

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH  
KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

## STATICKÉ ŘEŠENÍ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE STATIC DESIGN OF ROOF STRUCTURE

### P4. STATICKÝ VÝPOČET

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ DUDA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš ZICH, Ph.D.

## Obsah

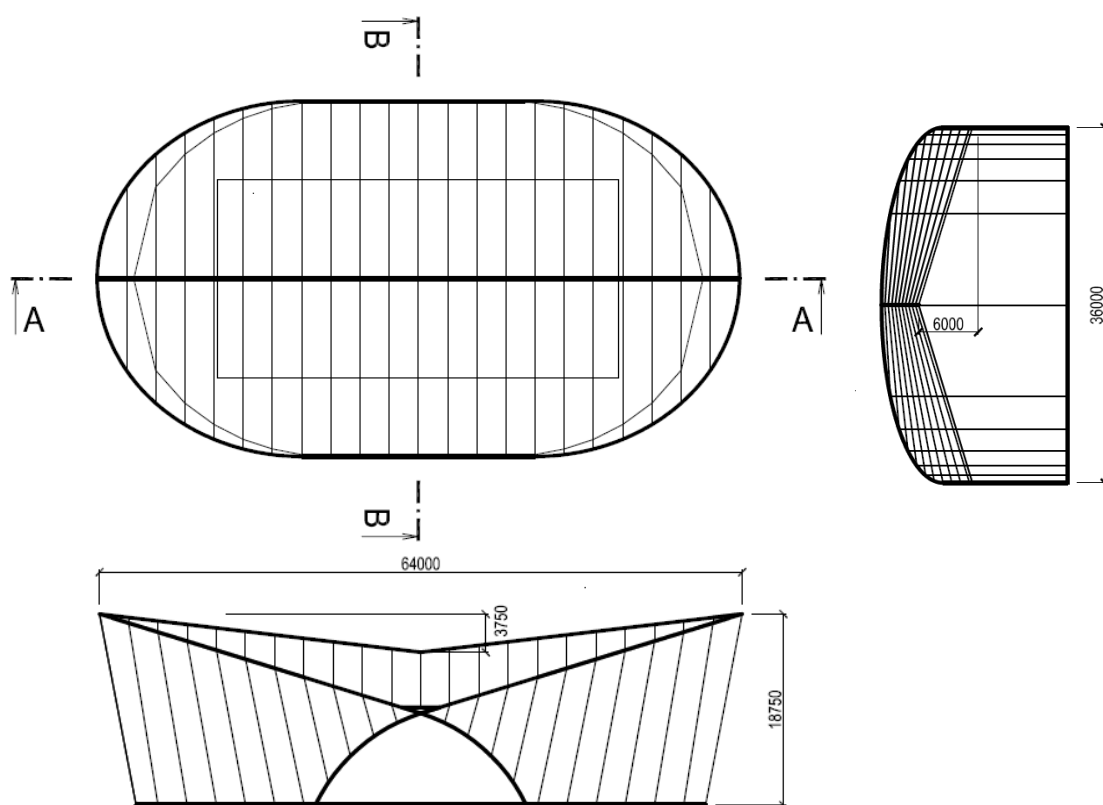
1	Návrh rozměrů řešeného konstrukčního systému .....	4
2	Návrh prefabrikovaného železobetonového panelu .....	5
2.1.1	Stanovení materiálových a pevnostních charakteristik panelu .....	7
2.1.2	Stanovení krycí vrstvy panelu .....	7
2.1.3	Tuhost vyvedené betonářské výztuže žeber panelu v závislosti na jeho uložení na nosná lana, výpočet deformace vyvedené výztuže, posouzení výztuže na ohybové namáhání .....	8
2.1.4	Stanovení zatížení působících na střešní panel, zatěžovací stavy .....	11
2.1.5	Stanovení spolupůsobící šířky desky a žebra .....	14
2.1.6	Dimenzování panelu .....	15
2.1.7	Návrh uložení panelů střešní konstrukce .....	20
3	Statická analýza předepnuté střešní skořepiny .....	22
3.1	Návrh výpočetního modelu .....	22
3.2	Předpoklady statického posouzení .....	26
3.2.1	Statické působení lana .....	26
3.2.2	Geometrická nelinearita, výpočetní metoda, příčná tuhost lana .....	27
3.2.3	Použité konečné prvky .....	31
3.2.4	Dokonalá tuhost obvodového prstence .....	33
3.2.5	Klimatické zatížení konstrukce .....	34
3.2.6	Odchyłky výpočetního modelu od reálného působení .....	35
3.3	Postup výstavby skořepiny .....	35
3.4	Hledání výchozího rovnovážného stavu .....	37
3.4.1	Stanovení silových účinků na nosná příčná lana .....	39
3.4.2	Nalezení výchozího tvaru .....	42
3.4.3	Stanovení kotevního napětí nosných lan .....	51
3.5	Časová analýza předpjaté membrány .....	53
3.5.1	Návrh předepnutí skořepiny pomocí monostrandů .....	54
3.5.2	Shrnutí výsledků časové analýzy .....	63
4	Posouzení předpjaté skořepiny .....	63
4.1	Stanovení vnitřních sil .....	63
4.2	Posouzení MSP .....	69
4.2.1	Kombinace a posouzení .....	69
4.3	Posouzení MSÚ .....	81
4.3.1	Kombinace pro MSÚ .....	82

4.3.2	Průřezy pro MSÚ .....	86
4.3.3	Posouzení pomocí iteračního diagramu .....	87
5	Závěr a shrnutí statického výpočtu .....	91
6	Citovaná literatura .....	92
7	Použitý software .....	93
8	Seznam obrázků a tabulek statického výpočtu .....	93
8.1	Seznam obrázků .....	93
8.2	Seznam tabulek .....	95

# 1 Návrh rozměrů řešeného konstrukčního systému

Zvolená konstrukce bude realizována za účelem zastřešení jezdecké plochy jízdárny o rozměrech 20 x 40 m. Prvotní návrh rozměrů a schematický nákres konstrukce je zobrazen na obrázku 1.1. Střechu tvoří předpjatá betonová skořepina (membrána) vetknutá do obvodového prstence. Ta je tvořena betonovými prefabrikáty, které budou kladeny na nosná lana. Lana vytvářejí lanovou síť s rozestupy příčných lan 2,91 m. Spáry mezi betonovými dílci budou po jejich uložení zmonolitněny a celá střešní konstrukce dodatečně v obou směrech předepnuta předpínacími kabely typu monostrand, které jsou v příčném a v podélném směru vedeny ve spárách mezi prefabrikáty a kotveny do obvodového prstence.

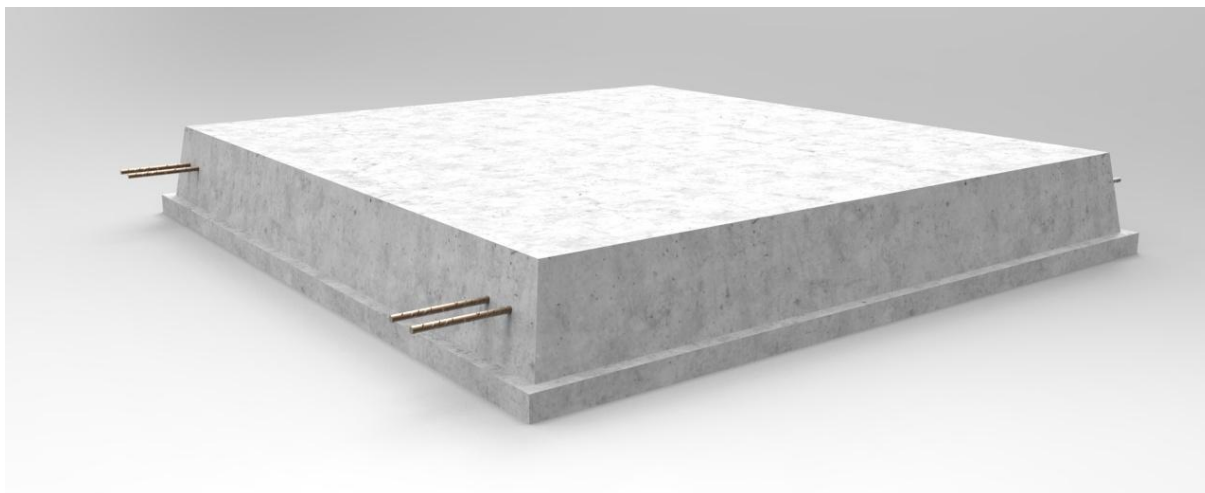
Půdorysné rozměry konstrukce činí 64 x 36 m. Nejvyšším bodem zastřešení je vrchol eliptického ramena konstrukce, který se nachází ve výšce 18,75 m nad zemí. Navrhovaný průvřez střechy od nejvyššího bodu ramene je 3,75 m. Vzepětí ve směru příčných lan je 6 m. Prvotním cílem diplomové práce bude snaha dosáhnout co nejblíže námi navržené geometrie skořepiny s ohledem na ekonomickou i architektonickou stránku stavby a v neposlední řadě možnou proveditelnost, tzn. určit tzv. výchozí tvar řešené skořepiny (rovnovážný stav). Původně námi navržená geometrie je zobrazena na výkresu č.01.



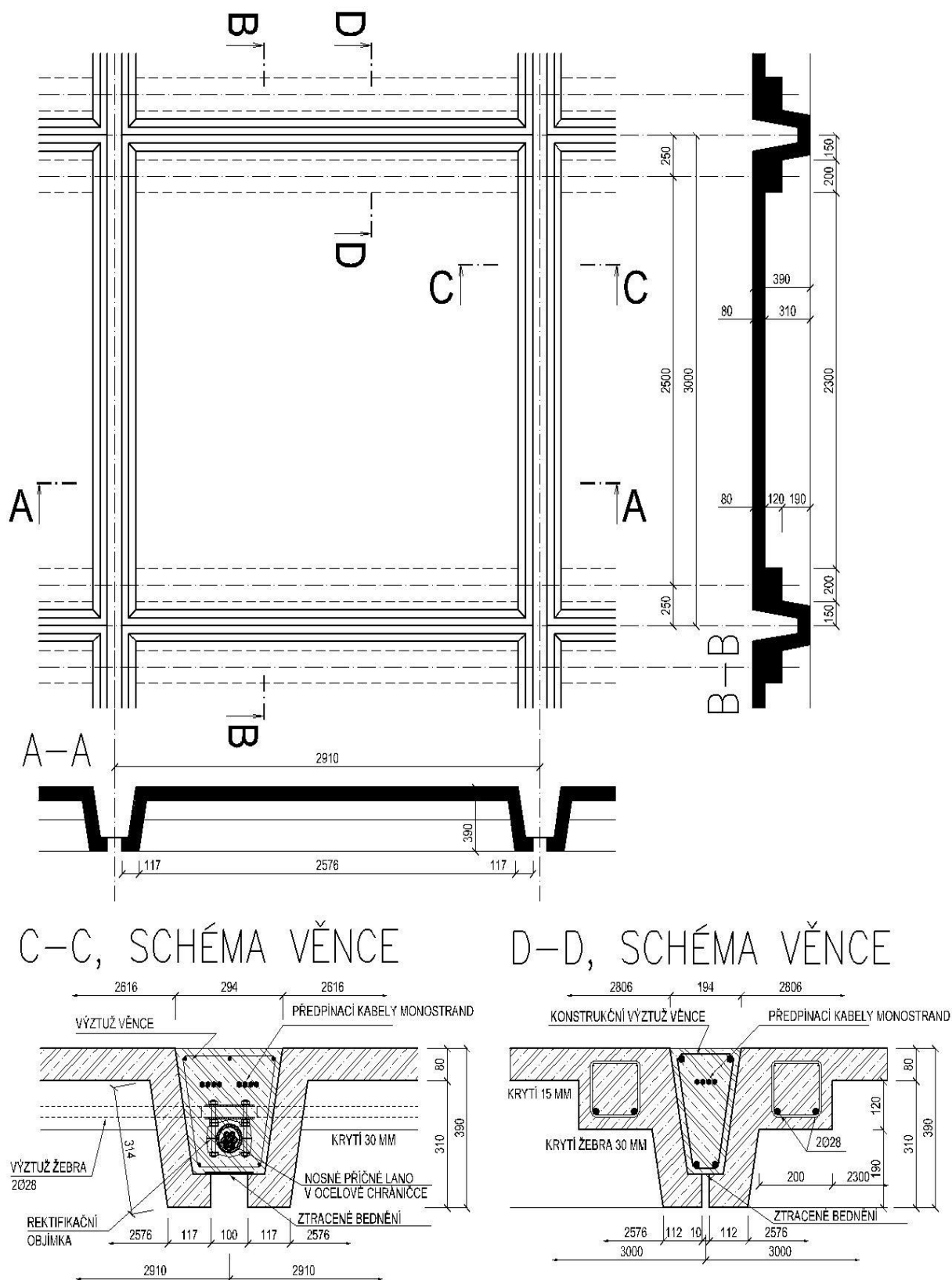
Obrázek 1.1 Schematický nákres konstrukčního systému

## 2 Návrh prefabrikovaného železobetonového panelu

Prefabrikované betonové dílce budou vyrobeny ze slabě vyztuženého betonu v továrnách s předepsanou objemovou hmotností betonu  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ . Na základě ortogonální lanové sítě řešené střešní konstrukce byly stanoveny rozměry převážné většiny panelů na 2,91 x 3 m. Panely u obvodového prstence a hřebene střechy budou vyrobeny na míru pro dané místo jako A typ. Tloušťka prefabrikátů činí v jeho deskové části 80 mm a po okrajích je tvořen obvodovými žebry výšky 390 mm tak, aby byl vytvořen po zalití spár mezi panely odpovídající železobetonový věnec v obou směrech, ve kterém budou vedeny předpínací kabely skořepiny typu monostrand. Součástí panelů jsou i dvě vnitřní žebra o rozměrech 200 x 120 mm. Prostřednictvím podélné výztuže těchto vnitřních žebířů, jež je vyvedena z panelu ven, budou prefabrikáty kladeny na příčná nosná lana. Nosná lana budou v místě styku s výztuží opatřena rektifikačními podložkami (objímkami), které napomohou vyrovnávat zborcení střešní roviny skořepiny mezi dvěma sousedícími lany tak, aby položené panely nebyly lámány a střednice desky panelu byla po pokládce v jedné rovině. Délka přesahující výztuže žebířů je dána zborcením střešní plochy, které způsobuje, že věnec (spára mezi panely) se od obvodového prstence konstrukce směrem k hřebenu střechy zužuje. Nosná výztuž žebířů musí být tedy dostatečně tuhá, aby se pod tíhou panelu výrazně neprohla či neusmýkla. Navrhovaný panel je schematicky zobrazen pomocí vizualizace a také schematicky v půdoryse a řezech na obrázcích níže.



Obrázek 2.1 3D vizualizace navrhovaného střešního panelu



Obrázek 2.2 Schéma tvaru panelu

### 2.1.1 Stanovení materiálových a pevnostních charakteristik panelu

Posouzení prvku bylo provedeno v souladu s eurokódem 2 [1, 2]. Pro výrobu panelů bude použit beton třídy C30/37 a betonářská výztuž B500B. Stupeň vlivu prostředí je stanoven jako XC1. Betonový prefabrikát se svou objemovou hmotností 2200 kg/m<sup>3</sup> je na hranici mezi posouzením dle [1] pro lehké či obyčejné betony. Beton panelu bude posouzen jako beton obyčejný.

#### Pevnostní charakteristiky betonu C30/37/XC1

$f_{ck}$  charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku

$f_{ctm}$  střední hodnota pevnosti betonu v tahu

$E_{cm}$  střední hodnota modulu pružnosti betonu

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 32\,000 \text{ MPa}$$

#### Pevnostní charakteristiky betonářské oceli B500B

$f_{yk}$  charakteristická hodnota pevnosti oceli na mezi kluzu

$E_s$  Youngův modul pružnosti betonu oceli

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ MPa}$$

### 2.1.2 Stanovení krycí vrstvy panelu

#### a) pro žebro panelu

Stupeň vlivu prostředí: XC1

Třída konstrukce: S4

Rozměr největšího zrna kameniva:  $d_g < 32 \text{ mm}$

Stanovení minimální krycí vrstvy:

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

Průměr volen tak, aby bylo zabráněno nadměrné deformaci výztuže v místě uložení na nosná stabilizační lana.

$c_{min,b}$  - průměr výztuže v žebře = 28 mm

$c_{min,dur}$  - požadavek na prostředí = 15 mm

$\Delta c_{dur,\gamma}; \Delta c_{dur,st}; \Delta c_{dur,add}$  - uvažují nulové

$$c_{min} = \max\{28; 15; 10 \text{ mm}\} = 28 \text{ mm}$$

Návrhový přírůstek krytí k minimální hodnotě je stanoven jako  $\Delta c_{dev} = 2 \text{ mm}$ , kdy se předpokládá, že výztuž v panelech bude uložena přesně na svém místě, neboť se jedná o prefabrikáty vyráběny v továrně na míru s použitím velmi citlivých přístrojů pro měření krycí vrstvy.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 28 + 2 = 30 \text{ mm}$$

$$c \geq c_{nom} \Rightarrow c = \mathbf{30 \text{ mm}}$$

Navrhují krytí podélné betonářské výztuže žebra panelu o velikosti 30 mm.

#### **b) pro výztuž desky panelu**

$c_{min,b}$  - průměr výztuže v žebře = 10 mm

$c_{min,dur}$  - požadavek na prostředí = 15 mm

$\Delta c_{dur,\gamma}; \Delta c_{dur,st}; \Delta c_{dur,add}$  - uvažují nulové

$$c_{min} = \max\{10; 15; 10 \text{ mm}\} = 15 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 15 + 0 = 15 \text{ mm}$$

$$c \geq c_{nom} \Rightarrow c = \mathbf{15 \text{ mm}}$$

Navrhují krytí podélné betonářské výztuže desky panelu o velikosti 15 mm.

#### **2.1.3 Tuhost vyvedené betonářské výztuže žeber panelu v závislosti na jeho uložení na nosná lana, výpočet deformace vyvedené výztuže, posouzení výztuže na ohybové namáhání**

Krokem pro ověření správné funkčnosti námi zvoleného uložení je předběžný návrh podélné výztuže žeber. Jak již bylo uvedeno, tato výztuž musí být dostatečně tuhá. Je nutné zvolit takový průměr výztuže vyvedené mimo průřez panelu, aby její průhyb v místě uchycení na lana byl minimální. Tato vyvedená výztuž staticky působí jako konzola vetknutá v místě vyvedení do panelu. Délka konzoly je proměnlivá v důsledku zborcení střešní plochy. Průhyb volného okraje konzoly



zatíženého osamělou silou se stanoví dle následujícího vzorce, který lze jednoduše odvodit z principu virtuálních prací s použitím Vereščaginova pravidla.

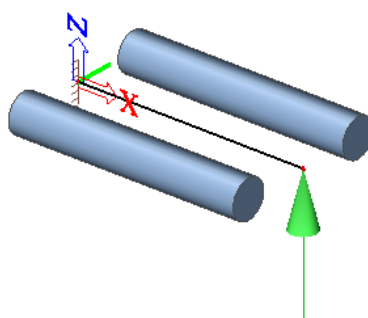
$$w = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Díky 3D modelu panelu, který byl vytvořen v programu Cinema 4D, je nám známá jeho hodnota objemu. Na základě objemové hustoty železobetonu a počtu míst uchycení panelu na lana, můžeme určit reakci  $R_0$  od vlastní tíhy. Při montáži střešní konstrukce se budou již po uložených panelech také pohybovat dělníci. Idealizujeme je tedy silovým účinkem o hodnotě 1 kN (člověk o hmotnosti 100 kg) působícím ve středu panelu.

Objem střešního panelu:	$V = 1,021 \text{ m}^3$
Objemová hustota železobetonu:	$\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$
Hmotnost panelu:	$m = \rho \cdot V = 2200 \cdot 1,021 = 2246,2 \text{ kg}$
Tíha panelu:	$F_0 = m \cdot g = 2246,2 \cdot 9,81 \div 22,04 \text{ kN}$
Reakce v podpoře od vl. tíhy:	$R_0 = F_0/4 = 22,04/4 \div 5,51 \text{ kN}$
Reakce v podpoře od dělníků:	$R = F/4 = 1/4 \div 0,25 \text{ kN}$

Sílu  $F$  ve vzorci pro výpočet průhybu konzoly zatížené na volném okraji osamělou silou nahradíme vypočtenou sumou reakcí od obou případů možného namáhání o hodnotě 5,76 kN. Délka nejdelšího možného vyvedení výztuže činí v našem případě 0,17 m. Vyztužení žeber je navrženo ze dvou kusů tyčí o průměru 28 mm. Po dosazení hodnot do výše uvedené rovnice průhybu konzoly, zatíženou silou při jejím volném okraji (v místě podepření výztuže), činí jeho velikost 0,782 mm. Lze tedy předpokládat, že navržená výztuž je dostatečně tuhá, aby nedošlo k její nadměrné deformaci.

$$w = \frac{5760 \cdot 0,17^3}{3 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,014^4} = 0,000782 \text{ m}$$



Obrázek 2.3 Schéma výpočtového modelu pro posouzení uložení

Dále posoudíme ohybové a smykové namáhání výztuže, které toto uložení způsobuje. Napětí od vnějšího zatížení ve výztuži musí být menší než hodnota únosnosti na mezi kluzu oceli. Jelikož se jedná o posudky na MSÚ, je nutné počítat s výpočtovými hodnotami. Výpočtovou hodnotu reakce (síly při volném okraji konzoly) určíme zjednodušeně podle kombinační rovnice 6.10, kdy stálé zatížení zvýšíme pomocí dílčích součinitelů spolehlivosti o 35 % a proměnné o 50%. Pokud tuto reakci přenásobíme délkou konzoly, získáme ohybový moment  $M_{ed}$ .

Dílčí součinitel spolehlivosti pro stálé zatížení:  $\gamma_G = 1,35$

Dílčí součinitel spolehlivosti pro proměnné zatížení:  $\gamma_Q = 1,50$

Reakce:  $R = 1,35 \cdot 5,51 + 1,5 \cdot 0,25 = 7,81 \text{ kN}$

#### Posouzení průřezu na ohyb:

$$\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd}$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{R \cdot l}{I} \cdot z \leq \sigma_{Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Dosazení:

$$\sigma_{Ed} = \frac{7810 \cdot 0,17}{2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,014^4} \cdot 0,014 = 308 \text{ MPa} \leq \sigma_{Rd} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

#### Posouzení průřezu na smyk:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$$




$$\frac{V_{Ed}}{A_v} \leq \frac{\sqrt{3} \cdot f_{yk}}{3}$$

Maximální posouvající síla v průřezu:  $V_{Ed} = 7,81 \text{ kN}$

(v našem případě je průběh posouvajících sil konstantní o hodnotě reakce)

Smyková plocha průřezu:  $A_v = 0,844 \cdot A \text{ pro plný kruhový průřez}$

$$A_v = 0,844 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 0,844 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,014^2 = 1,039 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

	 <sup>1)</sup>	 <sup>2)</sup>	 <sup>3)</sup>
$A_v$	$0,5 A$	$0,844 A$	$0,833 A$

<sup>1)</sup> Kruhová trubka konstantní tloušťky

<sup>2)</sup> Plný kruhový průřez

<sup>3)</sup> Plný obdélníkový průřez

Obrázek 2.4 Přehled smykových ploch vybraných průřezů

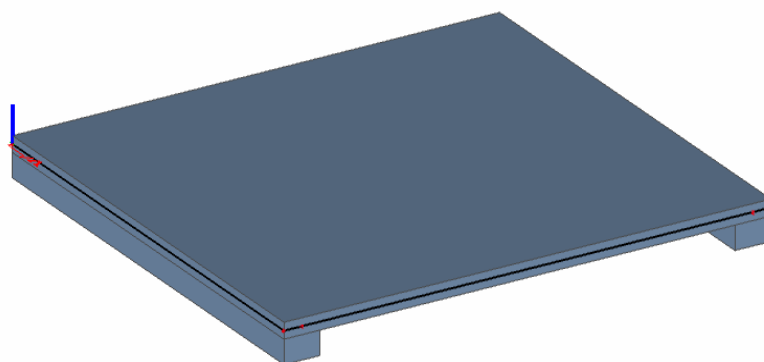
Dosazení:

$$\tau_{Ed} = \frac{7810}{1,039 \cdot 10^{-3}} = 7,52 \text{ MPa} \leq \tau_{Rd} = \frac{\sqrt{3} \cdot 500}{3} = 288,7 \text{ MPa}$$

Výztuž žebra, tedy 2 ks podélné výztuže o průměru 28 mm, z hlediska námi navrženého uložení vyhovuje.

#### 2.1.4 Stanovení zatížení působících na střešní panel, zatěžovací stavy

Panel byl posouzen pomocí softwaru SCIA Engineer 2013, kde byl vymodelován jako zjednodušený model desky se dvěma žebry o rozměrech desky 2,48 x 2,7 m a tloušťkou desky 80 mm. Výška žebra činí 200 mm od horního okraje desky. Žebra po obvodu panelu byla zanedbána, čímž se snížila tuhost panelu ve směru kolmém na žebra modelovaná uvnitř desky. Tímto zanedbáním se z hlediska statického chování panelu, který by jinak působil jako křížem vyztužená deska, stala deska převážně namáhaná v jednom směru. Hmoty (tíha) zanedbaných žebor byla zohledněna v zatěžovacím stavu ZS11 a to tak, že po okrajích panelu byla nahrazena silovými účinky v podobě liniového rovnoměrného zatížení a k nim odpovídajícího liniového momentového zatížení díky excentricity těžiště průřezu obvodových žebor. Snahou bylo docílit toho, aby zjednodušený model v softwaru hmotnostně odpovídal skutečnosti. Vizualizace modelu z výpočtového softwaru je zobrazena na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Vizualizace modelu v softwaru SCIA

I když z hlediska postupu výstavby nebude samotný panel vzdorovat zatížení od skladby střechy a od sněhu (pozn. vítr je v této práci zanedbán), neboť bude vyvedenou výztuží ve věnci propojen s ostatními panely a následně dojde k zalití spár a ke zmonolitnění střechy, bude toto zatížení ve výpočtu pro dimenzování panelu uvažováno s ohledem na stranu bezpečnou návrhu.

Bylo stanoveno 6 zatěžovacích stavů, ze kterých byly vytvořeny 2 kombinace. První kombinací byla kombinace lineární pro ověření odpovídající hmotnosti vymodelovaného panelu, druhou kombinací byla kombinace pro posouzení MSÚ STR/GEO souboru B [3]. Kombinace pro mezní stavy únosnosti se navrhuje tak, aby vybrané rozhodující zatěžovací stavy vytvořili co nejnepříznivější účinky zatížení na posuzovaný prvek v konstrukci (v našem případě panel). K zjištění této rozhodující kombinace zatěžovacích stavů použijeme kombinační rovnice 6.10a a 6.10b dle ČSN EN 1990. Méně příznivá kombinace je rozhodující:

$$\text{rovnice 6.10a; 6.10b} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{array} \right.$$

#### Dílčí součinitele zatížení pro MSÚ

$\xi = 0,85$ ;  $\gamma_{G,j} = 1,35$  (nepříznivá);  $\gamma_{G,j} = 1,00$  (příznivá)

$\gamma_{Q,1} = 1,50$  (nepříznivá);  $\gamma_{Q,1} = 0,00$  (příznivá)

$\gamma_{Q,i} = 1,50$  (nepříznivá);  $\gamma_{Q,i} = 0,00$  (příznivá)

#### Doporučené hodnoty součinitele $\psi$ pro kombinace zatížení pro pozemní stavby

Kategorie budovy H - obchodní plochy:  $\psi_0 = 0$

Zatížení sněhem:  $\psi_0 = 0,5$

#### 2.1.4.1 Přehled zatěžovacích stavů

Ve statickém výpočtu P4 jsou jednotlivé zatěžovací stavy stanoveny a vypočteny. Jejich podrobné zobrazení spolu s vypočítanými vnitřními silami je uvedeno v příloze statického výpočtu P5.

#### ZS1 – Zatížení vlastní tíhou vymodelovaného panelu

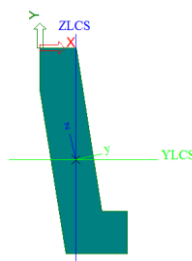
#### ZS11 – Dodatek k vlastní tíze – zohlednění zanedbání obvodových žebírek panelů

Parametry průřezu zanedbané hrany panelu = žebra:

$$A = 0,03447 \text{ m}^2$$

$$e_{YUCS} = 68 \text{ mm}$$

$$e_{ZUCS} = -212 \text{ mm}$$



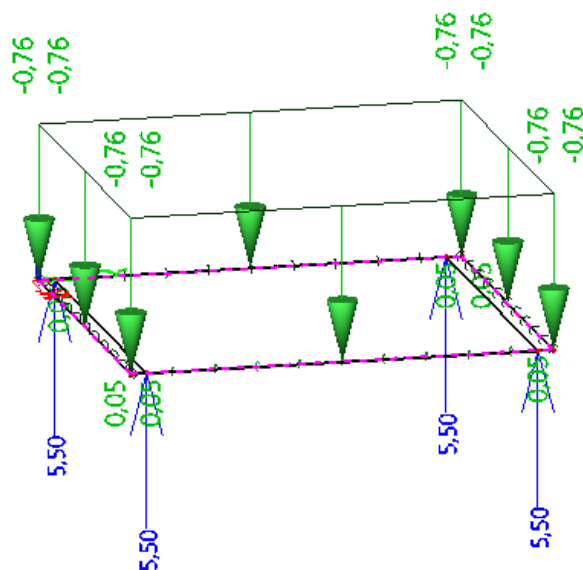
Stanovení liniového silového zatížení:

$$f = A \cdot \gamma_c = 0,03447 \cdot 22 = 0,758 \text{ kN/m}$$

Stanovení liniového momentového zatížení:

$$m = f \cdot e_{YUCS} = 0,758 \cdot 0,068 = 0,052 \text{ kNm/m}$$

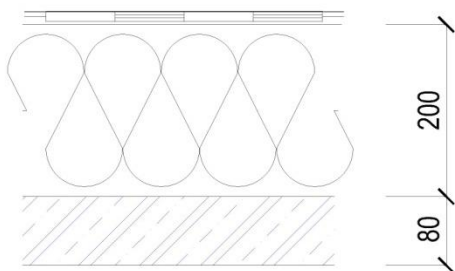
Pomocí lineární kombinace zatěžovacích stavů ZS1 a ZS11 byla v softwaru ověřena hmotnost modelu. Jak lze vidět na obrázku 2.6, ruční výpočet z kapitoly 2.1.3 koresponduje s výpočtem softwaru, kde reakce v místě uchycení vychází 5,50 kN. Můžeme tedy předpokládat, že zjednodušený model dostatečně vystihuje svou hmotností panel reálný.



Obrázek 2.6 Reakce lineární kombinace ZS1 a ZS11

## ZS2 – Ostatní stálé zatížení

Ostatní stálé zatížení souvisí se skladbou střešní konstrukce. Navrhovaná střešní skladba bude prostá. Skládá se pouze z tepelné izolace tloušťky 200 mm a asfaltového pásu - hydroizolace tl. 4 mm. Doporučená objemová tíha pro tepelnou izolaci XPS je  $1,5 \text{ kN/m}^3$ , pro asfaltový pás  $0,047 \text{ kN/m}^2$ .



Obrázek 2.7 Skladba střechy

Stanovení ostatního stálého zatížení:

$$g_{1,k} = 0,2 \cdot 1,5 + 0,047 = 0,347 \text{ kN/m}^2$$

**ZS3 – Klimatické zatížení – zatížení sněhem**

Stavba bude vystavěna v lokalitě města Brna, které se nachází v II. sněhové oblasti. V této oblasti je charakteristická hodnota zatížení sněhem rovna  $1,0 \text{ kN/m}^2$ .

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$\mu_i$  - tvarový součinitel závislý na sklonu střechy  $\Rightarrow \mu_i = 0,8$

$C_e$  - součinitel expozice závislý na typu krajiny

– nedochází k výraznému přemístění sněhu větrem vlivem okolních staveb  $\Rightarrow C_e = 1,0$

$C_t$  - tepelný součinitel, kterým lze snížit zatížení střechy sněhem z důvodu jeho odtávání vlivem vysoké tepelné propustnosti – standardně se uvažuje  $C_t = 1,0$

$s_k$  - charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi

**ZS4 – Užité zatížení Šach1****ZS5 – Užité zatížení Šach2**

Užitným zatížením se rozumí dělník stojící uprostřed panelu (šach1) či při jeho okraji (šach2) během montáže střechy. Je idealizován silou  $1 \text{ kN}$ .

**ZS6 – Zatížení osamělými momenty a reakcemi od vlastní tíhy v místě podpor modelu**

Poslední zatěžovací stav je odvozen od navrženého stylu uložení. Víme, že reakce v místě uložení od vlastní tíhy je  $5,50 \text{ kN}$ . Tato reakce působí na konci vyvedené výztuže ve vzdálenosti  $0,17 \text{ m}$  od okraje panelu a způsobuje v každé podpoře osamělý moment  $0,935 \text{ kNm}$ .

**2.1.5 Stanovení spolupůsobící šířky desky a žebra**

Pro výpočet vnitřních sil žebra byla do výpočetního programu zadána níže vypočtená spolupůsobící šířka mezi žebrem a deskou. Pro samotné dimenzování bude spolupůsobící průřez zjednodušen z průřezu obecného na jednoose symetrický z důvodu snadnějšího ručního dimenzování žebra.

**Stanovení spolupůsobící šířky pro výpočet vnitřních sil žebra ve výpočetním softwaru SCIA**

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b$$

$$b_{eff,i} = 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_o \leq 0,2 \cdot l_o ; b_{eff,i} \leq b_i$$

$$b_1 = 50 \text{ mm}, b_2 = 1150 \text{ mm}$$

$l_o$  - vzdálenost mezi dvěma body s nulovou hodnotou ohybového momentu, v našem případě se jedná o vzdálenost vymodelovaného žebra

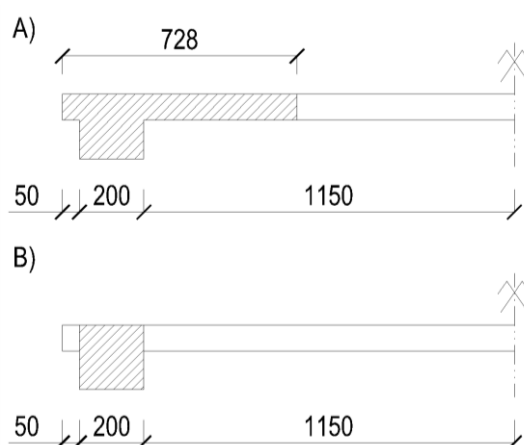
$$b_{eff,1} = 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_o = 0,2 \cdot 50 + 0,1 \cdot 2480 = 258 \text{ mm} \leq 50 = \mathbf{50 \text{ mm}}$$

$$b_{eff,2} = 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_o = 0,2 \cdot 1150 + 0,1 \cdot 2480 = \mathbf{478 \text{ mm}} \leq 0,2 \cdot 2480 = 496 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 50 + 478 + 200 = \mathbf{728 \text{ mm}}$$

### Stanovení spolupůsobící šířky pro dimenzování výztuže žebra

Pro dimenzování výztuže žebra zanedbáme spolupůsobení mezi žebrem a deskou. Dostaneme tak jednoose symetrický průřez tvaru čtverce.



Obrázek 2.8 Spolupůsobící šířka panelu a žebra a) pro výpočet vnitřních sil b) pro dimenzování žebra

### 2.1.6 Dimenzování panelu

Na základě výsledků vnitřních sil z programu SCIA byla dimenzována žebra panelu a deska samotná. Vnitřní síly od jednotlivých zatěžovacích stavů a dimenzační momenty pro desku panelu jsou zobrazeny na v příloze statického výpočtu P5.

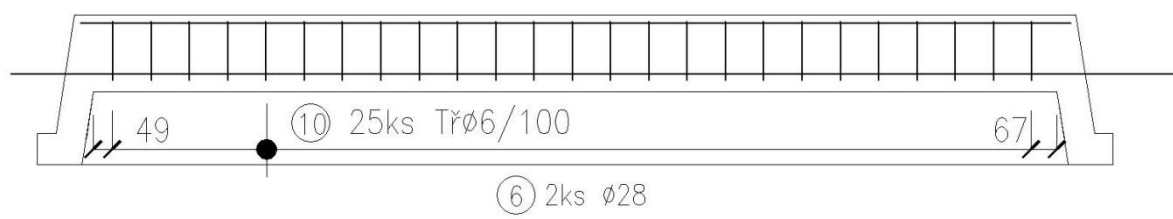
#### 2.1.6.1 Dimenzování žebra panelu

Rozhodující vnitřní síly pro dimenzování žebra panelu byly odečteny z kombinační rovnice pro MSÚ. Předem navržené tyče o průměru 28 mm na namáhání ohybovým momentem  $M_{y,ED} = 5,68 \text{ kNm}$  s přehledem vyhověly. Rád bych ale poznamenal, že tento průměr výztuže byl navržen s ohledem na uložení, a není v ní nabyto mezní přetvoření výztuže při mezi kluzu, čili není plně využita. Ostatní směry namáhání jsou zanedbatelné a bude pro ně navržena konstrukční výztuž. Na základě průběhu posouvajících sil  $V_{z,ED}$  byla také navržena konstrukční smyková výztuž o průměru 6 mm po 100 mm.

