ZASTŘEŠENÍ SPORTOVNÍ HALY

DIPLOMOVÝ SEMINÁŘ

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Vedoucí práce: Ing. Michal Netušil, Ph.D.

Praha 2016 **Josef Bajtek**

Obsah

1. Úvod 2
2. Varianta A – Lanová střecha 2
2.1 Technický popis konstrukce 2
2.2 Výpočetní model 3
2.3 Návrh a posouzení 3
2.3.1 Analýza zatížení 3
2.3.2 Horní lano 4
2.3.3 Dolní lano 4
2.3.4 Krajní stojka 5
2.3.5 Propojení horního a dolního lana 6
2.4 Vyhodnocení Varianty A 7
3. Varianta B – Prostorové příhradové nosníky 8
3.1 Technický popis konstrukce 8
3.2 Výpočetní model 9
3.3 Návrh a posouzení 9
3.3.1 Analýza zatížení 9
3.3.2 Horní pás příhradového nosníku 10
3.3.3 Dolní pás příhradového nosníku 11
3.3.4 Krajní stojka 12
3.3.5 Lana 13
3.4 Vyhodnocení Varianty B 13
4. Varianta C – Kopule 14
4.1 Technický popis konstrukce 14
4.2 Výpočetní model 15
4.3 Návrh a posouzení 15
4.3.1 Analýza zatížení 16
4.3.2 Žebro 16
4.3.3 Prstenec 18
4.3.4 Lana 19
4.4 Vyhodnocení Varianty C 19
5. Závěr 20
6. Použitá literatura 20

1. Úvod

Úkolem této semestrální práce je zjednodušený návrh variant zastřešení sportovní haly. Inspirací pro výběr konstrukčních variant byli již stojící haly velkých rozpětí. Na základě toho byly zvoleny tři varianty, které byly podrobněji studovány. První variantou (Varianta A) je netuhá konstrukce lanové střechy. Druhá varianta (Varianta B) je střešní plášť podporován prostorovými příhradovými nosníky, které jsou zavěšeny na lanech. Variantou třetí (Varianta C) je prostorová konstrukce příhradové kopule. Výsledkem této práce je výběr nejvhodnější varianty.

2. Varianta A – Lanová střecha

2.1 Technický popis konstrukce

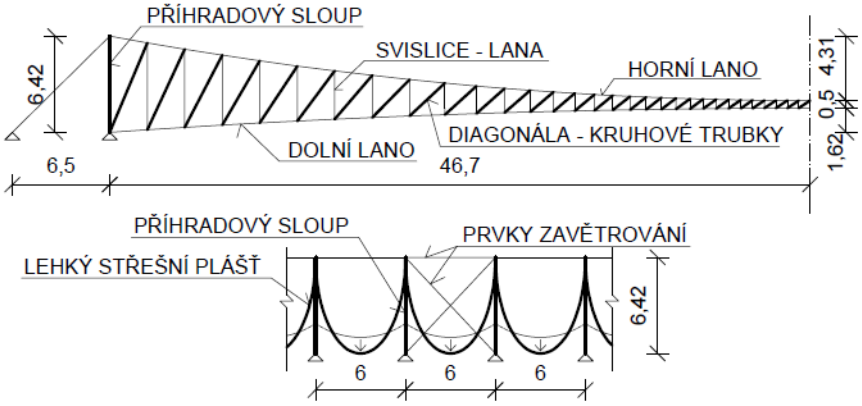


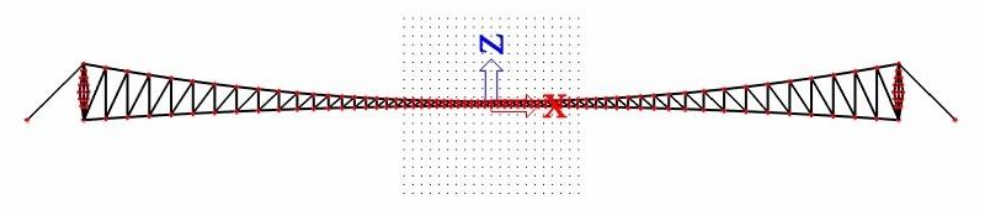
Schéma konstrukce – příčný řez (nahoře), podélný řez (dole)

Konstrukce zastřešení se skládá z nosné konstrukce (příčné lanové vazby) a lehkého střešního pláště. Jednotlivé příčné vazby tvoří hřebeny střechy. Mezi těmito hřebeny je střešní plášť prohnut dolů. Tento průhyb se směrem ke kraji zvětšuje a tím umožňuje odvodnění střechy. Příčné vazby jsou od sebe vzdáleny 6m a překonávají rozpětí 93,4m.

Hlavním prvkem nosné konstrukce jsou dvě předpjatá lana DYWIDAG, které v nezatíženém stavu mají parabolický tvar nad rozpětím. Tato lana jsou mezi sebou propojena svislými a šikmými prvky. Svislé prvky jsou lana DYWIDAG a šikmé prvky jsou kruhové trubky. Maximální vzdálenost svislic je 2,5m. Tato vzdálenost se směrem ke středu rozpětí postupně zmenšuje (poměr výšky svislice a vzdálenosti je přibližně 1:1). Tato úprava je tu použita z důvodu délky tlačených diagonál uprostřed rozpětí, kde při rovnoměrném rozdělení měli tyto diagonály velké vzpěrné délky. Horní lano je převedeno přes dvě krajní stojky a je kotveno do nosné konstrukce budovy. Dolní lano je kotveno v patě krajních stojek. Krajní stojka je vzhledem k velkému namáhání tlakem a velké výšce volena jako příhradový sloup.

2.2 Výpočetní model

Výpočetní model byl sestaven v programu SCIA Engineer. Horní lano je modelováno jako tři prvky. Hlavním prvkem je lano překonávající rozpětí, které je kloubově připojeno ke krajním stojkám. Dalšíma dvěma prvky horního lana je ukotvení vrcholu krajní stojky pomocí lana do nosné konstrukce (kloubová podpora). Dolní lano je tvořeno jedním celistvým prvkem kloubově připojeným k patě krajního sloupu. Svislé a šikmé prvky propojení jsou modelovány jako jednotlivé pruty kloubově připojeny k nosným lanům. Dále bylo těmto prvkům předdefinováno omezení dovolující namáhání pouze osovými silami. Krajní stojka je příhradový sloup, který je složen z tuze propojených prutů. Lana jsou modelována jako plné kruhové průřezy, které svou únosností odpovídají navrhovaným lanům.



2.3 Návrh a posouzení

Konstrukce byla posouzena v MSÚ (mezní stavy únosnosti) a dále byl kontrolován maximální průhyb uprostřed rozpětí. Finální průhyb dosáhl hodnoty 244,4mm, což pro konstrukci s rozpětím 93,4m je nepatrná hodnota. Posouzeny byly hlavní prvky konstrukce – horní lano, dolní lano, krajní stojka a propojení horního a dolního lana. Posouzení proběhlo ručním výpočtem. Konstrukční ocel trubkových profilů navrhuji S355. Lana DYWIDAG jsou navrženy na katalogové hodnoty dovoleného namáhání.

