

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Dřevěná oblouková konstrukce zastřešení sportovní haly

Timber arch structure of a sport-hall roofing

Bakalářská práce

Statický výpočet


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Koubková Jméno: Kateřina Osobní číslo: 424354
 Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí - K134
 Studijní program: Stavební inženýrství
 Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

 Název bakalářské práce: Dřevěná oblouková konstrukce zastřešení sportovní haly.

 Název bakalářské práce anglicky: Timber arch structure of a sport-hall roofing.

Pokyny pro vypracování:

V rámci bakalářské práce bude zhotoven statický výpočet a výkresová dokumentace hlavních nosných prvků a vybraných detailů dřevěné konstrukce zastřešení sportovní haly, vybrané ocelové prvky. Bude vypracována technická zpráva.

Seznam doporučené literatury:

 Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Lukáš Blesák, Ph.D.

 Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017

 Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

20.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Lukáše Blesáka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Lukáši Blesákovi, Ph.D. za jeho vstřícnost, trpělivost, pedagogický a osobní přístup při zpracování této práce.

Abstrakt:

Cílem bakalářské práce je návrh hlavních nosných prvků a vybraných detailů zastřešení dřevěné obloukové sportovní haly. Půdorysné rozměry haly jsou 24 x 42 m, příčné obloukové vazby jsou od sebe vzdáleny 6 m a výška haly 7,6 m. Hlavní obloukové nosníky jsou vyrobeny z lepeného lamelového dřeva a jsou řešeny jako trojkloubové konstrukce. Ztužení haly zajišťují ocelová táhla umístěná ve druhém a šestém poli konstrukce. Práce obsahuje statický výpočet, technickou zprávu a výkresovou dokumentaci.

Klíčová slova: *dřevěná konstrukce, oblouková konstrukce, sportovní hala, lepené lamelové dřevo, zastřešení, trojkloubová konstrukce*

Abstract:

The main purpose of this bachelor thesis is to present the design of the main load-bearing elements and selected details of the roofing in a sports hall. The structure has a rectangular shape, 24 metres wide and 42 metres long. The height of the sport-hall is 7,6 metres. The main load-bearing elements are made from glued laminated timber and are designed as three-hinged structures. The construction is braced by steel tension bars. The work includes static calculation, a technical report and drawings.

Keywords: *timber structure, arch structure, sport-hall, glued laminated timber, roofing, three-hinged arch*

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Obloukové konstrukce	8
1.2	Doprava a montáž	9
2	Základní informace o konstrukci	11
3	Zatížení.....	12
3.1	Stálé zatížení	12
3.1.1	Vlastní tíha.....	12
3.1.2	Ostatní stálé – střešní plášť	12
3.2	Proměnné zatížení.....	12
3.2.1	Sníh	12
3.2.1.1	Sníh rovnoměrný.....	13
3.2.1.2	Sníh navátý	13
3.2.2	Vítr.....	14
3.2.2.1	Vítr příčný – zatížení střešního pláště.....	16
3.2.2.2	Vítr podélný – zatížení štítových stěn.....	17
3.2.2.3	Vítr podélný – zatížení střešního pláště	18
3.3	Zatěžovací stavy	20
3.4	Kombinace	24
3.5	Vnitřní síly	28
3.5.1	Globální extrémy na obloukových nosnících	28
3.5.2	Globální extrémy na vaznicích	29
4	Posouzení hlavních prvků	29
4.1	Obloukový nosník.....	29
4.1.1	Charakteristické hodnoty	29
4.1.2	Geometrické charakteristiky	30
4.1.3	Posouzení nosníku na ohyb.....	30
4.1.4	Posouzení nosníku na tah kolmo k vláknům	31
4.1.5	Posouzení nosníku na smyk	32
4.1.6	Ověření příčné a torzní stability nosníku	32
4.1.7	Posouzení nosníku na průhyb	33
4.1.8	Stabilita oblouku	34
4.2	Vaznice	37
4.2.1	Charakteristické hodnoty	38
4.2.2	Geometrické charakteristiky	38
4.2.3	Posouzení vaznic na tlak a šikmý ohyb	38
4.2.3.1	Vaznice č.1	40
4.2.3.2	Vaznice č.2.....	40
4.2.3.3	Vaznice č.3.....	41

4.3	Ztužidla	42
4.3.1	Rozmístění ztužidel v konstrukci.....	42
4.3.2	Vnitřní síly ve ztužidlech.....	42
4.3.3	Návrh ztužidel.....	43
5	Spoje	43
5.1	Čepový spoj	43
5.1.1	Návrh čepového spoje.....	43
5.1.2	Posouzení čepu na stříh.....	44
5.1.3	Posouzení čepu a plechu v otláčení	45
5.1.4	Posouzení čepu na ohyb.....	45
5.1.5	Posouzení čepu na kombinaci stříhu a ohybu	45
5.1.6	Posouzení spojovacích prostředků na účinky příčné síly	46
5.1.7	Posouzení otláčení prvku ve směru rovnoběžném s vlákny	48
5.1.8	Posouzení plechu na ohyb.....	48
5.1.9	Návrh svarů.....	49
5.2	Připojení vaznice na obloukový nosník	50
5.2.1	Návrh spojovacích úhelníků	50
5.2.2	Posouzení vaznice na účinky sání v místě připojení na obloukový nosník ..	51
5.2.3	Posouzení vaznice na otláčení v místě připojení na obloukový nosník.....	52
6	Závěr	52
	Seznam použité literatury	53
	Seznam příloh.....	54
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	57
	Seznam výkresů.....	58

Seznam použitých symbolů

A	$[mm^2]$	plocha průřezu
C_e	$[-]$	součinitel expozice
C_t	$[-]$	tepelný součinitel
$E_{0,05}$	$[MPa]$	hodnota 5% kvantilu modulu pružnosti
$E_{0,mean}$	$[MPa]$	modul pružnosti
$F_{ax,Rk}$	$[kN]$	charakteristická osová únosnost spoj. prostředku na vytažení
$F_{b,Rd}$	$[kN]$	návrhová únosnost šroubu v otláčení
F_{HR}	$[kN]$	únosnost spojovacího úhelníku
$F_{v,Rd}$	$[kN]$	návrhová únosnost šroubu ve stříhu
$F_{v,Rk}$	$[kN]$	charakteristická únosnost pro stříh jednoho spojovacího prostředku
I_v	$[-]$	intenzita turbulence větru
I_y	$[mm^4]$	moment setrvačnosti k ose y
I_z	$[mm^4]$	moment setrvačnosti k ose z
M_d	$[kNm]$	návrhový moment
$M_{y,Rk}$	$[kNm]$	charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti
N_{Ed}	$[kN]$	normálová síla
N_{cr}	$[kN]$	kritické břemeno
R	$[kN]$	osová síla
V_0	$[m^3]$	referenční objem
V	$[m^3]$	namáhaný objem ve vrcholové oblasti
V_{Ed}	$[kN]$	posouvající síla
W_{el}	$[mm^3]$	pružný průřezový modul
W_y	$[mm^3]$	průřezový modul k ose y
W_z	$[mm^3]$	průřezový modul k ose z
b	$[mm]$	šířka
b_{ef}	$[mm]$	účinná šířka průřezu
c_{dir}	$[-]$	součinitel směru větru
c_o	$[-]$	součinitel orografie
c_{pe}	$[-]$	součinitel vnějšího tlaku
c_r	$[-]$	součinitel drsnosti terénu
c_{season}	$[-]$	součinitel ročního období

d	[mm]	průměr
d_0	[mm]	průměr otvoru
$f_{c,0,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{c,0,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{c,90,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům
$f_{c,90,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům
$f_{h,0,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny
$f_{h,\alpha,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v otláčení pro úhel α k vláknům
$f_{m,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v ohybu
$f_{m,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v ohybu
$f_{m,y,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v ohybu k hlavní ose y
$f_{m,z,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v ohybu k hlavní ose z
$f_{t,0,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny
$f_{t,0,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny
$f_{t,90,d}$	[MPa]	návrhová pevnost v tahu kolmo k vláknům
$f_{t,90,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost v tahu kolmo k vláknům
f_u	[MPa]	pevnost v tahu spojovaného materiálu
$f_{v,d}$	[MPa]	návrhová pevnost ve smyku
$f_{v,k}$	[MPa]	charakteristická pevnost ve smyku
$f_{vw,d}$	[MPa]	návrhová pevnost svaru ve smyku
f_y	[MPa]	mez kluzu oceli
g_d	[kN/m]	návrhové zatížení
h	[mm]	výška
h_{ap}	[mm]	výška vrcholové oblasti
i_y	[mm]	poloměr setrvačnosti k ose y
i_z	[mm]	poloměr setrvačnosti k ose z
$k_{c,y}$	[-]	součinitel vzpěrnosti
$k_{c,z}$	[-]	součinitel vzpěrnosti
k_{cr}	[-]	součinitel trhlin pro únosnost ve smyku
k_{crit}	[-]	součinitel používaný pro příčnou a torzní stabilitu
k_{dis}	[-]	součinitel zohledňující rozložení napětí ve vrcholové oblasti
k_l	[-]	součinitel turbulence

k_m	[-]	součinitel zohledňující redistribuci ohybových napětí v průřezu
k_{mod}	[-]	modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti
k_r	[-]	redukční součinitel
k_{vol}	[-]	součinitel objemu
k_y	[-]	součinitel vzpěrnosti
k_z	[-]	součinitel vzpěrnosti
l	[mm]	rozpětí
l_{ef}	[mm]	účinná délka
n_{ef}	[-]	účinný počet spojovacích prostředků v řadě
n_{PR}	[-]	počet řad
n_{SR}	[-]	počet střížných rovin
q_b	[Pa]	základní dynamický tlak větru
q_p	[Pa]	maximální dynamický tlak větru
r	[mm]	poloměr
r_{in}	[mm]	vnitřní poloměr
s	[kN/m ²]	zatížení sněhem
s_k	[kN/m ²]	charakteristická hodnota zatížení sněhem
t	[mm]	tloušťka
u_z	[mm]	svislý posun
v_b	[m/s]	základní rychlost větru
$v_{b,0}$	[m/s]	výchozí základní rychlost větru
v_m	[m/s]	střední rychlost větru
w_e	[Pa]	tlak větru
z_0	[m]	parametr drsnosti terénu
α_{ap}	[°]	úhel sklonu ve vrcholu
α_{cr}	[-]	součinitel kritického zatížení
β_c	[-]	součinitel přímosti
β_w	[-]	korelační faktor
γ_M	[-]	dílčí součinitel vlastnosti materiálu
λ_y	[-]	štíhlostní poměr odpovídající ohybu kolem osy y
λ_z	[-]	štíhlostní poměr odpovídající ohybu kolem osy z
$\lambda_{rel,m}$	[-]	poměrná štíhlost v ohybu

$\lambda_{rel,y}$	[-]	poměrný štíhlostní poměr odpovídající ohybu kolem osy y
$\lambda_{rel,z}$	[-]	poměrný štíhlostní poměr odpovídající ohybu kolem osy z
μ_i	[-]	tvarový součinitel zatížení sněhem
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost vzduchu
ρ_k	[kg/m ³]	hustota dřeva
σ_{\perp}	[MPa]	normálové napětí kolmé k rovině nebezpečného průřezu
$\sigma_{c,0,d}$	[MPa]	návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny
$\sigma_{m,d}$	[MPa]	návrhové napětí v ohybu
$\sigma_{m,crit}$	[MPa]	kritické napětí v ohybu
$\sigma_{m,y,d}$	[MPa]	návrhové napětí v ohybu k hlavní ose y
$\sigma_{m,z,d}$	[MPa]	návrhové napětí v ohybu k hlavní ose z
$\sigma_{t,90,d}$	[MPa]	návrhové napětí v tahu kolmo k vláknům
$\sigma_{y,d}$	[MPa]	návrhová hodnota napětí v oceli
τ_d	[MPa]	návrhové napětí ve smyku
τ_{\perp}	[MPa]	smykové napětí kolmé k ose svaru
τ_{\parallel}	[MPa]	smykové napětí rovnoběžné s osou svaru

1 Úvod

Předmětem řešení bakalářské práce je návrh nosné konstrukce a vybraných detailů zastřešení existující dřevěné obloukové sportovní haly. Hala se nachází v Praze a slouží k tréninkům místního baseballového a softballového klubu Eagles Praha, dále je využívána k pořádání florbalových a futsalových turnajů.



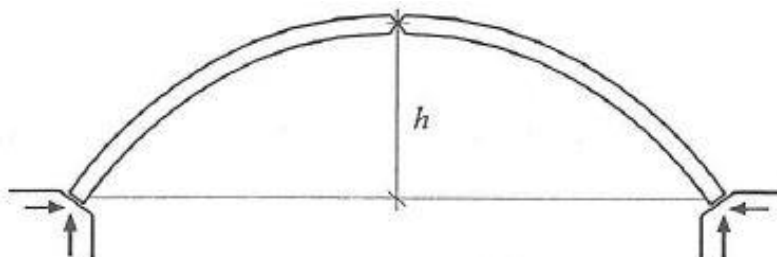
Obr. 1: Sportovní hala Eagles v Praze

Hlavní nosná konstrukce stávající haly je navržena jako trojkloubová konstrukce z obloukových nosníků z lepeného lamelového dřeva. Zastřešení haly je navrženo na půdorysné rozměry 24 x 42 m. Vzdálenost mezi jednotlivými příčnými obloukovými vazbami je 6 m a jejich vzepětí je 7,6 m. Podélná tuhost konstrukce je zajištěna příčnými ocelovými ztužidly umístěnými ve druhém a šestém poli konstrukce.

1.1 Obloukové konstrukce

Často používaným druhem dřevěných nosných konstrukcí jsou v dnešní době obloukové konstrukce. Jejich největší předností je možnost použití na velká rozpětí, a to dokonce i na více než 100 m. Většinou se obloukové konstrukce používají pro zastřešení sportovních a průmyslových hal nebo hangárů. Tyto konstrukce bývají vyrobeny z lepeného lamelového dřeva nebo vrstveného dřeva, popřípadě z rostlého dřeva se skříňovým průřezem nebo I-průřezem.

Ze statického hlediska se oblouky navrhují zpravidla jako dvojklobové nebo trojklobové konstrukce prostě uložené. Vetknuté konstrukce do podpor se téměř nenavrhují z důvodu obtížné montáže a zavedení ohybových momentů do základů. Nejpoužívanějším konstrukčním systémem je trojklobová konstrukce s kloubem ve vrcholu a dvěma klouby v podporách (viz Obr. 2). Výhodou těchto konstrukcí je, že rozdělení vnitřních sil je nezávislé na možném posunutí podpor i na deformacích účinkem možných změn vlhkosti, neboť se jedná o staticky určitou konstrukci. Další předností je, že vrcholový spoj není namáhán ohybovými momenty a je jednodušší na provedení a také méně nákladný. Na rozdíl od dvouklobových konstrukcí vznikají na trojklobových konstrukcích větší deformace a na jejich provedení je potřeba více dřeva kvůli nepříznivějšímu rozdělení ohybových momentů.