Výpočet ohybové únosnosti průřezu dle ČSN EN 1992-1-1					
Dimenzování žebra prefabrikované stropní desky					
Hodnota ohybového momentu $M_{ed,y}$		5,68 kNm			
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu					
Beton C30/37		Ocel B500B	Krytí		
$f_{ck} =$	30.00 MPa	$f_{yk} =$	500.00 MPa	Stupeň vlivu prostředí XC1	
$\gamma_c =$	1.50	$\gamma_s =$	1.15	Konstrukční třída S4	
$f_{cd} =$	20.00 MPa	$f_{yd} =$	434.78 MPa	$c_{min,b} =$	28 mm
$f_{ctm} =$	2.90 MPa	$E_s =$	200.00 GPa	$c_{min,dur} =$	15 mm
$\epsilon_{cu3} =$	3.50 ‰	$\epsilon_{yd} =$	2.17 ‰	$c_{nom} =$	30 mm
Předběžný návrh výztuže - geometrie, profil výztuže					
Předpokládaný průměr výztuže		$\phi =$	28 mm	Předpoklad:	
Předpokládaný průměr výztuže třmínku		$\phi_s =$	6 mm	$M_{ed} \approx M_{Rd}$	
Výška žebra		$h =$	200 mm	$M_{ed} =$	
Šířka žebra		$b =$	200 mm	$A_{s,req} \cdot f_{yd} \cdot z$	
Předběžná účinná výška průřezu		$d =$	150 mm		
		$d_1 =$	50 mm		
Předpokládané rameno vnitřních sil		$z =$	135.00 mm		
Nutná plocha výztuže		$A_{s,req} =$	1.08E-04 m <sup>2</sup>		
Skutečný návrh výztuže		2 ks		$\phi$	28
Skutečný průměr výztuže		$\phi =$	28 mm		
Účinná výška průřezu		$d =$	150 mm		
		$d_1 =$	50 mm		
Navrhovaná plocha výztuže		$A_{s,prov} =$	1.232E-03 m <sup>2</sup>		
Plocha tlačené oblasti		$A_{cc} =$	0.0268 m <sup>2</sup>		
Tloušťka desky		$h_s =$	0.0800 m		
Součinitel $\lambda$		$\lambda =$	0.8		
Poloha neutrální osy		$x =$	0.16732 m		
Kontrola míry vyztužení					
Minimální plocha výztuže		$A_{s,min} =$	4.52E-05 m <sup>2</sup>	$A_{s,prov} > A_{s,min}$	
				Vyhoví	
Maximální plocha výztuže		$A_{s,max} =$	1.60E-03 m <sup>2</sup>	$A_{s,max} > A_{s,prov}$	
				Vyhoví	
Kontrola mezery mezi pruty					
Mezery mezi pruty		$a_{sl} =$	72.00 mm		
$a_{sl} > \max\{1, 2\phi; d_g + 5; 20\}$		$a_{sl} >$	$\max\{34; 16 + 5; 20\} =$	34 mm	
				Vyhoví	
Posouzení ohybové únosnosti průřezu					
$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z_c$		$M_{ed} =$	5,68 kNm	$M_{Rd} > M_{ed}$	
$z_c = d - \lambda x / 2 =$		0.083 mm	$M_{Rd} =$	80.28 kNm	Vyhoví



Výpočet smykové únosnosti průřezu dle ČSN EN 1992-1-1				
Hodnota posouvající síly $V_{ed,z}$		8,53 kN	$C_{nom} =$	30 mm
			<b>TŘΦ</b>	<b>6 mm</b>
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu				
Beton C30/37		Ocel B500B		$b_w =$ 0.2 m
$f_{ck} =$	30.00 MPa	$f_{yk} =$	500.00 MPa	$A_{sw} =$ 1.01E-04 m <sup>2</sup>
$\gamma_c =$	1.50	$\gamma_s =$	1.15	$A_{sl} =$ 1.41E-03 m <sup>2</sup>
$f_{cd} =$	20.00 MPa	$f_{ywd} =$	434.78 MPa	$v =$ 0.528
$f_{ctm} =$	2.90 MPa	$E_s =$	200.00 MPa	$d =$ 0.149 m
$\epsilon_{cu3} =$	3.50 ‰	$\epsilon_{yd} =$	2.17 ‰	$z =$ 0.072 m
Stanovení smykové únosnosti betonu a podélné výztuže				
$C_{rd,c} =$	0.12			
$\sigma_{cp} =$	0 MPa	S předpětím (s normálovou silou) pro posudek neuvažujeme.		
$k =$	2	Pokud je splněna podmínka $V_{Rd,c} \geq V_{Ed,z}$ , stačí pouze konstrukční výztuž		
$\rho_l =$	0.0034			
$V_{Rd,c} =$	16.15809 kN	$\geq$	$V_{Ed,z} =$ 8,53 kN	<b>Vyhoví</b>
Posouzení konstrukčních zásad				
Osová vzdálenost třmínků $s = 100$ mm		$\leq 0,75d =$	0.11175 m	<b>Vyhoví</b>
		$\leq$	0.400 m	<b>Vyhoví</b>
K-ční smyková výztuž TŘΦ6		$s =$	100 mm	
$\rho_w =$	0.00505	$\geq \rho_{w,min} =$	0.000876	<b>Vyhoví</b>
		$\leq \rho_{w,max} =$	0.012144	<b>Vyhoví</b>



Obrázek 2.9 Schéma vyztužení panelu

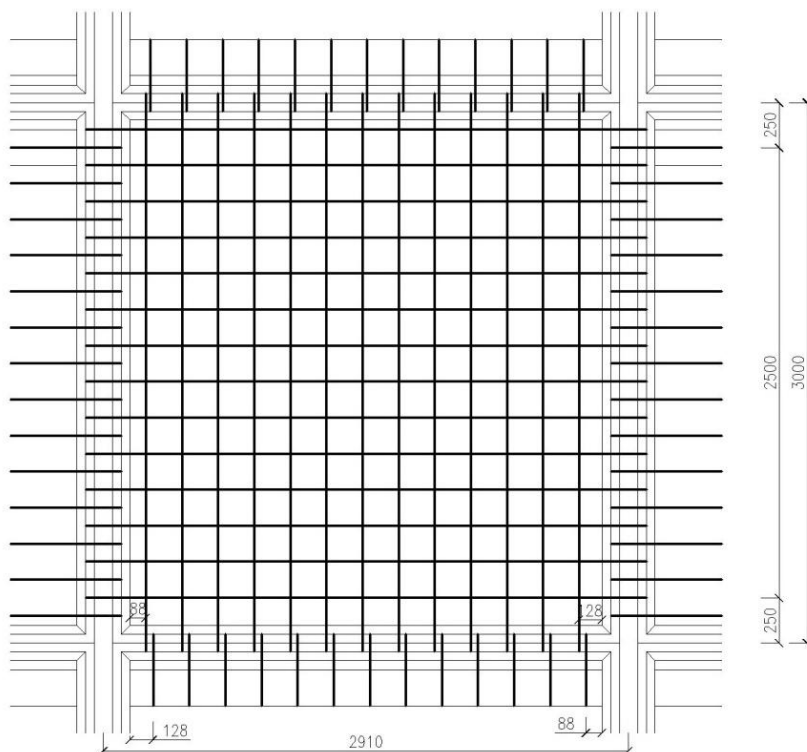
### 2.1.6.2 Dimenzování desky panelu

Rozhodující vnitřní síly pro dimenzování desky panelu byly odečteny z kombinační rovnice pro MSÚ. Model působí jako deska namáhaná převážně v jenom směru (směru y), tudíž rozhodující bude návrh výztuže na dimenzační moment  $m_{yd} = 4,48$  kNm/m. Dimenzační moment v ose x je roven  $m_{xd} = 1,38$  kNm/m. Při horním okraji žádné dimenzační momenty s výjimkou špiček u podepření v ose y nevznikají. Lze tedy předpokládat, že tyto lokální špičky se po jejich integraci nad šířkou žebra přenesou konstrukční výztuží obvodových žebor, viz Výkres vyztužení střešního panelu.

Výpočet ohybové únosnosti průřezu dle ČSN EN 1992-1-1					
Dimenzování prefabrikované stropní desky					
Hodnota dimenzačního momentu myD-		4.48 kNm/m	Místo výpočtu POLE		
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu					
Beton C30/37		Ocel B500B	Krytí		
fck =	30.00 MPa	fyk =	500.00 MPa	Stupeň vlivu prostředí XC2	
γc =	1.50	γs =	1.15	Konstrukční třída S4	
fcd =	20.00 MPa	fyd =	434.78 MPa	Cmin,b =	8 mm
fctm =	2.90 MPa	Es =	200.00 GPa	Cmin,dur =	15 mm
εcu3 =	3.50 ‰	εyd =	2.17 ‰	Cnom =	15 mm
Předběžný návrh výztuže - geometrie, profil výztuže					
Předpokládaný průměr výztuže	φ =	8 mm	Předpoklad:		
Výška desky	h =	80 mm	M <sub>ed</sub> ≈ M <sub>Rd</sub>		
Šířka desky	b =	1000 mm	M <sub>ed</sub> =		
Předběžná účinná výška průřezu	d =	61 mm	A <sub>s,req</sub> · f <sub>yd</sub> · z		
	d <sub>1</sub> =	19 mm			
Předpokládané rameno vnitřních sil	z =	54.90 mm			
Nutná plocha výztuže	A <sub>s,req</sub> =	2.036E-04 m <sup>2</sup>			
Skutečný návrh výztuže	φ 8	po	200 mm		
Skutečný průměr výztuže	φ =	8 mm			
Účinná výška průřezu	d =	61 mm			
	d <sub>1</sub> =	19 mm			
Navrhovaná plocha výztuže	A <sub>s,prov</sub> =	2.513E-04 m <sup>2</sup>			
Plocha tlačené oblasti	A <sub>cc</sub> =	0.0055 m <sup>2</sup>			
Součinitel λ	λ =	0.8			
Poloha neutrální osy	x =	0.00683 m			
Kontrola míry vyztužení					
Minimální plocha výztuže	A <sub>s,min</sub> =	9.20E-05 m <sup>2</sup>	A <sub>s,prov</sub> > A <sub>s,min</sub>		
			Vyhoví		
Maximální plocha výztuže	A <sub>s,max</sub> =	3.20E-03 m <sup>2</sup>	A <sub>s,max</sub> > A <sub>s,prov</sub>		
			Vyhoví		
Kontrola přetvoření výztuže					
Přetvoření výztuže	ε <sub>s</sub> =	27.76 ‰	ε <sub>s</sub> > ε <sub>yd</sub>		
			Vyhoví		
Posouzení ohybové únosnosti průřezu					
M <sub>Rd</sub> = A <sub>st</sub> · f <sub>yd</sub> · z <sub>c</sub>	M <sub>ed</sub> =	4.48 kNm	M <sub>Rd</sub> > M <sub>ed</sub>		
z <sub>c</sub> = d - λx / 2 =	0.058 mm	M <sub>Rd</sub> =	6.67 kNm	Vyhoví	

Výpočet ohybové únosnosti průřezu dle ČSN EN 1992-1-1					
Dimenzování prefabrikované stropní desky					
Hodnota dimenzačního momentu $m \times D$ -		1.38 kNm/m	Místo výpočtu POLE		
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu					
Beton C30/37		Ocel B500B	Krytí		
$f_{ck} =$	30.00 MPa	$f_{yk} =$	500.00 MPa	Stupeň vlivu prostředí XC2	
$\gamma_c =$	1.50	$\gamma_s =$	1.15	Konstrukční třída S4	
$f_{cd} =$	20.00 MPa	$f_{yd} =$	434.78 MPa	$C_{min,b} =$	8 mm
$f_{ctm} =$	2.90 MPa	$E_s =$	200.00 GPa	$C_{min,dur} =$	15 mm
$\epsilon_{cu3} =$	3.50 ‰	$\epsilon_{yd} =$	2.17 ‰	$C_{nom} =$	15 mm
Předběžný návrh výztuže - geometrie, profil výztuže					
Předpokládaný průměr výztuže	$\phi =$	8 mm	Předpoklad:		
Výška desky	$h =$	80 mm	$M_{ed} \approx M_{Rd}$		
Šířka desky	$b =$	1000 mm	$M_{ed} =$		
Předběžná účinná výška průřezu	$d =$	53 mm	$A_{s,req} \cdot f_{yd} \cdot z$		
	$d_1 =$	27 mm			
Předpokládané rameno vnitřních sil	$z =$	47.70 mm			
Nutná plocha výztuže	$A_{s,req} =$	7.233E-05 m <sup>2</sup>			
Skutečný návrh výztuže	$\phi$	8	po 200 mm		
Skutečný průměr výztuže	$\phi =$	8 mm			
Účinná výška průřezu	$d =$	53 mm			
	$d_1 =$	27 mm			
Navrhovaná plocha výztuže	$A_{s,prov} =$	2.513E-04 m <sup>2</sup>			
Plocha tlačené oblasti	$A_{cc} =$	0.0055 m <sup>2</sup>			
Součinitel $\lambda$	$\lambda =$	0.8			
Poloha neutrální osy	$x =$	0.00683 m			
Kontrola míry vyztužení					
Minimální plocha výztuže	$A_{s,min} =$	7.99E-05 m <sup>2</sup>	$A_{s,prov} > A_{s,min}$		
			Vyhoví		
Maximální plocha výztuže	$A_{s,max} =$	3.20E-03 m <sup>2</sup>	$A_{s,max} > A_{s,prov}$		
			Vyhoví		
Kontrola přetvoření výztuže					
Přetvoření výztuže	$\epsilon_s =$	23.66 ‰	$\epsilon_s > \epsilon_{yd}$		
			Vyhoví		
Posouzení ohybové únosnosti průřezu					
$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z_c$	$M_{ed} =$	1.38 kNm	$M_{Rd} > M_{ed}$		
$z_c = d - \lambda x / 2 =$	0.050 mm	$M_{Rd} =$	5.79 kNm	Vyhoví	

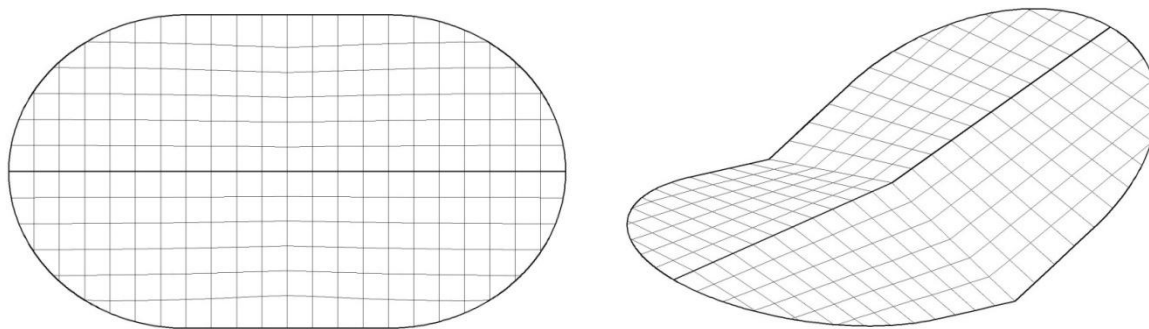
Z dimenzování je tedy zřejmé, že deska panelu bude vyztužena výztuží profilu  $\Phi 8$  se vzdáleností vložek 200 mm v obou směrech. Abychom zajistili provázání panelu s věncem, bude tato výztuž z panelu, jako výztuž žebel, rovněž vytažena do věnce a propojena s jeho výztuží. Může tak napomáhat vzdorovat případně vzniklým tahům při horním okraji ve spáře v jejich směru. S ohledem na kolizi této výztuže sousedících panelů ve věnci je síť výztuže navržena tak, aby byla vyloučena. Stačí ukládat vždy sousední panely navzájem o 180 stupňů pootočené. Se stejným předpokladem byla navržena i výztuž žebra. Schéma vyztužení desky panelu je zobrazeno na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10 Schéma vyztužení desky panelu, navržena výztuž  $\Phi 8/200$

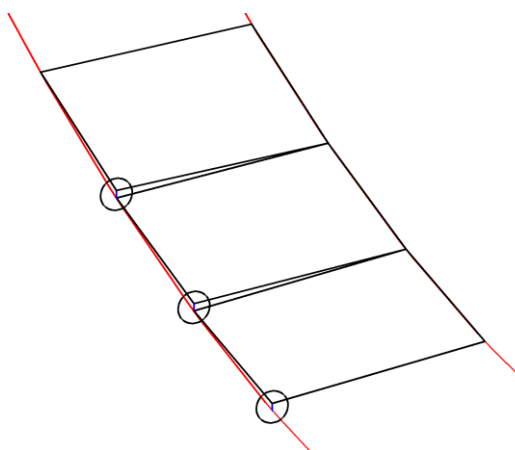
### 2.1.7 Návrh uložení panelů střešní konstrukce

Nezbytným krokem pro vytvoření komplexního modelu ve výpočetním programu bylo navržení schématu uložení panelů na nosná lana. Vlivem zborcení střednice střešní plochy a eliptického tvaru obvodového prstence budou prefabrikáty, jež jsou uloženy po okrajích, jiných rozměrů než výše navržený panel a tedy vyrobeny na míru jako A typy. Panely se budou klást od okrajů směrem ke středu střešní konstrukce a to vždy souběžně s protilehlou stranou zastřešení tak, aby se jednotlivé strany reflektovaly. Půdorysné schéma plánu uložení panelů a jeho axonometrie je zobrazena na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11 Návrh kladecího schématu – půdorys a axonometrie

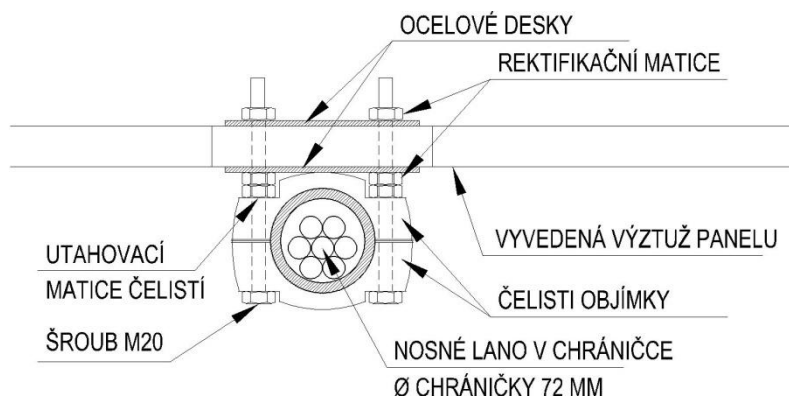
Zborcení střednice střešní plochy má také za následek další nepříjemné namáhání panelů po jejich uložení, neboť nedovoluje, aby uchycení panelu ve všech čtyřech rozích bylo v jedné rovině. Jednotlivá příčná nosná lana totiž nejsou vůči sobě v prostoru rovnoběžná a liší se i svým vzepětím. Tento fakt je demonstrován na obr. 2.12, kde jsou příčná lana nalezeného výchozího tvaru zobrazena červeně, prefabrikované panely černě a výškový rozdíl bodů uložení panelů modře v kroužku. Lze vidět, že jeden bod uložení nepřenáší tíhu panelu, „vznáší se“ a panel se láme. Tento výškový rozdíl se v našem případě pohybuje kolem 10 cm s výjimkou nejnižšího místa skořepiny v jejím středu při okraji prstence, kde je rozdíl ještě o něco vyšší.



Obrázek 2.12 Problematika uchycení prefabrikovaných panelů

K vyřešení tohoto problému se nabízí 3 řešení. Prvním z nich je změna čtvercového panelu na panel trojúhelníkový, který umožňuje pokrytí jakékoliv plochy. Je však nutno přihlídnout ke změně postupu výstavby, kdy by se kolem předepnutých nosných lan musel vyhotovit železobetonový věnec, a to buď před pokládkou panelů a panely by se na něj poté usazovaly, anebo dodatečně namísto zmonolitnění spár po pokládce panelů na lana. To je samozřejmě náročnější na provádění a čas výstavby. Druhým řešením je návrh dostatečně pružného zavěšení, které by dokázalo kopírovat tvar zborcené plochy. Třetím a námi navrženým řešením je použití rektifikačních objímek (podložek). V našem případě se tedy musí vypodložit vyvedená výztuž vnitřních žeber panelů v místě uložení na lana. Samotná pokládka i čas výstavby se tím o něco prodlouží. Objímky totiž musejí být osazeny a namontovány na předem určená místa přednostně, například z montážní plošiny, a nivelačně (výškově) připraveny tak, aby panel po uložení nebyl lámán a žádný jeho roh nevisel. Případné další

geometrické nepravidelnosti budou vyrovnány monolitickým betonem ve spárách mezi prefabrikovanými panely. Samotná podoba a návrh těchto rektifikačních objímk v diplomové práci řešen není. Avšak jejich možný tvar je v pohledu zobrazen na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13 Rektifikační objímka – možný návrh

### 3 Statická analýza předepnuté střešní skořepiny

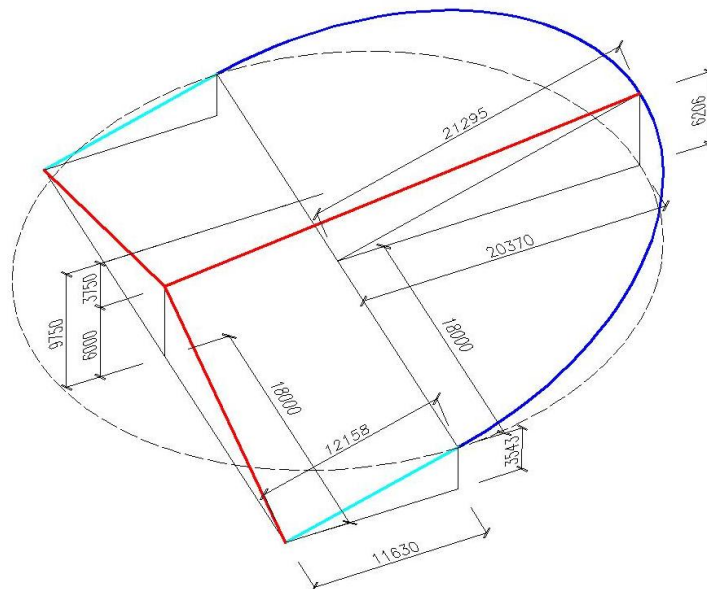
Předmětem statické analýzy je posouzení střešní skořepiny mezi obvodovými rámy konstrukce ve výpočetním softwaru Ansys. Do analýzy byla zahrnuta řada zjednodušení a omezení popsána v kapitole 3.2 níže. Skořepina se posuzovala pomocí fázované výstavby, kdy se zohledňovalo její působení v čase. Jednotlivé fáze jsou popsány v kapitole 3.3 a dále posouzeny. Základním pilířem návrhu bylo nalézt výchozí tvar lanové sítě tak, aby se co nejvíce blížil námi navržené původní geometrii. Byly celkem nalezeny 4 typy výchozích tvarů a nakonec nejlepší s ohledem na možnou proveditelnost vybrán a dále posuzován. Na základě tohoto tvaru byla vymodelována skořepina s žebry, které odpovídaly věncům s monostrandy. Bylo stanoveno pět zatěžovacích šachů od zatížení sněhem. Zatížení větrem bylo zanedbáno s ohledem na náročnost problematiky posouzení střech zborcených tvarů. Na charakteristickou kombinaci, jež způsobila extrémní namáhání, bylo navrženo předpětí membrány pomocí monostrandů. Na závěr se skořepiny posoudila v extrémně namáhaných průřezích na příslušné mezní stavy.

#### 3.1 Návrh výpočetního modelu

Geometrie řešené skořepiny vychází z úvodu kapitoly 1 a výkresu č.01, kde je znázorněna řešená část střešní konstrukce. Skořepina je po okrajích vetknutá do prostorově zakřiveného obvodového prstence a je sestavena z jednotlivých betonových prefabrikátů, které jsou zavěšeny na nosná lana. Prvotním cílem tedy bylo vymodelovat tato lana spolu s rámem konstrukce. Půdorysné rozměry konstrukce činí 64 x 36 m a jejím nejvyšším bodem je vrchol obvodového ramena konstrukce, který se nachází ve výšce 18,75 m nad zemí. Samotná skořepina je vysoká 9,75 m.

Navrhovaný průvřes středu střechy od nejvyššího bodu skořepiny v podélném směru je 3,75 m. Vzepětí středu střechy od nejnižšího bodu prstence v příčném směru je 6 m.

Nejprve byl definován obvodový prstenec, který bude proveden ze železobetonu. Průřez tohoto prvku je plný obdélníkový o rozměrech 2,0 x 1,6 m. Kraj prstence v přímém kontaktu s řešenou skořepinou se skládá ze dvou geometrických částí, a to z části přímé (přímky) zobrazené na obr. 3.1 bledě modrou barvou a a eliptické (tmavě modrá barva).



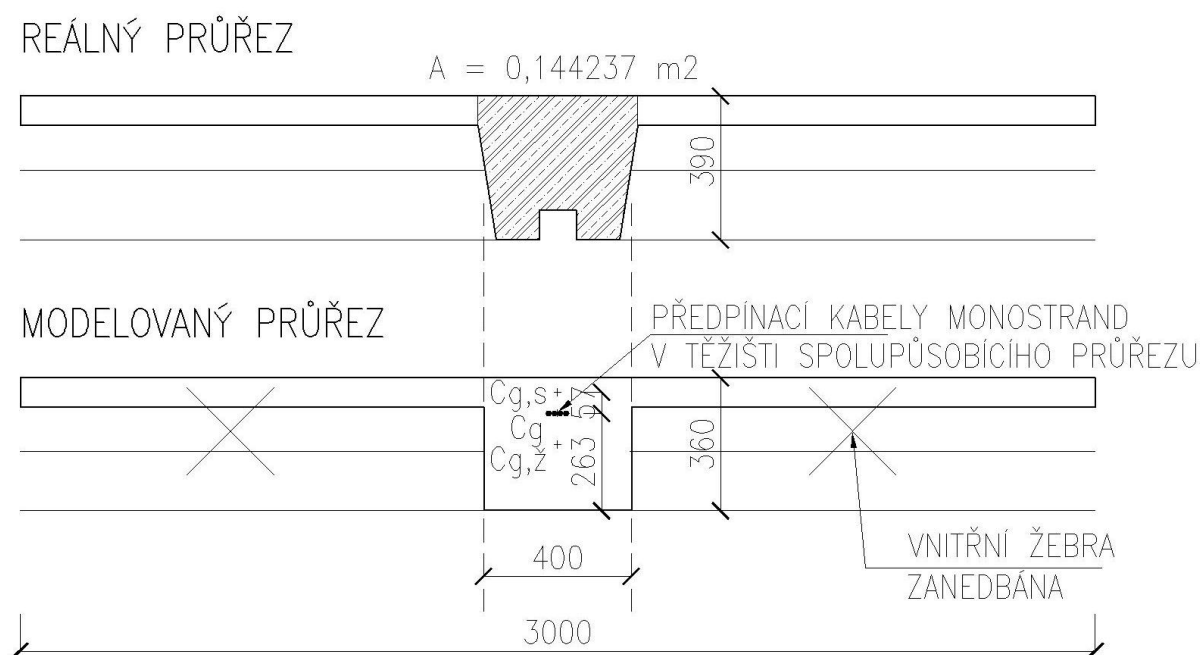
*Obrázek 3.1 Geometrie obvodového prstence*

Geometrie elipsy je popsána následující známou rovnicí:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = \left(\frac{x}{21.295}\right)^2 + \left(\frac{y}{18.000}\right)^2 = 1$$

Na obrázku 3.1 jsou znázorněna nosná lana červenou barvou. Pokud bude obrázek doplněn o chybějící lana a za předpokladu znalosti kladecího plánu střešních panelů skořepiny (kap 2.1.7), je možné odečíst z vytvořeného 3D modelu v AutoCADu souřadnice všech důležitých bodů jednotlivých lan, prstence či míst na laně, kde budou v prvotní fázi výstavby působit osamělé sil simulujících tíhu panelů pro analýzu hledání výchozího tvaru konstrukce (rovnovážného stavu). Tyto souřadnice byly přiřazeny jednotlivým keypointům, které byly vymodelovány a spojeny přímkami. Bylo využito symetrie konstrukce a modelována pouze její čtvrtina a její elementy později reflektovány. Dalším prvkem systému je oblouk spojující skořepinu se zemí. Ten je výsekem kružnice s poloměrem 17,47 m. V softwaru byl vymodelován, ale na posuzování skořepiny nemá žádný vliv, ostatně stejně jako celý obvodový prstenec, neboť se předpokládá jeho dokonalá tuhost (viz kapitola 3.2.4). Vymodelována byla i lana obvodového pláště. Nosná lana skořepiny jsou v terminologii předpjatého betonu předpínacími kabely. Předpínací kabely se skládají z předpínacích lan, přičemž byla pro analýzu

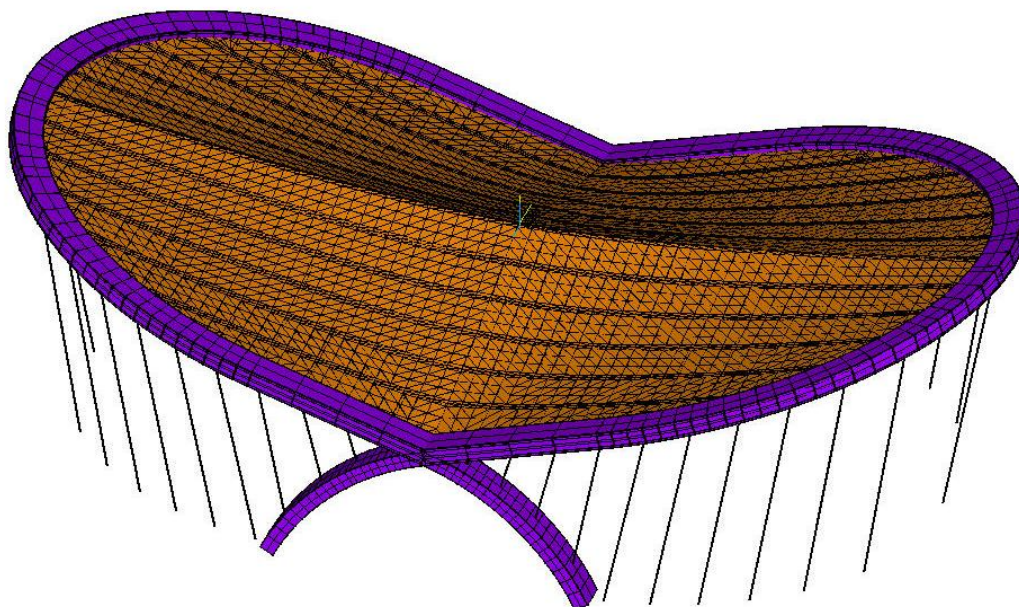
použita předpínací lana o průměru 15,7 mm s průřezovou plochou  $150 \text{ mm}^2$  s označením předpínací oceli Y1860S7. Návrh průřezu celého kabelu a jejich předepnutí je popsán dále. Jednotlivé příčné kabely jsou od sebe vzdáleny v půdorysném průmětu 2,91 m s výjimkou prvních dvou, kde vzdálenost činí pouze 2,9 m. Tyto příčné kabely jsou podporovány hlavním podélným visutým lanem (opět předpínacím kabelem). Je zřejmé, že toto lano vynáší celou hmotnost zastřešení a tudíž jeho průřez bude zcela dominantní s porovnáním s ostatními lany. Po nalezení výchozího tvaru lanové sítě byly osamělé síly nahrazeny celistvou skořepinou tl. 80 mm. Jednotlivé panely a kontakty mezi nimi s ohledem na náročnost modelu modelovány nebyly. Taktéž vnitřní žebra panelů. Zanedbáním těchto žeber se o něco zmenšila tuhost skořepiny s ohledem na stranu bezpečnou. Věnce po obvodu byly zjednodušeně vymodelovány jako pruty obdélníkového průřezu. Tato idealizace průřezů věnců v příčném směru je zobrazena na obrázku 3.2.



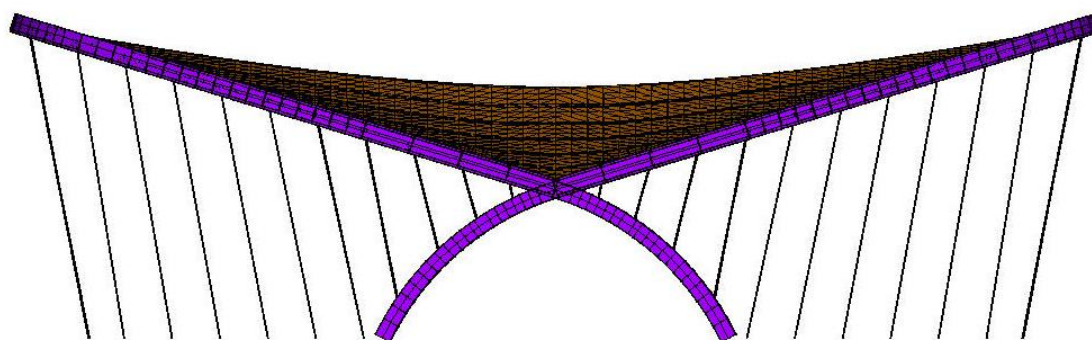
Obrázek 3.2 Idealizace věnce v příčném směru pro výpočetní model

Plocha reálného průřezu věnce o hodnotě  $0,144237 \text{ m}^2$  odpovídá ploše obdélníkového žebra o rozměrech  $0,4 \times 0,36 \text{ m}$ . Věnce v podélném směru jsou užší a stejným postupem byly nalezeny i jeho rozměry  $0,3 \times 0,36 \text{ m}$ . Následovalo nalezení těžiště  $C_g$  T-průřezu žebra a skořepiny pro každý směr. Do něj byly umístěny předpínací kabely typu monostrand Ls 15,7 mm. Uzly prvků (elementů) nosných lan, skořepiny, monostrandů a věnců, které měly v našem případě společnou souřadnici Y (byly nad sebou), byly pomocí příkazu „coupling“ spojeny tak, aby měly shodnou deformaci, a tedy spolupůsobily. Na závěr se do skořepiny vnesla tlaková rezerva, kdy bylo snahou provést takový návrh předpětí, aby v membráně od provozních zatížení nevznikla tahová namáhání, která by měla za následek vznik trhlin ve spárách mezi panely. Výsledný výpočtový model je zobrazen na obrázcích níže.

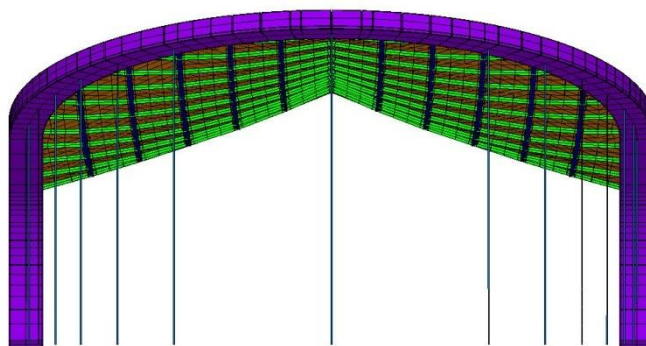




Obrázek 3.3 Vytvořený výpočtový model - axonometrie



Obrázek 3.4 Vytvořený výpočtový model– pohled 1



Obrázek 3.5 Vytvořený výpočtový model– pohled 2

Postup vytváření výpočetního modelu je podrobněji popsán u každé fáze časové analýzy dále s ohledem na následující kapitolu, která se zabývá předpoklady samotného statického posouzení námi řešené membrány a také zmiňuje zjednodušující předpoklady (idealizace) při jejím řešení.

### Přehled materiálových charakteristik jednotlivých prvků modelu konstrukce

Skořepina, žebra i rám jsou provedeny z betonu pevnostní třídy C30/37. Nosná lana a předpínací kabely monostrand z předpínací oceli s označením Y1860S7-15,7.

#### Beton C30/37/XC1

Objemová hmotnost  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$

Youngův modul pružnosti  $E = 32 \text{ GPa}$

Poissonův součinitel  $\nu = 0,2$

Modul pružnosti ve smyku  $G = 13,33 \text{ GPa}$

#### Předpínací ocel Y1860S7-15,7-A

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

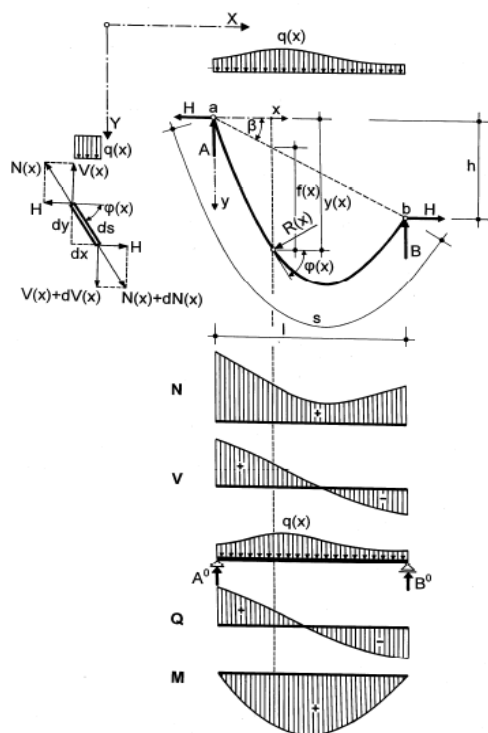
Youngův modul pružnosti  $E = 195 \text{ GPa}$

Poissonův součinitel  $\nu = 0,3$

## 3.2 Předpoklady statického posouzení

### 3.2.1 Statické působení lana

K pochopení působení lana je zde zjednodušeně nastíněno jeho statické posouzení. Předpokládáme, že lano plochy  $A$  a modulu pružnosti  $E$  působí jako perfektně ohebný prvek, který



Obrázek 3.6 Základní charakteristiky lana [5]

přenáší pouze normálovou sílu. Je-li lano zavěšené mezi dvěma neposuvnými klouby a zatížené obecným svislým spojitým zatížením  $q(x)$  rozloženým po vodorovném průmětu lana, bude toto lano po ustálení zaujímat výslednicový tvar k tomuto zatížení a zvolené hodnotě vodorovné síly  $H$ . Svislou polohu jednotlivých bodů této křivky lze odvodit s pomocí prostého nosníku, který je zatížen shodným zatížením jako lano (viz. obr. 3.6). Ze statických podmínek rovnováhy vnitřních sil na elementu  $ds$  vyplývá, že zvolená konstantní horizontální síla  $H$  a rovnice průvřesové křivky lana.

$$H = \text{konst.}$$

Rovnice průvřesové křivky je dána vztahem:

$$y(x) = \frac{M(x)}{H} + \frac{h}{l} \cdot x = f(x) + x \cdot \tan \beta$$

kde  $M(x)$  je moment na prostém nosníku v místě  $x$ .