2.3.1 Analýza zatížení

Vlastní tíha nosné konstrukce je vypočtena programem Scia Engineer. Předpětí lan je stanoveno v závislosti na odezvě konstrukce. Zatížení je definováno jako spojité rovnoměrné zatížení na prutu horního lana. Volba takovéhoto rozložení zatížení není sice ideální, ale je na straně bezpečného návrhu. Není ideální z hlediska nestejných roznášecích šířek a z toho vyplývá, že uprostřed rozpětí je zatížení vyšší. Zatížení sněhem je redukováno na rovnoměrné spojité zatížení přes zatěžovací šířku a to není ideální s přihlédnutí ke geometrii konstrukce. Horní lano tvoří sedlo střechy a mezi jednotlivými sedly se střešní plášť prohýbá dolů. Průběh tohoto průhybu se zvětšuje směrem ke krajům (odvodnění). Z toho důvodu je zatížení konstrukce sněhem vyšší než by mělo být. Zatížení větrem není uvažováno, protože komplikovanost geometrie střechy nedoluje jednoduchý odhad.

Ostatní stálé zatížení

		g_k(kN/m)	γ_g	g_d(kN/m)
Lehký střešní plášť	5kg/m^2	0,3	1,35	0,405

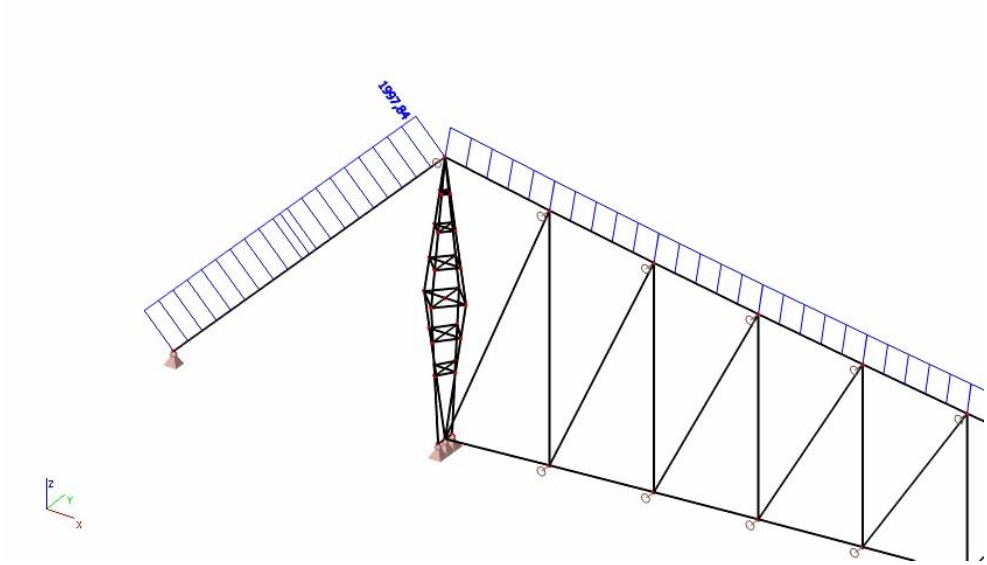
Nahodilé zatížení

		q_k(kN/m)	γ_q	q_d(kN/m)
Sníh	1kN/m^2	6	1,5	9

Kombinační součinitel pro sníh je ψ_0=0,5. Proto horní lano bylo zatíženo rovnoměrným spojitým zatížením o intenzitě 4,905kN/m.

2.3.2 Horní lano

Navrhuji lano *DYWIDAG DG-P85* (85 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=23,715kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=2015,775kN.

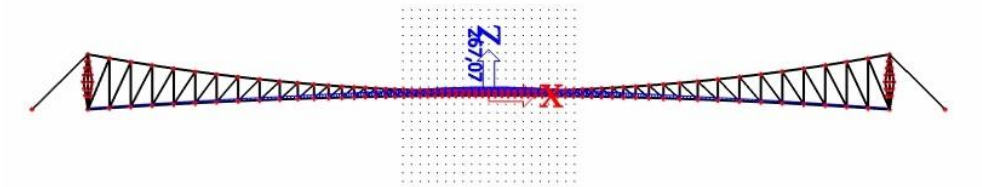


$F_{Ed} = 1997{,}84kN < 2015{,}775kN = R_d \rightarrow vyhovuje$

Navrhované lano *DYWIDAG DG-P85* vyhovuje posudku MSÚ.

2.3.3 Dolní lano

Navrhuji lano *DYWIDAG DG-P37* (37 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=10,323kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=381,951kN.

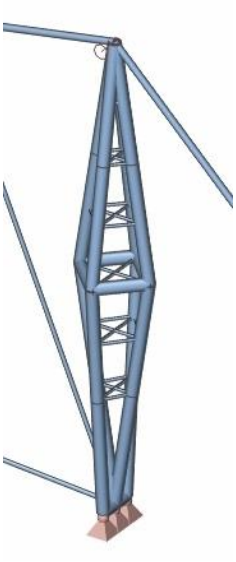


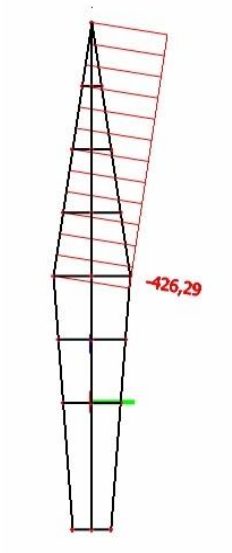
$F_{Ed} = 267{,}07kN < 381{,}95kN = R_d \rightarrow vyhovuje$

Navrhované lano *DYWIDAG DG-P37* vyhovuje posudku MSÚ.

2.3.4 Krajní stojka

Krajní stojku navrhuji jako příhradový sloup složený z trubek *TR159x6.3* (hlavní profily) a *TR33.7x3* (vazby zajišťující vzpěrnou stabilitu hlavních profilů). Posouzeny jsou pouze hlavní profily.





Maximální délka prutu je l=0,81m (mezi vazbami) a je nedokonale vetknutý z obou stran do zbytku konstrukce (klouby).

- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{159}{6{,}3} = 25{,}24 < 33 = 50 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = \beta l = 1{,}0 \times 810 = 810m$$

$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{810}{54 \times 76{,}059} = 0{,}197$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(0{,}197 - 0{,}2) + 0{,}197^2] = 0{,}52$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0{,}52 + \sqrt{0{,}52^2 + 0{,}197^2}} = 0{,}92$$

- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}92 \times 3022 \times 355}{1{,}0} = 986{,}98kN > 426{,}29kN = N_{Ed} \rightarrow vyhovuje$$

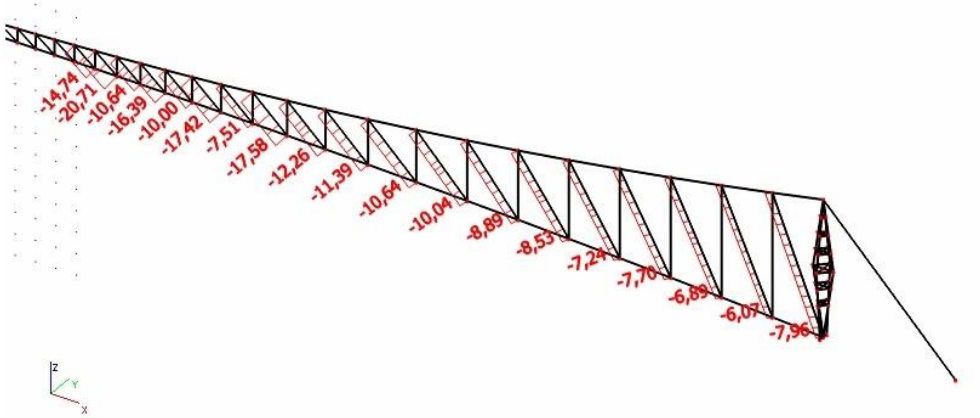
Navrhované trubky *TR159x6.3* vyhovují posudku MSÚ.

