



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

Návrh a posouzení konstrukce rozhledny

Design and structural analysis of an observation tower

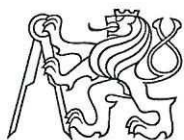
Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
Studijní zaměření: K - Inženýrské konstrukce

Vedoucí práce: Ing. Michal Netušil, Ph.D.

Bc. Walter Mai

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Mai Jméno: Walter Osobní číslo: 405359

Zadávací katedra: K134 - Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh a posouzení konstrukce rozhledny

Název diplomové práce anglicky: Design and structural analysis of an observation tower

Pokyny pro vypracování:

Návrh konstrukčního a materiálového řešení, statického schématu, tvorba 3D numerického výpočetního modelu pro zjištění odezvy konstrukce na zatížení větrem i stálým a užitným zatížením. Statický výpočet a posouzení konstrukčních prvků nosné konstrukce rozhledny. Výkresová dokumentace - dispozice, klíčové detaily. Technická zpráva

Seznam doporučené literatury:

Skripta ČVUT - Ocelové konstrukce, Normové podklady řady ČSN EN 1993, 1990, 1991, ...

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Michal Netušil, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

27.2.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Michala Netušila, Ph.D. a Rista Kiviluoma PhD. Dále prohlašuji, že veškerá použitá literatura při tvorbě této práce je uvedena v seznamu použité literatury.

V Praze dne 20.5.2018

.....

podpis



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Netušilovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Risto Kiviluomovi, PhD za odborné rady a vedení práce na finské Aalto University.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při tvorbě této práce.

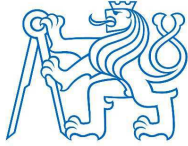


Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce rozhledny a jejím statickým a dynamickým posouzením. Na začátku práce je uvedena lokalita umístění rozhledny následována popisem konstrukčního a materiálového řešení a výpočetního 3D modelu. Dále jsou znázorněny vlastní tvary kmitání a jejich hodnoty vlastních frekvencí. Následuje podrobný rozbor zatížení aplikované na konstrukci, představení zatěžovacích kombinací dle Eurokódu a výpočet dynamické odezvy konstrukce na zatížení větrem pomocí posouzení aerodynamické stability. Závěr práce tvoří statický výpočet, podrobné posouzení vybraných konstrukčních prvků a přípojů dle mezního stavu únosnosti a posouzení konstrukce jako celku na mezní stav použitelnosti. Součástí diplomové práce jsou přílohy výkresové dokumentace a fotografie budoucího umístění rozhledny.

Klíčová slova

Rozhledna, Eurokód, 3D model, SCIA Engineer, vlastní frekvence, vlastní tvar kmitání, zatížení větrem, aerodynamická stabilita, zatěžovací kombinace, svar, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti.



Abstract

Master's Thesis deals with design of an observation tower and its static and dynamic assessment. At the beginning of the thesis, the location of the tower is indicated, followed by a description of structural and material solution and numerical 3D model. In addition, natural shapes of vibration and natural frequencies are shown. Following is a detailed description of load cases applied on the structure, load combinations according to Eurocode and computation of dynamic response under wind load evaluated by aerodynamic stability. The conclusion of the thesis consists of static evaluation, detailed assessment of selected structural members and joints according to the ultimate limit state and assessment for the service limit state. As part of the thesis are attached drawing documentation and photos of the future location of the observation tower.

Key words

Observation tower, Eurocode, 3D model, SCIA Engineer, natural frequency, natural shape of vibration, wind load, aerodynamic stability, load combination, weld, ultimate limit state, service limit state.



Obsah

Úvod.....	8
1 Lokalita rozhledny	9
2 Návrh konstrukčního a materiálového řešení	11
3 Tvorba výpočetního 3D modelu	14
4 Návrh zatížení.....	16
4.1 Stálé zatížení.....	16
4.2 Nahodilé zatížení.....	16
4.2.1 Užité zatížení	17
4.2.2 Zatížení sněhem	17
4.2.3 Zatížení větrem	18
5 Dynamická analýza konstrukce	35
5.1 Vlastní frekvence a tvary kmitání.....	35
5.2 Aerodynamická stabilita	43
5.2.1 Kritická rychlost větru.....	43
5.2.2 Maximální výchylka a zrychlení konstrukce.....	47
6 Statická analýza konstrukce.....	55
6.1 Zavedení imperfekce	55
6.2 Zatěžovací stavy	57
6.3 Kombinace zatěžovacích stavů.....	57
6.4 Výsledky vnitřních sil.....	62
7 Mezní stav únosnosti.....	77
7.1 Posouzení nosných prvků.....	78
7.1.1 Posouzení nosných sloupů	78
7.1.2 Posouzení nosníků horní podesty a spojníků sloupů.....	85
7.1.3 Posouzení nosníků schodišťových ramen.....	92
7.1.4 Posouzení ztužidel.....	99
7.2 Posouzení přípojí	106
7.2.1 Přípoj nosníku rámu horní podesty k nosnému sloupu.....	106
7.2.2 Přípoj ztužidla k nosnému sloupu	111
8 Mezní stav použitelnosti	118
8.1 Posouzení deformací	118
8.2 Posouzení vibrací.....	120
Závěr.....	121
Seznam použité literatury	122
Použité normy	122
Citovaná literatura	122
Ostatní použité informační zdroje.....	123



Úvod

Nuoksio je jedním z nejnavštěvovanějších národních parků na jihu Finska. Každý den přiláká několik stovek turistů díky své rozmanité přírodě, divokým lesům, průzračným jezerům, a především díky své snadné dostupnosti městskou hromadnou dopravou z metropole Helsinky. Pohled do okolní krajiny umožňuje propojení návštěvníka s jedinečnou severskou přírodou.

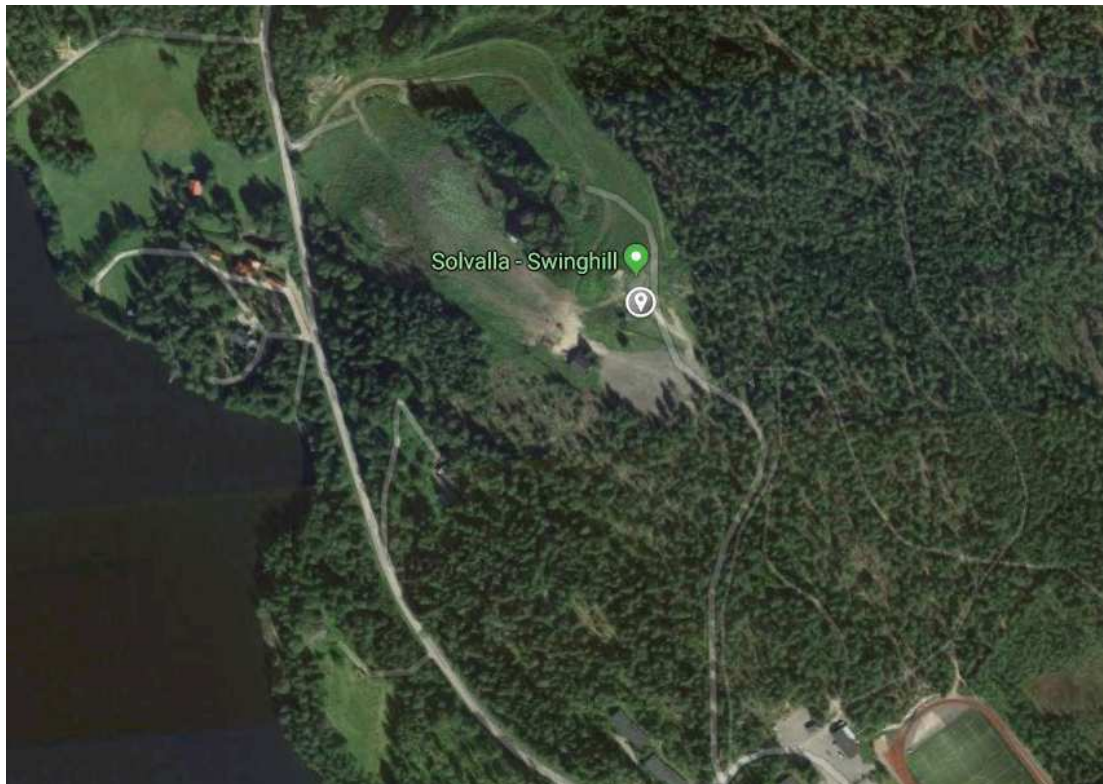
Obsahem této práce je vytvoření návrhu nové ocelové rozhledny situované v blízkosti národního parku Nuoksio na vrcholu kopce v oblasti Solvalla. Diplomová práce se zabývá především návrhem konstrukčních prvků rozhledny a jejich posouzením na statické a dynamické účinky zatížení dle Eurokódu. Cílem této práce je navrhnout esteticky zajímavou konstrukci vyhovující všem požadavkům mezních stavů dle Eurokódu pro danou oblast.

Téma diplomové práce jsem si vybral z důvodu kladného vztahu k finské krajině a široké znalosti okolí metropole Helsinky, kterou jsem poznal v průběhu prvního roku magisterského studia v programu Erasmus+ na finské Aalto University.



1 Lokalita rozhledny

Lokalita umístění nové rozhledny se nachází na vrcholu kopce v oblasti Solvalla u národního parku Nuuksio v oblasti jižního Finska v helsinském regionu Espoo. Místo je v okolí známé svým lyžařským areálem Solvalla Swinghill, které získalo prestižní cenu za nejlepší finské lyžařské středisko roku 2015. Vrchol nabízí výhled na přilehlé jezero, z důvodu zalesnění oblasti je ale viditelnost širokého okolí malá. Nová rozhledna umožní návštěvníkům větší rozhled po okolí a při dobré viditelnosti pohled na centrum Helsinek. Oblast Solvalla má navíc velké procento návštěvnosti díky místnímu lyžařskému areálu.



obr. 1: Mapa lokality umístění rozhledny (15)

Souřadnice umístění středové vertikální osy konstrukce:

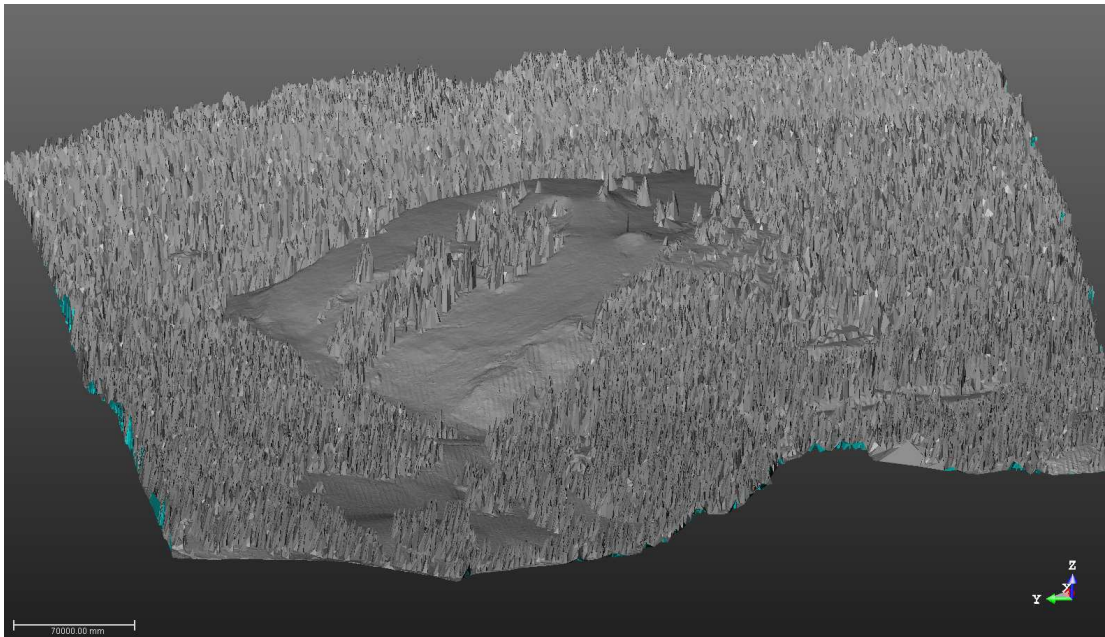
N60.298264, E24.556129

Nadmořská výška bodu umístění konstrukce:

H = 91 m n.m.



Nadmořská výška vrcholu je 91 m n.m. Tvar je tvořen strmými svahy se sklonem až 24% na jedné straně a mírnými svahy se sklonem do 10% na druhé straně. Pro přesné určení celkové geometrie kopce byla kvůli potřebným koeficientům pro výpočet větru použita data z finského státního geodetického úřadu (14). Na základě leteckého monitoringu krajiny a mračna bodů byl v softwaru Trimble RealWorks vytvořen 3D model kopce a přilehlé krajiny.



obr. 2: 3D model terénu umístění stavby

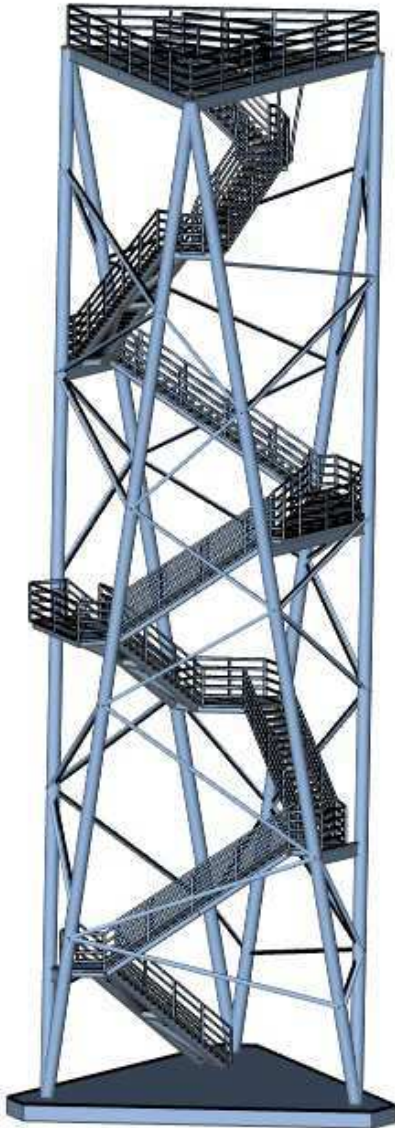
Severozápadní svah je používán k zimním sportům od roku 1946. Jako první zde byl vybudován dřevěný skokanský můstek a vedlejší sjezdovka byla určena k tréninku a lyžařským závodům mládeže. (9)

V současné době se v prostoru budoucí výstavby nenachází žádný jiný stavební objekt. Vzhledem ke skutečnosti, že na vrchol kopce vede přístupová komunikace, bude přeprava stavebních dílců a celková realizace stavby nenáročná. Místo zamýšlené výstavby se nachází před hranicí národního parku Nuuksio a není vedené v žádné přírodní chráněné krajinné oblasti Finska.

Fotografie oblasti umístění stavby se nacházejí v příloze D této diplomové práce.



2 Návrh konstrukčního a materiálového řešení



Konstrukce rozhledny je tvořena šesti hlavními ocelovými sloupy půdorysně tvořící dvojicí osově převrácených rovnostranných trojúhelníků o jednotné délce stran 9 m. První pomyslný trojúhelník se nachází v místě uložení podpor konstrukce, druhý trojúhelník je v úrovni horní podesty. V polovině výšky tedy konstrukce tvoří pravidelný šestiúhelník. Každá k sobě připojená dvojice hlavních nosných sloupů tvoří statický tuhý trojúhelníkový rám.

Na všechny konstrukční prvky rozhledny je použita ocel třídy S355J2. Nosné sloupy jsou navrženy jako trubkové kruhového průřezu CHS 406x12,5 mm. Celá konstrukce je třemi body vetknuta do železobetonového základového pásu o tloušťce 800 mm. Vnitřek lomeného základového pásu tvoří základová železobetonová deska o tloušťce 300mm. U všech železobetonových prvků byl použita třída betonu C25/30. Z důvodu předpokladu tahových reakcí od zatížení větrem je spolupůsobení základové desky s podložím zajištěno systémem mikropilot, navržených v rozích základové desky pod místy uložení sloupů.

obr. 3: Vizualizace konstrukce rozhledny

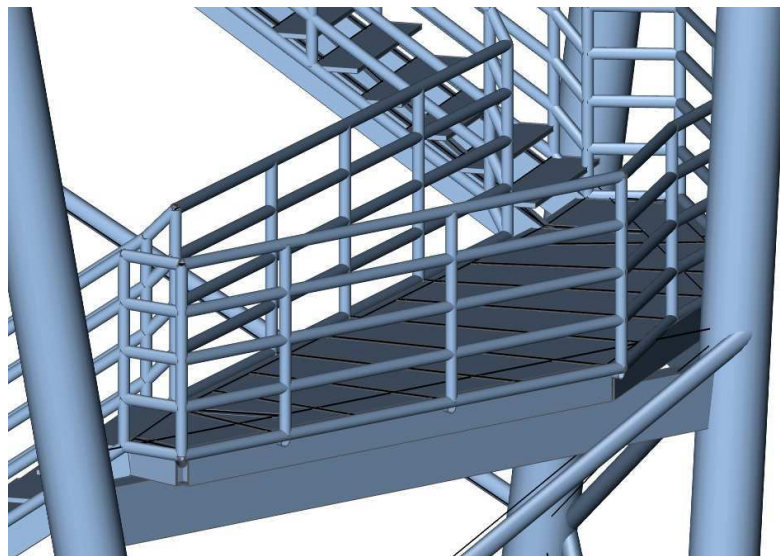
Ve výšce 30 metrů nad zemí se nachází horní vyhlídková plošina. Je tvořena pevným trojúhelníkovým rámem připojeným ke styčnickům sloupů. Průřezy nosníků rámu horní podesty jsou navrženy trubkové obdélníkového průřezu RHS 350x150x12,5 mm.



Prostorovou tuhost konstrukce zajišťuje systém diagonálních ztužidel, která spojují vždy dva přilehlé sloupy. Přípoje ztužidel jsou navrženy jako svarové. Průřezy jsou navrženy podle působení vnitřních sil ze třech různých trubkových kruhových průřezů CHS 114x5,0 mm, CHS 140x5,0 mm a CHS 140x8,0 mm.

Vnitřní část konstrukce rozhledny tvoří přímočaré lomené schodiště s mezipodestami. Nosná část schodišťových ramen je tvořena dvěma nosníky trubkových obdélníkových průřezů RHS 200x100x6,3 mm, které jsou prostorově ztuženy proti účinkům bočního zatížení od větru. Ramena schodiště mají běžný úhel stoupání 35° a zajišťují tak snadnější přístup návštěvníkům na vrchol rozhledny. Pod horní podestou je část schodiště zavěšena třemi ocelovými táhly o průřezu CHS 76x3,2 mm.

V několika výškových úrovních jsou navrženy mezipodesty umožňující návštěvníkům výhled do různých světových stran. Rámové nosníky mezipodest jsou navrženy z profilů RHS 200x100x6,3 mm. Některé mezipodesty jsou připojeny přes kloubovou spojku nebo pevně navařeny k vodorovným spojníkům sloupů o profilu RHS 350x150x12,5 mm.



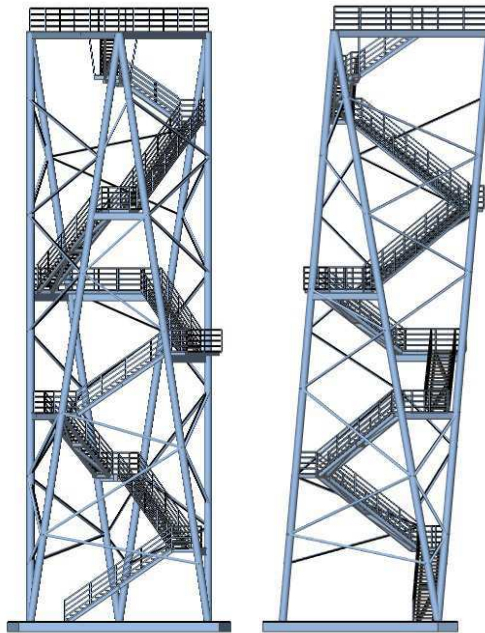
obr. 4: Detail mezipodesty

Tvar schodiště je přizpůsoben prostorové geometrii nosných sloupů. Do poloviny výšky konstrukce schodiště kopíruje strany dolního půdorysného trojúhelníku. V polovině výšky je navržena dlouhá mezipodesta, která tento pomyslný rytmus naruší a schodiště



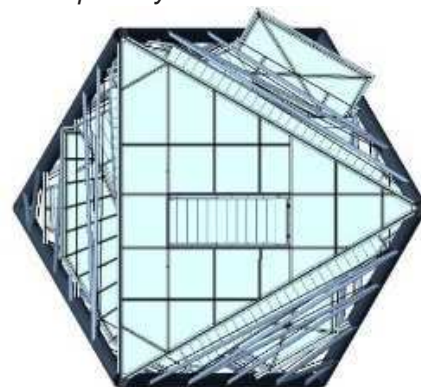
pokračuje po vedení stěn horního trojúhelníku. Tento systém zaručí, že připojení schodiště k hlavní nosné konstrukci je vždy v místě menší vzdálenosti nosných sloupů a nevznikají tak případné velké ohybové momenty na dlouhých vodorovných nosnících mezi sloupy.

Průchozí prostor schodiště je navržen v šířce 1,1 m a odpovídá tak požadavkům na minimální rozměry dvouproudových schodišť pro občanské stavby. V celé délce schodiště a mezipodest je navrženo zábradlí s ocelových trubkových průřezů s výškou 1,2 m nad pochozí úrovní. Na horní podestě je navrženo zábradlí výšky 1,3 m nad pochozí úrovní. Celková hmotnost konstrukce rozhledny je 44,46 t. Na všechny konstrukční prvky je navržena vhodná povrchová antikorozi ochrana dle EN ISO 12944-5. Pochozí povrchy horní plošiny, mezipodest i schodišťových stupňů jsou navrženy z ocelového roštu.



obr. 5: Vizualizace rozhledny - boční pohledy

Prostorové uspořádání sloupů vytváří z určitých úhlů u rozhledny vzhled zkosené konstrukce. Lomené schodiště je výrazným estetickým prvkem rozhledny a svým návrhem zdůrazňuje ostré hrany konstrukce. Systém ztužidel je navíc příjemným funkčním doplňkem rozhledny.



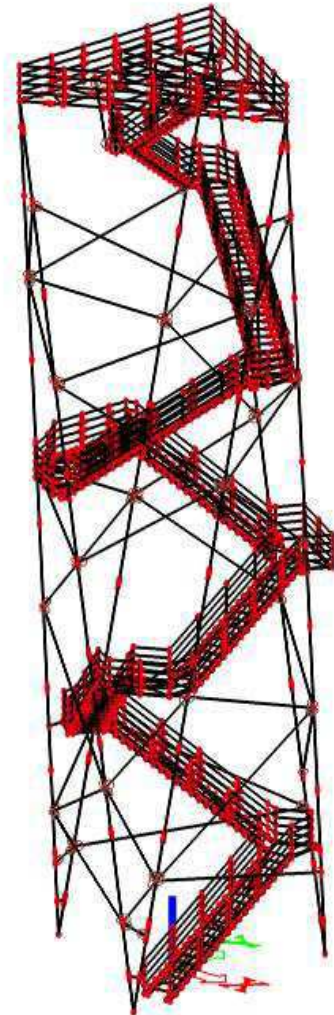
obr. 6: Půdorysný pohled



3 Tvorba výpočetního 3D modelu

Pro návrh zatížení a posouzení konstrukce byl vytvořen výpočetní 3D model v softwaru SCIA Engineer 16. Výpočetní model tvoří celkem 942 prutových 1D prvků a 34 plošných 2D prvků. Všechny nosníky jsou modelovány jako prutové prvky, na podestách jsou vytvořeny deskové 2D prvky kvůli lepšímu rozložení plošného zatížení do nosníků. Všechny prvky jsou spojeny celkem 1064 uzly. Konstrukce je vetknuta třemi pevnými podporami do základny, podpory nástupního ramena schodiště jsou modelovány jako kloubové.

Prvotní model konstrukce byl vytvořen v softwaru Autodesk AutoCAD 2015. Postup vytvoření 3D modelu spočíval ve vykreslení půdorysu ve tvaru šestiúhelníku pomocí úseček, kde byl poté každý sudý vrchol zvednut do polohy 30 metrů v souřadnici „Z“. Horní tři body byly následně propojeny úsečkami a vytvořil se tak základ geometrie konstrukce. Následovalo vytvoření schodiště ve vnitřním prostoru rozhledny pomocí kopírování, otáčení a protahování šikmých úseček klopených pod úhlem 35 stupňů. Při modelování schodišťových ramen bylo uvažováno s budoucími prostorovými rozměry všech prvků a byl tak dodržen dostatečný odstup mezi úsečkami.

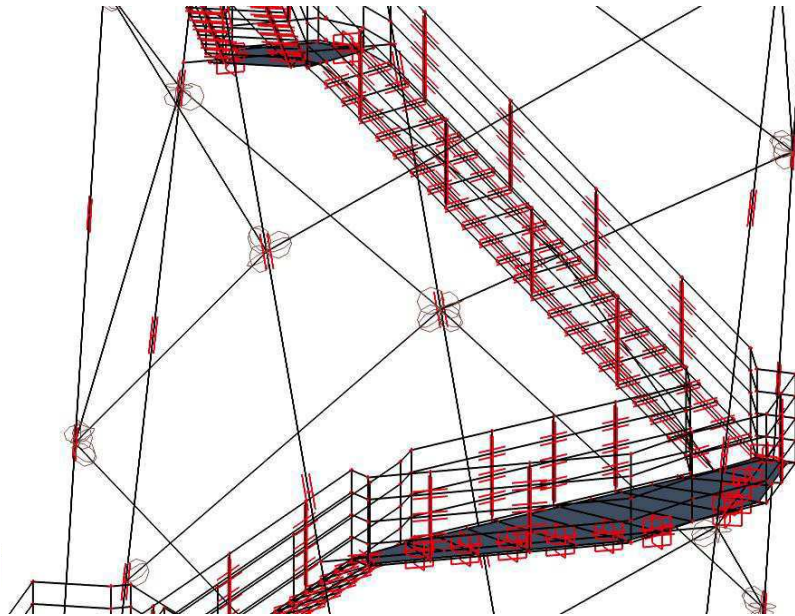


obr. 7: Výpočetní 3D model

V různých výškových úrovních byly pomocí úseček vymodelovány mezipodesty a průvlaky horní plošiny. Úsečky schodiště s mezipodestami a vertikálními sloupy byly vzájemně propojeny vodorovnými spojníky. Dále byly vytvořeny jednotlivé schodišťové stupně pomocí pravidelného kopírování úseček o konstantní délce. Na závěr bylo vymodelováno zábradlí pomocí křivek vedených po okrajích schodiště a podest a vytvořením jejich ekvidistant ve směru „Z“.



Takto vytvořený úsečkový 3D model byl poté v softwaru SCIA Engineer 16 importován za nosníky reálných průřezů. Z důvodu zajištění prostorové stability konstrukce byl na základě vzpěrných účinků hlavních sloupů vytvořen systém diagonálních ztužidel s kloubovými konci propojující vždy dva přilehlé sloupy. Typy všech styčníků ve výpočetním modelu byly vymodelovány podle budoucího reálného působení a typů přípojí.



obr. 8: Detail styčníků a křížení výpočetního 3D modelu

Křížení jednotlivých stupňů schodiště a nosníků schodišťových ramen je modelováno jako pevné, křížení průvlaků mezipodest a spojnůk sloupů je modelováno kloubovou spojkou podle budoucího reálného uložení. Z důvodu přesnějších výsledků vnitřních sil a vlastních tvarů kmitání byly po délce hlavních nosných sloupů vytvořeny vnitřní uzly. Na všech podestách byly vytvořeny 2D deskové prvky propojeny jednotlivými uzly s prutovými 1D prvky.

Na závěr byla provedena kontrola geometrických dat konstrukce a kontrola singularity všech prvků. Výpočetní model rozhledny byl úspěšně vyhodnocen jako plně funkční pro všechny typy statických i dynamických výpočtů ve SCIA Engineer 16.



4 Návrh zatížení

Pro finální posouzení konstrukčních prvků a přípojí je nutné uvažovat s vnitřními silami na zatížené konstrukci. Výpočetní 3D model konstrukce byl vystaven účinkům základních typů zatížení dle Eurokódu. V této kapitole jsou popsány všechny typy zatížení aplikované na konstrukci rozhledny, jejich uvažované hodnoty a postup výpočtu dílčích součinitelů.

4.1 Stálé zatížení

Základním typem stálého zatížení je vlastní tíha nosných a nenosných prvků konstrukce a dalšího příslušenství, které je uvažováno jako trvalá součást konstrukce. Závisí na objemové hmotnosti materiálu, rozměrech prvku a gravitačním zrychlení. Vlastní tíha nenosných prvků a příslušenství, které nejsou součástí konstrukčního modelu, ale je s nimi uvažováno, se nazývá ostatní stálé zatížení. (10)

Zatížení od sedání základu není pro tuto konstrukci uvažováno z důvodu dostatečně kvalitních geologických podmínek v oblasti umístění rozhledny.

Výpočetní 3D model konstrukce rozhledny obsahuje všechny nosné a nenosné prvky a příslušenství, které odpovídají finálnímu návrhu konstrukce. Vlastní tíha je automaticky vypočtena pomocí softwaru SCIA Engineer dle materiálových charakteristik, rozměrů jednotlivých prvků konstrukce a gravitačního zrychlení s hodnotou $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

4.2 Nahodilé zatížení

Nahodilé zatížení má různou dobu trvání účinku na konstrukci, je tedy proměnné v čase. Dělí se podle doby trvání na dlouhodobé, střednědobé, krátkodobé, okamžité a mimořádné. (10)

U konstrukce rozhledny bylo uvažováno se třemi typy nahodilého zatížení – užitným zatížením, bočním zatížením od větru a zatížením sněhem. Zatížení sněhem bylo následně zanedbáno z důvodu nízké hodnoty zatížení v porovnání s užitným zatížením.



4.2.1 Užité zatížení

Rozhledna je stavba určená především pro kumulaci návštěvníků. Konstrukce je specifikována do **kategorie C5**, což jsou plochy, kde může dojít ke koncentraci lidí např. budovy pro veřejné akce jako jsou koncertní a sportovní haly, terasy a jiné přístupové plochy (2). Na základě tohoto zařazení je dle SFS-EN 1991-1-1, Tab. 6.2 stanovena hodnota rovnoměrného spojitého zatížení **5 kN/m²**. Na konstrukci jsou vymodelovány dva zatěžovací stavy užitého zatížení. První stav uvažuje plné zatížení na všechny podesty i schodiště, druhý zatěžovací stav pak předpokládá účinky zatížení pouze na horní plošinu a mezipodesty.