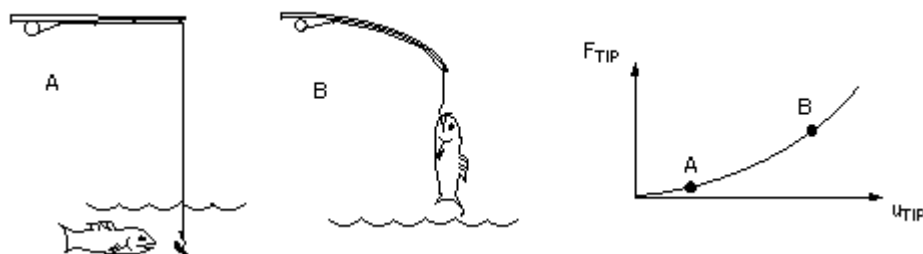
Je tak zřejmé, že průvřesová křivka lana je afinní vůči momentovému obrazci na prostém nosníku. Pokud je tedy zatížení  $q(x)$  rovnoměrné, bude tvar průvřesové křivky lana parabola druhého stupně [4, 5]. V našem případě máme lanovou síť zatíženou v prvotní fázi osamělými silami idealizující tíhu panelů. Pro nalezení geometrické rovnováhy, tzv. výchozího tvaru, numerického a popř. i reálného modelu, musíme iteračně hledat vodorovnou sílu  $H$  pro každé lano lanové sítě. Bylo vytvořeno makro, pomocí něhož tato iterace probíhala do té doby, než byla složka deformace celé konstrukce od zatížení sil nulová.

### 3.2.2 Geometrická nelinearita, výpočetní metoda, příčná tuhost lana

Z předešlé kapitoly jednoznačně vyplývá, že tvar lana je závislý na zatížení díky nulové ohybové tuhosti tohoto prvku. Tento fakt má za následek nadměrnou deformaci lanové sítě, pokud není dosaženo jejího výchozího tvaru. Řešenou konstrukci tedy musíme posuzovat jako geometricky nelineární dle teorie velkých deformací, neboť nemůžeme během výpočtu zajistit, aby byly splněny tři podmínky pro užití teorie deformací malých, které jsou následující [6]:

1.  $\varepsilon_{ij} \ll 1$ , tedy že poměrná deformace (translační či úhlová) v řešeném bodě je mnohem menší než 1.
2. Největší posuny jsou řádově menší než nejmenší rozměr tělesa.
3. Největší vzájemné pootočení diferenciálních úseček před a po deformaci jsou menší než  $3^\circ$ .

Demonstrace geometrické nelinearity (či teorie velkých deformací) je znázorněna obrázkem 3.7 pomocí rybářského prutu. Na grafu můžeme sledovat nelinearitu posunu stejného bodu v závislosti na velikosti zatížení.



Obrázek 3.7 Demonstrace geometrické nelinearity pomocí rybářského prutu [7]

Geometrické rovnice, jež spolu s fyzikálními rovnicemi a rovnicemi rovnováhy představují základ pro řešení teorie pružnosti, popisují vztah mezi vektorem posunů a vektorem deformací. Vektor deformací pro libovolný řešený bod konstrukce obsahuje 6 členů, a to 3 členy objemové deformace

(odpovídají translaci) a 3 členy úhlové deformace (odpovídají rotaci). Vektor posunů obsahuje v kartézském souřadném systému 3 členy posunů přiřazených k ose x, y a z.

Vektor složek posunutí

$$\mathbf{u} = \{u_x, u_y, u_z\}^T$$

Vektor složek deformací:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}\}^T$$

Vztah mezi vektorem posunutí a vektorem deformací, ze kterého na základě počtu jejich složek vyplývá 6 geometrických rovnic, je uveden níže. Geometrická nelinearita je zohledněna pomocí nelineárního operátoru  $\Gamma_N$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = f(\mathbf{u})$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \Gamma_L \mathbf{u} + \Gamma_N \mathbf{u}$$

Po roznásobení vektorů operátory a po rozepsání složek, vypadá výsledný maticový tvar rovnice takto [6]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{du_x}{dx} \\ \frac{du_y}{dy} \\ \frac{du_z}{dz} \\ \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} \\ \frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dy} \\ \frac{du_x}{dz} + \frac{du_z}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \left(\frac{du_x}{dx}\right)^2 + \left(\frac{du_y}{dx}\right)^2 + \left(\frac{du_z}{dx}\right)^2 \\ \left(\frac{du_x}{dy}\right)^2 + \left(\frac{du_y}{dy}\right)^2 + \left(\frac{du_z}{dy}\right)^2 \\ \left(\frac{du_x}{dz}\right)^2 + \left(\frac{du_y}{dz}\right)^2 + \left(\frac{du_z}{dz}\right)^2 \\ 2\left(\frac{du_x}{dx} \cdot \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} \cdot \frac{du_y}{dy} + \frac{du_z}{dx} \cdot \frac{du_z}{dy}\right) \\ 2\left(\frac{du_x}{dy} \cdot \frac{du_x}{dz} + \frac{du_y}{dy} \cdot \frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dy} \cdot \frac{du_z}{dz}\right) \\ 2\left(\frac{du_x}{dz} \cdot \frac{du_x}{dx} + \frac{du_y}{dz} \cdot \frac{du_y}{dx} + \frac{du_z}{dz} \cdot \frac{du_z}{dx}\right) \end{Bmatrix}$$

Z uvedených poznatků tedy vyplývá, že změna geometrie konstrukce má podstatný vliv na její tuhost. V obecné rovnici rovnováhy z teorie pružnosti se tento fakt projevuje tak, že celková matice tuhosti  $[K]$  je funkcí vektoru uzlových deformací  $\mathbf{u}$ .

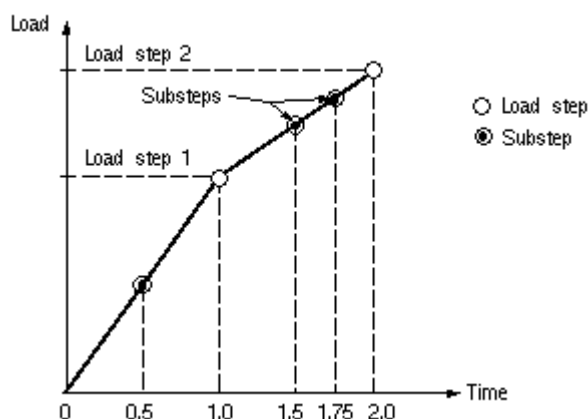
$$[K](\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

$[K](\mathbf{u})$  - celková matice tuhosti

$\mathbf{u}$  - vektor uzlových deformací

$\mathbf{F}$  - celkový zatěžovací vektor

Ve výpočetním softwaru Ansys nastavíme předpoklad geometricky nelineárního chování konstrukce v nastavení řešiče, kdy zvolíme použití teorie velkých deformací (příkaz NLGEOM,ON). Výpočet odezvy geometricky nelineární konstrukce na zatížení nelze řešit najednou přímým výpočtem. V softwaru je proto použita úplná Newton-Raphsonova iterační metoda neboli metoda tečen. Jednotlivé zatěžovací stavy, které jsou v analýze fázované výstavby reprezentovány jednotlivými časy (time 1 – 5), jsou rozděleny na několik podkroků (substeps) a ty dále do několika rovnovážných iterací tak, aby byla dosažena konvergence řešení. Mezi jednotlivými podkroky se úloha řeší lineárně. Zatížení je možno přidávat na konstrukci buď v prvním kroku najednou v plné výši (ramped), anebo postupně po částech mezi jednotlivými podkroky. V našem případě bylo nutné nastavit v některých zatěžovacích stavech z důvodů špatné konvergence až 1000 podkroků (např. pro čas 1 – výchozí tvar lanové sítě) a zatížení přidávat postupně během celé analýzy (příkaz KBC,1) [8].



Obrázek 3.8 Nelineární analýza v softwaru ANSYS, postupné zatěžování konstrukce [7]

### Zvolená výpočetní metoda v softwaru ANSYS

Konstrukci byla posuzována jako časově závislá fázovaná výstavba, kdy každý čas představoval zatěžovací stav. Pro celou analýzu byla použita úplná dynamická analýza (Full transient dynamic analysis neboli time-history analysis, příkaz ANTYPE,4), jejíž rovnice rovnováhy je oproti klasické statice rozšířena o 2 členy.

$$[M]\ddot{\mathbf{u}} + [C]\dot{\mathbf{u}} + [K]\mathbf{u} = \mathbf{F}(t)$$

$\mathbf{u}$  - vektor uzlových deformací

- $\dot{\mathbf{u}}$  - vektor uzlových rychlostí
- $\ddot{\mathbf{u}}$  - vektor uzlových zrychlení
- $[M]$  - celková matice hmotnosti
- $[C]$  - celková matice tlumení
- $[K]$  - celková matice tuhosti
- $\mathbf{F}(t)$  - celkový zatěžovací vektor

Tato metoda zajišťovala hladší průběh konvergence pro čas 1, kdy se hledal výchozí tvar konstrukce. V prvotním modelu jsem vymodeloval lana jako přímky, což byla jistá chyba, neboť software si se zatíženými lany (jako s prvky nulové ohybové tuhosti) nevěděl rady. Nenacházel konvergenci, zatížení způsobovalo nadměrné deformace či případný deformovaný tvar lan neodpovídal očekávané skutečnosti. Pro budoucí řešitele lanové problematiky v softwaru ANSYS či případné čtenáře této práce by její autor doporučil modelovat lana již od počátku parabolicky a vnést do nich ihned libovolné vnitřní přetvoření, které se pak bude měnit při hledání výchozího rovnovážného stavu.

V důsledku nadměrného kmitání konstrukce při výměně zatížených lan za skořepinu byly pro plnou dynamickou analýzu nastaveny koeficienty proporcionálního útlumu, nazývaného také Rayleighho model útlumu, na následující hodnoty.

$$\alpha = 61, \beta = 0,05$$

kde  $\alpha$  je násobitel matice hmotnosti  $[M]$  a  $\beta$  je násobitel matice tuhosti  $[K]$ . Rayleighho model útlumu stanovuje matici poddajnosti  $[C]$  jako lineární kombinaci matic hmotnosti a tuhosti konstrukce. [6]

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K]$$

Pro simulaci postupné výstavby ve výpočetním softwaru ANSYS byla použita jeho možnost zmrazit a následně oživit vybrané elementy řešené konstrukce, tedy funkce „BIRTH and DEATH (příkazy EALIVE a EKILL). V prvotní fázi jsou kupříkladu v čase 1 „aktivní“ pouze elementy nosných lan, avšak prvky ostatních částí skořepiny se deformují spolu s nimi, neboť jsou také obsaženy v matici tuhosti. Jsou však přenásobeny redukčním součinitelem  $1e-6$  a tak je jejich tuhost pro tento čas zanedbatelná. V následujících časech jsou postupně oživeny a jejich plná tuhost vstupuje do výpočtu. Takto byly postupně ožívány elementy pro každý čas postupné výstavby popsané v kapitole 3.5.

### Stress stiffening – Tahové zpevnění

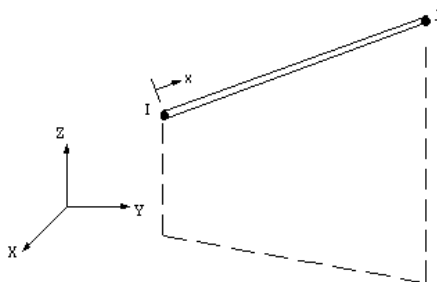
Ve výpočtu byla zohledněna tuhost lanových prvků membrány daná jejich tahovým přetvořením (Stress Stiffness, příkaz SSTIF a PSTRES,ON), čímž zajistíme, aby matice prvku (elementu) lana (v našem případě Link8) nebyla singulární. Tato tahová tuhost zjednodušeně demonstruje fakt, že čím více membránu napneme (táhneme), tím bude její deformace nižší a naopak. Stress stiffening byl námi zohledněn po celou dobu analýzy. Příčná tuhost je u většiny prvků v softwaru aktivována automaticky, pokud je konstrukce posuzována pomocí teorie velkých deformací.

#### 3.2.3 Použité konečné prvky

Výpočetní model byl vytvořen z databáze konečných prvků softwaru ANSYS. Následující výčet popisuje stručné charakteristiky použitých prvků v našem modelu.

#### LINK8

Prvek LINK8 byl použit pro modelování všech typů lan v modelu. Jedná se o prvek s nulovou ohybovou tuhostí, který přenáší pouze normálové síly a v konstrukci se chová jako kloubově připojený. Je definován pomocí dvou uzlů I a J, kdy každý z těchto uzlů má tři stupně volnosti. S výhodou se u tohoto prvku využila jeho průřezová charakteristika počátečního poměrného přetvoření či počáteční napjatosti (Instr – initial strain), pomocí které jsme do lan vnášeli předpětí, ať už při hledání výchozího rovnovážného stavu nebo při předpínání monostrandů.

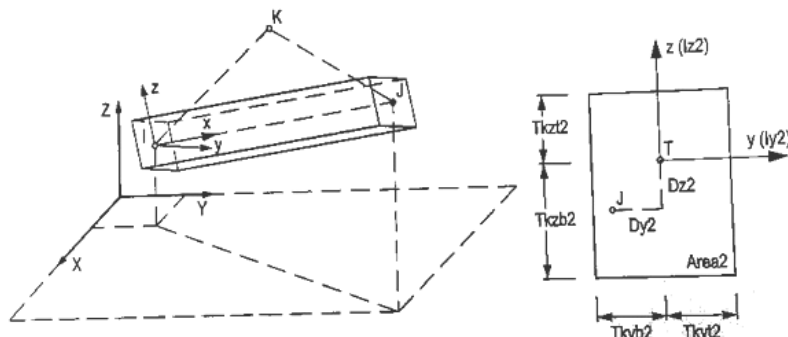


Obrázek 3.9 Schéma prvku LINK8 [7]

Počet uzlů:	2
Stupně volnosti v uzlu:	$U_x, U_y, U_z$
Průřezové charakteristiky:	Area, Instr
Materiálové charakteristiky:	$E_x, \alpha_{px}, \text{Dens}$

## BEAM44

BEAM44 je prutová prvek s osovou, ohybovou a torzní tuhostí s možností zahrnutí vlivu smykových deformací. Prvek má 6 stupňů volnosti každém uzlu, přičemž je definován dvěma uzly (I, J) nebo třemi (I, J, K), kdy třetí uzel slouží k případné orientaci prvku. Důležitou vlastností tohoto prvku je možnost zadání excentricity těžištní osy od osy elementu pomocí vytvořené sekce (section) k tomuto prvku. Tímto prvkem byly vymeshovány žebra panelů skořepiny.

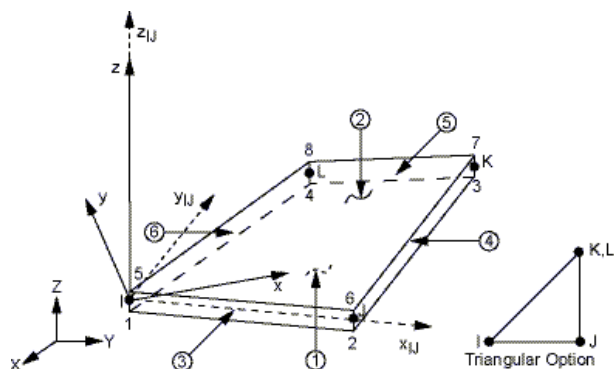


Obrázek 3.10 Schéma prvku BEAM44 [9]

Počet uzlů:	2
Stupně volnosti v uzlu:	$U_x, U_y, U_z, Rot_x, Rot_y, Rot_z$
Průřezové charakteristiky:	$Area1, I_{z1}, I_{y1}, I_{x1}, T_{kzb1}, T_{kyb1},$ $Area2, I_{z2}, I_{y2}, I_{x2}, T_{kzb2}, T_{kyb2},$ $D_{x1}, D_{y1}, D_{z1}, D_{x2}, D_{y2}, D_{z2},$ $T_{kzt1}, T_{kzt2}, T_{kzt2}, T_{kzt2}, Instr, Shear_z, Shear_y$
Materiálové charakteristiky:	$E_x, \alpha_{px}, Dens, G_{xy}$

## SHELL181

Prvek SHELL181 byl užit pro modelování prefabrikovaných panelů, který umožňuje geometricky nelineární výpočty s velmi zakřivenou (zborcenou) střednicovou plochou. Je definován 4 uzly (I, J, K, L), kdy každý z těchto uzlů má 6 stupňů volnosti. V těchto čtyřech uzlech nám prvek umožňuje zadat různou tloušťku skořepiny nebo vymodelovat skladbu sendvičové konstrukce, to však v našem případě nebylo potřeba. Vyhodnocování vnitřních sil bylo provedeno v souřadném systému prvku, který byl shodný pro všechny elementy skořepiny.



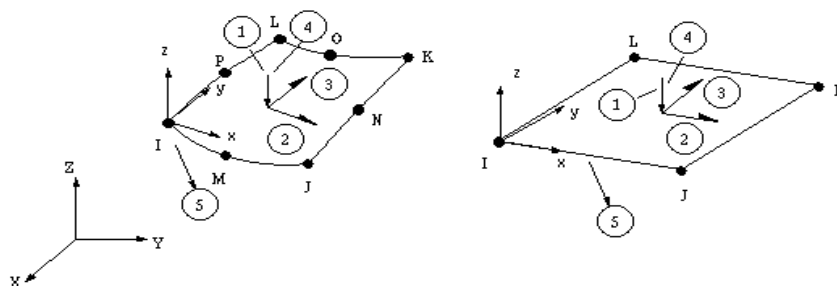
Obrázek 3.11 Schéma prvku SHELL181



Počet uzlů:	4
Stupně volnosti v uzlu:	$U_x, U_y, U_z, Rot_x, Rot_y, Rot_z$
Průřezové charakteristiky:	$T_k(I), T_k(J), T_k(K), T_k(L), \Theta, Admsua$ E11, E22, E12, DRILL, MEMBRANE, BENDING
Materiálové charakteristiky:	EX, EY, EZ ALPX, ALPY, ALPZ DENS, GXY, GYZ, GXZ

### SURF154

SURF154 je prvek k určení zadávání zatížení na skořepinu. Tento prvek je vždy vygenerován v soumězné poloze se skořepinovým prvkem SHELL181 (příkaz ESURF) a nemá žádnou tuhost či hmotnost. Zatížení může být aplikováno v různých směrech, kdy ostatní stálé zatížení bylo modelováno kolmo ke střednicové ploše skořepiny a zatížení sněhem pro její půdorysný průmět.



Obrázek 3.12 Schéma prvku SURF154

Počet uzlů:	4-8
Stupně volnosti v uzlu:	$U_x, U_y, U_z$
Průřezové charakteristiky:	-
Materiálové charakteristiky:	-

#### 3.2.4 Dokonalá tuhost obvodového prstence

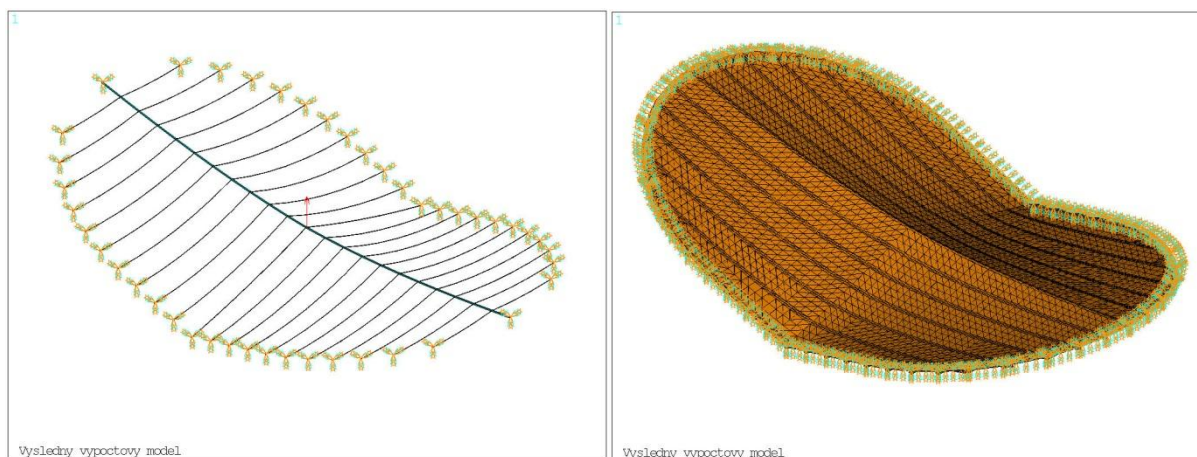
Prostorová geometrie námi navrženého obvodového prstence je popsána pomocí výkresu tvaru skořepiny a také v kapitole 3.1. Skládá se ze dvou částí, elipsy a přímky. S ohledem na návrh lanové sítě můžeme předem předvídat jeho velké ohybové namáhání od tažených lan. Největší ohybové namáhání prstence dochází při prvotním napnutí lan a také při pokládce panelů při montáži skořepiny. Avšak správně navržený tvar obvodového prstence by měl být takový, aby byl jeho celý průřez od reakcí z lanové sítě tlačeny.

Existuje obecný postup jak nalézt vhodný tvar prstence při vhodném návrhu lanové sítě. S výhodou můžeme opět užít prostého nosníku, kdy hledaný tvar prvku konstrukce definuje průběh ohybových momentů (tzv. ohybová čára) od daného zatížení. Pokud zajistíme, aby reakce od lanové sítě působily na celý prstenec spojitě rovnoměrně, jeho nejvhodnějším tvarem bude parabola druhého stupně. Proto se používají zastřešení typu hyperbolického paraboloidu, jako je hala v Calgary, nebo

s kruhovým či eliptickým půdorysným tvarem, a to s radiální či ortogonální lanovou sítí, který lze vidět u mnohých zastřešení moderních stadionů.

V naší konstrukci nese jedno nosné lano většinu váhy střechy, neboť je v podélném směru osamoceno. V Příčném směru jsou lano rozmístěna půdorysně po 2,91 m. Lze tedy předvídat, že namáhání v hlavním nosném lanu bude několika násobně vyšší než v nosných lanech příčných. Pokud bychom zanedbali příčná lano, ideální tvar pro obvodový prstenec znázorňuje průběh ohybových momentů na prostém nosníku od osamělé síly působící v jeho středu. Vhodným tvarem prstence zatíženého osamělou reakcí lano by tedy bylo písmeno V.

Jelikož příčná lano zanedbat nelze, stává se návrh naší konstrukce velice komplikovaný. Ze statického hlediska je navržená geometrie obvodového prstence nevhodná. Tento fakt se projeví hlavně u velkých rozměrů konstrukce s velkým rozpětím lan. Při hledání výchozího tvaru konstrukce (rovnovážného stavu) by se tak zároveň s lany nemístně deformoval i obvodový prstenec. Z výše uvedených důvodů byl zaveden předpoklad jeho dokonalé tuhosti a ve výpočtech je nahrazen vetknutým podepřením kolem celé skořepiny. Tato idealizace je dost zásadní, co se týče posuzování konstrukce jako celku. Diplomová práce, s ohledem na náročnost problematiky, tedy byla omezena na posouzení části konstrukce zastřešení, a to na posouzení předepnuté membrány podepřené visutým lanem po obvodě vetknuté.



Obrázek 3.13 Výsledný výpočtový model – lano (čas 1) a aktivace skořepiny (čas 2)

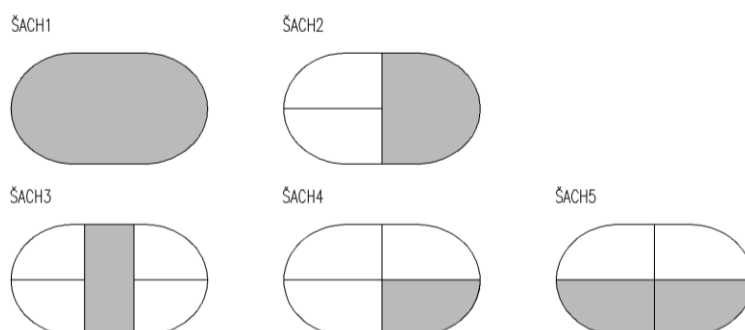
### 3.2.5 Klimatické zatížení konstrukce

#### Zatížení větrem

Problematiku idealizace zatížení větrem u takto složitých geometrických tvarů konstrukcí normy nepopisují. Bylo by tedy nutné vytvořit zmenšený model konstrukce a sledovat jeho odezvu ve větrných tunelech nebo simulovat zatížení větrem pomocí numerického modelu mechaniky proudícího kontinua (CFD). Proto bylo rozhodnuto zatížení větrem v diplomové práci opomenout.

### Zatížení sněhem

Obdobně i zatížení sněhem vyžaduje výzkumný přístup pomocí reálného modelu či CFD. Nemůžeme totiž dopředu odhadnout, v jakém místě se sníh může hromadit. S ohledem na možný způsob hromadění sněhu přírodními vlivy i možnou údržbou střechy (odhazováním sněhu se střechy), bylo stanoveno pět zatěžovacích stavů od zatížení sněhem. Jednotlivé stavy jsou zobrazeny na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14 Šachy pro zatížení sněhem

### 3.2.6 Odchylky výpočetního modelu od reálného působení

Jednou z odchylek výpočetního modelu od reálného působení konstrukce je statické chování prefabrikovaných panelů při jejich pokládce ve fázi před zmonolitněním spár mezi nimi. Vnitřní žebra panelů tak přenáší většinu jejich tíhy a působí jako „proste nosníky“ s rozpětím o vzdálenosti mezi 2 příčnými nosnými lany (3 m). Navrhovaná časová analýza však tento jev nezohledňuje – viz kapitola níže. Výměna zatížených lan osamělými silami za spojitou skořepinu způsobí, že žebra skořepiny působí jako spojité nosníky, kdy kladné ohybové momenty vznikají ve spárách mezi panely. Abychom tuto chybu opravili, bude nutno tyto vnitřní síly (napětí) ve spárách při posuzování průřezu, ať už na MSP či MSÚ, odečíst od ostatních fází časované analýzy. Lze předpokládat, že tato napětí od aktivace skořepiny může také navyšovat nepřesná záměna tíhy, kterou představují osamělé síly na lanech, za vlastní tíhu modelované skořepiny.

V modelu byla zanedbána také výztuž ve spárách, která by určitě zvyšovala tuhost konstrukce jako celku. Například výztuž vyvedená z panelů při horním okraji spár, rektifikační podložky či samotná podélná výztuž věnců.

### 3.3 Postup výstavby skořepiny

Snahou práce bylo s ohledem na předešlou kapitolu 3.2, co nejlépe popsat postup výstavby řešené skořepiny od nalezení jejího výchozího tvaru až po finální působení. Jelikož předpokládáme dokonalou tuhost obvodového prstence skořepiny, odpadá nám starost o jeho ohybové namáhání, které by bylo klíčové pro návrh velikosti předpětí nosných lan. Tento fakt nám může demonstrovat i postup výstavby haly Saddledome v Calgary, o které byla zmínka v textové části této diplomové práce,

uvedený v citované literatuře [9], kdy kabely lanové sítě (stabilizační lana) byly napínány postupně za účelem toto namáhání co nejvíce omezit.

1. Osazení nosných kabelů pomocí metody nenapjaté délky lana. Kabely jsou zakotveny do prstence v konečné délce a nebudou dále dopínány.
2. Osazení stabilizačních kabelů lanové sítě.
3. První předepnutí stabilizačních kabelů přibližně na polovinu hodnoty konečné normálové síly.
4. Osazení všech prefabrikovaných panelů na lanovou síť tak, aby byl prstenec namáhán symetricky ohybovými momenty než v předchozí fázi.
5. Dopnutí stabilizačních kabelů.
6. Osazení předpínacích kabelů do spár mezi prefabrikáty.
7. Zmonolitnění spár. V tomto okamžiku je konstrukce v tzv. **Výchozím rovnovážném stavu**.
8. Po zatuhnutí spár následuje předepnutí skořepiny pomocí předpínacích kabelů.
9. Montáž střešního pláště.

V diplomové práci nebyl z hlediska časové analýzy simulován výše uvedený postup a byl zjednodušen na 5 fází (časů) výstavby, kdy byla konstrukce posuzována od jejího výchozího tvaru pouze směrem vpřed k jejímu finálnímu stavu. Byl tak opomenut postup výstavby osazování panelů, napínání lan a jejich kotvení či případná výstavba konstrukce, která je popsána v části P3.

**Posuzovaná časová analýza se v našem případě skládá z těchto fází:**

- Čas 1 Výchozí rovnovážný stav** = lana zatížená osamělými silami. Síly charakterizující hmotnost skořepiny (panely + zmonolitněné spáry)
- Čas 2 Výchozí rovnovážný stav – Aktivace skořepiny** = nahrazení silových účinků vymodelovanou skořepinou. Je zřejmé, že dokonale přesně vytvořený model musí mít shodnou odezvu na zatížení jako model v čase 1. Proto obojí časy můžeme nazvat výchozím rovnovážným stavem.
- Čas 3 Předepnutí skořepiny** = vnesení tlakové rezervy do betonové skořepiny pomocí předpínacích kabelů monostrand umístěných ve spárách mezi kabely.
- Čas 4 Ostatní stálé zatížení – zhotovení střešního pláště**
- Čas 5 Klimatické zatížení - zatížení sněhem**

Touto fázovanou výstavbou byla v diplomové práci plně posouzena pouze kombinace zatížení, která obsahuje šach 1 od zatížení sněhem. Byla totiž dopředu provedena časovaná analýza bez předpětí (tedy bez času 3), kdy sněhem plně zatížená nepředepnutá střešní membrána způsobovala

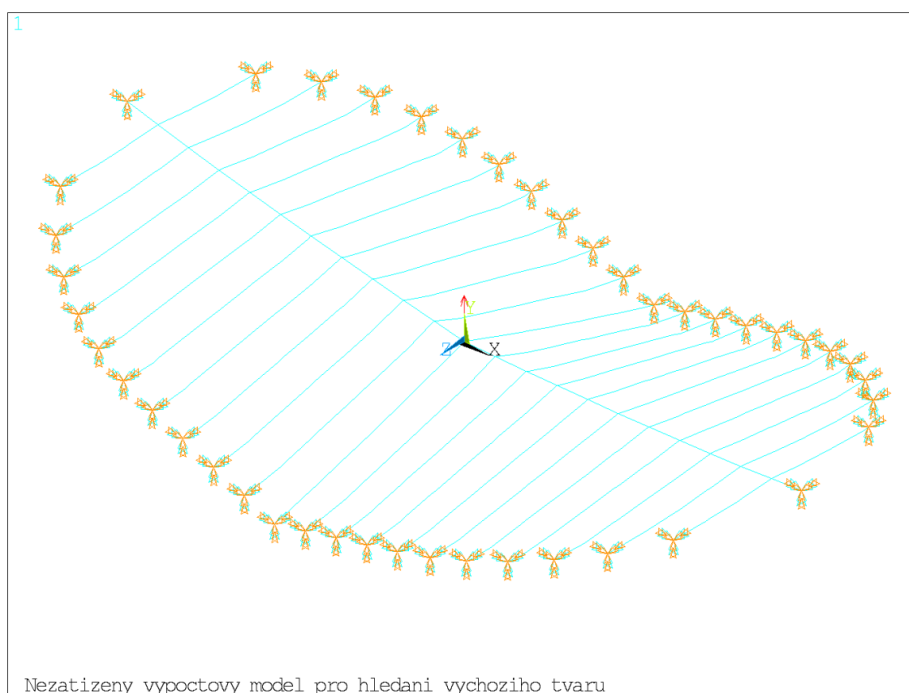
největší namáhání, tedy nejnepříznivější odezvu, viz 3.2.5. Veškeré další kombinace a jejich namáhání jsou ale pomocí obrázků zobrazeny v příloze statického výpočtu P5.

### 3.4 Hledání výchozího rovnovážného stavu

Rovnovážný stav konstrukce nastává tehdy, pokud jsou její deformace od působícího zatížení nulové. Výchozí rovnovážný stav (z geometrického hlediska výchozí tvar) je rozhodující rovnovážný stav konstrukce membrány z hlediska statického posouzení. Od tohoto stavu můžeme sledovat odezvu skořepinu směrem dozadu, tedy analyzovat postup výstavby (napínání lan), nebo vpřed směrem k jejímu posouzení finálního stavu působení na mezní stavy únosnosti a použitelnosti.

Jak již bylo naznačeno, za výchozí rovnovážný stav lze v našem případě vzít v úvahu 2 fáze časové analýzy, které by měly mít shodnou odezvu (deformaci) na působící zatížení. Jedná se o fázi, kdy je lanová síť zatížena pouze silovými účinky, které demonstrují hmotnost skořepiny, a fází kdy jsou tyto síly nahrazeny vymodelovanou skořepinou. Silové účinky by tedy měly odpovídat vlastní tíze skořepiny.

Jak již bylo popsáno v kapitole 3.2.2 v textu o výpočetní metodě, lana byla původně „chybně“ modelována jako přímky a software dlouze hledal konvergenci a tvar deformované lanové sítě. Pro urychlení výpočtového času se tedy přistoupilo k řešení spustit výpočet lanové sítě zatížené pouze vlastní tíhou (příkaz ACEL) a původní geometrii modelu modifikovat na geometrii deformovaných lan od vlastní tíhy (příkaz NMODIF), čímž se z přímkových lan stala lana parabolická. Silově nezatížený výpočtový model pro hledání výchozího tvaru je pak zobrazen na obrázku 3.15 níže, kde jsou vymodelovaná zatím silově nezatížená nosná lana.



Obrázek 3.15 Výpočtový model pro hledání výchozího tvaru

Makro, které tuto opravu umožnilo, je zobrazeno v programovacím jazyku APDL zde:

```

allsel                ! Výběr všech částí modelu
modmsh,deta          ! Oddělení elementů od modelovacích entit (přímek, ploch, ...)
*get,pocet,node,0,count ! Proměnná „pocet“ definuje počet (množství) uzlů prvků
/post               ! Postprocessor
*dim,posuny,array,pocet,7,1 ! Vytvoření tabulky „posuny“ o 7 sloupcích a „pocet“ řádcích
*do,i,1,pocet,1      ! Spust' cyklus od 1 do „pocet“ s krokem 1
*get,uzel,node,0,num,min ! Proměnná „uzel“ definuje uzel s nejnižším číslem ve výběru
*set,posuny(i,1,1),uzel ! Do tabulky posuny se vepíše do 1. řádku a sloupce číslo uzlu
*get,x,node,uzel,loc,x ! Získ souřadnic „x“, „y“, „z“ řešeného uzlu z původní nedeformované
                        ! geometrie
*get,y,node,uzel,loc,y
*get,z,node,uzel,loc,z
*set,posuny(i,2,1),x  ! Zápis těchto souřadnic do tabulky „posuny“ do příslušných sloupců
*set,posuny(i,3,1),y
*set,posuny(i,4,1),z
*get,Ux,node,uzel,u,x ! Získ hodnot deformací „Ux“, „Uy“, „Uz“ řešeného uzlu z po
                        ! výpočtu konstrukce
*get,Uy,node,uzel,u,y
*get,Uz,node,uzel,u,z
*set,posuny(i,5,1),Ux ! Zápis těchto hodnot do tabulky „posuny“ do příslušných sloupců
*set,posuny(i,6,1),Uy
*set,posuny(i,7,1),Uz
nset,u,,uzel         ! Odváběr řešeného uzlu
*enddo               ! Ukončit cyklus dokud se neprojdou všechny uzly

fini
/prep7               ! Preprocessor
allsel
*do,i,1,pocet,1      ! Spust' cyklus od 1 do „pocet“ s krokem 1
nmodif,posuny(i,1,1),posuny(i,2,1)+posuny(i,5,1),posuny(i,3,1)+posuny(i,6,1),posuny(i,4,1)+posuny(i
,7,1)                ! Modifikace souřadnic uzlů (od souřadnice se odečítá deformace)
*enddo               ! Ukončení cyklu
allsel
    
```

Stejně makro se s výhodou užilo i pro hledání výchozí tvaru konstrukce při jeho finálním nalezení či spíše vyladění. Postup hledání výchozího tvaru bude v této kapitole detailně rozepsán. Dalším krokem po vytvoření výpočtového modelu pro hledání výchozího tvaru lanové sítě, a potažmo i celé skořepiny, bylo stanovení silových účinků zatížení na nosná příčná lana.

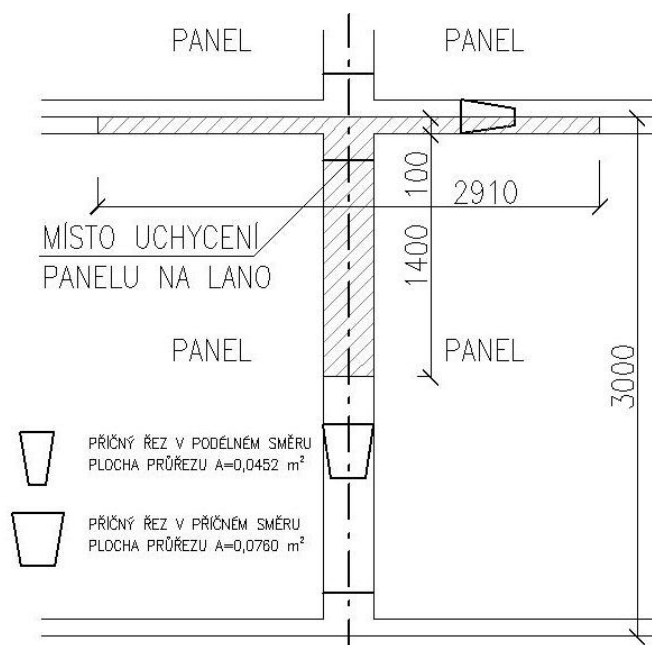
### 3.4.1 Stanovení silových účinků na nosná příčná lana

Silové účinky byly stanoveny na základě tíhy panelu a tíhy betonu ve spárách mezi panely (tíhy betonové zálivky). Působíště sil na jednotlivých lanech vychází z navržené skladby (z kladecího plánu) prefabrikovaných panelů. Je tedy v místě uchycení vyvedené výztuže žeber na jednotlivá lana. V kapitole 2.1.3 je stanovena hmotnost panelu a následně reakce od vlastní tíhy panelu v místě jeho uložení.

