

Příloha A

Stanovení zatížení na konstrukci a vyhodnocení MKP
Rozhledna s větrnou elektrárnou

Obsah

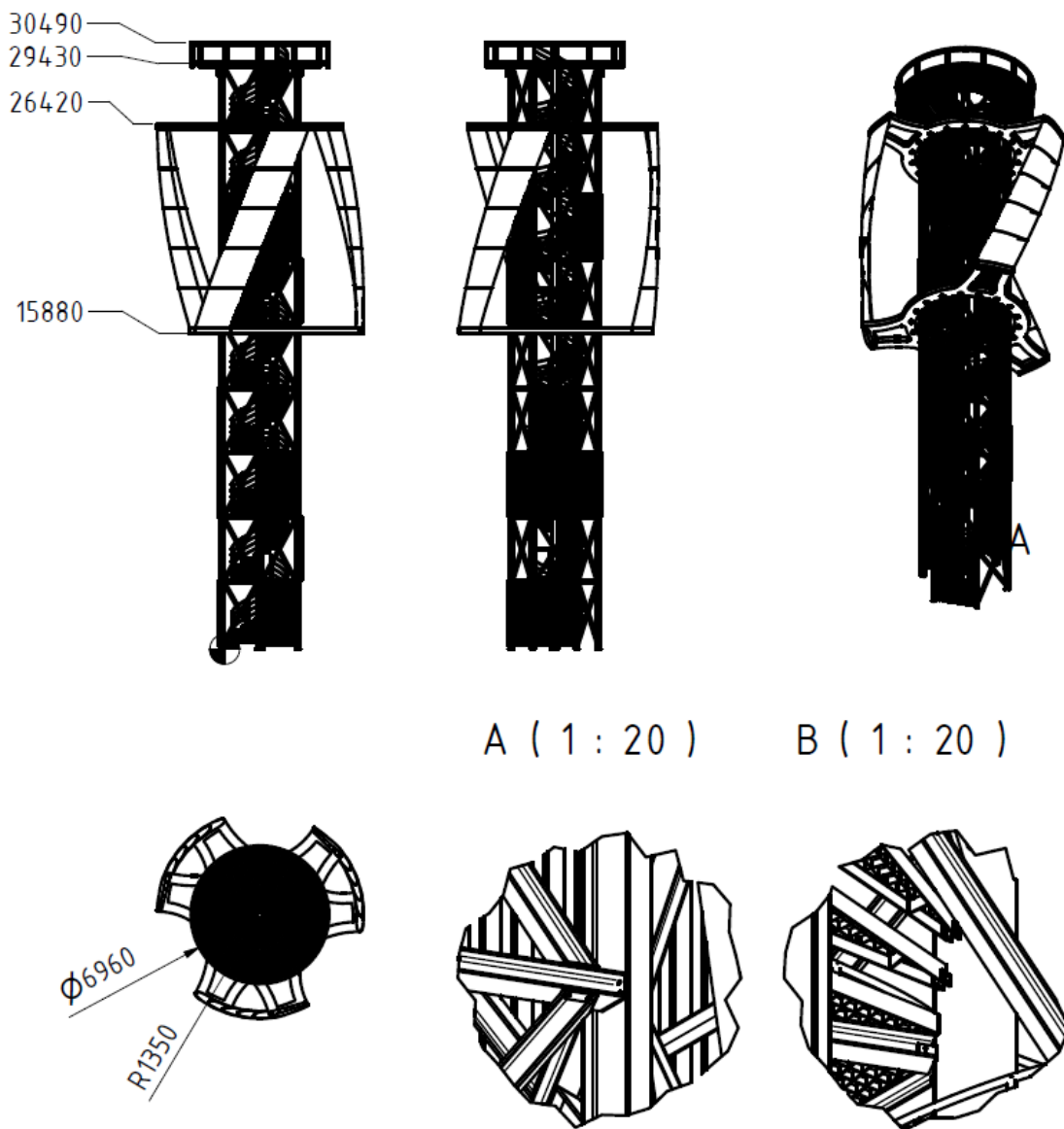
Příloha A.....	1
1. Úvod.....	3
1.1. Typologie věže.....	3
1.1. Použité materiály.....	4
1.2. Použité normy.....	4
2. Výpočet zatížení.....	4
2.1. Rotor.....	4
2.1.1. Vlastní hmotnost.....	5
2.1.2. Vítr.....	5
2.1.3. Odstředivá síla od nevyvážku.....	5
2.1.4. Brždění.....	5
2.1.5. Zatížení sněhem.....	5
2.1.6. Užité zatížení.....	5
2.2. Příhradová konstrukce.....	6
2.2.1. Zatížení sněhem.....	6
2.2.2. Užité zatížení.....	6
2.2.3. Vítr.....	6
2.2.3.1. Stanovení součinitele konstrukce podle přílohy C.....	7
3. Zavedení imperfekcí.....	14
4. Působení II řádu – nelineární analýza.....	14
5. Zatěžovací stavy.....	14
6. Kombinace zatěžovacích stavů.....	14
7. Výsledky numerické analýzy konstrukce.....	16
8. Vyhodnocení vnitřních sil navrhovaných detailů.....	17
8.1. Základová patka.....	17
8.2. Spojení sloupu.....	18
8.3. Křížení zavětrování.....	18
8.4. Obvodový rám.....	18
8.5. Konzola plošiny.....	19

1. Úvod

1.1. Typologie věže

Základovou konstrukci věže tvoří základová deska podepřená mikropiloty. Konstrukce věže bude spojena se základovou deskou přes kotevní příruby IPE nosníků. Toto napojení je v této fázi návrhu uvažováno jako kloubové.

Konstrukce příhradové věže se sestává z obvodového prstence tvořeného IPE nosníky. Profil IPE byl zvolen z důvodu provedení konstrukce styků. Tyto nosníky jsou ztuženého po výšce patra (3,24 m) ztužujícím prstencem z profilu HEB. Zároveň je každé pole zavětřováno příčnými HEB nosníky. Ve středu konstrukce je umístěn kruhový profil, na který je zavěšeno schodiště.



Obrázek 1, typologie věže.

1.1. Použité materiály

Ocelová konstrukce věže:

Pro všechny konstrukční prvky je uvažována konstrukční ocel S355 J2 G3

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Schodišťové stupně, podesty a vyhlídková plošina:

Pro všechny prvky je uvažována konstrukční ocel S235

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Pro lopatky je uvažováno využití sklolaminátu o vlastnostech:

$$f_y = 130 \text{ MPa}$$

$$E = 120 \text{ GPa}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

Pro základové konstrukce je uvažován beton C 25/30 o vlastnostech:

$$f_{c,k} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{c,tm} = 2,2 \text{ MPa}$$

$$E = 30 \text{ GPa}$$

$$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$$

Pro obložení je uvažováno modřínové dřevo.