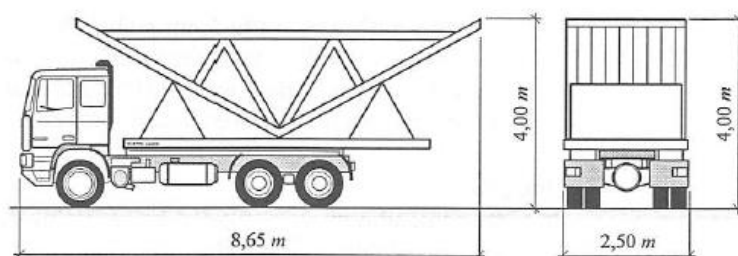
Obr. 2: Trojklobová oblouková konstrukce

Při navrhování oblouků se často volí kruhový nebo parabolický tvar konstrukce, jelikož střednice oblouku téměř odpovídá tlakové čáře, a tím vznikají na konstrukci pouze malé nebo žádné ohybové momenty. Pro výrobu oblouků se obvykle používá lepené lamelové dřevo konstantního obdélníkového průřezu, je však možné použít i jiné materiály s proměnnou výškou průřezu.

1.2 Doprava a montáž

Doprava a montáž dřevěných konstrukčních prvků je poslední fází realizace dřevěných konstrukcí. Přestože se tato fáze může jevit nevýznamně, je nutné jí věnovat pozornost, protože může kromě organizačního průběhu projektu ovlivnit také konstrukční řešení a rozpočet projektu.

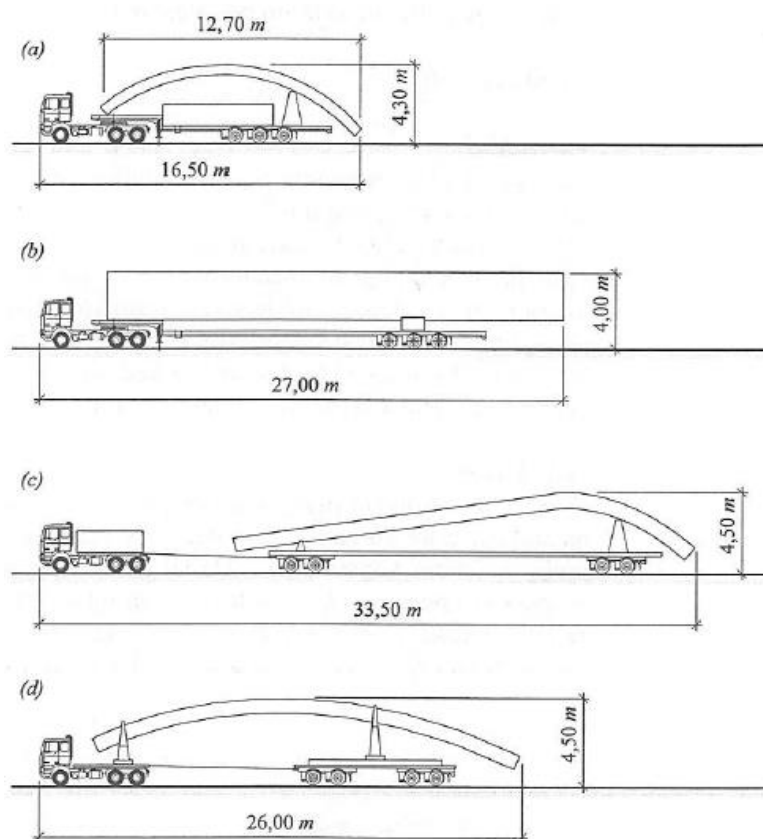
Doprava rostlého dřeva a deskových prvků nepředstavuje díky jejich běžným rozměrům problém. Naopak prvky z lepeného lamelového dřeva bývají vyráběny ve velkých rozměrech a různých tvarech, proto je třeba včas řešit možnosti jejich přepravy s ohledem na dopravní prostředky a přepravní trasy. V případě, že celková výška prvku je větší než 4 metry, není možné prvek přepravovat na silnici ani železnici. V tomto případě je vhodné navrhnout prvek ze dvou samostatných částí, které budou na staveništi stykovány pomocí ocelových nebo dřevěných stykových částí a svorníků. Nosníky přesahující rozměry vozidla jsou považovány za speciální náklad a jejich přeprava se provádí jako speciální transport. Pokud není možné použít běžné nákladní auto, u kterého náklad může přesahovat 3 m dozadu (viz Obr. 3), je nutné využít speciálního nákladního vozidla (viz Obr. 4).



Obr. 3: Třínápravové nákladní auto

Mezi speciální vozidla, která slouží k přepravě dlouhých nebo vysokých nosníků, patří:

- tahač s valníkovým (sedlovým) návěsem (Obr. 4a) – vhodný pro přepravu krátkých nosníků s velkým vzepětím
- tahač a valníkový návěs s přemostěním (Obr. 4b) – vhodný pro přepravu nosníků o délce do 24 m s výškou do 3 m
- tahač s hlubínovým přívěsem (Obr. 4c) – vhodný pro přepravu nosníků s celkovou výškou do 4 m
- tahač s plošinovým přívěsem (Obr. 4d) – vhodný pro jakékoliv nosníky do výšky 3,5 m



Obr. 4: Speciální vozidla

K nakládání konstrukčních prvků na vozidlo slouží zpravidla portálový jeřáb, menší prvky a příslušenství se nakládají pomocí vidlicového zdvižného vozíku. Při nakládání je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy a zajistit náklad na úložné ploše, aby se nemohl při přepravě uvolnit.

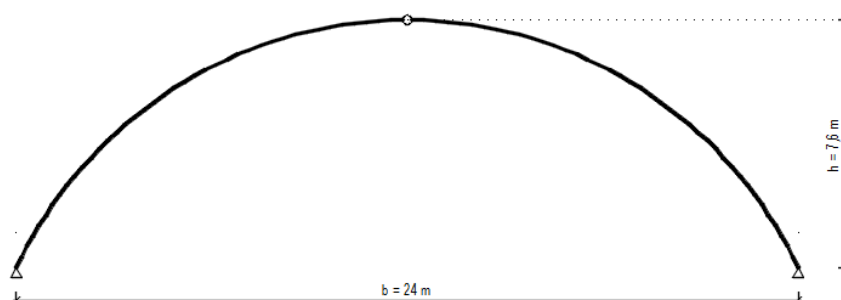
Vykládání konstrukčních prvků probíhá za pomoci zdvihacího zařízení, které se nachází na staveništi. Většinou se jedná o staveništní jeřáb s výložníkem nebo mobilní jeřáb. Nosníky je potřeba opatřit zdvihacími popruhy, které zamezují poškození a brání prokluzování nosníků během manipulace.

Dříve než dojde k samotné montáži prvků, je třeba zajistit jejich správné uskladnění na staveništi. Konstrukční prvky nesmí být během uskladnění porušeny a musí být chráněny před deštěm, zemní vlhkostí a sněhem.

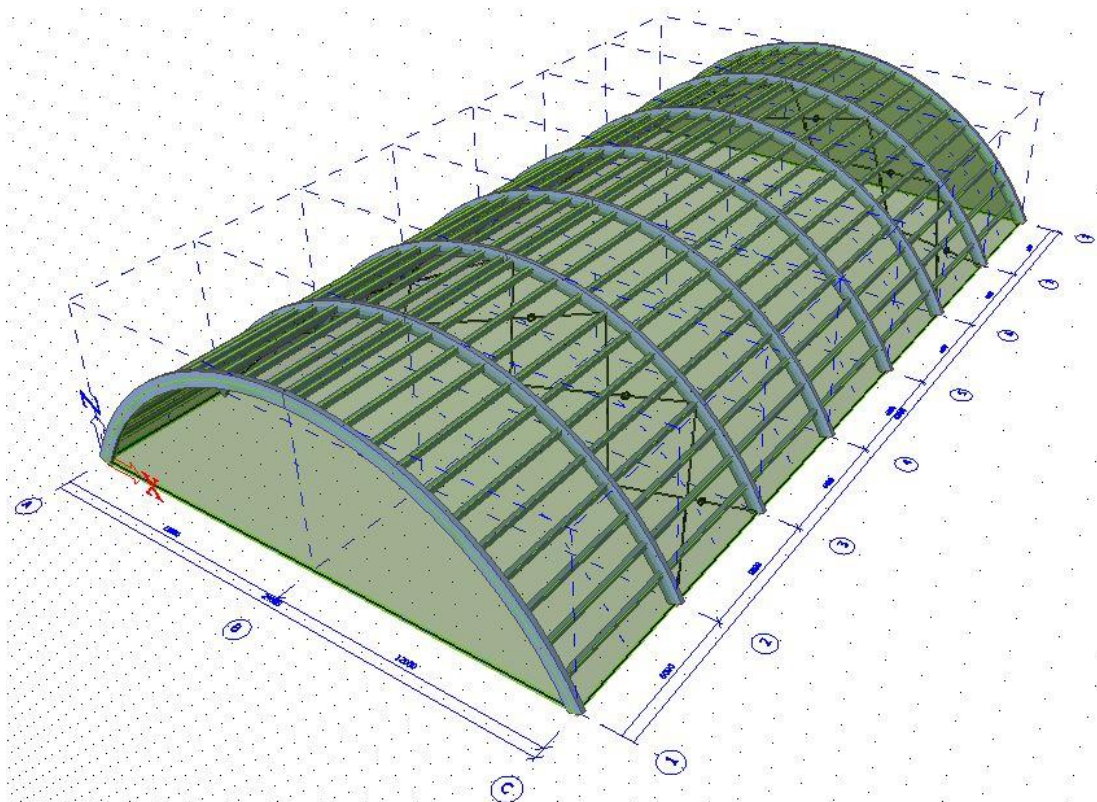
Montáž trojkloubového rámu probíhá zpravidla prefabrikováním dvou sousedních polorámů na zemi připojením ztužidel a vaznic, následně jsou polorámy zdviženy ve vrcholových bodech a otáčeny okolo patních kloubů. Vrcholové body musí být zdviženy nad svou konečnou polohu a poté se opět spouštějí, aby mohl být ve stanovené výšce zhotoven vrcholový kloub. K jeho provedení se využívá montážní věže nebo zdvižné plošiny.

2 Základní informace o konstrukci

Pro řešenou sportovní halu byla navržena dřevěná nosná konstrukce z oblouků z lepeného lamelového dřeva konstantního průřezu pevnostní třídy GL24h a z vaznic z rostlého dřeva pevnostní třídy C24. Oblouky byly navrženy jako trojúhelníkové konstrukce s klouby v podporách a ve vrcholu. Navržená konstrukce má rozpětí 24 m, délku 42 m a vzepětí 7,6 m, vzdálenost mezi jednotlivými oblouky je 6 m. Na obou stranách jsou oblouky kotveny pomocí čepového spoje do železobetonových patek. Ztužení haly zajišťují příčná ocelová ztužidla a celoplošný záklop z OSB desek, který je součástí skladby střešního pláště.



Obr. 5: Statické schéma konstrukce



Obr. 6: Prostorový model konstrukce

3 Zatížení

Stanovené zatížení v této kapitole bude následně použito pro výpočet vnitřních sil na konstrukci v programu SCIA Engineer. Na vypočtené hodnoty vnitřních sil budou navrženy hlavní nosné prvky konstrukce, spoje a ztužidla.

3.1 Stálé zatížení

3.1.1 Vlastní tíha

Vlastní tíha nosné konstrukce bude stanovena z programu SCIA Engineer.

3.1.2 Ostatní stálé – střešní plášť

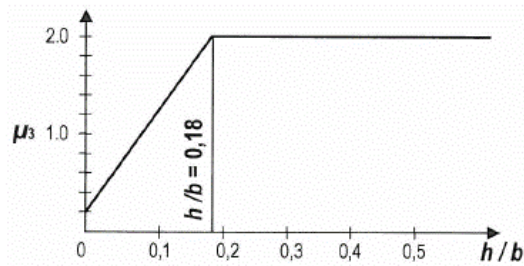
Tab. 1: Charakteristické hodnoty ostatního stálého zatížení

Vrstva (od exteriéru)	Objemová tíha [kN/m ³]	Tloušťka [m]	Plošná tíha [kN/m ²]
Fatrafol 807	13,35	0,0015	0,02
Tepelná izolace Rockwool Airrock HD	0,7	0,1	0,07
OSB deska	7	0,022	0,154
Tepelná izolace Rockwool Airrock HD	0,7	0,24	0,168
Parozábrana Dörken Delta-Reflex	-	0,0003	-
OSB deska	7	0,022	0,154
Ostatní stálé celkem:			0,57 kN/m²

3.2 Proměnné zatížení

3.2.1 Sníh

Lokalita: Praha	sněhová oblast I.
Charakteristická hodnota zatížení sněhem (viz [14])	$s_k = 0,56 \text{ kN/m}^2$
Součinitel expozice	$C_e = 1,0$
Tepelný součinitel	$C_t = 1,0$
Tvarový součinitel zatížení sněhem	$\mu_1 = 0,8$ (rovnoměrný sníh) $\mu_3 = 2,0$ (navátý sníh)



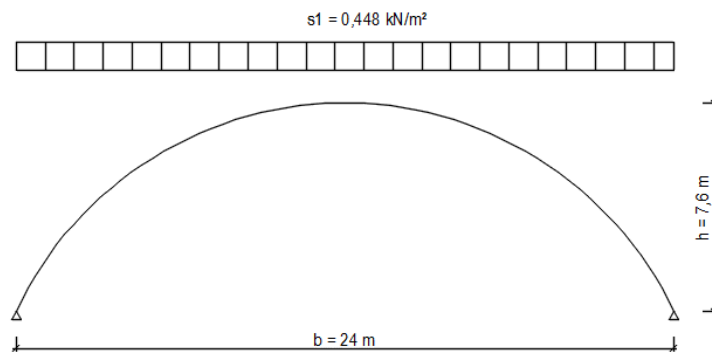
Obr. 7: Doporučená hodnota tvarového součinitele zatížení sněhem pro válcové střechy [2]

Zatížení sněhem na střeše

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

3.2.1.1 Sníh rovnoměrný

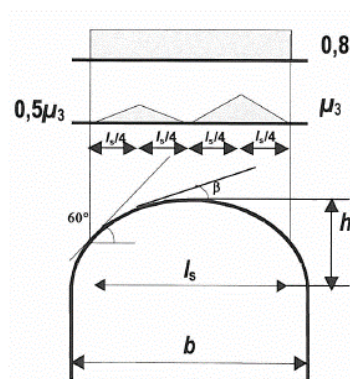
$$s_1 = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,56 = 0,448 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 8: Rovnoměrné zatížení sněhem

3.2.1.2 Sníh navátý

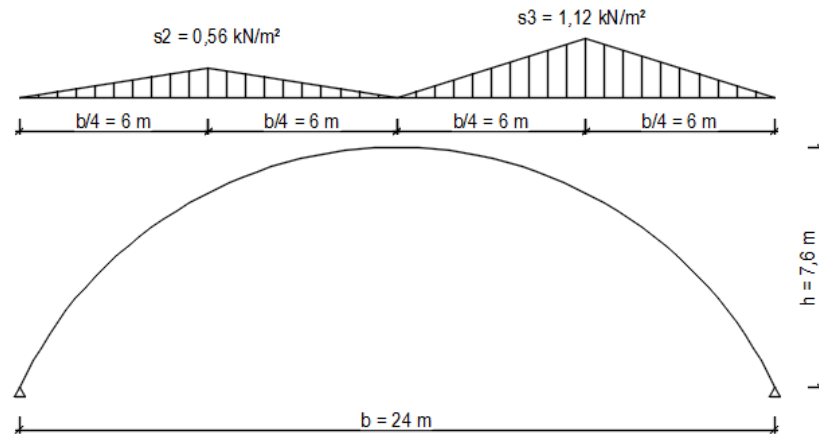
$$\frac{h}{b} = \frac{7,6}{24} = 0,317 \rightarrow \mu_3 = 2,0 \quad (\text{viz Obr. 7})$$