Reakce v podpoře od vl. tíhy od 1 panelu:  $R_0 = F_0/4 = 22,04/4 \doteq 5,51 \text{ kN}$

Reakce od vlastní tíhy panelů se v místě uložení musí vynásobit dvakrát, neboť se zde stýkají dva sousedící panely.

Reakce v místě uložení od tíhy panelů:  $R_0 = F_0/2 = 22,04/2 \doteq 11,02 \text{ kN}$



Obrázek 3.16 Schéma pro stanovení silového účinku na lano

Silový účinek zatížení od tíhy betonu ve spárách se stanoví na základě plošných průřezů spáry podélným a příčným směru a rozměrů zatěžovací plochy, která případně místu uchycení. Zatěžovací

plocha je znázorněna šrafovou na obrázku výše. Reakce v místě uložení od tíhy betonové zálivky se pak stanoví:

Objem betonové zálivky:

$$V_z = \frac{0,0452}{2} \cdot 2,91 + 0,076 \cdot 1,4 \doteq 0,1721 \text{ m}^3$$

Reakce v místě uložení od tíhy betonové zálivky:

$$R_z = V_z \cdot \rho \cdot g = 0,1721 \cdot 2200 \cdot 9,81 \doteq 3,625 \text{ kN}$$

Výsledná síla se poté rovná součtu sil  $R_0$  a  $R_z$ .

$$F = R_0 + R_z = 11,02 + 3,625 = 14,645 \text{ kN}$$

Výslednou silou  $F$  byla zatížena všechna místa předpokládaného podepření uprostřed skořepiny s výjimkou podepření po krajích kolem obvodového prstence, kde se musela pro každé lano stanovit zvlášť. Prstenci po krajích byla přiřazena část tíhy krajních panelů A typů a z výsledné zbylé hmoty panelů pak i tyto síly stanoveny. Jejich stanovení zde není z důvodu pracnosti uvedeno, avšak jejich výsledné hodnoty lze odečíst přímo ze softwaru. Veškeré síly se zadaly na předem připravené nody na lanech. V softwaru byla zatížena pouze jedna čtvrtina lanové sítě a poté pomocí makra, byly jednotlivé síly vepsány do tabulky a z tabulky dalším makrem rozprostřeny po celém modelu. Druhé jmenované makro se užívalo po celou časovou analýzu i po nalezení výchozího tvaru.

Makro pro uložení sil do tabulky „sily“:

```
*get,pocet,node,0,count      ! Proměnná „pocet“ definuje počet (množství) uzlů prvků
*dim,sily,array,pocet,4,1    ! Vytvoř tabulku „sily“ o „pocet“ řádcích a 4 sloupcích
uzel=0                       ! Proměnná „uzel“ se rovná nule
*do,i,1,pocet,1              ! Cyklus
uzel=ndnext(uzel)            ! Výběr řešeného uzlu
*get,lx,node,uzel,loc,x      ! Stanovení proměnných souřadnic řešeného uzlu a jeho zatížení
*get,ly,node,uzel,loc,y
*get,lz,node,uzel,loc,z
*get,nf,node,uzel,f,fy
*set,sily(i,1,1),lx           ! Zápis souřadnic uzlů a zatížení do tabulky
*set,sily(i,2,1),ly
*set,sily(i,3,1),lz
*set,sily(i,4,1),nf
*enddo,i                     ! Ukončení cyklu
```



Makro pro vložení sil z tabulky „sily“ do výpočetního modelu:

```
*do,i,1,pocet,1          ! Cyklus pro první čtvrtinu lanové sítě
nrel,s,loc,x,sily(i,1,1)  ! Výběr řešeného uzlu se souřadnicemi x, y, z
nrel,r,loc,y,sily(i,2,1)
nrel,r,loc,z,sily(i,3,1)
F,all,FY,sily(i,4,1)      ! Pokud obsahuje řešený uzel sílu, zatíží se
*enddo,i                  ! Ukončení cyklu
allsel

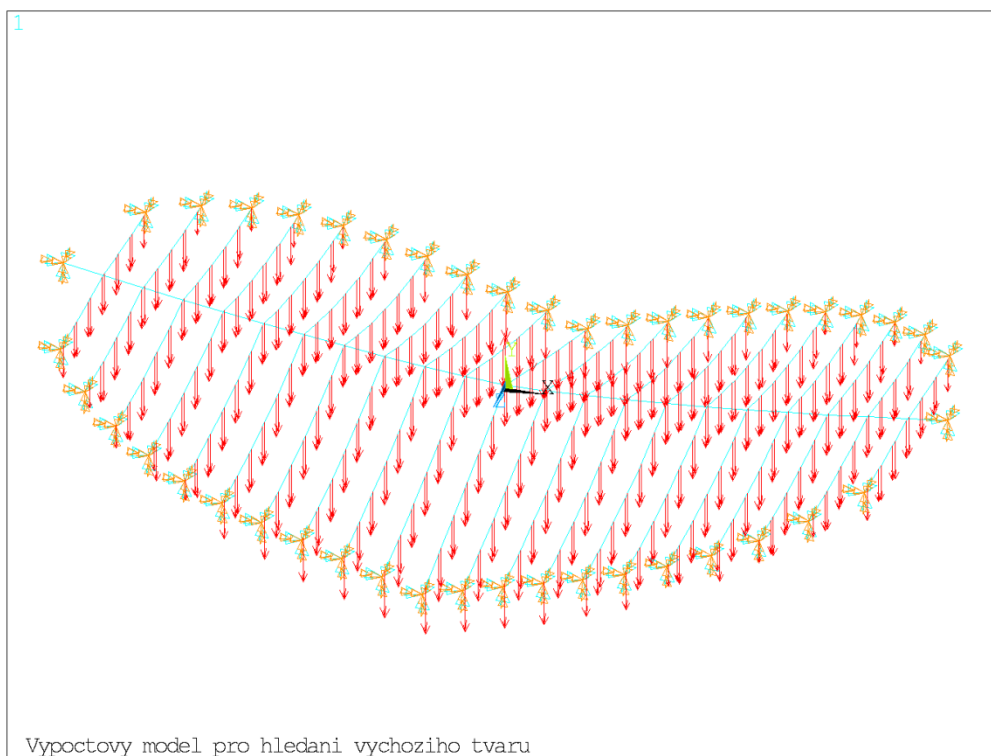
! Další tři cykly jsou pro vložení sil do zbylých čtvrtin lanové sítě

*do,i,1,pocet,1
nrel,s,loc,x,-sily(i,1,1)
nrel,r,loc,y,sily(i,2,1)
nrel,r,loc,z,sily(i,3,1)
F,all,FY,sily(i,4,1)
*enddo,i
allsel

*do,i,1,pocet,1
nrel,s,loc,x,-sily(i,1,1)
nrel,r,loc,y,sily(i,2,1)
nrel,r,loc,z,-sily(i,3,1)
F,all,FY,sily(i,4,1)
*enddo,i
allsel

*do,i,1,pocet,1
nrel,s,loc,x,sily(i,1,1)
nrel,r,loc,y,sily(i,2,1)
nrel,r,loc,z,-sily(i,3,1)
F,all,FY,sily(i,4,1)
*enddo,i
allsel
```

Výsledný model pro hledání výchozího rovnovážného stavu zatížený silami je zobrazen na obrázku 3.17.



Obrázek 3.17 Výpočtový model pro hledání výchozího tvaru

### 3.4.2 Nalezení výchozího tvaru

Při hledání výchozího tvaru bylo nejprve nutno stanovit horní mez pro napětí v lanech. Tedy horní hodnotu napětí v předpínací výztuži v čase nekonečno, tzn. po započtení okamžitých a provozních ztrát předpětí v lanech, která se nesmí v lanech překročit. Tím by byl zohledněn úbytek předpínací síly v čase. Ztráty předpínací síly ve výztuži nejsou v diplomové práci vypočteny a jsou odhadem stanoveny hodnotou 10 % pro ztráty okamžité a 5 % pro ztráty dlouhodobé. Pro analýzu byla použita předpínací výztuž s charakteristickou hodnotou pevnosti předpínací výztuže v tahu 1860 MPa, tedy s označením Y1860S7-15,7-A. Návrh vycházel z podkladů pro předpínací systém firmy VSL.

#### Postup horní meze napětí $\sigma_{pm\infty}$ po započtení všech ztrát

$$\sigma_{p,max} \leq \min \{0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}\}$$

$$\sigma_{p,max} \leq \min \{0,8 \cdot 1860; 0,9 \cdot 1640\}$$

$$\sigma_{p,max} \leq 1440 \text{ MPa}$$

$\sigma_{p,max}$  - maximální napětí v předpínací vložce při napínání

$f_{pk}$  - charakteristická hodnota pevnosti předpínací oceli v tahu

$f_{p0,1k}$  - charakteristická smluvní mez kluzu 0,1% předpínací oceli

Okamžité ztráty jsou rovny deseti procentům, a tedy napětí v předpínací výztuži se započtením těchto ztrát  $\sigma_{pm,0}$  se stanoví následovně:

$$\sigma_{pm0} = 0,9 \cdot \sigma_{p,max} \leq \min \{0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}\}$$

$$\sigma_{pm0} = 0,9 \cdot 1440 \leq \min \{0,75 \cdot 1860; 0,85 \cdot 1640\}$$

$$\sigma_{pm0} = 1296 \text{ MPa} \leq \min \{1395; 1394\}$$

$$\sigma_{pm0} = 1296 \text{ MPa}$$

Při předpokladu dlouhodobých ztrát 5 % je horní mez napětí v kabelech rovna 1230 MPa.

$$\sigma_{pm\infty} = 0,95 \cdot \sigma_{pm0} = 0,95 \cdot 1296 \cong 1230 \text{ MPa}$$

Z výše uvedeného předpokladu pro horní mez napětí v předpínací výztuži po zohlednění veškerých ztrát vyplývá, že musíme navrhnout takové dimenze průřezových ploch předpínacích kabelů, aby v nich tato mez napětí nebyla překročena.

### Postup hledání výchozího rovnovážného stavu

Celá analýza pro hledání výchozího rovnovážného stavu lanové sítě vychází z Hookova zákona a vyjádřením z něj poměrného přetvoření:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot E}$$

Odvození pro poměrné přetvoření se následně užilo ve vytvořeném makru, jež je v jazyku APDL uvedené níže. Z uvedeného odvození také vyplývá, že známe pouze modul pružnosti předpínací oceli  $E$  o hodnotě 195 GPa a plochu průřezu kabelů, kterou do výpočtu zadáváme. Síla v laně  $N$  se bude spolu s přetvořením  $\varepsilon$  během hledání tvaru měnit a jsou na sobě závislé. Cílem je určit takové poměrné přetvoření lana, aby vyrovnilo odezvu vnějšího zatížení a deformace konstrukce byla nulová. Díky nelineárnímu chování konstrukce je nutné výpočet mnohokrát opakovat, neboť Hookův zákon pouze přibližuje konvergenci řešení, a tak vypočtené poměrné přetvoření na základě vnitřního napětí či síly v laně ihned neeliminuje jeho deformaci. Postup hledání výchozího tvaru probíhal následujícím způsobem.

## 1. První spuštění výpočtu zatížené lanové sítě

Prvotním spuštěním výpočtu se konstrukce díky vnějšímu zatížení deformuje a do lan je tak vneseno vnitřní napětí či síla  $N$ , kterou můžeme odečíst. Lana jsou v našem případě v ANSYSu tvořena prvky LINK8. Prvky hlavního podélného lana jsou označeny jako prvky typu 1 s reálnou konstantou číslo 1, pro příčné střední lano jako typ 5 s reálnou konstantou číslo 5 a pro zbylá příčná lana jako typ 3 s reálnou konstantou číslo 3.

## 2. Předpínání pomocí maker

Níže uvedené vytvořené makro se tedy zadávalo do výpočtu opakovaně, dokud napětí v některém z lan nepřekročilo hodnotu 1230 MPa. Poté bylo nutné navýšit průřezovou plochu tohoto lana v reálné konstantě a ve výpočtu dále pokračovat do té doby, než se odezva deformované konstrukce prakticky rovnala původně zamýšlené geometrii. V závěru analýzy se také užilo makro uvedené na stránce 37 této diplomové práce a změnila se tak původní geometrie lanové sítě na geometrii deformované konstrukce, mezi kterými byl minimální rozdíl. Byl tak nalezen výchozí rovnovážný stav lanové sítě a potažmo i celé skořepiny.

Podstata níže uvedeného makra je popsána následujícím způsobem. Nejprve byly vybrány elementy lanové sítě a k nim jejich uzly. Poté se vytvořila tabulka o pěti sloupcích a tolika řádcích, jejichž počet se rovná počtu prvků lan. Každému elementu přísluší jeden řádek v tabulce a ten byl postupně vyplněn po sloupcích jeho číslem (ee), silou, kterou v něm způsobilo zatížení (efx), novým číslem jeho budoucí reálné konstanty, která se mu přiřadí, jeho průřezovou plochou odečtenou na základě jeho typu (plocha se tak nemusela měnit přímo v každé nové reálné konstantě, ale stačila se vyměnit v původní) a poměrným přetvořením, které bylo vypočteno na základě odvození z předešlé stránky. Na závěr se přiřadila každému elementu lanové sítě nová reálná konstanta se změněným poměrným přetvořením a výpočet se opakoval.

rod=30	! Proměnná „rod“ – určuje číslo nejnížší nové reálné konstanty
ex=195e9	! ex se rovná modulu pružnosti předpínací oceli
esel,s,type,,1,5,2	! Výběr elementů lan (lana jsou type 1,3 a 5)
nsle	! Výběr uzlů vybraných elementů
*get,epocet,elem,0,count	! Získej počet prvků v konstrukci – proměnná „epocet“
*dim,esily,array,epocet,5	! Vytvoření tabulky
ee=0	! Proměnná „ee“ je číslo elementu, a to se rovná nule
*do,i,1,epocet,1	! Spust' cyklus pro všechny elementy

```

ee=elnext(ee)                ! Výběr následujícího prvku
*get,efx,elem,ee,smisc,1     ! Zjistí „efx“, tj. vnitřní sílu vybraného elementu
*get,typ,elem,ee,attr,type   ! Zjistí „typ“, tj. type prvku
*get,plocha,rcon,typ,1       ! Zjistí „plochu“, tj. průřezovou plochu lana z původní reálné
                             ! konstanty na základě typu elementu

*set,esily(i,1),ee           ! Zápisy do sloupců popsané v textu výše
*set,esily(i,2),efx
*set,esily(i,3),rod+i-1
*set,esily(i,4),plocha
*set,esily(i,5),efx/(plocha*ex)
*enddo

/prep7
ee=0
*do,i,1,epochet,1
ee=elnext(ee)
r,esily(i,3),esily(i,4),esily(i,5)    ! Vytvoření nové reálné konstanty na základě tabulky
EMODIF,ee,REAL,esily(i,3)             ! Přiřazení nové reálné konstanty příslušnému elementu
*enddo

```

Uvedeným postupem byly nalezeny 4 výchozí rovnovážné stavy pro naši lanovou síť. Snahou bylo skořepinu navrhnout tak, aby šla postavit zvoleným předpínacím systémem VSL (hledisko proveditelnosti) a tak, aby se svým tvarem co nejlépe přiblížila tvaru navrženému (architektonické hledisko). Bylo již předem zřejmé, že průřezová plocha hlavního podélného lana bude rozhodující, neboť vynáší celou střešní skořepinu. Obojí hlediska tedy souvisí převážně s návrhem tohoto lana. V systému VSL je v nabídce kabel s nejvyšší průřezovou plochou  $8250 \text{ mm}^2$ . Skládá se z 55-ti sedmidrátových svazků lan. V následující tabulce jsou sestupně uvedeny nalezené tvary od nejvíce podobného počáteční geometrii po nejméně podobný, ale s možným provedením z kabelů ze systému VSL. V prvním sloupci je uvedeno číslo výchozího tvaru, v druhém průřezová plocha nosného lana a ve třetím sloupci potřebné množství sedmidrátových lan.

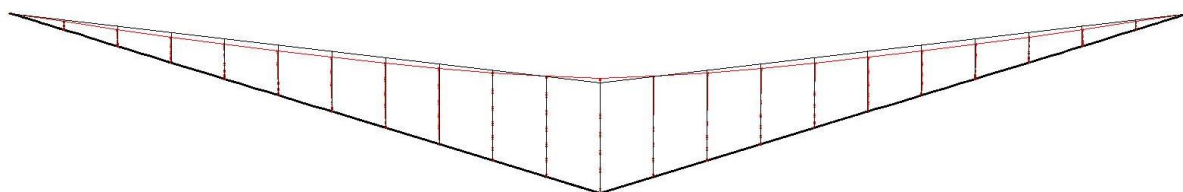
Číslo nalezeného tvaru	Průřezová plocha nosného lana	Potřebné množství předpínacích lan ( $A_{p,1} = 150 \text{ mm}^2$ )
Tvar 1	$40000 \text{ mm}^2$	267 ks
Tvar 2	$33000 \text{ mm}^2$	220 ks
Tvar 3	$16500 \text{ mm}^2$	110 ks
Tvar 4	$8250 \text{ mm}^2$	55 ks

Tabulka 1- Nalezené výchozí tvary lanové sítě

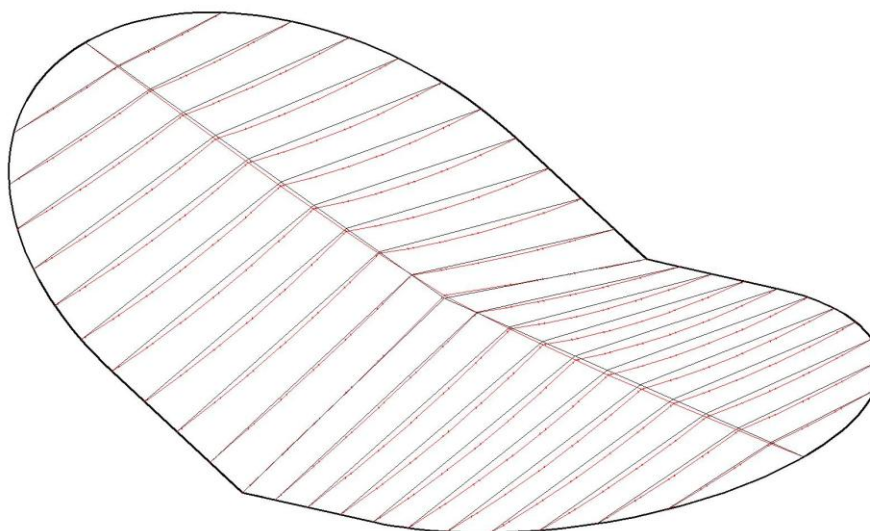
Všechny čtyři výchozí tvary byly nalezeny pro různé průřezové plochy hlavního nosného lana při hodnotě jeho napětí 1200 MPa.

### Tvar 1

Při hledání tvaru 1 bylo snahou se co nejvíce přiblížit původní geometrii z kapitoly 1 statického výpočtu a výkresu č. 01. Průřezová plocha nosného lana byla neustále zvětšována, až nabyla hodnoty 40000 mm<sup>2</sup>. Tento kabel by tvořilo 267 předpínacích lan o průřezové ploše 150 mm<sup>2</sup>. Tak velký kabel není obsažen v předpínacím systému žádné společnosti a musel by být vyroben na míru požadavkům stavby. Z hlediska technologického je tento výchozí tvar náročný a do dalšího výpočtu nebyl užít. Na obrázcích je znázorněn rozdíl v geometrii mezi černou původní (lana přímková – nelze docílit) a nalezenou červenou geometrií.



Obrázek 3.18 Srovnání tvaru 1 (červeně) s původní geometrií (černě) – pohled

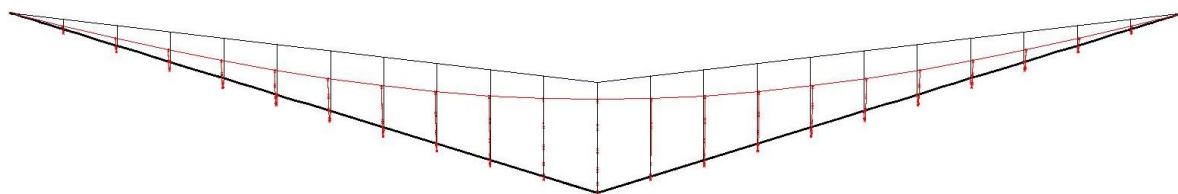


Obrázek 3.19 Srovnání tvaru 1 s původní geometrií – axonometrie

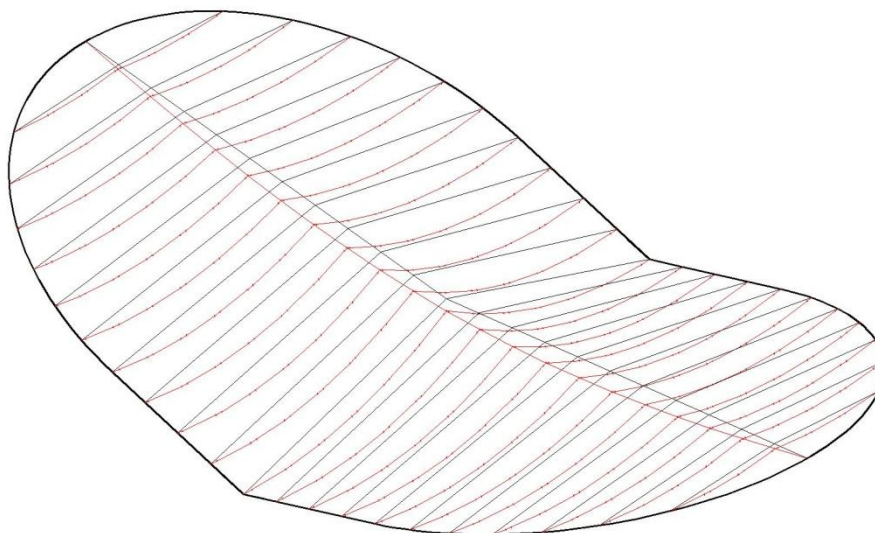
### Tvar 4

Při hledání tvaru 4 bylo snahou využít předpínacího systému VSL a jejich kabelů v běžně dostupné nabídce. Plocha hlavního nosného lana byla dopředu stanovena na hodnotu 8250 mm<sup>2</sup>, což je maximální průřez kabelu, který VSL vyrábí. Cyklus předpínání (opakování makra) byl ukončen tehdy, když bylo v nosném lanu nabyto napětí 1200 MPa. Jak lze vidět z obrázků, konstrukce je málo

předepnuta a příčná lana jsou velmi prověšena. Geometrie původní konstrukce je velmi odlišná, a proto tento tvar nebyl užít do další analýzy.



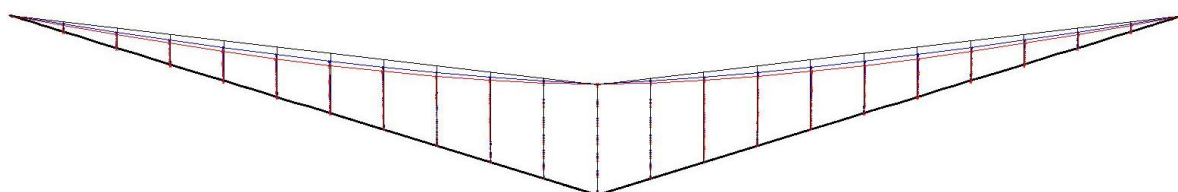
Obrázek 3.20 Srovnání tvaru 4 (červeně) s původní geometrií (černě) – pohled



Obrázek 3.21 Srovnání tvaru 4 s původní geometrií – axonometrie

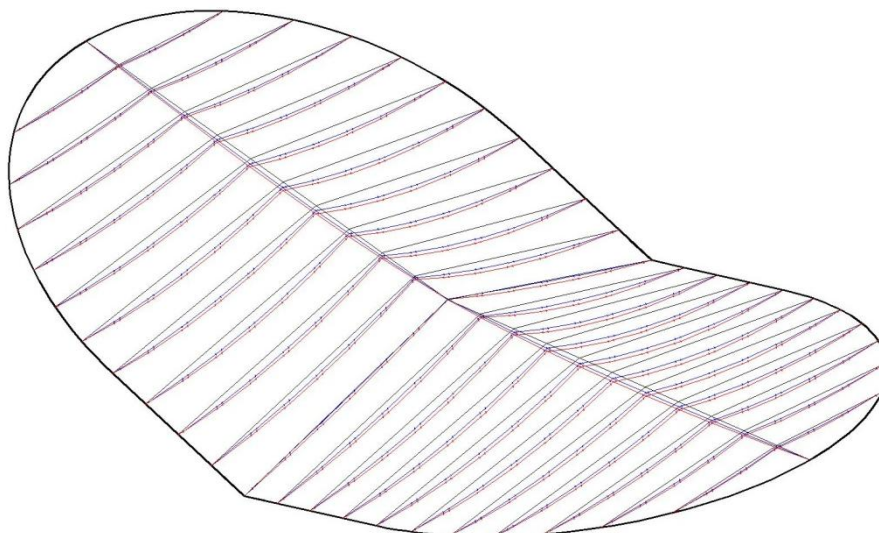
## Tvar 2 a 3

Stanovení výchozích tvarů 2 a 3 vycházelo opět z předpokladu využít předpínacího systému VSL a jeho kabelu s nejvyšší průřezovou plochou v nabídce, tj. kabelu o průřezové ploše  $8250 \text{ mm}^2$ , pro návrh podélného nosného lana. Byl zaveden předpoklad, rozdělit nosné lano jako celku na dva předpínací kabely ve tvaru 3 anebo na 4 předpínací kabely ve tvaru 2. Průřezová plocha hlavního nosného lana ve tvaru 2 je tedy čtyřnásobkem kabelu s plochou  $8250 \text{ mm}^2$  a její hodnota činí  $33000 \text{ mm}^2$ . Ve tvaru 3 je dvojnásobkem a její hodnota je  $16500 \text{ mm}^2$ . Inspirací pro rozdělení hlavního nosného lana na více spojených lan je olympijský stadion Yoyogi v Tokiu popsán v textové části. Srovnání nalezených výchozích tvarů s původní geometrií konstrukce je znázorněno následujícími obrázky. Tvar 2 je znázorněn modrou barvou, tvar 3 červenou a původní geometrie černou.



Obrázek 3.22 Srovnání tvaru 2 a 3 s původní geometrií – pohled

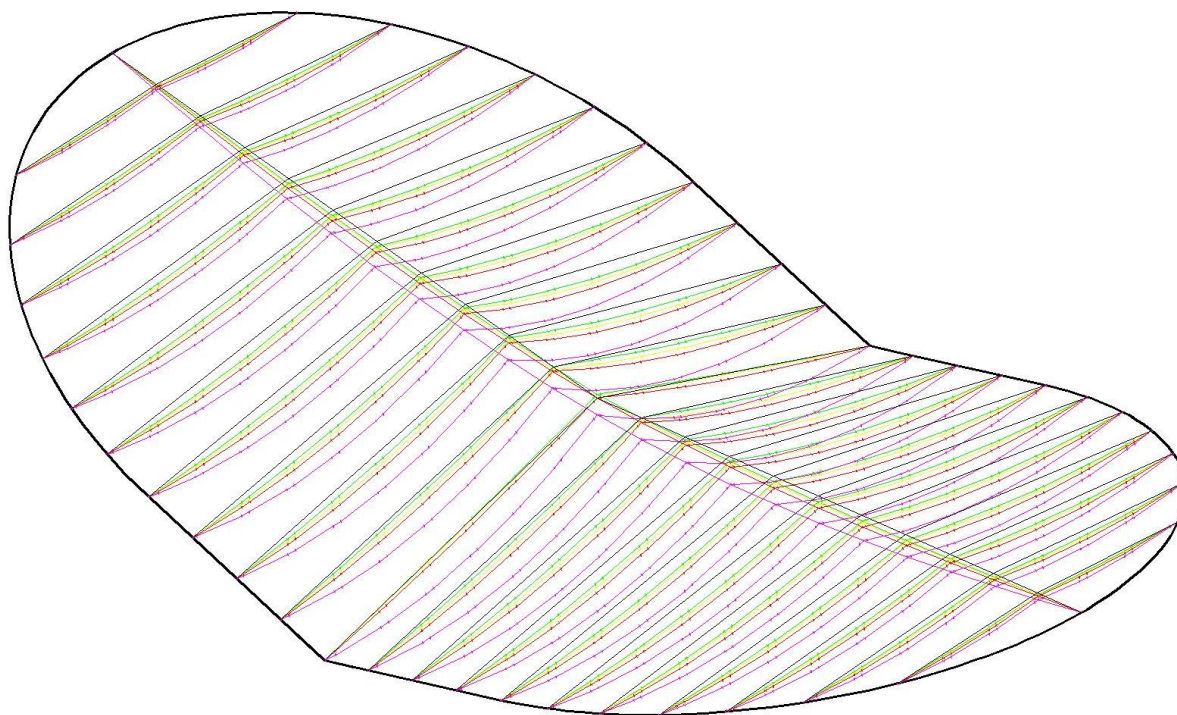




Obrázek 3.23 Srovnání tvaru 2 a 3 s původní geometrií – axonometrie

Cyklus předpínání byl u obou tvarů ukončen, jakmile hlavní nosné lano dosáhlo napětí 1200 MPa a následně oba tvary vytvořeny modifikací geometrie popisující makro na straně 37. Z obrázku je patrné, že i když je plocha hlavního nosného lana ve tvaru 2 dvakrát vyšší než ve tvaru 3, jejich deformace od původní geometrie se příliš neliší. **Bylo tedy rozhodnuto, že výchozím rovnovážným stavem bude pro další analýzu nalezený výchozí tvar 3.**

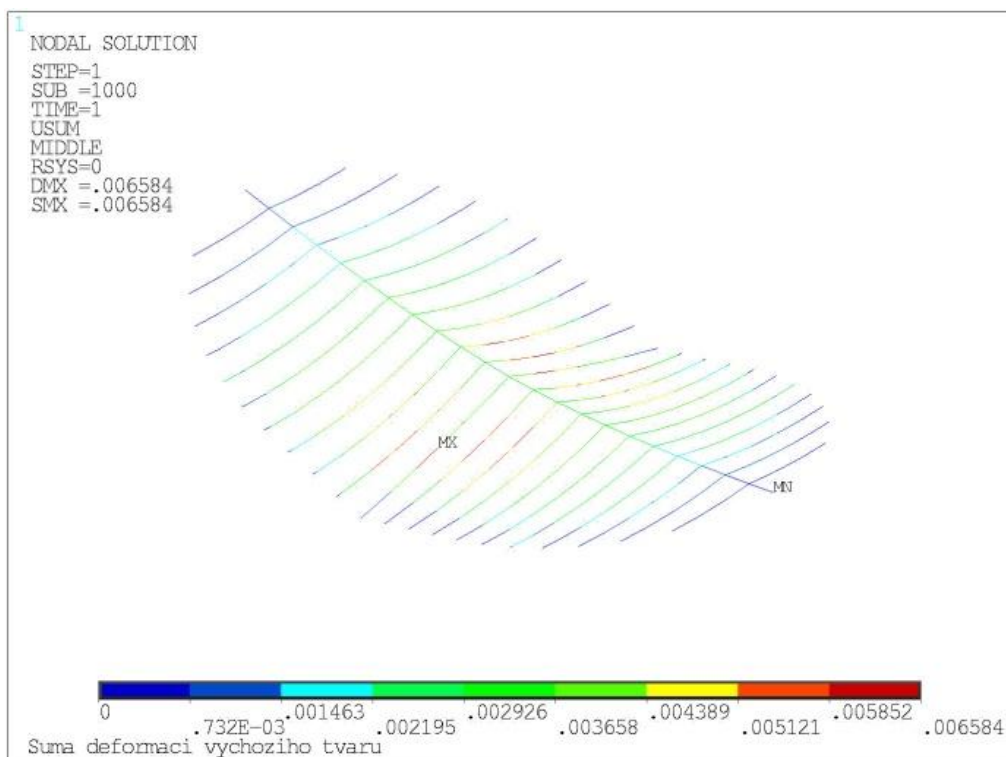
Pro přehlednost je zde uveden ještě jeden obrázek znázorňující konstrukci v axonometrii se všemi nalezenými výchozími tvary. Lana původní geometrie jsou na něm znázorněna černě, lana tvaru 1 zeleně, lana tvaru 2 žlutě, lana tvaru 3 červeně a tvaru 4 fialově.



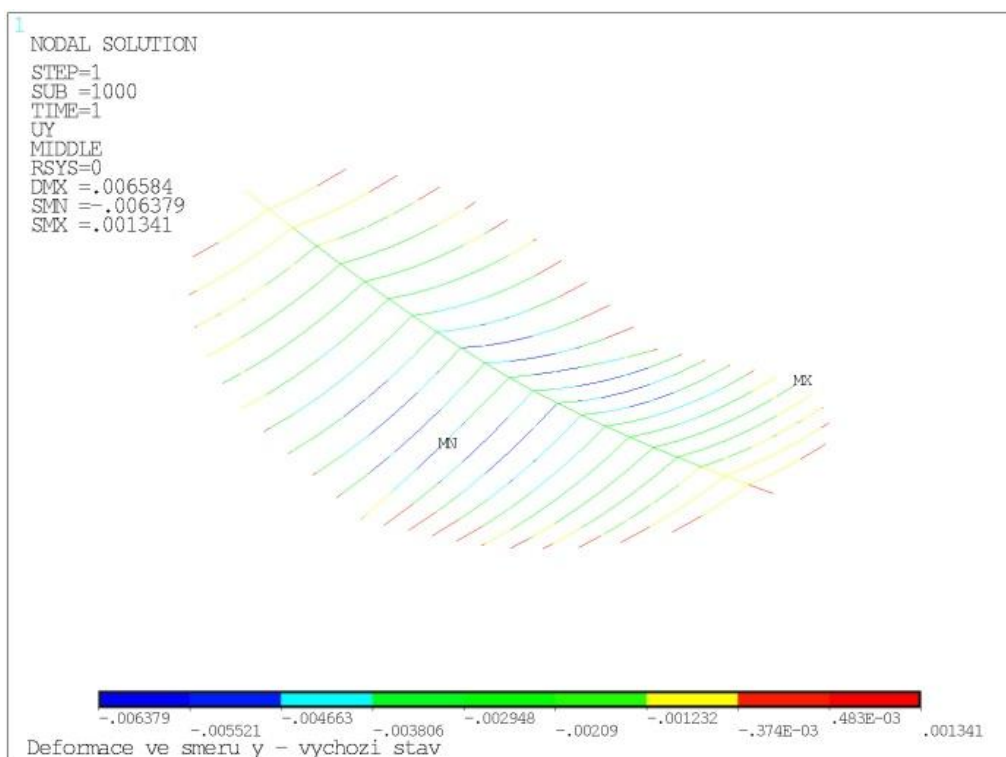
Obrázek 3.24 Srovnání všech výchozích tvarů lanové sítě – axonometrie



Výchozí tvar číslo 3 je hledaným výchozím rovnovážným stavem naší konstrukce. Tento stav by měl být charakterizován nulovou deformací od vnějšího zatížení. V našem případě je deformace od zatížení ve směru y -6,38 mm, což je při zohlednění rozpětí lan zanedbatelné číslo. Vektor deformací uzlů (USUM) má pak nejvyšší hodnotu 6,58 mm. Navržený tvar je narýsován na výkresu č.04.

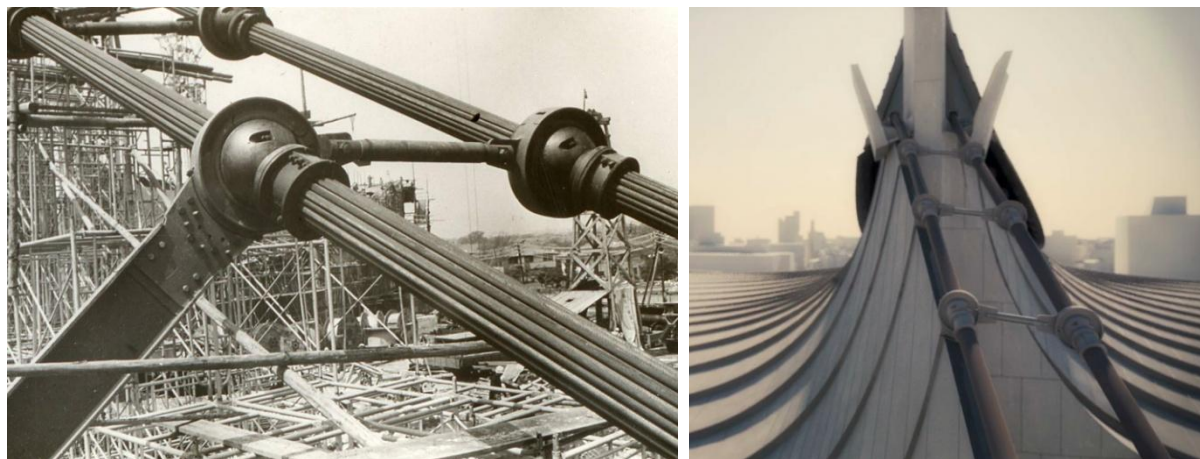


Obrázek 3.25 Suma deformací výchozího tvaru



Obrázek 3.26 Deformace ve směru y výchozího tvaru

S navrženým hlavním nosným lanem, jehož průřez je rozdělen na dvě samostatná lana, se pojí i návrh detailu uchycení příčných lan k hlavnímu nosnému lanu. Rozdělení hlavního lana na dva celky byl proveden i u olympijského stadiónu v Tokiu. Aby jeho lana spolupůsobila, byla osazena objímkami s kulovými kloubovými spoji a následně díky přivařeným okům k objímkám sešroubována.