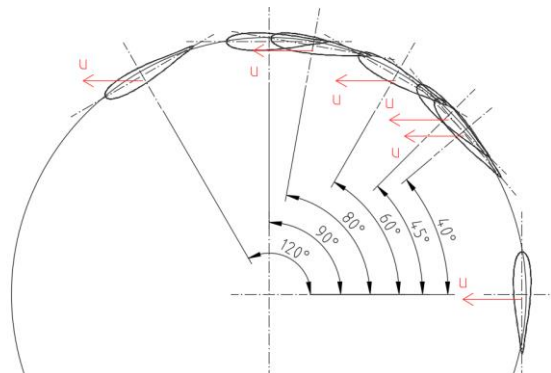
1.2. Použité normy

ČSN EN 1991-1-4	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1–4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.
ČSN EN 1993-1-1	Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
ČSN EN 1993-1-8	Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků.
ČSN 74 3305	Ochranná zábradlí.

2. Výpočet zatížení

2.1. Rotor

Zatížení bude uvažováno pro jednotlivé směry. Bude uvažováno 5 kombinací zatížení:



Obrázek 2, směry zatížení.

CO1 – Zastavená konstrukce.

Maximální zatížení větrem, maximální posun, námraza, vlastní hmotnost, sníh.

CO2 – Rotující konstrukce při maximálních otáčkách.

Zatížení větrem při rychlosti 10 m/s, příslušný posun, odstředivá síla lopatek, odstředivá síla nevyvážku.

CO3 – Brždění

Zatížení větrem při rychlosti 10 m/s, příslušný posun, setrvačná síla, odstředivá síla, nevyvážek.

CO4 – Nevyvážek – námraza + nevyvážek pouze na jedné části konstrukce, maximální vítr.

Tento zatěžovací stav primárně ovlivňuje kotvení turbíny ke konstrukci. Na zatížení lopatky má stejný vliv, jako ZS3.

CO5 – Montáž konstrukce.

Zatížení se bude do návrhu konstrukce promítat rozděleně pro dané rotační nosné rámy.

Posouzení konstrukce bude probíhat pomocí programu SCIA Engineer.

2.1.1. Vlastní hmotnost

Vlastní hmotnost je dle modelu konstrukce stanovena na 12,08 t. Toto zatížení je rozloženo rovnoměrně do obou rámu.

2.1.2. Vítr

Vítr je uvažován dle numerického modelování pro jednotlivé směry.

2.1.3. Odstředivá síla od nevyvážku

Odstředivou sílu způsobuje rotace konstrukce. Jedná se o hmotnost konstrukce a hmotnost nevyvážku. Pro limitní případ uvažuji hmotu nevyvážku ve středu lopatky.

2.1.4. Brždění

Uvažuji při zatěžovacím stavu, kdy brzdím lopatky z počáteční rychlosti 10 m/s. Brždění $0,2 \text{ m/s}^2$. Namáhání působí ve směru tečny na kružnici, tedy kolmo na tužší osu. Uvažuji ztížení při brždění pouze jednoho prstence. Návrh konstrukce uvažuje brždění obou prstenců.

2.1.5. Zatížení sněhem

V zimních měsících je oblast trvale pokryta sněhovou pokrývkou. Hodnota zatížení sněhem dle ČHMÚ je stanovena pro oblast stavby (49.8423 z.š., 14.7286 z.d. a nadmořskou výšku 527 m.n.m.) jako $s_k = 1,06 \text{ kPa}$. Uvažováno zatížení sněhem na všech vodorovných plochách turbíny ($18,7 \text{ m}^2$) pro zastavenou konstrukci.

2.1.6. Užité zatížení

Uvažováno na vodorovných plochách turbíny $1,0 \text{ kN/m}^2$ pro servis a údržbu na zastavené konstrukci.

Tabulka 1, zatížení rotoru.

Hodnoty jsou v charakteristických hodnotách zatížení.

Námraza - uvedena s větrem

Typ zatížení	Směr	Natočení	ZS	1			2			3		
Rozložení				Celkem	Spodní rám	Horní rám	Celkem	Spodní rám	Horní rám	Celkem	Spodní rám	Horní rám
Vlastní hmotnost	Svislé zatížení	0-360	[kN]	120,8	60,4	60,4	120,8	60,4	60,4	120,8	60,4	60,4
Vítr	Podélné	0	[kN]	4,0	2,0	2,0	1,6	0,8	0,8	1,6	0,8	0,8
		45	[kN]	2,7	1,3	1,3	1,1	0,5	0,5	1,1	0,5	0,5
		60	[kN]	2,9	1,4	1,4	1,2	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6
		90	[kN]	5,0	2,5	2,5	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
		120	[kN]	4,0	2,0	2,0	1,6	0,8	0,8	1,6	0,8	0,8
		180	[kN]	3,0	1,5	1,5	1,2	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6
		240	[kN]	4,0	2,0	2,0	1,6	0,8	0,8	1,6	0,8	0,8
		280	[kN]	2,7	1,4	1,4	1,1	0,6	0,6	1,1	0,6	0,6
	320	[kN]	4,5	2,2	2,2	1,8	0,9	0,9	1,8	0,9	0,9	
	Příčné	0	[kN]	-1,7	-0,9	-0,9	-0,7	-0,4	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4
		45	[kN]	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
		60	[kN]	1,7	0,9	0,9	0,7	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4
		90	[kN]	1,0	0,5	0,5	0,4	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
		120	[kN]	-1,7	-0,9	-0,9	-0,7	-0,4	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4
		180	[kN]	1,7	0,9	0,9	0,7	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4
		240	[kN]	-1,7	-0,9	-0,9	-0,7	-0,4	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4
280		[kN]	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	
320	[kN]	2,5	1,2	1,2	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5		
Odstředivá síla nevyvážku	Od středu	0-360	[kN]	0	0	0	10,3	5,15	5,15	10,3	5,15	5,15
Setrvačná síla brždění	Tečné	0	[kN]	0	0	0	0	0	0	1,407	1,407	0
Sníh na vodorovných plochách	Svislé zatížení	0-360	[kN]	19,8	9,9	9,9	0	0	0	0	0	0
Užitné zatížení*	Svislé zatížení	0-360	[kN]	18,7	9,4	9,4	0	0	0	0	0	0

*užitné zatížení se započítává pouze pro montážní ZS.

2.2. Příhradová konstrukce

2.2.1. Zatížení sněhem

V zimních měsících je oblast trvale pokryta sněhovou pokrývkou. Hodnota zatížení sněhem dle ČHMÚ je stanovena pro oblast stavby (49.8423 z.š., 14.7286 z.d. a nadmořskou výšku 527 m.n.m.) jako $s_k = 1,06$ kPa. Uvažováno zatížení sněhem na všech podestách a na vrcholu konstrukce.

