

Betonové a ocelové konstrukce

Ing. Josef Novák, Ph.D.
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

České vysoké učení technické v Praze



Zatížení

■ Stálé

	Výpočet	g_k / G_k	Y_G [-]	g_d / G_d
Vlastní tíha	Software		1,35	
Ostatní stálé – bodová síla $F_{g,k}$	$a \cdot 20$	$F_{g,k}$ [kN]	1,35	$F_{g,d}$ [kN]
Ostatní stálé – liniové zatížení g_k	$b \cdot 10$	$f_{g,k}$ [kN/m]	1,35	$f_{g,d}$ [kN/m]

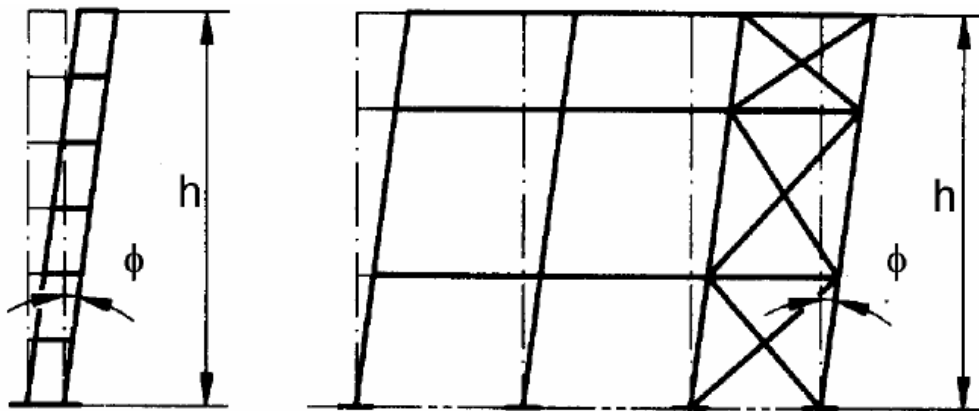
■ Proměnné

	Výpočet	Q_k	Y_Q [-]	Q_d
Vítr – síla $H_{q,k}$	$0,3 \cdot F_{g,k}$	$H_{q,k}$ [kN]	1,5	$H_{q,d}$ [kN]

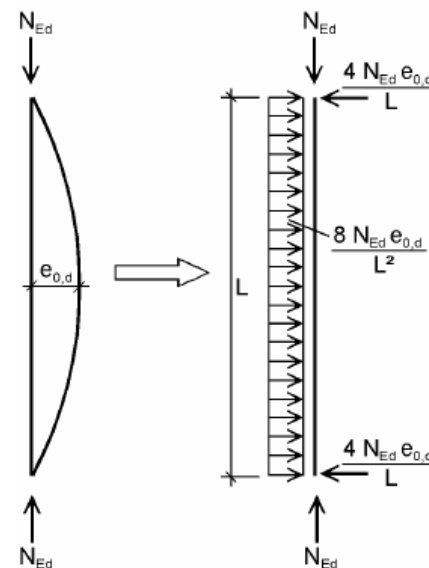
Imperfekce

- Závisí na způsobu výpočtu
- V našem případě metoda s imperfekcemi soustavy
 - Zavedení globální imperfekce (imperfekce soustavy)
 - Náklonem soustavy
 - Přídavnou ekvivalentní horizontální silou
 - Bez lokálních imperfekcí (prutové imperfekce)
 - Bude zohledněno součiniteli vzpěrnosti

Globální imperfekce



Lokální imperfekce



Imperfekce soustavy prutů

■ Zohlednění náklonem soustavy

- Redukční součinitel v závislosti na výšce sloupů

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{musí ale platit: } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

- Redukční součinitel pro počet sloupů v řadě

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

- Ekvivalentní počáteční natočení sloupů

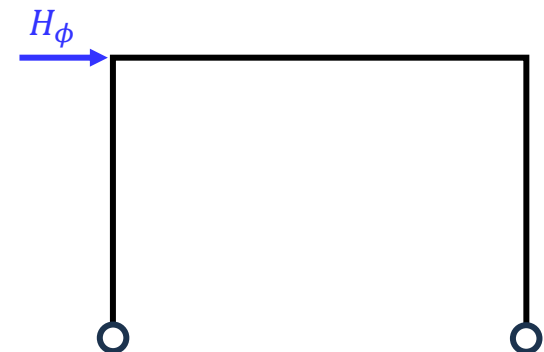
$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m = \frac{1}{200} \alpha_h \alpha_m$$

■ Zohlednění ekvivalentní vodorovnou silou

$$H_\phi = \phi \sum N_{Ed} = \phi m N_{Ed}$$

$$N_{Ed} = \frac{1,35(G_{0,i} + f_{g,k}L + F_{g,k})}{2}$$

Tíha celé konstrukce [kN]



Klasifikace rámu

- Globální analýza konstrukce
 - Součinitel kritického zatížení

$$\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}}$$

- Dále lze případně použít pro stanovení vzpěrné délky sloupu

$$L_{cr} = \pi \sqrt{\frac{EI}{\alpha_{cr} N_{Ed}}}$$

- Způsob výpočtu v závislosti na α_{cr}

α_{cr}	Vnitřní síly	Posouzení tlakové síly
$\alpha_{cr} > 25$	Pružnoplasticky – I. řád (redistribuce)	Prostý tlak
$\alpha_{cr} > 15$	Pružnoplasticky – I. řád (redistribuce)	Stabilita
$\alpha_{cr} > 10$	Pružně – I. řád	Stabilita
$10 > \alpha_{cr} > 3$	Pružně – II. řád (software / zjednodušeně)	Stabilita
$3 > \alpha_{cr}$	Pružně – II. řád – podrobně – software	Stabilita

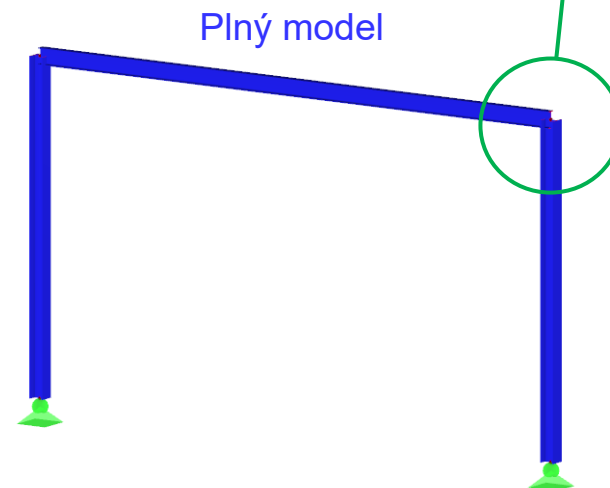
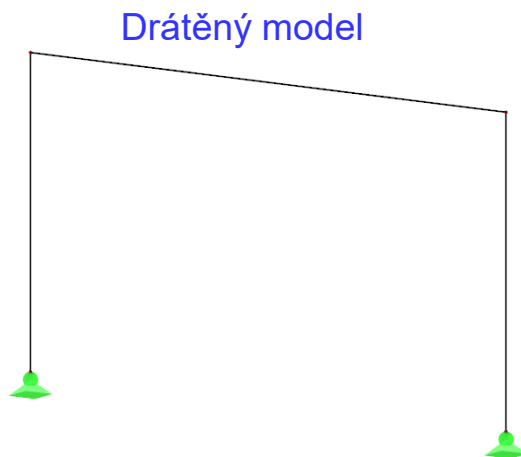
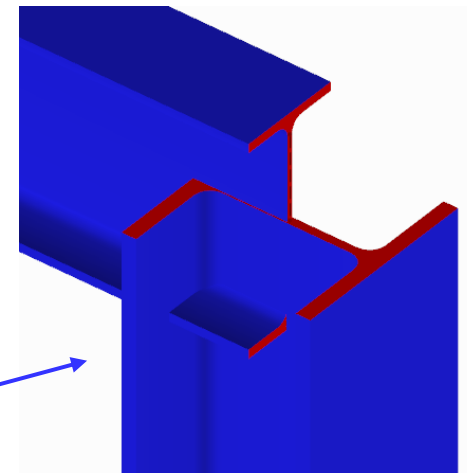
Postup v tomto cvičení

- Numerický 3D model
 - Dlubal / SCIA
 - Imperfekce pomocí ekvivalentní horizontální síly
- Stanovit α_{cr} pro KZ1
 - Lineární výpočet (I. řádem)
 - Optimalizace průřezů, aby $10 > \alpha_{cr} > 3$
- Globální analýza
 - Globální imperfekce (ekvivalentní horizontální síla)
 - Výpočet II. řádem, pružně
- Posouzení průřezů a celé konstrukce
 - MSÚ, MSP
- Optimalizace
- Porovnání α_{cr} výsledného návrhu ze softwaru se zjednodušeným výpočtem

Numerický model

- Odhad dimenzí
 - Sloupy z průřezu HEB (např. HEB 200)
 - Příčel z průřezu IPE (např. IPE 240)

- Vymodelování prutové konstrukce
 - Rámová konstrukce
 - Sloup tuhou osou v rovině rámu
 - Nutné zajistit realizaci rámového rohu
 - Šířka pásnice příčle menší než šířka pásnice sloupu
 - Kloubové podpory