4.2.2 Zatížení sněhem

V zimních měsících je oblast umístění rozhledny pokryta sněhovou pokrývkou, v případě návrhu konstrukce je nutné uvažovat se zatížením sněhem. Charakteristická hodnota rovnoměrné zatížení je vypočtena vzorcem dle normy SFS EN 1991-1-3 (3), Příloha C, Tab. C.1.

$$s_k = (0,790 Z + 0,375) + \frac{A}{336}$$

s_k ... charakteristická hodnota rovnoměrného zatížení sněhem

Z ... číslo zóny

A ... nadmořská výška

Pro polohu umístění stavby rozhledny je číslo zóny dle finské národní dodatkové mapy uvažováno s hodnotou 3,0 (SFS-EN 1991-1-3, obr. C.8). Nadmořská výška umístění stavby je uvažována s hodnotou 91 m n.m. Z dosazení do výpočtu tedy dostaneme výslednou charakteristickou hodnotu rovnoměrného zatížení sněhem.

$$s_k = (0,790 * 3,0 + 0,375) + \frac{91}{336} = 3,02 \text{ kN/m}^2$$

(3)



Zatížení sněhem je v případě posouzení konstrukce rozhledny zanedbáno, jelikož charakteristická hodnota rovnoměrného zatížení $3,02 \text{ kN/m}^2$ je menší než charakteristická hodnota rovnoměrného užitého zatížení $5,0 \text{ kN/m}^2$. Navíc účinky obou typů zatížení nemohou nastat současně, je proto pro posouzení upřednostňována hodnota užitého zatížení.

4.2.3 Zatížení větrem

Nahodilé zatížení od větru je jediné zatížení aplikované na konstrukci rozhledny ve vodorovném směru. Způsobuje maximální vodorovný posun u vrcholu konstrukce, který je důležitý pro posouzení z hlediska mezního stavu použitelnosti. Zatížení od větru má také značný vliv na momentové kotevní reakce a může způsobit vznik tahových kotevních sil v podporách.



obr. 9: Grafické zobrazení složek zatížení větrem (8)

Hodnota zatížení na konstrukci vychází z účinku dynamických tlaků od větru, které jsou proměnné v čase. Maximální dynamický tlak od účinku větru závisí na charakteristice terénu krajiny v místě stavby konstrukce, střední rychlosti větru, intenzitě turbulence a zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace větru.



4.2.3.1 Maximální dynamický tlak větru

Dynamický tlak větru vychází ze základní rychlosti větru. Ta je definovaná jako průměrná hodnota rychlosti větru s integrační dobou 10 minut a dobou návratnosti 50 let (8). Konstrukce rozhledny je umístěna do oblasti kategorie II.

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) q_b$$

ρ ... měrná hmotnost vzduchu

$I_v(z)$... intenzita turbulence

$v_m(z)$... základní rychlost větru

$c_e(z)$... součinitel expozice

q_b ... základní dynamický tlak větru

(4)

Vstupní hodnoty pro výpočet střední rychlosti větru a maximálního dynamického tlaku:

Výchozí základní rychlost větru $v_{b,0} = 21 \text{ m/s}$

Měrná hmotnost vzduchu $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

Kategorie terénu II ... parametr drsnosti terénu $z_0 = 0,05$

Základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

$c_{dir} = 1,0$... doporučeno

$c_{season} = 1,0$... doporučeno

Součinitel terénu:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 * \left(\frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

Hodnota střední rychlosti větru, intenzity turbulence a součinitele drsnosti je proměnná s výškou konstrukce. Hodnoty jsou vypočítané z následujících vztahů:



Střední rychlost větru

$$v_{m(z)} = c_{r(z)} c_{0(z)} v_b$$

$c_{r(z)}$.. součinitel drsnosti terénu

$c_{0(z)}$... součinitel orografie

v_b ... základní rychlost větru

(4)

Intenzita turbulence

$$I_{v(z)} = \frac{\sigma_v}{v_{m(z)}} = \frac{k_I}{c_{0(z)} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \dots \text{pro } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_{v(z)} = I_{v(z_{min})} \dots \text{pro } z \leq z_{min}$$

Součinitel turbulence $k_I = 1,0$... doporučeno

(4)

Součinitel drsnosti

Drsnost terénu je rozdělena do pěti kategorií podle charakteristiky krajiny dané oblasti od mořských oblastí až po oblasti s hustou zástavbou. Součinitel drsnosti vyjadřuje změnu střední rychlosti větru způsobenou výškou nad úrovní terénu v místě konstrukce a drsností povrchu terénu na návětrné straně pro uvažovaný směr větru. (11)

$$c_{r(z)} = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots \text{pro } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_{r(z)} = c_{r(z_{min})} \dots \text{pro } z \leq z_{min}$$

(4)

Výpočet součinitele orografie závisí na geometrii tvaru kopce, výškovém převýšení místa stavby a úpatím a sklonu svahů kopce. Pro určení základních hodnot byl využit 3D model terénu. Součinitel orografie byl uvažován pro celou výšku konstrukce konstantní. Do výpočtu byla dosazena výška konstrukce.

Sklon návětrného svahu:

$$\phi = \frac{H}{L_e} = 0,284$$



Součinitel sklonu svahu:

$$s = 0,8$$

Hodnota určena dle SFS-EN 1991-1-4, příloha A.3, obrázek A.3

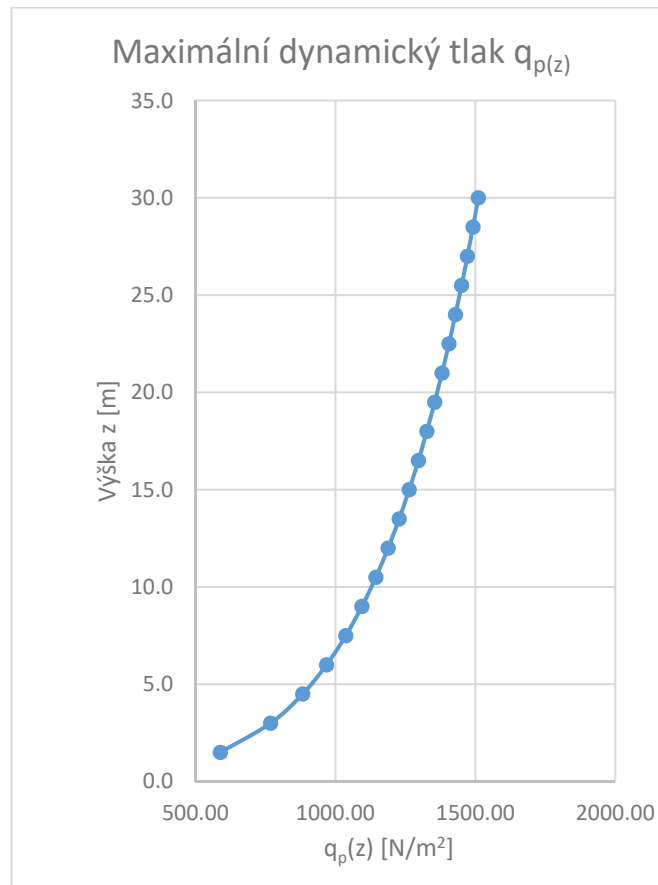
Součinitel orografie

$$c_0 = 1 + 2 s \phi = 1 + 2 * 0,8 * 0,284 = 1,46$$

Výsledné hodnoty součinitele drsnosti, střední rychlosti a maximálního dynamického tlaku jsou vyobrazeny po úsecích výšky 1,5 m v následující tabulce a grafu:

Tabulka 1: Hodnoty maximálního dynamického tlaku větru

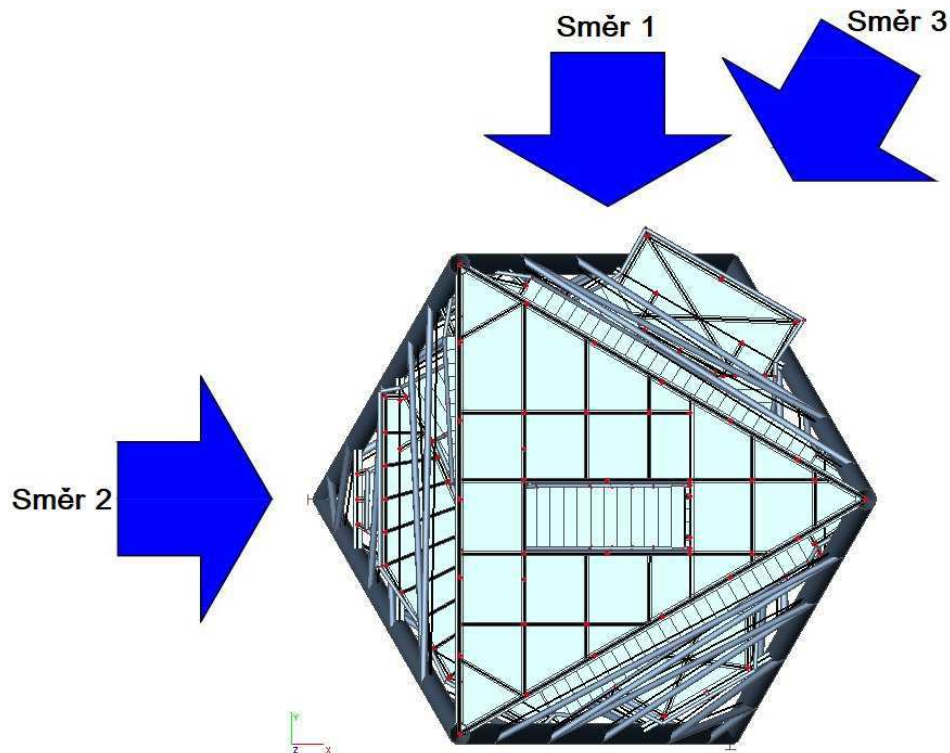
z	$C_{r(z)}$	$V_{m(z)}$	$I_{v(z)}$	$q_{p(z)}$
[m]	[]	m/s	[]	kN/m ²
1.5	0.65	19.75	0.20	588.39
3.0	0.78	23.77	0.17	768.08
4.5	0.85	26.12	0.15	882.58
6.0	0.91	27.79	0.14	968.02
7.5	0.95	29.09	0.14	1036.69
9.0	0.99	30.15	0.13	1094.36
10.5	1.02	31.04	0.13	1144.21
12.0	1.04	31.82	0.13	1188.20
13.5	1.06	32.50	0.12	1227.62
15.0	1.08	33.11	0.12	1263.39
16.5	1.10	33.67	0.12	1296.14
18.0	1.12	34.17	0.12	1326.38
19.5	1.13	34.64	0.12	1354.47
21.0	1.15	35.07	0.11	1380.73
22.5	1.16	35.47	0.11	1405.38
24.0	1.17	35.84	0.11	1428.62
25.5	1.18	36.19	0.11	1450.61
27.0	1.20	36.53	0.11	1471.48
28.5	1.21	36.84	0.11	1491.36
30.0	1.22	37.14	0.11	1510.32



obr. 10: Graf maximálního dynamického tlaku větru po výšce konstrukce

4.2.3.2 Směry působení větru

Při návrhu zatížení větrem na konstrukci byly uvažovány 3 nejméně příznivé směry působení větru. Směry jsou určeny podle geometrie vlastních tvarů kmitání tak, aby jejich účinek byl vždy kolmý/rovnoběžný k deformaci prvního vlastního tvaru konstrukce.



obr. 11: Uvažované směry působení větru na konstrukci

4.2.3.3 Síly od větru

Výpočet sil od větru byl proveden na základě dvou příslušných norem, normy pro účinky zatížení větrem na konstrukce EN 1991-1-4 a normy pro navrhování ocelových stožárů EN 1993-3-1.

Výpočet dle EN 1991-1-4:

$$F_W = c_s c_d \sum_{\text{prvky}} c_f q_p(z_e) A_{ref}$$

$c_s c_d$... součinitel konstrukce

c_f ... součinitel síly

$q_p(z_e)$... maximální dynamický tlak v referenční výšce z_e

$A_{ref} = A$

(4)



Výpočet dle EN 1993-3-1:

Střední hodnota síly od účinku větru:

$$F_{m,W}(z) = \frac{q_p}{1 + 7I_v(z_e)} \sum c_f A_{ref}$$

Nárazová hodnota síly od účinku větru

$$F_{T,W}(z) = F_{m,W}(z) \left[1 + \left(1 + 0,2(z_m/h^2) \right) \frac{[1 + 7I_v(z_e)]c_s c_d - 1}{c_0(z_m)} \right]$$

$c_s c_d$... součinitel konstrukce

c_f ... součinitel síly

z_m ... výška nad základnou, u které je vyžadován účinek zatížení větru

h ... celková výška konstrukce

$I_v(z_e)$... intenzita turbulence

$c_0(z_m)$... součinitel orografie

(7)

Výsledky z těchto dvou postupů byly porovnány a pro konstrukci byla použita vyšší hodnota zatížení.

Součinitel konstrukce

Součinitel konstrukce $c_s c_d$ zavádí norma u kvazistatické metody stanovení odezvy na zatížení větrem za účelem zohlednění vlivu flukтуаční složky větru a zároveň vliv kmitání konstrukce. Hodnota součinitele je konstantní pro celou konstrukci. (8)

Hodnota součinitele konstrukce pro řešenou konstrukci rozhledny byla odečtena z grafu v normě SFS-EN 1991-1-4, příloha D, obr. D1 o velikosti **1,0**. Norma (4) navíc zmiňuje, že pro pozemní stavby s rámovou konstrukcí a výškou nižší než 100 metrů nepřesahující 4 násobek nejmenšího půdorysného rozměru lze uvažovat součinitel konstrukce s hodnotou 1,0. Tento případ byl ověřen jednoduchým výpočtem:



Výška $h = 31,3 \text{ m}$; šířka konstrukce $b = 8,06 \text{ m}$

$$\text{Poměr } \frac{h}{b} = 3,88 < 4 \dots \rightarrow c_s c_d = 1,0$$

Součinitel síly

Výpočet součinitele síly vychází z normy pro navrhování ocelových stožárů EN 1993-3-1. Součinitel síly pro všechny prvky konstrukce byl vypočten s použitím součinitele plnosti pro holou část konstrukce. Součinitel síly pro příslušenství byl uvažován s hodnotou 0.

$$c_f = c_{f,S} + c_{f,A}$$

$c_{f,S}$... součinitel síly pro holou část konstrukce stanovený s použitím součinitele plnosti ϕ

$c_{f,A}$... součinitel síly pro příslušenství

$$c_{f,S} = K_\theta c_{f,S,0} \frac{A_S}{\sum A}$$

$c_{f,S,0}$... celkový součinitel síly úseku bez koncových efektů

K_θ ... součinitel úhlu náběhu větru na příslušnou stěnu konstrukce

A_S ... celkový kolmý průmět prvků konstrukce

$$\sum A = A_{ref} \dots \text{dle normy (4)} \quad A_{ref} = A$$

(7)

Součinitel úhlu náběhu větru:

$$K_\theta = 1,0 + K_1 K_2 \sin^2 2\theta$$

$$K_1 = \frac{0,55 A_f}{A_S} + \frac{0,8 (A_c + A_{c,sup})}{A_S}$$

$$K_2 = 2,0 \dots \text{pro } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ a } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0$$

$$K_2 = \varphi \dots \text{pro } 0,2 < \varphi \leq 0,5$$

$$K_2 = 1 - \varphi \dots \text{pro } 0,5 < \varphi < 0,8$$

$$A_S = A_f + A_c + A_{c,sup}$$

(7)



θ ... úhel mezi půdorysnými průměty směru působení větru a normály ke stěně

φ ... součinitel plnosti viz (citace norma vítr), kap. 7.11

A_f ... celkový kolmý průmět plochy plochých prvků ve stěně do roviny této stěny

A_c ... celkový kolmý průmět plochy kruhových prvků v podkritickém režimu ve stěně do roviny této stěny

$A_{c,sup}$... celkový kolmý průmět plochy kruhových prvků v nadkritickém režimu ve stěně do roviny této stěny

(7)

$$c_{f,s,0,j} = c_{f,0,f} \frac{A_f}{A_S} + c_{f,0,c} \frac{A_c}{A_S} + c_{f,0,c,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_S}$$

$$c_{f,0,f} = 1,76 C_1 [1 - C_1 \varphi + \varphi^2]$$

$$c_{f,0,c} = C_1 (1 - C_2 \varphi) + (C_1 + 0,875) \varphi^2$$

$$c_{f,0,f} = 1,9 - \sqrt{\{(1 - \varphi)(2,8 - 1,14 C_1 + \varphi)\}}$$

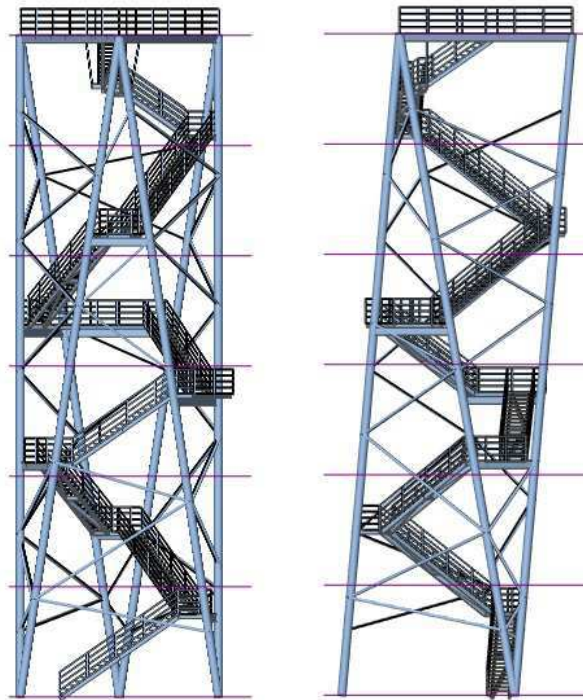
(7)

Koeficienty C_1 a C_2 byly uvažovány pro konstrukci s trojúhelníkovou podstavou:

$$C_1 = 1,9$$

$$C_2 = 1,4$$

Kvůli složitosti geometrie konstrukce je výpočet součinitelů síly rozdělen do dílčích úseků po 5 m výšky konstrukce. Samostatný úsek tvoří horní plošina. Tyto úseky pak byly dále rozděleny podle toho, v jakém úhlu nabíhá směr působení větru na danou stěnu konstrukce. Referenční plocha konstrukce v daném úseku byla uvažována jako průmět konstrukčních prvků do přední roviny. Účinek zatížení větrem byl modelován na všechny nosné i nenosné prvky. Na schodištích a podestách bylo navíc uvažováno zatížení lidí do 1,5 metrů výšky nad pochozí úrovní.



obr. 12: Rozdělení výšky konstrukce na dílčí úseky pro zatížení větrem

Plochy nosných prvků konstrukce, které jsou vystaveny účinkům zatížení spolu s uvažovanou plochou osob do 1,5 m výšky nad pochozí úrovní, jsou uvedeny v příloze C této diplomové práce. Velikosti ploch všech prvků a jejich hodnoty koeficientů síly pro všechny tři směry působení větru jsou vypočteny na základě výše zmíněných vzorců a jsou zaznamenány v následujících tabulkách:

Směr větru 1:

a) Hodnoty součinitele síly pro hlavní nosné sloupy:

Tabulka 2: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro hlavní nosné sloupy, směr větru 1

z	A_s	ϕ	A_f	A_c	$A_{c,sup}$	K_1	K_2	K_ϕ	$C_{f,0f}$	$C_{f,0c}$	$C_{f,0sup}$	$C_{f,0i}$	$C_{f,s}$
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	8.46	0.35	0.00	0.00	8.46	0.80	0.35	1.00	2.12	1.31	1.10	1.10	1.10
10.00	9.15	0.59	0.00	0.00	9.15	0.80	0.41	1.00	1.75	1.29	1.19	1.19	1.19
15.00	9.15	0.63	0.00	0.00	9.15	0.80	0.37	1.00	1.72	1.32	1.21	1.21	1.21
20.00	9.15	0.59	0.00	0.00	9.15	0.80	0.41	1.00	1.75	1.30	1.19	1.19	1.19
25.00	9.15	0.57	0.00	0.00	9.15	0.80	0.43	1.00	1.76	1.28	1.18	1.18	1.18
30.00	8.41	0.48	0.00	0.00	8.41	0.80	0.48	1.00	1.87	1.26	1.14	1.14	1.14
31.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00								



b) Hodnoty součinitele síly pro podesty, schodiště, ztužidla a návštevnický (h = 1,5 m)

Tabulka 3: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro stěny, úhel náběhu větru 30°, směr větru 1

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	5.92	0.35	4.77	0.00	1.15	0.60	0.35	0.96	2.12	1.31	1.10	1.92	1.85
10.00	15.16	0.59	13.71	0.00	1.45	0.57	0.41	0.95	1.75	1.29	1.19	1.70	1.62
15.00	16.79	0.63	15.33	0.00	1.46	0.57	0.37	0.95	1.72	1.32	1.21	1.68	1.60
20.00	15.36	0.59	13.73	0.00	1.63	0.58	0.41	0.96	1.75	1.30	1.19	1.69	1.61
25.00	14.38	0.57	12.44	0.00	1.94	0.58	0.43	0.96	1.76	1.28	1.18	1.69	1.61
30.00	11.50	0.48	10.98	0.00	0.52	0.56	0.48	0.95	1.87	1.26	1.14	1.83	1.75
31.50	11.78	1.00	11.78	0.00	0.00	0.55	0.20	0.95	3.34	1.90	1.10	3.34	3.18

Směr větru 2:

a) Hodnoty součinitele síly pro hlavní nosné sloupy:

Tabulka 4: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro hlavní nosné sloupy, směr větru 2

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	9.56	0.45	0.00	0.00	9.56	0.80	0.45	1.03	1.91	1.26	1.13	1.13	1.16
10.00	11.79	0.51	0.00	0.00	11.79	0.80	0.49	1.03	1.83	1.27	1.15	1.15	1.19
15.00	10.10	0.54	0.00	0.00	10.10	0.80	0.46	1.03	1.79	1.27	1.17	1.17	1.20
20.00	9.13	0.60	0.00	0.00	9.13	0.80	0.40	1.03	1.74	1.30	1.20	1.20	1.23
25.00	10.14	0.54	0.00	0.00	10.14	0.80	0.46	1.03	1.79	1.27	1.16	1.16	1.20
30.00	8.22	0.47	0.00	0.00	8.22	0.80	0.47	1.03	1.88	1.26	1.14	1.14	1.17
31.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00								

b) Hodnoty součinitele síly pro podesty, schodiště, ztužidla a návštevnický (h = 1,5 m)

Tabulka 5: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro stěny, úhel náběhu větru 0°, směr větru 2

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	8.01	0.45	6.64	0.00	1.37	0.00	0.55	1.00	1.91	1.26	1.13	1.78	1.78
10.00	4.19	0.51	3.25	0.00	0.94	0.61	0.49	1.00	1.83	1.27	1.15	1.68	1.68
15.00	6.86	0.54	6.30	0.00	0.56	0.57	0.46	1.00	1.79	1.27	1.17	1.74	1.74
20.00	10.51	0.60	9.48	0.00	1.03	0.57	0.40	1.00	1.74	1.30	1.20	1.69	1.69
25.00	2.05	0.54	0.47	0.00	1.58	0.74	0.46	1.00	1.79	1.27	1.16	1.31	1.31
30.00	13.29	0.47	13.09	0.00	0.20	0.00	0.53	1.00	1.88	1.26	1.14	1.87	1.87
31.50	13.47	1.00	13.47	0.00	0.00	0.55	0.20	1.00	2.01	2.02	1.90	2.01	2.01



Tabulka 6: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro stěny, úhel náběhu větru 60°, směr větru 2

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	3.98	0.45	2.93	0.00	1.05	0.62	0.55	1.25	1.91	1.26	1.13	1.70	2.13
10.00	8.20	0.51	6.16	0.00	2.04	0.61	0.49	1.23	1.83	1.27	1.15	1.66	2.03
15.00	8.79	0.54	7.69	0.00	1.10	0.58	0.46	1.20	1.79	1.27	1.17	1.71	2.05
20.00	8.74	0.60	7.71	0.00	1.03	0.58	0.40	1.17	1.74	1.30	1.20	1.68	1.97
25.00	13.34	0.54	11.98	0.00	1.36	0.58	0.46	1.20	1.79	1.27	1.16	1.73	2.07
30.00	0.86	0.47	0.52	0.00	0.34	0.65	0.53	1.26	1.88	1.26	1.14	1.59	1.99
31.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Směr větru 3:

a) Hodnoty součinitele síly pro hlavní nosné sloupce:

Tabulka 7: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro hlavní nosné sloupce, směr větru 3

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	10.12	0.47	0.00	0.00	10.12	0.80	0.53	1.04	1.88	1.26	1.13	1.13	1.18
10.00	11.23	0.51	0.00	0.00	11.23	0.80	0.49	1.03	1.83	1.27	1.15	1.15	1.19
15.00	9.80	0.54	0.00	0.00	9.80	0.80	0.46	1.03	1.79	1.27	1.16	1.16	1.20
20.00	9.31	0.60	0.00	0.00	9.31	0.80	0.40	1.03	1.74	1.30	1.20	1.20	1.23
25.00	10.74	0.48	0.00	0.00	10.74	0.80	0.52	1.04	1.87	1.26	1.14	1.14	1.18
30.00	9.07	0.53	0.00	0.00	9.07	0.80	0.47	1.03	1.80	1.27	1.16	1.16	1.20
31.50	0.00	1.00	0.00	0.00									

b) Hodnoty součinitele síly pro podesty, schodiště, ztužidla a návštěvníky (h = 1,5 m)

Tabulka 8: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro stěny, úhel náběhu větru 60°, směr větru 3

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	9.98	0.47	8.18	0.00	1.80	0.60	0.53	1.24	1.88	1.26	1.13	1.75	2.16
10.00	8.82	0.51	7.22	0.00	1.60	0.60	0.49	1.22	1.83	1.27	1.15	1.70	2.08
15.00	5.90	0.54	5.06	0.00	0.84	0.00	0.46	1.00	1.79	1.27	1.16	1.70	1.70
20.00	10.99	0.60	9.62	0.00	1.37	0.58	0.40	1.18	1.74	1.30	1.20	1.67	1.97
25.00	3.33	0.48	2.34	0.00	0.99	0.62	0.52	1.25	1.87	1.26	1.14	1.65	2.06
30.00	8.04	0.53	7.77	0.00	0.27	0.56	0.47	1.20	1.80	1.27	1.16	1.78	2.13
31.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Tabulka 9: Hodnoty koeficientů součinitele síly pro stěny, úhel náběhu větru 0°, směr větru 3

z	A _s	φ	A _f	A _c	A _{c,sup}	K ₁	K ₂	K _φ	C _{f,0f}	C _{f,0c}	C _{f,0sup}	C _{f,0j}	C _{f,s}
[m]	[m ²]	[-]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5.00	2.17	0.47	1.05	0.00	1.12	0.00	0.53	1.00	1.88	1.26	1.13	1.50	1.50
10.00	4.13	0.51	3.22	0.00	0.91	0.00	0.49	1.00	1.83	1.27	1.15	1.68	1.68
15.00	9.93	0.54	9.39	0.00	0.54	0.56	0.46	1.00	1.79	1.27	1.16	1.76	1.76
20.00	8.08	0.60	7.28	0.00	0.80	0.57	0.40	1.00	1.74	1.30	1.20	1.69	1.69
25.00	8.55	0.48	7.00	0.00	1.55	0.60	0.52	1.00	1.87	1.26	1.14	1.74	1.74
30.00	8.03	0.53	7.42	0.00	0.61	0.00	0.47	1.00	1.80	1.27	1.16	1.75	1.75
31.50	13.60	1.00	13.60	0.00	0.00	0.55	0.20	1.00	2.01	2.02	1.90	2.01	2.01

Výsledné hodnoty sil od větru:

Na základě hodnot součinitelů síly byly vypočteny síly od větru působící na konstrukci dle dvou postupů příslušných norem EN 1991-1-4 a EN 1993-3-1. Výsledky obou těchto metod byly porovnány a vyšší hodnoty sil pak byly použity při zatížení výpočetního 3D modelu konstrukce.

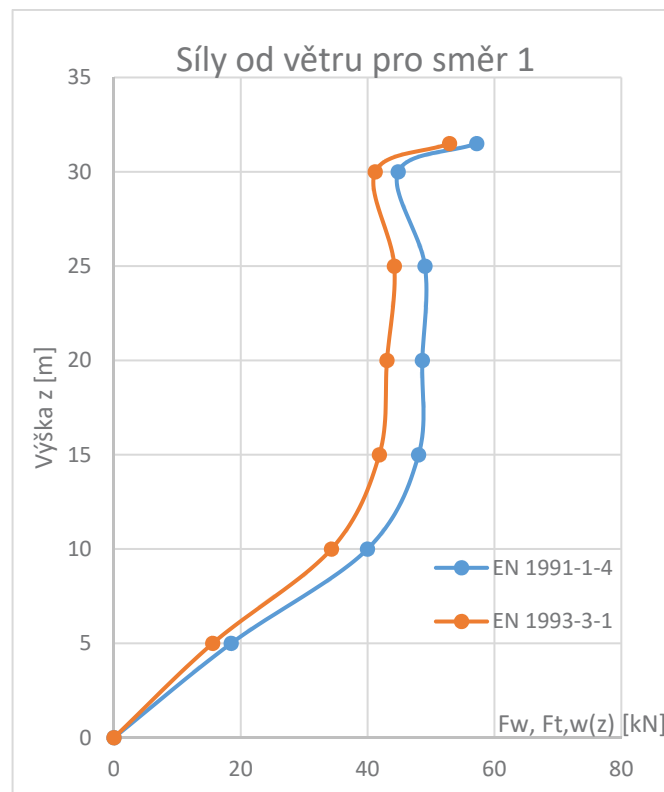


Směr větru 1:

Tabulka 10: Porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 1

EN 1991-1-4 EN 1993-3-1

z [m]	F_w [kN]	$F_{t,W(z)}$ [kN]
5.00	18.48	15.56
10.00	39.97	34.28
15.00	48.03	41.84
20.00	48.61	43.04
25.00	49.04	44.20
30.00	44.81	41.19
31.50	57.20	52.91



obr. 13: Graf porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 1

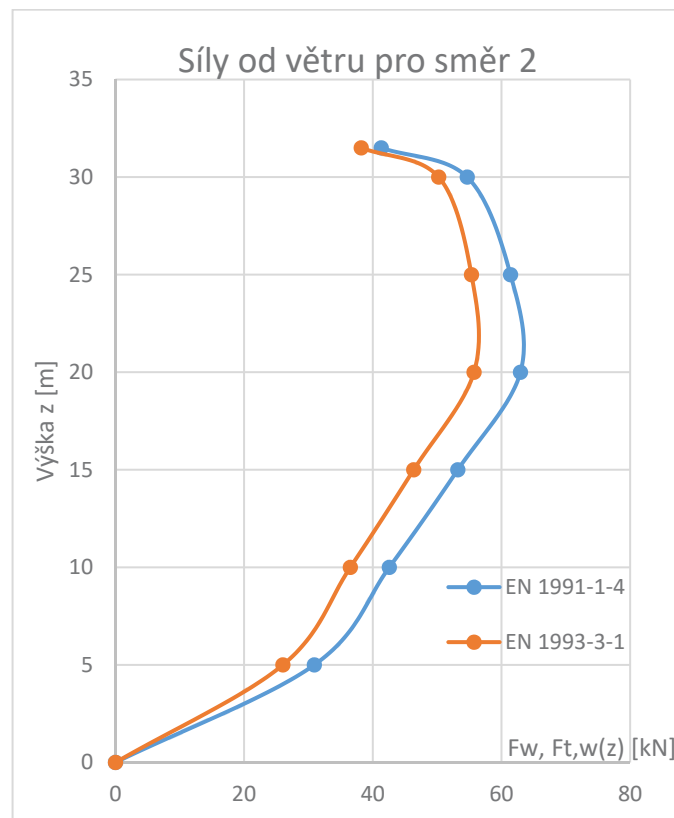


Směr větru 2:

Tabulka 11: Porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 2

EN 1991-1-4 EN 1993-3-1

z [m]	F_w [kN]	$F_{t,W(z)}$ [kN]
5.00	30.91	26.02
10.00	42.56	36.50
15.00	53.21	46.35
20.00	62.95	55.73
25.00	61.40	55.33
30.00	54.67	50.24
31.50	41.31	38.20



obr. 14: Graf porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 2

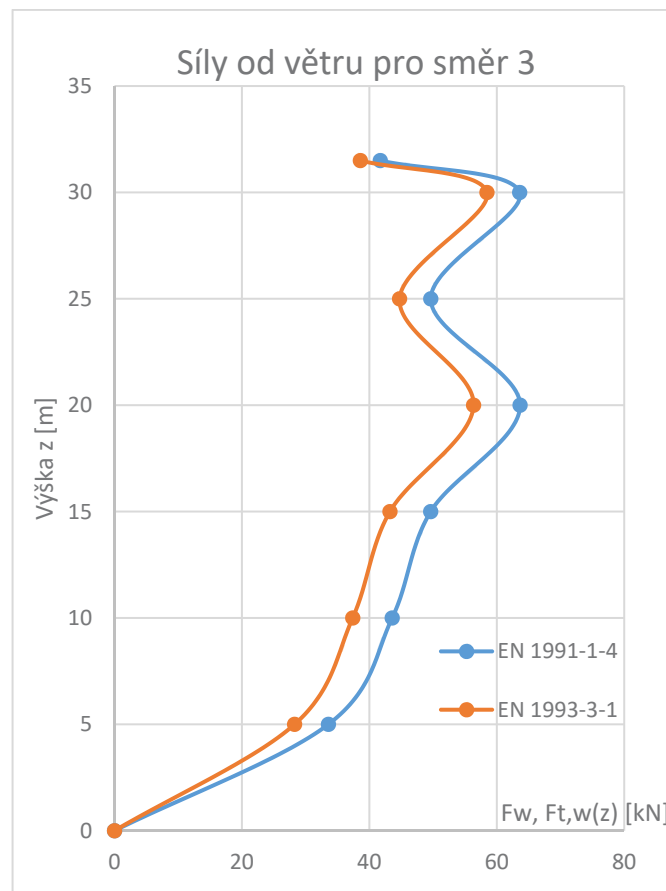


Směr větru 3:

Tabulka 12: Porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 3

EN 1991-1-4 EN 1993-3-1

z [m]	F_w [kN]	$F_{t,W(z)}$ [kN]
5.00	33.57	28.26
10.00	43.58	37.38
15.00	49.61	43.22
20.00	63.65	56.35
25.00	49.63	44.73
30.00	63.58	58.44
31.50	41.71	38.58



obr. 15: Graf porovnání hodnot celkových sil od větru na úseky konstrukce, směr větru 3



Z výsledných tabulek a grafů sil je patrné, že obě metody mají podobný průběh účinku větru po výšce konstrukce. Norma pro navrhování ocelových stožárů vykazuje menší hodnoty, jelikož do výpočtu zahrnuje vliv intenzity turbulence.