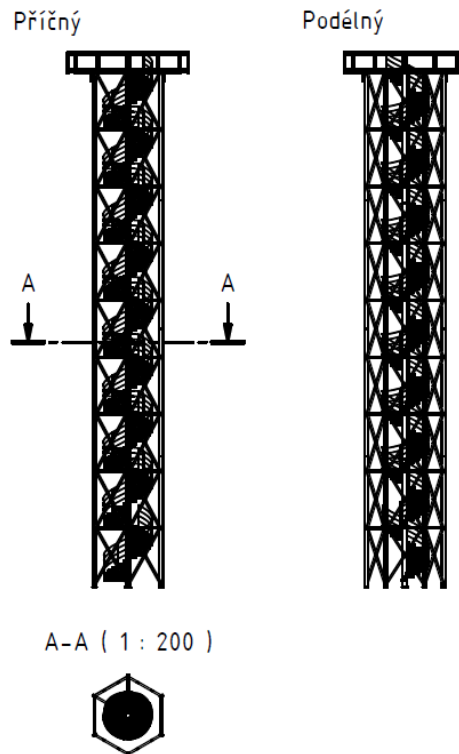
2.2.2. Užitné zatížení

Rozhledna je stavba určená především pro zatížení kumulací návštěvníků. Konstrukce je zatříděna do kategorie C5, hodnota rovnoměrného spojitého zatížení je rovna 5 kN/m^2 . Uvažovány dva zatěžovací stavy. Plné užitné zatížení na schodišťových podestách a na vyhlídkové plošině a konstrukce bez užitného zatížení.

2.2.3. Vítr

Zatížení větrem je řešeno pro případ kolmo na tužší a měkčí osu konstrukce. Je uvažováno zatížení na příhradovou konstrukci z úhelníků dle normy ČSN EN 1991-1-4, kapitoly 7.11, příhradové konstrukce. Působíště zatížení je uvažováno do styčnicku ztužujícího prstence. Výška zatěžovacích pásů je tedy zvolena shodně s výškou patra, tedy 3,24 m. Součinitel plnosti

konstrukce má hodnotu 50 % z důvodu zábradlí, schodiště a pohledových panelů, součinitel c_{s,c_d} byl vypočten a má hodnotu 1,223. Základní rychlost větru uvažována jako 27,5 m/s.



Obrázek 3, směry zatížení větrem.

2.2.3.1. Stanovení součinitele konstrukce podle přílohy C

Výška: 29,40 m

Šířka: 4,05 m

Kategorie terénu: III

Součinitel c_{s,c_d} se vypočte podle následujícího vztahu za předpokladu, že platí:

-konstrukce odpovídá jednomu z tvarů na následujícím obrázku: Ano, přibližně odpovídá tvaru A

-je významné pouze kmitání ve směru větru v základním tvaru a tento tvar má konstantní znaménko: Ano

$$c_{s,c_d} = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 * 3,797 * 0,134 * \sqrt{0,638 + 1,179}}{1 + 7 * 0,134} = 1,223$$

z_s = referenční výška

k_p = součinitel maximální hodnoty, definovaný jako poměr maximální hodnoty flukuační složky odezvy a její smerodatné odchylky

I_v = intenzita turbulence

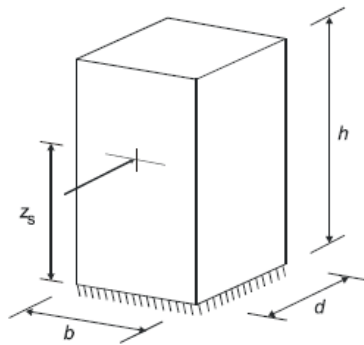
B^2 = součinitel odezvy pozadí

R^2 = rezonanční část odezvy

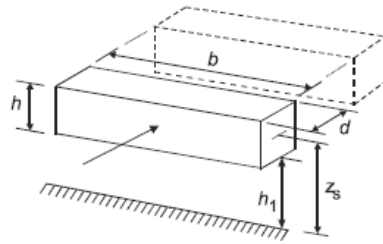
$$z_s = 0,6 * h = 0,6 * 29,4 = 17,64 \text{ m}$$

Tímto výpočtem byl stanoven součinitel c_{s,c_d} vyšší, než dříve uvažovaný součinitel roven 1,0. Zatížení větrem působící na konstrukci bude tedy tímto součinitelem přenásobeno. Nový model bude zatížen již upraveným zatížením. Hodnoty zatížení jsou uvedeny v následující tabulce.

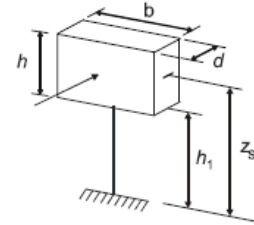
a) vertikální konstrukce, jako jsou pozemní stavby apod.



b) vodorovně orientované stavební konstrukce, jako jsou nosníky apod.



c) bodově působící stavební objekty, jako jsou informační tabule apod.



POZNÁMKA Omezení jsou uvedena také v 1.1(2).

$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min}$$

$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

Obrázek 4, obecné tvary konstrukcí pro výpočet součinitele c_{scd} .

Postup 2 pro stanovení součinitele konstrukce $c_s c_d$ dle přílohy C

- Součinitel odezvy pozadí B^2 :

$$B^2 = \frac{1}{1 + 1,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{b}{L(z_s)}\right)^2 + \left(\frac{h}{L(z_s)}\right)^2 + \left(\frac{b}{L(z_s)} \cdot \frac{h}{L(z_s)}\right)^2}}$$

$$= \frac{1}{1 + 1,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{4,05}{78,4}\right)^2 + \left(\frac{29,4}{78,4}\right)^2 + \left(\frac{4,05}{78,4} \cdot \frac{29,4}{78,4}\right)^2}} = 0,637$$

- Měřítka délky turbulence:

$$L(z_s) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha = 300 \cdot \left(\frac{29,4}{200}\right)^{0,670} = 78,4 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,76 + 0,05 \cdot \ln(z_0) = 0,76 + 0,05 \cdot \ln(0,3) = 0,670$$

- Součinitel k_p dle B.2(3) (ČSN EN 1991-1-4):

$$k_p = \max\left(\frac{\sqrt{2 \cdot \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(vT)}}}{3}\right)$$

$$= \max\left(\frac{\sqrt{2 \cdot \ln(1,466 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(1,466 \cdot 600)}}}{3}\right) = 3,797$$

v = frekvence přechodů s kladnou směrnici

T = doba integrace při stanovení střední rychlosti větru, $T = 600 \text{ s}$

- Frekvence přechodů s kladnou směrnici:

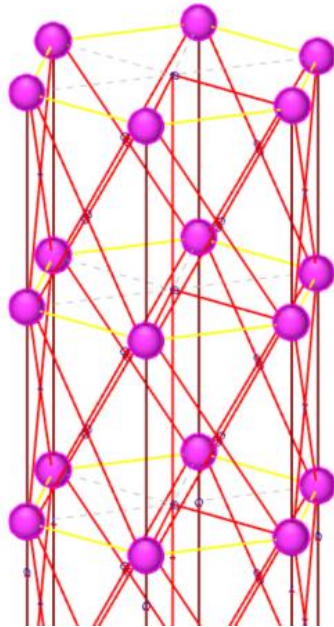
$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1,82 \cdot \sqrt{\frac{1,178}{0,637 + 1,178}} = 1,466$$

- Základní vlastní frekvence konstrukce:

$n_{1,x} = 3,0$ (mezni hodnota, podrobněji viz příloha F, ČSN EN 1991 – 1 – 4)

Základní vlastní frekvence konstrukce byla vygenerována ze SW SCIA Engineer.