Obr. 9: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu [2]

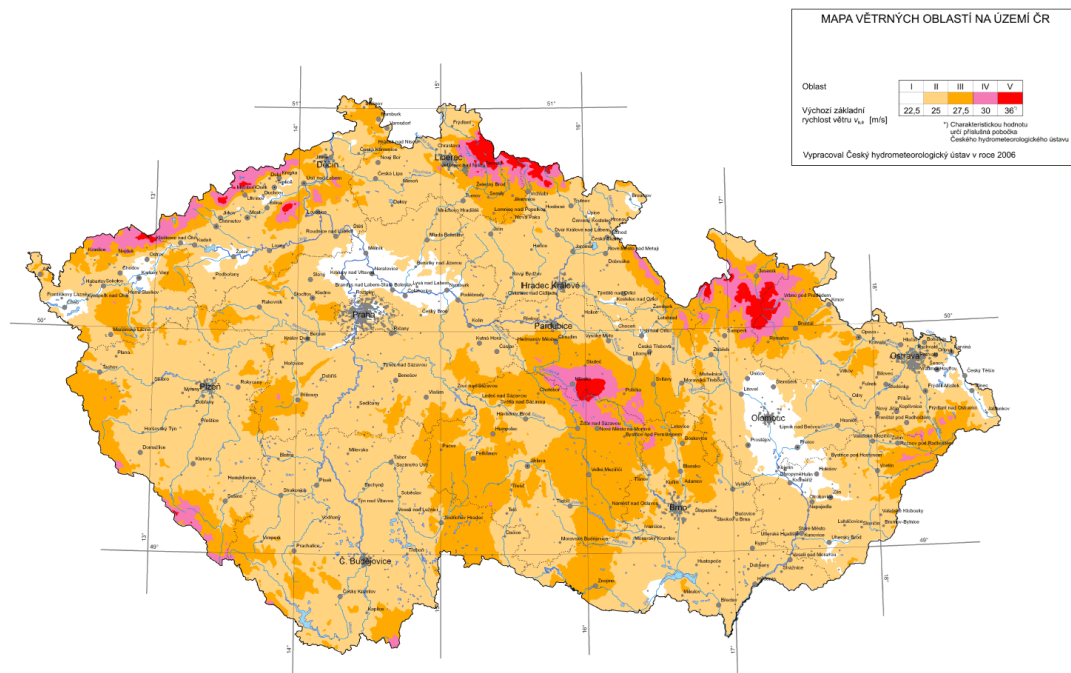
$$s_2 = 0,5 \cdot \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,5 \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,56 = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

$$s_3 = \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,56 = 1,12 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 10: Zatížení navátým sněhem

3.2.2 Vítr



Obr. 11: Mapa větrných oblastí ([3])

Lokalita: Praha → větrná oblast I. (viz Obr. 11)

Výška konstrukce

$$z = 7,6 \text{ m}$$

Výchozí základní rychlost větru

$$v_{b,0} = 22,5 \text{ m/s} \quad (\text{větrná oblast I.})$$

Součinitel směru větru

$$c_{dir} = 1,0$$

Součinitel ročního období

$$c_{season} = 1,0$$

Základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 22,5 = 22,5 \text{ m/s}$$

Parametry drsnosti terénu

$$z_0 = 0,3 \text{ m} \quad (\text{kategorie terénu III.})$$

$$z_{0,II} = 0,05 \text{ m} \quad (\text{kategorie terénu II.})$$

Součinitel terénu

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215$$

Součinitel drsnosti terénu (pro $z_{min} \leq z \leq z_{max}$)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0,215 \cdot \ln \left(\frac{7,6}{0,3} \right) = 0,695$$

Součinitel orografie

$$c_o(z) = 1,0$$

Střední rychlost větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,695 \cdot 1,0 \cdot 22,5 = 15,64 \text{ m/s}$$

Součinitel turbulence

$$k_I = 1,0$$

Intenzita turbulence větru

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln \left(\frac{7,6}{0,3} \right)} = 0,31$$

Základní dynamický tlak větru

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

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(z) = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 22,5^2 = 316,4 \text{ Pa}$$

Maximální dynamický tlak větru

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

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0,31] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 15,64^2 = 484,6 \text{ Pa}$$

Součinitel expozice

$$c_e = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{484,6}{316,4} = 1,53$$

Tlak větru na povrchy

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

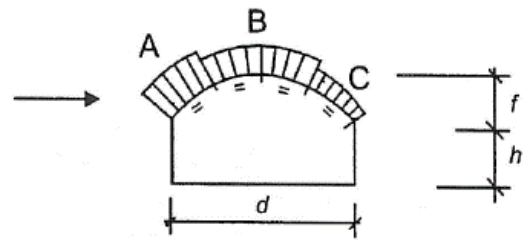
3.2.2.1 Vítr příčný – zatížení střešního pláště

$$h = 0$$

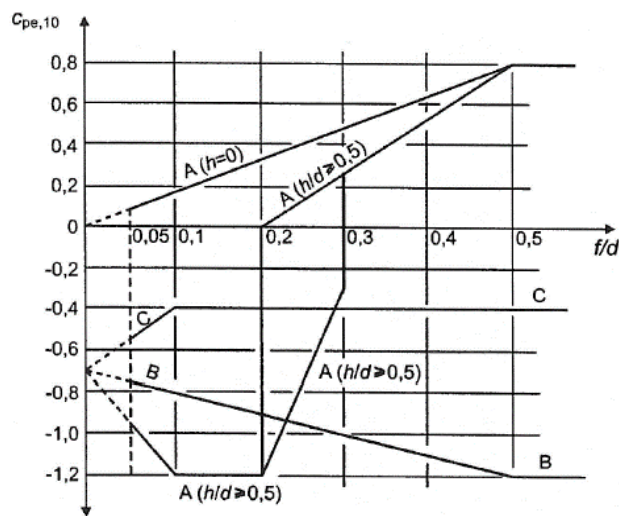
$$f = 7,6 \text{ m}$$

$$d = 24 \text{ m}$$

$$\frac{f}{d} = \frac{7,6}{24} = 0,317$$



Obr. 12: Oblasti větru pro klenbové střechy ([3])



Obr. 13: Hodnoty součinitelů vnějšího tlaku c_{pe} pro klenbové střechy ([3])

$$\text{Oblast A: } c_{pe,10,A} = +0,5$$

$$\text{Oblast B: } c_{pe,10,B} = -1,04$$

$$\text{Oblast C: } c_{pe,10,C} = -0,4$$

Hodnoty součinitelů vnějšího tlaku $c_{pe,10}$ pro oblasti A, B a C byly získány grafickým odečtem a lineární interpolací z Obr. 13.¹

¹ Hodnoty součinitele c_{pe} se znaménkem „+“ značí tlakové namáhání větrem, hodnoty se znaménkem „-“ značí sání větru.

Tlak větru na střešní plášť

$$\text{Oblast A: } w_{e,A} = q_p \cdot c_{pe,10,A} = 484,6 \cdot 0,5 = 242,3 \text{ Pa} = 0,242 \text{ kPa}$$

$$\text{Oblast B: } w_{e,B} = q_p \cdot c_{pe,10,B} = 484,6 \cdot (-1,04) = -503,98 \text{ Pa} = -0,504 \text{ kPa}$$

$$\text{Oblast C: } w_{e,C} = q_p \cdot c_{pe,10,C} = 484,6 \cdot (-0,4) = -193,84 \text{ Pa} = -0,190 \text{ kPa}$$

3.2.2.2 Vítr podélný – zatížení štítových stěn

$$d = 42 \text{ m}$$

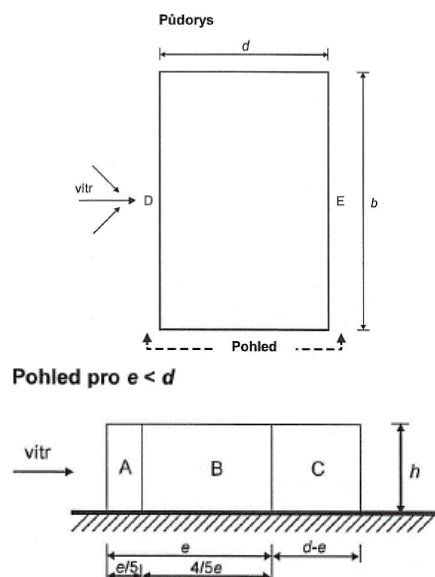
$$b = 24 \text{ m}$$

$$h = 7,6 \text{ m}$$

$$e = \min(b; 2h) = \min(24; 2 \cdot 7,6) = 15,2 \text{ m}$$

$$e = 15,2 \text{ m} < d = 42 \text{ m}$$

$$\frac{h}{d} = \frac{7,6}{42} = 0,18$$



Obr. 14: Oblasti větru pro svislé stěny ([3])

Tab. 2: Doporučené hodnoty součinitelů vnějšího tlaku pro svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem ([3])

Oblast	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

$$\text{Oblast A: } c_{pe,10,A} = -1,2$$

$$\text{Oblast B: } c_{pe,10,B} = -0,8$$

$$\text{Oblast C: } c_{pe,10,C} = -0,5$$

$$\text{Oblast D: } c_{pe,10,D} = +0,7$$

$$\text{Oblast E: } c_{pe,10,E} = -0,3$$

Hodnoty součinitelů vnějšího tlaku $c_{pe,10}$ pro oblasti A, B, C, D a E byly získány v závislosti na poměru h/d odečtem z Tab. 2. ([3])

Tlak větru na svislé stěny

$$\text{Oblast A: } w_{e,A} = q_p \cdot c_{pe,10,A} = 484,6 \cdot (-1,2) = 581,52 \text{ Pa} = -0,58 \text{ kPa}$$

$$\text{Oblast B: } w_{e,B} = q_p \cdot c_{pe,10,B} = 484,6 \cdot (-0,8) = -387,68 \text{ Pa} = -0,388 \text{ kPa}$$

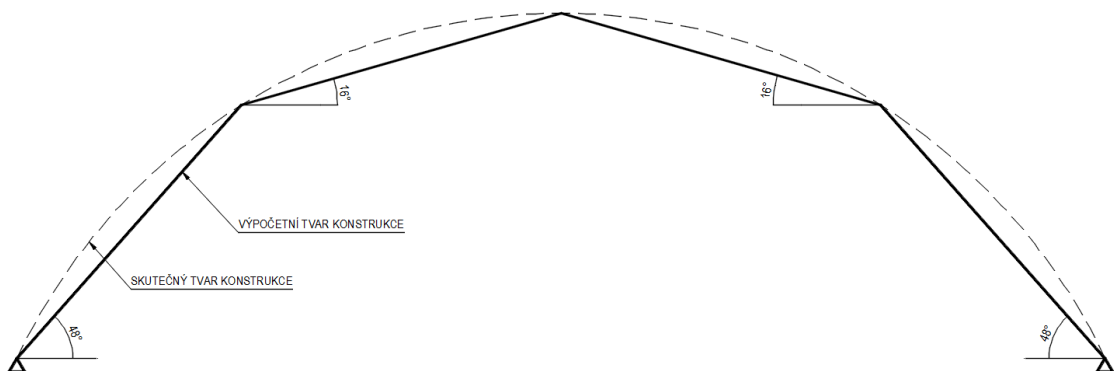
$$\text{Oblast C: } w_{e,C} = q_p \cdot c_{pe,10,C} = 484,6 \cdot (-0,5) = -242,3 \text{ Pa} = -0,242 \text{ kPa}$$

$$\text{Oblast D: } w_{e,D} = q_p \cdot c_{pe,10,D} = 484,6 \cdot (+0,7) = 339,22 \text{ Pa} = 0,339 \text{ kPa}$$

$$\text{Oblast E: } w_{e,E} = q_p \cdot c_{pe,10,E} = 484,6 \cdot (-0,3) = -145,38 \text{ Pa} = -0,145 \text{ kPa}$$

3.2.2.3 Vítr podélný – zatížení střešního pláště

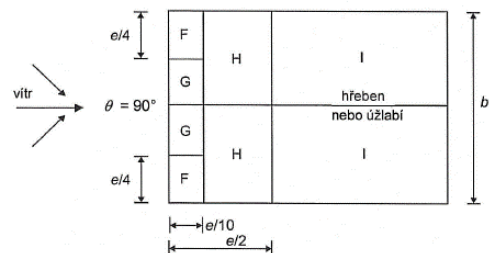
Pro výpočet podélného větru působícího na střešní plášť byla konstrukce oblouku rozdělena a převedena na segmenty sedlových střech o sklonech 48° a 16° . Jednotlivé úhly byly vhodně zvoleny tak, aby byl co nejvíce zachován původní tvar obloukové konstrukce.



Obr. 15: Výpočetní tvar konstrukce pro stanovení součinitelů vnějšího tlaku od podélného větru na střešní plášť

$$b = 24 \text{ m}$$

$$e = \min(b; 2h) = \min(24; 2 \cdot 7,6) = 15,2 \text{ m}$$



Obr. 16: Oblasti větru pro sedlové střechy ([3])

Tab. 3: Součinitelé vnějšího tlaku pro sedlové střechy ([3])

Úhel sklonu α	Oblast pro směr větru $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	

Oblast H pro 48°: $c_{pe,10,H48} = -0,88$

Oblast H pro 16°: $c_{pe,10,H16} = -0,6$

Oblast I pro 48°: $c_{pe,10,I48} = -0,5$

Oblast I pro 16°: $c_{pe,10,I16} = -0,5$

Hodnoty součinitelů vnějšího tlaku $c_{pe,10}$ pro oblasti H a I byly získány odečtem a lineární interpolací z Tab. 3. Oblasti F a G byly z důvodu malé plochy zanedbány.