2.3.5 Propojení horního a dolního lana

Na propojení horního a dolního lana spolupracují dva typy prvků – šikmé a svislé. Šikmé prvky jsou namáhané tlakem, proto zde navrhuji trubky *TR60.3x3*. Svislé prvky jsou namáhané tahem, proto zde navrhuji lana *DYWIDAG DG-P7* (7 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=1,953kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=13,671kN.

- **Posouzení šikmých prvků – TR60.3x3**

Šikmé prvky jsou ke zbytku konstrukce připojeny kloubově. Posudek bude proveden pro dva kritické pruty – prut s maximální délkou l=6,476m a prut namáhány maximálním tlakem (l=1,372m).



Posouzení prutu s maximální délkou

- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{60{,}3}{3} = 20{,}1 < 33 = 50 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = \beta l = 1{,}0 \times 6476 = 6476m$$

$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{6476}{20{,}3 \times 76{,}059} = 4{,}194$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(4{,}194 - 0{,}2) + 4{,}194^2] = 10{,}273$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{10{,}273 + \sqrt{10{,}273^2 + 4{,}194^2}} = 0{,}047$$

- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}047 \times 523 \times 355}{1{,}0} = 8{,}72kN > 7{,}96kN = N_{Ed} \rightarrow vyhovuje$$

Posouzení prutu namáhaného maximálním tlakem

- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{60{,}3}{3} = 20{,}1 < 33 = 50 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = \beta l = 1{,}0 \times 1372 = 1372m$$

$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{1372}{20{,}3 \times 76{,}059} = 0{,}888$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(0{,}89 - 0{,}2) + 0{,}89^2] = 1{,}065$$

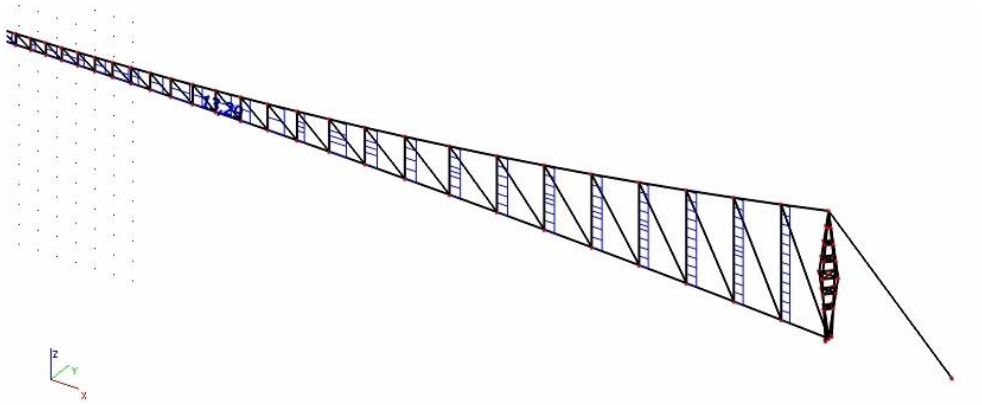
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1{,}065 + \sqrt{1{,}065^2 + 0{,}888^2}} = 0{,}408$$

- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}408 \times 523 \times 355}{1{,}0} = 75{,}75kN > 20{,}71kN = N_{Ed} \rightarrow vyhovuje$$

Navrhované trubky *TR60.3x3* vyhovují posudku MSÚ.

➢ **Posouzení svislých prvků – DYWIDAG DG-P7**



$$F_{Ed} = 13{,}29kN < 13{,}67kN = R_d \rightarrow vyhovuje$$

Navrhované lano *DYWIDAG GD-P7* vyhovuje posudku MSÚ.

2.4 Vyhodnocení Varianty A

Jako Varianta A byla navržena a posouzena lanová střecha. Hlavním konstrukčním prvkem jsou dvě lana (horní a dolní), která jsou mezi sebou propojena. Pro horní lano je použito lano *DYWIDAG DG-P85*. Pro dolní lano je použito lano *DYWIDAG DG-P37*. Propojení hlavních lan je řešeno systémem šikmých trubek *TR60.3x3* a svislých lan *DYWIDAG DG-P7*. Podporu horního lana tvoří dvě krajní stojky, které jsou navrženy jako příhradový sloup. Tento sloup je složen z trubek *TR159x6.3* (hlavní profily) a *TR33.7x3* (vazby snižující vzpěrnou délku hlavních profilů).

Varianta A sice vyhovuje požadavkům MSÚ při rovnoměrném zatížení, ale je citlivá na nerovnoměrné zatěžování. V případě nerovnoměrného zatížení (fluktuace větru nebo nerovnoměrná pokrývka sněhem) popřípadě selhání jednoho prvku propojení lan dochází k velkým deformacím konstrukce. Proto mi v tomto stupni posuzování variant nepřijde příliš vhodná pro konstrukci zastřešení velkého rozpětí.

3. Varianta B – Prostorové příhradové nosníky

3.1 Technický popis konstrukce

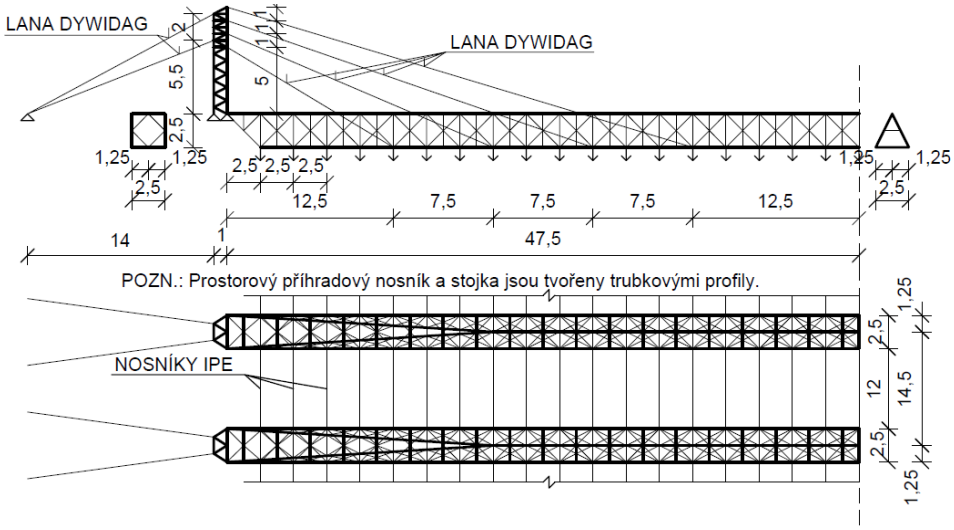


Schéma konstrukce – příčný řez (nahoře), půdorys (dole)