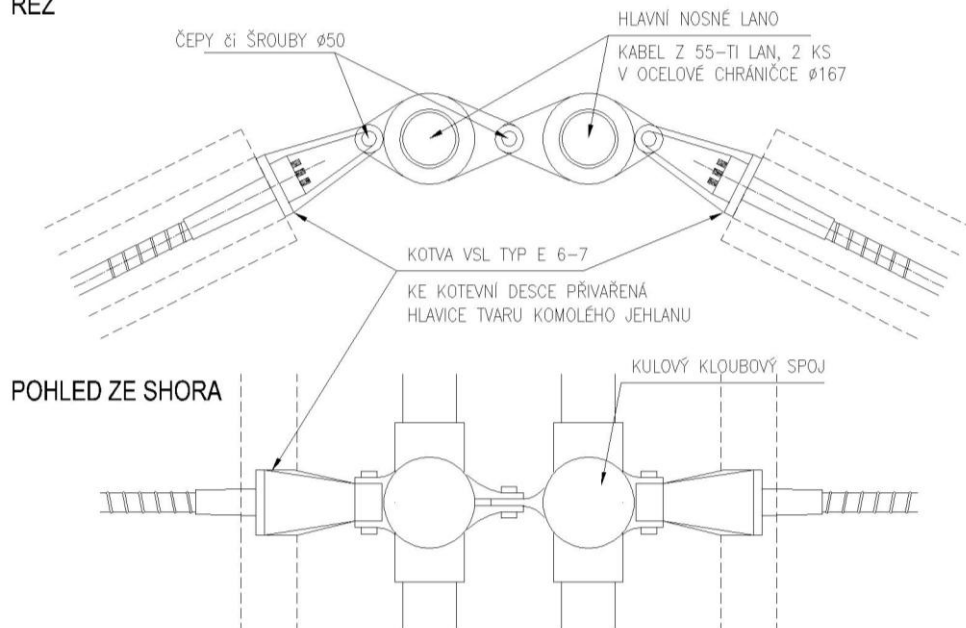
*Obrázek 3.27 Nosné lano stadiónu Yoyogi, Tokio, Japonsko*

Téměř shodný systém s kulovým kloubovým spojem použijeme i my v našem případě. Střecha olympijského stadiónu byla provedena z ohybově tuhých nosníků, které jsou v našem případě nahrazeny příčnými lany. Tato lana budou kotvena a napínána z jedné strany v obvodovém prstenci skořepiny. Abychom u hřebene střechy spojili kotvu VSL s nosnými lany, byla navrhuta ocelová hlavice (zámečnický výrobek) tvaru komolého jehlanu ve „špici“ opatřeném tubicovým otvorem, která se přivaří dopředu ke kotevní desce a kotevní objímce kotvy. Z kotvy VSL typu E tak vznikne u hřebene střechy jakýsi A-typ, kde ocelová hlavice obaluje kotevní objímku. Sváry, kterými je hlavice přichycená k desce a objímce, musí být dostatečně únosné, neboť budou vzdorovat tahovým napětím při předpínání a také při montáži skořepiny, stejně jako čep či šroub, jehož prostřednictvím se bude celé zatížení z příčného lana přenášet do lana hlavního. Příčná lana se budou díky tomuto provedení napínat pouze z jedné strany, a to ze strany u obvodového prstence. Čepy či šrouby budou namáhány předpínací silou na smyk. Jejich předběžný průměr je 50 mm a budou provedeny z vysoce pevnostní konstrukční oceli s mezí kluzu 700 MPa.

Dva kusy hlavního nosného lana jsou spojeny stejně jako u stadiónu Yoyogi. Kulové klouby jsou po stranách opatřeny navařenými deskami s otvory pro čepy či šrouby, které je pojí s příčným lanem (otvorem v ocelové hlavici) na jedné straně a druhým kusem nosného lana na straně druhé pomocí táhla. Osový rozestup mezi kusy hlavního lana činí po celé délce stadiónu 500 mm s výjimkou okrajů, kde naroste na 875 mm díky kotvicímu systému. Podélný otvor, který mezi nimi vzniká, se vylije betonovou zálivkou stejně jako spáry mezi prefabrikovanými dílci po uložení monostrandů a betonářské výztuže do spár. V neposlední řadě je nutné poznamenat, že díky rozdělení nosného lana

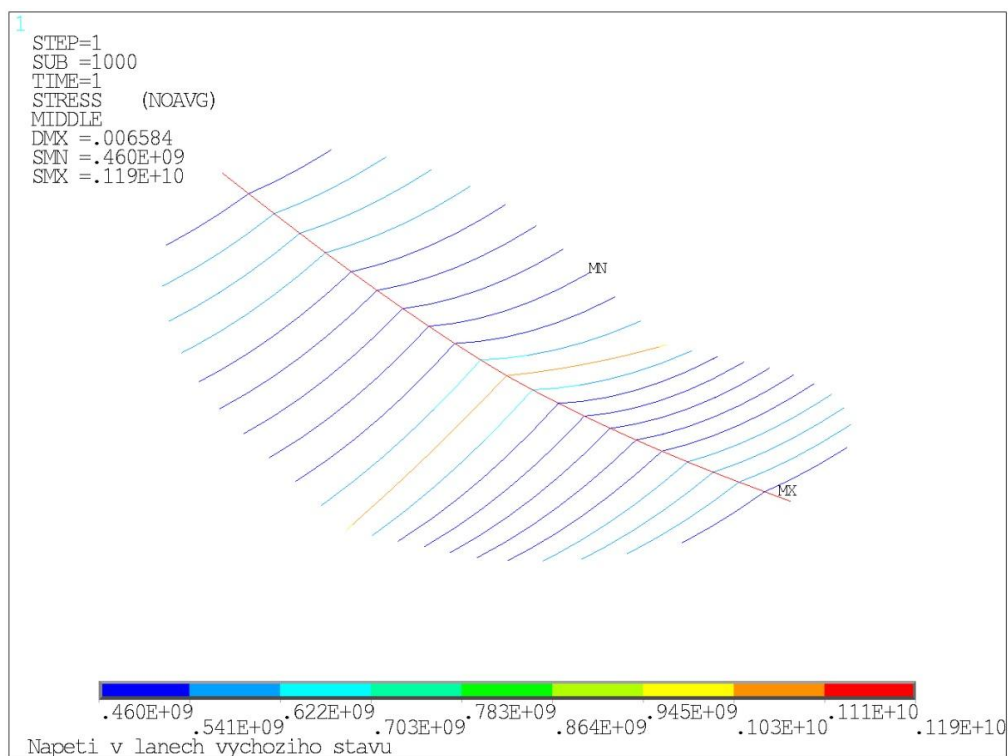
na 2 spojené kabely, budou muset panely u hřebenu střechy být navrženy na míru a vyráběny jako A-typy stejně jako panely při okraji obvodového rámu. Výše popsany návrh napojení příčných lan na nosné lano je schematicky zobrazen na 3.28.

SCHÉMA NAPOJENÍ PŘÍČNÝCH LAN K NOSNÉMU LANU  
ŘEZ



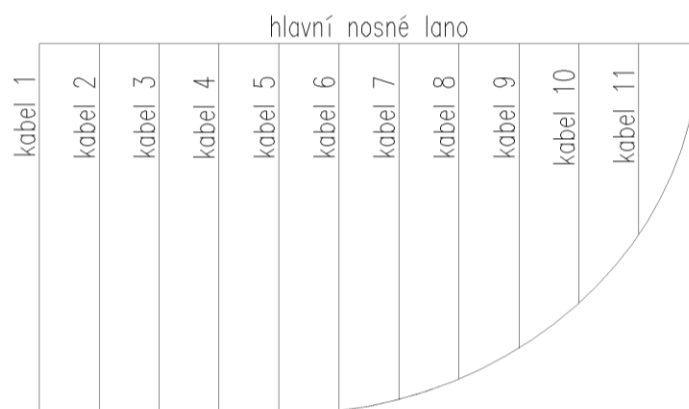
Obrázek 3.28 Schéma napojení příčných nosných lan k hlavnímu nosnému lanu

### 3.4.3 Stanovení kotevního napětí nosných lan



Obrázek 3.29 Napětí v lanech nalezeného výchozího tvaru

Na obrázku 3.29 je znázorněno napětí v lanech nalezeného výchozího rovnovážného stavu. Toto napětí představuje vnesené napětí do lan od předpětí po započtení provozních a okamžitých ztrát, tedy napětí  $\sigma_{pm\infty}$ . Kotevní napětí, na které je nutno vložky napnout, získáme zpětným postupem pospaným v úvodu kapitoly 3.4.2. Výsledný návrh a dimenze předpínacích vložek (kabelů) a kotev je zobrazen v tabulce níže.



Obrázek 3.30 Číslování předpínacích kabelů

ČÍSLO PŘEDPÍNAČÍHO KABELU												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	HLAVNÍ
$\sigma_{pm\infty}$ (MPa)	1074.40	642.95	534.55	503.15	508.98	521.93	540.75	563.43	573.01	570.94	513.37	1187.10
$\sigma_{pm0}$ (MPa)	1128.12	675.10	561.28	528.31	534.43	548.03	567.79	591.60	601.66	599.49	539.04	1246.46
Kotevní napětí (MPa)	1240.93	742.61	617.41	581.14	587.87	602.83	624.57	650.76	661.83	659.44	592.94	1371.10
Průřezová plocha kabelu (m <sup>2</sup> )	0.0012	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0165
Počet lan v kabelu (ks)	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	2x55
Navržená kotva VSL	E 6-12	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-7	E 6-55

Tabulka 2- Navržené předpínací nosné kabely

Z tabulky je zřejmé, že vyjma vložky 1 a hlavního nosného lana jsou zbylé kabely předdimenzovány, neboť  $\sigma_{pm\infty}$  je menší než poloviční v porovnání s jeho stanovenou mezní hodnotou 1200 MPa. Tyto kabely s průřezovou plochou 0,0009 m<sup>2</sup> jsou ale s průměrem 55 mm už tak dosti tenké a přišlo mi riskantní jejich plochu ještě zmenšovat. Prověřený tvar těchto příčných lan se zdá být vhodný i z hlediska odvodu dešťové vody ze střešní roviny. V našem případě bude voda stékat vždy do nejnižšího místa ve středu střešní konstrukce, kde bude díky otvoru ze skořepiny odvedena. Hlavní lano bude napínáno z obou stran a přenáší prakticky celou hmotnost skořepiny. Příčná lana budou po jeho částečném napnutí k němu uchycena a pak napínána z jedné strany u betonového prstence. Napínání bude probíhat, až beton v prstenci dosáhne 80% pevnosti v tlaku (tj. po 28-ti dnech). S ohledem na

tento fakt byly navrženy i aktivní kotvy systému VSL typu E. Všechna lana budou opatřena ocelovou chráničkou. S návrhem předpětí byly vypracovány výkresy předpínacích vložek.

Z výše uvedeného postupu předpínání je jasné, že konstrukce nemůže být vyzdvižena najednou, jak je popsáno v části P3 této diplomové práce o postupu výstavby. Obvodový prstenec musí být vyhotoven před osazením lan a musí tak být podepřen pylony nebo stěnami. Kdybychom měli konstrukci posuzovat jako celek a podařilo by se nám najít i optimální tvar prstence (nejspíše blízký tvaru V), bylo by betonové provedení řešené konstrukce o těchto rozměrech nemožné. Již tak mohutné hlavní nosné lano by neslo i část hmotnosti betonového rámu a bylo by takřka nedimenzovatelné stejně jako kloubový spoj betonového rámu s hlavou piloty. V této diplomové práci je řešena pouze předpjatá skořepina bez ohledu na další části konstrukce a polemika o možnosti provedení a využití tohoto konstrukčního systému bude uvedena v závěru.

### 3.5 Časová analýza předpjaté membrány

#### Čas 1 Výchozí rovnovážný stav

Výchozí rovnovážný stav byl detailně popsán v předešlé kapitole. Jedná se osamělá břemena zatěžující nosná příčná lana v místě uložení prefabrikovaných betonových panelů. Břemena představují tíhu panelů a betonové zálivky.

V Softwaru jsou veškeré prvky zmrazeny s výjimkou prvků nosných lan LINK8.

#### Čas 2 Výchozí rovnovážný stav – Aktivace skořepiny

Následuje čas 2, kdy dojde k nahrazení silových účinků (osamělých břemen) vymodelovanou skořepinou, jejíž rozměry a dimenze jsou popsány v kapitole 3.1. Snahou bylo vytvořit model tak, aby odezva od vlastní tíhy skořepiny v čase 2 nezpůsobovala žádná napětí ve spáře mezi panely, protože tak by tomu bylo i ve skutečnosti. Uložený prefabrikovaný panel by měl při montáži na laně působit jako „prostý nosník“, jak je navržen v kapitole 2, než dojde ke zmonolitnění spár a jejich předepnutí, kdy pak konstrukce působí jako celek. V našem případě však normálová napětí ve spárách vznikla, neboť jsme modelovali skořepinu ihned celistvě a žebra, která jí podepírají, působí v obou směrech jako spojitě nosníky. Předcházet tomuto jevu v modelu by snad bylo zabráněno modelováním kloubových spojů mezi panely a lany pro čas 2 a v čase 3 kloubové spoje vyměnit za fixní [9]. V našem případě byl tento problém vyřešen při posuzování vybraných bodů ve spárách na MSP a MSÚ tak, že normálová napětí ve spáře z času 2 byla od ostatních časů odečtena.

V softwaru ANSYS byla osamělá břemena nahrazena aktivací prvků skořepiny SHELL181, prvků žebířů BEAM44 a prvků monostrandů LINK8.

### Čas 3 Předepnutí skořepiny

Předepnutím se do skořepiny vnesla tlaková rezerva pomocí předpínacích kabelů monostrand umístěných ve spárách mezi kabely. Velikost předpětí byla navržena v následující kapitole 3.5.1.

Navržená velikost předpětí byla do prvků LINK8 vnesena pomocí jejich reálné konstanty.

### Čas 4 Ostatní stálé zatížení – zhotovení střešního pláště

Následovala aktivace prvků SURF154, který aktivoval zatížení od tíhy skladby střechy  $347 \text{ N/m}^2$ . Zatížení bylo modelováno kolmo na střednici střešní roviny.

### Čas 5 Klimatické zatížení - zatížení sněhem (šach 1 – 5, zatíženo na půdorysný průmět)

Následovala aktivace prvků SURF154, který aktivoval zatížení od klimatického zatížení pro příslušný šach 1 – 5. Plošné zatížení sněhem má hodnotu  $800 \text{ N/m}^2$ . Zatížení bylo modelováno na půdorysný průmět střešní roviny.

#### 3.5.1 Návrh předepnutí skořepiny pomocí monostrandů

Abychom uplatnili výše zmíněný postup časové analýzy, bylo nejprve nutné určit či stanovit předpínací sílu, kterými se monostrandy budou muset napnout tak, aby eliminovali tahové napětí ve spárách mezi prefabrikovanými panely a vytvořili v membráně dostatečnou tlakovou rezervu, která eliminuje tahové účinky stálých složek a klimatického zatížení. Návrh tohoto předpětí vycházel z charakteristické kombinace:

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

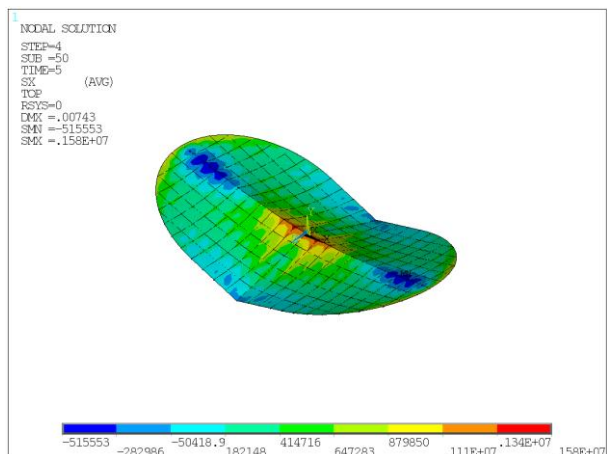
Jelikož v našem posudku uvažujeme pouze s jedním druhem proměnného (klimatického) zatížení, a to se sněhem, navrhne předpětí na základě prostého součtu účinků všech zatěžovacích stavů (časů) s ohledem na dodržení podmínek pro mezní stav použitelnosti, kdy maximální tlakové napětí v betonu od charakteristické kombinace zatížení nesmí překročit hodnotu  $0,6 f_{ck}$  a případná tahová napětí nesmí překročit hodnotu pevnosti betonu v tahu  $f_{ctm}$ . V kapitole 4 budou poté vybrány a posouzeny jednotlivé body skořepiny ve spárách mezi panely na MSP a se zanedbáním nelineárních předpokladů i na MSÚ. Nejprve bylo nutné spustit časovou analýzu pro našich 5 zatěžovacích kombinací (liší se pouze šachy od sněhu) s nulovým předpětím monostrandů a stanovit tak tu, která způsobuje od stálých a klimatických složek zatížení nejnepříznivější namáhání, tedy nejvyšší tahy ve spárách mezi panely. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledky napětí pro každou kombinaci ve směru x a z ve střednicové rovině (normálové napětí) a také při horním a spodním okraji skořepiny.



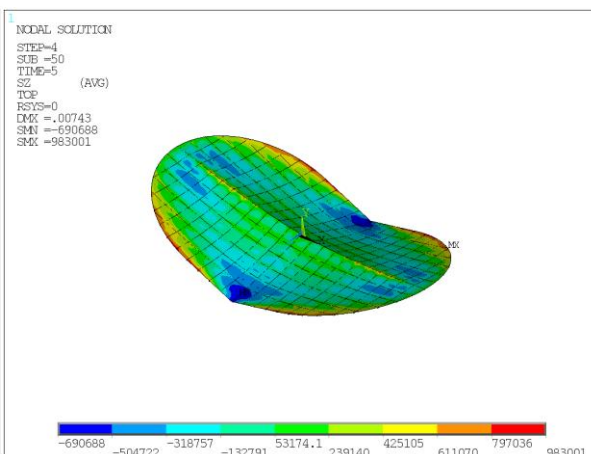
**Kombinace 1 (v čase 5 je zatížení sněhem celoplošné = šach 1)**

**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru x: 1,58 MPa**

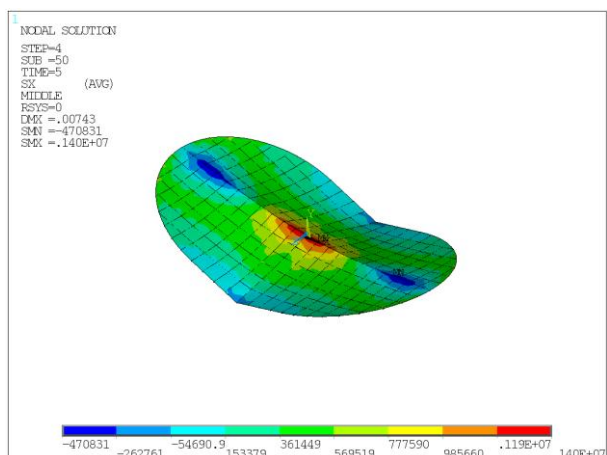
**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru z: 0,98 MPa**



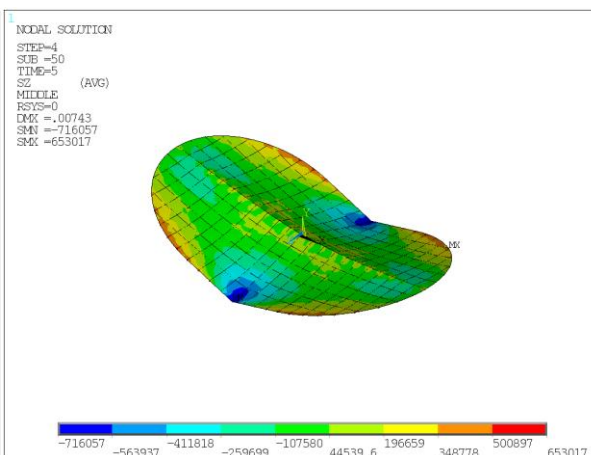
K1 Směr X – horní okraj



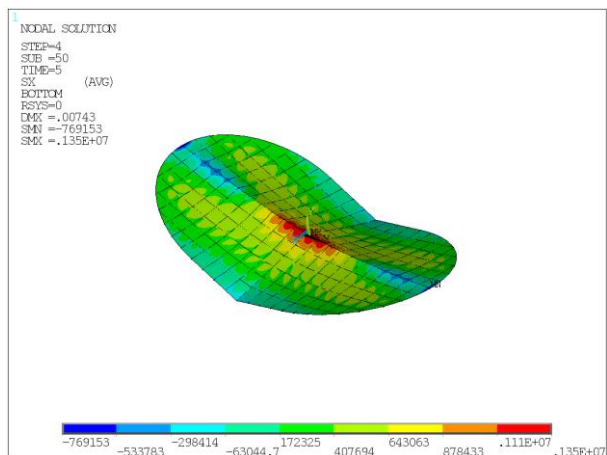
K1 Směr Z – horní okraj



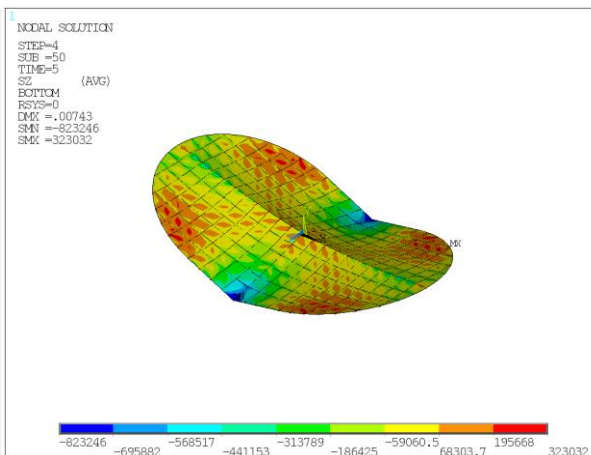
K1 Směr X – střednicová rovina



K1 Směr Z – střednicová rovina



K1 Směr X – dolní okraj

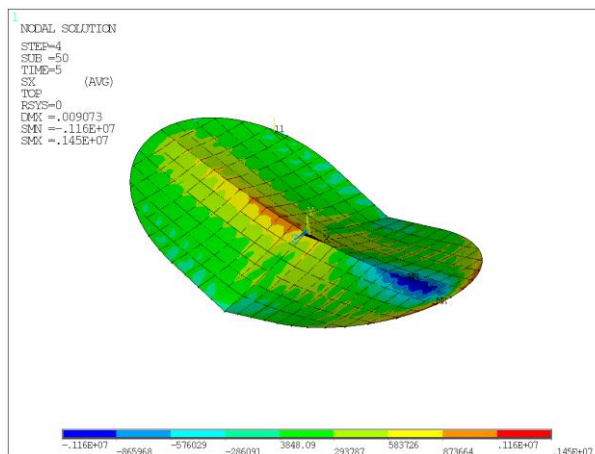


K1 Směr Z – dolní okraj

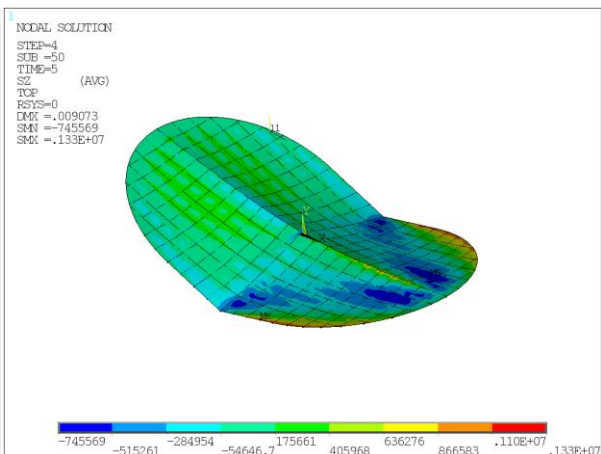
**Kombinace 2 (v čase 5 je zatížení sněhem šach 2)**

**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru x: 1,45 MPa**

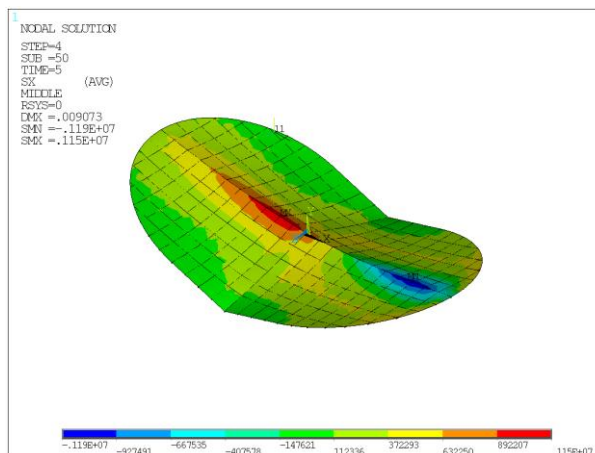
**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru z: 1,33 MPa**



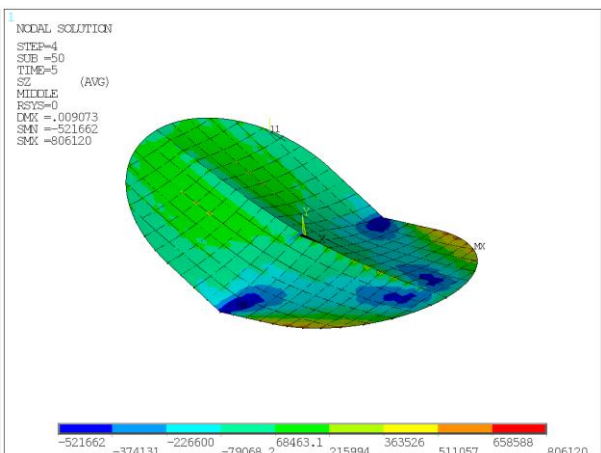
K2 Směr X – horní okraj



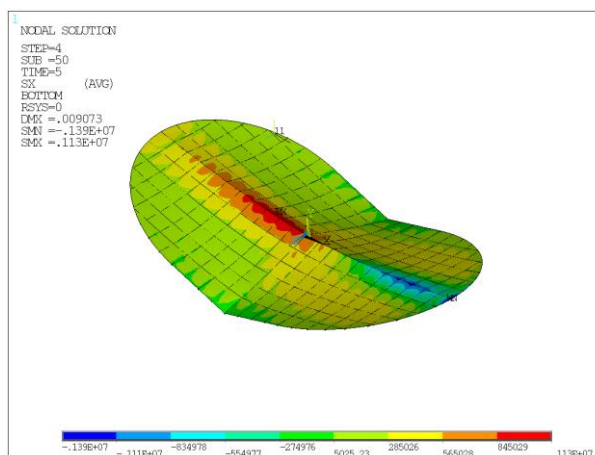
K2 Směr Z – horní okraj



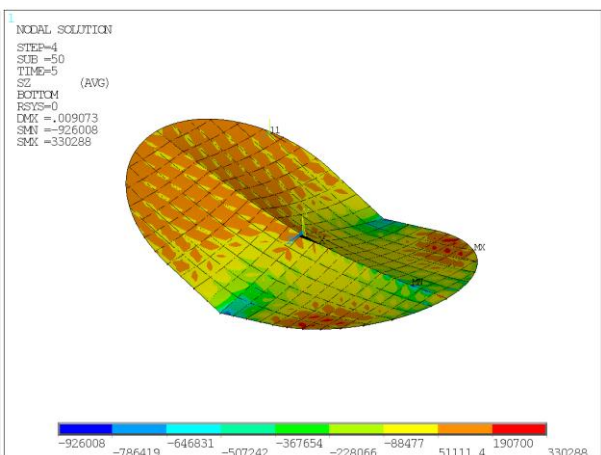
K2 Směr X – střednicová rovina



K2 Směr Z – střednicová rovina



K2 Směr X – dolní okraj



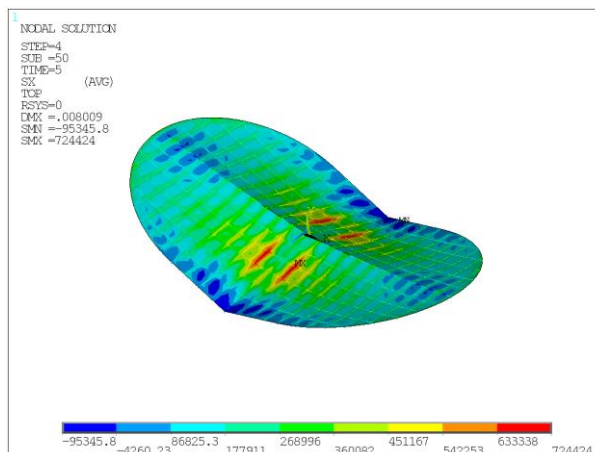
K2 Směr Z – dolní okraj



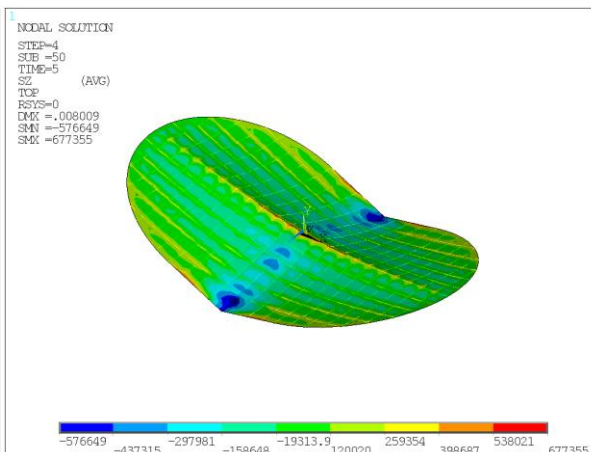
**Kombinace 3 (v čase 5 je zatížení sněhem šach 3)**

**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru x: 0,72 MPa**

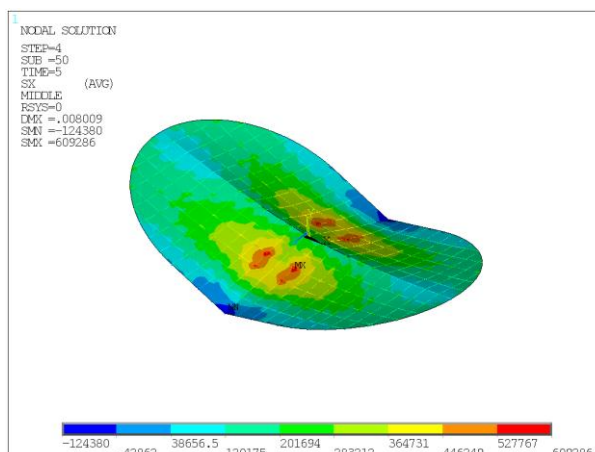
**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru z: 0,67 MPa**



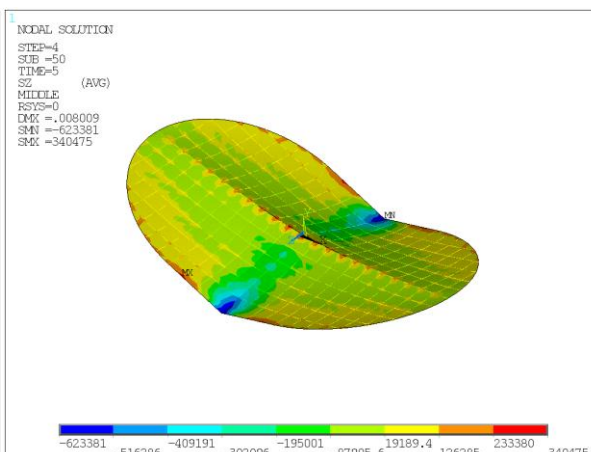
K3 Směr X – horní okraj



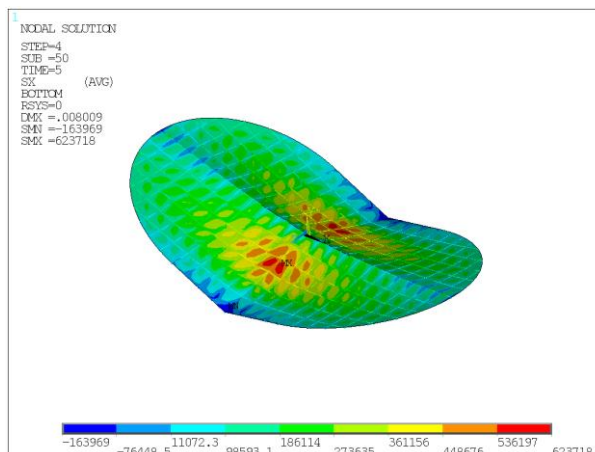
K3 Směr Z – horní okraj



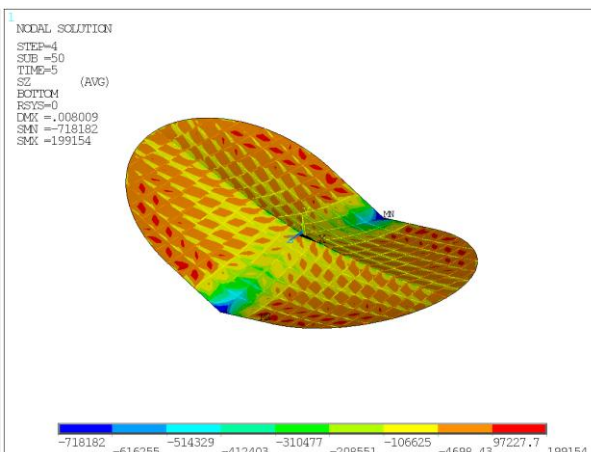
K3 Směr X – střednicová rovina



K3 Směr Z – střednicová rovina



K3 Směr X – dolní okraj

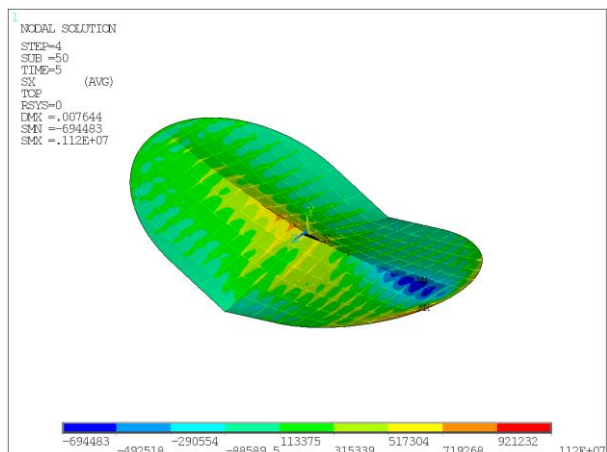


K3 Směr Z – dolní okraj

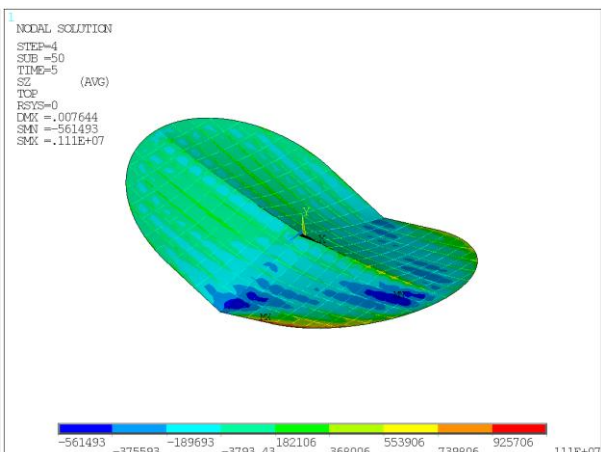
**Kombinace 4 (v čase 5 je zatížení sněhem šach 4)**

**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru x: 1,12 MPa**

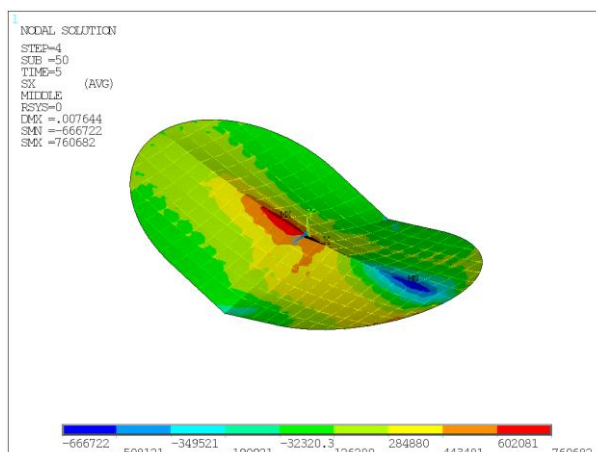
**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru z: 1,11 MPa**



