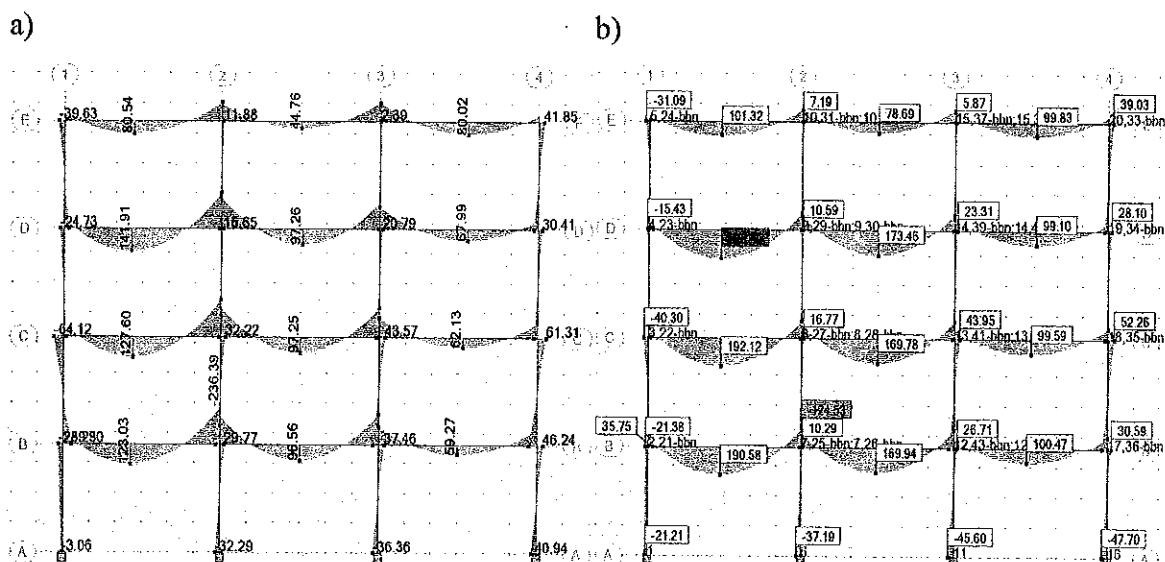
W6:  $k_M = 0,68$ ,  $k_S = 12,5$ .

W odniesieniu do rys. 4, powyższe węzły można przyporządkować w przybliżeniu do węzłów o parametrach  $k_M = 0,6$  i  $k_S = 6,0$ . W przypadku smukłości ramy  $B/H = 18/14,4 = 1,25$  stan graniczny użytkowości jest zachowany.

\*\*\*



Rys. 3. Deformacja konstrukcji wskutek oddziaływania wiatru na ścianę podłużną, przemieszczenie węzłów podano w [mm] (w nawiasach podano wartości przesuwu względnego poszczególnych kondygnacji)



Rys. 4. Porównanie wykresów momentów zginających w przypadku kombinacji obciążeń  $1,35 \cdot 0,85 \cdot G + 1,5 \cdot (Q3+Q4) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (We1)$  i a) węzłów sztywnych, b) węzłów podatnych