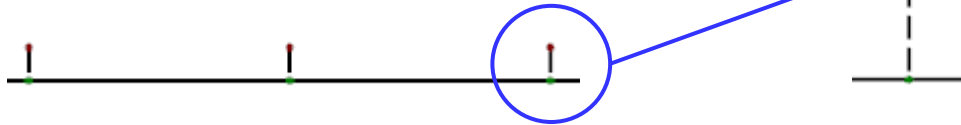


Numerický model

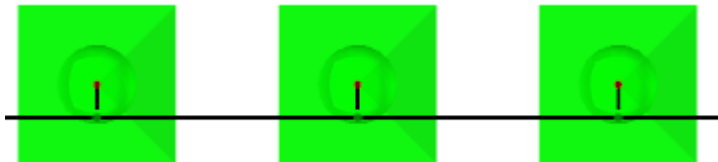
- Příčné podepření horní pásnice
 - Například 10 uzlů na příčli



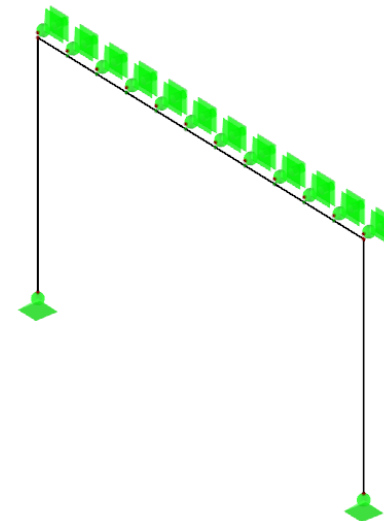
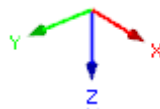
- Tuhý prut o délce $\frac{h_{IPE}}{2}$



- Na konci tuhá podpora ve směru z roviny



- Pouze ve směru osy y



Numerický model – zatěžovací stavy

■ Stálé zatížení

■ ZS1 – Vlastní tíha

- Vlastní tíha (software)
- Ostatní stálé zatížení
 - $F_{g,k}; f_{g,k}$

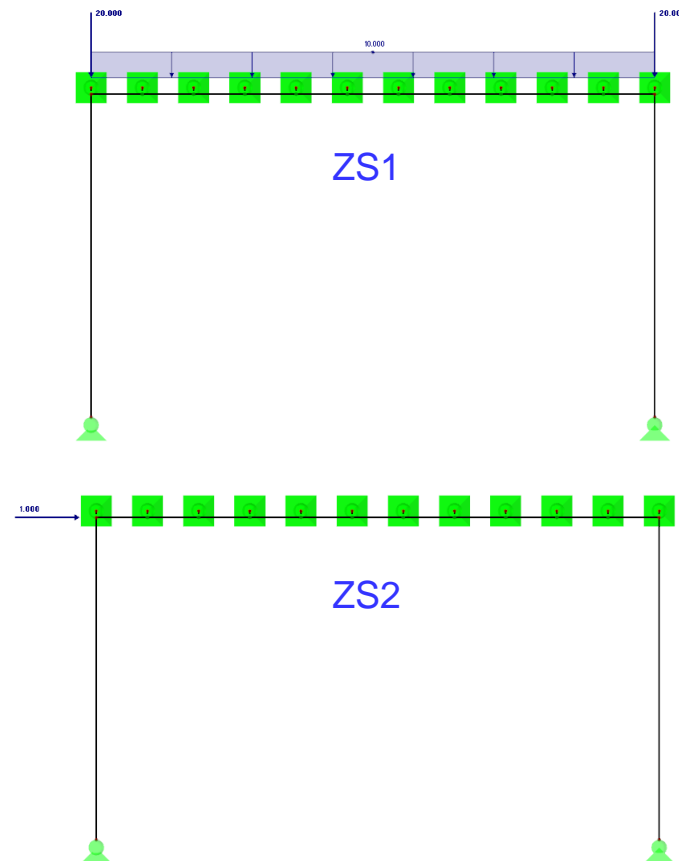
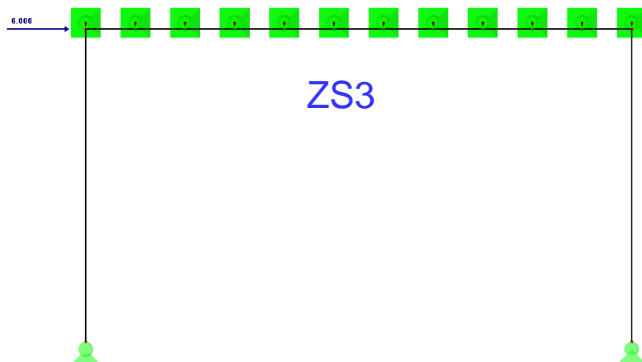
■ ZS2 – Imperfekce

- H_ϕ

■ Proměnné zatížení

■ ZS3 – Vítr

- $H_{q,k}$



Numerický model – Kombinace zatížení

- Kombinace vytvořit ručně

- KZ1

- Kombinace pro stabilitní výpočet a posouzení MSÚ

$$ZS1 \cdot 1,35 + ZS2 \cdot 1,35 + ZS3 \cdot 1,5$$

- KZ2

- Kombinace pro návrhový vodorovný posun

$$ZS2 \cdot 1,35 + ZS3 \cdot 1,5$$

- KZ3

- Kombinace pro posouzení MSP

$$ZS1 + ZS2 + ZS3$$

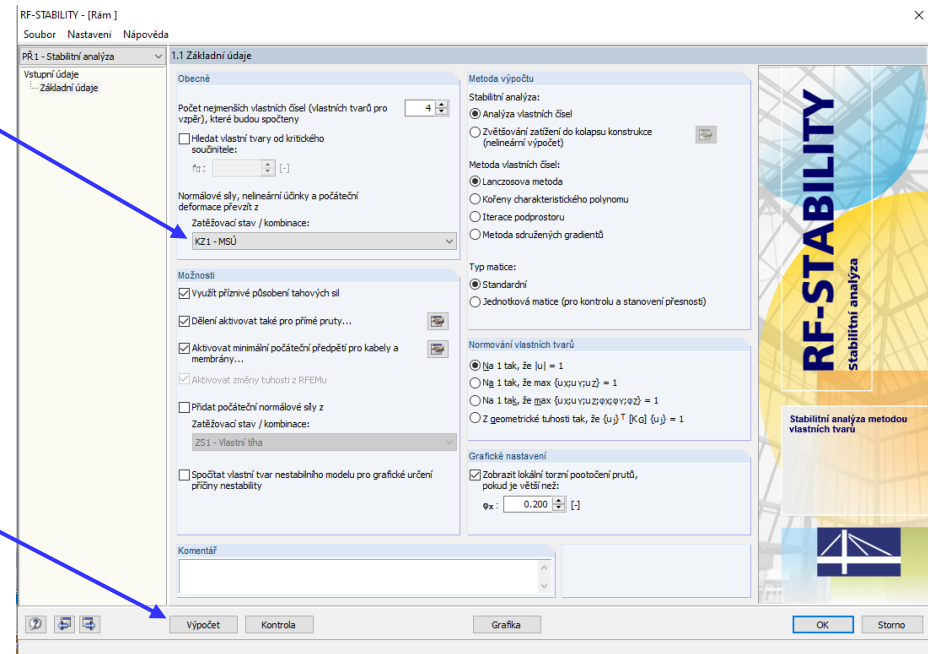
Součinitel kritického zatížení α_{cr}

- Dlubal RFEM – přídatný modul RF-Stability

- Výpočet pro kombinaci KZ1

- Výpočet

- Vypočtené hodnoty



RF-STABILITY - [Rám]

Soubor Nastavení Nápověda

PŘ1 - Stabilitní analýza

Vstupní údaje

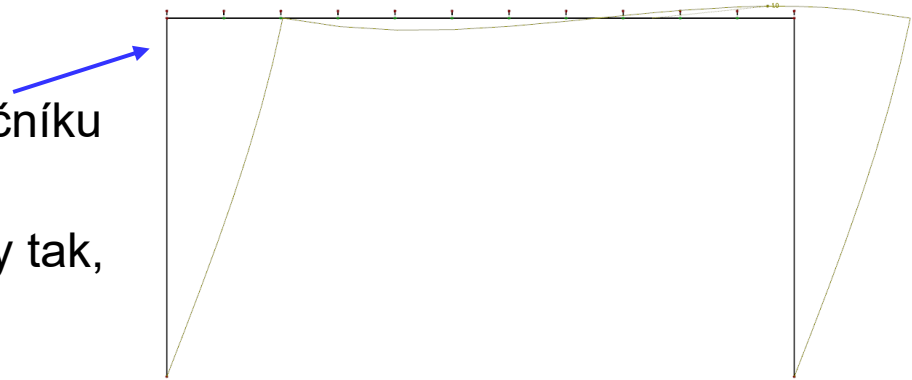
- ... Základní údaje
- Výsledky
 - ... Součinitele kritického zatížení
 - ... Vzpěrné délky a kritické síly
 - ... Vlastní tvary po uzlech
 - ... Vlastní tvary po prutech

2.1 Součinitele kritického zatížení	A	B
Vl. číslo č.	Součinitel kritického zatížení f [-]	Faktor zvětšení α [-]
1	6.799	1.172
2	21.194	1.050
3	24.734	1.042
4	56.048	1.018