Pro všechny tři směry působení větru byly uvažovány výsledné hodnoty vypočteny podle EN 1991-1-4 z důvodu vyšších hodnot účinku na konstrukci, než v případě výpočtu dle EN 1993-3-1. Konstrukce tím byla navržena na straně bezpečnosti.

Síly od větru byly zpětně rozloženy na jednotlivé konstrukční prvky v závislosti na typu prvku, jejich ploše a úhlem náběhu směru větru. Finální rozložení zatížení sil od větru na dílčí prvky konstrukce není v této práci podrobněji popsáno.



5 Dynamická analýza konstrukce

Rozhledny, podobně jako lávky pro chodce a jiné štíhlé konstrukce, vykazují ve většině případů nízké hodnoty vlastních frekvencí kmitání, které mohou dosahovat nebezpečných hodnot z hlediska použitelnosti, tj. komfortu pro návštěvníky a rezonance od dynamických účinků zatížení větrem. U těchto typů konstrukcí se předpokládá posouzení jejich dynamické odezvy.

5.1 Vlastní frekvence a tvary kmitání

Vlastní tvary představují chování konstrukce při netlumeném kmitání, tj. stav, ve kterém konstrukce kmitá s hodnotou kruhové frekvence působením pouze její vlastní tíhy a nepůsobí při tom žádné okolní budící síly. Při vlastním netlumeném kmitání se neuvažuje útlum konstrukce. (12)

Výpočet vlastních frekvencí byl proveden modální analýzou v softwaru SCIA Engineer 16 pomocí Lanczosovy iterační metody. Vlastní tvary kmitání a jejich hodnoty frekvencí byly vypočteny pro tři případy modelu rozložení hmot na konstrukci podle polohy působení užitého zatížení osob. Hodnoty vlastních frekvencí byly u každého ze tří případů vypočteny pro prvních 30 vlastních tvarů kmitání. U konstrukce nebyl uvažován vliv rovnoměrného konstrukčního tlumení.

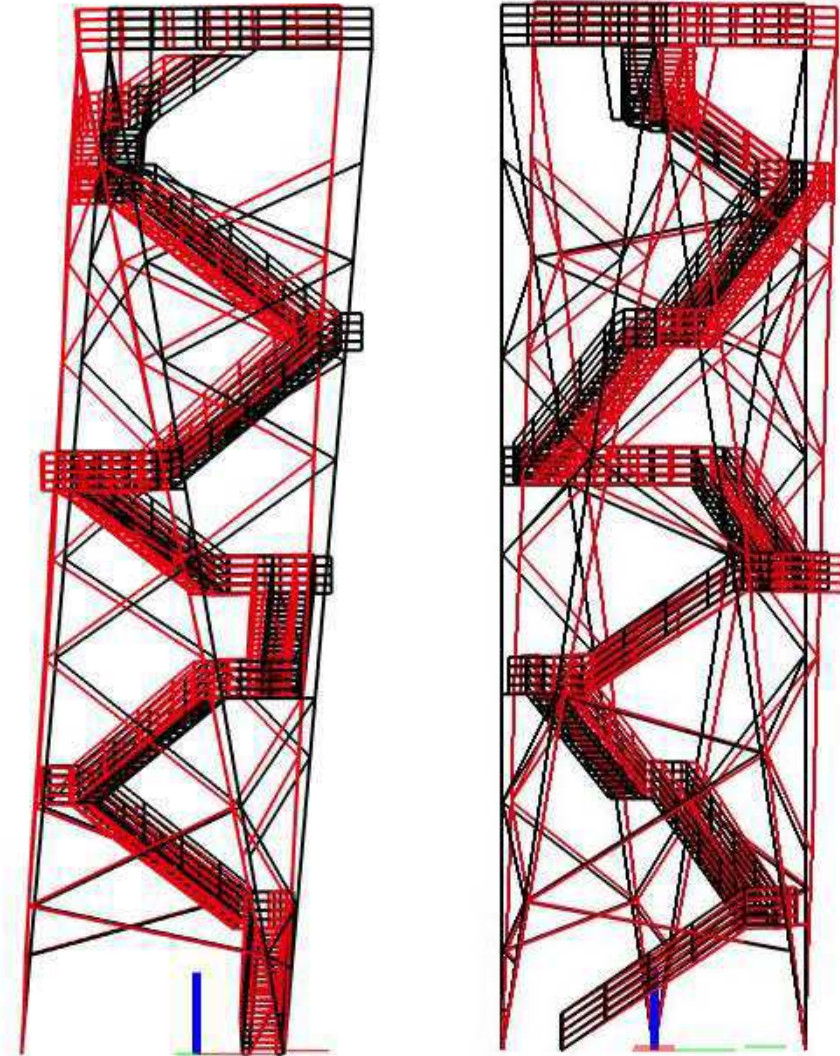
Model rozložení hmot č. 1:

První model uvažuje s rozložením hmot pouze od vlastní tíhy konstrukčních prvků. Hodnoty prvních dvou vlastních frekvencí jsou pod kritickou hodnotou 5 Hz. Jedná se o vlastní tvary **vybočení ve směru X** a **vybočení ve směru Y**. Třetí vlastní tvar charakterizuje rotaci konstrukce okolo svislé osy.

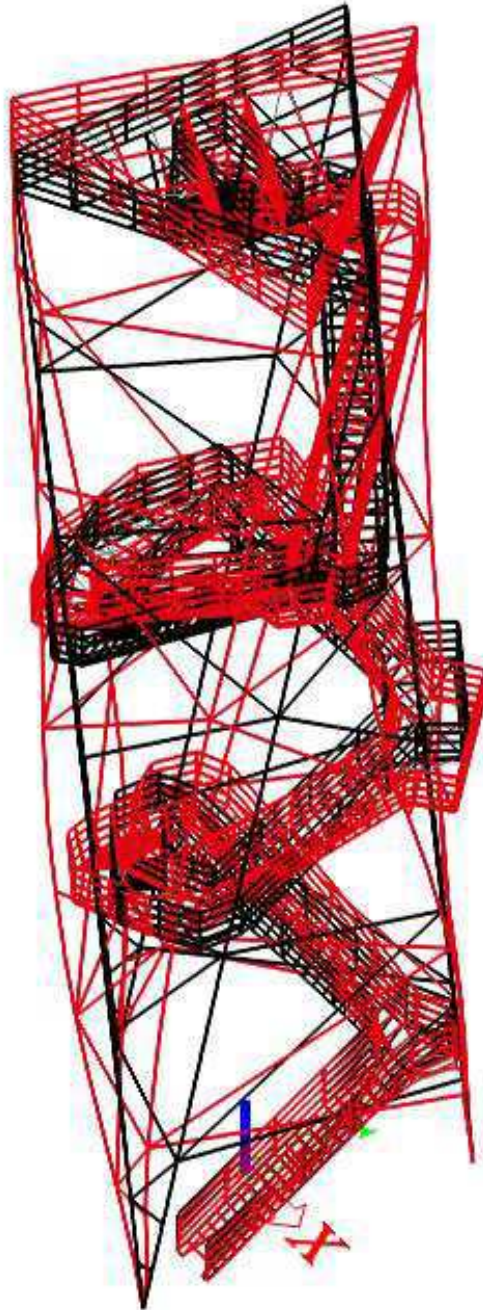


Tabulka 13: Vlastní tvary kmitání a jejich hodnoty frekvencí pro model rozložení hmoty 1

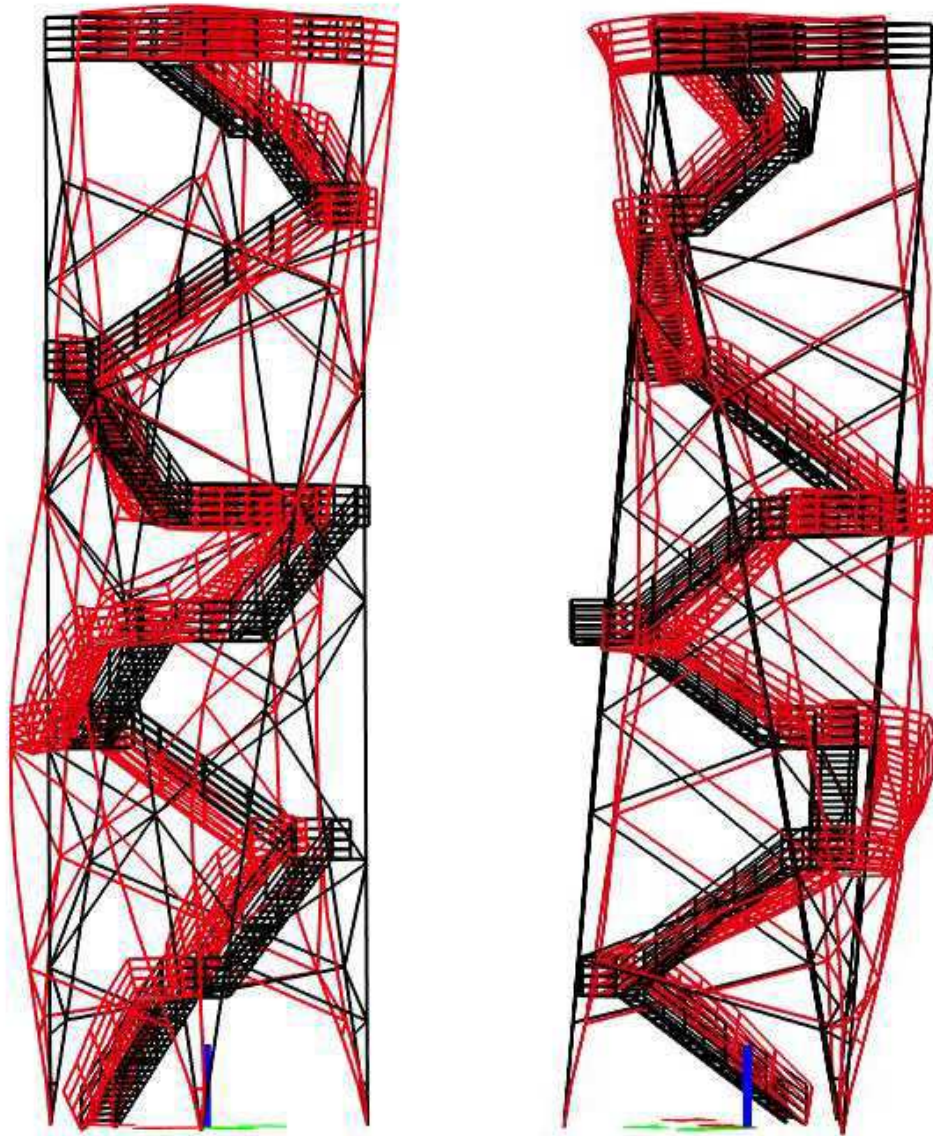
Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]
1	3.90	11	12.32	21	17.04
2	3.96	12	12.99	22	17.56
3	6.19	13	13.53	23	18.22
4	7.52	14	14.11	24	18.69
5	7.98	15	14.35	25	18.80
6	9.95	16	14.80	26	19.03
7	10.84	17	15.23	27	19.15
8	11.45	18	15.77	28	19.46
9	11.47	19	15.91	29	19.77
10	11.82	20	16.89	30	20.40



obr. 16: První a druhý vlastní tvar kmitání ($f_1 = 3,89$ Hz, $f_2 = 3,95$ Hz)



obr. 17: Třetí vlastní tvar kmitání ($f_3 = 6,10$ Hz) – rotace Z

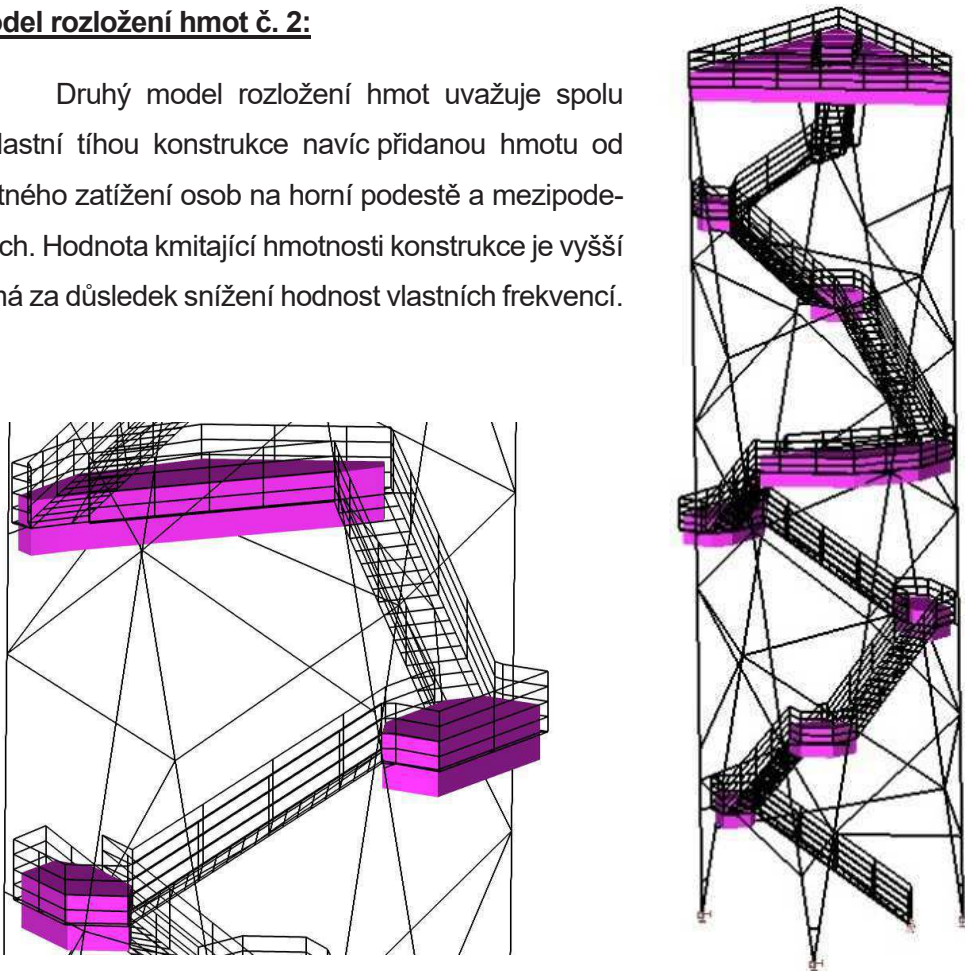


obr. 18: Čtvrtý a pátý vlastní tvar kmitání ($f_4 = 7,50$ Hz, $f_5 = 7,94$ Hz)



Model rozložení hmot č. 2:

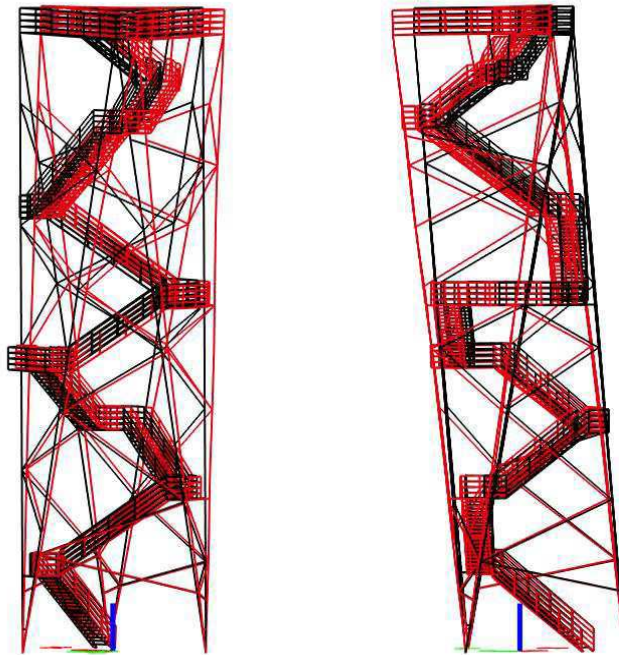
Druhý model rozložení hmot uvažuje spolu s vlastní tíhou konstrukce navíc přidanou hmotu od užitého zatížení osob na horní podestě a mezipodestách. Hodnota kmitající hmotnosti konstrukce je vyšší a má za důsledek snížení hodnot vlastních frekvencí.



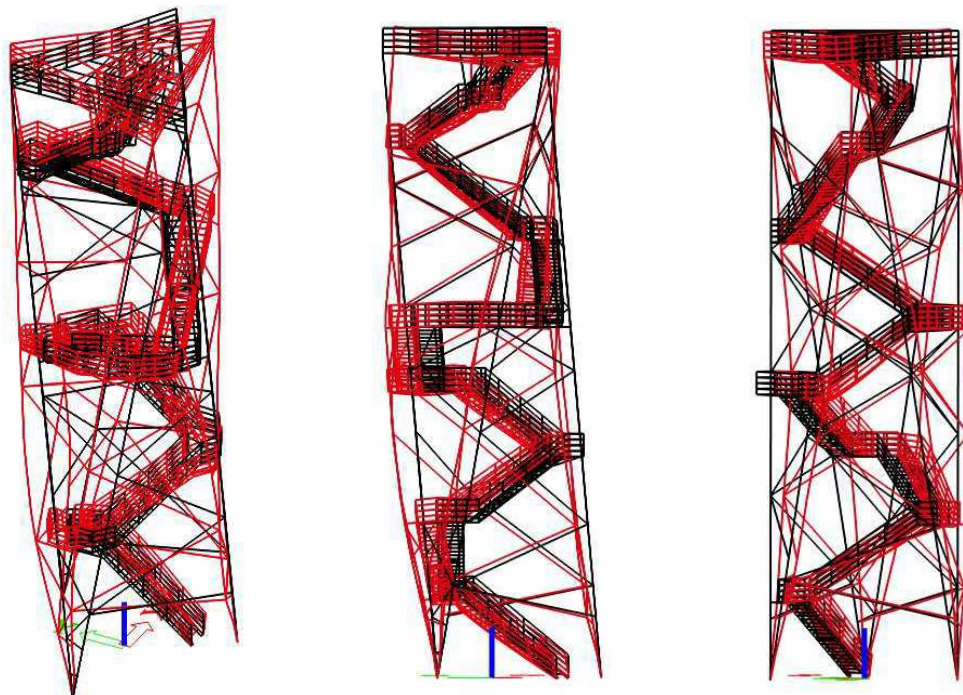
obr. 19: Schéma modelu rozložení hmot č.2

Tabulka 14: Vlastní tvary kmitání a jejich hodnoty frekvencí pro model rozložení hmoty 2

Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]
1	2.71	11	10.15	21	14.32
2	2.76	12	10.90	22	14.80
3	5.13	13	11.30	23	15.47
4	5.71	14	11.63	24	15.62
5	5.92	15	11.84	25	15.91
6	6.08	16	12.46	26	16.49
7	8.39	17	12.98	27	16.63
8	9.15	18	13.47	28	16.80
9	9.29	19	13.70	29	16.89
10	9.58	20	14.10	30	17.63



obr. 20: První a druhý vlastní tvar kmitání ($f_1 = 2,71 \text{ Hz}$, $f_2 = 2,76 \text{ Hz}$)

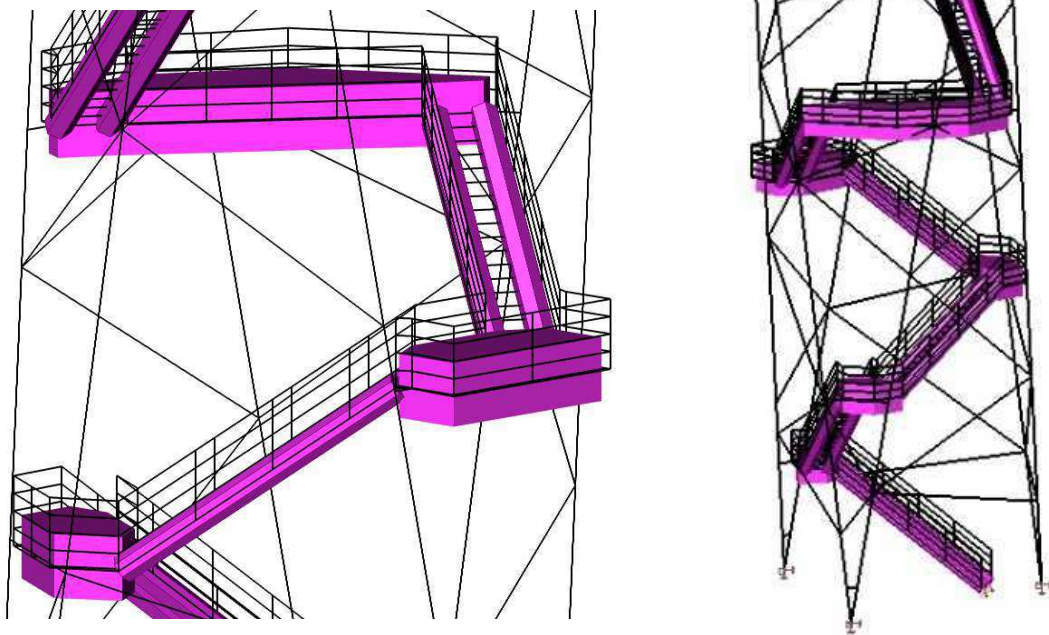


obr. 21: Třetí, čtvrtý a pátý vlastní tvar kmitání ($f_3 = 5,13 \text{ Hz}$, $f_4 = 5,71 \text{ Hz}$, $f_5 = 5,92 \text{ Hz}$)



Model rozložení hmot č. 3:

Třetí model uvažuje rozložení hmot od vlastní tíhy konstrukce spolu s hmotou od plného užitého zatížení rozloženou na horní podestu, mezipodesty i celou délku schodiště.



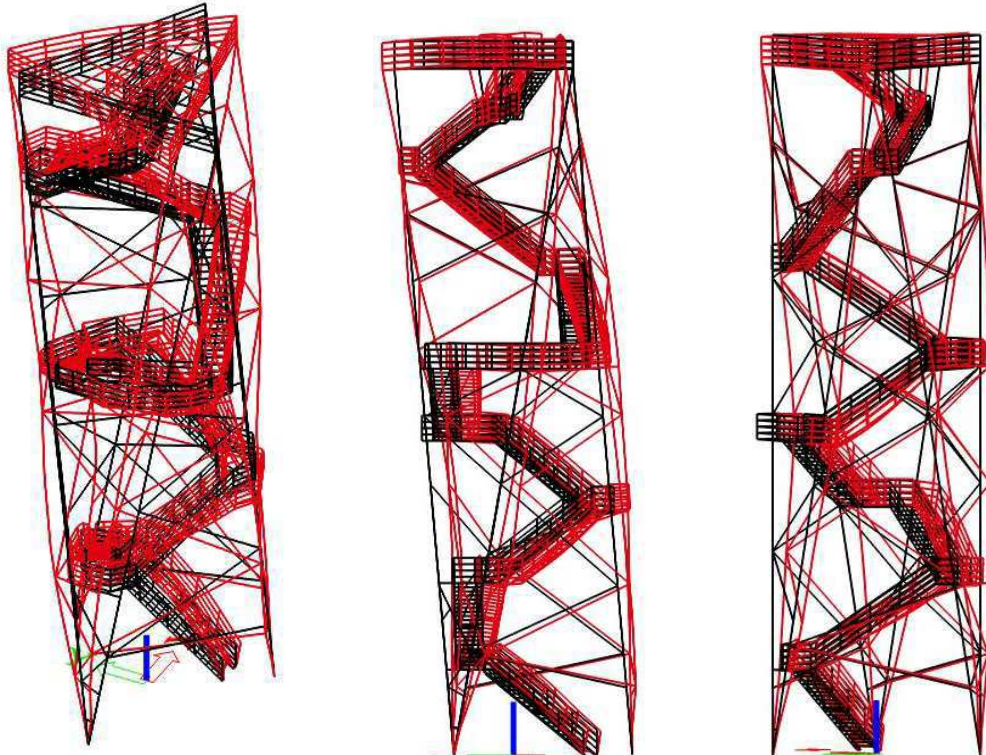
obr. 22: Schéma modelu rozložení hmoty č.3

Tabulka 15: vlastní tvary kmitání a jejich hodnoty frekvencí pro model rozložení hmoty 3

Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]	Vlastní tvar	frekvence [Hz]
1	2.44	11	7.59	21	10.73
2	2.49	12	7.76	22	11.18
3	4.67	13	8.26	23	11.44
4	4.90	14	8.47	24	11.99
5	4.99	15	8.56	25	12.05
6	5.36	16	8.75	26	12.60
7	6.10	17	9.27	27	13.00
8	6.65	18	9.69	28	13.33
9	6.90	19	9.98	29	13.48
10	7.32	20	10.35	30	14.32



obr. 23: První a druhý vlastní tvar kmitání ($f_1 = 2,44$ Hz, $f_2 = 2,49$ Hz)



obr. 24: Třetí, čtvrtý a pátý vlastní tvar kmitání ($f_3 = 4,67$ Hz, $f_4 = 4,90$ Hz, $f_5 = 4,99$ Hz)



5.2 Aerodynamická stabilita

Hlavními nosnými prvky konstrukce rozhledny jsou nosné sloupy kruhového průřezu, které mohou být náchylné k rezonanci od dynamického zatížení větrem, a to od účinků odtrhávání vírů na závětrné straně sloupu. Hlavní nosné sloupy byly proto posouzeny z hlediska aerodynamické stability.

Principem posouzení aerodynamické stability je porovnání směrodatné rychlosti větru s hodnotou kritické rychlosti, při které vzniká kmitání daného konstrukčního prvku o frekvenci rovné vlastní frekvenci kmitání celé konstrukce. Spolu s charakteristikami útlumu jsou z těchto rychlostí poté vypočítány amplitudy maximálních výchylek a zrychlení prvků pro každý z vlastních tvarů kmitání.