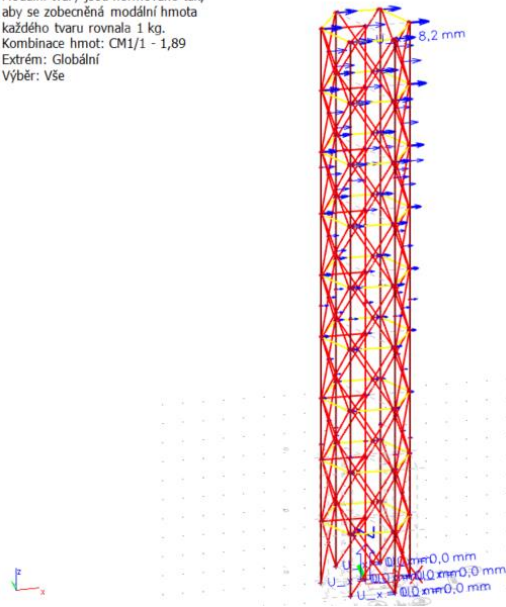
Byly zadány hmoty konstrukce dle vlastní hmotnosti konstrukce. Ta je bez lopatek rovna po zaokrouhlení 20 t. Na obvodový rám v každém patře byla aplikována hmota 20t/10pater = 2 t/patro. Hmota se umístila na každý z vrcholů šestiúhelníku tj 2t/6 = 330 kg.



Obrázek 5, zadané hmoty na konstrukci.

Přemístění uzlů

Hodnoty: U_x
Modální tvary jsou normované tak, aby se zobecněná modální hmota každého tvaru rovnala 1 kg.
Kombinace hmot: CM1/1 - 1,89
Extrém: Globální
Výběr: Vše



Obrázek 6, první vlastní tvar konstrukce.

Bylo spočítáno prvních 10 vlastních tvarů. Základní vlastní frekvence se rovná:

$n_{1,x} = 1,82$ (hodnota vypočtena ze software SCIA Engineer)

- Rezonanční část odezvy:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_L(z_s, n_{1,x}) * R_h(\eta_h) * R_b(\eta_b) = \frac{\pi^2}{2 * 0,181} * 0,652 * 0,12 * 0,549 = 1,179$$

- Celkový logaritmický dekrement útlumu podle přílohy F.5 (ČSN EN 1991-1-4):

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

$$\delta = 0,03 + 0,151 + 0,0 = 0,181$$

δ_s – logaritmický dekrement konstrukčního tlumení v základním tvaru kmitání, dle tabulky F.2 pro ocelové příhradové věže s vysokopevnostními šrouby

$$\delta_s = 0,03$$

δ_a – logaritmický dekrement útlumu od zvláštních zařízení (laděné pohlcovače kmitání apod.)

$$\delta_a = 0,0$$

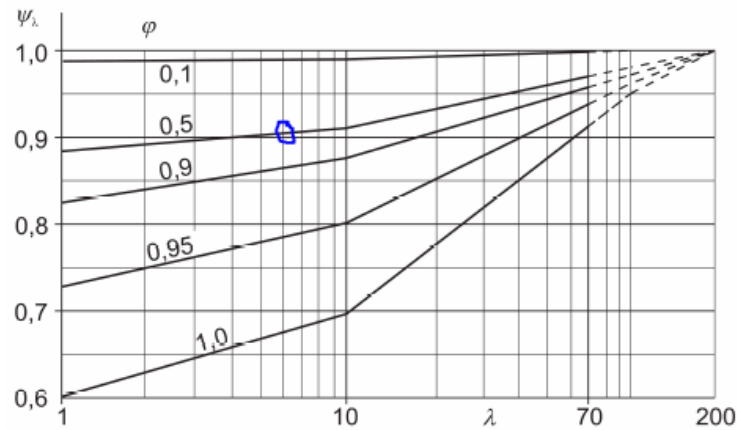
- Logaritmický dekrement aerodynamického útlumu při základním tvaru kmitání:

$$\delta_a = \frac{c_f * \rho * b * v_m(z_s)}{2 * n_1 * m_e} = \frac{1,82 * 1,25 * 4,05 * 31,725}{2 * 1,609 * 600} = 0,151$$

c_f = součinitel síly, dle 7.7

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda = 2 * 0,91 = 1,82$$

- Součinitel koncového efektu:



Graf 1, součinitel koncového efektu.

$$\psi_{\lambda} = 0,91$$

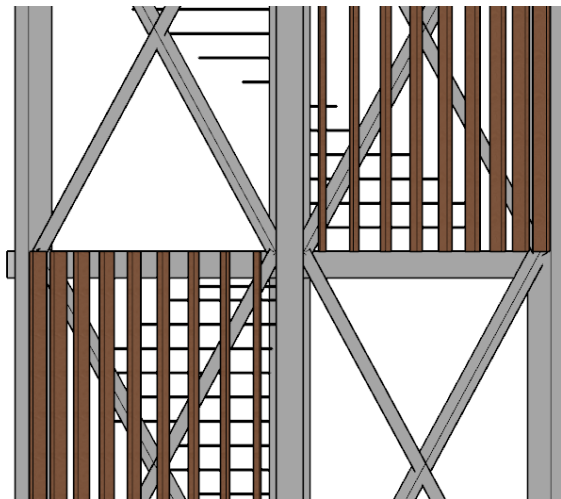
- Efektivní štíhlost určená pro mnohoúhelníkové průřezy:

$$\lambda = 0,9 * \frac{l}{b} = 0,9 * \frac{29,4}{4,05} = 6,53$$

4		<p>Pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 0,7\ell/b$ nebo $\lambda = 70$.</p> <p>Pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = \ell/b$ nebo $\lambda = 70$.</p> <p>Pro mezilehlé hodnoty ℓ se doporučuje použít lineární interpolaci.</p>
---	--	--

Obrázek 7, tabulka 7.16 normy ČSN EN 1991-1-4.

- Součinitel plnosti:



Obrázek 8, pohled na předběžný 3D model konstrukce pro stanovení součinitele plnosti.