Tlak větru na střešní plášť

Oblast H pro 48°:

$$w_{e,H48} = q_p \cdot c_{pe,10,H48} = 484,6 \cdot (-0,88) = -426,45 \text{ Pa} = -0,426 \text{ kPa}$$

Oblast H pro 16°:

$$w_{e,H16} = q_p \cdot c_{pe,10,H16} = 484,6 \cdot (-0,6) = -290,76 \text{ Pa} = -0,291 \text{ kPa}$$

Oblast I pro 48°:

$$w_{e,I48} = q_p \cdot c_{pe,10,I48} = 484,6 \cdot (-0,5) = -242,3 \text{ Pa} = -0,242 \text{ kPa}$$

Oblast I pro 16°:

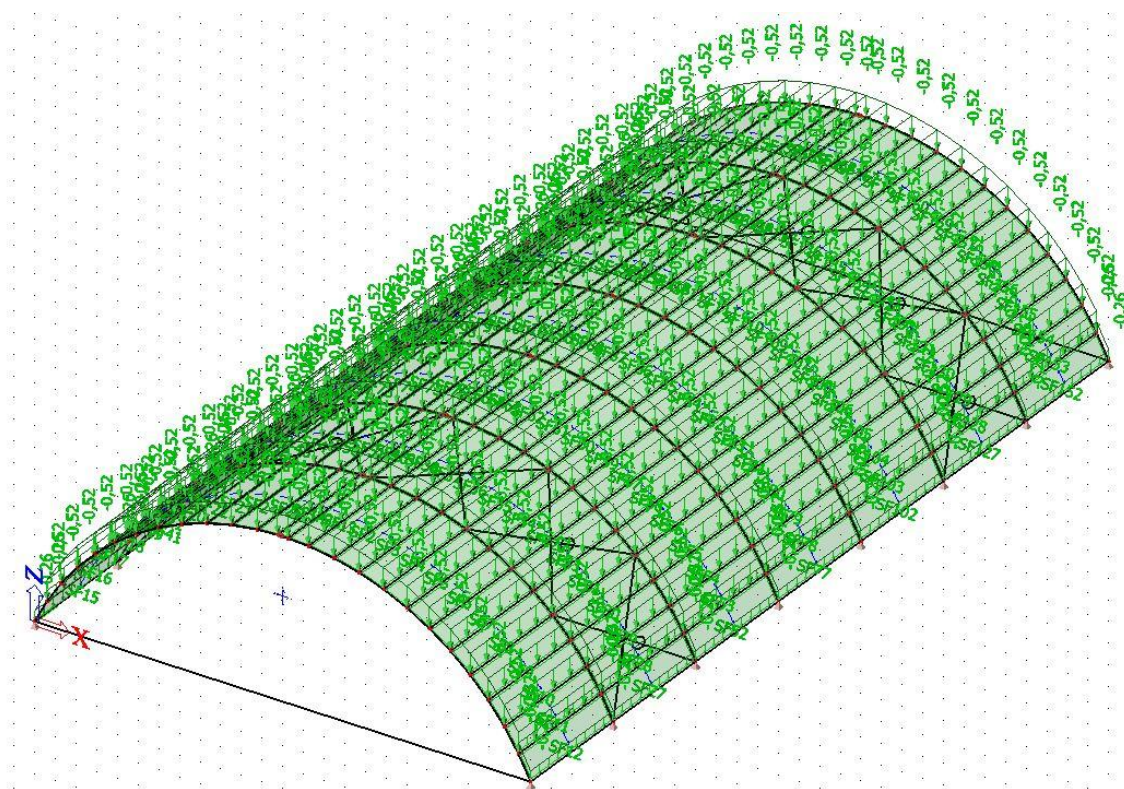
$$w_{e,I16} = q_p \cdot c_{pe,10,I16} = 484,6 \cdot (-0,5) = -242,3 \text{ Pa} = -0,242 \text{ kPa}$$

3.3 Zatěžovací stavy

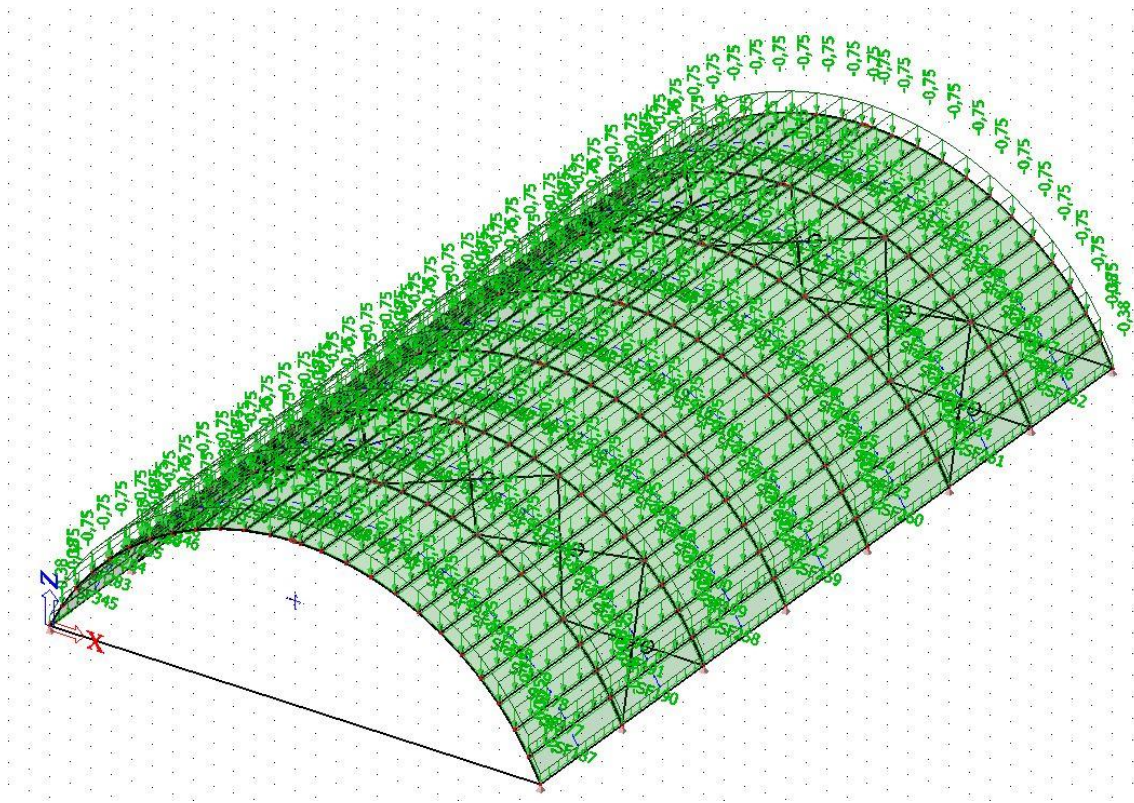
Seznam zatěžovacích stavů

- ZS1 – Vlastní tíha
- ZS2 – Ostatní stálé zatížení
- ZS3 – Užité zatížení
- ZS4 – Sníh rovnoměrný
- ZS5 – Sníh navátý
- ZS6 – Vítr příčný zleva
- ZS7 – Vítr příčný zprava
- ZS8 – Vítr podélný – zatížení na štítové stěny
- ZS9 – Vítr podélný – zatížení na střešní plášť