5.2.1 Kritická rychlost větru

Posouzen byl průřez nosného sloupu CHS 406x12,5 mm pro hodnotu střední rychlosti větru v místě 60% výšky konstrukce, tj. 18,78 m nad zemí.

$$v_{crit} = \frac{b n_i}{St}$$

St ... Strouhalovo číslo dle tvaru obtékaného průřezu

n_i ... i – tá vlastní frekvence

b ... průměr válce

(4)

Účinek odtrhávání vírů nemusí být vyšetřován, pokud hodnota kritické rychlosti přesáhne hodnotu 1,25ti násobku střední rychlosti větru (4).

$$v_{crit} > 1,25 v_m$$

v_m ... charakteristická 10 – minutová střední rychlost větru v průřezu, kde nastává odtrhávání vírů

(4)



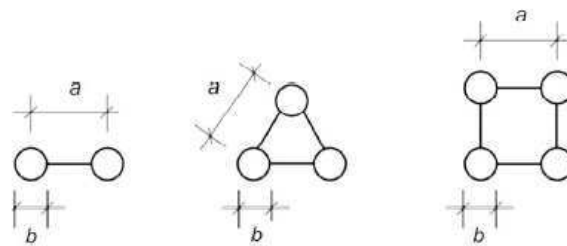
Strouhalovo číslo:

Strouhalovo číslo je parametr konstrukce, který závisí na průměru kruhového průřezu posuzovaného prvku a osové vzdálenosti rozmístění sloupů.

$$St = 0,1 + 0,085 \log(a/b) \dots \text{pro } 1 \leq a/b \leq 9$$

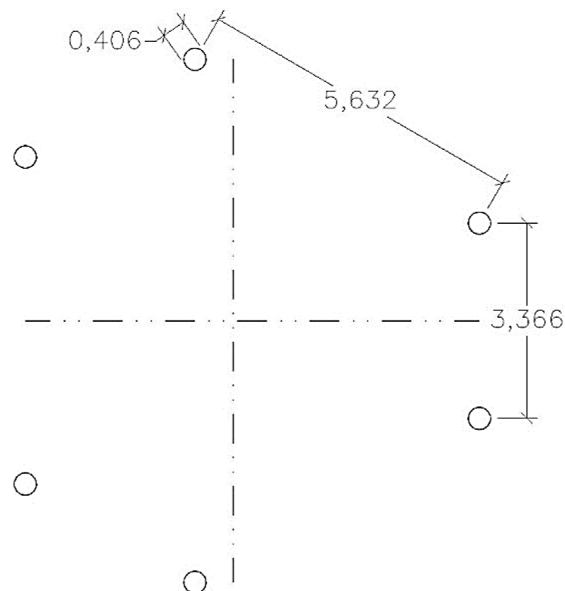
$$St = 0,18 \dots \text{pro } a/b > 9$$

a ... osová vzdálenost válců; b ... průměr válce



obr. 25: Schéma propojených válcových prvků dle normy (4)

Řez posuzované konstrukce rozhledny v místě 60% výšky:



obr. 26: Schéma příčného řezu řešené nosné konstrukce v místě 60% výšky



Výpočet Strouhalova čísla pro posuzovanou konstrukci:

$$\frac{a}{b} = \frac{5,632}{0,406} = 13,85 > 9 \rightarrow St = 0,18$$

Hodnoty kritických rychlostí byly vypočteny dle výše zmíněných vzorců pro všechny tři modely rozložení hmot a byly zaznamenány do následujících tabulek:

Model rozložení hmot č. 1:

Tabulka 16a: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 1

vlastní tvar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	3.89	3.95	6.10	7.50	7.94	9.92	10.84	11.44	11.46	11.81
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	8.77	8.91	13.76	16.92	17.91	22.38	24.45	25.80	25.85	26.64
v_{crit}/v_m	0.255	0.259	0.400	0.491	0.520	0.650	0.710	0.750	0.751	0.774

Tabulka 16b: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 1

vlastní tvar	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	12.32	12.98	13.53	14.11	14.35	14.80	15.23	15.77	15.91	16.90
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	27.79	29.28	30.52	31.83	32.37	33.38	34.35	35.57	35.89	38.12
v_{crit}/v_m	0.807	0.851	0.887	0.925	0.940	0.970	0.998	1.033	1.043	1.108

Tabulka 16c: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 1

vlastní tvar	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	17.05	17.57	18.22	18.69	18.80	19.02	19.14	19.45	19.77	20.35
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	38.46	39.63	41.10	42.16	42.40	42.90	43.17	43.87	44.59	45.90
v_{crit}/v_m	1.117	1.151	1.194	1.225	1.232	1.246	1.254	1.275	1.296	1.334



Model rozložení hmot č. 2:

Tabulka 17a: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 2

vlastní tvar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	2.71	2.75	5.06	5.69	5.88	6.08	8.37	9.14	9.29	9.55
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	6.11	6.20	11.41	12.83	13.26	13.71	18.88	20.62	20.95	21.54
v_{crit}/v_m	0.178	0.180	0.332	0.373	0.385	0.398	0.549	0.599	0.609	0.626

Tabulka 17b: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 2

vlastní tvar	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	10.15	10.91	11.29	11.63	11.84	12.46	12.99	13.47	13.70	14.09
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	22.89	24.61	25.47	26.23	26.71	28.10	29.30	30.38	30.90	31.78
v_{crit}/v_m	0.665	0.715	0.740	0.762	0.776	0.817	0.851	0.883	0.898	0.923

Tabulka 17c: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 2

vlastní tvar	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	14.32	14.80	15.46	15.62	15.90	16.51	16.63	16.80	16.89	17.63
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	32.30	33.38	34.87	35.23	35.86	37.24	37.51	37.89	38.10	39.77
v_{crit}/v_m	0.938	0.970	1.013	1.024	1.042	1.082	1.090	1.101	1.107	1.155

Model rozložení hmot č. 3:

Tabulka 18a: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 3

vlastní tvar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	2.44	2.49	4.62	4.87	4.96	5.36	6.11	6.64	6.90	7.33
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST [-]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	5.50	5.62	10.42	10.98	11.19	12.09	13.78	14.98	15.56	16.53
v_{crit}/v_m	0.160	0.163	0.303	0.319	0.325	0.351	0.400	0.435	0.452	0.480



Tabulka 18b: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 3

vlastní tvar	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	7.59	7.76	8.26	8.47	8.56	8.75	9.27	9.68	9.98	10.36
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	17.12	17.50	18.63	19.10	19.31	19.74	20.91	21.83	22.51	23.37
v_{crit}/v_m	0.497	0.509	0.541	0.555	0.561	0.573	0.607	0.634	0.654	0.679

Tabulka 18c: Hodnoty kritických rychlostí pro účinek odtrhávání vírů, model rozložení hmot č. 3

vlastní tvar	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	10.73	11.18	11.45	11.99	12.06	12.60	13.00	13.32	13.48	14.32
v_m [m/s]	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42	34.42
ST	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	24.20	25.22	25.83	27.04	27.20	28.42	29.32	30.04	30.40	32.30
v_{crit}/v_m	0.703	0.733	0.750	0.786	0.790	0.826	0.852	0.873	0.883	0.938

5.2.2 Maximální výchylka a zrychlení konstrukce

Pro výpočet hodnoty maximální výchylky $y_{F,max}$ byl uvažován postup dle EN 1991-1-4, metody 1. Maximální výchylky byly pro zjednodušení vypočteny pouze pro první a druhý vlastní tvar kmitání pro 3 různé modely rozložení hmot na konstrukci.

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc} K K_w c_{lat}$$

St ... Strouhalovo číslo

Sc ... Scrutonovo číslo

K_w ... součinitel účinné korelační délky

K ... součinitel vlastního tvaru kmitání

c_{lat} ... součinitel příčné síly

(4)



Scrutonovo číslo

$$Sc = \frac{2 \delta_s m_{i,e}}{\rho b^2}$$

δ_s ... tlumení konstrukce vyjádřené logaritmickým dekrementem útlumu

ρ ... měrná hmotnost vzduchu za podmínek při odtrhávání vírů

$m_{i,e}$... ekvivalentní hmotnost m_e na jednotku délky pro i – tý tvar kmitání konstrukce

b ... referenční šířka průřezu, ve kterém vzniká rezonanční odtrhávání vírů

(4)

Útlumové charakteristiky konstrukce

Konstrukční tlumení je charakterizováno tzv. logaritmickým dekrementem útlumu δ_s . Přibližnou hodnotu logaritmického dekrementu útlumu v základním tvaru kmitání stanovuje norma (4) dle typu posuzované konstrukce. Pro konstrukci rozhledny byla uvažována hodnota dekrementu útlumu 0,02.

$$\delta_s = 0,02 \text{ ... pro příhradové ocelové věže}$$

Ekvivalentní hmotnost na jednotku délky

Ekvivalentní hmotnost na jednotku délky je dle normy (citace vítr) definována pro základní tvar kmitání vztahem:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds}$$

$m(s)$... hmotnost na jednotku délky

l ... výška konstrukce

ϕ_1 ... základní tvar kmitání ($\phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta$; $\zeta = 2,5$... pro příhradové ocelové věže

(4)



Součinitel příčné síly

$$c_{lat} = 1,5 c_{lat(single)} \quad \dots \text{pro } 1 \leq a/b \leq 10$$

$$c_{lat} = c_{lat(single)} \quad \dots \text{pro } a/b \geq 15$$

$$\text{lineární interpolace} \quad \dots \text{pro } 10 \leq a/b \leq 15$$

(4)

Pro vzájemně propojené válce se součinitel příčné síly vypočítá ze vztahu:

$$c_{lat} = K_{iv} c_{lat(single)} \quad \dots \text{pro } 1,0 \leq a/b \leq 3,0$$

K_{iv} ... součinitel interference pro odtrhávání vírů

(4)

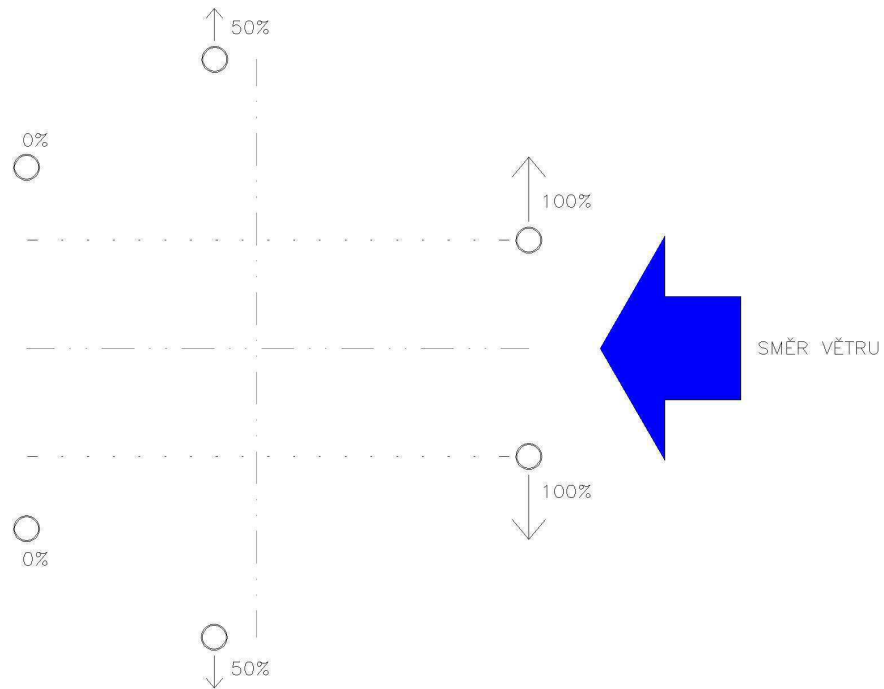
Poměr osové vzdálenosti sloupů a průměru kruhového průřezu má pro řešenou konstrukci hodnotu $a/b = 13,85$. Norma EN 1991-1-4 říká, že pro vzájemně propojené válce s poměrem $a/b > 3,0$ se doporučuje konzultace se specialistou.

V případě konstrukce rozhledny s poměrem $a/b = 13,85$ byl zvolen postup za předpokladu rozdílných účinků na jednotlivé sloupy podle jejich pozice vzhledem ke směru větru.



Pro výpočet c_{lat} byly uvažovány následující hodnoty součinitele interference K_{iv} pro dva na sebe kolmé směry větru.

a) směr větru X:

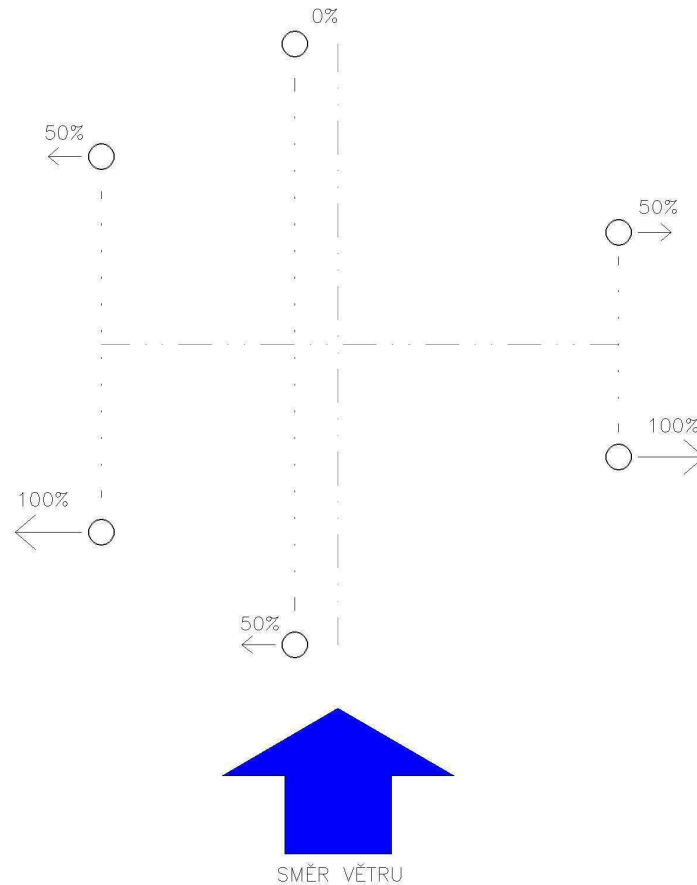


obr. 27: Procentuální hodnota účinků větru na jednotlivé sloupy, směr větru X

$$K_{iv} = 100\% + 100\% + 50\% + 50\% = 300\% \dots \rightarrow c_{lat} = 3,0 * c_{lat(single)}$$



b) směr větru Y:



obr. 28: Procentuální hodnota účinků větru na jednotlivé sloupy, směr větru Y

$$K_{iv} = 50\% + 100\% + 100\% + 50\% + 50\% = 350\% \dots \rightarrow c_{lat} = 3,5 * c_{lat(single)}$$

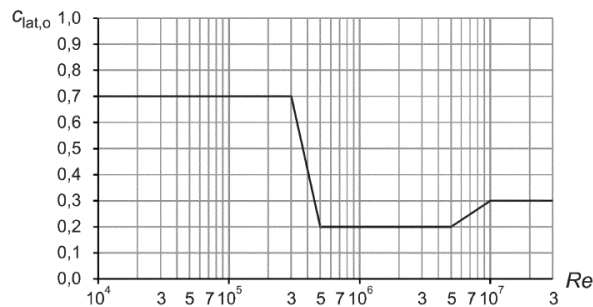
Bylo předpokládáno, že krajní sloupy přenesou 100% účinku, sloupy v zákrytu ve směru větru i šikmo v zákrytu přenesou 50% účinku a sloupy v pozadí přenesou 0% účinku z důvodu předpokladu zanedbatelného vytváření vírů v těchto místech konstrukce.

Podle vlastního tvaru kmitání konstrukce je hodnota součinitele interference vždy použita pro směr působení větru **kolmý** na vybočení konstrukce podle daného vlastního tvaru.



Součinitel příčné síly pro samostatný sloup $c_{lat(single)}$ závisí na Reynoldsově čísle obtékaného prvku a poměru kritické a střední rychlosti větru ve středu účinné korelační délky $v_{crit,i}/v_{m,L,i}$.

$$c_{lat,single} = c_{lat,0}$$



obr. 29: Graf součinitele $c_{lat,0}$ v závislosti na Reynoldsově čísle (4)

$$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,L,i}} \leq 0,83 \quad \dots \rightarrow c_{lat} = c_{lat,0}$$

$$0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,L,i}} < 1,25 \quad \dots \rightarrow c_{lat} = \left(3 - 2,4 \frac{v_{crit,i}}{v_{m,L,i}}\right) c_{lat,0}$$

$$1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,L,i}} \quad \dots \rightarrow c_{lat} = 0$$

Reynoldsovo číslo

Charakterizuje proudění vzduchu o dané viskozitě okolo prvku o kruhovém průřezu.

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b v_{crit,i}}{\nu}$$

b ... vnější průměr kruhového válce

ν ... kinematická viskozita vzduchu (uvažováno s hodnotou $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$v_{crit,i}$... kritická rychlost větru

(4)

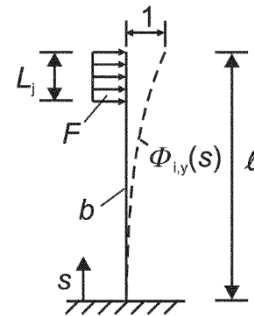
Součinitelé K_w a K byly dopočteny podle normy (4) dle geometrie prvního tvaru kmitání. Korelační délka byla zvolena jako horní třetina výšky konstrukce.



$$K_w = 3 \frac{L_i/b}{\lambda} \left[1 - \frac{L_i/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \left(\frac{L_i/b}{\lambda} \right)^2 \right] \leq 0,6 ;$$

$$\lambda = l/b; L_i = \frac{1}{3}H$$

$$K = 0,13$$



obr. 30: Schéma vlastního tvaru typické konstrukce (4)

$$K_w = 3 * \frac{(0,6 * 30)/0,406}{30/0,406} * \left[1 - \frac{(0,6 * 30)/0,406}{30/0,406} + \frac{1}{3} \left(\frac{(0,6 * 30)/0,406}{30/0,406} \right)^2 \right] = 0,703$$

$$0,703 > 0,6 \dots \rightarrow K_w = 0,6$$

Zrychlení konstrukce

Pro zjednodušení výpočtu bylo zrychlení konstrukce vypočteno dle normy (4) pro první a druhý vlastní tvar kmitání ze vzorce pro výpočet účinku odtrhávání vírů:

$$F_W(s) = m(s)(2\pi n_{i,y})^2 \phi_{i,y}(s) y_{F,max}$$

$$\rightarrow \text{max. zrychlení} \dots a_{max} = \frac{F_W(s)}{m(s)} = (2\pi n_{i,y})^2 \phi_{i,y}(s) y_{F,max}$$

$m(s)$... kmitající hmotnost konstrukce na jednotku délky v kg/m

$n_{i,y}$... vlastní frekvence konstrukce

$\phi_{i,y}(s)$... tvar kmitu konstrukce normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky

y_{max} ... maximální výchylka v závislosti na čase v bodě, kde $\phi_{i,y}(s)$ je rovno 1

Výpočet hodnot maximálních výchylek a zrychlení konstrukce pro 3 různé modely rozložení hmot je znázorněn v následujících tabulkách:



Tabulka 19: Výsledné hodnoty maximálních výchylek kmitání a zrychlení

Rozložení hmot	model 1 (vl.tíha)		model 2 (vl.tíha + užité podesty)		model 3 (vl.tíha + užité plné)	
	1	2	1	2	1	2
vlastní tvar						
b [m]	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
n_{iy} [Hz]	3.89	3.95	2.71	2.75	2.44	2.49
v_m [m/s]	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
v_{crit} [m/s]	8.77	8.91	6.11	6.20	5.50	5.62
v_{crit}/v_m	0.25	0.26	0.18	0.18	0.16	0.16
Re [-]	2.37E+05	2.41E+05	1.65E+05	1.68E+05	1.49E+05	1.52E+05
$C_{lat,0}$ [-]	2.45	2.10	2.10	2.45	2.10	2.45
C_{lat} [-]	2.45	2.10	2.10	2.45	2.10	2.45
$m_{e(1)}$ [kg/m] =	1482.03	1482.03	2389.67	2389.67	3205.74	3205.74
δ_s	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sc	287.71	287.71	463.91	463.91	622.34	622.34
Kw	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
K	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
$y_{f,max}$ [m]	0.008323	0.007134	0.004424	0.005162	0.003298	0.003848
A [m/s ²]	4.972	4.394	1.283	1.541	0.775	0.942

Z výsledků posouzení vyplývá, že konstrukce rozhledny vykazuje příznivé hodnoty maximálních výchylek. Hodnoty zrychlení ale dosahují nepříznivě vysokých hodnot. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u modelu rozložení hmot s uvažováním pouze vlastní tíhy konstrukce. Příznivější hodnoty maximálních výchylek a zrychlení prvků mají modely hmot, které navíc uvažují hmotu od zatížení osob.

Hodnoty zrychlení mohou mít nepříznivý vliv na komfort osob nacházející se na konstrukci. Z tohoto důvodu je nutné provést patřičná opatření vedoucí ke snížení hodnot zrychlení, např. instalace vhodných pohlcovačů kmitání.

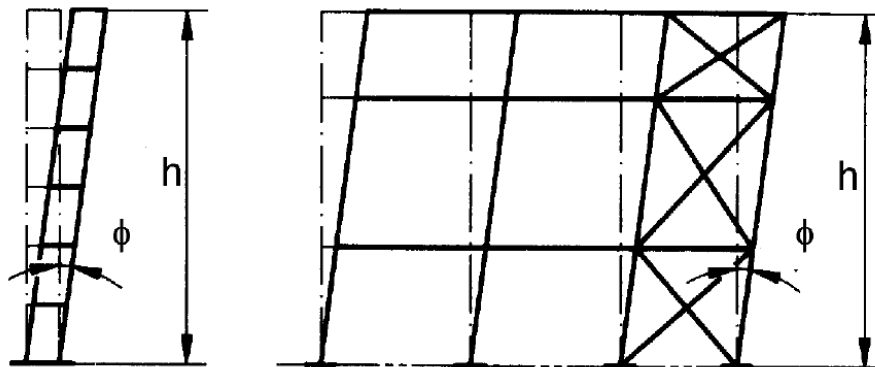
Dynamické pohlcovače kmitání jsou v případě řešené konstrukce rozhledny velmi výhodné z důvodu jejich možného umístění pod horní vyhlídkovou plošinou. Aerodynamické pohlcovače (rozrážeče) nejsou příliš vhodným řešením z estetických důvodů.



6 Statická analýza konstrukce

Výpočetní model konstrukce rozhledny byl staticky posouzen v softwaru SCIA Engineer 16 na typy zatížení dle Eurokódu uvedeny v kapitole 4. Pro výpočet byla vybrána nelineární analýza podle teorie druhého řádu, která do výpočtu zahrnuje lokální imperfekce prutů a vliv normálové síly na tuhost dílců. (13)

6.1 Zavedení imperfekce



obr. 31: Schéma zavedení globální imperfekce pro rámové konstrukce dle normy (5)

Hodnota globální imperfekce ϕ byla vypočtena ze vztahu:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (5)$$

ϕ_0 ... základní hodnota: $\frac{1}{200}$

α_h ... redukční součinitel pro výšku "h" aplikovaný na sloupy

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \dots \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0; \quad h \dots \text{výška konstrukce}$$

α_m ... redukční součinitel pro počet sloupů v řadě



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

*m ... počet sloupů v řadě zahrnující pouze ty sloupy, které přenášejí svislé zatížení N_{Ed}
ne méně než 50% průměrné hodnoty všech sloupů vertikální roviny*

(5)

Výpočet globální imperfekce:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{31,3}} = 0,357 < \frac{2}{3} \dots \rightarrow \alpha_h = \frac{2}{3}$$

$$m = 6 \dots \rightarrow \alpha_m = \sqrt{0,5 + \left(1 + \frac{1}{6}\right)} = 1,291$$

$$\phi = \frac{1}{200} * \frac{2}{3} * 1,291 = 0,0043 \dots \text{odpovídá tangentě úhlu o velikosti } 0,25^\circ$$

Hlavní nosné sloupy jsou navrženy pod úhlem $8,53^\circ$ od svislice. Hodnota tangens pro tento úhel je rovna číslu 0,15. V porovnání s tangentou globální imperfekce tak vyplývá, že hlavní nosné sloupy mají větší úhel naklopení než vypočítaná hodnota globální imperfekce, tj. že veškeré svislé zatížení aplikované na konstrukci již zahrnuje vodorovné účinky díky sklonu os hlavních nosných sloupů.

Zavedení globální imperfekce konstrukce rozhledny nebylo uvažováno z důvodu dostatečného sklonu os hlavních nosných sloupů vůči svislici. Pro tuto konstrukci mají svislé síly již zahrnutý vodorovný účinek díky sklonu sloupu a není tak nutné zavádět globální imperfekce na konstrukci.

Lokální imperfekce prutů

U všech prvků konstrukčního modelu byla zadána počáteční imperfekce prutů v závislosti na jejich délce s hodnotou:

$$\frac{e_0}{L} = \frac{1}{250}$$



6.2 Zatěžovací stavy

Pro statické posouzení konstrukce na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti bylo uvažováno s následujícími zatěžovacími stavy:

- 1.ZS – G_0 (*vlastní tíha*)
- 2.ZS – Q_1 (*užitné zatížení – plné zatížení*)
- 3.ZS – Q_2 (*užitné zatížení – horní podesta a mezipodesty*)
- 4.ZS – W_1 (*vítr směr 1*)
- 5.ZS – W_2 (*vítr směr 2*)
- 6.ZS – W_3 (*vítr směr 3*)

6.3 Kombinace zatěžovacích stavů

Statické posouzení bylo vyhodnoceno na základě kombinací zatěžovacích stavů dle EN 1990. Pro posouzení mezního stavu únosnosti je použita základní kombinace pro trvalé a dočasné návrhové situace (1):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$\gamma_{G,j}$... dílčí součinitel j – tého stálého zatížení

$G_{k,j}$... charakteristická hodnota j – tého stálého zatížení

$\gamma_{Q,i}$... dílčí součinitel i – tého proměnného zatížení

$Q_{k,1}$... charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení

$Q_{k,i}$... charakteristická hodnota i – tého proměnného zatížení

$\psi_{0,i}$... součinitel pro kombinační hodnotu i – tého proměnného zatížení

(1)



Hodnoty dílčích součinitelů zatížení byly uvažovány podle EN 1990, Tab.A1.2(A).

Tabulka 20: Hodnoty dílčích součinitelů dle normy (1)

	příznivý účinek	nepříznivý účinek
$\gamma_{G,j}$	1,0	1,35
$\gamma_{Q,1}; \gamma_{Q,i}$	0	1,5

Pro posouzení mezního stavu použitelnosti jsou uvažovány charakteristická a kvazistálá kombinace zatížení:

Charakteristická kombinace:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Kvazistálá kombinace:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Hodnoty použitých kombinačních součinitelů:

Tabulka 21: Hodnoty kombinačních součinitelů dle normy (1)

	$\psi_{0,i}$	$\psi_{2,i}$
Užitné zatížení (kategorie C)	0,7	0,6
Zatížení větrem	0,6	0



Přehled kombinací zatěžovacích stavů pro posouzení na mezní stav únosnosti:

(NC = non-linear combination)

- 1.NC – $1,35 \cdot G_0$
- 2.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1$
- 3.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2$
- 4.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$
- 5.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$
- 6.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_3$
- 7.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$
- 8.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$
- 9.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_3$
- 10.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1$
- 11.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2$
- 12.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3$
- 13.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$
- 14.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$
- 15.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$
- 16.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$
- 17.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$
- 18.NC – $1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$
- 19.NC – $1,00 \cdot G_0$
- 20.NC – $1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1$
- 21.NC – $1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2$
- 22.NC – $1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$
- 23.NC – $1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$



$$24.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_1 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_3$$

$$25.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_1$$

$$26.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_2$$

$$27.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot Q_2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot W_3$$

$$28.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1$$

$$29.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2$$

$$30.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3$$

$$31.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$32.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

$$33.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$34.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

$$35.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$36.NC - 1,00 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_3 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

Přehled kombinací zatěžovacích stavů na mezní stav použitelnosti:

$$37.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0$$

$$38.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_1$$

$$39.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_2$$

$$40.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_1 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_1$$

$$41.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_1 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_2$$

$$42.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_1 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_3$$

$$43.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_2 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_1$$

$$44.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_2 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_2$$

$$45.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot Q_2 + 1,00 \cdot 0,6 \cdot W_3$$



$$46.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_1$$

$$47.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_2$$

$$48.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_3$$

$$49.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_1 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$50.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_1 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

$$51.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_2 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$52.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_2 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

$$53.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_3 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

$$54.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_3 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_2$$

$$55.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 0,6 \cdot Q_1$$

$$56.NC(MSP) - 1,00 \cdot G_0 + 0,6 \cdot Q_2$$



6.4 Výsledky vnitřních sil

a) Hodnoty vnitřních sil hlavních nosných sloupů CHS 406x12,5 mm:

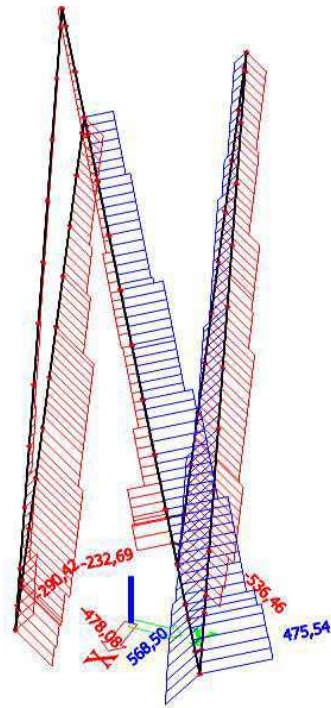
Tabulka 22: Hodnoty vnitřních sil hlavních nosných sloupů

Prvek	Průřez	dx [m]	Nelineární kombi-nace	N_{Ed} [kN]	$V_{y,Ed}$ [kN]	$V_{z,Ed}$ [kN]	$M_{x,Ed}$ [kNm]	$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]
B1	CHS406X12.5	1,200	NC17	-344,89	33,10	40,94	6,93	-33,42	-40,81
B1	CHS406X12.5	4,500	NC29	478,13	-18,20	1,18	-2,28	-3,81	-28,18
B1	CHS406X12.5	2,600	NC29	476,02	-19,27	2,34	-2,26	-7,15	7,31
B1	CHS406X12.5	12,000	NC11	423,28	1,38	-14,80	-0,49	-24,92	7,96
B1	CHS406X12.5	1,200	NC18	-307,97	32,30	41,86	5,47	-34,66	-38,02
B1	CHS406X12.5	4,500	NC29	460,03	7,24	11,29	-3,01	-3,83	-28,31
B1	CHS406X12.5	7,612	NC17	-196,03	-4,02	-7,31	7,38	-8,35	11,02
B1	CHS406X12.5	1,200	NC28	27,70	22,03	40,82	3,83	-40,92	-20,12
B2	CHS406X12.5	30,447	NC6	-70,89	11,21	8,59	-1,97	53,42	66,48
B2	CHS406X12.5	3,000	NC15	-633,73	13,42	9,13	2,94	-41,14	-31,80
B2	CHS406X12.5	30,447	NC30	-4,81	0,68	-2,00	-0,14	0,42	-7,43
B2	CHS406X12.5	1,200	NC28	-459,13	-38,25	-25,22	-1,19	12,89	42,45
B2	CHS406X12.5	3,000	NC29	-521,47	14,10	9,72	3,57	-41,96	-35,42
B2	CHS406X12.5	1,200	NC15	-563,61	-27,97	-64,78	3,01	59,29	8,49
B2	CHS406X12.5	0,000	NC17	-389,78	-27,02	39,45	-5,75	-56,02	61,02
B2	CHS406X12.5	15,000	NC12	-53,18	-3,39	2,34	4,12	5,45	-6,24
B2	CHS406X12.5	0,000	NC15	-544,22	-2,84	-63,09	-1,66	121,69	9,67
B2	CHS406X12.5	30,447	NC5	-183,41	-19,39	4,53	-0,53	18,89	-74,19
B2	CHS406X12.5	0,000	NC28	-464,35	-31,47	-5,51	-4,80	11,79	76,31
B3	CHS406X12.5	4,500	NC13	-579,43	4,95	-4,40	-6,96	4,49	0,53
B3	CHS406X12.5	30,447	NC19	-11,97	1,67	0,22	-0,66	4,84	9,02
B3	CHS406X12.5	1,200	NC17	-509,02	-24,65	-43,63	-8,90	35,95	18,57
B3	CHS406X12.5	0,000	NC29	-280,26	49,22	24,69	-1,89	-60,24	-91,45
B3	CHS406X12.5	1,200	NC18	-479,22	-22,68	-45,36	-9,84	39,20	16,18
B3	CHS406X12.5	1,200	NC15	-350,24	27,63	50,86	4,83	-45,79	-32,06
B3	CHS406X12.5	1,200	NC28	-474,56	18,36	-11,43	-11,90	20,77	-3,41
B3	CHS406X12.5	10,783	NC17	-483,54	1,81	-10,76	11,53	26,86	-23,08
B3	CHS406X12.5	0,000	NC15	-377,43	47,87	29,62	-0,57	-70,47	-86,96
B3	CHS406X12.5	0,000	NC30	-399,06	-8,02	-38,38	-11,72	75,51	23,13
B3	CHS406X12.5	30,447	NC6	-195,02	15,56	13,57	-2,80	46,13	65,12
B3	CHS406X12.5	4,500	NC13	-579,43	4,95	-4,40	-6,96	4,49	0,53
B4	CHS406X12.5	0,000	NC15	-339,07	-47,00	14,20	0,46	-21,65	107,68
B4	CHS406X12.5	1,200	NC30	475,54	36,94	9,14	4,05	-14,54	-34,65