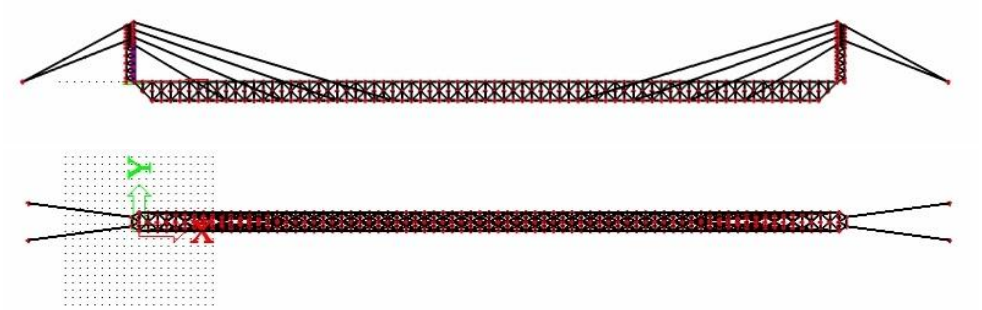
Konstrukce zastřešení se skládá z nosné konstrukce (příčné prostorové příhradové nosníky) a lehkého střešního pláště neseného nosníky IPE. Nosníky IPE jsou připevněny pod příhradové nosníky a to do uzlů těchto nosníků. Příhradové nosníky jsou od sebe vzdáleny 12m a překonávají rozpětí 95m. Tyto nosníky jsou dále zavěšeny lany.

Hlavním prvkem nosné konstrukce je prostorový příhradový nosník, který je tvořen dvěma hlavníma pásy. Horní pás je uprostřed rozpětí jednoduchá kruhová trubka, která se u podpor větví na dvě (důsledek namáhání velkým tlakem). Dolní pás jsou dvě kruhové trubky propojené vodorovným ztužením. Tyto pásy jsou mezi sebou spojeny svislými příčnými vazbami a diagonálami. Příčné vazby jsou od sebe vzdáleny 2,5m a spojují jednotlivé trubky pásů. Stabilita horního pásu je zajištěna diagonálami.

Příhradový nosník je zavěšen na 16 lanech DYWIDAG. Upevnění lan je umístěno do styku příčné vazby s dolním pásem nosníku. Lana jsou kotvena do dvou krajních stojek. Poloha vrcholu krajních stojek je zajištěna dalšími 8 lany. Tyto lana zakotveny do nosné konstrukce budovy. Krajní stojky jsou příhradové sloupy. Jeden příhradový sloup je složen z 5 svislých kruhových trubek, které jsou spojeny diagonálami.

3.2 Výpočetní model

Výpočetní model byl sestaven v programu SCIA Engineer. Hlavním prvkem příhradového nosníku jsou dva pásy (horní a dolní). Tyto pásy jsou celistvé pruty překonávající celé rozpětí, a jejichž prostorová stabilita je zajištěna systémem kloubově připojených prutů (diagonály, příčné vazby a ztužení). Závěsná lana jsou vloženy jako plné kruhové průřezy odpovídající únosností lanům DYWIDAG. Tyto lana jsou modelována jako pruty s omezením jen na osové síly a jsou kloubově připojena k trubkám dolního pasu a trubkám krajních stojek. Lana zajišťující polohu vrcholu krajní stojky jsou modelována obdobně jako závěsná lana. Krajní stojka je složena z kruhových trubkových prutů do příhradového sloupu.



3.3 Návrh a posouzení

Konstrukce byla posouzena v MSÚ (mezní stavy únosnosti) a dále byl kontrolován maximální průhyb uprostřed rozpětí. Finální průhyb dosáhl hodnoty 180,3mm, což pro konstrukci s rozpětím 95m je nepatrná hodnota. Posouzeny byly hlavní prvky konstrukce – horní pás příhradového nosníku, dolní pás příhradového nosníku, krajní stojka a lana. Posouzení proběhlo ručním výpočtem. Konstrukční ocel trubkových profilů navrhuji S355. Lana DYWIDAG jsou navrženy na katalogové hodnoty dovoleného namáhání. Pro prvky ztužení, příčných vazeb a diagonál byly zvoleny kruhové trubky *TR88.9x6.3*.

3.3.1 Analýza zatížení

Vlastní tíha nosné konstrukce je vypočtena programem Scia Engineer. Předpětí lan je stanoveno v závislosti na odezvě konstrukce. Zatížení konstrukce je definováno jako osamělé síly do uzlů příhradového nosníku v úrovni dolního pásu. Intenzita osamělých sil byla stanovena v závislosti na roznášecích šířích.

Ostatní stálé zatížení

		G_k(kN)	γ_g	G_d(kN)
Lehký střešní plášť	5kg/m²	0,75	1,35	1,01

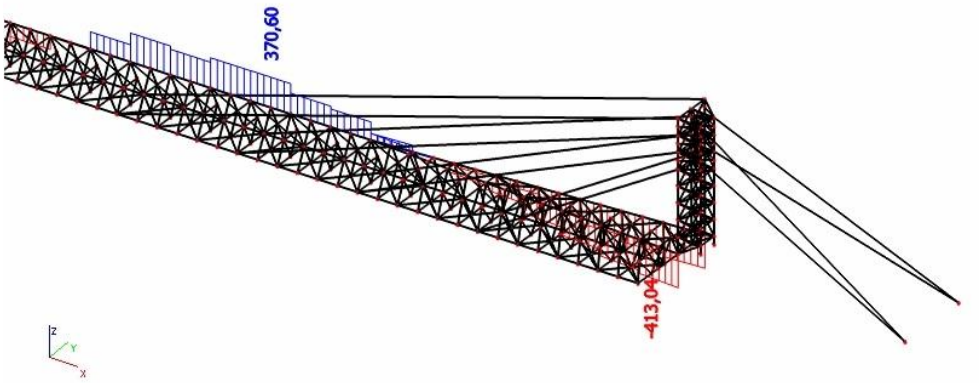
Nahodilé zatížení

		Q_k(kN)	γ_q	Q_d(kN)
Sníh	1kN/m²	15	1,5	22,5

Jeden uzel je zatížen osamělou silou o intenzitě 23,51kN.

3.3.2 Horní pás příhradového nosníku

Pro horní pás navrhuji kruhový profil *TR168.3x6*. Horní pás je posouzen ve dvou kritických oblastech.



- **Posouzení prutu s maximální tahovou silou**

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3059 \times 355}{1,0} = 1085,94kN > 370,60kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

- **Posouzení prutu s maximální tlakovou silou**

Vzpěrná délka je l=3,723m a je převzata ze stabilitního výpočtu.

- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{168,3}{6} = 28,05 < 33 = 50 \times 0,66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 3723mm$$
$$\lambda_1 = 93,9\varepsilon = 93,9 \times 0,81 = 76,059$$
$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{3723}{57 \times 76,059} = 0,859$$
$$\Phi = 0,5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0,2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0,5[1 + 0,49(0,859 - 0,2) + 0,859^2]$$
$$= 1,030$$
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,030 + \sqrt{1,030^2 + 0,859^2}} = 0,42$$

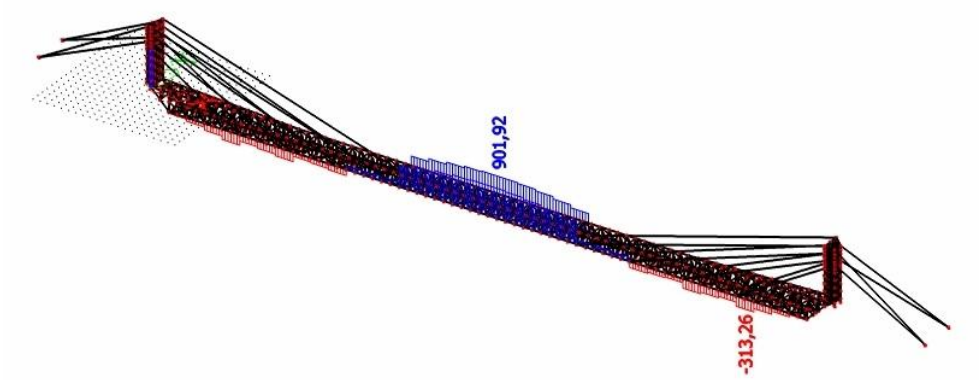
- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}42 \times 3059 \times 355}{1{,}0} = 457{,}96kN > 413{,}04kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR168.3x6* vyhovuje posudku MSÚ.

3.3.3 Dolní pás příhradového nosníku

Pro dolní pás navrhuji kruhový profil *TR139.7x8*. Dolní pás je posouzen ve dvou kritických oblastech.



- **Posouzení prutu s maximální tahovou silou**

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3310 \times 355}{1{,}0} = 1175{,}05kN > 901{,}92kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

- **Posouzení prutu s maximální tlakovou silou**

Vzpěrná délka je l=3,950m a je převzata ze stabilitního výpočtu.

- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{139{,}7}{8} = 17{,}46 < 33 = 50 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 3950mm$$
$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$
$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{3950}{47 \times 76{,}059} = 1{,}105$$
$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(1{,}105 - 0{,}2) + 1{,}105^2]$$
$$= 1{,}332$$
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1{,}332 + \sqrt{1{,}332^2 + 1{,}105^2}} = 0{,}33$$

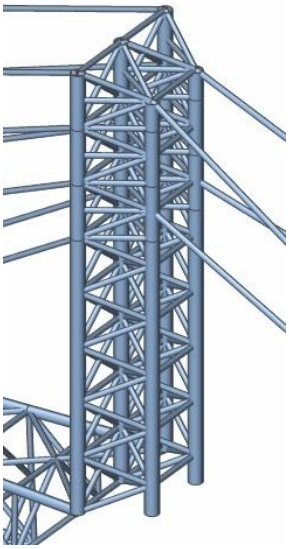
- **Únosnost prutu v tlaku**

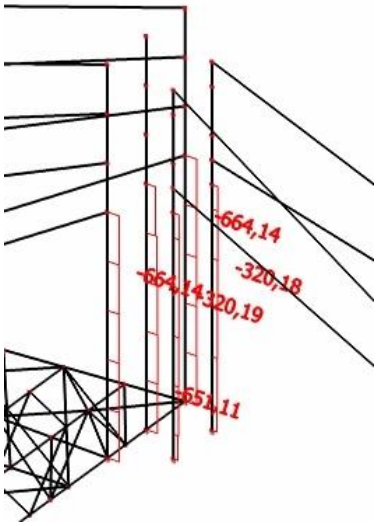
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}33 \times 3310 \times 355}{1{,}0} = 383{,}63kN > 313{,}26kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR139.7x8* vyhovuje posudku MSÚ.

3.3.4 Krajní stojka

Krajní stojka je příhradový sloup, který je tvořen pěti svislými trubkami *TR244,5x10* a ztužujícími pruty *TR88.9x6.3*. Posouzeny jsou pouze svislé profily. Maximální vzpěrná délka l=9,561m pro namáhání tlakem 651,11kN.





- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{244{,}5}{10} = 24{,}45 < 33 = 50 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 9561mm$$

$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{9561}{83 \times 76{,}059} = 1{,}515$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(1{,}515 - 0{,}2) + 1{,}515^2] = 1{,}969$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1{,}969 + \sqrt{1{,}969^2 + 1{,}515^2}} = 0{,}31$$

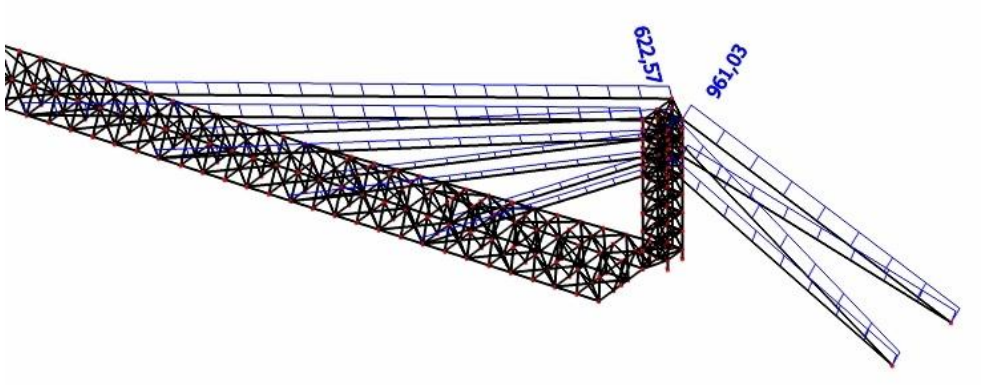
- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}31 \times 7367 \times 355}{1{,}0} = 810{,}74kN > 651{,}11kN = N_{Ed} \rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR244,5x10* vyhovuje posudku MSÚ.

3.3.5 Lana

Lana navrhuji dvojího typu – závěsná lana a lana zajištující polohu vrcholu krajní stojky. Jako závěsná lana volím lana DYWIDAG DG-P55 (55 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=15,345kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=843,975kN. Lana krajní stojky volím lana DYWIDAG DG-P61 (61 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=17,019kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=1038,159kN.



- **Posouzení závěsných lan**

$F_{Ed} = 622{,}57kN < 843{,}97kN = R_d \rightarrow vyhovuje$

Navrhované lano *DYWIDAG DG-P55* vyhovuje posudku MSÚ.

- **Posouzení lan krajní stojky**

$F_{Ed} = 961{,}03kN < 1038{,}15kN = R_d \rightarrow vyhovuje$

Navrhované lano *DYWIDAG DG-P61* vyhovuje posudku MSÚ.