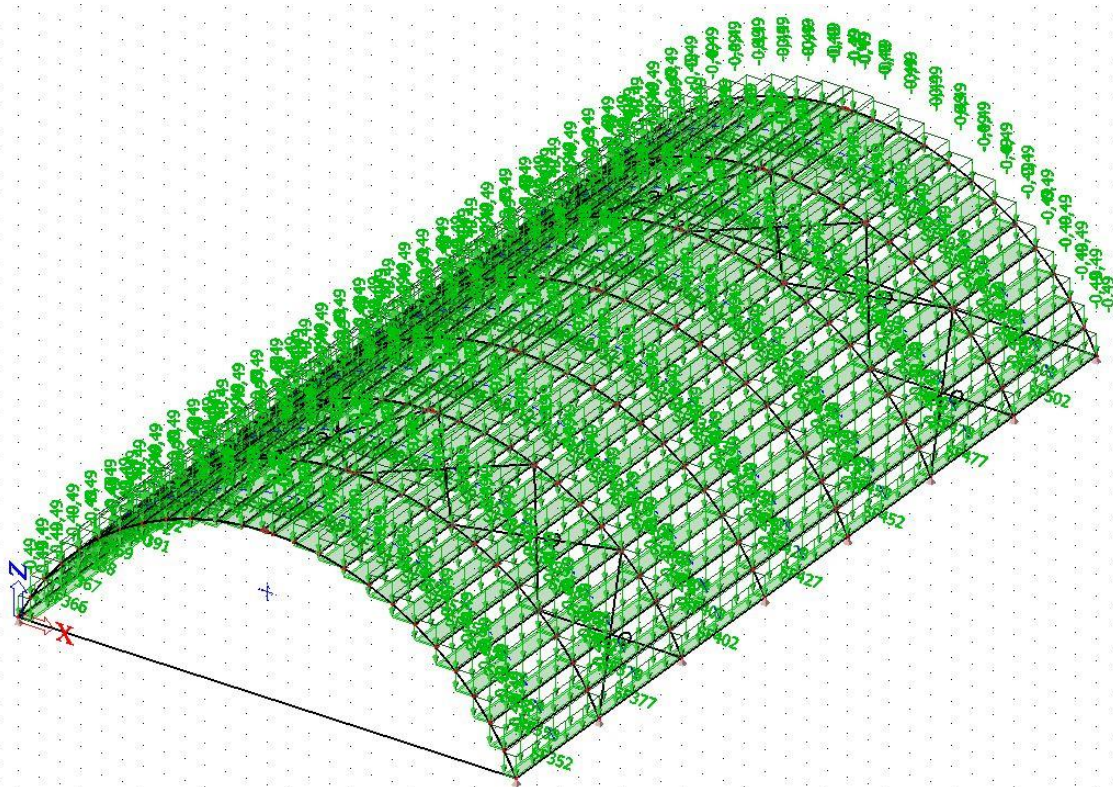
Grafické znázornění zatěžovacích stavů



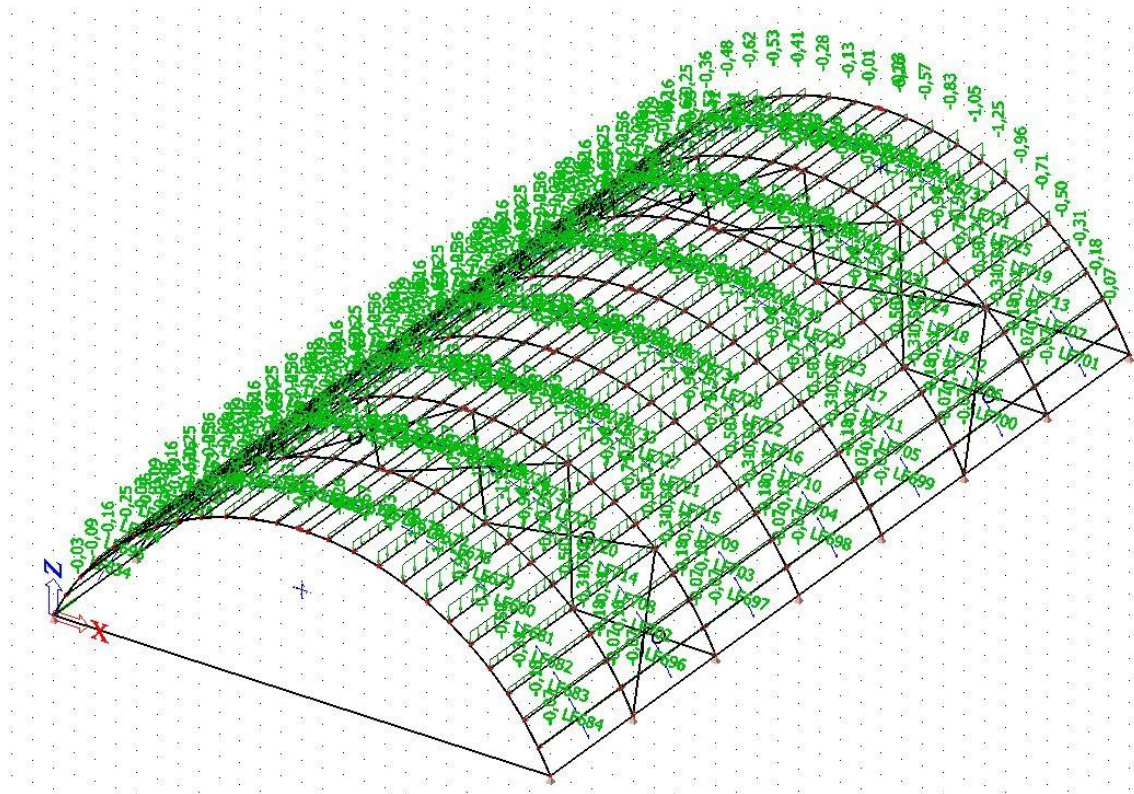
Obr. 17: ZS2 – Ostatní stálé zatížení



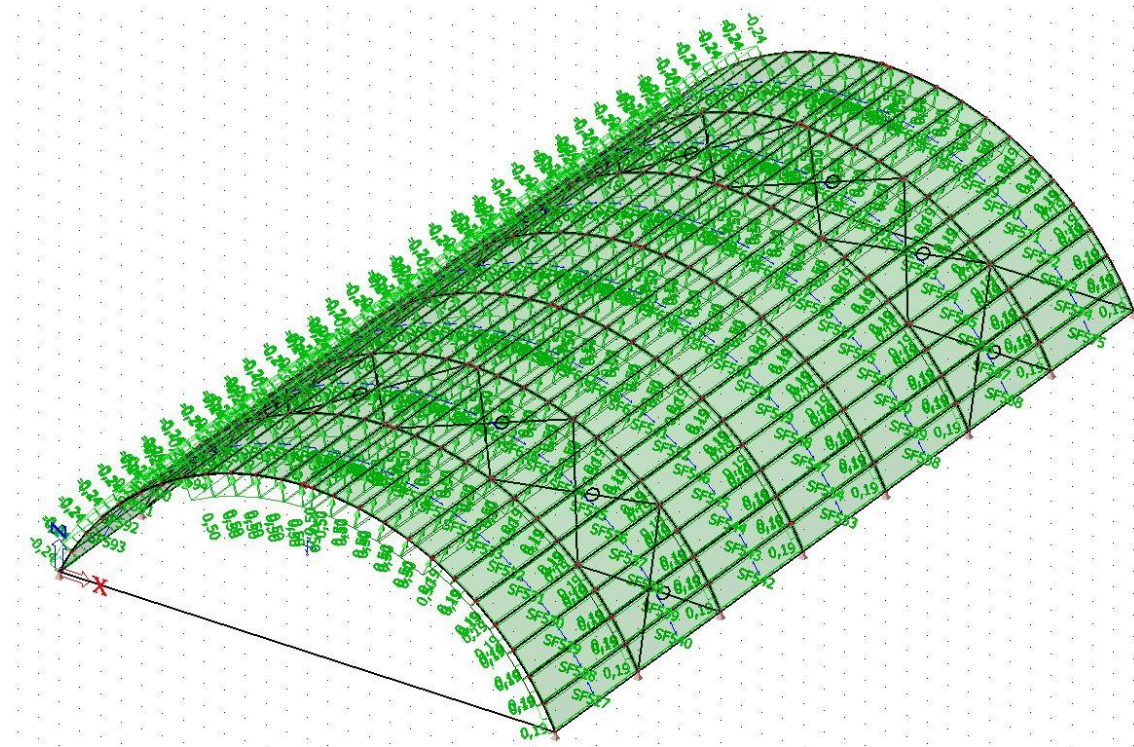
Obr. 18: ZS3 – Užité zátížení



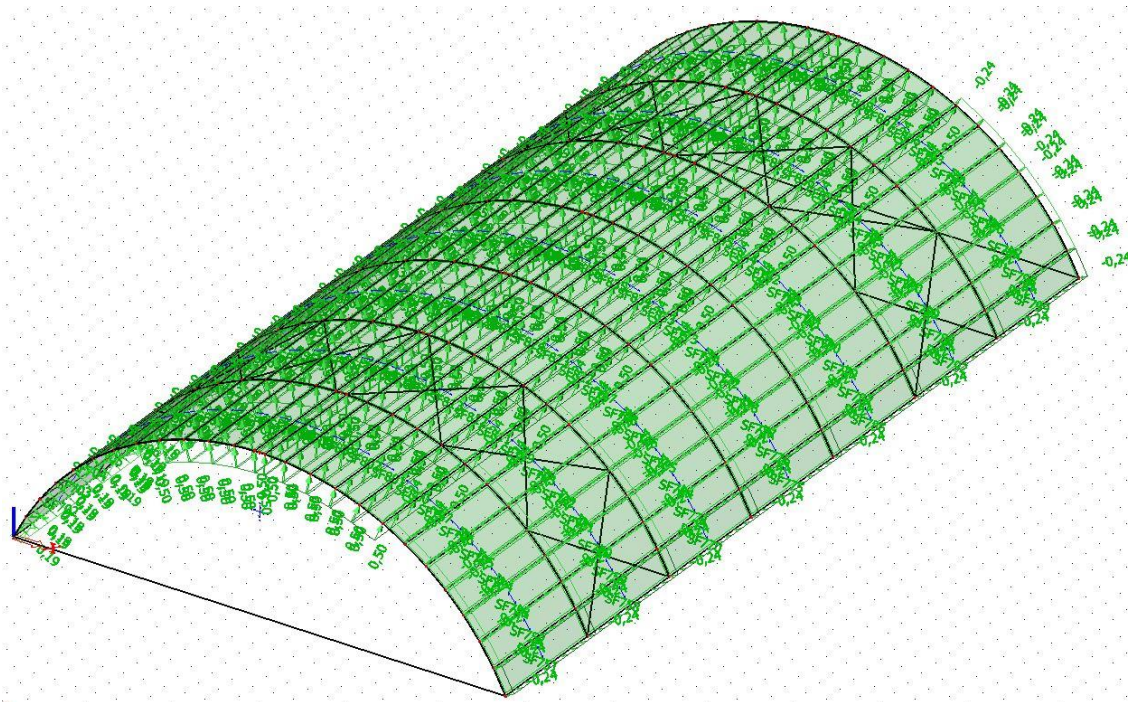
Obr. 19: ZS4 – Sníh rovnoměrný



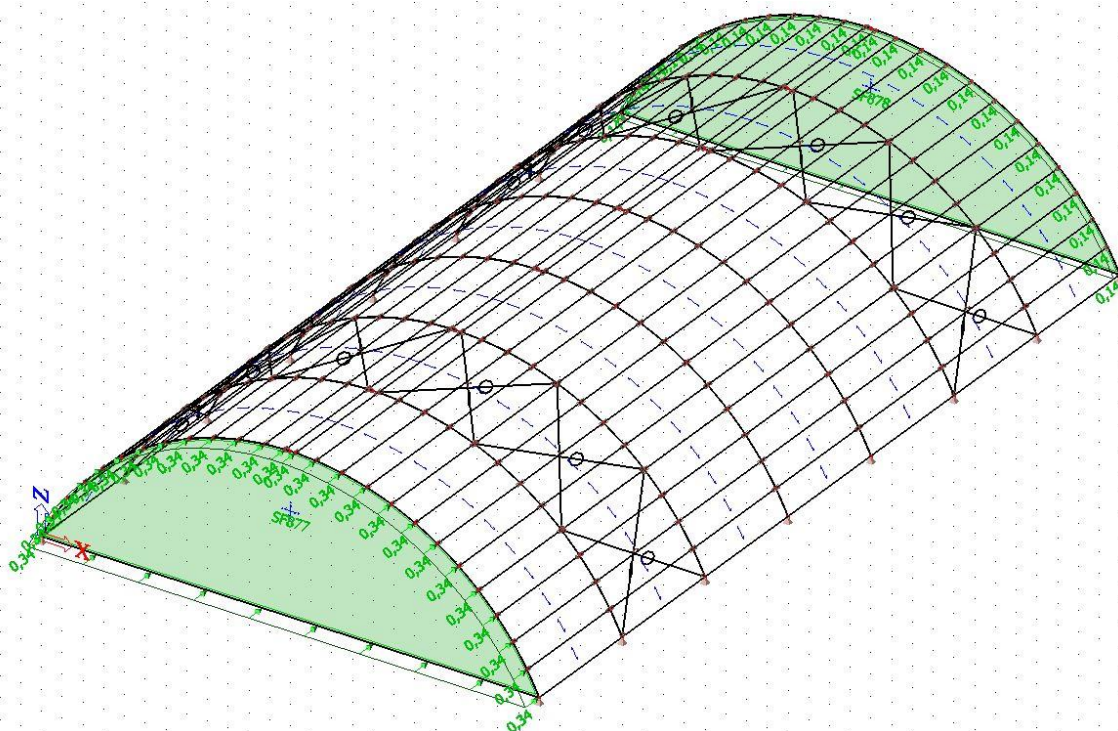
Obr. 20: ZS5 – Sníh navátý



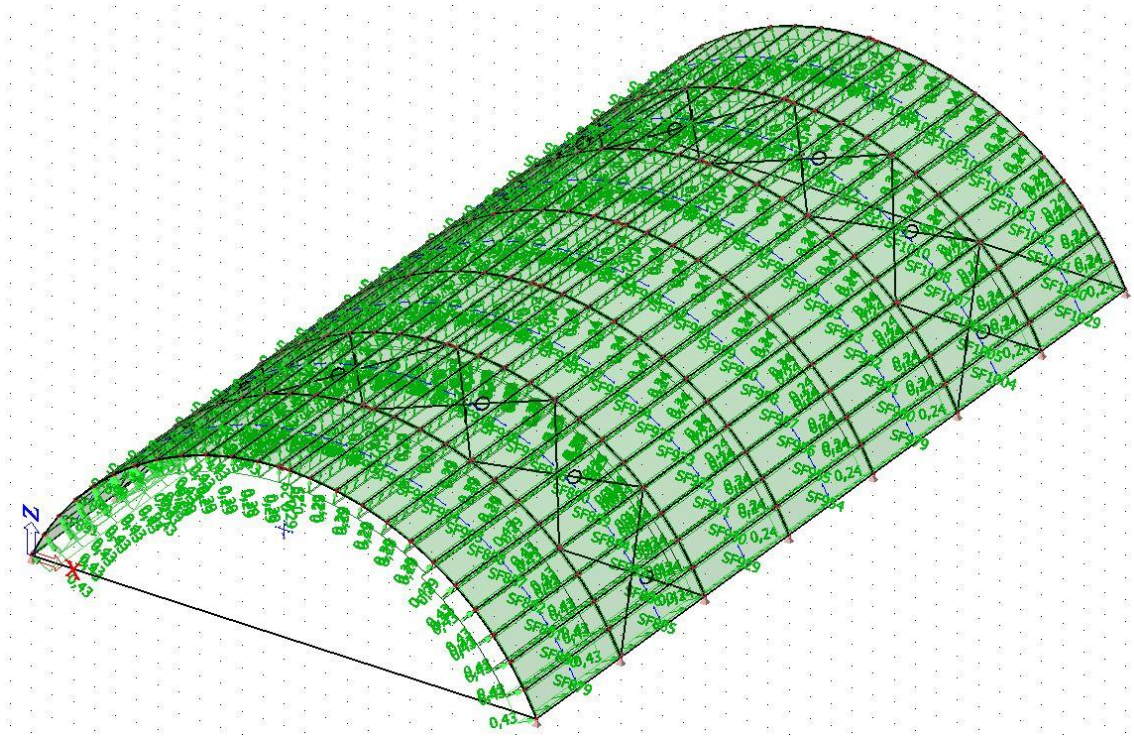
Obr. 21: ZS6 – Vitr příčný zleva



Obr. 22: ZS7 – Vítr příčný zprava



Obr. 23: ZS8 – Vítr podélný – zatížení na štítové stěny



Obr. 24: ZS9 – Vitr podélný – zatížení na střešní plášť

3.4 Kombinace

Kombinace CO1

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
<i>*Studentská verze¹ *Studentská verze¹ *Studentská verze¹ *Studentská verze¹ *Stu</i>			
CO1	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35

Kombinace CO2

CO2	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50

Kombinace CO3

CO3	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS4 - sníh 1	1,50

Kombinace CO4

CO4	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS5 - sníh 2	1,50

Kombinace CO5

CO5	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO6

CO6	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO7

CO7	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS4 - sníh 1	1,50

Kombinace CO8

CO8	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS5 - sníh 2	1,50

Kombinace CO9

CO9	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO10

CO10	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO11

CO11	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO12

CO12	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO13

CO13	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO14

CO14	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO15

CO15	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace CO16

CO16	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO17

CO17	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS6 - vítr příčný zleva	1,50

Kombinace CO18

CO18	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO19

CO19	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS7 - vítr příčný zprava	1,50

Kombinace CO20

CO20	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace CO21

CO21	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace CO22

CO22	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace CO23

CO23	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS4 - sníh 1	1,50
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace CO24

CO24	Lineární - únosnost	ZS1 - vlastní tíha	1,35
		ZS2 - ostatní stálé	1,35
		ZS3 - užité (střecha)	1,50
		ZS5 - sníh 2	1,50
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,50
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,50

Kombinace MSP

MSP	Obálka - použitelnost	ZS1 - vlastní tíha	1,00
		ZS2 - ostatní stálé	1,00
		ZS3 - užité (střecha)	1,00
		ZS5 - sníh 2	1,00
		ZS8 - vítr podélný 1 - stěny zepředu	1,00
		ZS9 - vítr podélný 2 - plášť zepředu	1,00

3.5 Vnitřní síly

3.5.1 Globální extrémny na obloukových nosnících

Tab. 4: Globální extrémny na obloukových nosnících

Prvek	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B7	0,000	CO7/1	-289,43	0,01	-43,49	0,00	0,00	0,00
B1	14,738	CO15/2	-14,84	0,00	-0,06	0,00	0,01	0,00
B3	3,750	CO23/3	-185,94	-1,89	-3,28	0,14	-104,64	0,28
B4	3,750	CO24/4	-177,11	1,90	-3,57	-0,14	-109,31	-0,28
B6	0,000	CO24/4	-250,15	-1,18	-52,67	0,00	0,00	0,00
B5	7,500	CO24/4	-183,92	0,51	33,22	-0,03	-42,40	0,19
B8	2,500	CO15/2	-65,36	0,35	-5,61	-0,47	-31,55	0,37
B8	2,500	CO17/5	-209,30	0,19	-3,83	0,33	-28,56	-0,82
B6	5,000	CO24/4	-191,97	-0,13	8,74	0,19	-129,44	0,34
B9	7,500	CO14/6	-76,72	-0,02	-0,71	0,00	86,38	0,01
B3	5,000	CO23/3	-186,11	1,73	7,43	-0,06	-108,75	-2,08
B4	5,000	CO24/4	-178,42	-1,74	7,65	0,06	-113,76	2,09

3.5.2 Globální extrémy na vaznicích

Tab. 5: Globální extrémy na vaznicích

Prvek	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B33	0,000	CO24/4	-5,13	-1,64	6,89	0,02	0,00	0,00
B58	0,000	CO8/7	12,80	0,00	8,64	0,00	0,00	0,00
B18	6,000	CO15/2	-1,95	-3,11	-1,50	-0,03	0,00	0,00
B18	0,000	CO15/2	-1,95	3,11	1,50	-0,03	0,00	0,00
B24	6,000	CO8/7	0,19	0,00	-13,13	0,09	0,00	0,00
B24	0,000	CO8/7	0,19	0,00	13,13	0,09	0,00	0,00
B183	0,000	CO23/3	1,54	-0,03	5,56	-0,19	0,00	0,00
B184	0,000	CO23/3	1,54	-0,03	5,56	0,19	0,00	0,00
B24	3,000	CO8/7	0,19	0,00	0,00	0,09	19,69	0,00
B30	3,000	CO15/2	-2,00	0,00	0,00	0,03	2,26	-4,67
B18	3,000	CO15/2	-1,95	0,00	0,00	-0,03	2,26	4,67

4 Posouzení hlavních prvků

4.1 Obloukový nosník

4.1.1 Charakteristické hodnoty

Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti pro homogenní lepené lamelové dřevo GL24h:

Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k} = 24 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,g,k} = 16,5 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu kolmo k vláknům	$f_{t,90,g,k} = 0,4 \text{ MPa}$
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,g,k} = 24 \text{ MPa}$
Pevnost v tlaku kolmo k vláknům	$f_{c,90,g,k} = 2,7 \text{ MPa}$
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k} = 2,7 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean} = 11\,600 \text{ MPa}$

$k_{mod} = 0,9$ (pro třídu provozu 2, krátkodobé zatížení)

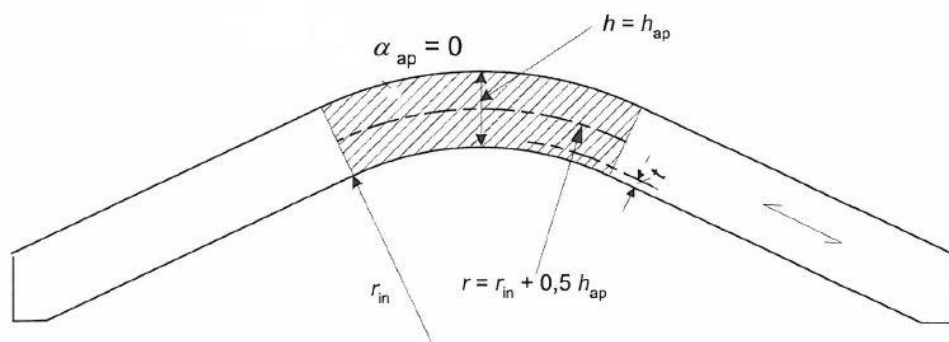
$\gamma_M = 1,25$ (dílní součinitel vlastnosti materiálu pro lepené lamelové dřevo)

$k_{cr} = 0,67$ (součinitel trhlin pro únosnost ve smyku pro lepené lamelové dřevo)

$k_{dis} = 1,4$ (součinitel zohledňující účinek rozdělení napětí ve vrcholové oblasti pro zakřivené nosníky)

4.1.2 Geometrické charakteristiky

Šířka průřezu	$b = 200 \text{ mm}$
Výška průřezu	$h = 640 \text{ mm}$
Výška průřezu ve vrcholu	$h_{ap} = h = 640 \text{ mm}$
Vnitřní poloměr nosníku	$r_{in} = 12\,954 \text{ mm}$
Poloměr nosníku	$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap} = 13\,274 \text{ mm}$
Tloušťka lamel	$t = 40 \text{ mm}$
Úhel sklonu ve vrcholu	$\alpha_{ap} = 0^\circ$



Obr. 25: Geometrie nosníku ([4])

4.1.3 Posouzení nosníku na ohyb

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,g,d}$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} = 1 + 1,4 \cdot \operatorname{tg} 0^\circ + 5,4 \cdot \operatorname{tg}^2 0^\circ = 1$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} = 0,35 - 8 \cdot \operatorname{tg} 0^\circ = 0,35$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} = 0,6 + 8,3 \cdot \operatorname{tg} 0^\circ - 7,8 \cdot \operatorname{tg}^2 0^\circ = 0,6$$

$$k_4 = 6 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} = 6 \cdot \operatorname{tg}^2 0^\circ = 0$$

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3$$

$$k_l = 1 + 0,35 \cdot \left(\frac{640}{13\,274} \right) + 0,6 \cdot \left(\frac{640}{13\,274} \right)^2 + 0 \cdot \left(\frac{640}{13\,274} \right)^3 = 1,018$$

Maximální návrhový moment $M_{ap,d} = 127,05 \text{ kNm}$

Návrhová pevnost v ohybu $f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{24}{1,25} = 17,28 \text{ MPa}$

Pro zakřivené a vyklenuté nosníky $\frac{r_{in}}{t} \geq 240 \rightarrow k_r = 1$

Návrhové napětí v ohybu

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

$$\sigma_{m,d} = 1,018 \cdot \frac{6 \cdot 127,05 \cdot 10^6}{200 \cdot 640^2} = 9,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,g,d}$$

$$9,5 \text{ MPa} \leq 17,28 \text{ MPa}$$

Nosník vyhovuje na ohyb.