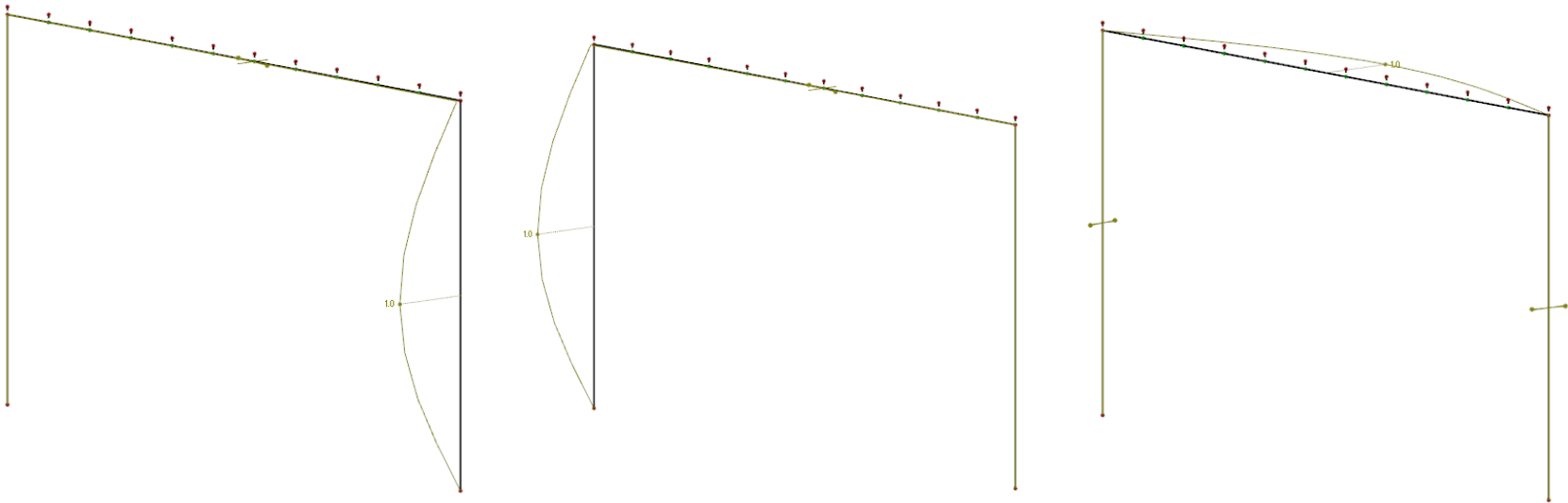
Předběžně optimalizovat průřezy tak, aby $10 > \alpha_{cr} > 3$ (α_{cr} ideálně lehce pod 10)

Součinitel kritického zatížení α_{cr}

- Kontrola vlastního tvaru
 - α_{cr} pro vybočení s posuvem styčnicku
 - Předběžně optimalizovat průřezy tak, aby $10 > \alpha_{cr} > 3$
(α_{cr} ideálně lehce pod 10)



Další vlastní tvary



Globální analýza

- Výpočet pomocí II. řádu
 - V Dlubal RFEM není nutno nic přenastavit
 - Software defaultně počítá kombinace zatížení II. řádem

Spočítat vše

Parametry výpočtu

Parametry výpočtu

Zatěžovací stavy | **Kombinace zatížení** | kombinace výsledků | Globální parametry výpočtu | Výpočtový diagram

Existující kombinace zatížení

KZ č.	MSÚ
KZ1	MSÚ
KZ2	Návrhový vodorovný posun
KZ3	MSP

KZ č. 1 Označení kombinace zatížení MSÚ Vypočítat

Parametry výpočtu

Metoda analýzy

I. řád (geometricky lineární výpočet)
 Analýza podle teorie II. řádu (P-Delta / P-delta)
 Analýza velkých deformací
 Postkritická analýza

Metoda řešení soustavy

Nelineárních algebraických rovnic
 Newton-Raphsonova
 Newton-Raphsonova analýza komb. s Picardovou
 Picardova
 Newton-Raphsonova s konstantní maticí tuhosti
 Modifikovaná Newton-Raphsonova
 Dynamická relaxace

Postupné zvyšování zatížení

Aktivovat
 Počáteční součinitel zatížení k_0 : [] [-]
 Přírůstek faktoru zatížení Δk : [] [-]
 Změnění posledního přírůstku zatížení: 10 []
 Podmínka zastavení pro: u []
 Uzel č.: Libovol [] [mm]
 Použít počáteční zatížení (nezvyšující se):

Možnosti

Upravit zatěžování pomocí součinitele: [] [-]
 Zpětné dělení výsledků součinitelem zatížení

Aktivovat součinitele tuhosti pro:

Materiály (dílec souč. spolehlivosti γ_M)
 Průřezy (faktor pro $I_T, I_y, I_z, A, A_y, A_z$)
 Pruty (definiční typ)
 Plochy (definiční typ)

Aktivovat speciální nastavení na záložce:

Upravit tuhosti
 Další možnosti
 Deaktivovat
 Zohlednit příznivé účinky tahových sil prutů
 Vztáhnout vnitřní síly na přetvořenou konstrukci pro:
 Normálové síly N
 Smykové síly V_y a V_z
 Momenty M_y, M_z a M_T
 Pokusit se vypočítat kinematický mechanismus (přidat malou tuhost v první iteraci)
 Použít samostatný počet přírůstků zatížení pro tuto kombinaci zatížení: []
 Uložit výsledky všech přírůstků zatížení
 Deaktivovat nelinearity pro tuto kombinaci zatížení

OK Storno

Úprava profilů na základě MSP

- Požadavky na MSP

- KZ3

- Svislý posun (u_z)

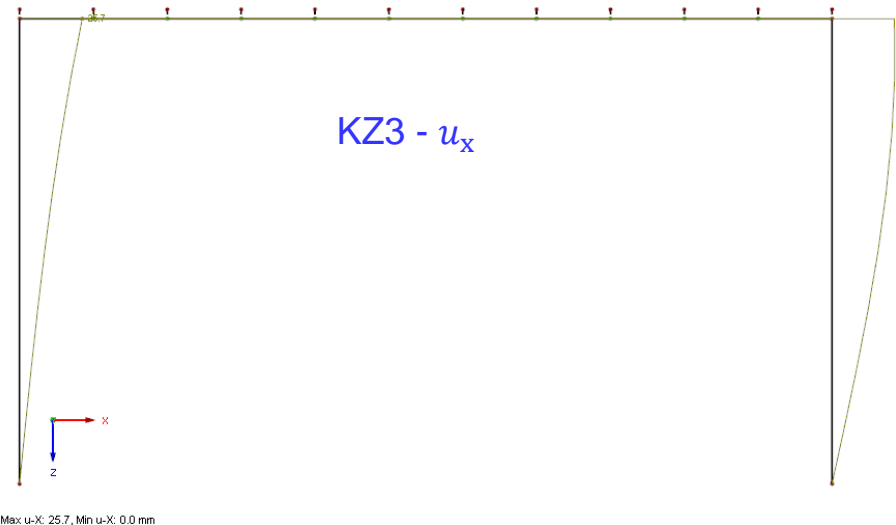
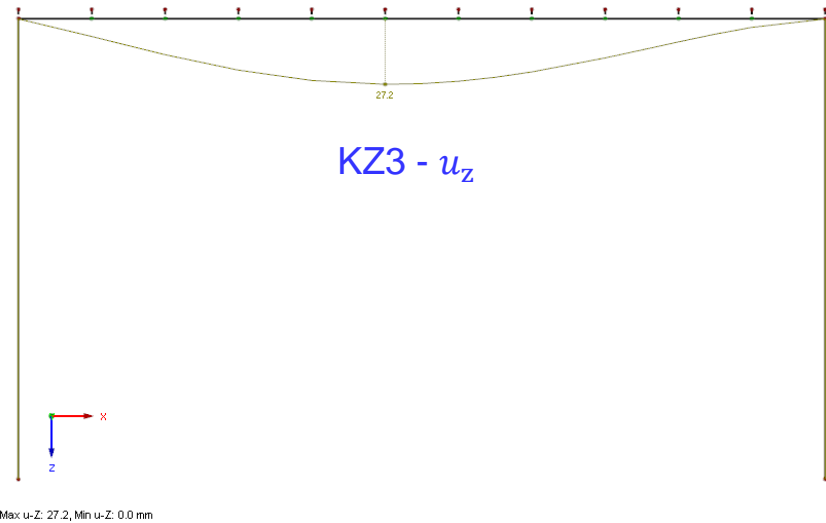
$$w_{\max} = u_z \leq \frac{L}{250}$$