3.4 Vyhodnocení Varianty B

Jako Varianta B byla navržena a posouzena plochá střecha. Hlavním konstrukčním prvkem jsou prostorové příhradové nosníky, lana a krajní stojky. Prostorový příhradový nosník je sestaven z trubkových profilů kruhového průřezu. Horní pás nosníku je tvořen uprostřed jednoduchou trubkou *TR168.3x6*, která se v blízkosti podpor dělí na dvě trubky stejného průřezu. Dolní pás nosníku jsou dvě trubky *TR139.7x8*, které jsou vodorovně vedle sebe. Oba tyto pásy jsou příhradově propojeny trubkami *TR88.9x6.3*. Celý jeden nosníky je nesen 16 lany *DYWIDAG DG-P55*, které jsou kotveny do dvou krajních stojek. Stabilita a pozice těchto krajních stojek je zjištěna 8 lany *DYWIDAG DG-P61*. Samotná krajní stojka je sestavena z kruhových trubek a tvoří tak příhradový sloup. Tento sloup sestává z 5 svislých trubek *TR244.5x10* a ze ztužujících trubek *TR88.9x6.3*.

Varianta B vyhovuje požadavkům MSÚ. Jedná se o funkční a jednoduchou variantu, která by byla použitelná z hlediska technického. Bohužel z estetického hlediska se nejedná o zdařilou variantu. Každá příčná vazba nosné konstrukce střechy představuje ve své podstatě

visutý most a tyto mosty se opakují několikrát za sebou. Jelikož se jedná o budovu s reprezentativním charakterem, tak mi tato nejeví příliš vhodná.

4. Varianta C – Kopule

4.1 Technický popis konstrukce

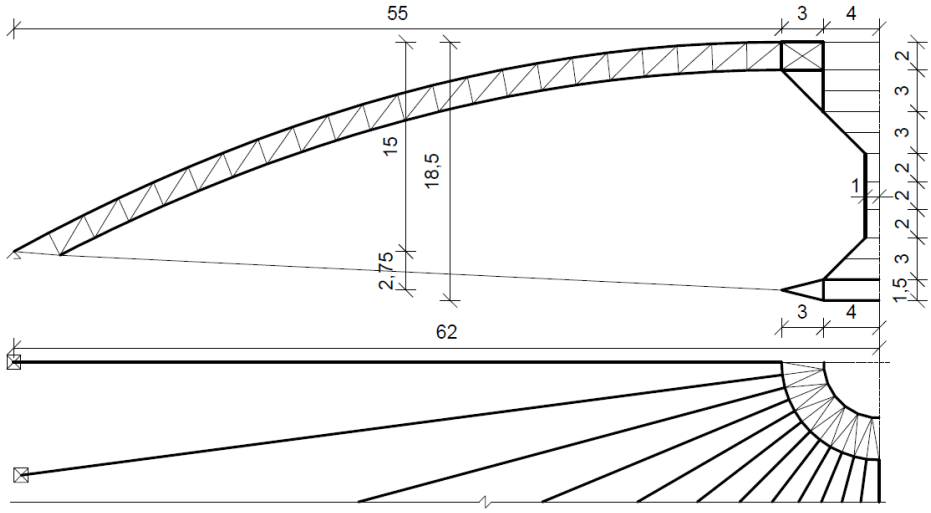


Schéma konstrukce – příčný řez (nahoře), částečný pohled shora (dole)

Konstrukce zastřešení se skládá ze třech hlavních částí – žebra, prstenec a lana. Příhradová žebra a horní část prstence tvoří kopuly, jejíž vrchol je nadlehčován spodní částí prstence a lany.
Příhradové žebra jsou složeny ze dvou pásů (horní a dolní) a diagonál. Horní pás je uložen na konstrukci budovy a dolní pás je skrze diagonály zavěšen pod ním. Do spodního konce dolního pásu je zakotveno vždy jedno lano. Prostorová stabilita žeber je zajištěna systémem ztužujících prvků, které spojují vždy dvě sousední žebra.

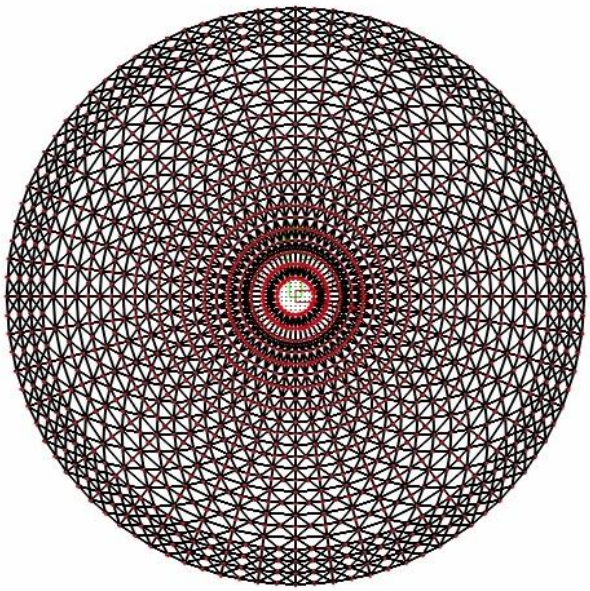
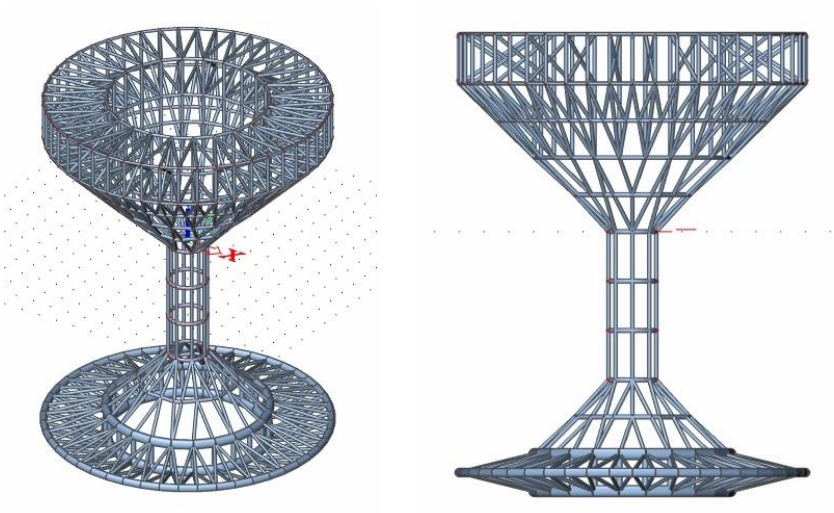


Schéma konstrukce – pohled shora

Prstenec je nejdůležitější částí konstrukce, jelikož ji spojuje do jednoho statického celku. Ke spodní části prstence jsou připojena jednotlivá lana. Tyto lana jsou předepnuta a tlačí prstenec směrem nahoru. Druhotným efektem předepnutí lan je snížení tlaku přenášeného žebry. Horní část prstence je vrcholem kopule, se kterým jsou spojena jednotlivá žebra.