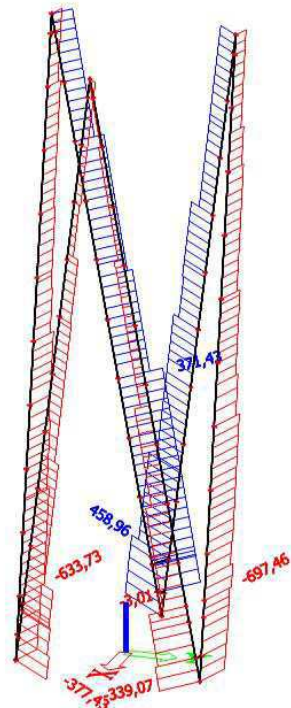


B4	CHS406X12.5	21,000	NC32	184,10	51,35	63,98	-0,89	-8,14	-6,64
B4	CHS406X12.5	3,806	NC17	315,72	-10,95	-61,30	5,27	-24,69	21,64
B4	CHS406X12.5	21,000	NC13	153,39	43,71	67,43	-1,42	-7,14	-16,25
B4	CHS406X12.5	30,447	NC18	172,44	-4,32	7,94	-5,58	31,03	-24,29
B4	CHS406X12.5	1,200	NC17	347,92	31,92	0,07	6,95	-7,02	-32,53
B4	CHS406X12.5	0,000	NC28	394,23	17,58	21,46	2,50	-50,21	-31,11
B4	CHS406X12.5	30,447	NC4	80,50	-11,21	13,43	-4,28	45,14	-48,43
B4	CHS406X12.5	0,000	NC30	474,14	38,00	9,87	4,05	-25,93	-79,55
B5	CHS406X12.5	3,806	NC15	-697,46	-22,53	-1,85	-0,34	3,17	31,39
B5	CHS406X12.5	3,806	NC30	568,50	-9,93	16,50	0,78	19,37	-7,45
B5	CHS406X12.5	24,000	NC30	236,68	-39,36	28,69	-2,53	-19,29	17,66
B5	CHS406X12.5	24,000	NC15	-348,62	44,36	-13,14	5,03	11,87	-24,74
B5	CHS406X12.5	0,000	NC15	-635,16	17,22	-52,15	-9,20	99,21	-34,91
B5	CHS406X12.5	24,000	NC17	177,57	-30,20	44,78	-1,52	-28,36	12,38
B5	CHS406X12.5	1,200	NC16	-608,32	5,17	-33,55	-11,12	49,10	-4,84
B5	CHS406X12.5	3,806	NC17	471,58	-25,53	14,44	5,33	8,41	18,46
B5	CHS406X12.5	3,806	NC16	-629,85	10,82	-27,50	-10,81	-45,49	20,57
B5	CHS406X12.5	0,000	NC16	-610,34	3,13	-52,00	-11,12	100,53	-9,84
B5	CHS406X12.5	25,819	NC30	238,66	-38,09	27,58	-2,53	31,79	-52,65
B5	CHS406X12.5	30,447	NC6	74,12	24,98	3,24	-6,01	31,44	76,97
B6	CHS406X12.5	3,000	NC17	-651,42	6,08	4,32	5,32	-32,90	-21,82
B6	CHS406X12.5	3,000	NC29	567,46	57,21	41,72	-1,21	38,72	43,14
B6	CHS406X12.5	1,200	NC30	-481,38	-26,62	-57,42	4,04	53,05	11,96
B6	CHS406X12.5	1,200	NC15	456,21	68,09	48,78	0,43	-41,96	-68,03
B6	CHS406X12.5	0,000	NC18	-539,17	-7,28	-61,11	1,36	113,51	17,41
B6	CHS406X12.5	25,819	NC6	-189,94	-14,39	7,43	-4,65	-10,02	5,03
B6	CHS406X12.5	0,000	NC15	449,85	39,10	29,53	6,32	-76,00	-114,22
B6	CHS406X12.5	0,000	NC36	-514,15	-6,84	-60,84	1,09	113,56	17,59
B6	CHS406X12.5	3,000	NC15	458,96	66,83	47,65	0,41	44,61	53,10

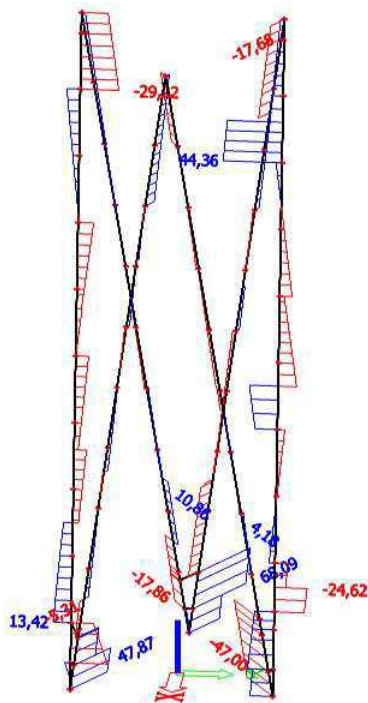
Vykreslení vnitřních sil:



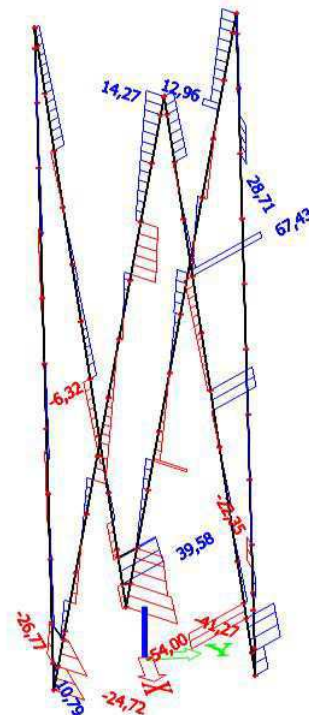
obr. 32: Průběh N [kN] – kombinace č.30



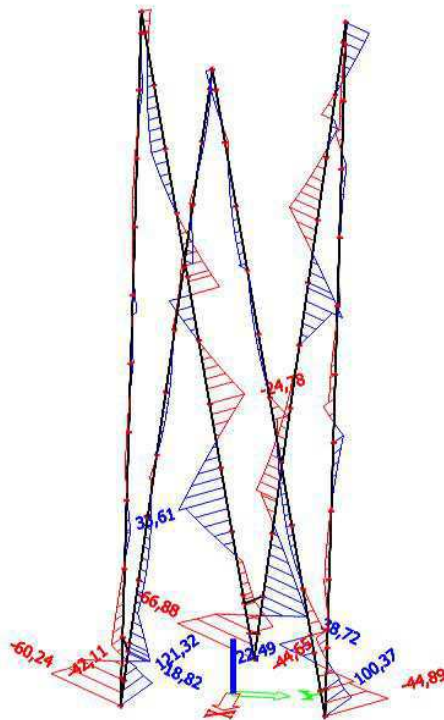
obr. 33: Průběh N [kN] – kombinace č.15



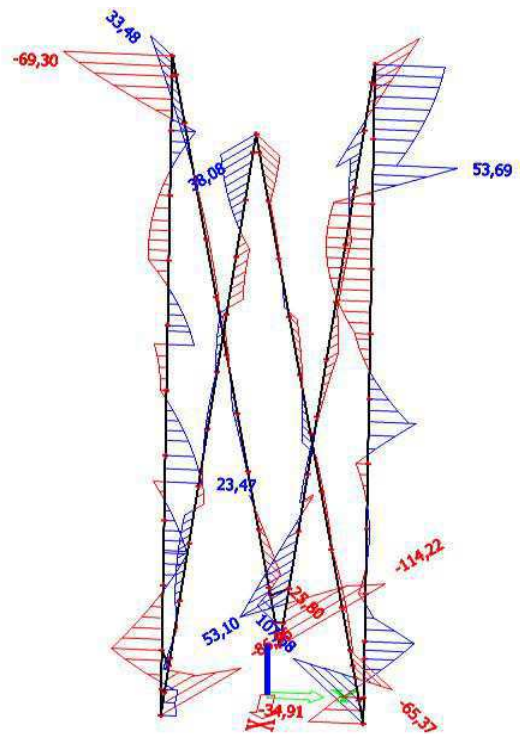
obr. 34: Průběh V_y [kN] – kombinace č.15



obr. 35: Průběh V_z [kN] – kombinace č.13



obr. 36: Průběh M_y [kNm] – kombinace č.29



obr. 37: Průběh M_z [kNm] – kombinace č.15

b) Hodnoty vnitřních sil nosníků rámu horní podesty a spojníků sloupů RHS

350x150x12,5 mm:

Tabulka 23: Hodnoty vnitřních sil nosníků rámu horní podesty a spojníků sloupů

Prvek	Průřez	dx [m]	Nelineární kombinace	N_{Ed} [kN]	$V_{y,Ed}$ [kN]	$V_{z,Ed}$ [kN]	$M_{x,Ed}$ [kNm]	$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]
B17	RHS350X150X12.5	3,188	NC29	0,87	15,97	-8,78	7,63	-4,12	9,03
B17	RHS350X150X12.5	0,000	NC13	65,75	-81,57	57,85	-23,96	-10,52	23,19
B17	RHS350X150X12.5	0,000	NC17	59,39	-92,88	56,09	-22,90	-8,12	27,01
B17	RHS350X150X12.5	1,594	NC17	60,56	23,68	-9,07	-1,05	3,38	2,08
B17	RHS350X150X12.5	3,188	NC4	28,26	0,79	-50,82	24,74	-26,67	2,45
B17	RHS350X150X12.5	0,670	NC4	42,52	-50,70	48,74	-24,71	23,47	-19,05
B17	RHS350X150X12.5	2,518	NC4	28,57	0,16	-50,00	25,15	6,86	2,12
B17	RHS350X150X12.5	0,670	NC17	58,58	-92,36	55,44	-23,21	29,80	-34,98
B18	RHS350X150X12.5	0,330	NC30	-14,76	39,69	-22,05	-7,16	-5,03	7,73
B18	RHS350X150X12.5	3,752	NC13	32,42	37,48	-12,49	-4,16	-18,04	-8,23
B18	RHS350X150X12.5	0,000	NC15	29,31	-58,04	51,88	-3,13	10,75	6,30
B18	RHS350X150X12.5	0,000	NC30	-14,76	42,59	-21,75	-9,04	2,20	-5,84



B18	RHS350X150X12.5	4,125	NC2	6,97	-1,72	-62,47	20,17	-31,72	5,69
B18	RHS350X150X12.5	0,000	NC5	25,49	-39,09	59,07	-9,19	-1,33	4,95
B18	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	3,03	18,76	33,40	-18,11	-12,15	-1,74
B18	RHS350X150X12.5	4,125	NC5	17,91	-0,20	-62,35	16,34	-34,92	3,28
B18	RHS350X150X12.5	0,417	NC15	23,36	-38,44	36,53	-6,38	32,08	-15,56
B18	RHS350X150X12.5	0,417	NC15	26,89	26,64	-19,26	0,26	27,85	-15,57
B18	RHS350X150X12.5	0,417	NC30	-3,87	-16,07	8,23	-7,93	-3,71	9,84
B19	RHS350X150X12.5	0,000	NC29	-22,02	-12,90	-6,56	-5,37	18,48	4,03
B19	RHS350X150X12.5	1,574	NC18	23,05	9,48	3,40	-3,08	18,09	-3,41
B19	RHS350X150X12.5	0,568	NC29	-14,72	-36,07	-26,58	-3,37	13,34	-2,05
B19	RHS350X150X12.5	0,568	NC17	12,16	49,71	53,91	13,83	-10,13	0,69
B19	RHS350X150X12.5	5,063	NC6	-3,43	-3,73	-27,41	-6,40	-18,62	-2,96
B19	RHS350X150X12.5	0,568	NC29	-22,01	-8,53	-7,03	-8,13	14,62	-2,05
B19	RHS350X150X12.5	0,568	NC17	-0,22	12,10	42,83	20,41	-7,96	0,68
B19	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	5,10	7,98	49,85	19,62	-36,12	-4,92
B19	RHS350X150X12.5	1,574	NC17	14,05	0,95	27,26	6,94	25,06	-0,98
B19	RHS350X150X12.5	0,000	NC17	0,59	12,63	43,51	20,06	-33,11	-6,36
B19	RHS350X150X12.5	1,574	NC15	-2,67	-13,51	6,54	5,99	0,86	5,27
B23	RHS350X150X12.5	0,000	NC2	-13,76	-1,89	21,11	5,12	-14,66	1,11
B23	RHS350X150X12.5	0,000	NC29	88,61	0,11	-23,27	-1,35	27,71	1,20
B23	RHS350X150X12.5	2,125	NC34	34,49	-20,24	-23,90	0,08	-10,41	-2,63
B23	RHS350X150X12.5	2,125	NC17	23,12	17,70	0,15	1,20	11,22	-0,03
B23	RHS350X150X12.5	3,938	NC5	-3,81	-1,44	-50,10	-15,67	-29,54	3,17
B23	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	-1,85	0,08	23,21	2,36	-14,63	0,45
B23	RHS350X150X12.5	3,938	NC2	-8,54	-0,79	-49,22	-18,48	-17,05	4,62
B23	RHS350X150X12.5	3,938	NC15	2,09	-1,84	-40,10	-9,77	-33,95	1,08
B23	RHS350X150X12.5	2,417	NC34	34,13	-20,04	-24,17	-0,08	-17,16	-8,51
B23	RHS350X150X12.5	3,313	NC17	28,46	1,43	-18,65	-2,93	-1,71	8,30
B24	RHS350X150X12.5	0,604	NC2	-6,92	-0,86	44,00	-24,78	12,67	-7,65
B24	RHS350X150X12.5	0,000	NC28	80,43	11,70	-8,51	-7,31	7,57	-1,50
B24	RHS350X150X12.5	0,604	NC13	73,29	-8,93	2,70	-10,66	11,77	2,58
B24	RHS350X150X12.5	2,096	NC13	49,63	22,18	-32,88	5,61	-6,72	6,63
B24	RHS350X150X12.5	2,700	NC13	10,79	2,61	-84,77	19,44	-49,26	5,59
B24	RHS350X150X12.5	0,000	NC5	1,53	-4,52	45,17	-23,19	-13,36	-7,85
B24	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	31,49	6,32	37,20	-26,81	-8,42	-6,82
B24	RHS350X150X12.5	2,700	NC4	7,36	-0,13	-70,67	21,86	-36,65	3,76
B24	RHS350X150X12.5	1,143	NC13	73,39	-5,27	-14,47	-1,44	17,87	-2,20
B24	RHS350X150X12.5	0,604	NC5	1,52	-4,27	44,44	-23,34	13,69	-10,50
B24	RHS350X150X12.5	0,604	NC36	63,40	18,12	-1,55	-10,62	4,45	7,56
B27	RHS350X150X12.5	8,797	NC15	-88,48	3,24	-48,31	-6,06	-61,25	1,98

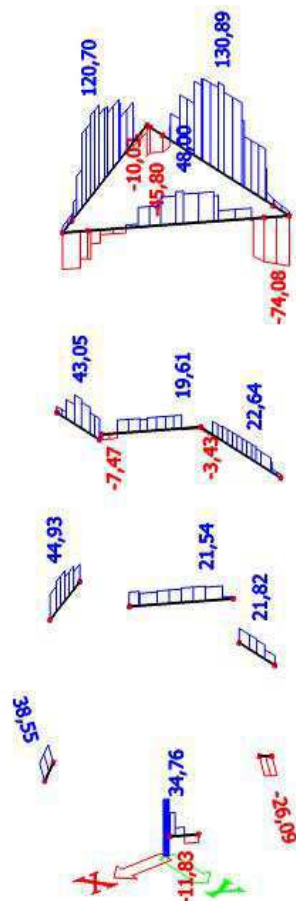


B27	RHS350X150X12.5	4,142	NC6	130,89	-4,78	13,74	-1,38	67,55	1,43
B27	RHS350X150X12.5	7,569	NC6	20,16	-17,94	-61,34	-5,40	-5,55	-6,75
B27	RHS350X150X12.5	1,500	NC5	-18,07	18,06	47,58	8,08	-3,73	-5,00
B27	RHS350X150X12.5	9,000	NC6	-45,80	-0,77	-71,13	-5,42	-93,19	0,99
B27	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	5,93	-5,10	59,79	6,78	-85,72	5,84
B27	RHS350X150X12.5	9,000	NC5	-77,61	4,31	-65,77	-7,78	-92,21	3,43
B27	RHS350X150X12.5	0,000	NC5	-58,19	-1,20	55,13	9,01	-79,36	1,46
B27	RHS350X150X12.5	5,459	NC6	120,28	-3,78	-40,45	-3,72	83,41	-1,59
B28	RHS350X150X12.5	9,000	NC17	-85,89	-6,46	-34,25	-11,82	-44,15	-7,05
B28	RHS350X150X12.5	4,798	NC5	99,56	4,09	3,20	1,77	51,89	0,59
B28	RHS350X150X12.5	7,569	NC6	-55,85	-16,02	-39,37	-10,65	1,04	3,06
B28	RHS350X150X12.5	1,500	NC6	-19,79	6,23	43,69	10,12	0,24	0,31
B28	RHS350X150X12.5	9,000	NC5	-3,32	-6,31	-47,71	-10,59	-61,70	-4,73
B28	RHS350X150X12.5	0,000	NC2	-32,25	3,10	52,06	10,30	-75,73	0,21
B28	RHS350X150X12.5	9,000	NC6	-74,08	-8,53	-45,56	-13,02	-57,50	-8,01
B28	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	-54,18	-0,08	50,66	12,60	-74,56	1,94
B28	RHS350X150X12.5	3,897	NC6	28,93	2,47	15,88	5,44	56,84	0,58
B28	RHS350X150X12.5	6,183	NC6	15,32	-6,84	-29,41	-8,49	38,51	4,21
B29	RHS350X150X12.5	0,000	NC2	-15,57	-2,79	50,34	-10,54	-68,12	4,11
B29	RHS350X150X12.5	3,000	NC4	127,42	-4,31	13,70	-3,78	38,82	1,13
B29	RHS350X150X12.5	1,126	NC2	0,68	-10,54	42,32	-11,38	-11,76	2,35
B29	RHS350X150X12.5	7,569	NC6	-6,27	17,22	-39,23	8,55	4,78	-3,42
B29	RHS350X150X12.5	9,000	NC6	-10,03	-3,47	-46,25	11,51	-55,55	0,67
B29	RHS350X150X12.5	0,000	NC6	8,91	-8,03	53,51	-9,80	-72,47	5,06
B29	RHS350X150X12.5	2,083	NC6	56,60	-9,69	42,21	-12,18	21,48	-4,25
B29	RHS350X150X12.5	9,000	NC2	-12,77	-1,70	-44,56	12,12	-55,13	1,52
B29	RHS350X150X12.5	3,897	NC6	119,60	-3,75	12,35	-4,52	52,97	-2,41
B29	RHS350X150X12.5	0,000	NC17	30,08	-7,44	42,57	-7,04	-58,25	6,55
B77	RHS350X150X12.5	0,000	NC29	-28,61	4,02	-25,45	8,20	15,78	0,32
B77	RHS350X150X12.5	0,637	NC17	27,38	0,36	57,26	-30,46	12,88	-2,50
B77	RHS350X150X12.5	1,125	NC15	2,77	-19,60	-3,90	-0,68	3,25	-6,34
B77	RHS350X150X12.5	1,613	NC15	6,17	17,79	-10,42	8,25	-0,21	-4,93
B77	RHS350X150X12.5	2,250	NC2	9,94	9,66	-29,30	25,44	-8,68	8,48
B77	RHS350X150X12.5	0,000	NC17	26,80	-0,09	58,04	-30,17	-23,39	-2,58
B77	RHS350X150X12.5	0,637	NC6	21,41	-3,06	55,50	-31,85	16,19	-3,66
B77	RHS350X150X12.5	1,613	NC6	14,03	13,21	-28,43	28,11	13,08	2,46
B77	RHS350X150X12.5	2,250	NC6	14,38	13,47	-29,17	27,97	-5,52	10,95
B77	RHS350X150X12.5	0,000	NC29	-28,61	4,02	-25,45	8,20	15,78	0,32
B77	RHS350X150X12.5	0,637	NC17	27,38	0,36	57,26	-30,46	12,88	-2,50
B1602	RHS350X150X12.5	0,562	NC17	-14,31	-24,62	7,80	15,21	2,36	-10,43

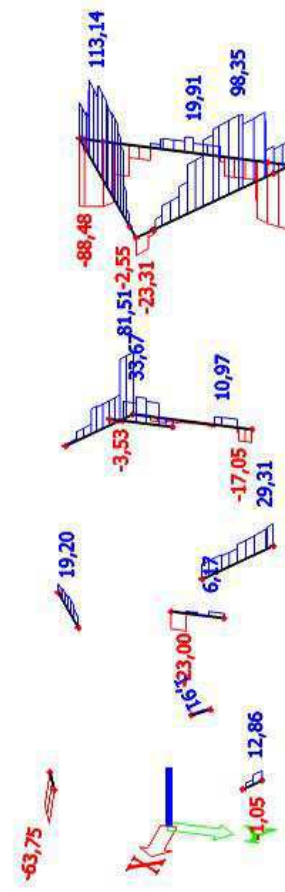


B1602	RHS350X150X12.5	0,937	NC17	43,97	35,37	47,91	-14,27	4,44	-6,30
B1602	RHS350X150X12.5	0,562	NC15	12,86	-50,45	-54,41	-13,49	8,73	-19,66
B1602	RHS350X150X12.5	0,937	NC13	36,52	54,04	-2,32	-7,49	-8,28	-7,69
B1602	RHS350X150X12.5	1,125	NC15	-1,05	48,94	-119,21	32,80	-47,60	11,23
B1602	RHS350X150X12.5	0,937	NC30	34,66	20,34	57,50	-27,78	2,90	-8,87
B1602	RHS350X150X12.5	1,125	NC16	-10,32	35,62	-113,23	20,72	-48,95	5,62
B1602	RHS350X150X12.5	0,000	NC29	9,09	-36,31	-71,94	-4,31	45,89	7,05
B1602	RHS350X150X12.5	1,125	NC5	8,86	42,40	-81,62	32,40	-29,45	11,49

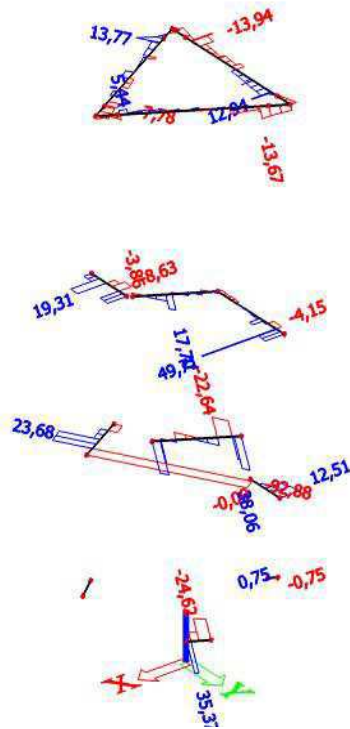
Vykreslení vnitřních sil:



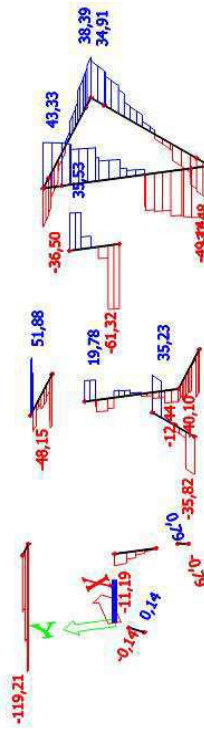
obr. 38: Průběh N [kN] – kombinace č.6



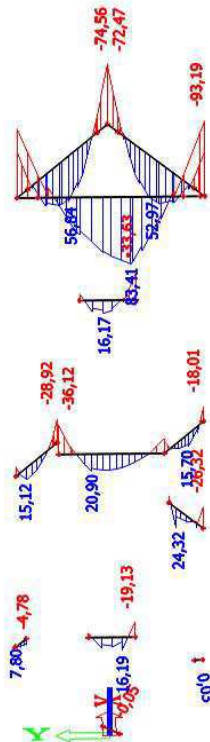
obr. 39: Průběh N [kN] – kombinace č.15



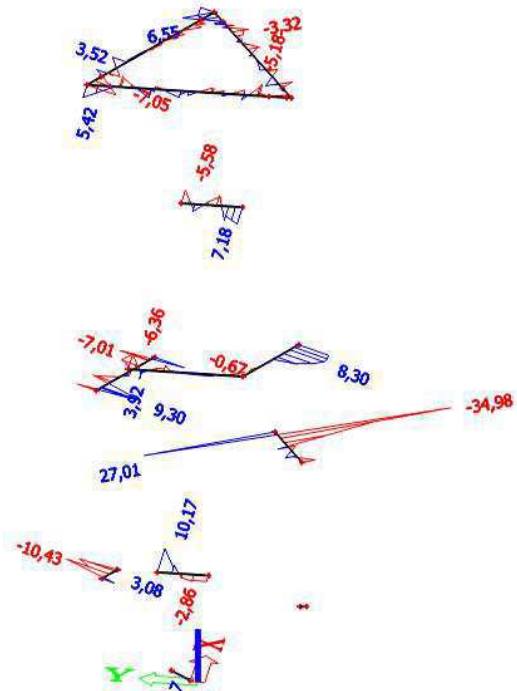
obr. 40: Průběh V_y [kN] – kombinace č.17



obr. 41: Průběh V_z [kN] – kombinace č.15



obr. 42: Průběh M_y [kNm] – kombinace č.6



obr. 43: Průběh M_z [kNm] – kombinace č.17



**c) Hodnoty vnitřních sil vybraných nosníků schodiště a mezipodest CHS
200x100x6,3 mm:**

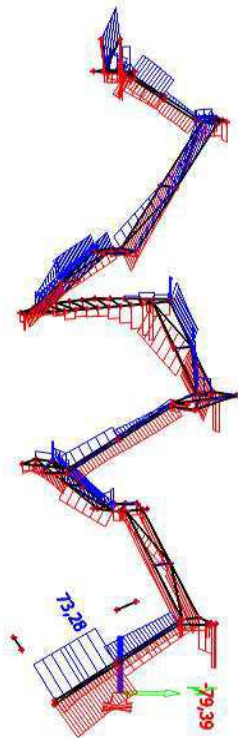
Tabulka 24: Hodnoty vnitřních sil vybraných nosníků schodiště a mezipodest

Prvek	Průřez	dx [m]	Nelineární kombinace	N _{Ed} [kN]	V _{y,Ed} [kN]	V _{z,Ed} [kN]	M _{x,Ed} [kNm]	M _{y,Ed} [kNm]	M _{z,Ed} [kNm]
B100	RHS200X100X6.3	0,000	NC17	-118,01	25,31	58,37	-4,51	-33,28	-8,74
B100	RHS200X100X6.3	0,013	NC21	0,77	1,35	7,68	0,02	-4,50	-0,11
B100	RHS200X100X6.3	1,089	NC2	-9,80	-0,31	15,32	0,93	3,76	0,01
B100	RHS200X100X6.3	0,013	NC18	-115,78	26,27	50,20	-4,64	-26,23	-8,56
B100	RHS200X100X6.3	1,089	NC19	-1,89	-0,05	2,52	0,16	0,60	0,01
B100	RHS200X100X6.3	0,000	NC18	-115,79	26,22	50,23	-4,65	-26,89	-8,91
B100	RHS200X100X6.3	0,013	NC5	-11,63	0,62	20,53	1,13	-15,98	-0,16
B100	RHS200X100X6.3	0,013	NC17	-99,99	1,91	49,26	-1,61	-34,08	-2,54
B100	RHS200X100X6.3	1,089	NC13	-93,47	4,58	45,57	-1,34	17,58	1,06
B100	RHS200X100X6.3	1,089	NC17	-99,89	5,18	45,95	-1,53	17,31	1,30
B628	RHS200X100X6.3	3,425	NC17	-37,39	-0,09	-0,68	-0,37	5,60	1,13
B628	RHS200X100X6.3	0,000	NC16	73,28	-0,22	-1,15	-0,21	2,76	0,05
B628	RHS200X100X6.3	3,425	NC29	71,92	-0,30	-1,99	-0,15	-3,12	-0,82
B628	RHS200X100X6.3	0,000	NC17	-36,69	1,08	1,67	-0,38	3,90	-0,61
B628	RHS200X100X6.3	3,425	NC15	72,14	-0,23	-3,03	-0,51	-1,51	-0,45
B628	RHS200X100X6.3	0,000	NC5	44,46	-0,09	-1,97	-0,63	8,72	0,31
B628	RHS200X100X6.3	3,425	NC30	-34,87	-0,12	1,62	-0,02	4,07	0,69
B628	RHS200X100X6.3	0,000	NC36	-34,16	1,00	1,39	-0,03	-0,97	-0,86
B628	RHS200X100X6.3	2,936	NC17	-37,29	0,08	-0,34	-0,37	5,85	1,13
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC15	-102,05	-8,04	-34,04	-2,79	-26,33	2,29
B1604	RHS200X100X6.3	0,000	NC30	24,52	24,30	28,52	1,28	17,65	-2,22
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC29	-70,05	-10,66	-16,52	-1,66	-12,61	0,66
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC17	-15,36	31,09	13,14	0,17	12,28	5,44
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC5	-96,63	-0,35	-35,85	-2,71	-26,69	3,41
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC30	24,48	24,30	28,50	1,28	23,72	2,96
B1604	RHS200X100X6.3	0,213	NC6	-44,34	24,90	-5,42	-0,89	-2,84	5,44
B92	RHS200X100X6.3	1,184	NC13	-67,40	-3,01	-13,83	-1,57	-11,83	-2,17
B92	RHS200X100X6.3	0,002	NC11	3,82	10,32	13,35	5,38	-10,50	-1,51
B92	RHS200X100X6.3	0,593	NC17	-59,32	-3,45	-18,54	-1,88	-1,97	-0,09
B92	RHS200X100X6.3	0,000	NC4	-39,62	29,20	-2,48	0,77	-6,13	0,34
B92	RHS200X100X6.3	0,000	NC30	-55,95	6,57	-25,25	-8,70	16,72	3,23
B92	RHS200X100X6.3	0,000	NC15	1,29	21,79	22,66	8,90	-20,11	-2,08
B92	RHS200X100X6.3	0,002	NC15	1,29	21,79	22,66	8,90	-20,07	-2,04
B92	RHS200X100X6.3	0,000	NC5	0,53	25,14	20,91	8,21	-20,64	-2,02