- Vodorovný posun (u_x)

$$\delta_{\max} = u_x \leq \frac{h}{150}$$

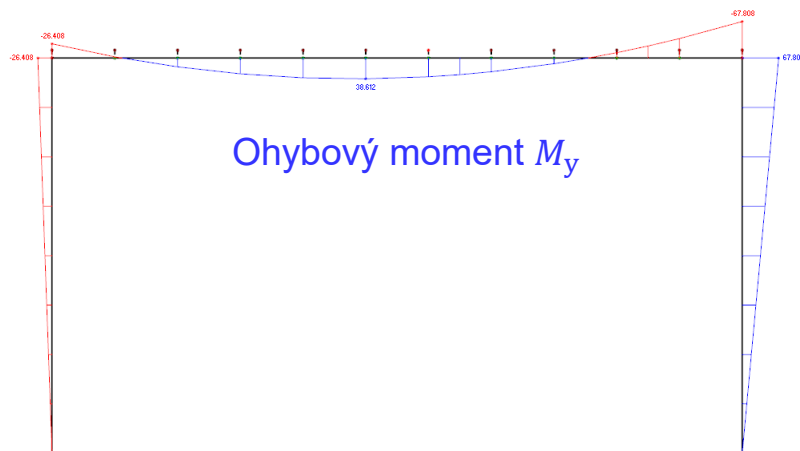
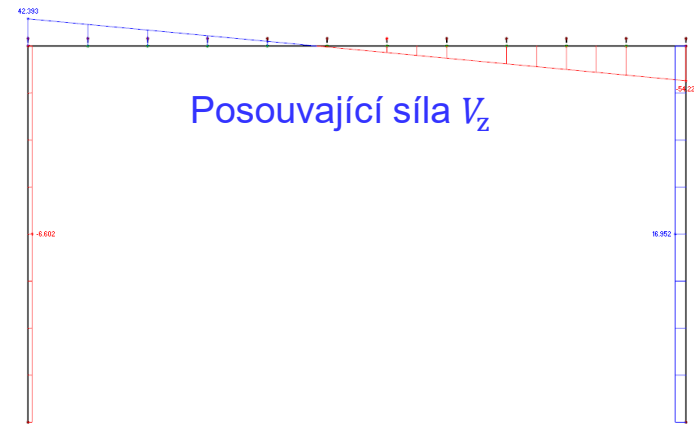
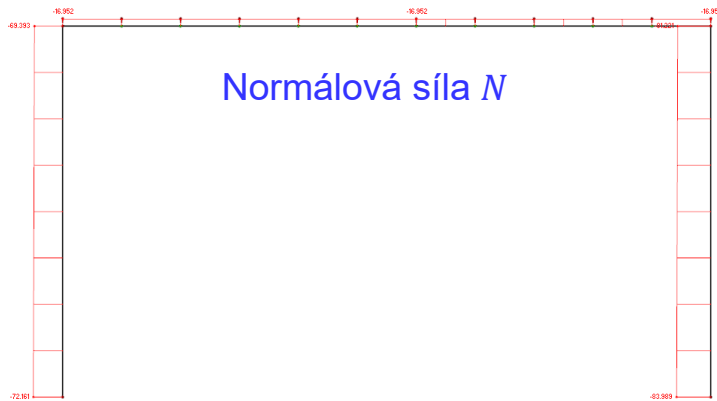
- Optimalizace průřezů

- „Využití“ 80 – 100 %



Vnitřní síly

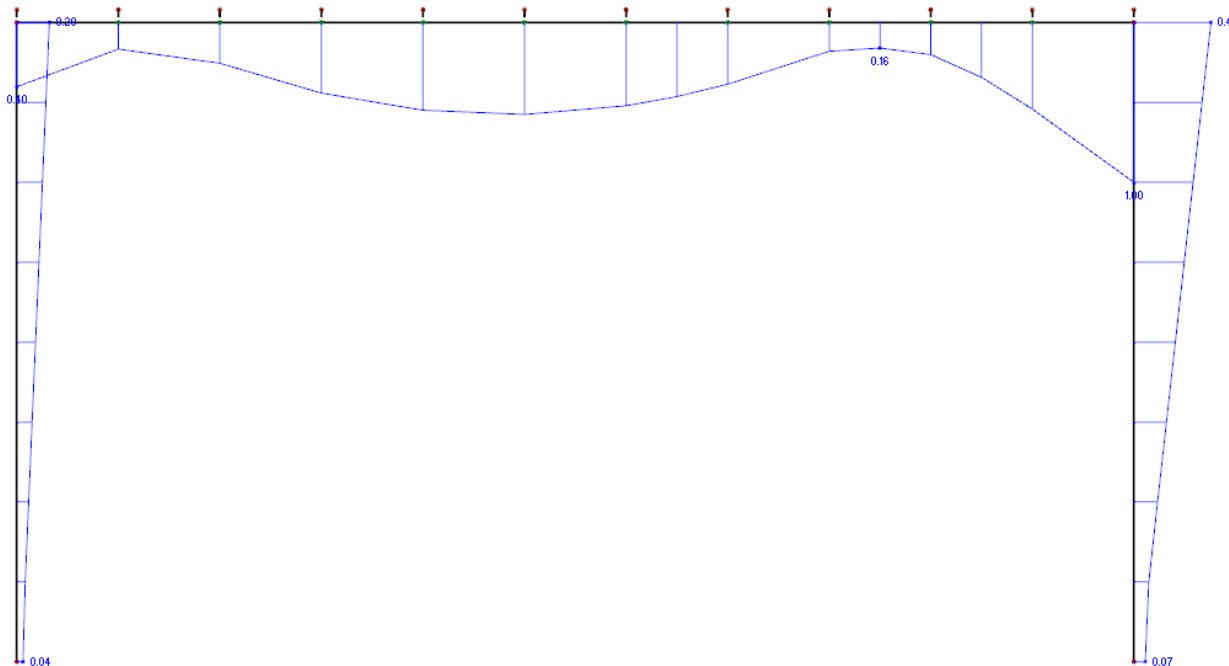
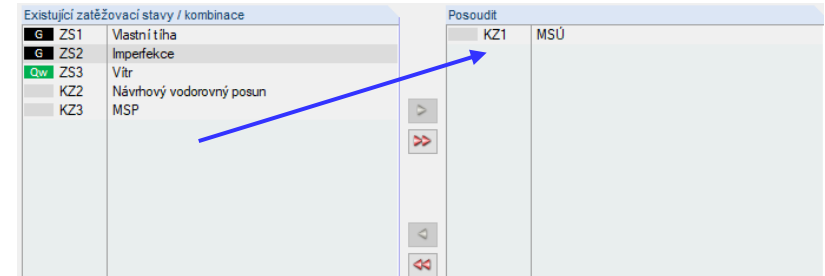
- Pro posouzení MSÚ
 - KZ1



Který sloup je více namáhán?
Pro jaký bod provést posouzení příčle?

Rozhodující průřezy

- Dlubal RFEM – přídatný modul RF-Steel Members
 - Zadat posouzení KZ1
 - Výpočet
 - Využití na základě napětí (f_y)
 - Pružně
 - Rozhodující sloup a průřez příčle



Sloup – pravý
 $N_{Ed}; V_{Ed,z}; M_{y,Ed}$

Příčel – pravý rámový roh
 $N_{Ed}; V_{Ed,z}; M_{y,Ed}$

Posouzení sloupu

- Zatřídít průřez
 - Ručně / Tabulky
 - Konzervativně tlak a ohyb zvlášť

Průřezy HEB

	<i>G</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t_w</i>	<i>t_r</i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>A</i>	<i>A_{vz}</i>	<i>I_y</i>	<i>W_y</i>	<i>W_{ply}</i>	<i>i_y</i>
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	10 ⁴ mm ⁴	10 ³ mm ³	10 ³ mm ³	mm
HE 100 B	20,4	100	100	6,0	10,0	12	58	2804	904	449,5	89,91	104,2	41,6
HE 120 B	26,7	120	120	6,5	11,0	12	74	3401	1098	864,4	144,1	165,2	50,4
HE 140 B	33,7	140	140	7,0	12,0	12	92	4298	1308	1509	215,6	245,4	59,3
HE 160 B	42,6	160	160	8,0	13,0	15	104	5425	1759	2492	311,5	354,0	67,8
HE 180 B	51,2	180	180	8,5	14,0	15	122	6525	2024	3831	425,7	481,4	76,6
HE 200 B	61,3	200	200	9,0	15,0	18	134	7808	2483	5696	569,6	642,5	85,4
HE 220 B	71,5	220	220	9,5	16,0	18	152	9104	2792	8091	735,5	827,0	94,3
HE 240 B	83,2	240	240	10,0	17,0	21	164	10800	3323	11280	938,3	1053	103
HE 260 B	93,0	260	260	10,0	17,5	24	177	11840	3759	14920	1148	1283	112
HE 280 B	103,1	280	280	10,5	18,0	24	198	13140	4109	19270	1376	1534	121
HE 300 B	117,0	300	300	11,0	19,0	27	208	14910	4743	25170	1678	1889	130
HE 320 B	126,7	320	300	11,5	20,5	27	225	16130	5177	30820	1926	2149	138
HE 340 B	134,2	340	300	12,0	21,5	27	243	17090	5609	36680	2156	2408	146
HE 360 B	141,8	360	300	12,5	22,5	27	261	18060	6060	43190	2400	2683	155
HE 400 B	155,3	400	300	13,5	24,0	27	298	19780	6998	57680	2884	3232	171
HE 450 B	171,1	450	300	14,0	26,0	27	344	21800	7966	79890	3551	3982	191
HE 500 B	187,3	500	300	14,5	28,0	27	390	23860	8982	107200	4287	4815	212
HE 550 B	199,4	550	300	15,0	29,0	27	438	25410	10010	136700	4971	5591	232
HE 600 B	211,9	600	300	15,5	30,0	27	486	27000	11080	171000	5701	6425	252
HE 650 B	224,8	650	300	16,0	31,0	27	534	28630	12200	210600	6480	7320	271
HE 700 B	240,5	700	300	17,0	32,0	27	582	30640	13710	258900	7340	8327	290
HE 800 B	262,3	800	300	17,5	33,0	30	674	33420	16180	359100	8977	10230	328
HE 900 B	291,5	900	300	18,5	35,0	30	770	37130	18880	494100	10980	12580	365
HE 1000 B	314,0	1000	300	19,0	36,0	30	868	40000	21250	644700	12890	14860	401