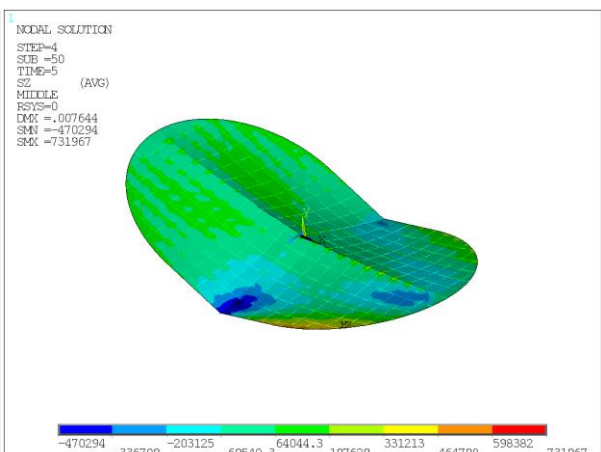
K4 Směr X – horní okraj



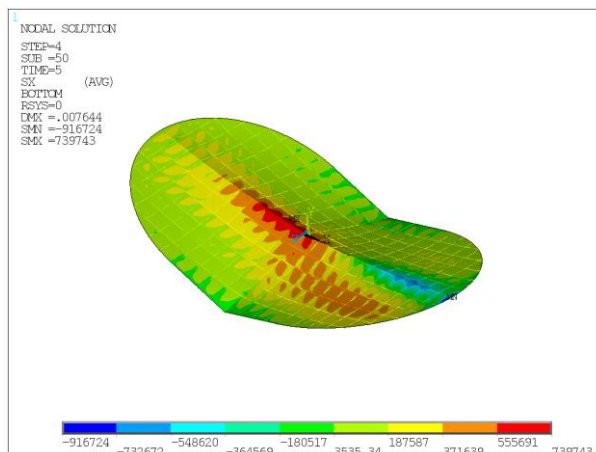
K4 Směr Z – horní okraj



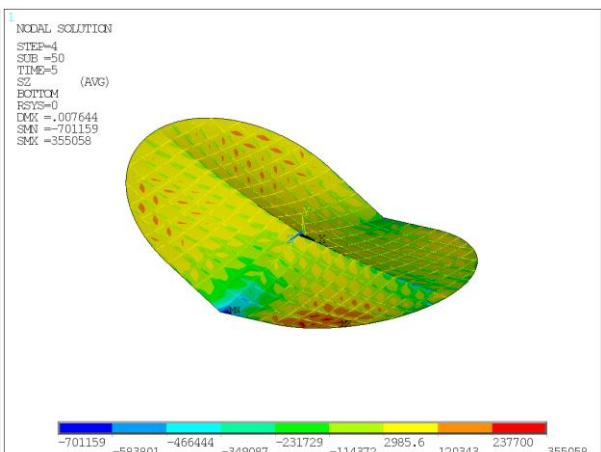
K4 Směr X – střednicová rovina



K4 Směr Z – střednicová rovina



K4 Směr X – dolní okraj

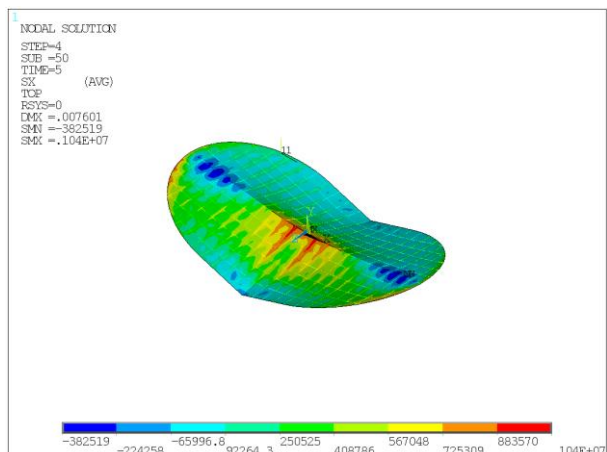


K4 Směr Z – dolní okraj

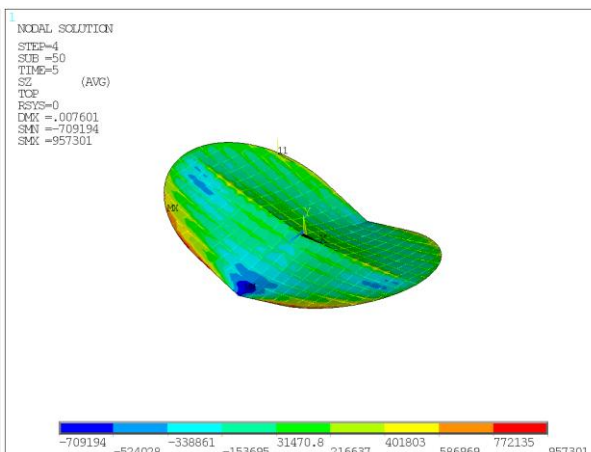
**Kombinace 5 (v čase 5 je zatížení sněhem šach 5)**

**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru x: 1,04 MPa**

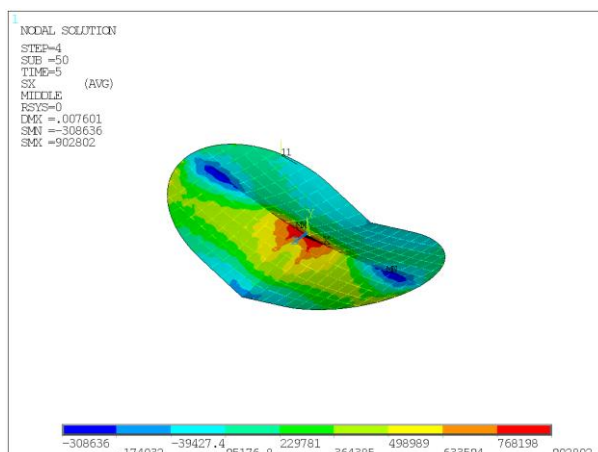
**- hodnota maximálního tahového napětí ve směru z: 0,96 MPa**



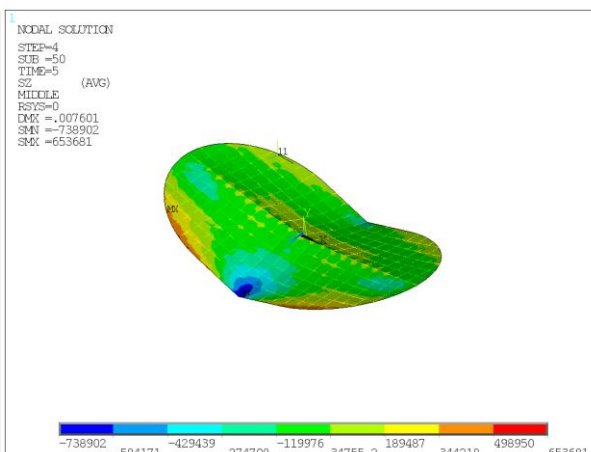
K5 Směr X – horní okraj



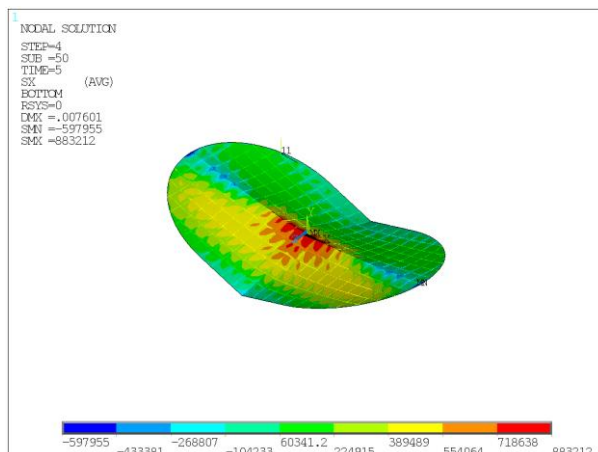
K5 Směr Z – horní okraj



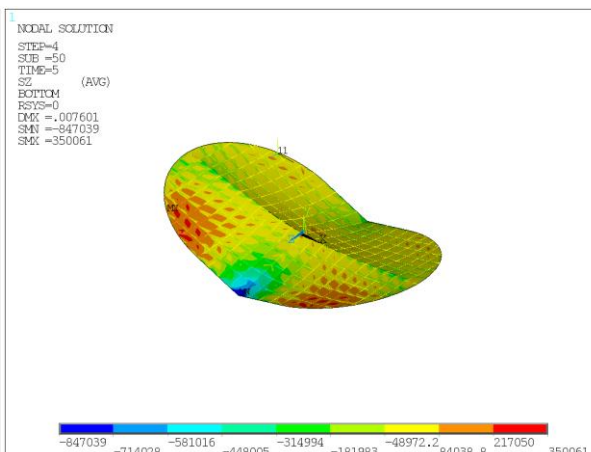
K5 Směr X – střednicová rovina



K5 Směr Z – střednicová rovina



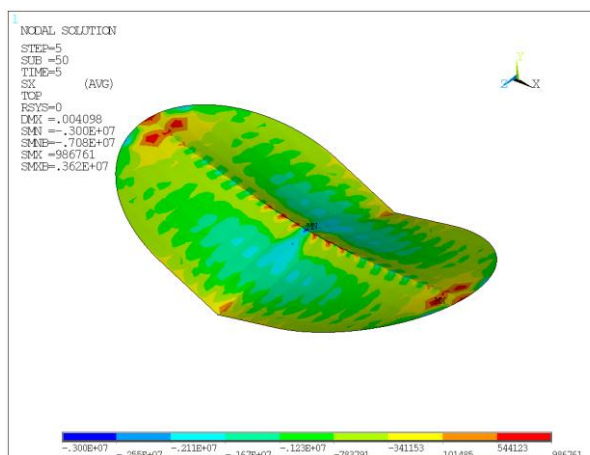
K5 Směr X – dolní okraj



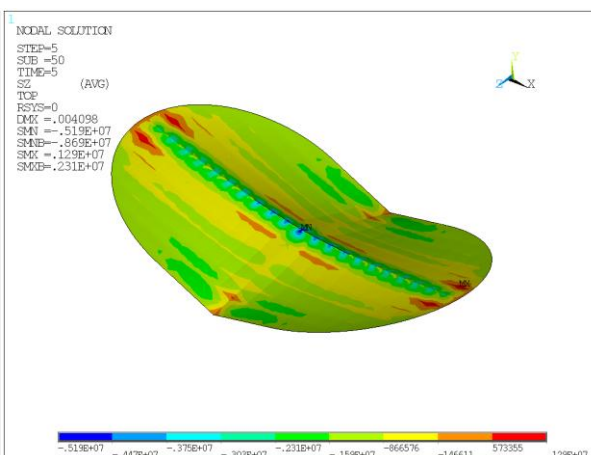
K5 Směr Z – dolní okraj

Z obrázků je patrné, že maximální tahové napětí, které musíme eliminovat předpětím je v kombinaci 1 o hodnotě 1,58 MPa. Snahou tedy bude navrhnout alespoň 2 MPa tlakovou rezervu tak, aby byla celá membrána tlačena.

Při návrhu předpětí se naplno objevil největší problém našeho modelu a to je jeho tvar. Obvod skořepiny je přizpůsoben obvodovému prstenci, který je brán jako dokonale tuhý (nedeformovatelný) a jeho geometrie je tedy pro nás výchozí. Ta však není výhodná z hlediska komplexního návrhu pro námi zvolenou ortogonální lanovou síť v obou směrech, kterou předpínací vložky definují (spáry jsou ortogonální). Dalším problémem jsou samotná příčná lana, která mají různá vzepětí a nosné lano namáhají různými reakcemi po jeho délce, a v neposlední řadě i větší zborcení střešní roviny ve středu střechy. Na základě těchto faktů se stal návrh předpětí obtížný, kdy nebylo možné zvolit jednotnou průřezovou plochu předpínacích vložek a jednotnou předpínací sílu v podélném a příčném směru konstrukce. Díky tvaru skořepiny se při předpínání téměř vždy objevily v určitých místech tahy ve spárách mezi panely a tak nezbyvalo nic jiného než postupovat „ruční iterační metodou pokusů a omylů“ a snažit se tahy omezit na co nejmenší hodnoty. Tím pádem bylo nutné připustit možný vznik trhlin ve spárách od tahového namáhání betonu a muset navrhnout do spár podélnou výztuž. Výsledný návrh předpětí je demonstrován obrázky napětí od charakteristické kombinace (v čase 5) pro posuzovanou kombinaci K1 níže. Z obrázků je patrné, že největší tahová namáhání vznikají při horním okraji skořepiny v oblasti hřebene. Tato místa představují zlomy a trasování předpínacích kabelů by tomu mělo odpovídat. Tahová napětí ve spárách při horním okraji se také jistě zmenší odečtením normálového napětí z času 2 od aktivace skořepiny, ale úplně nevymizí (viz. posouzení na MSP). Zobrazený návrh předpětí dodržuje zásady pro mezní stav omezení napětí, neboť maximální tlakové napětí v betonu je menší než mezní hodnota  $0,6 f_{ck}$ , tj. 18 MPa, a maximální tahové napětí menší než únosnost betonu v tahu  $f_{ctm} = 2,9$  MPa. Předpínací kabely jsou v modelu vedeny vždy v těžišti spolupůsobícího průřezu tvaru T zobrazeného v kapitole 3.1.

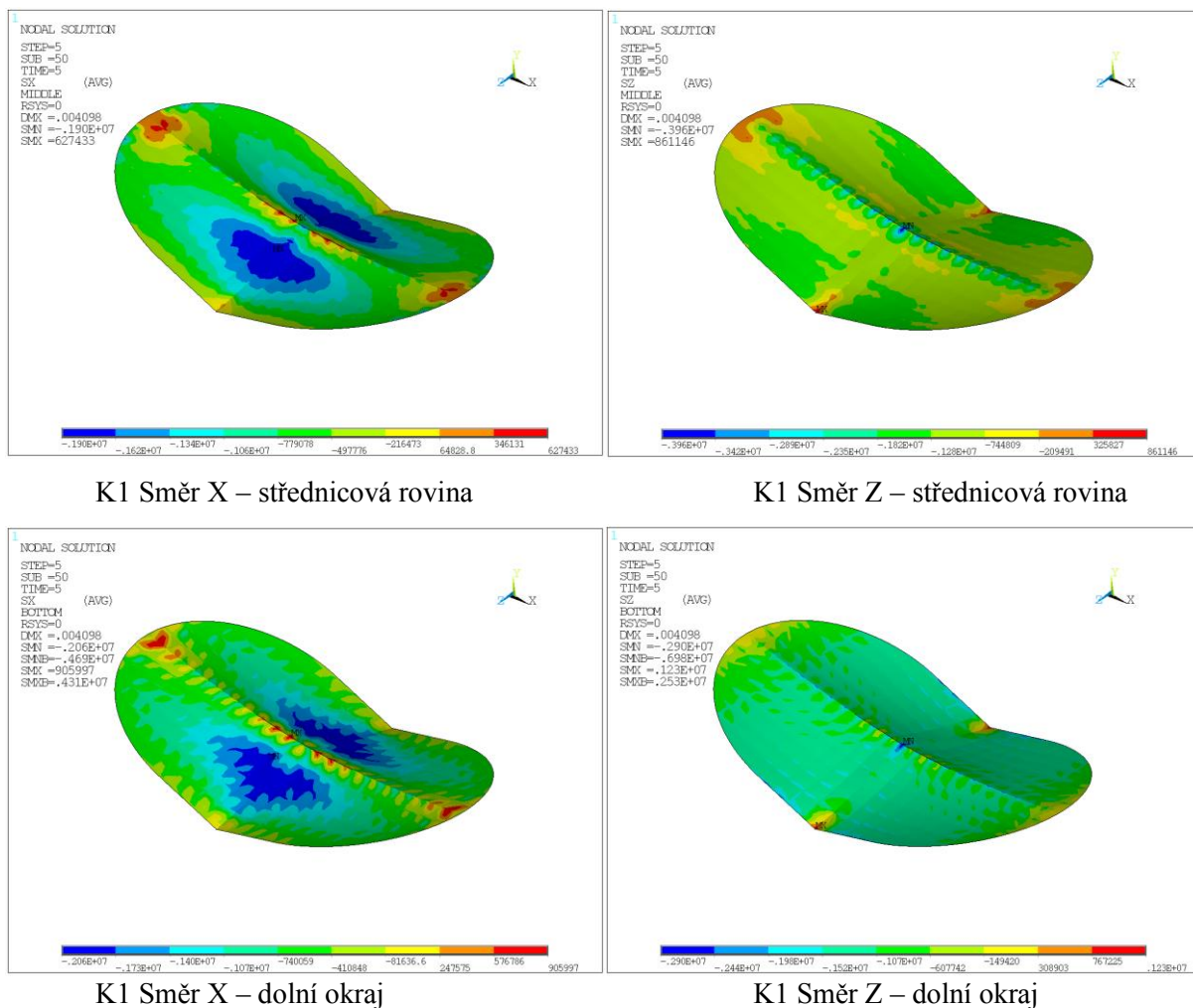


K1 Směr X – horní okraj

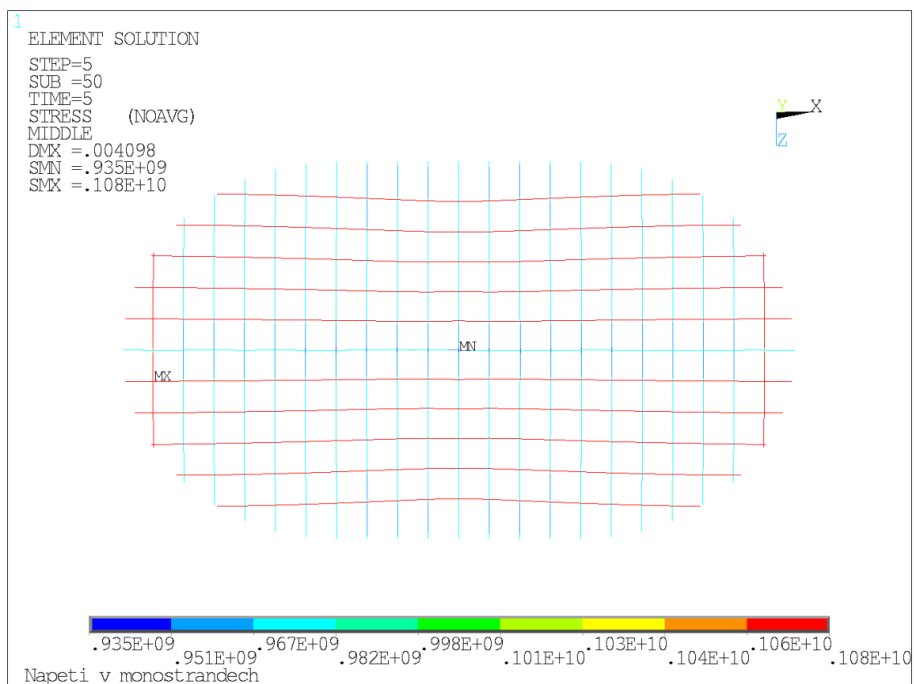


K1 Směr Z – horní okraj



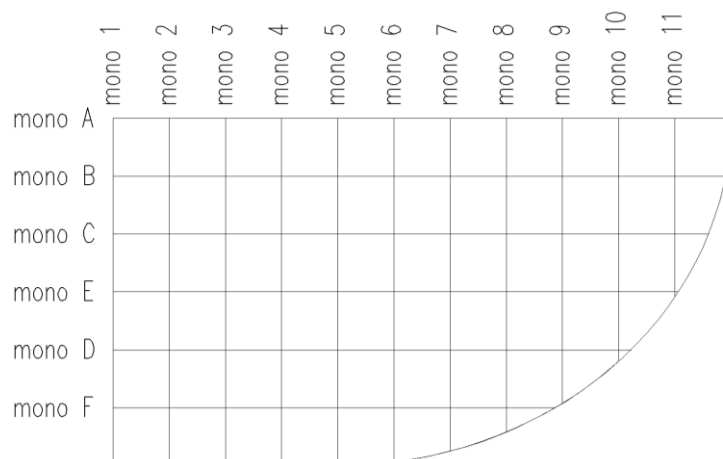


Stanovení kotevního napětí a kotev předpínacích vložek:



Obrázek 3.31 Napětí v předpínacích kabelech skořepiny

Jednotlivé vložky jsou očíslovány dle schématu 3.32.. Pro předepnutí skořepiny bylo s výhodou užito systému VSL pro předpínání plochých desek a skořepin. Navržené kabely budou vedeny v ocelové chráničce pro 4 kusy lana, které jsou vyskládány vodorovně vedle sebe (4 „monostrandy“) s výjimkou kabelu mono A, kde bude chránička pro 5 lan. Z návrhu vychází i volba kotev systému VSL. Budou užity aktivní kotvy s označením SO6-4 a jedna SA5-5 pro kabel mono A. Výsledný návrh je přehledně zobrazen pomocí tabulky 3. K němu také byly vyhotoveny výkresy předpínacích vložek skořepiny.



3.32 Schéma označení předpínacích vložek skořepiny

CISLO PŘEDPÍNAČÍHO KABELU											
	mono 1	mono 2	mono 3	mono 4	mono 5	mono 6	mono 7	mono 8	mono 9	mono 10	mono 11
$\sigma_{pm\infty}$ (MPa)	985.91	975.86	976.35	974.86	973.49	972.78	972.74	973.27	974.48	977.81	1076.90
$\sigma_{pm0}$ (MPa)	1035.21	1024.65	1025.17	1023.60	1022.16	1021.42	1021.38	1021.93	1023.20	1026.70	1130.75
Kotevní napětí (MPa)	1138.73	1127.12	1127.68	1125.96	1124.38	1123.56	1123.51	1124.13	1125.52	1129.37	1243.82
Průřezová plocha kabelu (m <sup>2</sup> )	0.00120	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060	0.00060
Počet lan v kabelu (ks)	2x4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Navržená kotva VSL	4xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4

	mono A	mono B	mono C	mono D	mono E	mono F
$\sigma_{pm\infty}$ (MPa)	981.04	1075	1069.6	1068	1067.8	1069.9
$\sigma_{pm0}$ (MPa)	1030.09	1128.75	1123.08	1121.4	1121.19	1123.4
Kotevní napětí (MPa)	1133.1	1241.63	1235.39	1233.54	1233.31	1235.73
Průřezová plocha kabelu (m <sup>2</sup> )	0.0015	0.0018	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
Počet lan v kabelu (ks)	2x5	3x4	4	4	4	4
Navržená kotva VSL	4xSA5-5	6xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4	2xSO6-4

Tabulka 3 - Navržené předpínací kabely skořepiny

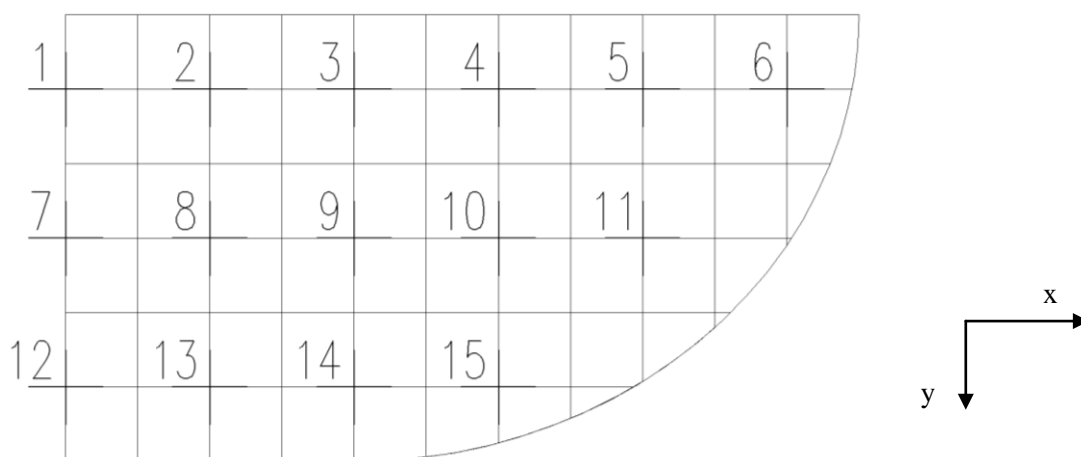
### 3.5.2 Shrnutí výsledků časové analýzy

Průběh časové analýzy od výchozího tvaru až po zatížení sněhem demonstrují obrázky v příloze statického výpočtu P5. Zobrazují napětí vnitřní síly skořepiny v podélném a příčném směru, deformaci ve svislém směru, vnitřní síly žeber a to pro každý čas. Čas 3 obsahuje výše navržené předepnutí skořepiny. Čas 5 je rozdělen na 5 kombinací v závislosti na zatížení (5 šachů zatížení sněhem) a pro všechny tyto kombinace jsou také uvedena napětí a vnitřní síly příslušných prvků, a lze tedy odečíst a porovnat jejich odezvu skořepiny.

## 4 Posouzení předpjaté skořepiny

### 4.1 Stanovení vnitřních sil

Dále se diplomová práce bude zabývat posouzením vybraných bodů ve spárách skořepiny dle mezních stavů použitelnosti a mezního stavu únosnosti [1]. Pro posouzení byla vybrána časová analýza zahrnující kombinaci K1 od zatížení sněhem, tedy celoplošné zatížení. Vybrané body jsou znázorněny na obrázku 4.1. V těchto bodech bylo nejprve nutno odečíst vnitřní síly desky a žebra v každém čase, které v něm působí. Jelikož v čase 1 je model definován pouze lany, naše posouzení začíná od času 2, tedy aktivace skořepiny. Jak již bylo dříve uvedeno, napětí v tomto čase je nutno odečíst, neboť ve spárách mezi panely po montáži panelů a zalití skořepiny nevznikají. Pro snazší průběh odečtu vnitřních sil, byly veškeré prvky skořepiny v softwaru natočeny tak, aby měly jednotný shodný souřadný systém. Tento lokální souřadný systém elementů se od globálního systému liší tak, že má zaměněnou osu Y s osou Z. V příloze statického výpočtu P5 jsou tedy napětí a deformace v jednotlivých časech zobrazena v globálním souřadném systému a vnitřní síly prvků skořepiny a žeber v novém lokálním souřadném systému.



4.1 Vybrané body pro posouzení ve spárách skořepiny

V následujících tabulkách jsou vypsány hodnoty vnitřních sil ve vybraných bodech skořepiny (deska a žebra) pro jednotlivé časy, tak jak byly odečteny z programu ANSYS pomocí řezů (paths). Průběh vnitřních sil byl nad jednotlivými řezy vždy integrován a vydělen vzdáleností mezi uzly, které definovaly jednotlivé řezy. Tato vzdálenost byla vždy volena s ohledem na předpokládanou spolupůsobící šířku průřezu ve spáře 3 m a na rozmístění uzlů skořepiny. Hodnota délky řezů se pohybovala od 2,8 – 3,2 m. Tímto způsobem byly stanoveny hodnoty normálových sil v N/m a dimenzačních ohybových momentů v Nm/m v jednotlivých posuzovaných bodech.

VNITŘNÍ SILY SKOŘEPINY (DESKY) VE VYBRANÝCH BODECH									
TIME 2 - AKTIVACE SKOŘEPINY					TIME 3 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE SKOŘEPINY				
Bod	Vnitřní síly skořepiny				Bod	Vnitřní síly skořepiny			
	nx (N/m)	mxD (Nm/m)	ny (N/m)	myD (Nm/m)		nx (N/m)	mxD (Nm/m)	ny (N/m)	myD (Nm/m)
1	-2269.62	71.00	2846.84	105.51	1	-185118.4	527.73	-113248.5	493.17
2	-1866.81	80.32	3570.67	120.12	2	-150040.7	236.57	-48011.56	921.62
3	-966.77	76.55	4602.74	127.73	3	-108554.9	175.77	-61857.06	595.03
4	82.65	75.07	6122.95	144.88	4	-66450.71	167.29	-65648.17	474.33
5	649.29	97.40	7576.03	162.29	5	-39794.43	251.14	-38326.28	610.88
6	-124.59	103.30	4088.29	131.72	6	4816.50	752.99	22887.47	1265.40
7	-259.80	70.38	7051.69	140.77	7	-172456.8	316.84	-71368.88	378.15
8	129.32	84.32	5337.48	136.71	8	-163063.5	197.04	-77933.13	518.56
9	174.43	84.10	5718.00	139.37	9	-136013.8	203.43	-76911.74	441.66
10	90.56	85.02	5944.28	136.15	10	-113452.8	252.96	-72971.26	473.67
11	-297.42	85.77	4988.07	134.54	11	-91342.78	341.39	-69967.68	437.87
12	709.63	79.40	6795.16	151.53	12	-71513.61	515.15	44952.26	995.23
13	944.73	88.78	6566.61	150.42	13	-66989.76	205.87	-84766.46	392.70
14	1379.51	93.95	4352.93	140.56	14	-62453.89	224.56	-107138.0	235.97
15	955.73	78.93	3374.71	130.71	15	-68682.14	178.05	-113365.0	172.43
TIME 4 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE + OSTATNÍ STÁLÉ ZATÍŽENÍ					TIME 5 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE + OSTATNÍ STÁLÉ ZATÍŽENÍ + SNÍH				
Bod	Vnitřní síly skořepiny				Bod	Vnitřní síly skořepiny			
	nx (N/m)	mxD (Nm/m)	ny (N/m)	myD (Nm/m)		nx (N/m)	mxD (Nm/m)	ny (N/m)	myD (Nm/m)
1	-164546.2	551.46	-111639.1	492.10	1	-120402.5	612.36	-108026.8	510.35
2	-127817.7	247.56	-47880.06	969.92	2	-84180.43	273.37	-45363.41	1037.92
3	-94471.16	175.12	-61648.80	608.82	3	-64146.84	174.43	-60874.83	638.41
4	-59869.77	158.70	-68388.61	461.36	4	-45308.88	139.80	-75335.66	436.73
5	-37969.90	171.09	-45636.30	561.78	5	-32954.33	180.04	-61635.33	457.18
6	7090.00	748.73	19523.18	1258.70	6	14056.11	752.83	14886.16	1258.98
7	-161410.6	308.75	-75821.9	397.83	7	-137383.9	294.40	-87235.65	436.56
8	-151167.1	208.95	-82399.13	519.72	8	-125545.6	232.64	-93284.99	518.68
9	-125030.3	195.28	-79026.01	416.84	9	-101132.5	185.06	-84556.30	367.65
10	-102174.2	231.47	-74128.13	444.85	10	-76018.83	192.47	-77306.82	384.28
11	-80554.82	328.14	-69255.38	443.53	11	-56147.25	303.67	-67202.98	452.06
12	-67858.56	540.78	29306.01	984.27	12	-60078.21	595.84	-7747.20	955.42
13	-64772.66	212.67	-92658.05	391.14	13	-60126.05	226.47	-111650.7	390.90
14	-58035.26	218.18	-106436.7	255.29	14	-48270.74	224.26	-105812.4	267.08
15	-62405.03	182.14	-107510.0	172.61	15	-48181.15	194.55	-95402.57	214.37

Tabulka 4 - Vnitřní síly desky skořepiny ve vybraných bodech v jednotlivých časech



VNITŘNÍ SÍLY ŽEBER SKOŘEPINY VE VYBRANÝCH BODECH									
TIME 2 - AKTIVACE SKOŘEPINY					TIME 3 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE				
Bod	Vnitřní síly žebra				Bod	Vnitřní síly žebra			
	Směr X		Směr Y			Směr X		Směr Y	
	Nx (N)	My (Nm)	Ny (N)	Mx (Nm)		Nx (N)	My (Nm)	Ny (N)	Mx (Nm)
1	-5508.50	-979.86	1371.53	819.17	1	-52503.50	8703.00	-212156.6	7414.60
2	-6725.95	-1346.20	-178.95	1033.50	2	-162530.0	-3504.40	-255783.3	14900.0
3	-6297.10	-1415.00	-538.37	1147.10	3	-100343.5	-2231.20	-204953.3	10432.0
4	-6380.05	-1464.20	-990.10	1248.30	4	-66419.50	-2426.90	-188916.6	8855.00
5	-7768.00	-1550.00	-1132.42	1330.90	5	-50714.00	-2401.20	-192996.6	10851.0
6	-7947.40	-1597.30	2110.70	946.99	6	-103588.5	-15197.0	-212803.3	14931.0
7	-3990.70	-1029.30	-2345.63	2140.60	7	-212710.0	-4150.20	-139776.6	3911.80
8	-6074.35	-1411.30	-3170.32	1289.20	8	-156405.0	-2577.80	-157123.3	4996.10
9	-6362.25	-1424.30	-3538.63	1331.90	9	-134240.0	-2808.10	-164253.3	4847.50
10	-7732.15	-1472.40	-3025.99	1381.00	10	-130375.0	-3460.70	-178013.3	5305.40
11	-6093.55	-1333.00	2468.03	1149.20	11	-139600.0	-4657.50	-145546.6	4675.10
12	-5249.05	-773.86	-1929.10	2370.70	12	-174605.0	-6612.70	-59577.00	13970.0
13	-5044.80	-1405.10	-3172.13	1493.90	13	-48921.00	-2562.90	-79762.00	1200.10
14	-7102.00	-1684.50	-3447.89	1328.70	14	-70540.00	-4477.10	-104160.3	-618.78
15	-4323.65	-1431.20	589.53	1392.00	15	-75656.50	-3903.50	-79477.33	-2260.2
TIME 4 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE + OST. STÁLÉ ZATÍŽENÍ					TIME 5 – PŘEDPĚTÍ + AKTIVACE + OST. STÁLÉ ZATÍŽENÍ+SNÍH				
Bod	Vnitřní síly žebra				Bod	Vnitřní síly žebra			
	Směr X		Směr Y			Směr X		Směr Y	
	Nx (N)	My (Nm)	Ny (N)	Mx (Nm)		Nx (N)	My (Nm)	Ny (N)	Mx (Nm)
1	-23680.00	9295.60	-213483.3	7337.90	1	37862.50	10571.0	-217393.3	7216.50
2	-145680.0	-3750.10	-263250.0	15178.0	2	-109700.0	-4263.80	-280503.3	15817.0
3	-85590.50	-2250.50	-209070.0	10415.0	3	-53670.50	-2283.20	-218763.3	10441.0
4	-54551.50	-2340.30	-188740.0	8338.70	4	-28168.00	-2146.20	-188700.0	7238.20
5	-37792.50	-2119.10	-187316.6	9844.60	5	-8580.80	-1508.70	-175200.0	7678.20
6	-103072.5	-14802.0	-212236.6	14713.0	6	-100715.5	-14010.0	-211500.0	14270.0
7	-197000.0	-3898.90	-149146.6	4016.70	7	-163640.0	-3432.20	-171266.6	5578.60
8	-146375.0	-2788.80	-163330.0	4868.30	8	-124185.0	-3232.70	-177643.3	4562.20
9	-120005.0	-2751.50	-160130.0	4497.90	9	-88619.00	-2624.00	-151636.6	3703.80
10	-112130.0	-3265.20	-170606.6	4886.00	10	-71842.00	-2840.40	-155326.6	3970.30
11	-122170.0	-4436.30	-144913.3	4443.60	11	-83785.00	-4098.40	-14433.33	4010.70
12	-174595.0	-7197.00	-80427.00	13538.0	12	-174465.0	-8482.90	-129070.0	12700.0
13	-43464.50	-2637.80	-84586.33	-770.85	13	-31132.50	-2797.30	-96949.00	-1204.9
14	-63793.00	-4481.90	-106040.0	-827.25	14	-48584.00	-4484.00	-111520.0	-2104.3
15	-68506.50	-3888.20	-87898.00	-1843.90	15	-52395.50	-3862.40	-107649.6	-1072.9

Tabulka 5 – Vnitřní síly žebér skořepiny v jednotlivých časech

Z tabulek je zřejmé, že jednotlivé zatěžovací stavy se v každém čase načítají. Abychom mohli posoudit skořepinu dle kombinačních rovnic, ať už pro MSP či MSÚ, musíme získat vnitřní síly od jednotlivých zatěžovacích stavů odečtením předchozího času analýzy od následujícího. Průběh odečtu vnitřních sil je znázorněn na obrázku 4.2.