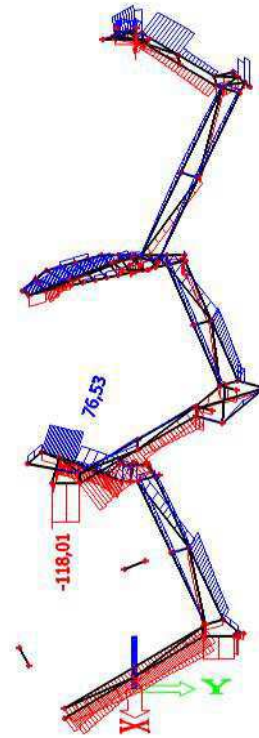


B92	RHS200X100X6.3	0,002	NC30	-37,08	-2,43	-25,00	-0,82	17,51	1,79
B92	RHS200X100X6.3	1,184	NC17	-59,34	-3,44	-18,69	-1,87	-12,73	-2,38
B92	RHS200X100X6.3	0,002	NC36	-57,80	7,88	-23,38	-8,29	15,78	3,27
B86	RHS200X100X6.3	0,000	NC15	-72,45	-5,27	3,36	1,40	6,62	1,13
B86	RHS200X100X6.3	3,448	NC15	50,43	1,42	-1,50	0,54	7,60	-0,03
B86	RHS200X100X6.3	3,291	NC36	-27,22	3,77	2,39	-0,05	-0,63	1,47
B86	RHS200X100X6.3	6,582	NC4	-17,11	-1,50	-13,13	-0,27	-9,70	-0,30
B86	RHS200X100X6.3	0,313	NC2	-8,10	-2,71	6,11	0,75	1,77	0,43
B86	RHS200X100X6.3	6,582	NC30	-46,32	0,91	-2,43	-1,84	-7,84	0,29
B86	RHS200X100X6.3	6,269	NC15	35,68	-1,57	-8,38	2,23	0,22	0,11
B86	RHS200X100X6.3	6,582	NC13	-34,18	-1,53	-13,00	-0,62	-12,34	-0,27
B86	RHS200X100X6.3	3,448	NC5	39,95	0,85	-0,61	0,73	9,02	-0,08
B86	RHS200X100X6.3	3,291	NC15	-49,08	-4,56	-2,37	1,02	5,80	-1,48
B87	RHS200X100X6.3	0,000	NC13	-87,15	6,88	4,39	-2,04	3,39	-1,34
B87	RHS200X100X6.3	3,291	NC19	-3,09	0,26	-0,10	0,04	1,21	0,08
B87	RHS200X100X6.3	3,761	NC17	-52,31	-2,45	-0,73	0,07	3,84	0,47
B87	RHS200X100X6.3	0,313	NC15	-49,52	9,26	2,95	-1,99	0,01	0,40
B87	RHS200X100X6.3	6,582	NC2	-22,85	1,77	-5,72	0,29	0,35	1,06
B87	RHS200X100X6.3	0,313	NC5	-51,92	6,06	7,43	-1,31	1,13	-0,92
B87	RHS200X100X6.3	0,000	NC15	-49,99	8,01	3,72	-2,26	-1,05	-2,31
B87	RHS200X100X6.3	5,956	NC15	-23,69	-1,87	-2,72	2,42	3,66	0,19
B87	RHS200X100X6.3	0,313	NC29	-16,33	3,84	1,65	-1,12	-2,24	-0,03
B87	RHS200X100X6.3	1,254	NC6	-60,47	2,97	3,61	0,14	8,38	-0,31
B87	RHS200X100X6.3	3,291	NC17	-50,74	3,54	-1,72	0,38	4,15	1,41
B1505	RHS200X100X6.3	0,768	NC6	-72,45	-5,27	3,36	1,40	6,62	1,13
B1505	RHS200X100X6.3	0,384	NC29	20,77	-3,09	-1,20	-0,60	-2,25	-0,20
B1505	RHS200X100X6.3	0,768	NC29	20,77	-3,10	-1,31	-0,60	-2,73	-1,39
B1505	RHS200X100X6.3	0,768	NC4	-19,80	10,80	-29,54	1,41	-33,26	5,49
B1505	RHS200X100X6.3	0,768	NC2	-18,14	10,16	-31,04	1,39	-32,66	5,26
B1505	RHS200X100X6.3	0,000	NC29	20,77	-3,09	-1,09	-0,60	-1,81	0,99
B1505	RHS200X100X6.3	0,000	NC6	-22,11	9,93	-29,74	1,47	-10,88	-2,54
B1505	RHS200X100X6.3	0,000	NC19	-2,55	1,45	-4,75	0,21	-1,40	-0,36
B1505	RHS200X100X6.3	0,000	NC4	-19,67	10,17	-28,72	1,42	-10,88	-2,58

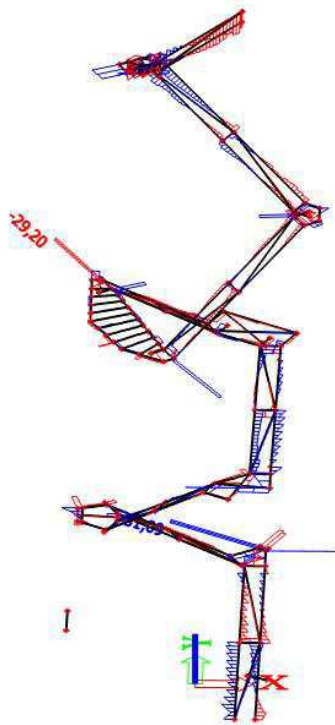
Vykreslení vnitřních sil:



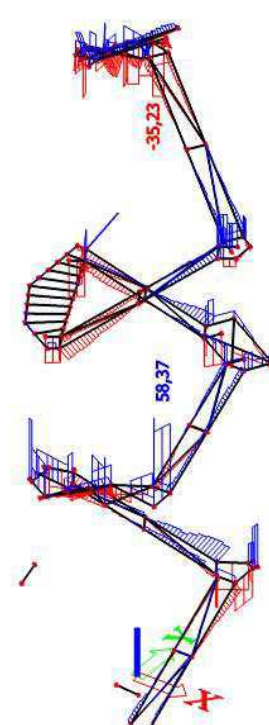
obr. 44: Průběh N [kN] – kombinace č.16



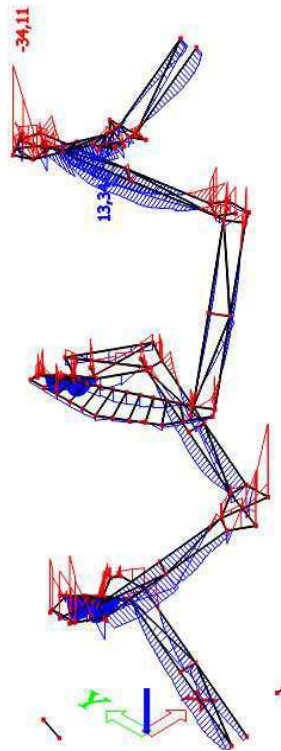
obr. 45: Průběh N [kN] – kombinace č.17



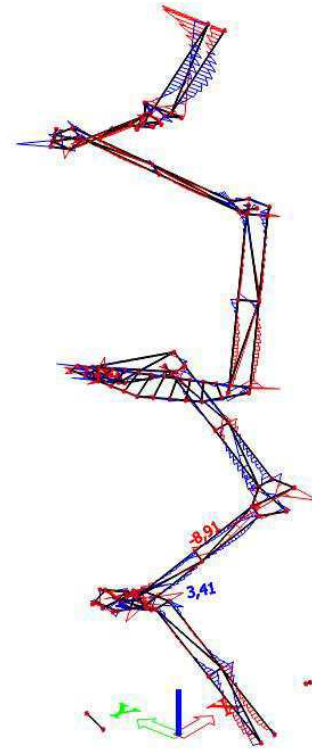
obr. 46: Průběh V_y [kN] – kombinace č.17



obr. 47: Průběh V_z [kN] – kombinace č.17



obr. 48: Průběh M_y [kNm] – kombinace č.6



obr. 49: Průběh M_z [kNm] – kombinace č.18

d) Hodnoty vnitřních sil vybraných ztužidel CHS 114x5,0 mm, CHS 140x5,0 mm, CHS 140x8,0 mm:

Tabulka 25: Hodnoty vnitřních sil vybraných ztužidel

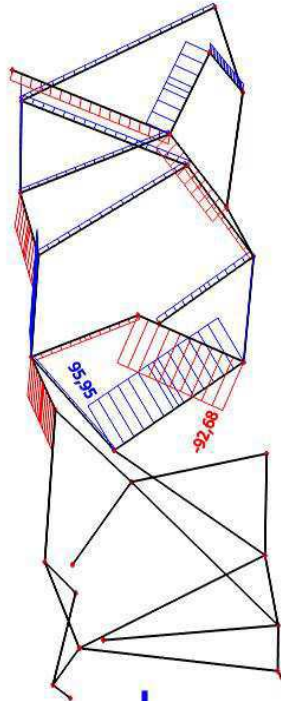
Prvek	Průřez	dx [m]	Nelineární kombinace	N_{Ed} [kN]	$V_{y,Ed}$ [kN]	$V_{z,Ed}$ [kN]	$M_{x,Ed}$ [kNm]	$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]
B1723	CHS114X5.0	0,000	NC14	-121,15	3,14	-2,92	0,07	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	4,390	NC20	0,88	0,00	-0,21	-0,07	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	4,390	NC14	-120,23	-3,13	2,91	0,07	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	0,000	NC32	-120,97	3,13	-3,04	0,07	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	4,390	NC32	-120,19	-3,13	3,03	0,07	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	4,390	NC5	-4,60	-0,38	-0,37	-0,08	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	4,390	NC30	-106,70	2,90	2,68	0,09	0,00	0,00
B1723	CHS114X5.0	2,195	NC32	-120,63	0,00	0,00	0,07	-3,67	3,79
B1723	CHS114X5.0	2,195	NC16	-11,43	0,00	0,00	-0,05	0,56	0,80
B1723	CHS114X5.0	2,195	NC18	-108,95	0,00	0,00	0,08	-3,17	-3,57
B1723	CHS114X5.0	2,195	NC14	-120,74	0,00	0,00	0,07	-3,53	3,79
B1695	CHS114X5.0	0,000	NC2	-8,63	0,15	0,62	-0,06	0,00	0,00



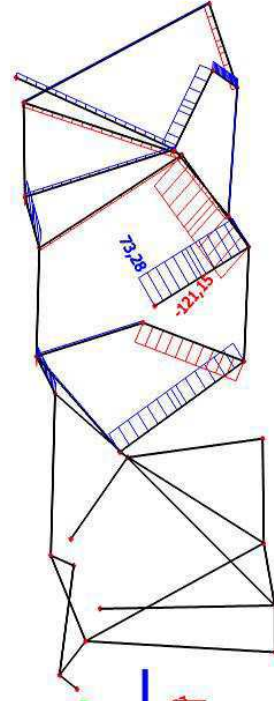
B1695	CHS114X5.0	0,000	NC29	95,95	-0,41	0,55	-0,01	0,00	0,00
B1695	CHS114X5.0	5,822	NC17	6,62	-0,55	-0,45	-0,09	0,00	0,00
B1695	CHS114X5.0	0,000	NC17	6,14	0,55	0,45	-0,09	0,00	0,00
B1695	CHS114X5.0	5,822	NC15	88,90	0,42	-0,64	-0,04	0,00	0,00
B1695	CHS114X5.0	0,000	NC15	89,95	-0,41	0,64	-0,04	0,00	0,00
B1695	CHS114X5.0	2,911	NC2	-8,37	0,00	0,00	-0,06	0,91	0,22
B1695	CHS114X5.0	2,911	NC15	89,42	0,00	0,00	-0,04	0,83	-0,54
B1695	CHS114X5.0	2,911	NC17	6,37	0,00	0,00	-0,09	0,65	0,79
B1726	CHS140X5.0	7,565	NC12	-112,41	5,10	3,56	0,02	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	7,565	NC16	124,27	0,27	-0,68	-0,08	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	0,000	NC30	-110,65	-5,10	-4,01	0,03	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	7,565	NC30	-112,32	5,10	3,99	0,03	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	7,565	NC17	-109,70	4,81	-4,96	0,02	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	0,000	NC17	-107,77	-4,81	4,86	0,02	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	0,000	NC15	120,25	-0,27	0,68	-0,11	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	7,565	NC36	-111,10	4,96	3,88	0,03	0,00	0,00
B1726	CHS140X5.0	3,783	NC30	-111,71	0,02	0,03	0,03	-8,75	-11,17
B1726	CHS140X5.0	3,783	NC17	-108,97	0,02	0,03	0,02	10,71	-10,48
B1726	CHS140X5.0	3,783	NC30	-111,71	0,02	0,03	0,03	-8,75	-11,17
B1707	CHS140X8.0	0,000	NC18	-125,50	-4,62	5,95	0,12	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	8,299	NC11	2,36	-0,65	-1,25	-0,01	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	8,299	NC18	-123,03	4,57	-5,88	0,12	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	8,299	NC14	-121,35	-3,85	-5,95	0,11	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	0,000	NC14	-123,40	3,88	6,00	0,11	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	8,299	NC29	2,26	-0,65	-0,93	-0,01	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	0,000	NC17	-125,19	-4,57	5,90	0,12	0,00	0,00
B1707	CHS140X8.0	4,149	NC14	-122,53	0,00	0,00	0,11	14,08	9,10
B1707	CHS140X8.0	4,149	NC18	-124,44	0,00	0,00	0,12	13,97	-10,85
B1693	CHS140X8.0	0,000	NC2	-15,09	-0,22	1,53	0,01	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	0,000	NC29	116,36	-0,30	0,85	0,07	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	7,812	NC17	5,47	-0,40	-1,23	-0,03	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	0,000	NC17	4,48	0,41	1,23	-0,03	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	7,812	NC2	-14,07	0,22	-1,53	0,01	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	7,812	NC36	9,68	-0,40	-0,90	-0,04	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	7,352	NC15	108,90	0,26	-0,94	0,07	0,47	-0,13
B1693	CHS140X8.0	0,000	NC15	109,07	-0,30	1,11	0,07	0,00	0,00
B1693	CHS140X8.0	3,906	NC2	-14,59	0,00	0,00	0,01	3,02	-0,43
B1693	CHS140X8.0	3,906	NC15	108,98	0,00	0,00	0,07	1,99	-0,54
B1693	CHS140X8.0	3,906	NC17	4,97	0,00	0,00	-0,03	2,39	0,78



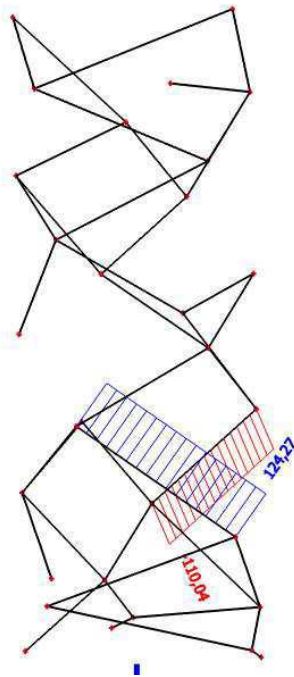
Vykreslení vnitřních sil:



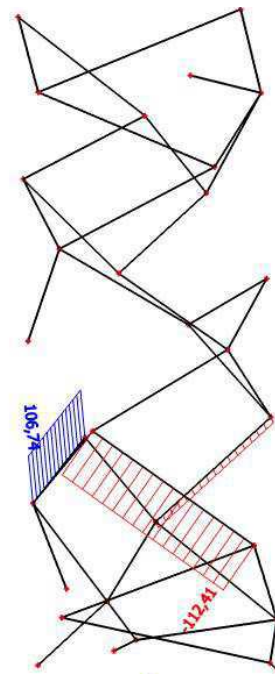
obr. 50: Průběh N [kN] – kombinace č.29



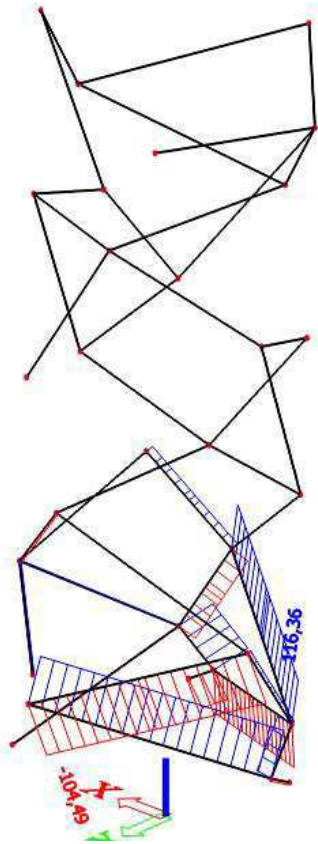
obr. 51: Průběh N [kN] – kombinace č.14



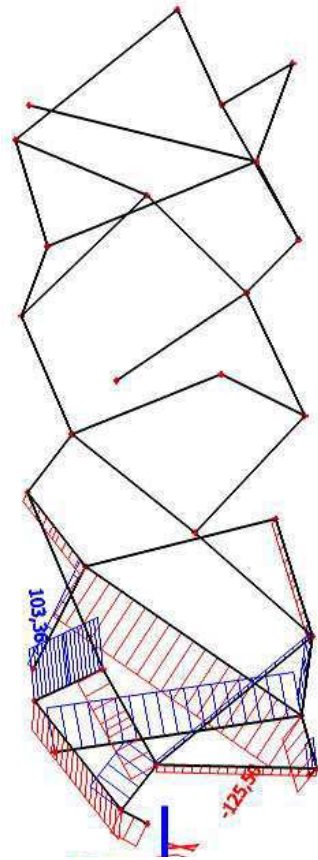
obr. 52: Průběh N [kN] – kombinace č.12



obr. 53: Průběh N [kN] – kombinace č.33



obr. 54: Průběh N [kN] – kombinace č.29



obr. 55: Průběh N [kN] – kombinace č.18



7 Mezní stav únosnosti

Pro posouzení konstrukce na mezní stav únosnosti byly vybrány tyto nejvíce namáhané prvky a přípoje:

Posudek nosných prvků podle SFS-EN 1993-1-1 (5):

- hlavní nosné sloupy
- nosníky rámu horní podesty, spojníky sloupů u mezipodest
- nosníky schodišťových ramen
- ztužidlové nosníky

Posudek přípojů podle SFS-EN 1993-1-8 (6):

- Posouzení přípoje nosníku horní podesty k hlavnímu nosnému sloupu
- Posouzení přípoje ztužidla k hlavnímu nosnému sloupu na propíchnutí

Vnitřní síly daného prvku byly vybrány jako maximální hodnoty ze zatěžovacích kombinací z výpočtu podle nelineární analýzy. Uzavřené průřezy mají velkou torzní tuhost. Vzhledem k nízkým hodnotám kroutících momentů M_x je posouzení prvků na torzní únosnost zanedbáno. Vzpěrné délky prutů pro oba na sebe kolmé směry vybočení byly uvažovány s hodnotami podle stabilitního výpočtu ze softwaru SCIA Engineer 16.

Pro posudek kombinace vzpěrného tlaku a ohybu byly vybrány vnitřní síly působící v kritickém místě na základě stabilitního posudku ze softwaru SCIA Engineer 16. Interakční součinitelé k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} a k_{zz} vycházejí z dvou variant postupů dle EN 1993-3-1. Hodnoty těchto součinitelů závisí na momentových faktorech C_{my} , C_{mz} a C_{mLT} podle průběhu momentů v daném nosníku. Z důvodu složitého průběh momentů na nosnících je obtížné stanovit přesné hodnoty momentových faktorů ručním výpočtem. Pro přesný výpočet byly proto hodnoty interakčních součinitelů uvažovány ze softwaru SCIA Engineer 16.



7.1 Posouzení nosných prvků

7.1.1 Posouzení nosných sloupů

Průřezové charakteristiky prvků:

CHS 406x12,5 mm

$$A = 15\,500 \text{ mm}^2$$

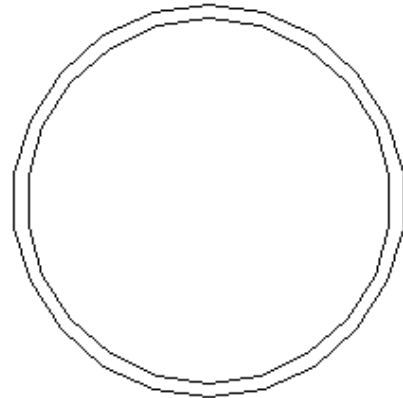
$$A_v = 9\,847,5 \text{ mm}^2$$

$$I = 3,003 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{el} = 1,478 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 1,9395 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$i = 139 \text{ mm}$$



obr. 56: Schéma průřezu CHS 406x12,5 mm

Třída průřezu:

$$\frac{d}{t} = \frac{406,4}{12,5} = 32,5 < 50 \cdot \varepsilon^2 = 32,8$$

Třída průřezu 1

7.1.1.1 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 568,50 \text{ kN (tah) ... zatěžovací kombinace č. 30}$$

$$N_{c,Ed} = 697,46 \text{ kN (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 15}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{15\,500 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,0} = 5\,502,5 \text{ kN} > N_{t,Ed} \wedge > N_{c,Ed}$$

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,10; \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,13$$



7.1.1.2 Posouzení průřezu na únosnost při ohybu

$$M_{y,Ed} = 121,69 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 29}$$

$$M_{z,Ed} = 114,22 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 15}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{1,9395 * 10^{-3} * 355 * 10^6}{1,0} = 688,52 \text{ kNm} > M_{y,Ed} \wedge > M_{z,Ed}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} = 0,18; \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rd}} = 0,17$$

7.1.1.3 Posouzení průřezu na smykovou únosnost

$$V_{y,Ed} = 68,09 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 15}$$

$$V_{z,Ed} = 67,43 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 13}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{9,8475 * 10^{-3} * \frac{355 * 10^6}{\sqrt{3}}}{1,0} = 2\,018,33 \text{ kN} > V_{y,Ed} \wedge > V_{z,Ed}$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,03; \frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,03$$

7.1.1.4 Posouzení průřezu na kombinaci smyku s ohybem

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,03 < 0,5$$

Spolupůsobení smyku může být při posouzení zanedbáno



7.1.1.5 Posouzení průřezu na kombinaci tlaku s ohybem

$N_{c,Ed} = 544,22 \text{ kN}$; $M_{y,Ed} = 121,69 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 9,67 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 15

$$M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{Pl,Rd} \frac{(1-n)}{(1-0,5 * a)}; M_{N,z,Rd} \leq M_{Pl,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Pl,Rd}} = \frac{544,22}{5\,502,5} = 0,10;$$

$$a = \frac{(A - 2dt)}{A} = \frac{(15\,500 - 2 * 406,4 * 12,5)}{15\,500} = 0,34$$

$$688,52 * \frac{(1 - 0,10)}{(1 - 0,5 * 0,34)} = 746,59 \text{ kNm} > 688,52 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = 688,52 \text{ kNm}$$

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1$$

$\alpha = 2$; $\beta = 2$... pro trubkové průřezy

$$\left(\frac{121,69}{688,52} \right)^2 + \left(\frac{9,67}{688,52} \right)^2 = 0,03 \leq 1$$

7.1.1.6 Posouzení prvku na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

$N_{c,Ed} = 697,46 \text{ kN}$ (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 15

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

$\alpha = 0,21$... vzpěrnostní křivka "a"



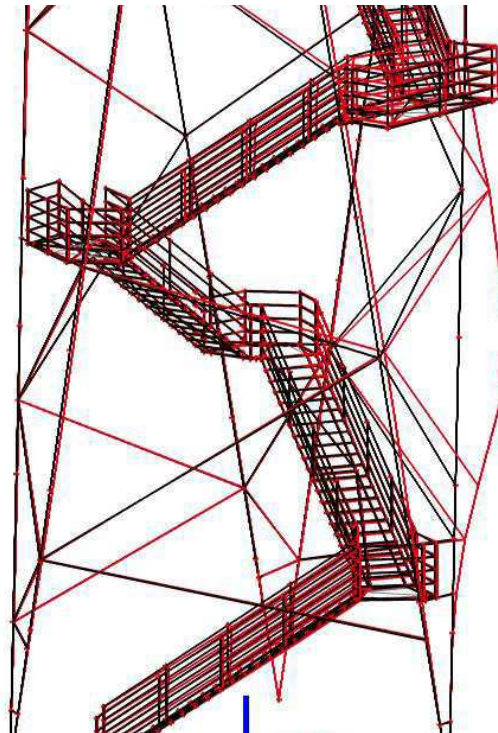
$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ } \varepsilon; \varepsilon = 0,81$$

Před posouzením sloupu na vzpěr byl proveden v softwaru SCIA Engineer stabilitní výpočet konstrukce vycházející ze stabilitních kombinací. Ty byly vytvořeny z nelineárních kombinací pro posudek MSÚ se stejnými dílčími součiniteli bezpečnosti i kombináčními součiniteli. Pro posouzení sloupu na vzpěr byl vybrán prvek s největší vnitřní normálovou silou a byla zjištěna nejnižší hodnota kritického součinitele α_{cr} . Následně byla zjištěna hodnota reálné vzpěrné délky pro oba na sebe kolmé směry vybočení.

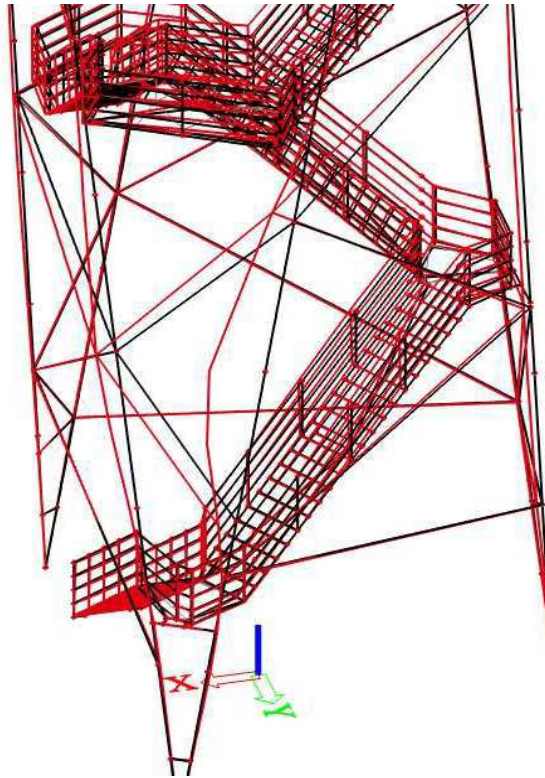
$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}}$$

$$\rightarrow \alpha_{cr,y-y} = 30,03; \alpha_{cr,z-z} = 38,50 \dots \textit{pro stabilitní kombinaci č. 15}$$

Nejnižší hodnota kritického součinitele α_{cr} vychází ze stabilitní kombinace č. 15 ($1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$). Nelineární verze této kombinace způsobuje maximální hodnotu tlakové normálové síly, na kterou je daný prvek posuzován.



obr. 57: Schéma vybočení sloupu pro $\alpha_{cr} = 30,03$ ve směru y-y ze stabilitní kombinace č. 15



obr. 58: Schéma vybočení sloupu pro $\alpha_{cr} = 38,50$ ve směru z-z ze stabilitní kombinace č. 15

Hodnota vzpěrných délek dle stabilitního výpočtu:

$$\rightarrow L_{cr,y} = 6,223 \text{ m}; L_{cr,z} = 5,496 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{6,223}{0,139} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,59$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,59 - 0,2) + 0,59^2] = 0,72$$

$$\chi = \frac{1}{0,72 + \sqrt{0,72^2 - 0,59^2}} = 0,89$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,89 * 15\,500 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 4\,912,91 \text{ kN} > N_{Ed} = 697,46 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 0,14$$



Posouzení ve směru z-z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{5,496}{0,139} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,52$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,52 - 0,2) + 0,52^2] = 0,67$$

$$\chi = \frac{1}{0,67 + \sqrt{0,67^2 - 0,52^2}} = 0,917$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,917 * 15\,500 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 5\,045,32 \text{ kN} > N_{Ed} = 697,46 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 0,14$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Návrhová únosnost při kombinaci tlaku a ohybu

Maximální hodnoty momentů v kritickém místě prvku:

$N_{c,Ed} = 635,16 \text{ kN}$ (tlak); $M_{y,Ed} = 99,21 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 34,91 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 15

$$\rightarrow L_{cr,y} = 5,708 \text{ m}; L_{cr,z} = 5,319 \text{ m}; \chi_y = 0,91; \chi_z = 0,92; \chi_{LT} = 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}}}{\gamma_{M_1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}}}{\gamma_{M_1}} \leq 1$$

$$N_{Rk} = f_y A_i; M_{Rk} = f_y W_i$$

$$\rightarrow \text{pro třídu průřezu 1 platí: } A_i = A; W_y = W_{pl,y}; W_z = W_{pl,z}; \Delta M_{y,Ed} = \Delta M_{z,Ed} = 0$$



$$\rightarrow k_{yy} = 0,93; k_{yz} = 0,56; k_{zy} = 0,56; k_{zz} = 0,94$$

Hodnoty interakčních součinitelů ze SCIA Engineer

$$\frac{635,16}{\frac{0,91 * 5\,502,5}{1,0}} + 0,93 * \frac{99,21}{\frac{1 * 688,52}{1,0}} + 0,56 * \frac{34,91}{\frac{1 * 688,52}{1,0}} = 0,29 \leq 1$$

$$\frac{635,16}{\frac{0,92 * 5\,502,5}{1,0}} + 0,56 * \frac{99,21}{\frac{1 * 688,52}{1,0}} + 0,94 * \frac{34,91}{\frac{1 * 688,52}{1,0}} = 0,25 \leq 1$$

Průřez CHS 406x12,5 mm vyhoví na posudek MSÚ



7.1.2 Posouzení nosníků horní podesty a spojníků sloupů

Průřezové charakteristiky prvků:

RHS 350x150x12,5 mm

$$A = 11\,700 \text{ mm}^2$$

$$A_y = 3\,480,5 \text{ mm}^2$$

$$A_z = 8\,121,2 \text{ mm}^2$$

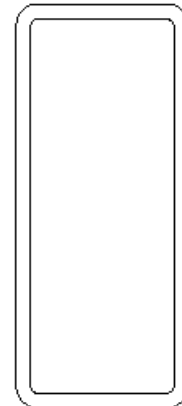
$$I_y = 1,73 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 4,45 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 0,988 \cdot 10^6 \text{ mm}^3; W_{el,z} = 0,593 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 1,246 \cdot 10^6 \text{ mm}^3; W_{pl,z} = 0,679 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$i_y = 122 \text{ mm}; i_z = 62 \text{ mm}$$



obr. 59: Schéma průřezu RHS 350x150x12,5 mm

Třída průřezu:

$$\frac{c}{t} = \frac{350 - 2 \cdot (12,5 + 6)}{12,5} = 25,04 < 72 \cdot \varepsilon = 58,32 \dots \text{pro ohýbanou část;}$$

$$< 33 \cdot \varepsilon = 26,73 \dots \text{pro tlačnou část}$$

Třída průřezu 1

7.1.2.1 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 130,89 \text{ kN (tah)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 6}$$

$$N_{c,Ed} = 88,48 \text{ kN (tlak)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 15}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{11\,700 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,0} = 4\,152,5 \text{ kN} > N_{t,Ed} \wedge > N_{c,Ed}$$



$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,03; \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,02$$

7.1.2.2 Posouzení průřezu na únosnost ohybu

$$M_{y,Ed} = 93,19 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 6}$$

$$M_{z,Ed} = 34,98 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 17}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{1,246 * 10^{-3} * 355 * 10^6}{1,0} = 442,33 \text{ kNm}$$

$$> M_{y,Ed}; \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} = 0,21$$

$$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{0,679 * 10^{-3} * 355 * 10^6}{1,0} = 241 \text{ kNm}$$

$$> M_{z,Ed}; \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,z,Rd}} = 0,15$$

7.1.2.3 Posouzení průřezu na smykovou únosnost

$$V_{y,Ed} = 92,88 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 17}$$

$$V_{z,Ed} = 119,21 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 15}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}}$$

$$V_{y,pl,Rd} = \frac{A_y \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}} = \frac{3\,480,5 * 10^{-6} * \frac{355 * 10^6}{\sqrt{3}}}{1,0} = 713,4 \text{ kN} > V_{y,Ed}$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,13$$



$$V_{z,pl,Rd} = \frac{A_z \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}} = \frac{8\,121,2 * 10^{-6} * \frac{355 * 10^6}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1664,5 \text{ kN} > V_{z,Ed}$$
$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,07$$

7.1.2.4 Posouzení průřezu na kombinaci smyku s ohybem

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,13 < 0,5$$

Spolupůsobení smyku může být při posouzení zanedbáno

7.1.2.5 Posouzení průřezu na kombinaci tlaku s ohybem

$N_{c,Ed} = 45,80 \text{ kN}$ (tlak); $M_{y,Ed} = 93,19 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 0,99 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 6

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{(1-n)}{(1-0,5 * a_w)}; M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{45,80}{4\,152,5} = 0,01;$$

$$a_w = \frac{(A-2bt)}{A} = \frac{(11\,700 - 2 * 150 * 12,5)}{11\,700} = 0,68$$

$$442,33 * \frac{(1-0,01)}{(1-0,5 * 0,68)} = 663,50 \text{ kNm} > 442,33 \text{ kNm}$$