4.1.4 Posouzení nosníku na tah kolmo k vláknům

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$$

Referenční objem

$$V_0 = 0,01 \text{ m}^3$$

Namáhaný objem ve vrcholové oblasti

$$V = \frac{\alpha \cdot \pi}{180} \cdot b \cdot (h_{ap}^2 + 2 \cdot r_{in} \cdot h_{ap}) =$$

$$= \frac{27 \cdot \pi}{180} \cdot 0,2 \cdot (0,64^2 + 2 \cdot 12,954 \cdot 0,64) = 1,6 \text{ m}^3$$

Součinitel objemu

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} = \left(\frac{0,01}{1,6}\right)^{0,2} = 0,362$$

$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \text{tg} \alpha_{ap} = 0,2 \cdot \text{tg} 0^\circ = 0$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \text{tg} \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{ap} = 0,25 - 1,5 \cdot \text{tg} 0^\circ + 2,6 \cdot \text{tg}^2 0^\circ = 0,25$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \text{tg} \alpha_{ap} - 4 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{ap} = 2,1 \cdot \text{tg} 0^\circ - 4 \cdot \text{tg}^2 0^\circ = 0$$

$$k_p = 0 + 0,25 \cdot \left(\frac{640}{13\,274}\right) + 0 \cdot \left(\frac{640}{13\,274}\right)^2 = 0,012$$

Návrhové napětí v tahu kolmo k vláknům

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

$$\sigma_{t,90,d} = 0,012 \cdot \frac{6 \cdot 127,05 \cdot 10^6}{200 \cdot 640^2} = 0,112 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tahu kolmo k vláknům

$$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{t,90,d} = 0,9 \cdot \frac{0,4}{1,25} = 0,288 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{t,90,d} &\leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d} \\ 0,112 &\leq 1,4 \cdot 0,362 \cdot 0,288 \\ 0,112 \text{ MPa} &\leq 0,146 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na tah kolmo k vláknům.

4.1.5 Posouzení nosníku na smyk

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

Maximální návrhová posouvající síla	$V_{Ed} = 52,67 \text{ kN}$
Účinná šířka průřezu	$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 200 = 134 \text{ mm}$
Návrhové napětí ve smyku	$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{Ed}}{b_{cr} \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{52,67 \cdot 10^3}{134 \cdot 640} = 0,92 \text{ MPa}$
Návrhová pevnost ve smyku	$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,944 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}\tau_d &\leq f_{v,d} \\ 0,92 \text{ MPa} &\leq 1,944 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na smyk.

4.1.6 Ověření příčné a torzní stability nosníku

Účinná délka nosníku závislá na podmínkách uložení a uspořádání zatížení

$$l_{ef} = 0,9 \cdot 29\,976 = 26\,978,4 \text{ mm}$$

Kritické napětí v ohybu pro celistvý obdélníkový průřez

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0,g,05} = \frac{0,78 \cdot 200^2}{640 \cdot 26\,978,4} \cdot 9\,400 = 17,0 \text{ MPa}$$

Poměrná štíhlost v ohybu

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,g,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{17,0}} = 1,19$$

Součinitel, který bere v úvahu redukovanou pevnost v ohybu v důsledku příčné a torzní stability (pro $0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$)

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m}$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot 1,19 = 0,67$$

Návrhová pevnost v ohybu

$$f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{24}{1,25} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,g,d}$$

$$9,5 \text{ MPa} \leq 0,67 \cdot 17,28$$

$$9,5 \text{ MPa} \leq 11,53 \text{ MPa}$$

Není třeba zajistit spodní pás nosníku proti klopení.

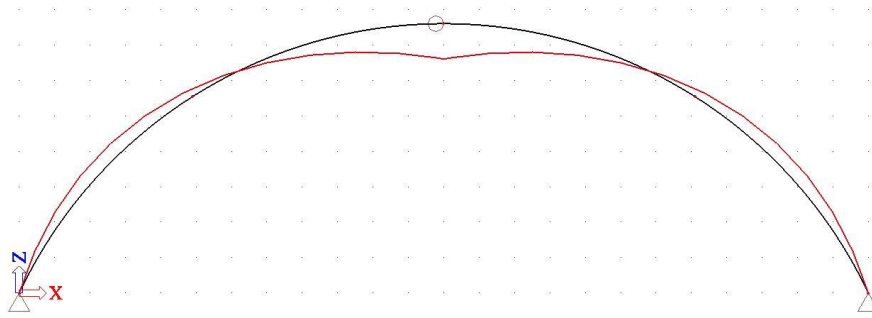
4.1.7 Posouzení nosníku na průhyb

Z programu SCIA Engineer byly získány hodnoty průhybů u_z pro rozhodující kombinaci CO7 uvedené v následující tabulce (Tab.6). Deformovaný tvar konstrukce je pak znázorněn na Obr.26.

Tab. 6: Deformace na konstrukci

Deformace na prutu
 Lineární výpočet, Extrém : Globální
 Výběr : B1..B16
 Třída : Všechny MSU

Prvek	dx [m]	Stav	ux [mm]	uy [mm]	uz [mm]
B10	13,750	CO19/7	-27,8	0,0	-4,3
B9	13,750	CO14/6	26,7	0,0	-7,1
B2	14,738	CO15/2	-0,7	-6,5	-13,1
B1	14,738	CO15/2	-0,7	6,5	-13,1
B6	14,988	CO23/3	-0,6	6,4	-64,4
B10	6,250	CO19/7	-11,5	0,0	41,5
B8	1,250	CO15/2	-0,4	0,8	3,4
B8	0,000	CO17/5	0,0	0,0	0,0
B10	0,000	CO19/7	0,0	0,0	0,0
B5	14,738	CO23/3	-3,5	-6,4	-61,5
B2	0,000	CO23/3	0,0	0,0	0,0
B1	0,000	CO23/3	0,0	0,0	0,0



Obr. 26: Deformovaný tvar konstrukce oblouku

Průhyb ve směru osy z

$$u_z = 64,4 \text{ mm}$$

Limitní hodnota průhybu ve směru osy z

$$u_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{29\,976}{300} = 99,9 \text{ mm}$$

$$u_z \leq u_{lim}$$

$$64,4 \text{ mm} < 99,9 \text{ mm}$$

Nosník vyhovuje na průhyb.

4.1.8 Stabilita oblouku

Důležitým kritériem pro navrhování obloukových konstrukcí je jejich stabilita. Stabilita prvku se ověřuje pomocí kritické síly, při které tlačенý prvek vybočí. Kritická síla závisí na vzpěrné délce (délce a způsobu uložení prvku) a ohybové tuhosti prvku. V tomto případě byla vzpěrná délka pro vybočení v rovině oblouku určována třemi způsoby – obecným vzorcem pro výpočet vzpěrné délky trojkloubových oblouků (Varianta 1), zjednodušeným vzorcem pro výpočet vzpěrné délky trojkloubových oblouků (Varianta 2) a vzorcem pro výpočet Eulerova kritického břemene na tlačенých prvcích (Varianta 3).

Varianta 1

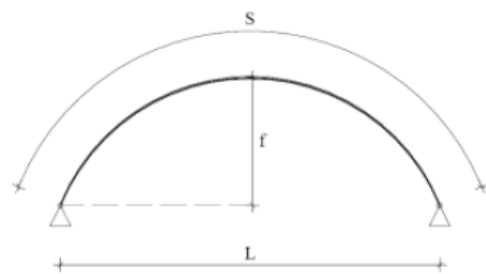
$$L = 24 \text{ m}$$

$$f = 7,6 \text{ m}$$

$$s = 29,976 \text{ m}$$

$$k = \frac{f}{L} = \frac{7,6}{24} = 0,317$$

$$L_{ef} = \frac{L}{1,75} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot k} = \frac{24}{1,75} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 0,317} = 17,53 \text{ m}$$



Varianta 2

$$L_{ef} = 0,7 \cdot s = 0,7 \cdot 29,976 = 20,98 \text{ m}$$

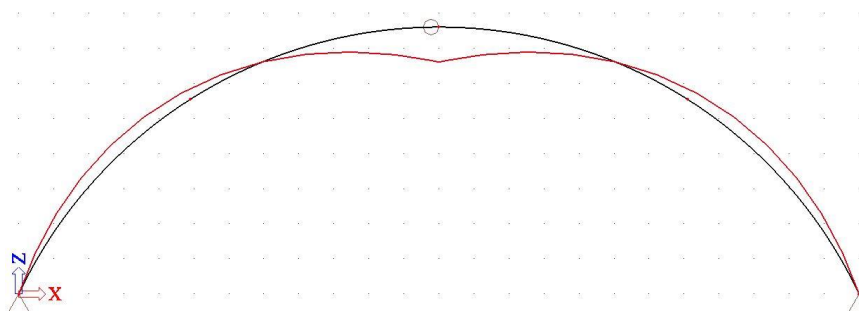
Varianta 3

K výpočtu vzpěrné délky oblouku L_{ef} budou použita výsledná data z programu SCIA Engineer. Rozhodující kombinací pro tento výpočet je kombinace CO7, pro kterou je součinitel kritického zatížení $\alpha_{cr} = 8,64$ (pro první vlastní tvar vybočení). Jelikož je $\alpha_{cr} < 10$, blíží se konstrukce ke kolapsu a bude řešena pomocí teorie 2. řádu. Po přepočítání konstrukce nelineárním výpočtem v programu SCIA je získána nová hodnota $\alpha_{cr,nelin.} = 5,0$, která bude použita při výpočtu kritického břemene N_{cr} . Z programu SCIA bude odečtena hodnota $N_{Ed} = 215 \text{ kN}$ ve čtvrtinovém bodě oblouku, která bude také následně použita při výpočtu kritického břemene N_{cr} .

Na Obr. 27 jsou znázorněny hodnoty součinitele α_{cr} pro jednotlivé vlastní tvary vybočení konstrukce. Rozhodující kombinací při tomto posudku je kombinace CO7. Deformovaná konstrukce a její první vlastní tvar vybočení je pak znázorněn na Obr. 28.

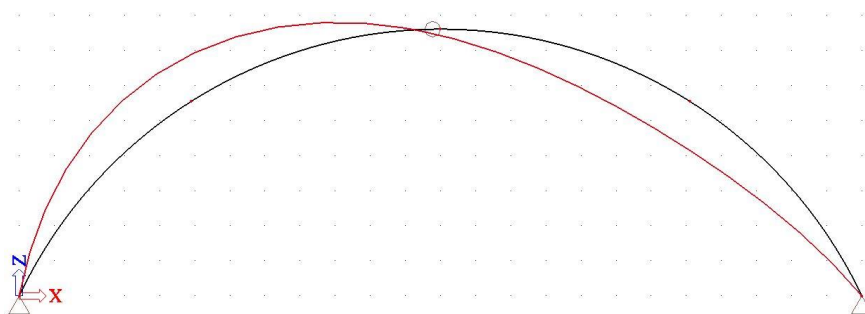
Stabilitní kombinace : S7		Stabilitní kombinace : S7	
1	8,64	1	5,00
2	8,84	2	5,13
3	36,03	3	21,00
4	36,53	4	21,22

Obr. 27: Hodnoty α_{cr} pro kombinaci CO7 lineárním (vlevo) a nelineárním výpočtem (vpravo)

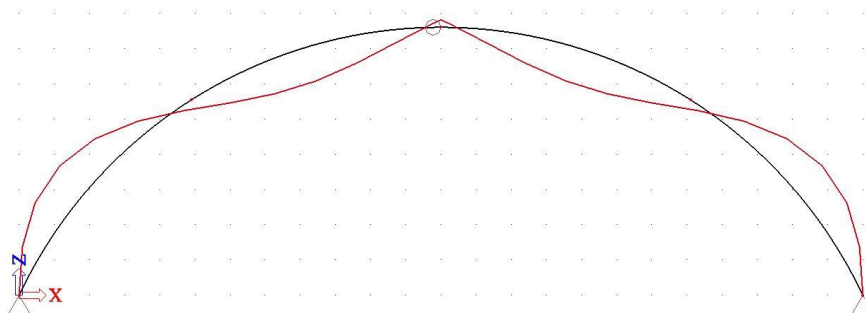


Obr. 28: První vlastní tvar vybočení konstrukce

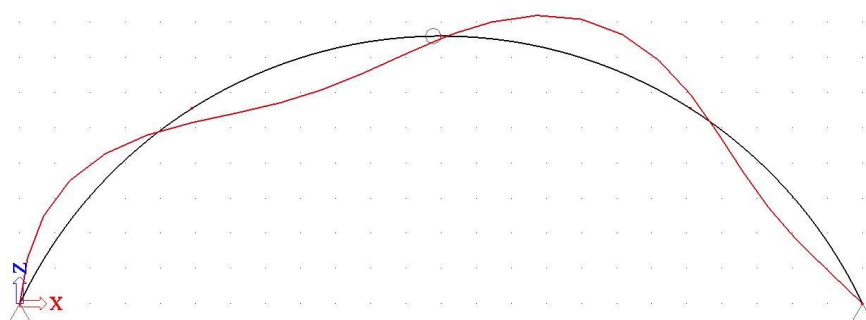
Pro názornost jsou zde ukázány i další vlastní tvary vybočení konstrukce, které ale nejsou dále použity ve výpočtech.



Obr. 29: Druhý vlastní tvar vybočení konstrukce



Obr. 30: Třetí vlastní tvar vybočení konstrukce



Obr. 31: Čtvrtý vlastní tvar vybočení konstrukce

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 640^3 = 43,69 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$N_{cr} = N_{Ed} \cdot \alpha_{cr,netin.} = 215 \cdot 5,0 = 1\,075 \text{ kN}$$

$$L_{ef} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{0,g,05} \cdot I_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 9\,400 \cdot 43,69 \cdot 10^8}{1\,075 \cdot 10^3}} = 19\,418 \text{ mm} = \mathbf{19,42 \text{ m}}$$

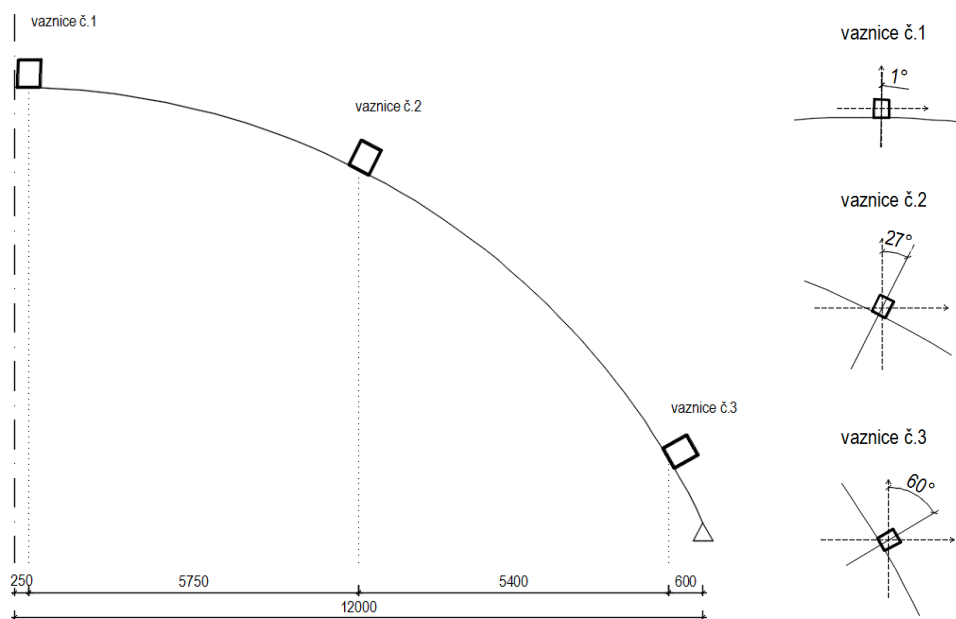
Porovnání

Tab. 7: Vzpěrné délky L_{ef}

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
vzpěrná délka L_{ef} [m]	17,53	20,98	19,42

4.2 Vaznice

V rámci této kapitoly budou posuzovány vaznice znázorněné na Obr. 32. Rozhodující kombinací pro jejich posuzování je kombinace CO8 (viz Tab. 5).