<i>I_z</i>	<i>W_z</i>	<i>W_{plz}</i>	<i>i_z</i>	<i>I_t</i>	<i>I_w</i>	ohyb				tlak				
						S235	S275	S355	S460	S235	S275	S355	S460	
10 ⁴ mm ⁴	10 ³ mm ³	10 ³ mm ³	mm	10 ⁴ mm ⁴	10 ⁸ mm ⁵									
167,3	33,45	51,42	25,3	9,248	3375	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 100 B
317,5	52,92	80,97	30,6	13,84	9410	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 120 B
549,7	78,52	119,8	35,8	20,06	22480	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 140 B
889,2	111,2	170,0	40,5	31,24	47940	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 160 B
1363	151,4	231,0	45,7	42,16	93750	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 180 B
2003	200,3	305,8	50,7	59,28	171100	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 200 B
2843	258,5	393,9	55,9	76,57	295400	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 220 B
3923	326,9	498,4	60,8	102,7	486900	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 240 B
5135	395,0	602,2	65,8	123,8	753700	1	1	1	2	1	1	1	2	HE 260 B
6585	471,0	717,6	70,9	143,7	1130000	1	1	1	2	1	1	1	2	HE 280 B
8563	570,9	870,1	75,8	185,0	1688000	1	1	1	3	1	1	1	3	HE 300 B
9239	615,9	939,1	75,7	225,1	2069000	1	1	1	2	1	1	1	2	HE 320 B
9990	646,0	985,7	75,3	257,2	2454000	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 340 B
10140	676,1	1032	74,9	292,5	2883000	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 360 B
10820	721,3	1104	74,0	355,7	3817000	1	1	1	1	1	1	1	1	HE 400 B
11720	781,4	1198	73,3	440,5	5258000	1	1	1	1	1	1	1	2	HE 450 B
12620	841,6	1292	72,7	538,4	7018000	1	1	1	1	1	1	2	2	HE 500 B
13080	871,8	1341	71,7	600,3	8856000	1	1	1	1	1	1	2	3	HE 550 B
13530	902,0	1391	70,8	667,2	10970000	1	1	1	1	1	2	3	4	HE 600 B
13980	932,3	1441	69,9	739,2	13380000	1	1	1	1	2	2	3	4	HE 650 B
14440	962,7	1495	68,7	830,9	16060000	1	1	1	1	2	2	4	4	HE 700 B
14900	993,6	1553	66,8	946,0	21840000	1	1	1	1	3	3	4	4	HE 800 B
15820	1054	1658	65,3	1137	29460000	1	1	1	1	3	4	4	4	HE 900 B
16280	1085	1716	63,8	1254	37640000	1	1	1	1	4	4	4	4	HE 1000 B

Posouzení sloupu – Vzpěr

- Vzpěrné délky
 - Globální analýza II. řádem s imperfekcemi soustavy $\rightarrow L_{cr,y} = h$
 - K měkké ose na obou koncích kloubové uložení $\rightarrow L_{cr,z} = h$

- Štíhlost prutu

$$\lambda_i = \frac{L_{cr,i}}{i_i}$$

- Srovnávací štíhlost

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

- Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1}$$

Posouzení sloupu – Vzpěr

- Přirazení křivky vzpěrnosti
 - Tabulky
 - Rozepsat do úkolu !!!
- Stanovit součinitele vzpěrnosti χ_i
 - Ručně
 - Tabulky
- Vzpěrná únosnost

$$N_{b,Rd,i} = \chi_i A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \geq N_{Ed}$$

Spočítat pro osu y i z

$$N_{b,Rd,y} \neq N_{b,Rd,z}$$

Tabulka 6.2 – Přirazení křivek vzpěrné pevnosti k průřezům

Průřez	Meze	Vybočení kolmo k ose	Křivka vzpěrné pevnosti	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Válcované průřezy 	$t_f \leq 40$ mm	$y-y$	a	a_0
		$z-z$	b	a_0
	40 mm $< t_f \leq 100$ mm	$y-y$	b	a
		$z-z$	c	a
$h/b > 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	$y-y$	b	a
	$t_f > 100$ mm	$z-z$	d	c
Svařované průřezy 	$t_f \leq 40$ mm	$y-y$	b	b
	$t_f > 40$ mm	$z-z$	c	c
Duté průřezy 	válcované za tepla	všechny	a	a_0
	tvarované za studena	všechny	c	c
Svařované duté průřezy 	všechny průřezy kromě níže uvedených výjimek	všechny	b	b
	tlusté svary: $a > 0,5 t_f$ $b / t_f < 30$ $h / t_w < 30$	všechny	c	c
U, T a jiné průřezy 		všechny	c	c
Úhelníky 		všechny	b	b

Posouzení sloupu – Klopení

■ Kritický moment

■ Určí se pro následující okrajové podmínky

- Délka nosníku (zde sloupu) mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny
 - V řešeném příkladu $L_{LT} = h$ (výška sloupu)
- Součinitel vzpěrné délky popisující okrajové podmínky uložení v ohybu (pootočení k ose z-z)
 - $k_z = 0,5$ (pro vetknutí obou konců)
 - $k_z = 1,0$ (pro kloubové uložení obou konců) – řešený příklad
- Součinitel vzpěrné délky popisující okrajové podmínky uložení v kroucení
 - $k_w = 0,5$ (bráněno deplanaci)
 - $k_w = 1,0$ (není bráněno deplanaci) – řešený příklad

■ Bezrozměrný parametr kroucení

$$K_{wt} = \frac{\pi}{k_w L_{LT}} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}}$$

I_w – výsečový moment setrvačnosti

I_t – moment tuhosti v prostém kroucení

E – modul pružnosti oceli (210 000 MPa)

G – modul pružnosti oceli ve smyku (80 700 MPa)

Posouzení sloupu – Klopení

■ Kritický moment

■ Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2}$$

- C_1 je součinitel závisející na průběhu momentu a podmínkách uložení konců

- $C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0})\kappa_{wt} \leq C_{1,1}$

- Alternativně pro $k_z = 1,0$

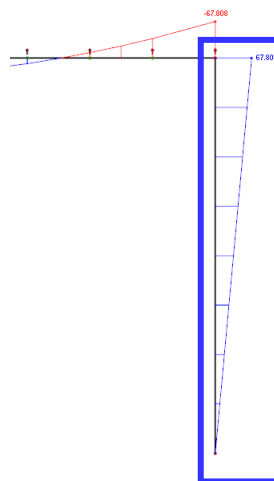
$$C_1 = (0,31 + 0,428\psi + 0,262\psi^2)^{-0,5}$$

Poměr
koncových
momentů

■ Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L_{LT}}$$

■ Alternativně pomocí LTBeam



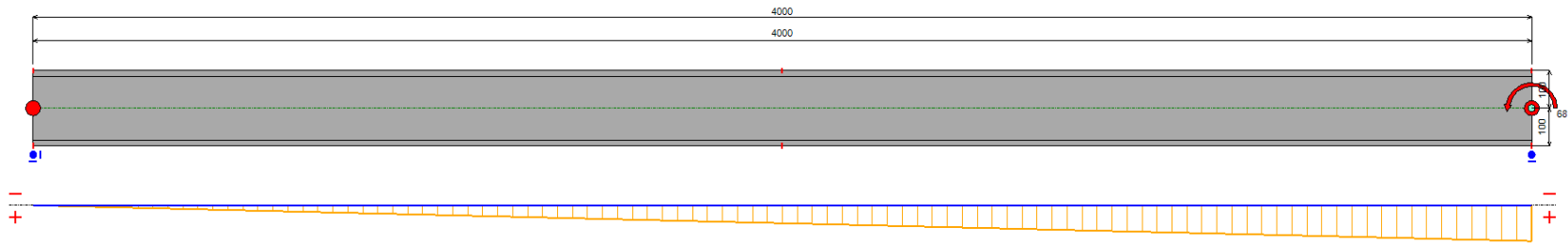
Tabulka NB.3.1 – Hodnoty součinitelů C_1 a C_2 při zatížení prutu koncovými momenty v závislosti na hodnotě součinitele k_z a součinitelů ψ_1 a κ_{wt}

Součinitel uložení konců prutu v rovině ohybu $k_y = 1,0$, v kroucení $k_{wt} = 1,0$

Tvar momentového obrazce Poměr koncových momentů ψ	k_z 2)	Hodnoty součinitelů					
		C_1 1)		C_2			
		$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	$\psi_1 = -1$ $\zeta \perp \zeta T$	$-0,9 \leq \psi_1 \leq 0$ $\zeta \perp \zeta T$	$0 \leq \psi_1 \leq 0,9$ $\zeta T \zeta \perp$	$\psi_1 = 1$ $\zeta T \zeta \perp$
$M_{cr} \psi = +1$ 	1,0	1,00	1,00	1,00			
	0,7L	1,02	1,10	1,02			1,00
	0,7R	1,02	1,10	1,02			1,00
$M_{cr} \psi = +3/4$ 	0,5	1,00	1,13	1,02			
	1,0	1,14	1,14	1,00			
	0,7L	1,21	1,31	1,05			1,00
$M_{cr} \psi = +1/2$ 	0,7R	1,11	1,20	1,00			
	0,5	1,14	1,29	1,02			
	1,0	1,31	1,32	1,15		1,00	
$M_{cr} \psi = +1/4$ 	0,7L	1,48	1,62	1,16			1,00
	0,7R	1,21	1,32	1,00			
	0,5	1,31	1,48	1,15	1,00		
$M_{cr} \psi = 0$ 	1,0	1,52	1,55	1,29	1,00		
	0,7L	1,85	2,08	1,80	1,26	1,00	
	0,7R	1,33	1,47	1,00			
$M_{cr} \psi = 0$ 	0,5	1,52	1,73	1,35	1,00		
	1,0	1,77	1,85	1,47	1,00		
	0,7L	2,33	2,68	2,00	1,42	1,00	
$M_{cr} \psi = 0$ 	0,7R	1,45	1,59	1,00			
	0,5	1,75	2,03	1,50	1,00		