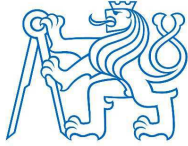
$$\rightarrow M_{N,y,Rd} = 442,33 \text{ kNm}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{(1-n)}{(1-0,5 * a_w)}; M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}$$

$$a_f = \frac{(A-2ht)}{A} = \frac{(11\,700 - 2 * 350 * 12,5)}{11\,700} = 0,25$$

$$241 * \frac{(1-0,01)}{(1-0,5 * 0,25)} = 251,15 \text{ kNm} > 241 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow M_{N,z,Rd} = 241 \text{ kNm}$$



$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)^\beta \leq 1$$

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2} \dots \text{pro duté obdelníkové průřezy}$$

$$\rightarrow \alpha = \beta = 1,66$$

$$\left(\frac{93,19}{442,33}\right)^{1,66} + \left(\frac{0,99}{241}\right)^{1,66} = 0,07 \leq 1$$

7.1.2.6 Posouzení průřezu na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

$N_{c,Ed} = 88,48 \text{ kN}$ (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 15

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

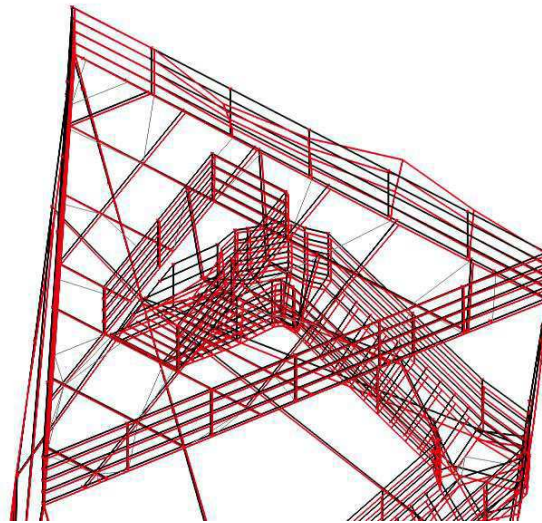
$\alpha = 0,21$... vzpěrnostní křivka "a"

$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ } \varepsilon; \varepsilon = 0,81$$

Pro zjištění vzpěrných délek byl proveden stabilitní výpočet a zjištěna nejnižší hodnota kritického součinitele α_{cr} .

$$\rightarrow \alpha_{cr} = \mathbf{61,26} \dots \text{pro stabilitní kombinaci č. 15}$$

Nejnižší hodnota kritického součinitele α_{cr} vychází ze stabilitní kombinace č. 15 ($1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_2 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$).



obr. 60: Schéma vybočení sloupu pro $\alpha_{cr} = 61,26$ ze stabilitní kombinace č.15

Nelineární kombinace č. 15 způsobí maximální tlakovou sílu v posuzovaném prvku. Hodnoty vzpěrných délek byly uvažovány ze stabilitního výpočtu:

$$\rightarrow L_{cr,y} = 8,103 \text{ m}; L_{cr,z} = 4,110 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{8,103}{0,122} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,88$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,88 - 0,2) + 0,88^2] = 0,96$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,88^2}} = 0,75$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,75 * 11\,700 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 3\,105,57 \text{ kN} > N_{Ed} = 88,48 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,03$$

Posouzení ve směru z-z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{4,110}{0,062} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,88$$



$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,88 - 0,2) + 0,88^2] = 0,96$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,88^2}} = 0,75$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,75 * 11\,700 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 3\,110,08 \text{ kN} > N_{Ed} = 88,48 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,03$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Návrhová únosnost při kombinaci tlaku a ohybu

Maximální hodnoty momentů v kritickém místě prvku:

$N_{c,Ed} = 88,48 \text{ kN}$ (tlak); $M_{y,Ed} = 61,25 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 1,98 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 15

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$N_{Rk} = f_y A_i; M_{Rk} = f_y W_i; \chi_{LT} = 1,0$$

→ pro třídu průřezu 1 platí: $A_i = A$; $W_y = W_{pl,y}$; $W_z = W_{pl,z}$; $\Delta M_{y,Ed} = \Delta M_{z,Ed} = 0$

$$\rightarrow k_{yy} = 0,97; k_{yz} = 0,58; k_{zy} = 0,58; k_{zz} = 0,97$$

Hodnoty interakčních součinitelů ze SCIA Engineer



$$\frac{88,48}{0,75 * 4 152,5} + 0,97 * \frac{61,25}{1 * 442,33} + 0,58 * \frac{1,98}{1 * 241} = 0,17 \leq 1$$

$$\frac{88,48}{0,75 * 4 152,5} + 0,58 * \frac{61,25}{1 * 442,33} + 0,97 * \frac{1,98}{1 * 241} = 0,12 \leq 1$$

Průřez RHS 350x150x5,0 mm vyhoví na posudek MSÚ



7.1.3 Posouzení nosníků schodišťových ramen

Průřezové charakteristiky prvků:

RHS 200x100x6,3 mm

$$A = 3\,580 \text{ mm}^2$$

$$A_y = 1\,183,9 \text{ mm}^2$$

$$A_z = 2\,367,9 \text{ mm}^2$$

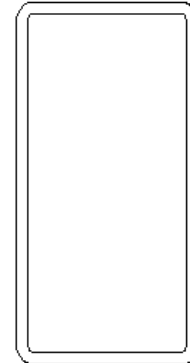
$$I_y = 1,829 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 6,13 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 1,83 \cdot 10^5 \text{ mm}^3; W_{el,z} = 1,23 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 2,2582 \cdot 10^5 \text{ mm}^3; W_{pl,z} = 1,3876 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$i_y = 71 \text{ mm}; i_z = 41 \text{ mm}$$



obr. 61: Schéma průřezu RHS 200x100x6,3 mm

Třída průřezu:

$$\frac{c}{t} = \frac{200 - 2 \cdot (6,3 + 3)}{6,3} = 28,79 < 72 \cdot \varepsilon = 58,32 \dots \text{pro ohýbanou část;}$$

Třída průřezu 1

$$> 33 \cdot \varepsilon = 26,73 \wedge < 33 \cdot \varepsilon = 30,78 \dots \text{pro tlačnou část}$$

Třída průřezu 2

7.1.3.1 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 73,28 \text{ kN (tah)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 16}$$

$$N_{c,Ed} = -118,01 \text{ kN (tlak)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 17}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$



$$N_{pl,Rd} = \frac{3\,580 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 1\,270,9 \text{ kN} > N_{t,Ed} \wedge > N_{c,Ed}$$

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,06; \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,09$$

7.1.3.2 Posouzení průřezu na únosnost při ohybu

$$M_{y,Ed} = 34,11 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 6}$$

$$M_{z,Ed} = 8,91 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 18}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{2,2582 * 10^{-4} * 355 * 10^6}{1,0} = 80,17 \text{ kNm} > M_{y,Ed}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} = 0,43$$

$$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{1,3876 * 10^{-4} * 355 * 10^6}{1,0} = 49,26 \text{ kNm} > M_{z,Ed}$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{c,z,Rd}} = 0,18$$

7.1.3.3 Posouzení průřezu na smykovou únosnost

$$V_{y,Ed} = 31,09 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 17}$$

$$V_{z,Ed} = 58,37 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 13}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}}$$

$$V_{y,pl,Rd} = \frac{A_y \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}} = \frac{1\,183,9 * 10^{-6} * \frac{355 * 10^6}{\sqrt{3}}}{1,0} = 242,65 \text{ kN} > V_{y,Ed}$$



$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,13$$

$$V_{z,pl,Rd} = \frac{A_z \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M_0}} = \frac{2\,367,9 * 10^{-6} * \frac{355 * 10^6}{\sqrt{3}}}{1,0} = 485,32 \text{ kN} > V_{z,Ed}$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,12$$

7.1.3.4 Posouzení průřezu na kombinaci smyku s ohybem

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0,13 < 0,5$$

Spolupůsobení smyku může být při posouzení zanedbáno

7.1.3.5 Posouzení průřezu na kombinaci tlaku s ohybem

$N_{c,Ed} = 22,25 \text{ kN}$; $M_{y,Ed} = 34,11 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 5,43 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 6

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \frac{(1 - n)}{(1 - 0,5 * a_w)}; M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{22,25}{1\,270,9} = 0,02;$$

$$a_w = \frac{(A - 2bt)}{A} = \frac{(3\,580 - 2 * 100 * 6,3)}{3\,580} = 0,65$$

$$80,17 * \frac{(1 - 0,02)}{(1 - 0,5 * 0,65)} = 109,27 \text{ kNm} > 80,17 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow M_{N,y,Rd} = 80,17 \text{ kNm}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \frac{(1 - n)}{(1 - 0,5 * a_w)}; M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}$$

$$a_f = \frac{(A - 2ht)}{A} = \frac{(3\,580 - 2 * 200 * 6,3)}{3\,580} = 0,3$$



$$49,26 * \frac{(1 - 0,02)}{(1 - 0,5 * 0,3)} = 53,32 \text{ kNm} > 49,26 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow M_{N,z,Rd} = 49,26 \text{ kNm}$$

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1$$

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2} \dots \text{pro duté obdelníkové průřezy}$$

$$\rightarrow \alpha = \beta = 1,66$$

$$\left(\frac{34,11}{80,17} \right)^{1,66} + \left(\frac{5,43}{49,26} \right)^{1,66} = 0,27 \leq 1$$

7.1.3.6 Posouzení průřezu na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

Pro posouzení vzpěru byl vybrán prvek B87, který má z prvků daného průřezu nejmenší hodnotu kritického součinitele α_{cr} . Ta byla vypočtena ze stabilitního výpočtu.

$$N_{c,Ed} = -87,15 \text{ kN (tlak)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 13}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

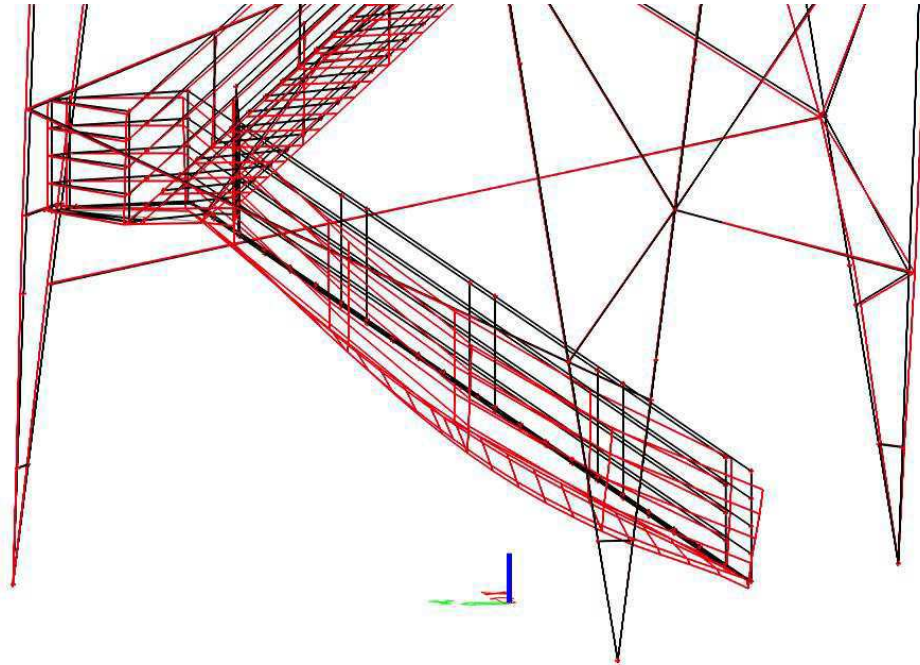
$$\alpha = 0,21 \dots \text{vzpěrnostní křivka "a"}$$

$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ } \varepsilon; \varepsilon = 0,81$$

$$\rightarrow \alpha_{cr} = 38,40 \dots \text{pro stabilitní kombinaci č. 13}$$



Nejnižší hodnota kritického součinitele α_{cr} vychází ze stabilitní kombinace č. 13 ($1,35 \cdot G_0 + 1,50 \cdot W_1 + 1,50 \cdot 0,7 \cdot Q_1$).



obr. 62: Schéma vybočení sloupu pro $\alpha_{cr} = 38,40$ ze stabilitní kombinace č.13

Ze stabilitního výpočtu byly zjištěny vzpěrné délky prutu:

$$\rightarrow L_{cr,y} = 4,211 \text{ m}; L_{cr,z} = 2,438 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y

$$\bar{\lambda}_y = \frac{4,211}{0,071} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,78$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,78 - 0,2) + 0,78^2] = 0,87$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,87 + \sqrt{0,87^2 - 0,78^2}} = 0,804$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,804 * 3\,580 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 1\,022,15 \text{ kN} > N_{Ed} = 87,15 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,09$$



Posouzení ve směru z-z

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2,438}{0,041} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 0,79$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (0,79 - 0,2) + 0,79^2] = 0,87$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,87 + \sqrt{0,87^2 - 0,79^2}} = 0,80$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,80 * 3\,580 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 1\,020,71 \text{ kN} > N_{Ed} = 112,86 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,11$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Návrhová únosnost při kombinaci tlaku a ohybu

$N_{c,Ed} = -87,15 \text{ kN}$ (tlak); $M_{y,Ed} = 3,39 \text{ kNm}$; $M_{z,Ed} = 1,34 \text{ kNm}$... zatěžovací kombinace č. 13

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$N_{Rk} = f_y A_i; M_{Rk} = f_y W_i; \chi_{LT} = 1,0$$

→ pro třídu průřezu 1 platí: $A_i = A$; $W_y = W_{pl,y}$; $W_z = W_{pl,z}$; $\Delta M_{y,Ed} = \Delta M_{z,Ed} = 0$

$$\rightarrow k_{yy} = 0,3; k_{yz} = 0,56; k_{zy} = 0,56; k_{zz} = 0,93$$

Hodnoty interakčních součinitelů ze SCIA Engineer



$$\frac{87,15}{0,986 * 1\,270,9} + 0,93 * \frac{3,39}{1 * 80,17} + 0,56 * \frac{1,48}{1 * 49,26} = 0,14 \leq 1$$

$$\frac{87,15}{0,785 * 1\,270,9} + 0,56 * \frac{3,39}{1 * 80,17} + 0,93 * \frac{1,48}{1 * 49,26} = 0,14 \leq 1$$

Průřez RHS 200x100x6,3mm vyhoví na posudek MSÚ



7.1.4 Posouzení ztužidel

Ztužidla jsou nosníky připojeny kloubovými styčníky k nosným sloupům. Jsou primárně zatíženy osovými silami.

Účinky na posouvající síly a ohybové momenty mají pouze vlastní tíha a boční zatížení větrem. Hodnoty těchto vnitřních sil jsou velmi nízké, proto byly v celkovém posouzení zanedbány. Ztužidla byla posouzena na únosnost prostého tahu/tlaku a vzpěrnou únosnost.

Průřezové charakteristiky prvku:

CHS 114x5,0 mm

$$A = 1\,720 \text{ mm}^2$$

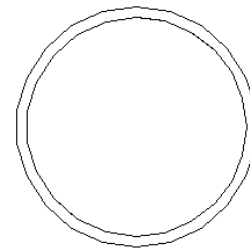
$$A_v = 1\,093 \text{ mm}^2$$

$$I = 2,57 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el} = 4,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 5,88 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 39 \text{ mm}$$



obr. 63: Schéma průřezu CHS 114x5,0 mm

Třída průřezu:

$$\frac{d}{t} = \frac{114,3}{5,0} = 22,86 < 50 \cdot \varepsilon^2 = 32,8$$

Třída průřezu 1

7.1.4.1 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 95,95 \text{ kN (tah) ... zatěžovací kombinace č. 29}$$

$$N_{c,Ed} = -121,15 \text{ kN (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 14}$$



$$N_{Pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{1\,720 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 610,6 \text{ kN} > N_{t,Ed} \wedge > N_{c,Ed}$$

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,16; \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} = 0,20$$

7.1.4.2 Posouzení prvku na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

$N_{c,Ed} = -121,15 \text{ kN}$ (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 14

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

$\alpha = 0,21$... vzpěrnostní křivka "a"

$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ ε}; \text{ ε} = 0,81$$

Ztužidla jsou modelována s kloubovými přípoji k hlavním nosným sloupům. Hodnota vzpěrných délek je tedy shodná s hodnotami systémových délek ztužidel. Pro výpočet posudku byla použita hodnota nejdelšího ztužidla daného průřezu:

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 4,39 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y a z-z

$$\bar{\lambda} = \frac{4,39}{0,039} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 1,49$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (1,49 - 0,2) + 1,49^2] = 1,74$$

$$\chi = \frac{1}{1,74 + \sqrt{1,74^2 - 1,49^2}} = 0,377$$



$$N_{b,Rd} = \frac{0,377 * 1\,720 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 230,14 \text{ kN} > N_{c,Ed} = 121,15 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = 0,53$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Průřez CHS 114x5,0 mm vyhoví na posudek MSÚ

Průřezové charakteristiky prvku:

CHS 140x5,0 mm

$$A = 2\,120 \text{ mm}^2$$

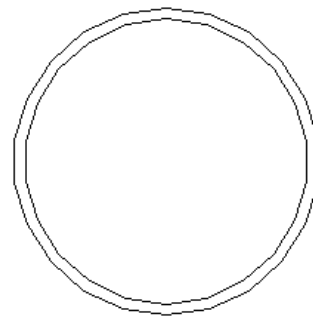
$$A_v = 1\,347 \text{ mm}^2$$

$$I = 4,81 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el} = 6,88 * 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 8,9331 * 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 48 \text{ mm}$$



obr. 64: Schéma průřezu CHS 140x5,0 mm

Třída průřezu:

$$\frac{d}{t} = \frac{139,7}{5,0} = 27,94 < 50 * \varepsilon^2 = 32,8$$

Třída průřezu 1

7.1.4.3 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 124,27 \text{ kN (tah)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 16}$$

$$N_{c,Ed} = -112,41 \text{ kN (tlak)} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 12}$$



$$N_{Pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{2\,120 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,0} = 752,6 \text{ kN} > N_{Ed,t} \wedge > N_{Ed,c}$$

$$\frac{N_{Ed,t}}{N_{pl,Rd}} = 0,17; \frac{N_{Ed,c}}{N_{pl,Rd}} = 0,15$$

7.1.4.4 Posouzení prvku na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

$N_{c,Ed} = 112,41 \text{ kN}$ (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 12

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

$\alpha = 0,21$... vzpěrnostní křivka "a"

$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ } \varepsilon; \varepsilon = 0,81$$

Pro výpočet posudku byla použita hodnota nejdelšího ztužidla daného průřezu:

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 7,565 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y a z-z

$$\bar{\lambda} = \frac{7,565}{0,048} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 2,09$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (2,09 - 0,2) + 2,09^2] = 2,88$$

$$\chi = \frac{1}{2,88 + \sqrt{2,88^2 - 2,09^2}} = 0,21$$



$$N_{b,Rd} = \frac{0,21 * 2\,120 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 154,81 \text{ kN} > N_{c,Ed} = 112,41 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = 0,73$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Průřez CHS 140x5,0 mm vyhoví na posudek MSÚ

Průřezové charakteristiky prvku:

CHS 140x8,0 mm

$$A = 3\,310 \text{ mm}^2$$

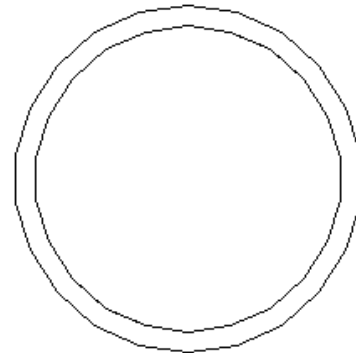
$$A_v = 2\,107,2 \text{ mm}^2$$

$$I = 7,2 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el} = 10,3 * 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} = 13,674 * 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 47 \text{ mm}$$



obr. 65: Schéma průřezu CHS 140x8,0 mm

Třída průřezu:

$$\frac{d}{t} = \frac{139,7}{8,0} = 17,46 < 50 * \varepsilon^2 = 32,8$$

Třída průřezu 1



7.1.4.5 Posouzení průřezu na únosnost při prostém tahu/tlaku

$$N_{t,Ed} = 116,36 \text{ kN (tah) ... zatěžovací kombinace č. 29}$$

$$N_{c,Ed} = 125,50 \text{ kN (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 18}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{3310 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 1\,175,05 \text{ kN} > N_{Ed,t} \wedge > N_{Ed,c}$$

$$\frac{N_{Ed,t}}{N_{pl,Rd}} = 0,10; \frac{N_{Ed,c}}{N_{pl,Rd}} = 0,10$$

7.1.4.6 Posouzení prvku na vzpěrnou únosnost

Návrhová únosnost na vzpěrný tlak

$$N_{c,Ed} = 119,49 \text{ kN (tlak) ... zatěžovací kombinace č. 18}$$

$$N_{Pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M_0}}$$

$$\rightarrow \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\rightarrow \phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

$$\alpha = 0,21 \text{ ... vzpěrnostní křivka "a"}$$

$$\rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}; \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3 \text{ } \varepsilon; \varepsilon = 0,81$$

Pro výpočet posudku byla použita hodnota nejdelšího ztužidla daného průřezu:

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 8,299 \text{ m}$$

Posouzení ve směru y-y a z-z

$$\bar{\lambda} = \frac{8,299}{0,047} * \frac{1}{93,3 * 0,81} = 2,34$$



$$\phi = 0,5[1 + 0,21 * (2,34 - 0,2) + 2,34^2] = 3,46$$

$$\chi = \frac{1}{3,46 + \sqrt{3,46^2 - 2,34^2}} = 0,17$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,17 * 3\,310 * 10^{-6} * 355 * 10^6}{1,0} = 195,56 \text{ kN} > N_{Ed} = 125,5 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 0,64$$

Návrhová únosnost při klopení průřezu

– může být zanedbána, neboť trubkové průřezy nejsou náchylné ke klopení

Průřez CHS 140x8,0 mm vyhoví na posudek MSÚ



7.2 Posouzení přípojí

Vybrané přípoje byly posouzeny z hlediska mezního stavu únosnosti. Většina spojů hlavních nosných prvků jsou svařové spoje. Přípoje ztužidel byly posouzeny na propíchnutí dle normy EN 1993-1-8 (6).

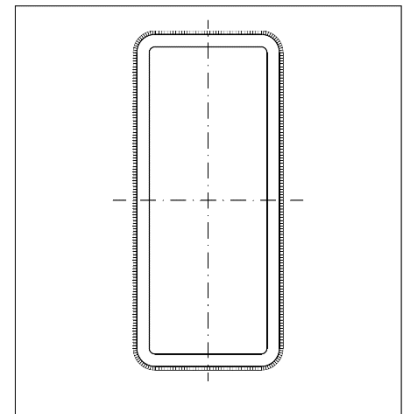
7.2.1 Přípoj nosníku rámu horní podesty k nosnému sloupu

Svařový přípoj nosníku rámu horní podesty k nosnému sloupu byl posouzen na mezní stav únosnosti. Vnitřní síly pro posouzení byly uvažovány v místě průniku stěny sloupu s vodorovným nosníkem. Pro posouzení svařů byla použita přímá metoda ověření pomocí vzorce dle normy (6):

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_{up}}{\beta_w \gamma_{M_2}};$$

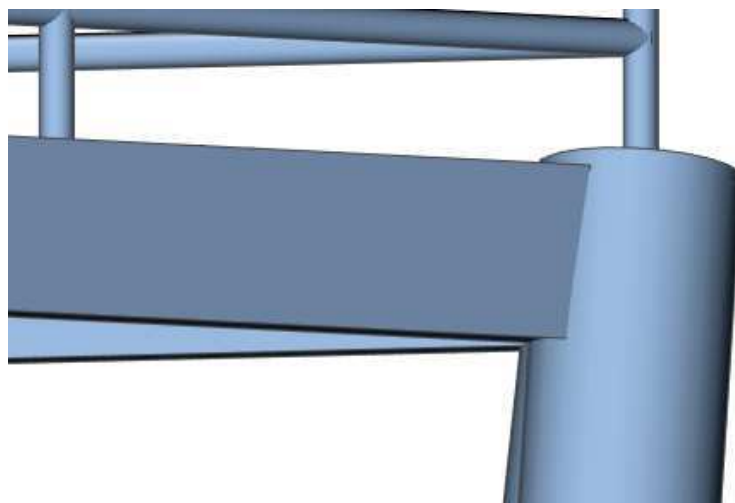
$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 f_{up} / \gamma_{M_2}$$

$$\beta_w = 0,9 \text{ pro } S355; \gamma_{M_2} = 1,25$$



obr. 66: Ilustrace svařového přípoje

Svařový přípoj vodorovného nosníku o průřezu RHS 350x150x12,5 mm byl navržen jako dokola ovařený u nosnému sloupu o průřezu CHS 406x12,5 mm. Pro přesné ovaření je potřeba provést elipsovité seříznutí hran vodorovného nosníku.



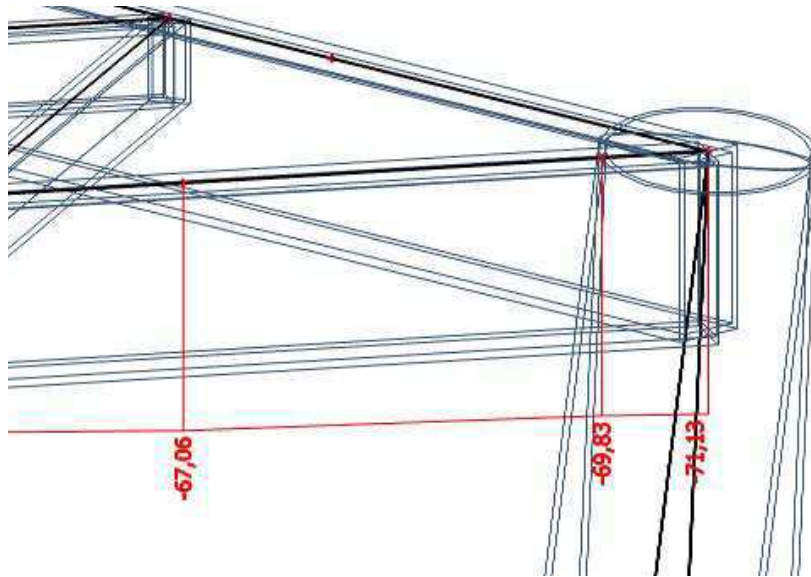
obr. 67: Detail přípoje nosníku horní podesty ke sloupu



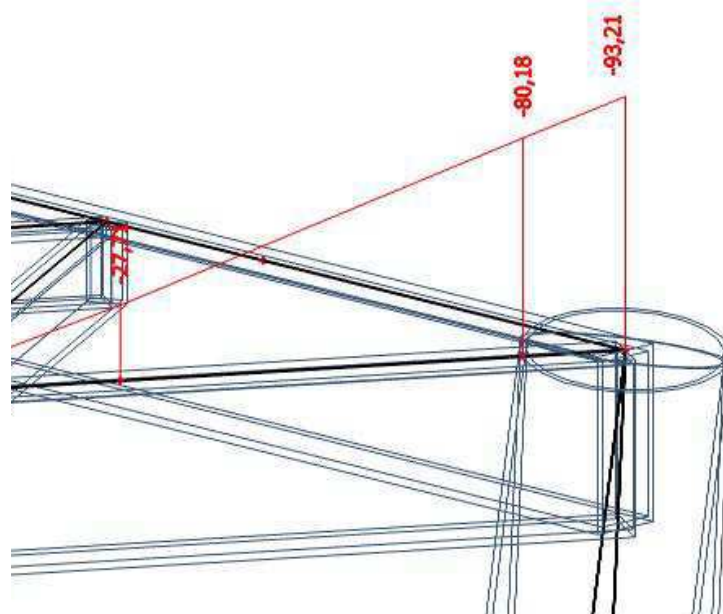
7.2.1.1 Posouzení svaru pro svislé zatížení

Vnitřní síly byly uvažovány v místě styčnicku vodorovného nosníku rámu a hlavního sloupu a jejich hodnoty byly redukovány k okraji sloupu.

$$V_{z,Ed} = 69,83 \text{ kN}; M_{y,Ed} = 80,18 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 6}$$



obr. 68: Průběh V_z [kN] – kombinace č.6



obr. 69: Průběh M_y [kNm] – kombinace č.6



Bylo předpokládáno, že posouvající sílu přenesou pouze svislé svar u stojinách nosníku.