Obr. 32: Posuzované vaznice

4.2.1 Charakteristické hodnoty

Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti pro rostlé dřevo třídy C24:

Pevnost v ohybu	$f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu kolmo k vláknům	$f_{t,90,k} = 0,4 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{0,05} = 7\,400 \text{ MPa}$
Zatížení od kombinace CO ₈	$g_{d,CO8} = 4,2 \text{ kN/m}$
Maximální normálová síla (CO ₈)	$N_{Ed,max} = 12,8 \text{ kN}$

$k_{mod} = 0,9$	(pro třídu provozu 2, krátkodobé zatížení)
$\gamma_M = 1,3$	(dílní součinitel vlastnosti materiálu pro rostlé dřevo)
$k_m = 0,7$	(součinitel zohledňující redistribuci ohybových napětí v průřezu pro obdélníkový průřez)
$\beta_c = 0,2$	(součinitel přímosti pro rostlé dřevo)

4.2.2 Geometrické charakteristiky

Šířka průřezu	$b = 200 \text{ mm}$
Výška průřezu	$h = 240 \text{ mm}$
Délka	$L = 6\,000 \text{ mm}$
Vzpěrná délka	$L_{cr} = L = 6\,000 \text{ mm}$

4.2.3 Posouzení vaznic na tlak a šikmý ohyb

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 240^3 = 230\,400\,000 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 = \frac{1}{12} \cdot 240 \cdot 200^3 = 160\,000\,000 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{b \cdot h}} = \sqrt{\frac{230\,400\,000}{200 \cdot 240}} = 69,3 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{b \cdot h}} = \sqrt{\frac{160\,000\,000}{200 \cdot 240}} = 57,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr}}{i_y} = \frac{6\,000}{69,3} = 86,58$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr}}{i_z} = \frac{6\,000}{57,7} = 103,92$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{86,58}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{21}{7\,400}} = 1,47$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{103,92}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{21}{7\,400}} = 1,76$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,47 - 0,3) + 1,47^2) = 1,7$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) =$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (1,76 - 0,3) + 1,76^2) = 2,2$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,7 + \sqrt{1,7^2 - 1,47^2}} = 0,39$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1,76^2}} = 0,28$$

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 240^2 = 1\,920\,000 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{1}{6} \cdot h \cdot b^2 = \frac{1}{6} \cdot 240 \cdot 200^2 = 1\,600\,000 \text{ mm}^3$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{21}{1,3} = 14,54 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = f_{m,z,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{24}{1,3} = 16,62 \text{ MPa}$$

4.2.3.1 Vaznice č.1

$$M_{y,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \cos\delta_1 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \cos 1^\circ = 18,9 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \sin\delta_1 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \sin 1^\circ = 0,33 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{18,9 \cdot 10^6}{1\,920\,000} = 9,84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0,33 \cdot 10^6}{1\,600\,000} = 0,206 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{12,8 \cdot 10^3}{200 \cdot 240} = 0,27 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \frac{0,27}{0,39 \cdot 14,54} + \frac{9,84}{16,62} + 0,7 \cdot \frac{0,206}{16,62} &= 0,65 \\ 0,65 &\leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \frac{0,27}{0,28 \cdot 14,54} + 0,7 \cdot \frac{9,84}{16,62} + \frac{0,206}{16,62} &= 0,49 \\ 0,49 &\leq 1 \end{aligned}$$

Vaznice č.1 splňuje podmínku pro posouzení maximálních napětí od kombinace vzpěrného tlaku a dvojosého ohybu.

4.2.3.2 Vaznice č.2

$$M_{y,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \cos\delta_2 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \cos 27^\circ = 16,84 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \sin\delta_2 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \sin 27^\circ = 8,58 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{16,84 \cdot 10^6}{1\,920\,000} = 8,77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{8,58 \cdot 10^6}{1\,600\,000} = 5,36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{12,8 \cdot 10^3}{200 \cdot 240} = 0,27 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,27}{0,39 \cdot 14,54} + \frac{8,77}{16,62} + 0,7 \cdot \frac{5,36}{16,62} = 0,80$$

$$0,80 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,27}{0,28 \cdot 14,54} + 0,7 \cdot \frac{8,77}{16,62} + \frac{5,36}{16,62} = 0,76$$

$$0,76 \leq 1$$

Vaznice č.2 splňuje podmínku pro posouzení maximálních napětí od kombinace vzpěrného tlaku a dvojosého ohybu.

4.2.3.3 Vaznice č.3

$$M_{y,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \cos \delta_3 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \cos 60^\circ = 9,45 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = \frac{1}{8} \cdot g_{d,cos} \cdot \sin \delta_3 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 4,2 \cdot 6^2 \cdot \sin 60^\circ = 16,37 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{9,45 \cdot 10^6}{1\,920\,000} = 4,92 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{16,37 \cdot 10^6}{1\,600\,000} = 10,23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h} = \frac{12,8 \cdot 10^3}{200 \cdot 240} = 0,27 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,27}{0,39 \cdot 14,54} + \frac{4,92}{16,62} + 0,7 \cdot \frac{10,23}{16,62} = 0,77$$

$$0,77 \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

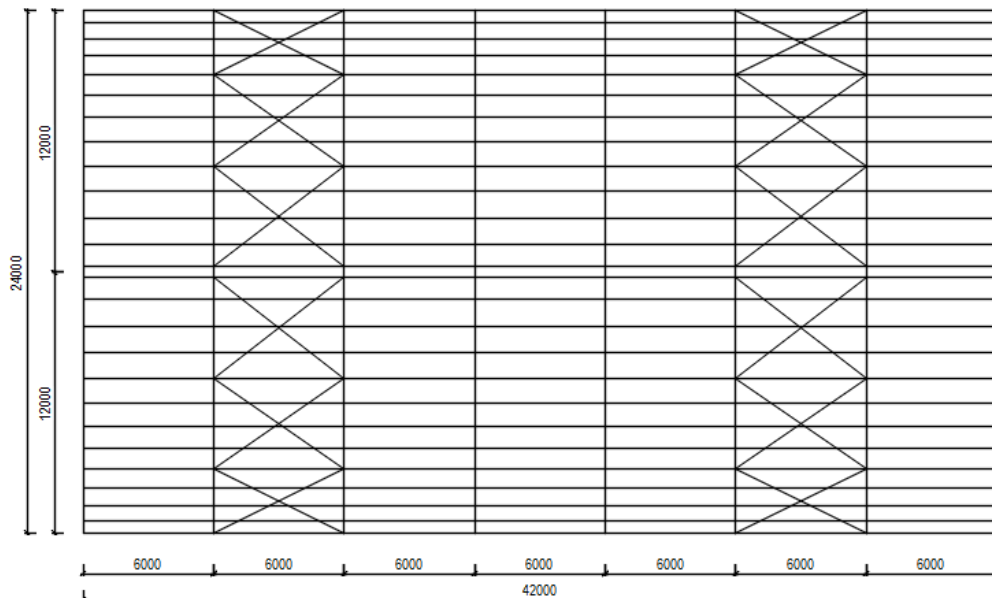
$$\frac{0,27}{0,28 \cdot 14,54} + 0,7 \cdot \frac{4,92}{16,62} + \frac{10,23}{16,62} = 0,89$$

$$0,89 \leq 1$$

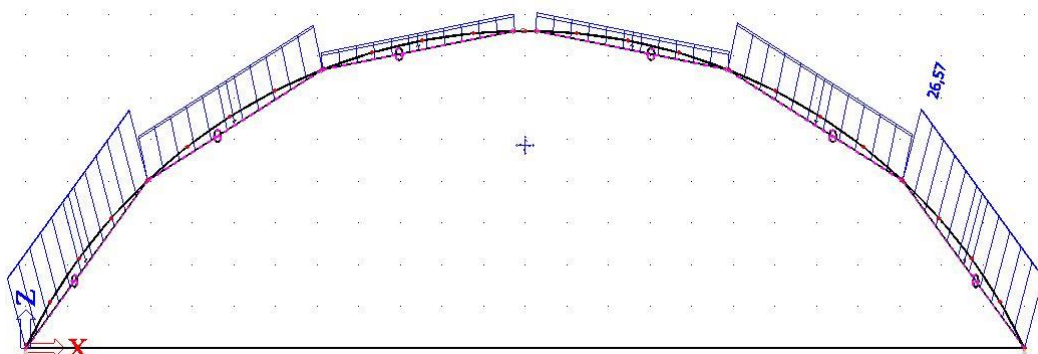
Vaznice č.3 splňuje podmínku pro posouzení maximálních napětí od kombinace vzpěrného tlaku a dvojosého ohybu.

4.3 Ztužidla

4.3.1 Rozmístění ztužidel v konstrukci



4.3.2 Vnitřní síly ve ztužidlech



Obr. 33: Vnitřní síly od rozhodující kombinace (NC24)

4.3.3 Návrh ztužidel

Maximální osová síla ve ztužidle (NC24)

$$N_{Ed,max} = 26,57 \text{ kN}$$

Na základě maximální osově síly ve ztužidlech a katalogu konstrukčních táhel Macalloy (Příloha 1) byla navržena ztužidla Macalloy 460 průměru 11 mm.

5 Spoje

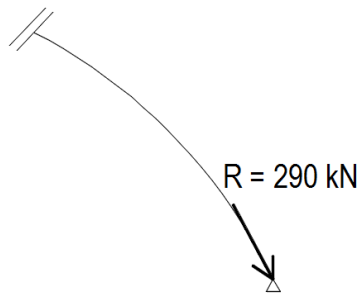
5.1 Čepový spoj

V rámci této kapitoly bude navržen a posouzen čepový spoj připojující obloukový nosník k základové patce. Dále budou posouzeny navržené spojovací prostředky čepu. Čepový spoj bude také použit ve vrcholu konstrukce pro kloubové připojení dvou obloukových nosníků. Řešení tohoto spoje však není předmětem této práce.

5.1.1 Návrh čepového spoje

Maximální osová síla na nosníku v místě podpory

$$R = 290 \text{ kN}$$



Ocel čepu i plechů: S355

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

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

Dílčí součinitel spolehlivosti – únosnost průřezů

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Dílčí součinitel spolehlivosti – únosnost spojů

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Tloušťka čepu

$$t \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot \gamma_{M0}}{f_y}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{290 \cdot 10^3 \cdot 1,0}{355}} = 20,01 \text{ mm}$$

Návrh tloušťky čepu: $t = 25 \text{ mm}$

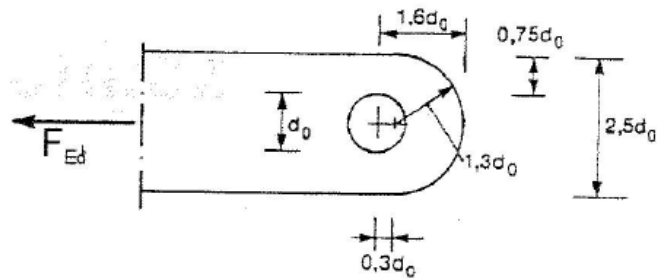
Průměr otvoru pro čep

$$d_0 \leq 2,5 \cdot t$$

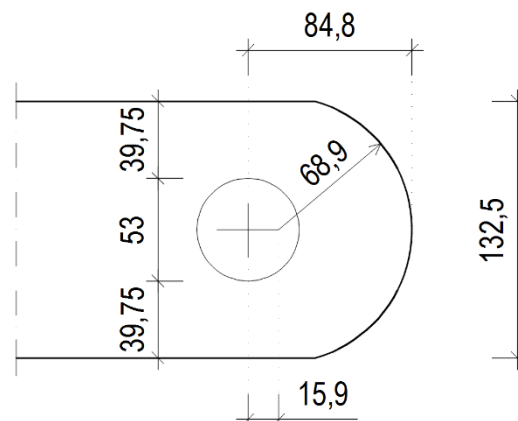
$$d_0 \leq 62,5 \text{ mm}$$

Návrh čepu: $d = \varnothing 50 \text{ mm}$

Návrh otvoru pro čep: $d_0 = \varnothing 53 \text{ mm}$



Obr. 34: Geometrické požadavky na pruty ukončené čepovými spoji ([8])



Obr. 35: Navržená geometrie čepu [mm]

5.1.2 Posouzení čepu na stříh

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_{up}}{\gamma_{M2}} \geq F_{v,Ed} (= R)$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 25^2 = 1\,963,5 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 1\,963,5 \cdot \frac{510}{1,25} = 480\,664,8 \text{ N} = 480,66 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} \geq R$$

$$480,66 \text{ kN} \geq 290 \text{ kN}$$

Čep vyhovuje na stříh.

5.1.3 Posouzení čepu a plechu v otláčení

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed} (= R)$$

$$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot 25 \cdot 50 \cdot \frac{355}{1,0} = 665\,625 \text{ N} = 665,6 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} \geq R$$

$$665,6 \text{ kN} \geq 290 \text{ kN}$$

Čep i plech vyhovují na otláčení.

5.1.4 Posouzení čepu na ohyb

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq M_{Ed}$$

$$W_{el} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 50^3}{32} = 12\,271,85 \text{ mm}^3$$

$$M_{Rd} = 1,5 \cdot 12\,271,85 \cdot \frac{355}{1,0} = 6\,534\,760 \text{ Nmm} = 6,53 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = \frac{R}{8} \cdot (b + 4c + 2a) = \frac{290 \cdot 10^3}{8} \cdot (25 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 25) = 3\,008\,750 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed} = 3,01 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$6,53 \text{ kNm} \geq 3,01 \text{ kNm}$$

Čep vyhovuje na ohyb.

5.1.5 Posouzení čepu na kombinaci stříhu a ohybu

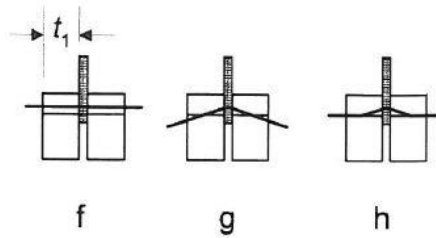
$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{3,01}{6,53}\right)^2 + \left(\frac{290}{480,66}\right)^2 \leq 1$$

$$0,58 \leq 1$$

Čep vyhovuje na kombinaci stříhu a ohybu.