4.2 Výpočetní model

Výpočetní model byl sestaven v programu SCIA Engineer. Žebra a prstenec je složen z kloubově propojených prutů. Jedno žebro se skládá ze dvou celistvých prutů překonávajících rozpětí od kraje k vrcholu kopule. Jejich prostorová stabilita je zajištěna systémem kloubově připojených prutů (diagonály, příčné vazby a ztužení). Lana jsou vloženy jako plné kruhové průřezy odpovídající únosností lanům DYWIDAG. Tyto lana jsou modelována jako pruty s omezením jen na osové síly a jsou kloubově připojena k trubkám dolního pasu a trubkám spodní části prstence.

4.3 Návrh a posouzení

Konstrukce byla posouzena v MSÚ (mezní stavy únosnosti) a dále byl kontrolován maximální svislý posun dolní části prstence. Posouzeny byly hlavní prvky konstrukce – žebra (horní a dolní pás), prstenec (horní a dolní část) a lana. Posouzení proběhlo ručním výpočtem. Konstrukční ocel trubkových profilů navrhuji S355. Lana DYWIDAG jsou navrženy na katalogové hodnoty dovoleného namáhání.

4.3.1 Analýza zatížení

Vlastní tíha nosné konstrukce je vypočtena programem Scia Engineer. Předpětí lan je stanoveno v závislosti na odezvě konstrukce. Zatížení konstrukce je definováno dvěma způsoby – zatížení na nosníky a zatížení na prstenec. Zatížení na nosníky je spojité lineárně proměnné zatížení (zatěžovací šířka se směrem k vrcholu kopule mění). Zatížení na prstenec je plošné zatížení o jednotné intenzitě.

Ostatní stálé zatížení

		g_k(kN/m²)	γ_g	g_d(kN/m²)
Lehký střešní plášť	5kg/m²	0,05	1,35	0,068

Nahodilé zatížení

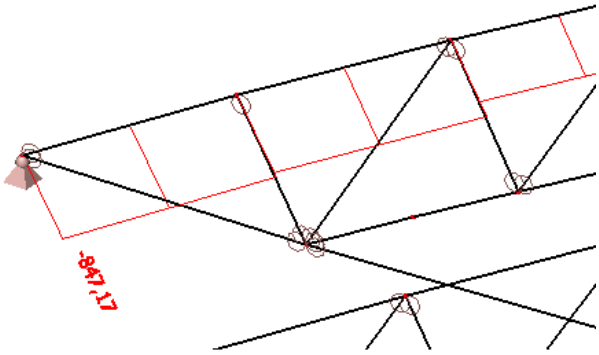
		q_k(kN/m²)	γ_q	q_d(kN/m²)
Sníh	1kN/m²	1,0	1,5	1,5

Zatížení na nosník má intenzitu 1,44kN/m (vrchol kopule) a 12,56kN/m (okraj kopule). Zatížení prstence má jednotnou intenzitu 1,57kN/m².

4.3.2 Žebro

➢ **Horní pás žebra**

Pro horní pás navrhuji kruhový profil *TR355.6x10*. Maximální vzpěrná délka l=8,432m pro namáhání tlakem 847,17kN.



- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{355{,}6}{10} = 35{,}56 < 46{,}2 = 70 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 2$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 8432mm$$

$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{8432}{122 \times 76{,}059} = 0{,}909$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(0{,}909 - 0{,}2) + 0{,}909^2]$$
$$= 1{,}086$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1{,}086 + \sqrt{1{,}086^2 + 0{,}909^2}} = 0{,}40$$

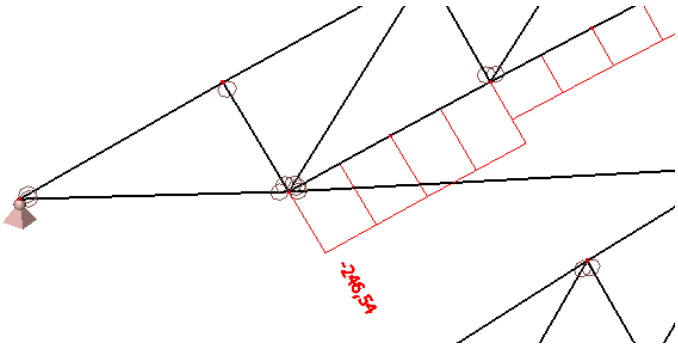
- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}40 \times 10857 \times 355}{1{,}0} = 1539{,}95kN > 847{,}17kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR355.6x10* vyhovuje posudku MSÚ.

➢ **Dolní pás žebra**

Pro dolní pás navrhuji kruhový profil *TR355.6x10*. Maximální vzpěrná délka l=16,186m pro namáhání tlakem 651,11kN.



- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{355{,}6}{10} = 35{,}56 < 46{,}2 = 70 \times 0{,}66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 2$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 16186mm$$
$$\lambda_1 = 93{,}9\varepsilon = 93{,}9 \times 0{,}81 = 76{,}059$$
$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{16186}{122 \times 76{,}059} = 1{,}744$$
$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0{,}5[1 + 0{,}49(1{,}744 - 0{,}2) + 1{,}744^2]$$
$$= 2{,}400$$
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2{,}400 + \sqrt{2{,}400^2 + 1{,}744^2}} = 0{,}19$$

- **Únosnost prutu v tlaku**

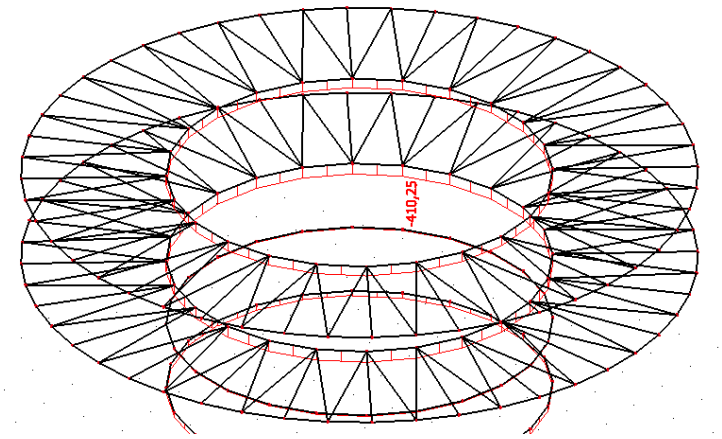
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}19 \times 10857 \times 355}{1{,}0} = 718{,}24kN > 246{,}54kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR355.6x10* vyhovuje posudku MSÚ.

4.3.3 Prstenec

➢ **Horní část prstence – extrémní tlak**

Pro tuto část navrhuji kruhový profil *TR139.7x10*. Maximální vzpěrná délka l=2,492m pro namáhání tlakem 410,25kN.