Posouzení sloupu – Klopení

- Kritický moment
 - Alternativně pomocí LTBeam
 - Délka prvku
 - Definovat průřez na obou koncích
 - Příčné podepření na obou koncích
 - Uložení kloubové
 - Zatížení koncovým momentem
 - Ve středu smyku



Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	x (Mmax) [mm]	$N_{max,cr}$ [kN] (*)	x (Nmax) [mm]
1	11.49	781.55	4000	0	4000

Ověřit průběh
ohybového momentu
s výsledky softwaru

Posouzení sloupu – Klopení

- Poměrná štíhlost při klopení

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}$$

Pokud $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ nosník neklopí

Průřezový modul podle třídy průřezu

- Křivka klopení pro válcované I profily

$$\frac{h}{b} \leq 2 \quad \text{křivka „b“} \quad \alpha_{LT} = 0,34$$

$$\frac{h}{b} > 2 \quad \text{křivka „c“} \quad \alpha_{LT} = 0,49$$

- Součinitel klopení

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1,0 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

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

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

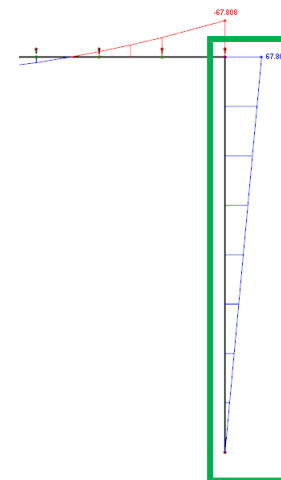
$$\beta = 0,75$$

- Ohybová únosnost

$$M_{b,Rd,y} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y \geq M_{y,Ed}$$

Posouzení sloupu – Interakce tlak + ohyb

- Součinitele ekvivalentních ohybových momentů
 - Vybočení s posuvem styčnicků
 - Poměr koncových momentů $\psi = 0$
 - Trojúhelníkový momentový obrazec


 Tabulka B.3 – Součinitele C_m ekvivalentního konstantního momentu v tabulkách B.1 a B.2

Průběh momentu	Rozsah		C_{my} a C_{mz} a C_{mLT}	
			rovnoměrné zatížení	soustředěné zatížení
C_{mLT}	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)^{NP)}$
C_{my} Součinitel ekvivalentního konstantního momentu při vybočení s posuvem styčnicků se má uvažovat $C_{my} = 0,9$ nebo $C_{mz} = 0,9$.				

C_{my} , C_{mz} a C_{mLT} se mají stanovit v závislosti na průběhu momentu mezi příslušnými body podepření následovně:

Součinitel:	osa ohybu:	body podepřené ve směru:
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

Posouzení sloupu – Interakce tlak + ohyb

- Interakční součinitele
 - Dochází ke klopení → prut je náchylný ke zkroucení
 - Stanovit k_{yy} a k_{zy}
 - Vztahy (sloupce) podle třídy průřezu (pružně / plasticky)

 Tabulka B.1 – Interakční součinitele k_{ij} pro pruty, které nejsou náchylné ke zkroucení

Interakční součinitele	Typ průřezu	Předpoklady navrhování	
		Pružnostní návrh – průřezy třídy 3 a 4	Plasticitní návrh – průřezy třídy 1 a 2
k_{yy}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	I průřezy	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	pravoúhlé duté průřezy	$\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Pro I a H-průřezy a pro pravoúhlé duté průřezy namáhané osovým tlakem a rovinným ohybem $M_{y,Ed}$ může být $k_{zy} = 0$.

 Tabulka B.2 – Interakční součinitele k_{ij} pro pruty, které jsou náchylné ke zkroucení

Interakční součinitele	Předpoklady navrhování	
	Pružnostní návrh – průřezy třídy 3 a 4	Plasticitní návrh – průřezy třídy 1 a 2
k_{yy}	k_{yy} z tabulky B.1	k_{yy} z tabulky B.1
k_{yz}	k_{yz} z tabulky B.1	k_{yz} z tabulky B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ <p>pro $\bar{\lambda}_z < 0,4$:</p> $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} z tabulky B.1	k_{zz} z tabulky B.1

V tomto a dalších jmenovatelích je
 $\chi_i \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} = N_{b,Rd,i}$ (již spočítáno)

Posouzení sloupu – Interakce a smyk

- Interakční rovnice

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd,y}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd,y}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

- Smyk

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \geq V_{Ed,z}$$

- Kritérium malého smyku

$$\frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,Rd,z}} \leq 0,5$$

Posouzení příčle

- Zatřídít průřez
 - Ručně / Tabulky
 - Konzervativně tlak a ohyb zvlášť

Průřezy IPE

	G	h	b	t _w	t _f	r	d	A	A _{v,z}	I _y	W _y	W _{ply}	i _y	I _z	W _z	W _{pl,z}	i _z	I _t	I _w	ohyb				tlak							
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	10 ⁴ mm ⁴	10 ³ mm ³	10 ³ mm ³	mm	10 ⁴ mm ⁴	10 ⁶ mm ⁶	10 ³ mm ³	mm	10 ⁴ mm ⁴	10 ⁶ mm ⁶	S235	S275	S355	S460	S235	S275	S355	S460				
IPE 80	6,0	80	46	3,8	5,2	5	59,6	764	358	80,14	20,03	23,22	32,4	8,489	3,691	5,818	10,5	0,6977	118,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	IPE 80
IPE 100	8,1	100	55	4,1	5,7	7	74,6	1032	509	171,0	34,20	39,41	40,7	15,92	5,789	9,146	12,4	1,202	351,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	IPE 100
IPE 120	10,4	120	64	4,4	6,3	7	93,4	1321	631	317,8	52,96	60,73	49,0	27,67	8,646	13,58	14,5	1,735	889,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	IPE 120
IPE 140	12,9	140	73	4,7	6,9	7	112,2	1643	764	541,2	77,32	88,34	57,4	44,92	12,31	19,25	16,5	2,447	1981	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	IPE 140
IPE 160	15,8	160	82	5,0	7,4	9	127,2	2009	966	869,3	108,7	123,9	65,8	68,31	16,66	26,10	18,4	3,604	3959	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	IPE 160
IPE 180	18,8	180	91	5,3	8,0	9	146,0	2395	1125	1317	146,3	166,4	74,2	100,9	22,16	34,60	20,5	4,790	7431	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	IPE 180
IPE 200	22,4	200	100	5,6	8,5	12	159,0	2848	1400	1943	194,3	220,6	82,6	142,4	28,47	44,61	22,4	6,980	12990	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	IPE 200
IPE 220	26,2	220	110	5,9	9,2	12	177,6	3337	1588	2772	252,0	285,4	91,1	204,9	37,25	58,11	24,8	9,066	22670	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	1	IPE 220
IPE 240	30,7	240	120	6,2	9,8	15	190,4	3912	1914	3892	324,3	366,6	99,7	283,6	47,27	73,92	26,9	12,88	37390	1	1	1	1	1	1	1	2	2	4	1	IPE 240
IPE 270	36,1	270	135	6,6	10,2	15	219,6	4595	2214	5790	428,9	484,0	112	419,9	62,20	96,95	30,2	15,94	70580	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	1	IPE 270
IPE 300	42,2	300	150	7,1	10,7	15	248,6	5381	2568	8356	557,1	628,4	125	603,8	80,50	125,2	33,5	20,12	125900	1	1	1	1	1	2	2	4	4	1	IPE 300	
IPE 330	49,1	330	160	7,5	11,5	18	271,0	6261	3081	11770	713,1	804,3	137	788,1	98,52	153,7	35,5	28,15	199100	1	1	1	1	1	2	3	4	4	1	IPE 330	
IPE 360	57,1	360	170	8,0	12,7	18	298,6	7273	3514	16270	903,6	1019	150	1043	122,8	191,1	37,9	37,32	313600	1	1	1	1	1	2	3	4	4	1	IPE 360	
IPE 400	66,3	400	180	8,6	13,5	21	331,0	8446	4269	23130	1156	1307	165	1318	146,4	229,0	39,5	51,08	490000	1	1	1	1	1	3	3	4	4	1	IPE 400	
IPE 450	77,6	450	190	9,4	14,6	21	378,8	9882	5085	33740	1500	1702	185	1676	176,4	276,4	41,2	66,87	791000	1	1	1	1	1	3	4	4	4	1	IPE 450	
IPE 500	90,7	500	200	10,2	16,0	21	426,0	11550	5987	48200	1928	2194	204	2142	214,2	335,9	43,1	89,29	1249000	1	1	1	1	1	3	4	4	4	1	IPE 500	
IPE 550	105,5	550	210	11,1	17,2	24	467,6	13440	7234	67120	2441	2787	223	2668	254,1	400,5	44,5	123,2	1884000	1	1	1	1	1	4	4	4	4	1	IPE 550	
IPE 600	122,4	600	220	12,0	19,0	24	514,0	15600	8378	92080	3069	3512	243	3387	307,9	485,6	46,6	165,4	2846000	1	1	1	1	1	4	4	4	4	1	IPE 600	

Posouzení příčle – Vzpěr

- Vzpěrné délky
 - Globální analýza II. řádem s imperfekcemi soustavy $\rightarrow L_{cr,y} = L$
 - K měkké ose příčel příčně podepřena $\rightarrow L_{cr,z} = 0 \rightarrow \chi_z = 1,0$