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_w} < \frac{f_{up}}{\sqrt{3}\beta_w\gamma_{M_2}}$$

$$A_w = a * L_w$$

$$L_w = 2 * [350 - 2 * (19)] = 624 \text{ mm}$$

Tloušťka svaru byla navržena 4 mm.

$$\rightarrow a = 4 \text{ mm}$$

$$A_w = 4 * 624 = 2496 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{69,83 * 10^3}{2496 * 10^{-6}} = 27,98 \text{ MPa} < \frac{510 * 10^6}{\sqrt{3} * 0,9 * 1,25} = 261,73 \text{ MPa}$$

Při výpočtu bylo předpokládáno, že ohybový moment ve spoji přenesou celý svar. Pro výpočet byl vypočten moment setrvačnosti svaru pro svislý směr:

$$I_w = 2 * \left\{ \frac{1}{12} * 4 * [350 - 2 * (19)]^3 + [150 - 2 * (19)] * 4^3 + [150 - 2 * (19)] * 4 * \left(\frac{350}{2} + \frac{4}{2} \right)^2 \right\} + 4 * \left\{ 0,0549 * (19 + 4)^4 + 0,7854 * (19 + 4)^2 * \left[\frac{350}{2} - 2 * (19 + 4) + 0,4244 * (19 + 4) \right]^2 - 0,0549 * 19^4 - 0,7854 * 19^2 * \left(\frac{350}{2} - 2 * 19 + 0,4244 * 19 \right)^2 \right\} = 6,133 * 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_M = \frac{M_{Ed}}{I_w} z = \frac{80,18 * 10^3}{6,133 * 10^{-5}} * 0,177 = 231,42 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{231,42}{\sqrt{2}} = 163,64 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{163,64^2 + 3(163,64^2 + 27,98^2)} = 330,84 \text{ MPa}$$

$$\leq \frac{f_{up}}{\beta_w\gamma_{M_2}} = \frac{510 * 10^6}{0,9 * 1,25} = 453,33 \text{ MPa}$$

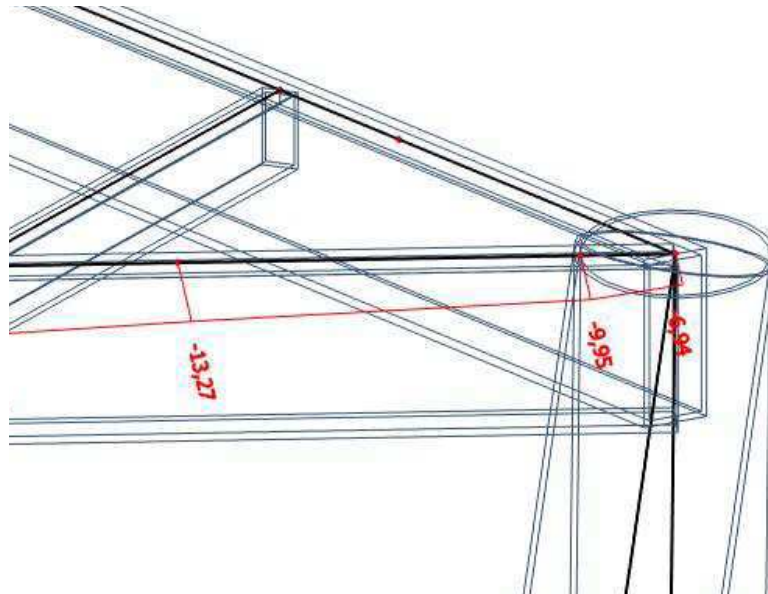
$$\sigma_{\perp} = 163,64 \text{ MPa} < 0,9 * \frac{510 * 10^6}{1,25} = 367,2 \text{ MPa}$$



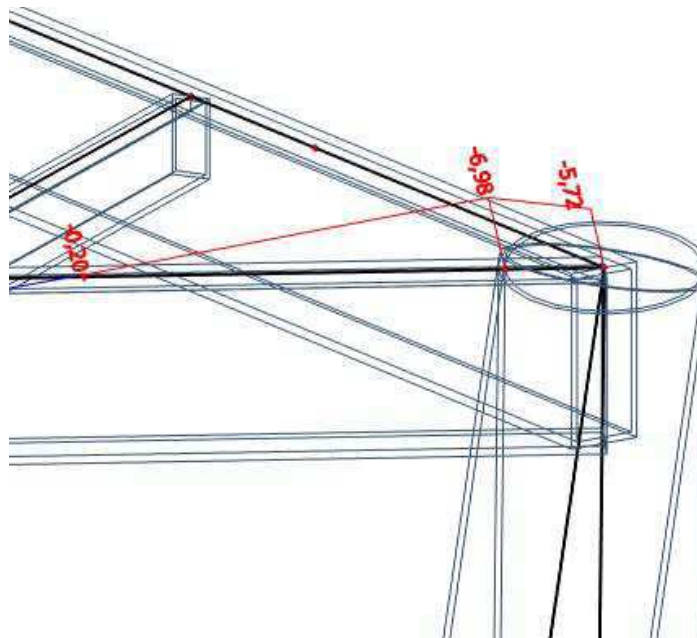
7.2.1.2 Posouzení svaru pro vodorovné zatížení

Vstupní hodnoty vnitřních sil:

$$V_{y,Ed} = 9,95 \text{ kN}; M_{z,Ed} = 6,98 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 6}$$



obr. 70: Průběh V_y [kN] – kombinace č.6



obr. 71: Průběh M_z [kNm] – kombinace č.6



Bylo předpokládáno, že posouvající sílu přenesou pouze svislé svar u stojinách nosníku.

$$L_w = 2 * [150 - 2 * (19)] = 224 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm}; A_w = 4 * 224 = 896 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{9,95 * 10^3}{896 * 10^{-6}} = 11,10 \text{ MPa} < \frac{510 * 10^6}{\sqrt{3} * 0,9 * 1,25} = 261,73 \text{ MPa}$$

Bylo předpokládáno, že moment ve spoji přenesou celý svar. Pro výpočet byl vypočten moment setrvačnosti svaru pro vodorovný směr:

$$I_w = 2 * \left\{ \frac{1}{12} * 4 * [150 - 2 * (19)]^3 + [350 - 2 * (19)] * 4^3 + [350 - 2 * (19)] * 4 * \left(\frac{150}{2} + \frac{4}{2} \right)^2 \right\} + 4 * \left\{ 0,0549 * (19 + 4)^4 + 0,7854 * (19 + 4)^2 * \left[\frac{150}{2} - (19 + 4) + 0,4244 * (19 + 4) \right]^2 - 0,0549 * 19^4 - 0,7854 * 19^2 * \left(\frac{150}{2} - 19 + 0,4244 * 19 \right)^2 \right\} = 1,749 * 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_M = \frac{M_{Ed}}{I_w} z = \frac{6,98 * 10^3}{1,749 * 10^{-5}} * 0,077 = 30,72 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{30,72}{\sqrt{2}} = 21,73 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{21,73^2 + 3(21,73^2 + 11,1^2)} = 47,52 \text{ MPa} \leq \frac{f_{up}}{\beta_w \gamma_{M_2}} = 453,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 21,73 \text{ MPa} < 0,9 * \frac{510 * 10^6}{1,25} = 367,2 \text{ MPa}$$

Svar vyhoví na posudek mezního stavu únosnosti

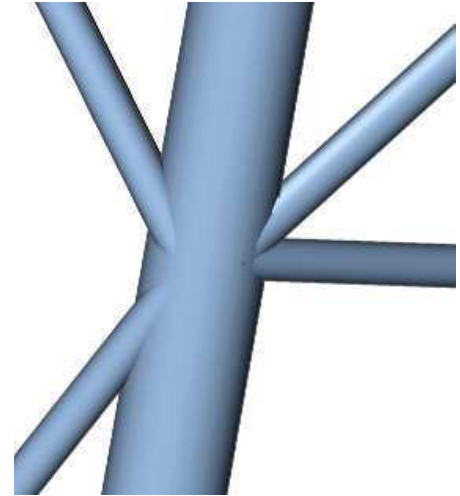


7.2.2 Přípoj ztužidla k nosnému sloupu

Svarový přípoj ztužidla byl posouzen podle EN 1993-1-8 (6).

Průřez hlavního nosného sloupu – **TR 406x12,5 mm**

Průřez ztužidel – **TR 140x8,0 mm**



Rozsah platnosti:

obr. 72: Detail přípoje ztužidel ke sloupu

$$0,2 \leq d/d_0 \leq 1,0 \rightarrow 139,7/406,4 = 0,344 \dots OK$$

$$10 \leq d_0/t_0 \leq 50 \rightarrow 406,4/12,5 = 32,5 \dots OK$$

$$10 \leq d_1/t_1 \leq 50 \rightarrow 139,7/8,0 = 17,46 \dots OK$$

$$\lambda_{ov} \geq 25\% \dots \lambda_{ov} = (q/p) \times 100\% \rightarrow \lambda_{ov} = (85/197,8) \times 100\% = 43\% \dots OK$$

$$g \geq t_1 + t_2 \rightarrow g = 124,7 \text{ mm} \geq 8,0 + 8,0 = 16 \text{ mm} \dots OK$$

Rozměry a geometrie styčnicku vyhovuje pro posouzení

Úhly napojení ztužidel:

$$\theta_{1_1} = 49^\circ; \theta_{2_1} = 88^\circ; \theta_{1_2} = 39^\circ; \theta_{2_2} = 30^\circ$$

Průběh vnitřních sil v přípoji:

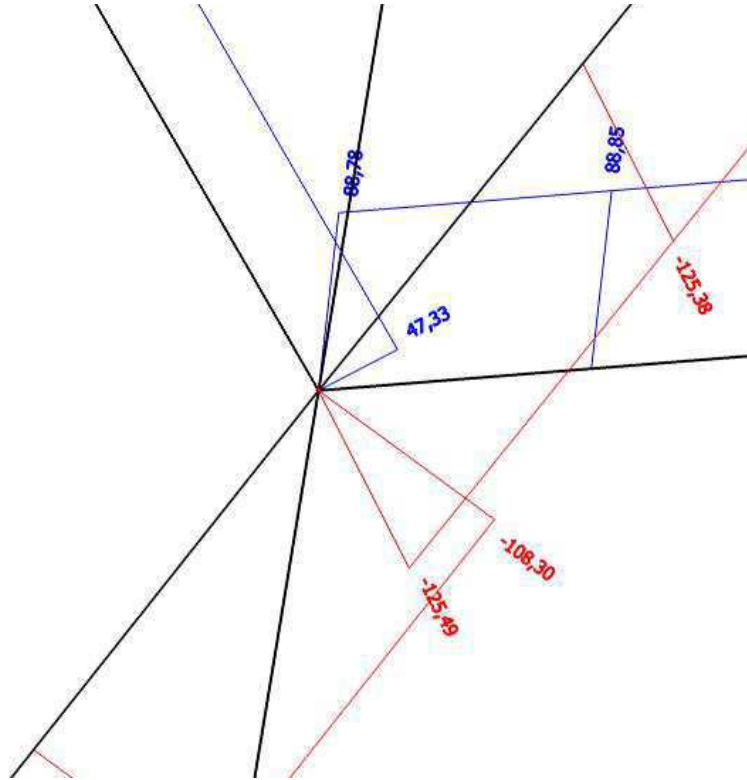
$$N_{1_1,Ed} = -125,49 \text{ kN (tlak)}; N_{2_1,Ed} = 88,78 \text{ kN (tah)};$$

$$N_{1_2,Ed} = 47,33 \text{ kN (tah)}; N_{2_2,Ed} = -108,30 \text{ kN (tlak)}$$

... zatěžovací kombinace č. 18



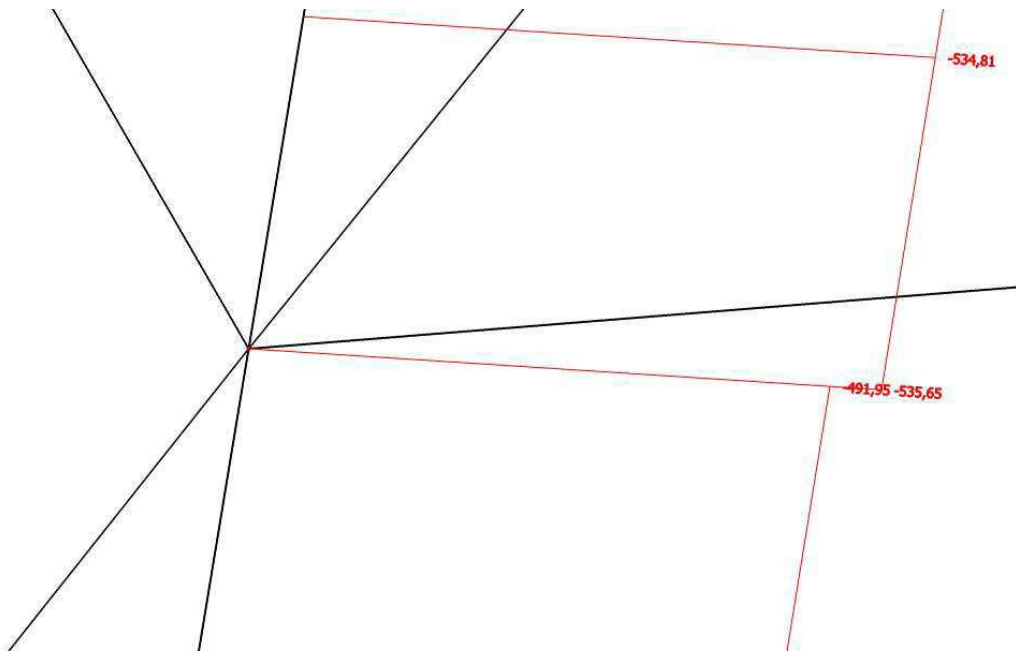
Průběh normálových vnitřních sil ve ztužidlech v místě přípoje:



obr. 73: Průběh normálových sil ve ztužidlech – kombinace č. 18

Průběh normálových vnitřních sil v nosném sloupu v místě přípoje:

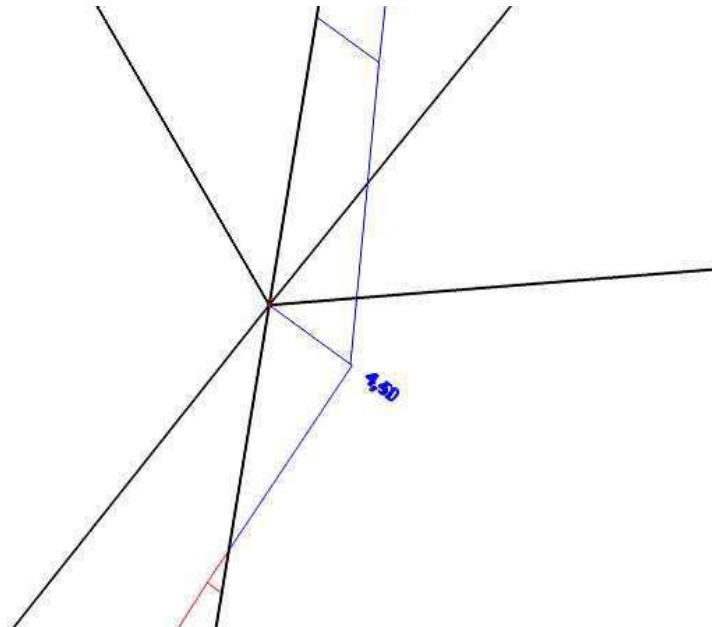
$$N_{0,Ed} = -535,65 \text{ kN}; N_{p,Ed} = -491,95 \text{ kN} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 18}$$



obr. 74: Průběh normálových sil v nosném sloupu – kombinace č. 18

Průběh ohybového momentu v nosném sloupu v místě přípoje:

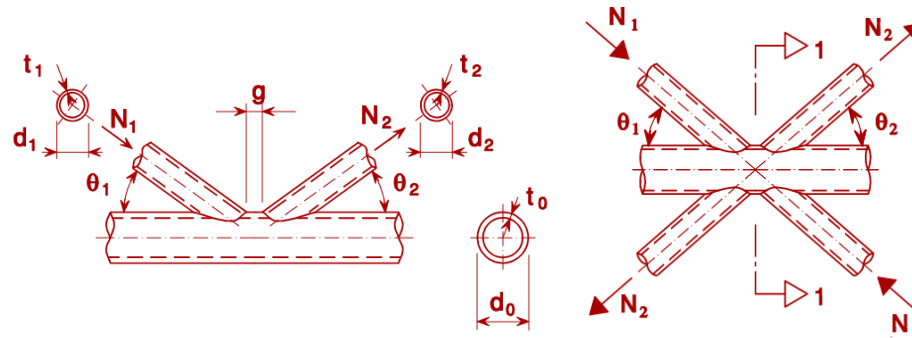
$$M_{0,Ed} = 4,50 \text{ kNm} \dots \text{zatěžovací kombinace č. 18}$$



obr. 75: Průběh ohybového momentu v nosném sloupu – kombinace č. 18



7.2.2.1 Posouzení na porušení povrchu pásu



obr. 76: Schéma K a DK styčnicku (6)

$$N_{1,Rd} = \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd}$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5 g/t_0 - 1,33)} \right)$$

$$k_p = 1 - 0,3 n_p (1 + n_p) \dots \text{pro } n_p > 0 \text{ (tlak)}; k_p \leq 1,0$$

$$k_p = 1,0 \dots \text{pro } n_p \leq 0 \text{ (tah)}$$

$$n_p = \left(\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} \right) / \gamma_{M5} \dots \text{pro pásy z trubkových kruhových průřezů}$$

$$\gamma_{M5} = 1,0$$

viz EN 1993-1-1 (2), Tab. 2.1

Výpočet dílčích součinitelů:

Výpočet součinitele k_p :

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}$$



$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}$$

$$kde \dots N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed} \cos\theta_i$$

$\sigma_{0,Ed}$... maximální napětí v pásu v místě přípoje

$\sigma_{p,Ed}$... napětí v pásu v místě přípoje, které nezahrnuje napětí způsobené komponenty rovnoběžnými s osou pásu

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{491,95 * 10^3}{15\,500 * 10^{-6}} + \frac{4,5 * 10^3}{1,478 * 10^{-3}} = 34,78 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow n_p = \frac{34,78}{355} = 0,098$$

$$\rightarrow k_p = 1 - 0,3 * 0,098(1 + 0,098) = 0,97$$

Výpočet součinitele k_g :

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,024\gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5 g/t_0 - 1,33)} \right)$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2 t_0} = \frac{406,4}{2 * 12,5} = 16,256$$

Přípoj ztužidel z pravé strany:

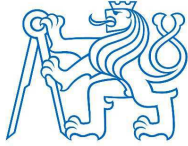
$g_1 = -85 \text{ mm}$... přípoj z pravé strany sloupu

$$k_{g1} = 16,256^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 * 16,256^{1,2}}{1 + \exp(0,5(-85)/12,5 - 1,33)} \right) = 2,93$$

$$N_{1,Rd} = \frac{2,93 * 0,97 * 355 * 12,5^2}{\sin 49^\circ} \left(1,8 + 10,2 \frac{139,7}{406,4} \right) / 1,0 = 1\,104,46 \text{ kN} >$$

$$> N_{1,Ed} = 125,49 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{\sin 49^\circ}{\sin 88^\circ} * 1107,06 = 834,05 \text{ kN} > N_{2,Ed} = 88,78 \text{ kN}$$



Přípoj ztužidel z levé strany:

$g_2 = 124,7 \text{ mm}$... přípoj z levé strany sloupu

$$k_{g,2} = 16,256^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 * 16,256^{1,2}}{1 + \exp(0,5 (124,7)/12,5 - 1,33)} \right) = 1,78$$

$$N_{12,Rd} = \frac{1,78 * 0,97 * 355 * 12,5^2}{\sin 39^\circ} \left(1,8 + 10,2 \frac{139,7}{406,4} \right) / 1,0 = 804,07 \text{ kN} >$$
$$> N_{12,Ed} = 47,33 \text{ kN}$$

$$N_{22,Rd} = \frac{\sin 39^\circ}{\sin 30^\circ} * 805,96 = 1\,012,04 \text{ kN} > N_{21,Ed} = 108,30 \text{ kN}$$

Přípoj ztužidel vyhoví na posouzení porušení povrchu pásu

7.2.2.2 Posouzení na prolomení pásu smykem

*Podmínka: $d_i \leq d_0 - 2t_0$... $d_i = 139,7 \text{ mm} < 406,4 - 2 * 12,5 = 381,4 \text{ mm}$... OK*

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{\sin \theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{11,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \frac{1 + \sin \theta_{11}}{\sin \theta_{11}} / \gamma_{M5} = \frac{355}{\sqrt{3}} 12,5 * \pi * 139,7 * \frac{1 + \sin 49^\circ}{\sin 49^\circ} / 1,0 =$$
$$= 2\,614,26 \text{ kN} > N_{11,Ed} = 125,49 \text{ kN}$$

$$N_{21,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \frac{1 + \sin \theta_{21}}{\sin \theta_{21}} / \gamma_{M5} = \frac{355}{\sqrt{3}} 12,5 * \pi * 139,7 * \frac{1 + \sin 88^\circ}{\sin 88^\circ} / 1,0 =$$
$$= 2\,249,50 \text{ kN} > N_{21,Ed} = 88,78 \text{ kN}$$

$$N_{12,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \frac{1 + \sin \theta_{12}}{\sin \theta_{12}} / \gamma_{M5} = \frac{355}{\sqrt{3}} 12,5 * \pi * 139,7 * \frac{1 + \sin 39^\circ}{\sin 39^\circ} / 1,0 =$$
$$= 2\,911,11 \text{ kN} > N_{12,Ed} = 47,33 \text{ kN}$$



$$N_{2_2,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \frac{1 + \sin\theta_{2_2}}{\sin\theta_{2_2}} / \gamma_{M5} = \frac{355}{\sqrt{3}} 12,5 * \pi * 139,7 * \frac{1 + \sin 30^\circ}{\sin 30^\circ} / 1,0 =$$
$$= 3\,373,22 \text{ kN} > N_{2_2,Ed} = 108,30 \text{ kN}$$

Připoj ztužidel vyhoví na posouzení smykového prolomení povrchu pásu

7.2.2.3 Ověření podmínek únosnosti pro DK styčnick

$$\left[\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl,0,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,Ed}}{V_{pl,0,Rd}} \right]^2 \leq 1,0$$
$$\left[\frac{535,65}{5\,502,5} \right]^2 + \left[\frac{61,11}{2\,018,33} \right]^2 = 0,01 \leq 1,0$$

Připoj ztužidel vyhoví na posouzení mezního stavu únosnosti

Všechny posuzované nosné prvky a přípoje vyhoví na požadavek mezního stavu únosnosti. Procento využití průřezu dosahuje u některých prvků nízkých hodnot. Tyto prvky byly takto navrženy za účelem zvýšení tuhosti konstrukce, snížení rizika rezonance od dynamických účinků větru a především lepšího estetického dojmu rozhledny z pohledu návštěvníků.



8 Mezní stav použitelnosti

8.1 Posouzení deformací

Maximální výchylka u vrcholu rozhledny byla vypočtena z nelineárních kombinací pro mezní stav použitelnosti dle Eurokódu (1) pomocí softwaru SCIA Engineer 16.

Maximální vodorovný posun vrcholu konstrukce:

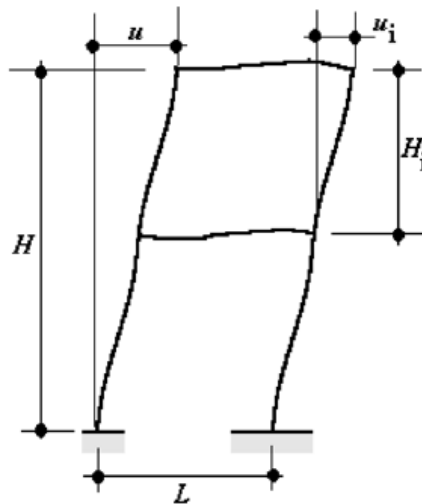
$$u_{max} = 21,2 \text{ mm} \dots \text{zatěžovací kombinace MSP č. 53}$$

$$53.NC(MSP) \rightarrow 1,00 \cdot G_0 + 1,00 \cdot W_3 + 1,00 \cdot 0,7 \cdot Q_1$$

Posouzení deformací:

u ... celkový vodorovný posun při vrcholu konstrukce

H ... celková výška konstrukce

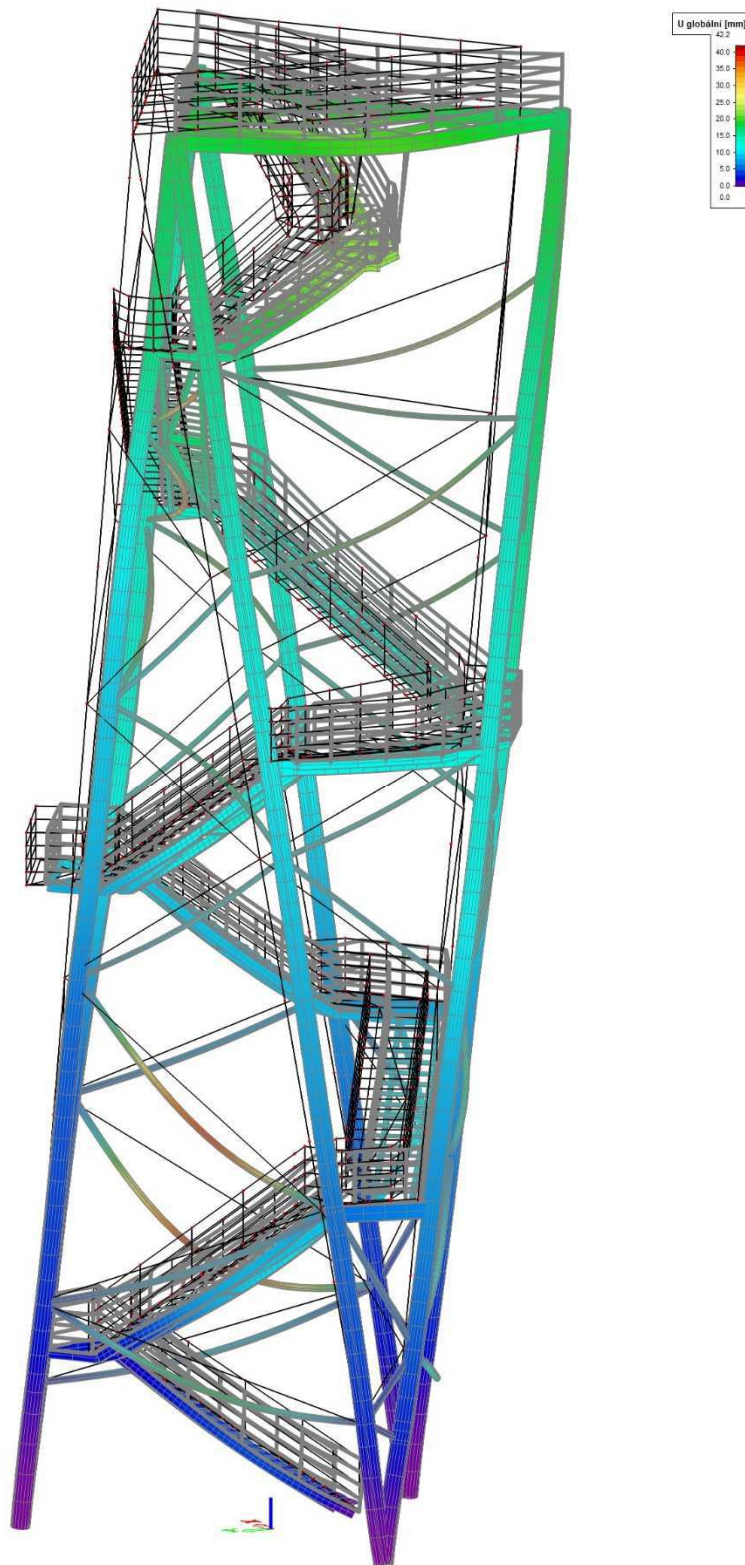


obr. 77: Schéma definice vodorovných deformací pro MSP dle normy EN 1990 (1)

$$u_{max} = 21,2 \text{ mm} = \frac{H}{1475} < u_{lim} = \frac{H}{200} = \frac{31,3}{200} = 156,5 \text{ mm}$$

Maximální vodorovný posun konstrukce vyhoví na mezní stav použitelnosti

Tvar celkové deformace ve všech směrech je znázorněn na obrázku 78:



obr. 78: 3D vykreslení deformované konstrukce – zatěžovací kombinace č.53



Z obrázku 78 je patrné, že lokální deformace některých prvků konstrukce dosahují větších hodnot, např. zavěšené schodiště či pruty ztužidla. Maximální hodnota deformace dosahuje hodnoty 42,2 mm, tato hodnota však zahrnuje lokální deformace prutu ztužidla pod zatížením vlastní tíhou a bočními silami od větru. Posudek MSP pro celkovou vodorovnou deformaci konstrukce nezahrnuje lokální deformace prutů. Posudek průhybu ztužidel není v této práci zpracován.

8.2 Posouzení vibrací

Konstrukce rozhledny byla posouzena z hlediska aerodynamické stability, kde pro výpočet vlastních frekvencí byly použity 3 různé rozložení hmot na konstrukci, viz kapitola 5.2. Dle výsledných hodnot maximální výchylky a zrychlení konstrukce je nutné provést opatření vedoucí buď ke zlepšení těchto hodnot, nebo omezení vstupu návštěvníkům. Řešení vedoucí ke zlepšení hodnot zrychlení konstrukce při kmitání od účinků odtrhávání vírů bude vyřešeno pohlcovači kmitání umístěné nejlépe pod horní vyhlídkovou plošinou.

Z hlediska komfortu osob bude na vrchol konstrukce umístěný měřič rychlosti větru a u vstupu na rozhlednu bude vybudován jednoduchý turniket. Měřič při vyhodnocení naměřené rychlosti větru větší než 15 m/s spustí jednoduchý mechanismus turniketu, který znemožní průchod turniketem ve směru vstupu na rozhlednu. Průchod turniketem ve směru výstupu z rozhledny bude bez omezení.

Rezonance by mohla nastat při pohybu osob po schodišti a podestách a to pouze v případě, kdyby pohyb všech osob byl dokonale synchronizovaný s jednotnou frekvencí rovné hodnotě některé s vlastních frekvencí kmitání.



Závěr

Konstrukce nové ocelové rozhledny na kopci v oblasti Solvalla vyhovuje požadavkům mezních stavů dle Eurokódu. Díky rozmanitému návrhu mezipodest do různých světových stran v několika výškových úrovních umožní rozhledna návštěvníkům skvělý zážitek a propojení s okolními lesy a krajinou. Systém prostorového uspořádání nosných sloupů a diagonálních ztužidel navíc vytváří elegantní vzhled konstrukce a rozhledna se tak stane novou turistickou ikonou v oblasti u národního parku Nuuksio. Byl tedy splněn cíl této diplomové práce navrhnout esteticky zajímavou a funkční konstrukci rozhledny.

Při psaní této práce jsem čerpal ze svých znalostí dané problematiky z bakalářského i magisterského studia. Výhodou při navrhování a posuzování konstrukce byla pro mě velmi dobrá znalost profesionálního softwaru spolu se znalostí prostředí finské kultury a krajiny. Přínosem pro mě bylo hlubší poznání práce s Eurokódem, který v mnoha případech uvažuje velmi konzervativní metody postupu výpočtů. Často tak vznikal problém při výběru z několika metod u návrhu takto unikátní konstrukce a pro volbu správného postupu jsem se musel obrátit na zkušené specialisty v oboru.

Zpracování této diplomové práce mě velice bavilo a obohatilo mě o nový úhel pohledu při navrhování rozhleden. Věřím, že sen každého inženýra je dát světu takovou stavbu, která ponese jeho jméno.



Seznam použité literatury

Použité normy

1. **SFS-EN 1990.** *Eurocode - Basis of structural design (includes amendment A1: 2005)*. Helsinki : Finnish Standards Association, SFS Online, 2006. EN 1990:2002 + A1:2005: E.
2. **SFS-EN 1991-1-1.** *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions. Densities, self-weight, imposed*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS Online, 2002. EN 1991-1-1:2002 E.
3. **SFS-EN 1991-1-3.** *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS online, 2015. EN 1991-1-3:2003/A1:2015 E.
4. **SFS-EN 1991-1-4.** *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions (includes amendment A1: 2010)*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS Online, 2011. EN 1991-1-4:2005 +AC:2010,.
5. **SFS-EN 1993-1-1.** *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS online, 2005. EN 1993-1-1:2005: E.
6. **SFS-EN 1993-1-8.** *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8:Design of joints*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS online, 2005. EN 1993-1-8:2005: E.
7. **SFS-EN 1993-3-1.** *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 3-1: Towers, masts and chimneys. Towers and masts*. Helsinki : Finnish Standards Association SFS online, 2006. EN 1993-3-1:2006: E.

Citovaná literatura

8. **LAHODNÝ, Jiří, JANATA, Vladimír, POSPÍŠIL, Stanislav.** Zatížení štíhlých konstrukcí větrem podle evropských norem. *časopis stavebnictví*. [Online] 03 2010. https://www.casopisstavebnictvi.cz/zatizeni-stihlych-konstrukci-vetrem-podle-evropskych-norem_N3236.
9. **Tenkanen, Pasi.** Swinghill jo vuodesta 1946. *Web Swinghill - Espoon Chamonix*. [Online] 2018. <http://swinghill.fi/talvi/rinteet-hissit>.
10. **Katedra stavební mechaniky VŠB-TU Ostrava.** Teoretická část: Zatížení stavebních konstrukcí. *Počítačová podpora statických výpočtů - studijní opory*. [Online] 2009. <http://fast10.vsb.cz/ppsv/10.pdf>.
11. **PEŠEK, O.** Zatížení větrem podle ČSN EN 1991-1-4. *Zatížení větrem objektu se sedlovou střechou*. [Online] 2017. https://www.fce.vutbr.cz/KDK/pesek.o/BO04/_V%C3%8DTR_hala.pdf.



12. **MÁČA, Jiří.** Soustavy s jedním stupněm volnosti - přednáška. *132DYN1 Dynamika stavebních konstrukcí 1, Katedra mechaniky FSv ČVUT v Praze.* 2015.
13. **SCIA CZ s.r.o.** Geometricky nelineární analýza. *SCIA.* [Online] A Nemetshek company, 2016.
https://resources.scia.net/download/cs/fs/Analyzer_GeometricalNonlinear_csy.pdf

Ostatní použité informační zdroje

14. **National land survey of Finland.** File service open data. *Web NLS National land survey of Finland.* [Online] 2018.
<https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta?lang=en>.
15. **Google.** Maps Google - Solvalla-Swinghill. *maps.google.fi.* [Online] Google, 2018.
<https://goo.gl/maps/NZoGb8BhYKC2>.