- **Kategorie průřezu**

$$\frac{d}{t} = \frac{139,7}{10} = 13,97 < 33 = 50 \times 0,66 = 50\varepsilon^2 \rightarrow Průřez\ třídy\ 1$$

- **Součinitel vzpěrnosti**

$$L_{cr} = 2492mm$$

$$\lambda_1 = 93,9\varepsilon = 93,9 \times 0,81 = 76,059$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i\lambda_1} = \frac{2492}{46 \times 76,059} = 0,712$$

$$\Phi = 0,5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0,2\right) + \bar{\lambda}^2\right] = 0,5[1 + 0,49(0,712 - 0,2) + 0,712^2] = 0,879$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,879 + \sqrt{0,879^2 + 0,712^2}} = 0,50$$

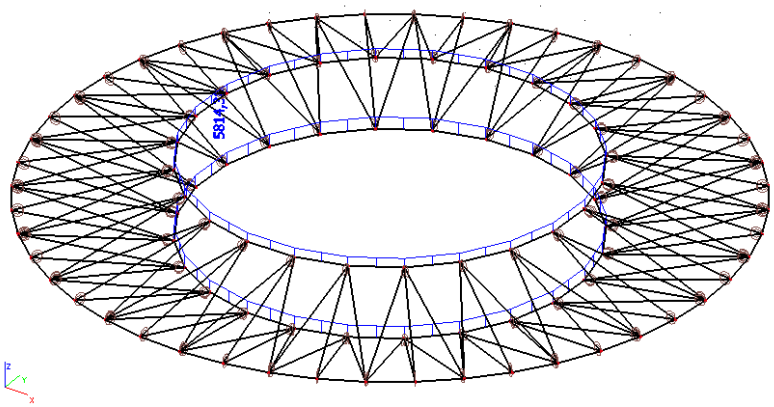
- **Únosnost prutu v tlaku**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,50 \times 4075 \times 355}{1,0} = 719,42kN > 410,25kN = N_{Ed} \rightarrow vyhovuje$$

Navrhovaný profil *TR139.7x10* vyhovuje posudku MSÚ.

- **Dolní část prstence – extremní tah**

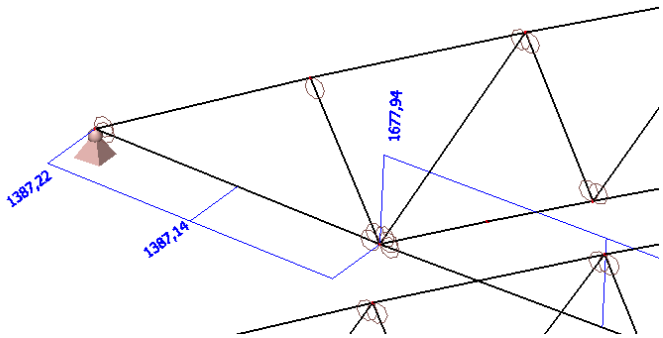
Pro tuto část navrhuji kruhový profil *TR457x12.5* namáhaný tahovou silou 5814,33kN.



$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{17455 \times 355}{1{,}0} = 6196{,}52kN > 5814{,}33kN = N_{Ed}$$
$$\rightarrow vyhovuje$$

4.3.4 Lana

Navrhuji lano *DYWIDAG DG-P85* (85 pramenů) s deklarovanou pevností jednoho pramene F_{Rd}=23,715kN (100% GUTS). Celková pevnost lana je R_d=2015,775kN.



$F_{Ed} = 1677{,}94kN < 2015{,}77kN = R_d \rightarrow vyhovuje$

Navrhované lano *DYWIDAG DG-P85* vyhovuje posudku MSÚ.

4.4 Vyhodnocení Varianty C

Jako Varianta C byla navržena a posouzena střecha tvaru kopule. Hlavním konstrukčním prvkem jsou příhradové žebra, prstenec a lana. Příhradové žebro je sestaveno z trubkových profilů kruhového průřezu. Horní i dolní pás žebra je tvořen trubkou *TR355.6x10*. Oba tyto pásy jsou příhradově propojeny trubkami. Prostorová stabilita žeber je zajištěna systémem ztužujících prvků, které spojují vždy dvě sousední žebra. Uhelným kamenem celé konstrukce je prstenec, který ve svém vrcholu spojuje jednotlivá žebra. V tomto místě vzniká extrémní tlak, který je mírněn předepnutými lany, která celý prstenec tlačí směrem vzhůru. Proto pro horní část prstence jsou použity trubky *TR139.7x10*.

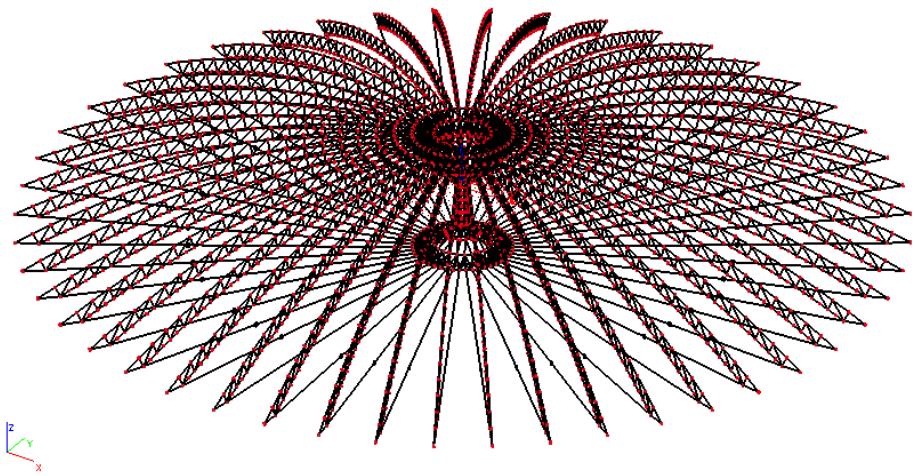
Důsledkem předepnutí lan je extrémně tažená spodní část prstence, kde jsou lana kotvena. Pro tuto část prstence jsou použity trubky *TR457x12.5*. Horní a dolní část prstence jsou spojeny trubkovými profily kruhového průřezu. Lana jsou *DYWIDAG DG-P85*.

Varianta C vyhovuje požadavkům MSÚ a diametrálně se liší od dvou předchozích variant. Zakrývá jednolitě celou zastřešovanou budovu a nerozděluje ji příčnými vazbami. Z estetického hlediska se jedná o nejlepší variantu. Tato varianta je oproti Variantě A tuhá a tvarově stálá. Jednou z nevýhod této je značná komplikovanost systému ztužení, který zajišťuje stabilitu tlačených žeber. Dále se hmotnostně jedná o nejtěžší variantu a tento fakt by se následně promítl na masivnosti nosné konstrukce budovy a základů.

5. Závěr

V rámci této práce byly shrnuty výsledky studie tří variant zastřešení sportovní haly. Varianta A byla lehká lanová střecha, která byla vyhodnocena za nejméně vhodnou. Vhodnější variantou byla Varianta B, což byly prostorové příhradové nosníky zavěšené na lanech. Bohužel tato varianta selhala z estetických důvodů.

Nedostatky předešlých dvou variant se ve Variantě C neobjevují, a proto ji volím za nejvhodnější variantu.



6. Použitá literatura

1. Skriptum Studnička-Holický-Marková: Ocelové konstrukce 2 – Zatížení, 2009
2. Skriptum Studnička: Ocelové konstrukce – Normy, 2011
3. Skriptum Vraný-Wald: Ocelové konstrukce – Tabulky, 2009