- Štíhlost prutu

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y}$$

- Srovnávací štíhlost

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

- Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1}$$

Posouzení příčle – Vzpěr

- Přřazení křivky vzpěrnosti
 - Tabulky
 - Rozepsat do úkolu !!!
- Stanovit součinitele vzpěrnosti χ_y
 - Ručně
 - Tabulky
- Vzpěrná únosnost

$$N_{b,Rd,y} = \chi_y A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \geq N_{Ed}$$

$$N_{b,Rd,z} = N_{Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \geq N_{Ed}$$

Tabulka 6.2 – Přřazení křivek vzpěrné pevnosti k průřezům

Průřez	Meze	Vybočení kolmo k ose	Křivka vzpěrné pevnosti	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Válcované průřezy 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a	a ₀
		z-z	b	a ₀
	40 mm < $t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
		z-z	c	a
$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	c	
	z-z	d	c	
Svarované průřezy 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	b
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y	c	c
Duté průřezy 	válcované za tepla	všechny	a	a ₀
	tvarované za studena	všechny	c	c
Svarované duté průřezy 	všechny průřezy kromě níže uvedených výjimek	všechny	b	b
	tlusté svary: $a > 0,5 t_f$ $b / t_w < 30$ $h / t_w < 30$	všechny	c	c
U, T a plně průřezy 		všechny	c	c
Úhelníky 		všechny	b	b

Posouzení příčle – Klopení

■ Kritický moment

■ Určí se pro následující okrajové podmínky

- Délka spodní tlačené pásnice (nepodepřena proti klopení) v oblasti rámového rohu
 - V řešeném příkladu $L^- \rightarrow$ Odměřit

- Součinitel vzpěrné délky popisující okrajové podmínky uložení v ohybu (pootočení k ose z-z)

- $k_z = 0,5$ (pro vetknutí obou konců)
- $k_z = 1,0$ (pro kloubové uložení obou konců)

Řešený příklad???

Nosník příčně podepřen

- Součinitel vzpěrné délky popisující okrajové podmínky uložení v ohybu (pootočení k ose y-y)

- $k_y = 0,5$ (pro vetknutí obou konců)
- $k_y = 1,0$ (pro kloubové uložení obou konců) – řešený příklad

- Součinitel vzpěrné délky popisující okrajové podmínky uložení v kroucení

- $k_w = 0,5$ (bráněno deplanaci)
- $k_w = 1,0$ (není bráněno deplanaci) – řešený příklad

■ Bezrozměrný parametr kroucení

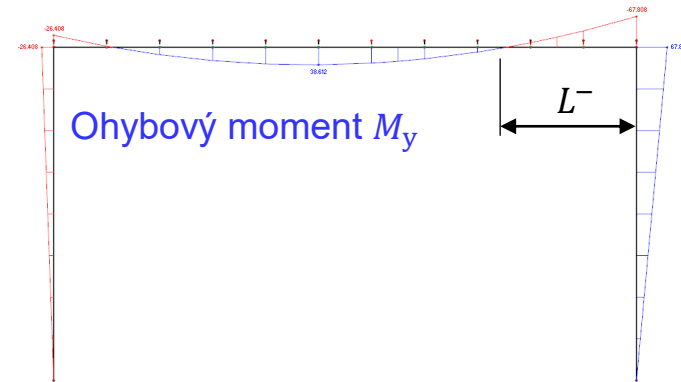
$$K_{wt} = \frac{\pi}{k_w L_{LT}} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}}$$

I_w – výsečový moment setrvačnosti

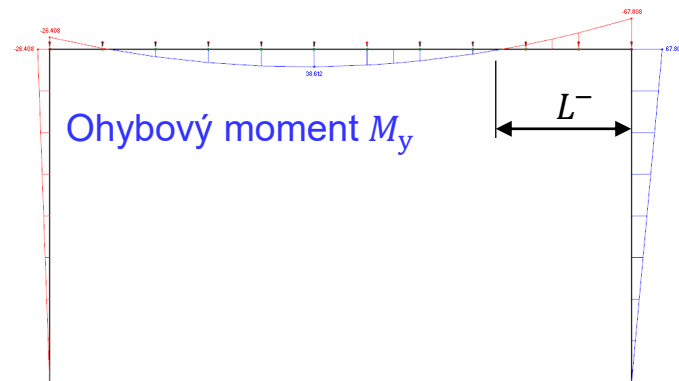
I_t – moment tuhosti v prostém kroucení

E – modul pružnosti oceli (210 000 MPa)

G – modul pružnosti oceli ve smyku (80 700 MPa)



Posouzení příčle – Klopení



■ Kritický moment

■ Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g)^2} - (C_2 \zeta_g)$$

- C_1 je součinitel závisející na průběhu momentu a podmínkách uložení konců

$$\bullet C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \kappa_{wt} \leq C_{1,1}$$

- C_2 je viz C_1 + zohlednění symetrie průřezu ψ_f

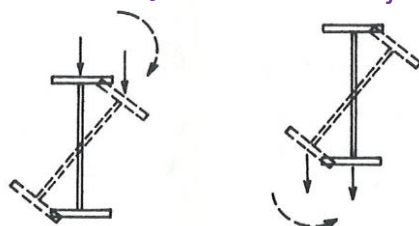
$$\psi_f = 0 \text{ (dvojose sym. průřez)}$$

- Bezrozměrný parametr působíště zatížení

$$\zeta_g = \frac{\pi z_g}{k_z L_{LT}} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad z_g = -\frac{h_{IPE}}{2}$$

Destabilizující

Stabilizující



Tabulka NB.3.2 – Hodnoty součinitelů C_1 , C_2 a C_3 pro různé případy příčného zatížení v závislosti na hodnotě součinitelů k_y , k_z , k_w a součinitelů ψ_1 a κ_{wt}

Zatížení a podmínky podepření	Součinitele vzpěrné délky			Hodnoty součinitelů							
	k_y	k_z	k_w	C_1 ¹⁾		C_2			C_3		
				$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	\perp $\psi_1 = -1$	\parallel $-0,9 \leq \psi_1 \leq 0$	\parallel $\psi_1 = 1$	\perp $\psi_1 = -1$	\parallel $-0,9 \leq \psi_1 \leq 0$	\parallel $\psi_1 = 1$
	1	1	1	1,13	1,13	0,33	0,46	0,50	0,93	0,53	0,38
	1	1	0,5	1,13	1,23	0,33	0,39	0,50	0,93	0,81	0,38
	1	0,5	1	0,95	1,00	0,25	0,41	0,40	0,84	0,48	0,44
	1	0,5	0,5	0,95	0,97	0,25	0,31	0,40	0,84	0,67	0,44
	1	1	1	1,35	1,36	0,52	0,55	0,42	1,00	0,41	0,31
	1	1	0,5	1,35	1,45	0,52	0,58	0,42	1,00	0,67	0,31
	1	0,5	1	1,03	1,09	0,40	0,45	0,42	0,80	0,34	0,31
	1	0,5	0,5	1,03	1,07	0,40	0,44	0,42	0,80	0,52	0,31
						$\psi_1 = -1$	$-0,5 \leq \psi_1 \leq 0$	$\psi_1 = 1$	$\psi_1 = -1$	$-0,5 \leq \psi_1 \leq 0$	$\psi_1 = 1$
	0,5	1	1	2,58	2,61	1,00	1,56	0,15	1,00	-0,86	-1,99
	0,5	0,5	1	1,49	1,52	0,56	0,90	0,08	0,61	-0,52	-1,20
	0,5	0,5	0,5	1,49	1,75	0,56	0,83	0,08	0,61	0,00	-1,20
	0,5	1	1	1,68	1,73	1,20	1,39	0,07	1,15	-0,72	-1,35
	0,5	0,5	1	0,94	0,96	0,69	0,76	0,03	0,64	-0,41	-0,76
	0,5	0,5	0,5	0,94	1,06	0,69	0,84	0,03	0,64	-0,07	-0,76

POZNÁMKY:

¹⁾ $C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \kappa_{wt} \leq C_{1,1}$ ($C_1 = C_{1,0}$ pro $\kappa_{wt} = 0$, $C_1 = C_{1,1}$ pro $\kappa_{wt} \geq 1$).

²⁾ Parametr ψ_1 se vztahuje ke středu rozpětí.

³⁾ Hodnoty kritického momentu M_{cr} se vztahují k průřezu, kde působí M_{max} .