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = 0,5$$

- Střední rychlost větru:

$v_m(z_s)$ = střední rychlost větru pro výšku 17,64 m

Tabulka 2, základní hodnoty zatížení větrem pro výšku nad zemí posuzovanou pro součinitel c_{scd} .

výška nad zemí	z	m	17,64		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	q_p	Pa		1218		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	$c_r(z)$			1,269		4.3.2(1)
intenzita turbulence	I_v			0,134		4.4(1)
střední rychlost větru	v_m	m/s		31,725		

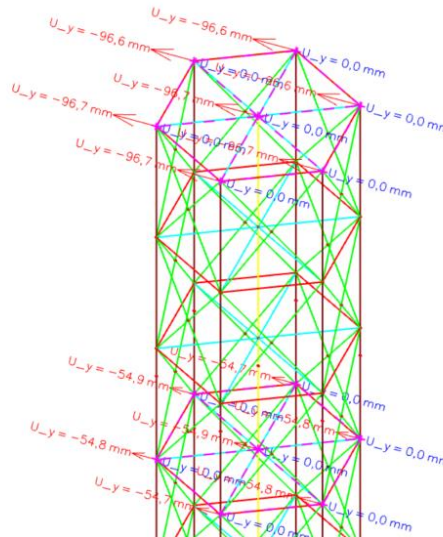
- Základní frekvence:

$n_1 =$ (zjednodušený výpočet pro konzolu s jednou hmotou na konci)

$$n_1 = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{g}{x_1}} = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{9,81}{0,096}} = 1,609$$

$x_1 =$ maximální výchylka horní části věže, určeno z návrhového zatížení modelu konstrukce

Přemístění uzlů
Hodnoty: U_y
Lineární výpočet
Kombinace: Návrhový stav
Extrém: Uzel
Výběr: N42, N48, N101, N102, N105, N107, N109, N111, N113



Obrázek 9, přemístění uzlů pro stanovení součinitele konstrukce.

- Ekvivalentní hmotnost:

$m_e =$ hmotnost na jednotku délky v horní $\frac{1}{3}$ výšce věže (zjednodušení dle F. 4, ČSN EN 1991 – 1 – 4)

$$m_e = 600 \text{ kg}$$

- Výkonová spektrální hustota:

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6,8 * f_L(z, n)}{(1 + 10,2 * f_L(z, n))^{\frac{5}{3}}} = \frac{6,8 * 4,498}{(1 + 10,2 * 4,498)^{\frac{5}{3}}} = 0,652$$

- Jednostranné spektrum rozptylu:

$$f_L(z, n) = n * \frac{L(z)}{v_m(z_s)} = 1,82 * \frac{78,4}{31,725} = 4,498$$

- Aerodynamické admittance:

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 * \eta_h^2} * (1 - e^{-2 * \eta_h}) = \frac{1}{7,759} - \frac{1}{2 * 7,759^2} * (1 - e^{-2 * 7,759}) = 0,1205$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 * \eta_b^2} * (1 - e^{-2*\eta_b}) = \frac{1}{1,069} - \frac{1}{2 * 1,069^2} * (1 - e^{-2*1,069}) = 0,550$$

$$\eta_h = 4,6 * \frac{h}{L(z_s)} * f_L(z, n) = 4,6 * \frac{29,4}{78,4} * 4,498 = 7,759$$

$$\eta_b = 4,6 * \frac{b}{L(z_s)} * f_L(z, n) = 4,6 * \frac{4,05}{78,4} * 4,498 = 1,069$$

Tabulka 3, základní hodnoty zatížení větrem.

Parametr	Označení	Jednotka	Zadaná hodnota	Vypočtená hodnota	Poznámka	kapitola normy, odstavec, poznámka
Maximální dynamický tlak qp						
základní rychlost větru	vb	m/s		27,5		4.2(2)P
výchozí základní rychlost větru	vb,0	m/s	27,5			ČHMÚ - zatížení větrem, NA.4
součinitel ročního období	Cseason	-	1		doporučená hodnota	poznámka 3
součinitel směru větru	Cdir	-	1		doporučená hodnota	poznámka 2
referenční výška	ze	m	29,4			kapitola 7
kategorie terénu					kategorie 3	tabulka 4.1
parametr drsnosti terénu	z0	-	0,3			tabulka 4.1
výška nad zemí	z	m	3,24		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		489		4.5(1)
součinitel terénu	kr	-		0,215		4.3.2(1)
součinitel ortografie	co(z)	-	1		doporučená hodnota	NA.2.13
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,513		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,420		4.4(1)
součinitel turbulence	kl	-	1		doporučená hodnota	NA.2.16
střední rychlost větru	vm	m/s		14,095		
měrná hmotnost vzduchu	ró	kg/m3	1,25		doporučená hodnota	NA.2.18
základní dynamický tlak větru	qb	Pa		472,6563		
výška nad zemí	z	m	6,48		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		679		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,662		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,325		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		18,200		
výška nad zemí	z	m	9,72		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		799		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,749		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,288		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		20,602		
výška nad zemí	z	m	12,96		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		889		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,811		4.3.2(1)

intenzita turbulence	lv			0,266		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		22,306		
výška nad zemí	z	m	16,2		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		961		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,859		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,251		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		23,628		
výška nad zemí	z	m	19,44		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		1022		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,898		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,240		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		24,708		
výška nad zemí	z	m	22,68		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		1074		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,932		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,231		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		25,621		
výška nad zemí	z	m	25,92		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		1120		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,960		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,224		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		26,412		
výška nad zemí	z	m	29,16		referenční výška	
charakteristický maximální dynamický tlak	qp	Pa		1162		4.5(1)
součinitel drsnosti terénu	cr(z)			0,986		4.3.2(1)
intenzita turbulence	lv			0,218		4.4(1)
střední rychlost větru	vm	m/s		27,109		

Tabulka 4, souhrn zatížení na styčníky.

Výška patra	Plocha obrysu	Součinitel plnosti	Referenční plocha	Součinitel	součinitel	maximální dynamický tlak	Celkový tlak	Tlak na styčník
z	A	φ	Aref	cscd	cf	qp(ze)		
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[kN]
1,2	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	489	1361,688	2,5
	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	489	1107,307	2,4
4,44	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	679	1888,28	3,5
	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	679	1535,525	3,4
7,68	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	799	2223,494	4,2
	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	799	1808,116	4,0
10,92	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	889	2473,498	4,6
	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	889	2011,416	4,4
14,16	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	961	2674,37	5,0
	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	961	2174,762	4,8

	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	1022	2843,005	5,3
17,4	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	1022	2311,894	5,1
	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	1074	2988,748	5,6
20,64	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	1074	2430,41	5,3
	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	1120	3117,34	5,8
23,88	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	1120	2534,98	5,6
	14,97	0,5	7,48	1,223	2,275	1162	3232,572	6,0
27,12	13,14	0,5	6,57	1,223	1,85	1162	2628,685	5,8

3. Zavedení imperfekcí

Z důvodu velkého vodorovného zatížení neuvažuji zavedení imperfekcí.

4. Působení II řádu – nelineární analýza

V případě posouzení konstrukce na vliv II řádu by bylo nutné provést nelineární analýzu vybraného zatěžovacího stavu a porovnat ji s daným ZS vypočítaným lineárně. Toto nebylo v rámci návrhu provedeno.

5. Zatěžovací stavy

ZS1 – Vlastní tíha	(G ₀)
ZS2 – Vítr podélný	(W ₁)
ZS3 – Vítr příčný	(W ₂)
ZS4 – Rotor – vlastní hmotnost	(G _{0R})
ZS5 – Rotor – vítr – podélný – lim	(W _{1R-lim})
ZS6 – Rotor – vítr – podélný – prov	(W _{1R-prov})
ZS7 – Rotor – vítr – příčný – lim	(W _{2R-lim})
ZS8 – Rotor – vítr – příčný – prov	(W _{2R-prov})
ZS9 – Rotor – odstředivá síla	(O _R)
ZS10 – Rotor – setrvačná síla	(S _R)
ZS11 – Sníh	(S)
ZS12 – Užité zatížení	(Q)
ZS13 – Rotor – sníh	(S _{nR})
ZS14 – Rotor – užité zatížení	(Q _n)

6. Kombinace zatěžovacích stavů

Kombinace zatěžovacích stavů vycházejí z doporučení dle ČSN EN 1990, TabA1.2(A), Tab.21 pro charakteristické kombinace zatížení.

Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení MSÚ věže:

1.CO – 1,35*G₀

2.CO – 1,35*G₀ + 1,5*Q

- 3.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)
 4.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$ (0,9)
 5.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$ (0,9)
 6.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1$
 7.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2$
 8.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05)
 9.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05)
10.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)
11.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)
 12.CO – $1,0 \cdot G_0$
 13.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q$
 14.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)
 15.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$ (0,9)
 16.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$ (0,9)
 17.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1$
 18.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2$
 19.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05)
 20.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05)
 21.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)
 22.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)

Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení MSÚ věže s rotorem ($v_0=0$ m/s):

- 23.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR}$
 24.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q$
25.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot Q_n + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75) + $1,5 \cdot 0,5 \cdot S_{nr}$ (0,75)
 26.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR}$
 27.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q$
28.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75)

Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení MSÚ věže s rotorem za chodu ($v_0=10$ m/s):

- 29.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (10/27,5) \cdot W_1$ (0,33) + $1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{1R-prov}$ (0,9) + $1,35 \cdot O_R$
 30.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (10/27,5) \cdot W_2$ (0,33) + $1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{2R-prov}$ (0,9) + $1,35 \cdot O_R$
 31.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (10/27,5) \cdot W_1$ (0,33) + $1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{1R-prov}$ (0,9) + $1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$
 32.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (10/27,5) \cdot W_2$ (0,33) + $1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{2R-prov}$ (0,9) + $1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$
33.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot (10/27,5) \cdot W_1$ (0,54) + $1,5 \cdot w_{1R-prov} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05) + $1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75) + $1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$
34.CO – $1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot (10/27,5) \cdot W_2$ (0,54) + $1,5 \cdot w_{2R-prov} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05) + $1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75) + $1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$
35.CO – $1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot (10/27,5) \cdot W_1$ (0,54) + $1,5 \cdot w_{1R-prov} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q$ (1,05) + $1,5 \cdot 0,5 \cdot S$ (0,75) + $1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$

$$36.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot (10/27,5) \cdot W_2 (0,54) + 1,5 \cdot w_{2R-prov} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q (1,05) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S (0,75) + 1,35 \cdot O_R + 1,35 \cdot S_R$$

Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení MSÚ věže s rotorem zastaveným ($v_0=27,5$ m/s):

$$37.CO - 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1 (0,9) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{1R-lim} (0,9)$$

$$38.CO - 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2 (0,9) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{2R-lim} (0,9)$$

$$39.CO - 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot Q + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1 (0,9) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot w_{1R-lim} (0,9) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot (S + S_n) (0,75)$$

$$40.CO - 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot w_{1R-lim} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q (1,05) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot (S + S_n) (0,75)$$

$$41.CO - 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot w_{2R-lim} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q (1,05) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot (S + S_n) (0,75)$$

$$42.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot W_1 + 1,5 \cdot w_{1R-lim}$$

$$43.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,5 \cdot W_2 + 1,5 \cdot w_{2R-lim}$$

Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení MSP:

$$44.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,0 \cdot (10/27,5) \cdot W_1 (0,36) + 1,0 \cdot w_{1R-prov} + 1,0 \cdot 0,7 \cdot Q (0,7) + 1,0 \cdot 0,5 \cdot S (0,5) + 1,0 \cdot O_R + 1,0 \cdot S_R$$

$$45.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,0 \cdot (10/27,5) \cdot W_2 (0,36) + 1,0 \cdot w_{2R-prov} + 1,0 \cdot 0,7 \cdot Q (0,7) + 1,0 \cdot 0,5 \cdot S (0,5) + 1,0 \cdot O_R + 1,0 \cdot S_R$$

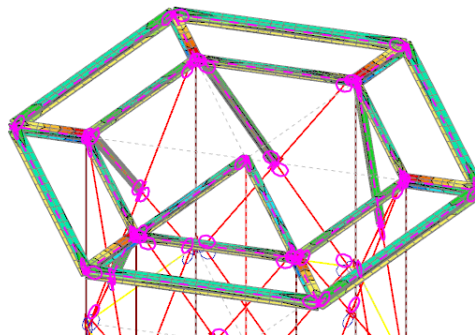
$$46.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,0 \cdot Q + 1,0 \cdot 0,6 \cdot W_1 (0,6) + 1,0 \cdot 0,6 \cdot w_{1R-lim} (0,6) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S (0,75)$$

$$47.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,0 \cdot W_1 + 1,0 \cdot w_{1R-lim} + 1,0 \cdot 0,7 \cdot Q (0,7) + 1,0 \cdot 0,5 \cdot S (0,5)$$

$$48.CO - 1,0 \cdot G_0 + 1,0 \cdot G_{OR} + 1,0 \cdot W_2 + 1,0 \cdot w_{2R-lim} + 1,0 \cdot 0,7 \cdot Q (0,7) + 1,0 \cdot 0,5 \cdot S (0,5)$$

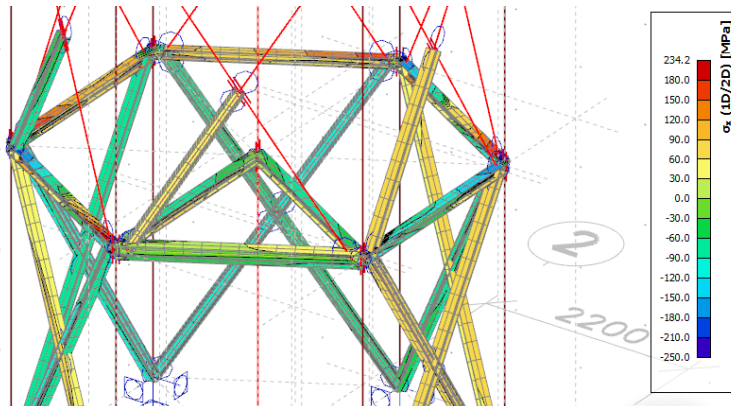
7. Výsledky numerické analýzy konstrukce

3D napětí
Hodnoty: σ_x (1D/2D)
Lineární výpočet
Třída: Všechny MSU
Výběr: B313..B330, B335, B338, B341, B344, B369..B382
Poloha: V uzlech s průměrováním na makro. Systém: LSS prvku síť
Základní veličiny



Obrázek 10, extrémní napětí v prvcích na vrcholu věže.