5.1.6 Posouzení spojovacích prostředků na účinky příčné síly



Obr. 36: Způsoby porušení pro spoje ocel-dřevo ([4])

Průměr spojovacích prostředků	$d = 22 \text{ mm}$
Hustota dřeva pvnostní třídy GL24h	$\rho_{k, GL24h} = 380 \text{ kg/m}^3$
Tloušťka krajního dřevěného prvku	$t_1 = 87,5 \text{ mm}$
Maximální příčná síla působící na spoj	$R_{max} = 53 \text{ kN}$

$k_{mod} = 0,9$	(pro třídu provozu 2, krátkodobé zatížení)
$\gamma_M = 1,3$	(dílní součinitel vlastnosti materiálu pro spoje)
$n_{PR} = 4$	
$n_{SR} = 2$	

Jelikož $F_{ax,Rk}$ není známa, příspěvek od účinku sepnutí spoje se uvažuje nula.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 22 = 1,68 \quad (\text{pro jehličnaté dřevo})$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 22) \cdot 380 = 24,3 \text{ MPa}$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,3}{1,68 \cdot \sin^2 10,35^\circ + \cos^2 10,35^\circ} = 23,78 \text{ MPa}$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 600 \cdot 22^{2,6} = 556 \, 636 \text{ Nmm} = 0,56 \text{ kNm}$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2} - 1} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 23,78 \cdot 87,5 \cdot 22 \\ 23,78 \cdot 87,5 \cdot 22 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 556\,636}{23,78 \cdot 22 \cdot 87,5^2}} - 1 \right] + 0 \\ 2,3 \cdot \sqrt{556\,636 \cdot 23,78 \cdot 22} + 0 \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 45\,777 \\ 27\,407 \\ 39\,249 \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 27\,407 \text{ N} = 27,41 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{27,41}{1,3} = 18,98 \text{ kN}$$

$$n_{ef} = \min \left\{ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \right.$$

$$n_{ef} = \min \left\{ 2^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{110}{13 \cdot 22}} \right.$$

$$n_{ef} = \min \{ 2, 1,47 \}$$

$$n_{ef} = 1,47$$

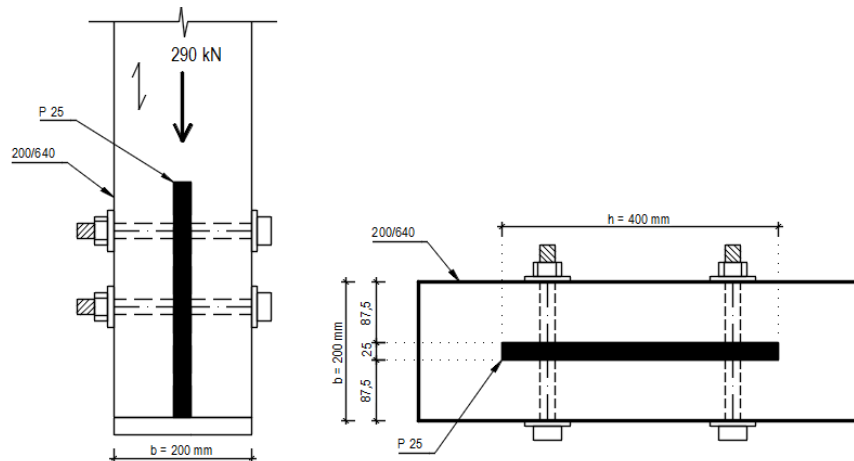
$$F_{v,Rd,spoj} = F_{v,Rd} \cdot n_{PR} \cdot n_{SR} \cdot n_{ef} = 18,98 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1,47 = 223,2 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd,spoj} \geq R_{\max}$$

$$223,2 \text{ kN} \geq 53 \text{ kN}$$

Spojovací prostředky vyhovují na účinky příčné síly.

5.1.7 Posouzení otláčení prvku ve směru rovnoběžném s vlákny



Maximální osová síla na nosníku v místě podpory

$$N_{max} = 290 \text{ kN}$$

Šířka nosníku

$$b = 200 \text{ mm}$$

Tloušťka plechu

$$t_{plech} = 25 \text{ mm}$$

Délka plechu

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$f_{c,0,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{24}{1,25} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,g,d} = \frac{N_{max}}{h \cdot (b - t_{plech})} = \frac{290 \cdot 10^3}{400 \cdot (200 - 25)} = 4,14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,0,g,d} \leq f_{c,0,g,d}$$

$$4,14 \text{ MPa} \leq 17,28 \text{ MPa}$$

Nosník vyhovuje na otláčení ve směru rovnoběžném s vlákny.

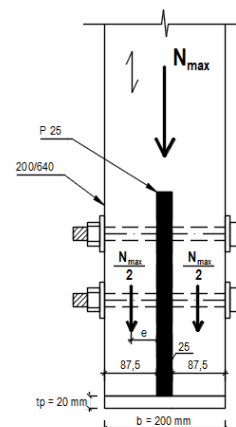
5.1.8 Posouzení plechu na ohyb

Maximální osová síla na nosníku $N_{max} = 290 \text{ kN}$

Šířka nosníku $b = 200 \text{ mm}$

Rameno působící osově síly $e = \frac{87,5}{2} = 43,75 \text{ mm}$

$$\sigma_{y,d} = \frac{\frac{N_{max}}{2} \cdot e}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot t_p^2} = \frac{\frac{290 \cdot 10^3}{2} \cdot 43,75}{\frac{1}{6} \cdot 200 \cdot 20^2} = 475,8 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{y,d} \leq f_{y,d}$$

$$475,8 \text{ MPa} \geq 355 \text{ MPa}$$

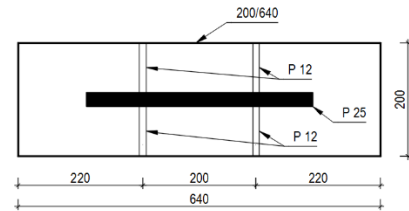
Plech tloušťky 20 mm nevyhovuje, z tohoto důvodu je potřeba navrhnout výztuhy.

Návrh výztuh

Budou navrženy 4 výztuhy z plechu S355 tloušťky 12 mm.

$$e = \frac{87,5}{2} = 43,75 \text{ mm}$$

$$\sigma_{y,d} = \frac{\frac{N_{max}}{4} \cdot e}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot t_p^2} = \frac{\frac{290 \cdot 10^3}{4} \cdot 43,75}{\frac{1}{6} \cdot 12 \cdot 70^2} = 323,7 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{y,d} \leq f_{y,d}$$

$$323,7 \text{ MPa} \leq 355 \text{ MPa}$$

Navržené výztuhy tloušťky 12 mm vyhovují, původně navržený plech tloušťky 20 mm lze s těmito výztuhami použít.

5.1.9 Návrh svarů

Výška svaru $a_w = 5 \text{ mm}$

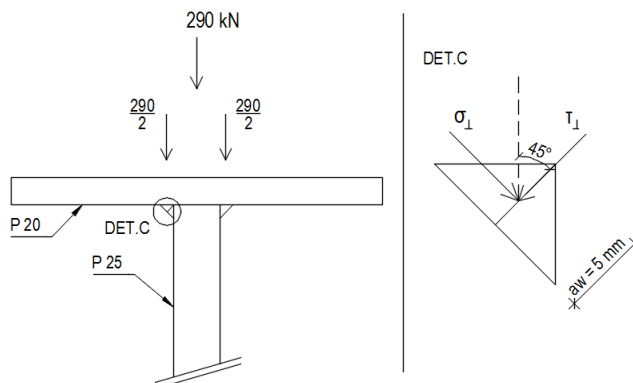
Délka svaru $l_w = 400 \text{ mm}$

$N_{max} = 290 \text{ kN}$

$\beta_w = 0,9$ (pro S355)

$\gamma_{M2} = 1,25$ (součinitel spolehlivosti materiálu pro svary)

$\tau_{||} = 0 \text{ MPa}$



Posouzení

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{\frac{N_{max}}{2} \cdot \cos 45^{\circ}}{l_w \cdot a_w} = \frac{145 \cdot 10^3 \cdot \cos 45^{\circ}}{400 \cdot 5} = 51,27 \text{ MPa}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 261,7 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} \leq f_{vw,d}$$

$$51,27 \text{ MPa} \leq 261,7 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$
$$\sqrt{51,27^2 + 3 \cdot (51,27^2 + 0)} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,25}$$

$$102,54 \text{ MPa} \leq 453,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$51,27 \text{ MPa} \leq \frac{0,9 \cdot 510}{1,25}$$

$$51,27 \text{ MPa} \leq 367,2 \text{ MPa}$$

Únosnost koutového svaru výšky 5 mm vyhovuje.

5.2 Připojení vaznice na obloukový nosník

Vaznice budou k obloukovému nosníku připojeny pomocí spojovacích úhelníků Bova 05-31, které byly navrženy na maximální posouvající sílu způsobenou sáním na vaznici v místě připojení vaznice k obloukovému nosníku.

5.2.1 Návrh spojovacích úhelníků

Maximální posouvající síla způsobená sáním na vaznici v místě připojení na oblouk

$$V_{Ed,max,sání} = F = 1,85 \text{ kN}$$

Únosnost spojovacího úhelníku výšky 150 mm, počet hřebíků 4+4

$$F_{HR} = 5,76 \text{ kN} > F = 1,85 \text{ kN}$$

5.2.3 Posouzení vaznice na otláčení v místě připojení na obloukový nosník

Pro výpočet návrhové hodnoty pevnosti v tlaku kolmo k vláknům a následné posouzení se uvažuje menší z hodnot $f_{c,90,d}$ (vaznice) a $f_{c,90,g,d}$ (obloukový nosník).

Maximální posouvající síla na vaznici v místě připojení na oblouk – tlak

$$V_{Ed,max,tlak} = 13,13 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_{Ed,max}}{u \cdot b} = \frac{13,13 \cdot 10^3}{100 \cdot 200} = 0,66 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{2,5}{1,3} = 1,73 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

$$0,66 \text{ MPa} \leq 1,73 \text{ MPa}$$

Vaznice vyhovuje na otláčení v místě připojení na obloukový nosník.

6 Závěr

Souhrn navržených hlavních nosných prvků

Tab. 8: Souhrn navržených hlavních nosných prvků

prvek	materiál	šířka průřezu [mm]	výška průřezu [mm]
obloukový nosník	lepené lamelové dřevo GL24h	200	640
vaznice	rostlé dřevo C24	200	240

prvek	materiál	průměr [mm]
ztužidlo	ocel S460	11

Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1991-1-1; Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Český normalizační institut: Praha, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-1; Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. Český normalizační institut: Praha, 2005.
- [3] ČSN EN 1991-1-1; Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Český normalizační institut: Praha, 2007.
- [4] ČSN EN 1995-1-1; Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut: Praha, 2006.
- [5] KOŽELOUH, Bohumil. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 – STEP 1 – Navrhování a konstrukční materiály. Zlín, 2000.
- [6] KOŽELOUH, Bohumil. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 – STEP 2 – Navrhování detailů a nosných systémů. ČKAIT: Praha, 2004.
- [7] VRANÝ, T., WALD, F. Ocelové konstrukce – Tabulky. ČVUT. Praha, 2009.
- [8] ČSN EN 1993-1-8; Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků. Český normalizační institut: Praha, 2006.

Internetové zdroje

- [9] http://www.eagles.cz/wp-content/uploads/2016/07/hala_new.jpg
- [10] http://www.eagles.cz/wp-content/uploads/2016/07/Hala_img.jpg
- [11] http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_1_CZ_final.pdf
- [12] <http://www.tension.cz/>
- [13] <http://bova-nail.cz/>
- [14] www.snehovamapa.cz

Seznam příloh

Příloha 1 – Katalog konstrukčních táhel Macalloy

Příloha 2 – Katalog spojovacích prostředků Bova

Příloha 3 – Technická zpráva

Seznam obrázků

Obr. 1: Sportovní hala Eagles v Praze	7
Obr. 2: Trojkloubová oblouková konstrukce	8
Obr. 3: Třínápravové nákladní auto	9
Obr. 4: Speciální vozidla.....	10
Obr. 5: Statické schéma konstrukce	11
Obr. 6: Prostorový model konstrukce	11
Obr. 7: Doporučená hodnota tvarového součinitele zatížení sněhem pro válcové střechy [2]	13
Obr. 8: Rovnoměrné zatížení sněhem	13
Obr. 9: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu [2].....	13
Obr. 10: Zatížení navátým sněhem	14
Obr. 11: Mapa větrných oblastí ([3])	14
Obr. 12: Oblasti větru pro klenbové střechy ([3]).....	16
Obr. 13: Hodnoty součinitelů vnějšího tlaku c_{pe} pro klenbové střechy ([3]).....	16
Obr. 14: Oblasti větru pro svislé stěny ([3])	17
Obr. 15: Výpočetní tvar konstrukce pro stanovení součinitelů vnějšího tlaku od podélného větru na střešní plášť	18
Obr. 16: Oblasti větru pro sedlové střechy ([3])	18
Obr. 17: ZS2 – Ostatní stálé zatížení	20
Obr. 18: ZS3 – Užitné zatížení.....	21
Obr. 19: ZS4 – Sníh rovnoměrný.....	21
Obr. 20: ZS5 – Sníh navátý.....	22
Obr. 21: ZS6 – Vítr příčný zleva.....	22
Obr. 22: ZS7 – Vítr příčný zprava	23
Obr. 23: ZS8 – Vítr podélný – zatížení na štítové stěny	23
Obr. 24: ZS9 – Vítr podélný – zatížení na střešní plášť.....	24
Obr. 25: Geometrie nosníku ([4]).....	30
Obr. 26: Deformovaný tvar konstrukce oblouku	34
Obr. 27: Hodnoty α_{cr} pro kombinaci CO7 lineárním (vlevo) a nelineárním výpočtem (vpravo).....	35
Obr. 28: První vlastní tvar vybočení konstrukce.....	35

Obr. 29: Druhý vlastní tvar vybočení konstrukce	36
Obr. 30: Třetí vlastní tvar vybočení konstrukce	36
Obr. 31: Čtvrtý vlastní tvar vybočení konstrukce	36
Obr. 32: Posuzované vaznice	37
Obr. 33: Vnitřní síly od rozhodující kombinace (NC24)	42
Obr. 34: Geometrické požadavky na pruty ukončené čepovými spoji ([8])	44
Obr. 35: Navržená geometrie čepu [mm]	44
Obr. 36: Způsoby porušení pro spoje ocel-dřevo ([4])	46

Seznam tabulek

Tab. 1: Charakteristické hodnoty ostatního stálého zatížení.....	12
Tab. 2: Doporučené hodnoty součinitelů vnějšího tlaku pro svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem ([3])	17
Tab. 3: Součinitelé vnějšího tlaku pro sedlové střechy ([3])	19
Tab. 4: Globální extrém na obloukových nosnících	28
Tab. 5: Globální extrém na vaznicích	29
Tab. 6: Deformace na konstrukci	33
Tab. 7: Vzpěrné délky L_{ef}	37
Tab. 8: Souhrn navržených hlavních nosných prvků	52

Seznam výkresů

Výkres 1 – Půdorys

Výkres 2 – Příčný řez A-A‘

Výkres 3 – Pohled a podélný řez B-B‘

Výkres 4 – Detail čepového spoje

Výkres 5 – Detail připojení ocelového táhla

Výkres 6 – Detail připojení vaznice k obloukovému nosníku