!!! TAKHLE TO DĚLAT NEBUDEME !!! 31

Posouzení příčle – Klopení

■ Kritický moment

■ Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g)^2} - (C_2 \zeta_g)$$

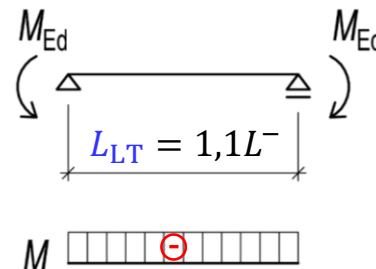
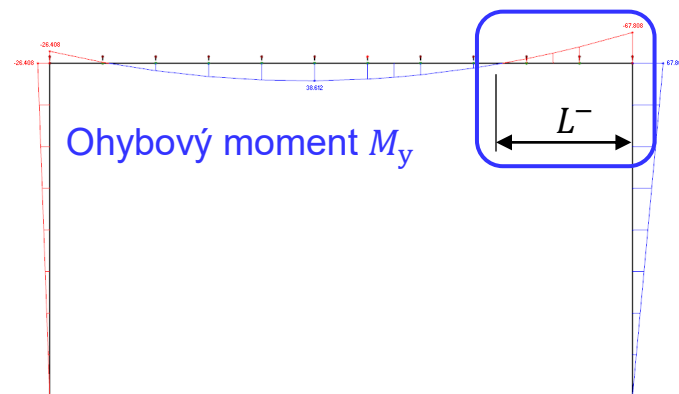
- C_1 je součinitel závisející na průběhu momentu a podmínkách uložení konců

- $C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0})\kappa_{wt} \leq C_{1,1}$

- Alternativně pro $k_z = 1,0$

$$C_1 = (0,31 + 0,428\psi + 0,262\psi^2)^{-0,5}$$

■ Inženýrský přístup



Tabulka NB.3.1 – Hodnoty součinitelů C_1 a C_2 při zatížení prutu koncovými momenty v závislosti na hodnotě součinitele k_z a součinitelů ψ_1 a κ_{wt}

Součinitel uložení konců prutu v rovině ohybu $k_y = 1,0$, v kroucení $k_{\omega} = 1,0$

Tvar momentového obrazce Poměr koncových momentů ψ	k_z 2)	Hodnoty součinitelů							
		C_1 1)		C_2					
		$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	$\psi_1 = -1$ $\zeta \perp \zeta \top$	$-0,9 \leq \psi_1 \leq 0$ $\zeta \top \zeta \top$	$0 \leq \psi_1 \leq 0,9$ $\zeta \top \zeta \top$	$\psi_1 = 1$ $\zeta \top \zeta \perp$		
$M_{cr} \psi = +1$	1,0	1,00	1,00	1,00					
$M_{cr} \psi = +3/4$	0,7L	1,02	1,10	1,02		1,00			
	0,7R	1,02	1,10	1,02		1,00			
	0,5	1,00	1,13	1,02					
	1,0	1,14	1,14	1,00					
$M_{cr} \psi = +1/2$	0,7L	1,21	1,31	1,05		1,00			
	0,7R	1,11	1,20	1,00					
	0,5	1,14	1,29	1,02					
	1,0	1,31	1,32	1,15		1,00			
$M_{cr} \psi = +1/4$	0,7L	1,48	1,62	1,16		1,00			
	0,7R	1,21	1,32	1,00					
	0,5	1,31	1,48	1,15		1,00			
$M_{cr} \psi = 0$	0,7L	1,85	2,08	1,80		1,00			
	0,7R	1,33	1,47	1,00					
	0,5	1,52	1,73	1,35		1,00			
	1,0	1,77	1,85	1,47		1,00			
	0,7L	2,33	2,68	2,00		1,42		1,00	
	0,7R	1,45	1,59	1,00					
	0,5	1,75	2,03	1,50		1,00			

Posouzení příčle – Klopení

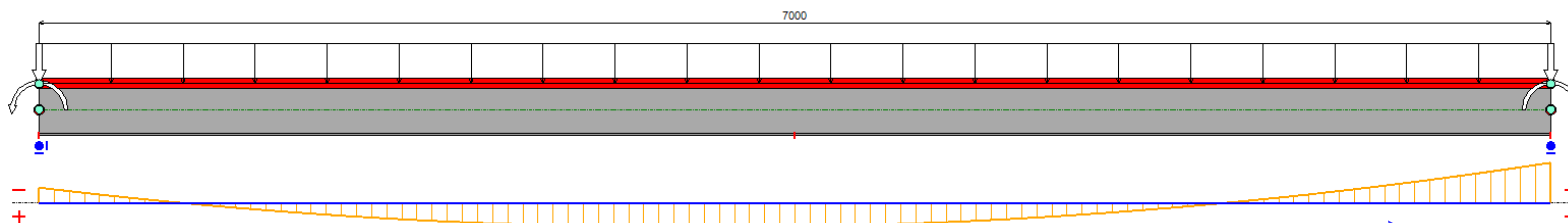
■ Kritický moment

■ Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L_{LT}}$$

■ Alternativně pomocí LTBeam

- Délka prvku
- Definovat průřez na obou koncích
- Příčné podepření na obou koncích
- Liniová podpora horní pásnice – směr v , zadat vzdálenost od středu smyku
- Uložení kloubové
- Zatížení koncovými momenty
- Zatížení návrhovým liniovým zatížením – posunout působíště na horní pásnici



Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	x (Mmax) [mm]	$N_{max,cr}$ [kN] (*)	x (Nmax) [mm]
1	2.875	-186.89	7000	0	7000

Ověřit průběh ohybového momentu s výsledky softwaru

Posouzení příčle – Klopení

- Poměrná štíhlost při klopení

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}$$

Pokud $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ nosník neklopí

Průřezový modul podle třídy průřezu

- Křivka klopení pro válcované I profily

$$\frac{h}{b} \leq 2 \quad \text{křivka „b“} \quad \alpha_{LT} = 0,34$$

$$\frac{h}{b} > 2 \quad \text{křivka „c“} \quad \alpha_{LT} = 0,49$$

- Součinitel klopení

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1,0 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

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

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\beta = 0,75$$

- Ohybová únosnost

$$M_{b,Rd,y} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y \geq M_{y,Ed}$$

Posouzení příčle – Interakce tlak + ohyb

■ Součinitele ekvivalentních ohybových momentů

■ Rovnoměrné zatížení

- Když $M_{ED,max}$ v kraji $\rightarrow \alpha_s$
- Když $M_{ED,max}$ v poli $\rightarrow \alpha_h$

Tabulka B.3 – Součinitele C_m ekvivalentního konstantního momentu v tabulkách B.1 a B.2

Průběh momentu	Rozsah	C_{my} a C_{mz} a C_{mLT}		
		rovnoměrné zatížení	soustředěné zatížení	
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$		
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)^{NP)}$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu při vybočení s posuvem styčniců se má uvažovat $C_{my} = 0,9$ nebo $C_{mz} = 0,9$.

C_{my} , C_{mz} a C_{mLT} se mají stanovit v závislosti na průběhu momentu mezi příslušnými body podepření následovně:

Součinitel:	osa ohybu:	body podepřené ve směru:
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

M_h Hlavní krajní moment
 M_v Vedlejší krajní moment
 M_s Moment v poli

Znaménka \pm hrají roli

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h}$$

$C_{my}; C_{mLT}$

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s}$$

$C_{my}; C_{mLT}$

$$\psi = \frac{M_v}{M_h}$$

Posouzení příčle – Interakce tlak + ohyb

■ Interakční součinitele

- Dochází ke klopení → prut je náchylný ke zkroucení
- Stanovit k_{yy} a k_{zy}
- Vztahy (sloupce) podle třídy průřezu (pružně / plasticky)

 Tabulka B.1 – Interakční součinitele k_{ij} pro pruty, které nejsou náchylné ke zkroucení

Interakční součinitele	Typ průřezu	Předpoklady navrhování	
		Pružnostní návrh – průřezy třídy 3 a 4	Plasticitní návrh – průřezy třídy 1 a 2
k_{yy}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	I průřezy, pravoúhlé duté průřezy	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	I průřezy	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	pravoúhlé duté průřezy	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Pro I a H-průřezy a pro pravoúhlé duté průřezy namáhané osovým tlakem a rovinným ohybem $M_{y,Ed}$ může být $k_{zy} = 0$.

 Tabulka B.2 – Interakční součinitele k_{ij} pro pruty, které jsou náchylné ke zkroucení

Interakční součinitele	Předpoklady navrhování	
	Pružnostní návrh – průřezy třídy 3 a 4	Plasticitní návrh – průřezy třídy 1 a 2
k_{yy}	k_{yy} z tabulky B.1	k_{yy} z tabulky B.1
k_{yz}	k_{yz} z tabulky B.1	k_{yz} z tabulky B.1
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ <p>pro $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $\lambda_z = 0$</p> $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} z tabulky B.1	k_{zz} z tabulky B.1

V tomto a dalších jmenovatelích je $\chi_i \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} = N_{b,Rd,i}$ (již spočítáno)

Posouzení příčle – Interakce a smyk

- Interakční rovnice

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd,y}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd,y}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0$$

- Smyk

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \geq V_{Ed,z}$$

- Kritérium malého smyku

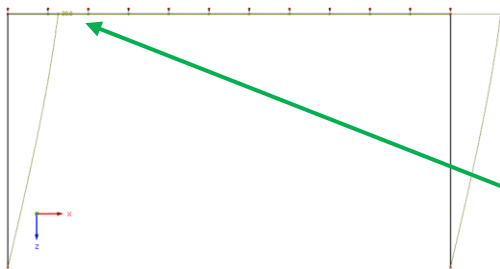
$$\frac{V_{Ed,z}}{V_{pl,Rd,z}} \leq 0,5$$

Iterační proces a porovnání α_{cr}

- Konstrukce navržena efektivně na MSP a
 - MSÚ vyhovuje → návrh je hotov
 - MSÚ nevyhovuje → upravit průřezy a posoudit znovu

- Stanovit α_{cr} pro finální konstrukci
 - Software
 - Ověřit že vlastní tvar odpovídá patrovému posunu (slide 12)
 - Zjednodušeně ručně

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)$$



H_{Ed} Návrhové vodorovné zatížení ($H_{q,d} + 1,35H_{\phi}$)

V_{Ed} Návrhové svislé zatížení ($2F_{g,d} + f_{g,d}L$)

h Výška konstrukce

$\delta_{H,Ed}$ Vodorovný posun od návrhového vodorovného zatížení H_{Ed}
(vodorovný posun u_x od **KZ2** – software)

- Porovnat hodnoty z obou postupů

Děkuji za pozornost

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze