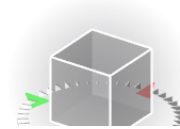
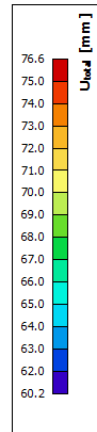
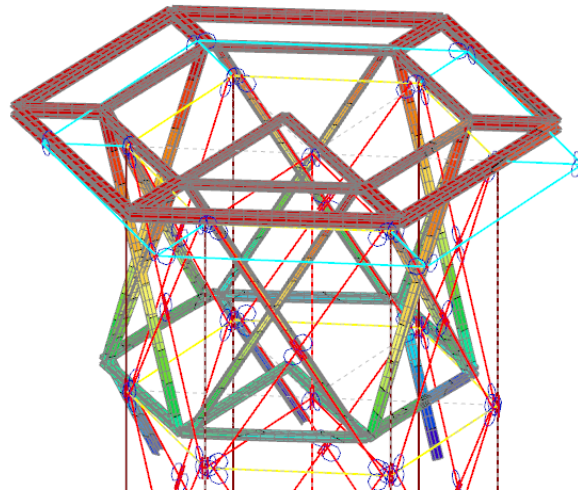
3D napětí
Hodnoty: σ_x (1D/2D)
Lineární výpočet
Třída: Všechny MSU
Výběr: B25..B55, B59, B60, B87, B90, B93, B313..B330, B335, B338, B341, B344, B353, B354, B369..B382
Poloha: V uzlech s průměrováním na makro. Systém: LSS prvku síť
Základní veličiny



Obrázek 11, extrémní napětí v prvcích v patě konstrukce.

3D přemístění

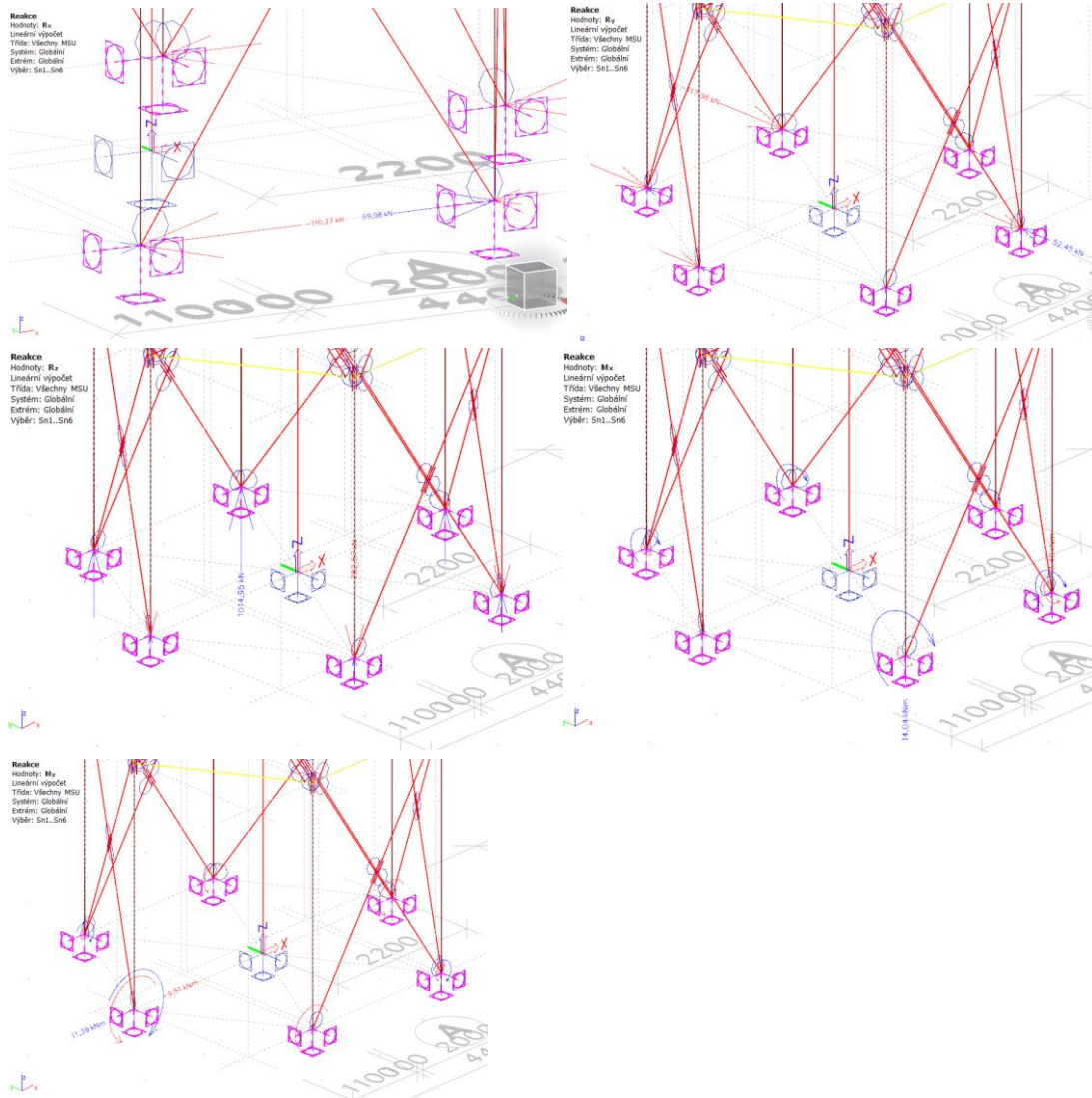
Hodnoty: U_{total}
 Lineární výpočet
 Třída: Všechny MSP
 Výběr: B277..B294, B299, B302, B308, B313..B348, B367..B382
 Poloha: V uzlech s průměrováním na makro. Systém: LSS prvku síť



Obrázek 12, extrémní přemístění vrcholu věže.

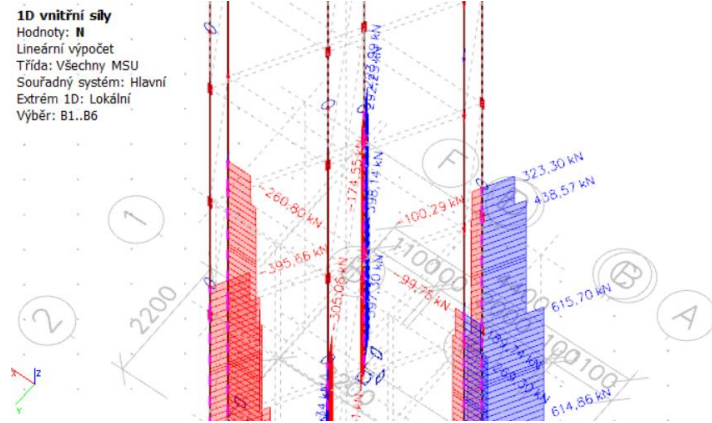
8. Vyhodnocení vnitřních sil navrhovaných detailů

8.1. Základová patka



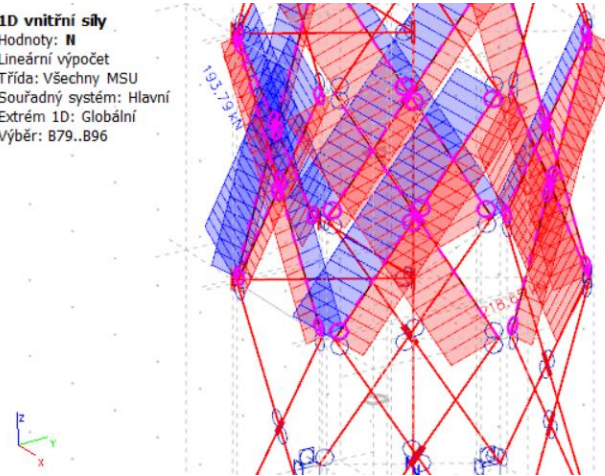
8.2. Spojení sloupů

1D vnitřní síly
 Hodnoty: N
 Lineární výpočet
 Třída: Všechny MSU
 Souřadný systém: Hlavní
 Extrém 1D: Lokální
 Výběr: B1..B6

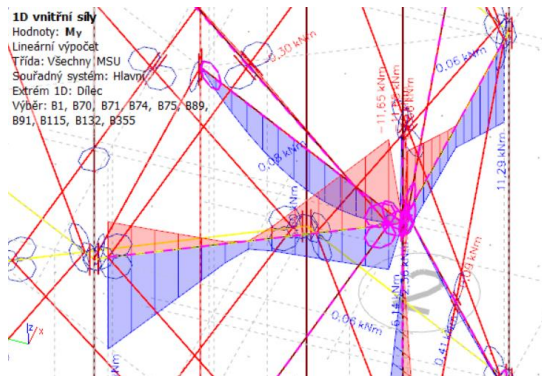
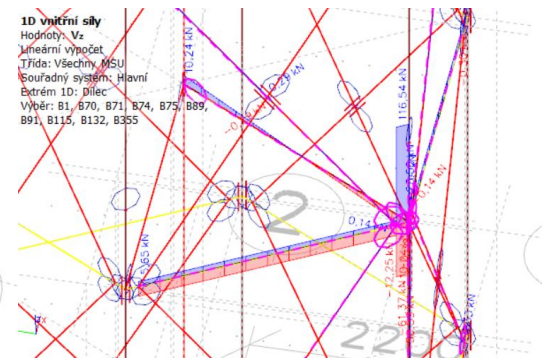
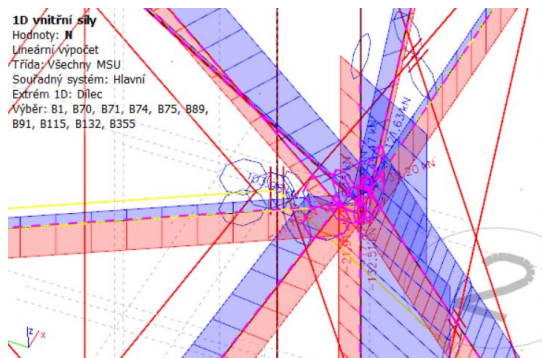


8.3. Křížení zavětrování

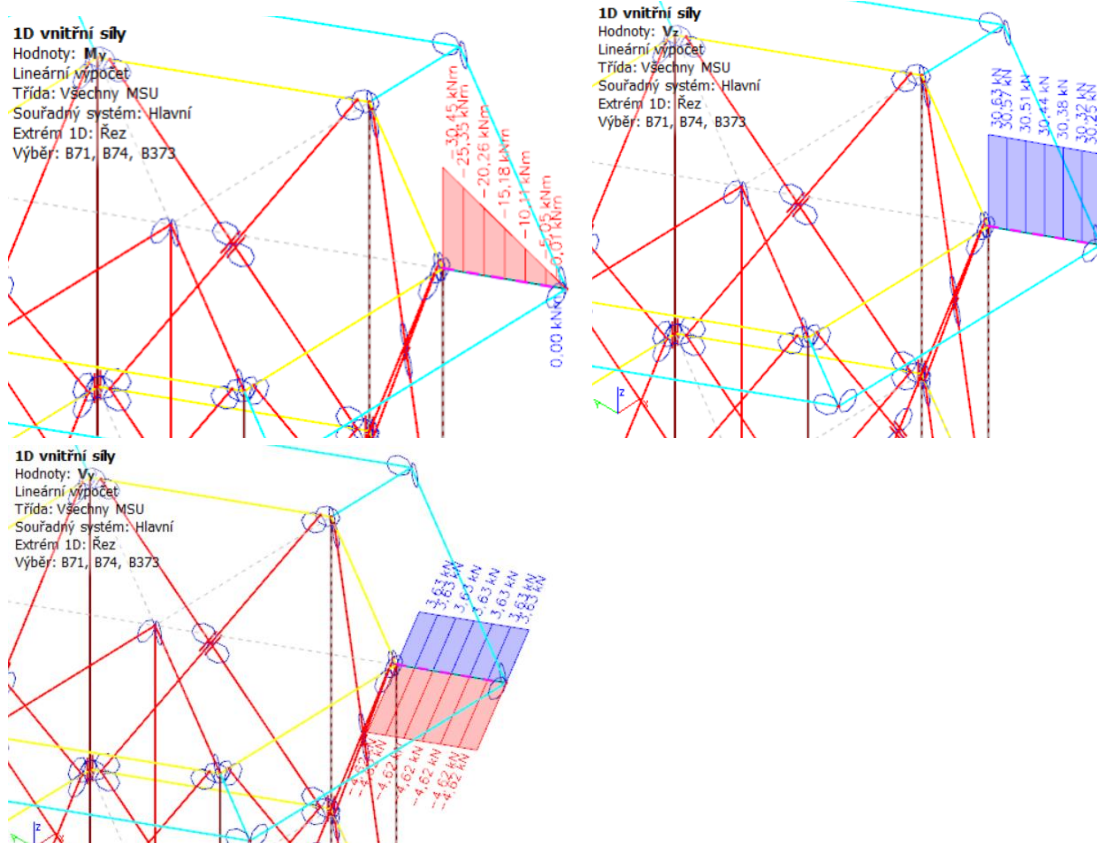
1D vnitřní síly
 Hodnoty: N
 Lineární výpočet
 Třída: Všechny MSU
 Souřadný systém: Hlavní
 Extrém 1D: Globální
 Výběr: B79..B96



8.4. Obvodový rám



8.5. Konzola plošiny



9. Vyhodnocení statického modelu

Z hlediska statického modelu konstrukce je možné usoudit, že navrhovaná konstrukce je stabilní a mezní napětí při mezním stavu únosnosti nepřesahuje pevnost materiálu. Zároveň jsou výsledky deformací příznivé i pro návrh turbíny, který je popsán detailně v hlavní části práce. Z hlediska mezního stavu použitelnosti dosahuje mezní deformace konstrukce hodnoty $L/400$ tj. 76 mm. Pro realizaci konstrukce by dále bylo nutné povést podrobné statické posouzení, které ale není cílem této práce.

Vnitřní síly stanovené v kapitole 8 jsou využity pro numerické modely styčníků v hlavní části práce.