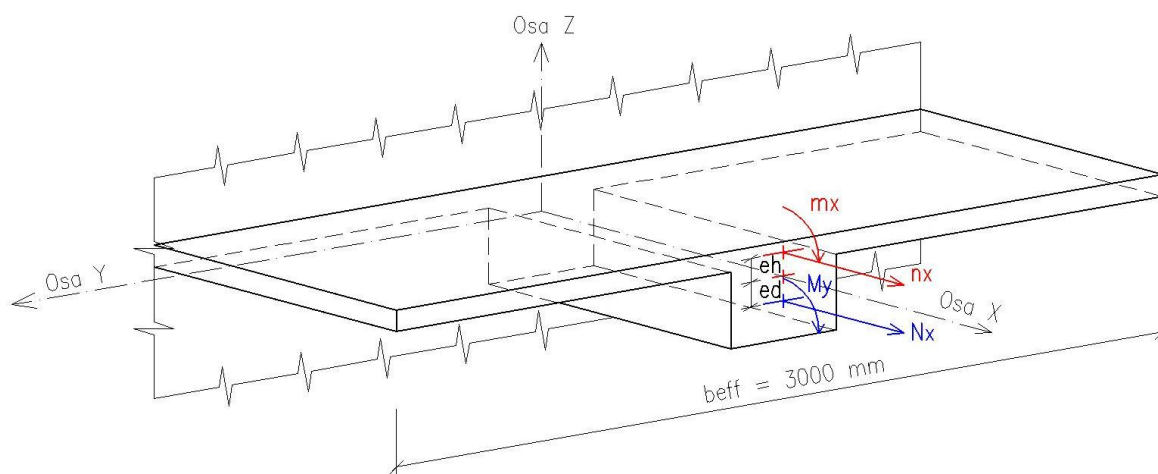
#### 4.2 Průběh stanovení vnitřních sil od jednotlivých zatěžovacích stavů

Vnitřní síly od PŘEDPĚTÍ									
Bod	Vnitřní síly skořepiny				Bod	Vnitřní síly žebra			
	$n_x$ (N/m)	$m_x D$ (Nm/m)	$n_y$ (N/m)	$m_y D$ (Nm/m)		$N_x$ (N)	$M_y$ (Nm)	$N_y$ (N)	$M_x$ (Nm)
1	-182848.8	456.73	-116095.3	387.66	1	-46995	9682.86	-213528.2	6595.43
2	-148173.9	156.25	-51582.23	801.5	2	-155804.0	-2158.2	-255604.3	13866.5
3	-107588.1	99.22	-66459.8	467.3	3	-94046.4	-816.2	-204414.9	9284.9
4	-66533.36	92.22	-71771.12	329.45	4	-60039.45	-962.7	-187926.5	7606.7
5	-40443.72	153.74	-45902.31	448.59	5	-42946	-851.2	-191864.3	9520.1
6	4941.09	649.69	18799.18	1133.68	6	-95641.1	-13600	-214914.0	13984.0
7	-172197.1	246.46	-78420.57	237.38	7	-208719.3	-3120.9	-137431.0	1771.2
8	-163192.8	112.72	-83270.61	381.85	8	-150330.7	-1166.5	-153953.0	3706.9
9	-136188.3	119.33	-82629.74	302.29	9	-127877.8	-1383.8	-160714.7	3515.6
10	-113543.4	167.94	-78915.54	337.52	10	-122642.9	-1988.3	-174987.3	3924.4
11	-91045.36	255.62	-74955.75	303.33	11	-133506.5	-3324.5	-148014.7	3525.9
12	-72223.24	435.75	38157.1	843.7	12	-169356.0	-5838.8	-57647.9	11599.3
13	-67934.49	117.09	-91333.07	242.28	13	-43876.2	-1157.8	-76589.86	-293.8
14	-63833.4	130.61	-111490.9	95.41	14	-63438	-2792.6	-100712.5	-1947.48
15	-69637.87	99.12	-116739.8	41.72	15	-71332.85	-2472.3	-80066.86	-3652.2
Vnitřní síly od OST. STÁLÉHO ZAT.									
Bod	Vnitřní síly skořepiny				Bod	Vnitřní síly žebra			
	$n_x$ (N/m)	$m_x D$ (Nm/m)	$n_y$ (N/m)	$m_y D$ (Nm/m)		$N_x$ (N)	$M_y$ (Nm)	$N_y$ (N)	$M_x$ (Nm)
1	20572.24	23.73	1609.34	-1.07	1	28823.5	592.6	-1326.66	-76.7
2	22223.02	10.99	131.5	48.3	2	16850	-245.7	-7466.66	278
3	14083.8	-0.65	208.26	13.79	3	14753	-19.3	-4116.66	-17
4	6580.94	-8.59	-2740.44	-12.97	4	11868	86.6	176.66	-516.3
5	1824.53	-80.048	-7310.02	-49.1	5	12921.5	282.1	5680	-1006.4
6	2273.5	-4.26	-3364.29	-6.7	6	516	395	566.66	-218
7	11046.25	-8.09	-4453.11	19.68	7	15710	251.3	-9370	104.9
8	11896.31	11.91	-4466	1.16	8	10030	-211	-6206.66	-127.8
9	10983.57	-8.15	-2114.27	-24.82	9	14235	56.6	4123.33	-349.6
10	11278.56	-21.49	-1156.87	-28.82	10	18245	195.5	7406.66	-419.4
11	10787.96	-13.25	712.3	5.66	11	17430	221.2	633.33	-231.5
12	3655.05	25.63	-15646.25	-10.96	12	10	-584.3	-20850	-432
13	2217.1	6.8	-7891.59	-1.56	13	5456.5	-74.9	-4824.33	-1970.95
14	4418.63	-6.38	701.24	19.32	14	6747	-4.8	-1879.66	-208.47
15	6277.11	4.09	5855.06	0.18	15	7150	15.3	-8420.66	416.3

Vnitřní síly od ZATÍŽENÍ SNĚHEM									
Bod	Vnitřní síly skořepiny				Bod	Vnitřní síly žebra			
	$n_x$ (N/m)	$m_{xD}$ (Nm/m)	$n_y$ (N/m)	$m_{yD}$ (Nm/m)		$N_x$ (N)	$M_y$ (Nm)	$N_y$ (N)	$M_x$ (Nm)
1	44143.66	60.9	3612.28	18.25	1	61542.5	1275.4	-3910	-121.4
2	43637.34	25.81	2516.65	68	2	35980	-513.7	-17253.33	639
3	30324.32	-0.69	773.97	29.59	3	31920	-32.7	-9693.33	26
4	14560.89	-18.9	-6947.05	-24.63	4	26383.5	194.1	40	-1100.5
5	5015.57	8.948	-15999.03	-104.6	5	29211.7	610.4	12116.66	-2166.4
6	6966.11	4.1	-4637.02	0.28	6	2357	792	736.66	-443
7	24026.7	-14.35	-11413.66	38.73	7	33360	466.7	-22120	1561.9
8	25621.5	23.69	-10885.86	-1.04	8	22190	-443.9	-14313.33	-306.1
9	23897.79	-10.22	-5530.29	-49.19	9	31386	127.5	8493.33	-794.1
10	26155.42	-39	-3178.69	-60.57	10	40288	424.8	15280	-915.7
11	24407.57	-24.47	2052.4	8.53	11	38385	337.9	-20	-432.9
12	7780.35	55.06	-37053.21	-28.85	12	130	-1285.9	-48643	-838
13	4646.61	13.795	-18992.68	-0.24	13	12332	-159.5	-12362.67	-434.05
14	9764.52	6.08	624.34	11.79	14	15209	-2.1	-5480	-1277.05
15	14223.88	12.41	12107.45	41.76	15	16111	25.8	-19751.67	771

Tabulka 6 – Vnitřní síly žeber a desky skořepiny od jednotlivých zatěžovacích stavů

Dalším a posledním krokem bylo konečné stanovení normálové síly a ohybového momentu, kterými je spolupůsobící průřez ve všech vybraných bodech namáhán, a to pro směr x a y. Obrázek 4.3 demonstruje tuto situaci ve směru x a taky zobrazuje kladnou konvenci vnitřních sil. Vnitřní síly skořepiny  $n_x, n_y, m_{xD}, m_{yD}$  s vnitřními silami žebra  $N_x, N_y, M_x, M_y$  je nutno sečíst dle uvedených rovnic níže s ohledem na konvenci. Získáme tak normálovou sílu N a M pro každý posuzovaný bod ve směru x a y pro každý zatěžovací stav.



Obrázek 4.3 Schéma posuzovaného průřezu pro stanovení N a M ve směru x

Stanovení normálové síly pro směr x a y:

$$N_{x,a=3,4,5} = n_{x,i} \cdot b_{eff} + N_{x,i}$$

$$N_{y,a=3,4,5} = n_{y,i} \cdot b_{eff} + N_{y,i}$$

Stanovení ohybového momentu pro směr x a y:

$$M_{y,a=3,4,5} = m_{xD,i} \cdot b_{eff} + n_{x,i} \cdot b_{eff} \cdot e_h + N_{x,i} \cdot e_d + M_{y,i}$$

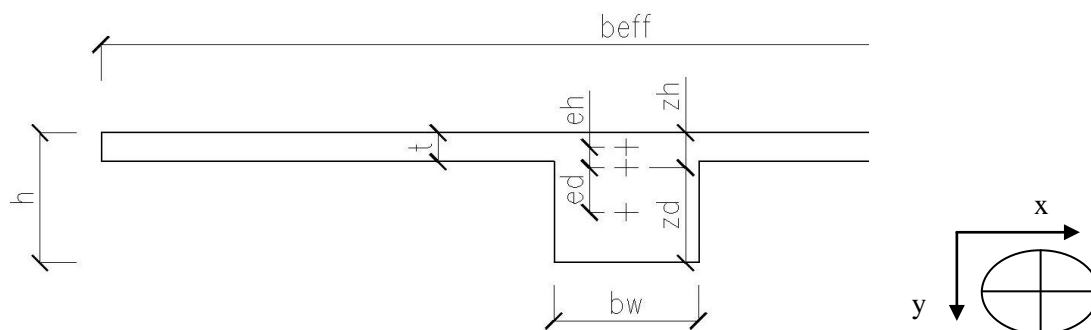
$$M_{x,a=3,4,5} = m_{yD,i} \cdot b_{eff} + n_{y,i} \cdot b_{eff} \cdot e_h + N_{y,i} \cdot e_d + M_{x,i}$$

BOD	Vnitřní síly od předpětí			
	Směr X		Směr Y	
	Nx,3 (N)	My,3 (Nm)	Ny,3 (N)	Mx,3 (Nm)
1	-595541.46	-8478.30	-561814.22	14170.08
2	-600325.99	-1860.04	-410351.08	38889.78
3	-416810.97	-3180.30	-403794.37	24465.22
4	-259639.53	-2082.00	-403239.93	19437.16
5	-164277.16	-380.73	-329571.18	26615.88
6	-80817.83	1766.33	-158516.49	47034.14
7	-725310.45	1098.36	-372692.74	5977.44
8	-639909.11	-3844.55	-403764.84	9549.40
9	-536442.71	-3220.62	-408603.92	10060.69
10	-463272.95	-1182.60	-411733.96	12965.85
11	-406642.53	2361.32	-372881.95	9824.26
12	-386025.67	7809.27	56823.40	27745.96
13	-247679.67	-4549.76	-350589.08	-5764.36
14	-254938.20	-2964.03	-435185.24	-8338.57
15	-280246.46	-2506.61	-430286.24	-13641.32
BOD	Vnitřní síly od ostatního stálého zatížení			
	Směr X		Směr Y	
	Nx,4 (N)	My,4 (Nm)	Ny,4 (N)	Mx,4 (Nm)
1	90540.22	-269.05	3501.35	358.47
2	83519.06	679.67	-7072.17	1363.79
3	57004.40	2.42	-3491.89	566.33
4	31610.82	-589.70	-8044.65	-1045.56
5	18395.09	-1419.34	-16250.06	-3102.35
6	7336.50	634.16	-9526.20	-883.09
7	48848.75	-304.88	-22729.33	554.97
8	45718.93	168.12	-19604.67	-124.59
9	47185.71	-312.42	-2219.48	-1292.77
10	52080.68	-705.28	3936.06	-1614.70
11	49793.88	-615.64	2770.23	-170.62
12	10975.15	6.62	-67788.75	-575.84
13	12107.80	-467.60	-28499.10	-2731.70
14	20002.89	-298.26	224.05	200.60
15	25981.33	-38.31	9144.51	2453.80
BOD	Vnitřní síly od zatížení sněhem			
	Směr X		Směr Y	
	Nx,5 (N)	My,5 (Nm)	Ny,5 (N)	Mx,5 (Nm)
1	193973.48	-502.80	6926.84	1031.98
2	166892.02	931.25	-9703.38	3395.51
3	122892.96	-4.40	-7371.42	1439.40
4	70066.17	-1318.52	-20801.15	-2367.27
5	44258.41	-2540.72	-35880.42	-6706.38
6	23255.33	1473.04	-13174.39	-1325.70
7	105440.10	-625.47	-56360.98	2447.11
8	99054.50	288.53	-46970.91	-410.16
9	103079.37	-707.91	-8097.54	-2932.03
10	118754.26	-1362.59	5743.93	-3520.41
11	111607.71	-1399.25	6137.20	-53.89
12	23471.05	-40.98	-159802.63	-1277.56
13	26271.83	-1103.10	-69340.71	-2161.91
14	44502.56	-629.86	-3606.98	-460.88
15	58782.64	-74.17	16570.68	5396.11

Tabulka 7- Konečné stanovení vnitřních sil v každém bodě od jednotlivých zatěžovacích stavů

## 4.2 Posouzení MSP

Geometrie spolupůsobících průřezů věnců, jež budou vstupovat do posouzení mezního stavu použitelnosti, bude zjednodušeně shodná s modelovanými žebry v softwaru uvedené v kapitole 3.1. Jedná se o průřezy tvaru T.



Obrázek 4.4 Schéma T průřezu pro posouzení na MSP

### Směr X

$b_{\text{eff}} =$	3.000 m	$A_c =$	0.324 m <sup>2</sup>
$h =$	0.360 m	$I_y =$	0.003 m <sup>4</sup>
$b_w =$	0.300 m	$W_h =$	0.031 m <sup>3</sup>
$t =$	0.080 m	$W_d =$	0.010 m <sup>3</sup>
$z_h =$	0.087 m	$e_h =$	0.047 m
$z_d =$	0.273 m	$e_d =$	0.133 m

### Směr Y

$b_{\text{eff}} =$	3.000 m	$A_c =$	0.352 m <sup>2</sup>
$h =$	0.360 m	$I_y =$	0.00333 m <sup>4</sup>
$b_w =$	0.400 m	$W_h =$	0.03437 m <sup>3</sup>
$t =$	0.080 m	$W_d =$	0.01268 m <sup>3</sup>
$z_h =$	0.097 m	$e_h =$	0.057 m
$z_d =$	0.263 m	$e_d =$	0.123 m

### 4.2.1 Kombinace a posouzení

Vybrané body byly posouzeny na mezní stavy použitelnosti dle [1]. Byl posouzen mezní stav omezení napětí, jež je spojen s charakteristickou kombinací a lineární dotvarování průřezu, které je spojeno s kombinací kvazistálou. Kombinační rovnice jsou uvedené zde:

Charakteristická kombinace:

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

Kvazistálá kombinace:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Z kombinací je zřejmé, že rovnice obsahují kombinační součinitele  $\psi_{0,i}, \psi_{2,i}$ , které redukují proměnné zatížení, jež je v našem případě definováno pouze zatížením od sněhu. Hodnota  $\psi_{0,i}$  pro kategorii budovy H (střechy) je rovna 0 a hodnota součinitele  $\psi_{2,i}$  taktéž, neboť stavba se nachází v nadmořské výšce pod hranicí 1000 m n. m. To znamená, že charakteristická kombinace v našem případě bude prostým součtem napětí všech zatěžovacích stavů a kvazistálá kombinace jen součtem stálých zatížení bez užití součinitelů. Problematika užití součinitelů související s principem superpozice u nelineárních konstrukcí, která je uvedena v [8], se v posouzení MSP nenachází a je také popsána v kapitole 4.4. Odezva od vlastní tíhy skořepiny je ve spárách mezi prefabrikáty (ve věnci) nulová s ohledem na postup uložení (kap. 3.2.6) a hledáním výchozího tvaru, kdy navržené předpětí nosných lan eliminuje účinky stálého zatížení od vlastní tíhy skořepiny. Dále norma popisuje užití součinitelů  $r_{inf}, r_{sup}$ , které zohledňují odchylky možných změn předpětí v mezních stavech použitelnosti. V našem případě uvažujeme přímé měření předpětí, kdy odchylky budou nulové a tyto součinitele rovny 1.

#### Dílčí součinitele zatížení pro MSP

$$\psi_0 = 0; \psi_2 = 0, r_{inf} = r_{sup} = 1,0$$

Maximální hodnota napětí v tlačeném betonu od charakteristické kombinace dle [1] nesmí překročit hodnotu 18 MPa. (MSP - omezení napětí v betonu)

$$\sigma_{char} \leq 0,6 \cdot f_{ck}; \sigma_{char} \leq 18 \text{ MPa}$$

Maximální hodnota napětí v tlačeném betonu od kvazistálé kombinace dle [1] nesmí překročit hodnotu 13,5 MPa. (MSP - lineární dotvarování průřezu)

$$\sigma_{kvaz} \leq 0,45 \cdot f_{ck}; \sigma_{kvaz} \leq 13,5 \text{ MPa}$$

S připuštěním vzniku trhlin ve spárách mezi panely nesmí hodnota v tahu překročit mezní hodnotu únosnosti betonu v tahu  $f_{ctm} = 2,8 \text{ MPa}$  pro obojí výše zmíněné kombinace.

$$\sigma \leq f_{ctm}; \sigma \leq 2,8 \text{ MPa}.$$

Průřez byl posuzován dle teorie pružnosti zjednodušeně jako plně betonový průřez.

POSOUZENÍ SKOŘEPINY NA MSP											
PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY											
Směr X	b <sub>eff</sub> =	3.000 m	A <sub>c,x</sub> =	0.324 m <sup>2</sup>		b <sub>eff</sub> =	3.000 m	A <sub>c,y</sub> =	0.352 m <sup>2</sup>		
	h =	0.360 m	I <sub>y</sub> =	0.00269 m <sup>4</sup>		h =	0.360 m	I <sub>y</sub> =	0.00333 m <sup>4</sup>		
	b <sub>w</sub> =	0.300 m	W <sub>h,x</sub> =	0.03095 m <sup>3</sup>		b <sub>w</sub> =	0.400 m	W <sub>h,y</sub> =	0.03437 m <sup>3</sup>		
	t =	0.080 m	W <sub>d,x</sub> =	0.00986 m <sup>3</sup>		t =	0.080 m	W <sub>d,y</sub> =	0.01268 m <sup>3</sup>		
	z <sub>h</sub> =	0.087 m	e <sub>h</sub> =	0.047 m		z <sub>h</sub> =	0.097 m	e <sub>h</sub> =	0.057 m		
	z <sub>d</sub> =	0.273 m	e <sub>d</sub> =	0.133 m		z <sub>d</sub> =	0.263 m	e <sub>d</sub> =	0.123 m		
SMĚR X											
BOD 1											
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE											
σ <sub>char</sub>	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$				±	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$				≥	0.6·f <sub>ck</sub> = -18.00 MPa
										≤	f <sub>ctm</sub> = 2.90 MPa
Horní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-595541.46 + 90540.22 + 193973.48}{0.324}$				+	$\frac{-8478.30 + -269.05 + -502.80}{0.03095}$				=	-1.26 MPa Vyhoví
Dolní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-595541.46 + 90540.22 + 193973.48}{0.324}$				-	$\frac{-8478.30 + -269.05 + -502.80}{0.00986}$				=	-0.02 MPa Vyhoví
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$				±	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$				≥	0.45·f <sub>ck</sub> = -13.50 MPa
Horní vlákna											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{-595541.46 + 90540.22 + 0.00}{0.324}$				+	$\frac{-8478.30 + -269.05 + 0.00}{0.03095}$				=	-1.84 MPa Vyhoví
Dolní vlákna											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{-595541.46 + 90540.22 + 0.00}{0.324}$				-	$\frac{-8478.30 + -269.05 + 0.00}{0.00986}$				=	-0.67 MPa Vyhoví
BOD 2											
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE											
σ <sub>char</sub>	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$				±	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$				≥	0.6·f <sub>ck</sub> = -18.00 MPa
										≤	f <sub>ctm</sub> = 2.90 MPa
Horní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-600325.99 + 83519.06 + 166892.02}{0.324}$				+	$\frac{-1860.04 + 679.67 + 931.25}{0.03095}$				=	-1.09 MPa Vyhoví
Dolní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-600325.99 + 83519.06 + 166892.02}{0.324}$				-	$\frac{-1860.04 + 679.67 + 931.25}{0.00986}$				=	-1.05 MPa Vyhoví
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$				±	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$				≥	0.45·f <sub>ck</sub> = -13.50 MPa
Horní vlákna											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{-600325.99 + 83519.06 + 0.00}{0.324}$				+	$\frac{-1860.04 + 679.67 + 0.00}{0.03095}$				=	-1.63 MPa Vyhoví
Dolní vlákna											
σ <sub>kvaz</sub>	$\frac{-600325.99 + 83519.06 + 0.00}{0.324}$				-	$\frac{-1860.04 + 679.67 + 0.00}{0.00986}$				=	-1.48 MPa Vyhoví
BOD 3											
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE											
σ <sub>char</sub>	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$				±	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$				≥	0.6·f <sub>ck</sub> = -18.00 MPa
										≤	f <sub>ctm</sub> = 2.90 MPa
Horní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-416810.97 + 57004.40 + 122892.96}{0.324}$				+	$\frac{-3180.30 + 2.42 + -4.40}{0.03095}$				=	-0.83 MPa Vyhoví
Dolní vlákna											
σ <sub>char</sub>	$\frac{-416810.97 + 57004.40 + 122892.96}{0.324}$				-	$\frac{-3180.30 + 2.42 + -4.40}{0.00986}$				=	-0.41 MPa Vyhoví

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-416810.97 + 57004.40 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-3180.30 + 2.42 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-1.21	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-416810.97 + 57004.40 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-3180.30 + 2.42 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.79	MPa	Vyhoví	
BOD 4									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-259639.53 + 31610.82 + 70066.17}{0.324}$	$+$	$\frac{-2082.00 + -589.70 + -1318.52}{0.03095}$	$=$	-0.62	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-259639.53 + 31610.82 + 70066.17}{0.324}$	$-$	$\frac{-2082.00 + -589.70 + -1318.52}{0.00986}$	$=$	-0.08	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-259639.53 + 31610.82 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-2082.00 + -589.70 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.79	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-259639.53 + 31610.82 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-2082.00 + -589.70 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.43	MPa	Vyhoví	
BOD 5									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-164277.16 + 18395.09 + 44258.41}{0.324}$	$+$	$\frac{-380.73 + -1419.34 + -2540.72}{0.03095}$	$=$	-0.45	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-164277.16 + 18395.09 + 44258.41}{0.324}$	$-$	$\frac{-380.73 + -1419.34 + -2540.72}{0.00986}$	$=$	0.13	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-164277.16 + 18395.09 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-380.73 + -1419.34 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.51	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-164277.16 + 18395.09 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-380.73 + -1419.34 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.27	MPa	Vyhoví	
BOD 6									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-80817.83 + 7336.50 + 23255.00}{0.324}$	$+$	$\frac{1766.33 + 634.16 + 1473.04}{0.03095}$	$=$	-0.03	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-80817.83 + 7336.50 + 23255.00}{0.324}$	$-$	$\frac{1766.33 + 634.16 + 1473.04}{0.00986}$	$=$	-0.55	MPa	Vyhoví	



KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-80817.83 + 7336.50 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{1766.33 + 634.16 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.15	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-80817.83 + 7336.50 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{1766.33 + 634.16 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.47	MPa	Vyhoví	
BOD 7									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-725310.45 + 48848.75 + 105440.10}{0.324}$	$+$	$\frac{1098.36 + -304.88 + -625.47}{0.03095}$	$=$	-1.76	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-725310.45 + 48848.75 + 105440.10}{0.324}$	$-$	$\frac{1098.36 + -304.88 + -625.47}{0.00986}$	$=$	-1.78	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-725310.45 + 48848.75 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{1098.36 + -304.88 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-2.06	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-725310.45 + 48848.75 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{1098.36 + -304.88 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-2.17	MPa	Vyhoví	
BOD 8									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-639909.11 + 45718.93 + 99054.50}{0.324}$	$+$	$\frac{-3844.55 + 168.12 + 288.53}{0.03095}$	$=$	-1.64	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-639909.11 + 45718.93 + 99054.50}{0.324}$	$-$	$\frac{-3844.55 + 168.12 + 288.53}{0.00986}$	$=$	-1.18	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-639909.11 + 45718.93 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-3844.55 + 168.12 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-1.95	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-639909.11 + 45718.93 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-3844.55 + 168.12 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-1.46	MPa	Vyhoví	
BOD 9									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-536442.71 + 47185.71 + 103079.37}{0.324}$	$+$	$\frac{-3220.62 + -312.42 + -707.91}{0.03095}$	$=$	-1.33	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-536442.71 + 47185.71 + 103079.37}{0.324}$	$-$	$\frac{-3220.62 + -312.42 + -707.91}{0.00986}$	$=$	-0.76	MPa	Vyhoví	

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-536442.71 + 47185.71 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-3220.62 + -312.42 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-1.62	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-536442.71 + 47185.71 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-3220.62 + -312.42 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-1.15	MPa	Vyhoví	
BOD 10									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-463272.95 + 52080.68 + 118754.26}{0.324}$	$+$	$\frac{-1182.60 + -705.28 + -1362.59}{0.03095}$	$=$	-1.01	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-463272.95 + 52080.68 + 118754.26}{0.324}$	$-$	$\frac{-1182.60 + -705.28 + -1362.59}{0.00986}$	$=$	-0.57	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-463272.95 + 52080.68 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-1182.60 + -705.28 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-1.33	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-463272.95 + 52080.68 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-1182.60 + -705.28 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-1.08	MPa	Vyhoví	
BOD 11									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-406642.53 + 49793.88 + 111607.71}{0.324}$	$+$	$\frac{2361.32 + -615.64 + -1399.25}{0.03095}$	$=$	-0.75	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-406642.53 + 49793.88 + 111607.71}{0.324}$	$-$	$\frac{2361.32 + -615.64 + -1399.25}{0.00986}$	$=$	-0.79	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-406642.53 + 49793.88 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{2361.32 + -615.64 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-1.04	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-406642.53 + 49793.88 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{2361.32 + -615.64 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-1.28	MPa	Vyhoví	
BOD 12									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-386025.67 + 10975.15 + 23471.05}{0.324}$	$+$	$\frac{7809.27 + 6.62 + -40.98}{0.03095}$	$=$	-0.83	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-386025.67 + 10975.15 + 23471.05}{0.324}$	$-$	$\frac{7809.27 + 6.62 + -40.98}{0.00986}$	$=$	-1.87	MPa	Vyhoví	

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-386025.67 + 10975.15 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{7809.27 + 6.62 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.91	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-386025.67 + 10975.15 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{7809.27 + 6.62 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-1.95	MPa	Vyhoví	
BOD 13									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-247679.67 + 12107.80 + 26271.83}{0.324}$	$+$	$\frac{-4549.76 + -467.60 + -1103.10}{0.03095}$	$=$	-0.84	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-247679.67 + 12107.80 + 26271.83}{0.324}$	$-$	$\frac{-4549.76 + -467.60 + -1103.10}{0.00986}$	$=$	-0.03	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-247679.67 + 12107.80 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-4549.76 + -467.60 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.89	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-247679.67 + 12107.80 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-4549.76 + -467.60 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.22	MPa	Vyhoví	
BOD 14									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-254938.20 + 20002.89 + 44502.56}{0.324}$	$+$	$\frac{-2964.03 + -298.26 + -629.86}{0.03095}$	$=$	-0.71	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-254938.20 + 20002.89 + 44502.56}{0.324}$	$-$	$\frac{-2964.03 + -298.26 + -629.86}{0.00986}$	$=$	-0.19	MPa	Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-254938.20 + 20002.89 + 0.00}{0.324}$	$+$	$\frac{-2964.03 + -298.26 + 0.00}{0.03095}$	$=$	-0.83	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-254938.20 + 20002.89 + 0.00}{0.324}$	$-$	$\frac{-2964.03 + -298.26 + 0.00}{0.00986}$	$=$	-0.39	MPa	Vyhoví	
BOD 15									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00	MPa
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-280246.46 + 25981.33 + 58782.64}{0.324}$	$+$	$\frac{-2506.61 + -38.31 + -74.17}{0.03095}$	$=$	-0.69	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-280246.46 + 25981.33 + 58782.64}{0.324}$	$-$	$\frac{-2506.61 + -38.31 + -74.17}{0.00986}$	$=$	-0.34	MPa	Vyhoví	

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{N_{x,3} + N_{x,4} + \psi_2 \cdot N_{x,5}}{A_{c,x}}$	$\pm$	$\frac{M_{y,3} + M_{y,4} + \psi_2 \cdot M_{y,5}}{W_{hd,x}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	=	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-280246.46 + 25981.33 + 0.00}{0.324}$	+	$\frac{-2506.61 + -38.31 + 0.00}{0.03095}$	=	-0.87	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-280246.46 + 25981.33 + 0.00}{0.324}$	-	$\frac{-2506.61 + -38.31 + 0.00}{0.00986}$	=	-0.53	MPa	Vyhoví	

## POSOUZENÍ SKOŘEPINY NA MSP

### PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

Směr X	$b_{eff}$	=	3.000 m	$A_{c,x}$	=	0.324 m <sup>2</sup>	Směr Y	$b_{eff}$	=	3.000 m	$A_{c,y}$	=	0.352 m <sup>2</sup>
	$h$	=	0.360 m	$I_y$	=	0.00269 m <sup>4</sup>		$h$	=	0.360 m	$I_y$	=	0.00333 m <sup>4</sup>
	$b_w$	=	0.300 m	$W_{h,x}$	=	0.03095 m <sup>3</sup>		$b_w$	=	0.400 m	$W_{h,y}$	=	0.03437 m <sup>3</sup>
	$t$	=	0.080 m	$W_{d,x}$	=	0.00986 m <sup>3</sup>		$t$	=	0.080 m	$W_{d,y}$	=	0.01268 m <sup>3</sup>
	$z_h$	=	0.087 m	$e_h$	=	0.047 m		$z_h$	=	0.097 m	$e_h$	=	0.057 m
	$z_d$	=	0.273 m	$e_d$	=	0.133 m		$z_d$	=	0.263 m	$e_d$	=	0.123 m

### SMĚR Y

#### BOD 1

CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	=	-18.00	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-561814.22 + 3501.35 + 6926.84}{0.352}$	+	$\frac{14170.08 + 358.47 + 1031.98}{0.03437}$	=	-1.11	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-561814.22 + 3501.35 + 6926.84}{0.352}$	-	$\frac{14170.08 + 358.47 + 1031.98}{0.01268}$	=	-2.79	MPa	Vyhoví	

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	=	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-561814.22 + 3501.35 + 0.00}{0.352}$	+	$\frac{14170.08 + 358.47 + 0.00}{0.03437}$	=	-1.16	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-561814.22 + 3501.35 + 0.00}{0.352}$	-	$\frac{14170.08 + 358.47 + 0.00}{0.01268}$	=	-2.73	MPa	Vyhoví	

#### BOD 2

CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	=	-18.00	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-410351.08 + -7072.17 + -9703.38}{0.352}$	+	$\frac{38889.78 + 1363.79 + 3395.51}{0.03437}$	=	0.06	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-410351.08 + -7072.17 + -9703.38}{0.352}$	-	$\frac{38889.78 + 1363.79 + 3395.51}{0.01268}$	=	-4.66	MPa	Vyhoví	

KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	=	-13.50	MPa
<b>Horní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-410351.08 + -7072.17 + 0.00}{0.352}$	+	$\frac{38889.78 + 1363.79 + 0.00}{0.03437}$	=	-0.01	MPa	Vyhoví	
<b>Dolní vlákna</b>									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-410351.08 + -7072.17 + 0.00}{0.352}$	-	$\frac{38889.78 + 1363.79 + 0.00}{0.01268}$	=	-4.36	MPa	Vyhoví	

BOD 3									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403794.37 + -3491.89 + -7371.42}{0.352}$	$+$	$\frac{24465.22 + 566.33 + 1439.40}{0.03437}$	$=$	$-0.41 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403794.37 + -3491.89 + -7371.42}{0.352}$	$-$	$\frac{24465.22 + 566.33 + 1439.40}{0.01268}$	$=$	$-3.27 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403794.37 + -3491.89 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{24465.22 + 566.33 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.43 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403794.37 + -3491.89 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{24465.22 + 566.33 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-3.13 \text{ MPa}$	Vyhoví		
BOD 4									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403239.93 + -8044.65 + -20801.15}{0.352}$	$+$	$\frac{19437.16 + -1045.56 + -2367.27}{0.03437}$	$=$	$-0.76 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403239.93 + -8044.65 + -20801.15}{0.352}$	$-$	$\frac{19437.16 + -1045.56 + -2367.27}{0.01268}$	$=$	$-2.49 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403239.93 + -8044.65 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{19437.16 + -1045.56 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.63 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403239.93 + -8044.65 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{19437.16 + -1045.56 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-2.62 \text{ MPa}$	Vyhoví		
BOD 5									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-329571.18 + -16250.06 + -35880.42}{0.352}$	$+$	$\frac{26615.88 + -3102.35 + -6706.38}{0.03437}$	$=$	$-0.60 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-329571.18 + -16250.06 + -35880.42}{0.352}$	$-$	$\frac{26615.88 + -3102.35 + -6706.38}{0.01268}$	$=$	$-2.41 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-329571.18 + -16250.06 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{26615.88 + -3102.35 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.30 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-329571.18 + -16250.06 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{26615.88 + -3102.35 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-2.84 \text{ MPa}$	Vyhoví		

BOD 6									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-158516.49 + -9526.20 + -13174.39}{0.352}$	$+$	$\frac{47034.14 + -883.09 + -1325.70}{0.03437}$	$=$	$0.79 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-158516.49 + -9526.20 + -13174.39}{0.352}$	$-$	$\frac{47034.14 + -883.09 + -1325.70}{0.01268}$	$=$	$-4.05 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-158516.49 + -9526.20 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{47034.14 + -883.09 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$0.87 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-158516.49 + -9526.20 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{47034.14 + -883.09 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-4.12 \text{ MPa}$	Vyhoví		
BOD 7									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-372692.74 + -22729.33 + -56360.98}{0.352}$	$+$	$\frac{5977.44 + 554.97 + 2447.11}{0.03437}$	$=$	$-1.02 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-372692.74 + -22729.33 + -56360.98}{0.352}$	$-$	$\frac{5977.44 + 554.97 + 2447.11}{0.01268}$	$=$	$-1.99 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-372692.74 + -22729.33 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{5977.44 + 554.97 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.93 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-372692.74 + -22729.33 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{5977.44 + 554.97 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-1.64 \text{ MPa}$	Vyhoví		
BOD 8									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403764.84 + -19604.67 + -46970.91}{0.352}$	$+$	$\frac{9549.40 + -124.59 + -410.16}{0.03437}$	$=$	$-1.07 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-403764.84 + -19604.67 + -46970.91}{0.352}$	$-$	$\frac{9549.40 + -124.59 + -410.16}{0.01268}$	$=$	$-2.05 \text{ MPa}$	Vyhoví		
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403764.84 + -19604.67 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{9549.40 + -124.59 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.93 \text{ MPa}$	Vyhoví		
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-403764.84 + -19604.67 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{9549.40 + -124.59 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-1.95 \text{ MPa}$	Vyhoví		

BOD 9									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-408603.92 + -2219.48 + -8097.54}{0.352}$	$+$	$\frac{10060.69 + -1292.77 + -2932.03}{0.03437}$	$=$	$-1.02 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-408603.92 + -2219.48 + -8097.54}{0.352}$	$-$	$\frac{10060.69 + -1292.77 + -2932.03}{0.01268}$	$=$	$-1.65 \text{ MPa}$		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-408603.92 + -2219.48 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{10060.69 + -1292.77 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.91 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-408603.92 + -2219.48 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{10060.69 + -1292.77 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-1.86 \text{ MPa}$		Vyhoví	
BOD 10									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-411733.96 + 3936.06 + 5743.93}{0.352}$	$+$	$\frac{12965.85 + -1614.70 + -3520.41}{0.03437}$	$=$	$-0.91 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-411733.96 + 3936.06 + 5743.93}{0.352}$	$-$	$\frac{12965.85 + -1614.70 + -3520.41}{0.01268}$	$=$	$-1.76 \text{ MPa}$		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-411733.96 + 3936.06 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{12965.85 + -1614.70 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.83 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-411733.96 + 3936.06 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{12965.85 + -1614.70 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-2.05 \text{ MPa}$		Vyhoví	
BOD 11									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck} = -18.00 \text{ MPa}$			
					$\leq$	$f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-372881.95 + 2770.23 + 6137.20}{0.352}$	$+$	$\frac{9824.26 + -170.62 + -53.89}{0.03437}$	$=$	$-0.75 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-372881.95 + 2770.23 + 6137.20}{0.352}$	$-$	$\frac{9824.26 + -170.62 + -53.89}{0.01268}$	$=$	$-1.79 \text{ MPa}$		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck} = -13.50 \text{ MPa}$			
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-372881.95 + 2770.23 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{9824.26 + -170.62 + 0.00}{0.03437}$	$=$	$-0.77 \text{ MPa}$		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-372881.95 + 2770.23 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{9824.26 + -170.62 + 0.00}{0.01268}$	$=$	$-1.81 \text{ MPa}$		Vyhoví	

BOD 12									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00 MPa	
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{56823.40 + -67788.75 + -159802.63}{0.352}$	$+$	$\frac{27745.96 + -575.84 + -1277.56}{0.03437}$	$=$	0.27 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{56823.40 + -67788.75 + -159802.63}{0.352}$	$-$	$\frac{27745.96 + -575.84 + -1277.56}{0.01268}$	$=$	-2.53 MPa		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{56823.40 + -67788.75 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{27745.96 + -575.84 + 0.00}{0.03437}$	$=$	0.76 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{56823.40 + -67788.75 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{27745.96 + -575.84 + 0.00}{0.01268}$	$=$	-2.17 MPa		Vyhoví	
BOD 13									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00 MPa	
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-350589.08 + -28499.10 + -69340.71}{0.352}$	$+$	$\frac{-5764.36 + -2731.70 + -2161.91}{0.03437}$	$=$	-1.58 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-350589.08 + -28499.10 + -69340.71}{0.352}$	$-$	$\frac{-5764.36 + -2731.70 + -2161.91}{0.01268}$	$=$	-0.43 MPa		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-350589.08 + -28499.10 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{-5764.36 + -2731.70 + 0.00}{0.03437}$	$=$	-1.32 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-350589.08 + -28499.10 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{-5764.36 + -2731.70 + 0.00}{0.01268}$	$=$	-0.41 MPa		Vyhoví	
BOD 14									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	$=$	-18.00 MPa	
					$\leq$	$f_{ctm}$	$=$	2.90 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-435185.24 + 224.05 + -3606.98}{0.352}$	$+$	$\frac{-8338.57 + 200.60 + -460.88}{0.03437}$	$=$	-1.50 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	$=$	$\frac{-435185.24 + 224.05 + -3606.98}{0.352}$	$-$	$\frac{-8338.57 + 200.60 + -460.88}{0.01268}$	$=$	-0.57 MPa		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	$=$	-13.50 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-435185.24 + 224.05 + 0.00}{0.352}$	$+$	$\frac{-8338.57 + 200.60 + 0.00}{0.03437}$	$=$	-1.47 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	$=$	$\frac{-435185.24 + 224.05 + 0.00}{0.352}$	$-$	$\frac{-8338.57 + 200.60 + 0.00}{0.01268}$	$=$	-0.59 MPa		Vyhoví	



BOD 15									
CHARAKTERISTICKÁ KOMBINACE									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.6 \cdot f_{ck}$	=	-18.00 MPa	
					$\leq$	$f_{ctm}$	=	2.90 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-430286.24 + 9144.51 + 16570.68}{0.352}$	+	$\frac{-13641.32 + 2453.80 + 5396.11}{0.03437}$	=	-1.32 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{char}$	=	$\frac{-430286.24 + 9144.51 + 16570.68}{0.352}$	-	$\frac{-13641.32 + 2453.80 + 5396.11}{0.01268}$	=	-0.69 MPa		Vyhoví	
KVAZISTÁLÁ KOMBINACE									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{N_{y,3} + N_{y,4} + \psi_2 \cdot N_{y,5}}{A_{c,y}}$	$\pm$	$\frac{M_{x,3} + M_{x,4} + \psi_2 \cdot M_{x,5}}{W_{hd,y}}$	$\geq$	$0.45 \cdot f_{ck}$	=	-13.50 MPa	
Horní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-430286.24 + 9144.51 + 0.00}{0.352}$	+	$\frac{-13641.32 + 2453.80 + 0.00}{0.03437}$	=	-1.52 MPa		Vyhoví	
Dolní vlákna									
$\sigma_{kvaz}$	=	$\frac{-430286.24 + 9144.51 + 0.00}{0.352}$	-	$\frac{-13641.32 + 2453.80 + 0.00}{0.01268}$	=	-0.31 MPa		Vyhoví	

Z posudků jednoznačně vyplývá, že tahová napětí vznikají ve směru x při dolním okraji v bodě 5 a ve směru Y při horním okraji v bodech 2,6 a 12. V ostatních bodech se nám díky navrženému předpětí skořepiny podařilo získat tlakovou rezervu. Vypočtené výsledky napětí odpovídají obrázkům napětí ze softwaru zobrazených v příloze statického výpočtu P5. Tahy ve spárách mezi panely povedou ke vzniku trhlin ve spárách a bude tedy nutné navrhnout betonářskou výztuž věnce.

### 4.3 Posouzení MSÚ

Posouzení MSÚ dle platných norem skýtá u řešeného typu konstrukce řadu problémů, které souvisí s užitím kombinačních rovnic pro tento mezní stav. Jak bylo popsáno výše, řešená předpjatá membrána je geometricky nelineární konstrukce a nelze tedy použít princip superpozice. Vnitřní síly nemůžeme jednoduše násobit příslušnými součiniteli v kombinační rovnici a sčítat, neboť jednotlivé časy (zatěžovací stavy) se navzájem ovlivňují (deformace v jednotlivých časech). To jednoduše znamená fakt, že pokud zatížení zvýšíme například dvakrát, deformace nebude dvakrát větší. S tím souvisí i hledání výchozího tvaru. Pokud například stálé zatížení navýšíme o 35 %, dostaneme jiný výchozí tvar, který bude zcela odlišný od námi navrženého rovnovážného stavu. Jistou možností posouzení by bylo vlastní tíhu nenavyšovat, zachovat tak námi požadovaný výchozí tvar, a další zatížení navýšit o příslušné součinitele kombinačních rovnic MSÚ a spustit časovou analýzu znovu . [8]

S ohledem na tuto problematiku, bylo rozhodnuto, že mezní stav únosnosti bude zjednodušeně (a nepřesně) posouzen tak, jako by se konstrukce chovala lineárně a do kombinační rovnice budou vstupovat vnitřní síly z časové analýzy pro MSP. Nadimenzujeme tak věnce potřebnou betonářskou výztuží, která bude vzdorovat rozvíjejícím se trhlinám v betonu.

### 4.3.1 Kombinace pro MSÚ

Kombinace pro mezní stavy únosnosti se navrhují tak, aby vybrané rozhodující zatěžovací stavy vytvořili co nejnepříznivější účinky zatížení na posuzovaný prvek v konstrukci (v našem případě na věnec). K zjištění této rozhodující kombinace zatěžovacích stavů použijeme kombinační rovnice 6.10a a 6.10b dle ČSN EN 1990 [10]. Méně příznivá kombinace je rozhodující:

$$\text{rovnice 6.10a; 6.10b} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{array} \right.$$

#### Dílčí součinitele zatížení pro MSÚ:

##### Nepříznivá situace

$\xi = 0,85$  ;  $\gamma_{G,j} = 1,35$  (nepříznivá)

$\gamma_P = 1,00$  (nepříznivá)

$\gamma_{Q,1} = 1,50$  (nepříznivá)

$\gamma_{Q,i} = 1,50$  (nepříznivá)

##### Příznivá situace

$\xi = 0,85$  ;  $\gamma_{G,j} = 1,00$  (příznivá)

$\gamma_P = 1,20$  (příznivá)

$\gamma_{Q,1} = 0,00$  (příznivá)

$\gamma_{Q,i} = 0,00$  (příznivá)

#### Doporučené hodnoty součinitele $\psi$ pro kombinace zatížení pro pozemní stavby

Kategorie budovy H - střechy:  $\psi_0 = 0,0$

Zatížení sněhem:  $\psi_0 = 0,5$

V tabulce jsou uvedeny výsledky kombinace vnitřních sil pro MSÚ pro všechny body. Rozhodující kombinace označené červeně jsou rozepsány níže pod tabulkou. Jedná se o 4 kombinace v každém směru. K1 obsahuje minimální hodnotu normálové síly a k ní odpovídající hodnotu ohybového momentu. K2 se skládá z maximální normálové síly a ohybového momentu. K3 z minimálního ohybového momentu a odpovídající normálové síly a K4 z maximálního ohybového momentu a odpovídající normálové síly.

BOD		Nepříznivá situace				Příznivá situace			
		6.10a		6.10b		6.10a		6.10b	
		Ned,x	Med,y	Ned,x	Med,y	Ned,x	Med,y	Ned,x	Med,y
Směr X	1	-327832.05	-9218.61	-200686.34	-9541.23	-624109.53	-10443.01	-637690.57	-10402.65
	2	-362406.24	-244.05	-254149.84	316.76	-636872.13	-1552.39	-649399.99	-1654.34
	3	-247685.31	-3180.34	-167058.98	-3184.13	-443168.76	-3813.95	-451719.42	-3814.31
	4	-164415.30	-3866.98	-118266.86	-4736.46	-279956.62	-3088.10	-284698.24	-2999.64
	5	-106249.98	-4202.38	-76781.18	-5820.50	-178737.50	-1876.22	-181496.77	-1663.31
	6	-53472.06	3727.22	-37516.20	4703.58	-89644.90	2753.75	-90745.37	2658.63
	7	-580284.56	217.68	-511096.36	-189.68	-821523.79	1013.16	-828851.10	1058.89
	8	-503897.68	-3401.19	-438864.89	-3218.84	-722172.00	-4445.34	-729029.84	-4470.56
	9	-395432.47	-4173.32	-327678.05	-4640.99	-596545.54	-4177.17	-603623.40	-4130.31
	10	-303898.34	-3156.66	-225378.98	-4035.79	-503846.86	-2124.39	-511658.97	-2018.60
	11	-255715.01	480.78	-182092.49	-443.99	-438177.16	2217.95	-445646.24	2310.29
	12	-353605.93	7787.48	-338225.11	7755.40	-452255.65	9377.75	-453901.93	9376.76
	13	-211630.27	-6008.35	-194378.22	-6740.98	-285107.80	-5927.31	-286923.97	-5857.17
	14	-194557.38	-3839.08	-165231.04	-4251.07	-285922.95	-3855.09	-288923.38	-3810.36
	15	-201084.68	-2613.95	-162258.92	-2661.82	-310314.42	-3046.24	-314211.62	-3040.49
Směr Y		6.10a		6.10b		6.10a		6.10b	
		Ned,y	Med,x	Ned,y	Med,x	Ned,y	Med,x	Ned,y	Med,x
	1	-551892.26	15427.99	-547406.16	16129.39	-670675.71	17362.56	-671200.91	17308.79
	2	-427176.04	43277.52	-433021.46	45547.98	-499493.46	48031.52	-498432.63	47826.95
	3	-414036.98	26309.31	-418858.44	27274.18	-488045.13	29924.59	-487521.34	29839.64
	4	-429701.07	16250.20	-443672.89	14686.48	-491932.57	22279.03	-490725.87	22435.87
	5	-378419.08	17397.91	-402038.76	12996.35	-411735.48	28836.70	-409297.97	29302.05
	6	-181257.66	44847.68	-189209.40	44032.24	-199746.00	55557.87	-198317.06	55690.33
	7	-445648.07	8561.98	-483316.12	10284.94	-469960.62	7727.90	-466551.22	7644.65
	8	-465459.33	9073.58	-496717.57	8791.19	-504122.48	11334.69	-501181.78	11353.38
	9	-417673.37	6116.43	-423297.08	4179.19	-492544.18	10780.06	-492211.26	10973.98
	10	-402112.34	8145.69	-398601.44	5832.36	-490144.70	13944.31	-490735.11	14186.52
	11	-364539.24	9553.52	-360497.31	9547.65	-444688.11	11618.50	-445103.64	11644.09
	12	-154543.39	26010.40	-260668.14	25168.84	399.33	32719.31	10567.64	32805.68
	13	-441068.40	-11073.59	-487302.86	-12141.85	-449206.00	-9648.93	-444931.13	-9239.18
	14	-437588.00	-8413.42	-440338.61	-8799.70	-521998.23	-9805.68	-522031.84	-9835.77
	15	-405513.13	-6281.61	-394936.88	-2731.42	-507198.97	-13915.79	-508570.65	-14283.86
Směr X						Směr Y			
Min N		K1	-828851.10	1058.89	Min N		K1	-671200.91	17308.79
Max N		K2	-37516.20	4703.58	Max N		K2	10567.64	32805.68
Min M		K3	-624109.53	-10443.01	Min M		K3	-508570.65	-14283.86
Max M		K4	-452255.65	9377.75	Max M		K4	-198317.06	55690.33

 Tabulka 8 – Vyčíslené kombinační rovnice – návrhové hodnoty vnitřních sil  $N_{ed}$  a  $M_{ed}$ 
**K1 – KOMBINACE MIN  $N_{ED}$  A ODPOVÍDAJÍCÍ  $M_{ED}$** 
**Směr X**

 6.10b – min  $N_{ed}$  (příznivá situace)

$$\sum_{j \geq 1} \xi \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} = \\
 = 0,85 \cdot 1,0 \cdot 48848,75 + 1,2 \cdot (-725310,45) - 0 = -828851,10 \text{ N}$$

6.10b – odpovídající  $M_{ed}$

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (-304,88) + 1,2 \cdot (1098,36) - 0 = 1058,39 \text{ Nm}$$

**Směr Y**

6.10b – min  $N_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot 3501,35 + 1,2 \cdot (-561814,22) - 0 = -671200,91 \text{ N}$$

6.10b – odpovídající  $M_{ed}$

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (358,47) + 1,2 \cdot (14170,08) - 0 = 17308,79 \text{ Nm}$$

## K2 – KOMBINACE MAX $N_{ED}$ A ODPOVÍDAJÍCÍ $M_{ED}$

**Směr X**

6.10b – max  $N_{ed}$  (nepříznivá situace)

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

$$= 0,85 \cdot 1,35 \cdot 7336,50 + 1,0 \cdot (-80817,83) + 1,5 \cdot 23255,33 = -37516,20 \text{ N}$$

6.10b – odpovídající  $M_{ed}$

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

$$= 0,85 \cdot 1,35 \cdot 634,16 + 1,0 \cdot (1766,33) + 1,5 \cdot 1473,04 = 4703,58 \text{ N}$$

**Směr Y**

6.10b – max  $N_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (-67788,75) + 1,2 \cdot 56823,40 - 0 = 10567,64 \text{ N}$$

6.10b – odpovídající  $M_{ed}$

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (-575,84) + 1,2 \cdot (27745,98) - 0 = 32805,68 \text{ Nm}$$

### K3 – KOMBINACE MIN $M_{ED}$ A ODPOVÍDAJÍCÍ $N_{ED}$

**Směr X**

6.10a – min  $M_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 1,00 \cdot (-269,05) + 1,2 \cdot (-8478,30) + 0 = -10443,01 \text{ Nm}$$

6.10a – odpovídající  $N_{ed}$

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

$$= 1,00 \cdot (90540,22) + 1,2 \cdot (-595541,46) + 0 = -624109,53 \text{ N}$$

**Směr Y**

6.10b – min  $M_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (2453,60) + 1,2 \cdot (-13641,32) - 0 = -14283,86 \text{ Nm}$$

6.10b – odpovídající  $N_{ed}$

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (9144,51) + 1,2 \cdot (-430286,24) - 0 = -508570,65 \text{ N}$$

### K4 – KOMBINACE MAX $M_{ED}$ A ODPOVÍDAJÍCÍ $N_{ED}$

**Směr X**

6.10a – max  $M_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 1,00 \cdot (6,62) + 1,2 \cdot (7809,27) + 0 = 9377,75 \text{ Nm}$$

6.10a – odpovídající  $N_{ed}$

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

$$= 1,00 \cdot (10975,15) + 1,2 \cdot (-386025,67) + 0 = -452255,65 \text{ N}$$

**Směr Y**

6.10b – max  $M_{ed}$  (příznivá situace)

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

$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (-883,09) + 1,2 \cdot (47034,14) - 0 = 55690,33 \text{ Nm}$$

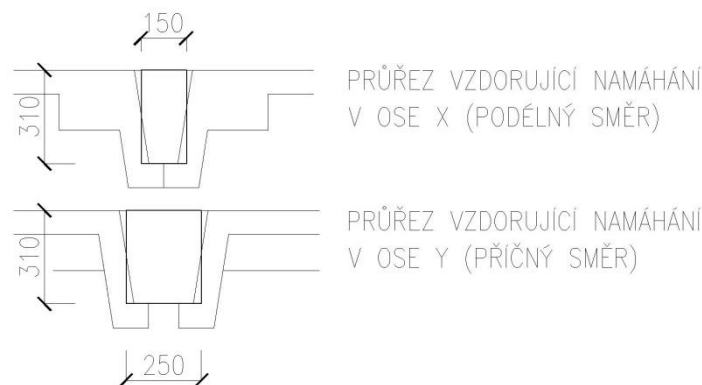
6.10b – odpovídající  $N_{ed}$

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

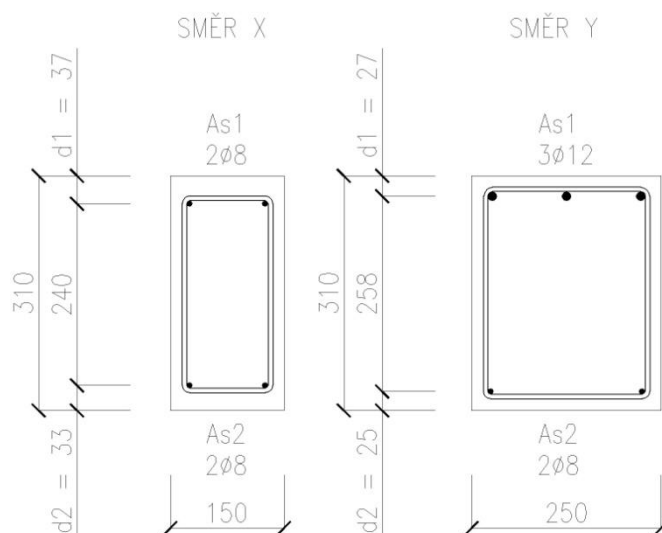
$$= 0,85 \cdot 1,0 \cdot (-9526,20) + 1,2 \cdot (-158516,49) - 0 = -198317,06 \text{ N}$$

### 4.3.2 Průřezy pro MSÚ

Při posuzování mezního stavu únosnosti musíme předpokládat nejextrémnější případ namáhání a ten souvisí i se stanovením účinného průřezu, který mu bude vzdorovat. Předpokládá se, že díky tahovým namáháním vzniknou ve spárách trhliny, a nelze tedy uvažovat se spolupůsobením betonu zálivky s betonem okolních panelů. Vzdorujícím průřezem bude obdélník ze železobetonu vyobrazený a pospaný na následujících obrázcích, který bude namáhán normálovou silou a ohybovým momentem. Bude posouzen pomocí iteračního diagramu.



Obrázek 4.5 Stanovení průřezu pro posouzení MSÚ

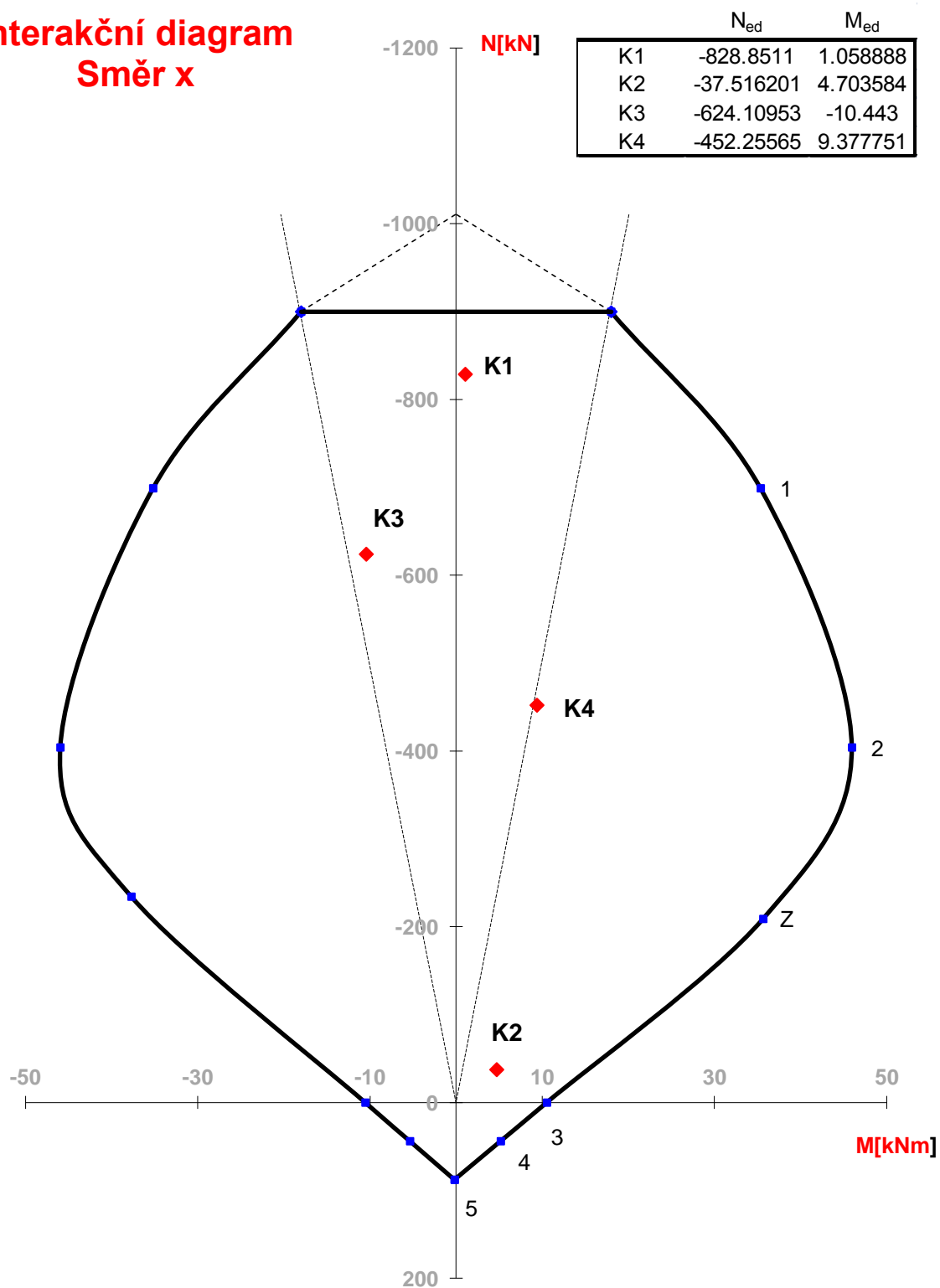


Obrázek 4.6 Posuzované průřezy pro MSÚ v ose x a v ose y

### 4.3.3 Posouzení pomocí iteračního diagramu

Namáhání ohybem a normálovou silou - interakční diagram - Směr X			
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu			
BETON C30/37	OCEL B500B	Geometrické charakteristiky	
$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ GPa}$	$h = 0.31 \text{ m}$	$A_{s1} = 1.01 \text{E-04 m}^2$
$\gamma_c = 1.50$	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$b = 0.15 \text{ m}$	$A_{s2} = 1.01 \text{E-04 m}^2$
$\epsilon_{c2} = 0.002$	$\gamma_s = 1.15$	$\eta = 1.0$	$d_1 = 0.037 \text{ m}$
$\epsilon_{cu3} = 0.0035$	$\epsilon_{yd} = 0.00217$	$\lambda = 0.8$	$d_2 = 0.033 \text{ m}$
$f_{cd} = 20 \text{ MPa}$	$f_{yd} = 434.783 \text{ MPa}$	$\xi_{bal,1} = 0.617$	$d = 0.273 \text{ m}$
	$\sigma_s = 400 \text{ MPa}$	$\xi_{bal,2} = 2.639$	$z_1 = 0.118 \text{ m}$
			$z_2 = 0.122 \text{ m}$
Body interakčního diagramu			
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	
$N_{Rd0} = -1010.80 \text{ kN}$	$N_{Rd1} = -699.11 \text{ kN}$	$N_{Rd,bal} = -404.17 \text{ kN}$	
$M_{Rd0} = 0.16 \text{ kNm}$	$M_{Rd1} = 35.37 \text{ kNm}$	$M_{Rd,bal} = 45.96 \text{ kNm}$	
<b>Z</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
$N_{Rd,z} = -209.04 \text{ kN}$	$N_{Rd3} = 0.00 \text{ kN}$	$N_{Rdt,bal} = 43.91 \text{ kN}$	
$M_{Rd,z} = 35.66 \text{ kNm}$	$M_{Rd3} = 10.54 \text{ kNm}$	$M_{Rdt,bal} = 5.18 \text{ kNm}$	
<b>1'</b>	<b>2'</b>	<b>Z'</b>	
$N_{Rd1} = -699.11 \text{ kN}$	$N_{Rd,bal} = -404.17 \text{ kN}$	$N_{Rd,z} = -234.37 \text{ kN}$	
$M_{Rd1} = -35.19 \text{ kNm}$	$M_{Rd,bal} = -45.96 \text{ kNm}$	$M_{Rd,z} = -37.71 \text{ kNm}$	
<b>3'</b>	<b>4'</b>	<b>5</b>	
$N_{Rd3} = 0.00 \text{ kN}$	$N_{Rdt,bal} = 43.91 \text{ kN}$	$N_{Rd0} = 87.83 \text{ kN}$	
$M_{Rd3} = -10.54 \text{ kNm}$	$M_{Rdt,bal} = -5.36 \text{ kNm}$	$M_{Rd0} = -0.18 \text{ kNm}$	

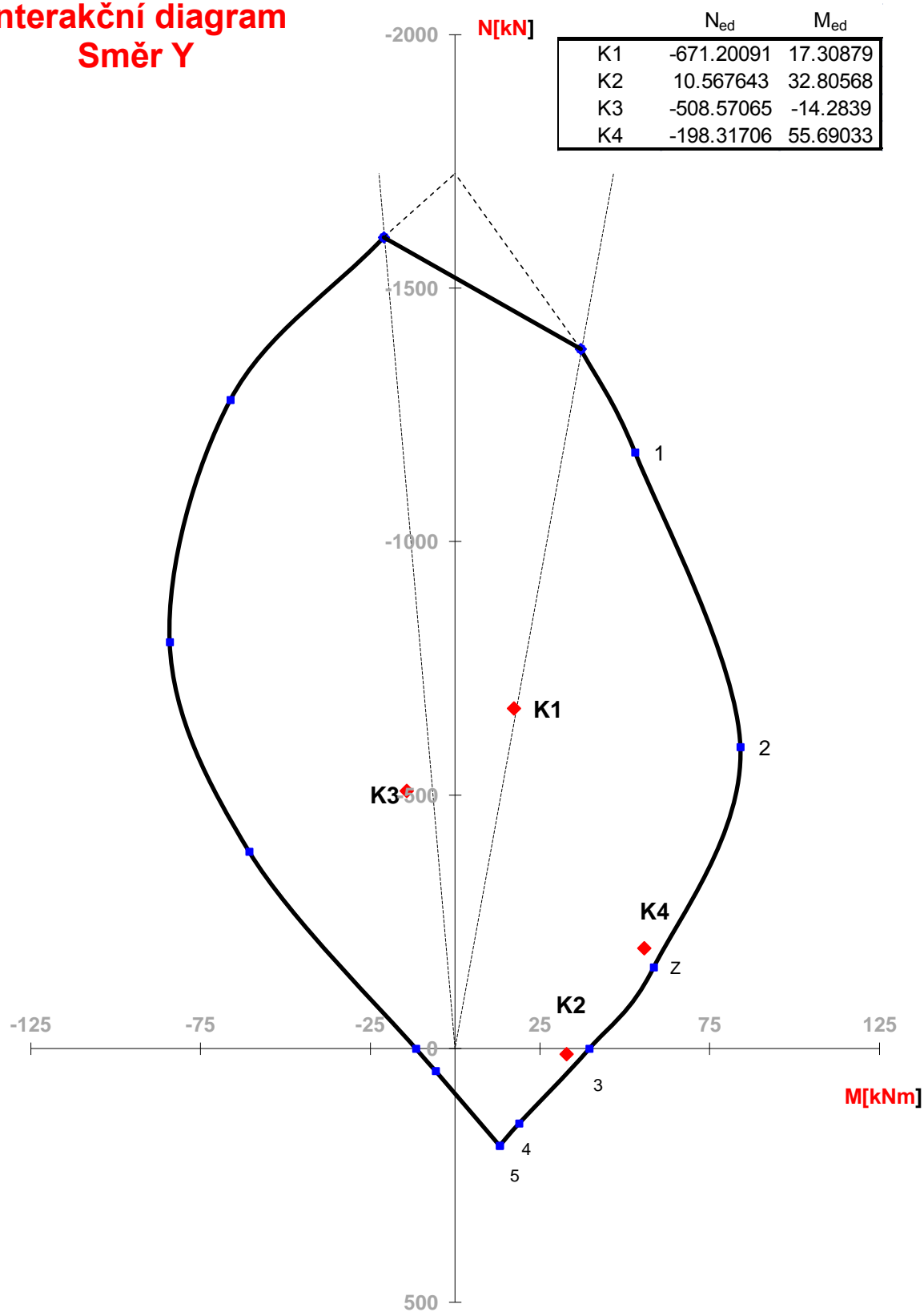
# Interakční diagram Směr x





Namáhání ohybem a normálovou silou - interakční diagram - Směr Y			
Vstupní hodnoty - parametry výpočtu			
BETON C30/37	OCEL B500B	Geometrické charakteristiky	
$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$	$E_s = 200 \text{ GPa}$	$h = 0.31 \text{ m}$	$A_{s1} = 3.39\text{E-}04 \text{ m}^2$
$\gamma_c = 1.50$	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$b = 0.25 \text{ m}$	$A_{s2} = 1.01\text{E-}04 \text{ m}^2$
$\epsilon_{c2} = 0.002$	$\gamma_s = 1.15$	$\eta = 1.0$	$d_1 = 0.027 \text{ m}$
$\epsilon_{cu3} = 0.0035$	$\epsilon_{yd} = 0.00217$	$\lambda = 0.8$	$d_2 = 0.025 \text{ m}$
$f_{cd} = 20 \text{ MPa}$	$f_{yd} = 434.783 \text{ MPa}$	$\xi_{bal,1} = 0.617$	$d = 0.283 \text{ m}$
	$\sigma_s = 400 \text{ MPa}$	$\xi_{bal,2} = 2.639$	$z_1 = 0.128 \text{ m}$
			$z_2 = 0.13 \text{ m}$
Body interakčního diagramu			
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	
$N_{Rd0} = -1726.00 \text{ kN}$	$N_{Rd1} = -1175.91 \text{ kN}$	$N_{Rd,bal} = -594.81 \text{ kN}$	
$M_{Rd0} = -12.10 \text{ kNm}$	$M_{Rd1} = 53.03 \text{ kNm}$	$M_{Rd,bal} = 84.05 \text{ kNm}$	
<b>Z</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
$N_{Rd,z} = -160.46 \text{ kN}$	$N_{Rd3} = 0.00 \text{ kN}$	$N_{Rdt,bal} = 147.39 \text{ kN}$	
$M_{Rd,z} = 58.52 \text{ kNm}$	$M_{Rd3} = 39.54 \text{ kNm}$	$M_{Rdt,bal} = 18.87 \text{ kNm}$	
<b>1'</b>	<b>2'</b>	<b>Z'</b>	
$N_{Rd1} = -1279.39 \text{ kN}$	$N_{Rd,bal} = -801.76 \text{ kN}$	$N_{Rd,z} = -388.53 \text{ kN}$	
$M_{Rd1} = -66.18 \text{ kNm}$	$M_{Rd,bal} = -84.05 \text{ kNm}$	$M_{Rd,z} = -60.63 \text{ kNm}$	
<b>3'</b>	<b>4'</b>	<b>5</b>	
$N_{Rd3} = 0.00 \text{ kN}$	$N_{Rdt,bal} = 43.91 \text{ kN}$	$N_{Rd0} = 191.30 \text{ kN}$	
$M_{Rd3} = -11.51 \text{ kNm}$	$M_{Rdt,bal} = -5.71 \text{ kNm}$	$M_{Rd0} = 13.16 \text{ kNm}$	

# **Interakční diagram Směr Y**



Navržené průřezu věnců vyhověly meznímu stavu použitelnosti.

## 5 Závěr a shrnutí statického výpočtu

Ve statickém výpočtu byly navrženy jednotlivé prvky řešené skořepiny. Byl navržen a nadimenzován střešní prefabrikovaný panel a vyřešena problematika jeho uložení. Dále byl vytvořen model lanové sítě v softwaru ANSYS a nalezen požadovaný tvar střešní skořepiny (výchozí rovnovážný stav). S tímto tvarem souvisí i návrh průřezu nosných předpínacích lan. Poté byla vymodelována skořepina a navržena i její předpínací výztuž. Geometricky nelineární skořepina se posuzovala pomocí časové analýzy, kdy jednotlivé zatěžovací stavy na sebe navazovaly a jejich deformace se navzájem ovlivňovaly. Na závěr byly posouzeny vybrané body ve spárách mezi prefabrikovanými panely na mezní stav použitelnosti a únosnosti a navržena výztuž těchto věnců.

Statická analýza v sobě obsahovala řadu zjednodušení, kdy byla konstrukce dosti idealizovaná od jejího reálného působení. Největší idealizací byl předpoklad tuhosti obvodového rámu, jehož tvar tak nemusel být hledán. Tento fakt však způsobil problémy při návrhu předpětí skořepiny, kdy se vnesené napětí nerozložilo do celé skořepiny rovnoměrně, neboť každé navržené příčné lano má jiné vzepětí. S obvodovým prstencem souvisí i otázka použití konstrukčního systému popsaného v části P3 této diplomové práce. Ten je možno vyzvednout jedním tahem a rychle realizovat. Předpokladem je však malá hmotnost celého systému, tzn. použití ocelových ramen menších dimenzí a textilní membrány jako krycí vrstvy zastřešení či prosklené fasády. V diplomové práci řešená membrána s rozpětím hlavního lana 64 m je však pro tento typ výstavby příliš těžká a bylo by obtížné navrhnout kotvení a průřez hlavní nosného lana (kabelu), které by neslo jednak hmotnost betonové střešní skořepiny a dokonce i hmotnost železobetonového obvodového prstence (průřez 2 x 1,6 m) při vyzvedávání a životnosti konstrukce. Je jisté na místě také uvést možnost použití lehkých (pórovitých) betonů, který se pro betonové membrány užívá, s objemovou hmotností od 1800 do 2200 kg/m<sup>3</sup>.

## 6 Citovaná literatura

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, Český normalizační institut, 2006, oprava 1 07.2009 a změna Z1 03.2010.
- [2] 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, 2004.
- [3] Zich M. a kol., Příklady posouzení betonových prvků dle Eurokódů, Praha: Verlag, 2011.
- [4] Šopík L., „Membránová střešní konstrukce z předpjatého betonu, článek JUNIORSTAV,“ v JUNIORSTAV, Brno, 2011.
- [5] Stráský J., Speciální betonové konstrukce (K), Modul M01, Konstrukční systémy a analýza lana, Brno, 2012.
- [6] Salajka V., *Stavební Mechanika II, Přednášky*.
- [7] Kicko J., „<http://www.mostreal.sk>,“ STU Bratislava, 2012. [Online]. [Přístup získán 2013].
- [8] Šopík L., Membránová střešní konstrukce z předpjatého betonu, Disertační práce, Brno: VUT v Brně, 2012.
- [9] Kaláb P., Visuté střechy z předpjatého betonu, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Ústav betonových a zděných konstrukcí, 2009, p. 150s.
- [10] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, březen: Český normalizační institut, 2004.
- [11] Stráský J., „Visuté předpjaté střechy - 2. díl,“ *Beton TKS*, č. 01, pp. 21-28, 16. Únor 2006.
- [12] Stráský J., „Visuté předpjaté střechy,“ *Beton TKS*, č. 05, pp. 10-15, 14. Říjen 2005.
- [13] Stráský J., „Membránové střechy z předpjatého betonu,“ *Beton TKS*, č. 1, pp. 15-21, 15. Únor 2008.
- [14] Rühle H., „Priestorové strešné konštrukcie, 2.diel,“ *Ocel a plastické hmoty*, 1979.
- [15] ČSN EN 1991-1-3 Eurokód 2: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - zatížení sněhem.
- [16] ANSYS Inc., *Element reference, ANSYS release 12.1*.
- [17] ANSYS Inc., *Theory reference, ANSYS Release 12.1*.
- [18] Juchelková P. a Stráský J., „Analýza předpjaté membrány ve tvaru mezikruží,“ *Konstrukce*, 18. Červen 2013.
- [19] Kadlčák J. a Kytýr J., Statika stavebních konstrukcí I., Vutium, 2011.
- [20] Navrátil J., Předpjaté betonové konstrukce, 2. vydání editor, Brno: CERM, 2008.
- [21] Stráský J., Speciální betonové konstrukce (K), Modul M02, Konstrukce tvořené předpjatým pásem a membránou, VUT, 2012.

- [22] Stráský J., Speciální betonové konstrukce (K), Modul M03, Konstrukce podporované kabely, VUT, 2012.
- [23] Šopík L. a Stráský J., „Předpjatá membrána podepřená visutým kabelem,“ *Konstrukce*, 2012.
- [24] Wyatt W., „<http://www.ncstatefair.org/facilities/dortonhistory.htm>,“ [Online]. Available: <http://www.ncstatefair.org/facilities/dortonhistory.htm>. [Přístup získán 9. Září 2013].
- [25] Zich M. a Bažant Z., Plošné konstrukce, nádrže a zásobníky, CERM, 2010.

## 7 Použitý software

- [26] SCIA ENGINEER 2013
- [27] MICROSOFT OFFICE WORD 2007
- [28] MICROSOFT OFFICE EXCEL 2007
- [29] AUTODESK AUTOCAD 2007
- [30] AUTODESK AUTOCAD ARCHITECTURE 2013
- [31] MAXXON CINEMA 4D
- [32] ANSYS 12.1
- [33] ANSYS 14.0

## 8 Seznam obrázků a tabulek statického výpočtu

### 8.1 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1.1 Schematický nákres konstrukčního systému</i>	4
<i>Obrázek 2.1 3D vizualizace navrženého střešního panelu</i>	5
<i>Obrázek 2.2 Schéma tvaru panelu</i>	6
<i>Obrázek 2.3 Schéma výpočtového modelu pro posouzení uložení</i>	9
<i>Obrázek 2.4 Přehled smykových ploch vybraných průřezů</i>	11
<i>Obrázek 2.5 Vizualizace modelu v softwaru SCIA</i>	11
<i>Obrázek 2.6 Reakce lineární kombinace ZS1 a ZS11</i>	13
<i>Obrázek 2.7 Skladba střechy</i>	13
<i>Obrázek 2.8 Spolupůsobící šířka panelu a žebra a) pro výpočet vnitřních sil b) pro dimenzování žebra</i>	15
<i>Obrázek 2.9 Schéma vyztužení panelu</i>	17
<i>Obrázek 2.10 Schéma vyztužení desky panelu, navržena výztuž Ø8/200</i>	20
<i>Obrázek 2.12 Problematika uchycení prefabrikovaných panelů</i>	21
<i>Obrázek 2.11 Návrh kladecího schématu – půdorys a axonometrie</i>	21
<i>Obrázek 2.13 Rektifikační objímka – možný návrh</i>	22
<i>Obrázek 3.1 Geometrie obvodového prstence</i>	23
<i>Obrázek 3.2 Idealizace věnce v příčném směru pro výpočetní model</i>	24

<i>Obrázek 3.3 Vytvořený výpočtový model - axonometrie</i>	25
<i>Obrázek 3.4 Vytvořený výpočtový model – pohled 1</i>	25
<i>Obrázek 3.5 Vytvořený výpočtový model – pohled 2</i>	25
<i>Obrázek 3.6 Základní charakteristiky lana [5]</i>	26
<i>Obrázek 3.7 Demonstrace geometrické nelinearity pomocí rybářského prutu [7]</i>	27
<i>Obrázek 3.8 Nelineární analýza v softwaru ANSYS, postupné zatěžování konstrukce [7]</i>	29
<i>Obrázek 3.9 Schéma prvku LINK8 [7]</i>	31
<i>Obrázek 3.10 Schéma prvku BEAM44 [9]</i>	32
<i>Obrázek 3.11 Schéma prvku SHELL181</i>	32
<i>Obrázek 3.12 Schéma prvku SURF154</i>	33
<i>Obrázek 3.13 Výsledný výpočtový model – lana (čas 1) a aktivace skořepiny (čas 2)</i>	34
<i>Obrázek 3.14 Šachy pro zatížení sněhem</i>	35
<i>Obrázek 3.15 Výpočtový model pro hledání výchozího tvaru</i>	37
<i>Obrázek 3.16 Schéma pro stanovení silového účinku na lano</i>	39
<i>Obrázek 3.17 Výpočtový model pro hledání výchozího tvaru</i>	42
<i>Obrázek 3.18 Srovnání tvaru 1 (červeně) s původní geometrií (černě) – pohled</i>	46
<i>Obrázek 3.19 Srovnání tvaru 1 s původní geometrií – axonometrie</i>	46
<i>Obrázek 3.20 Srovnání tvaru 4 (červeně) s původní geometrií (černě) – pohled</i>	47
<i>Obrázek 3.21 Srovnání tvaru 4 s původní geometrií – axonometrie</i>	47
<i>Obrázek 3.22 Srovnání tvaru 2 a 3 s původní geometrií – pohled</i>	47
<i>Obrázek 3.23 Srovnání tvaru 2 a 3 s původní geometrií – axonometrie</i>	48
<i>Obrázek 3.24 Srovnání všech výchozích tvarů lanové sítě – axonometrie</i>	48
<i>Obrázek 3.25 Suma deformací výchozího tvaru</i>	49
<i>Obrázek 3.26 Deformace ve směru y výchozího tvaru</i>	49
<i>Obrázek 3.27 Nosné lano stadionu Yoyogi, Tokio, Japonsko</i>	50
<i>Obrázek 3.28 Schéma napojení příčných nosných lan k hlavnímu nosnému lanu</i>	51
<i>Obrázek 3.29 Napětí v lanech nalezeného výchozího tvaru</i>	51
<i>Obrázek 3.30 Číslování předpínacích kabelů</i>	52
<i>Obrázek 3.31 Napětí v předpínacích kabelech skořepiny</i>	61
<i>Obrázek 3.32 Schéma označení předpínacích vložek skořepiny</i>	62
<i>Obrázek 4.1 Vybrané body pro posouzení ve spárách skořepiny</i>	63
<i>Obrázek 4.2 Průběh stanovení vnitřních sil od jednotlivých zatěžovacích stavů</i>	66
<i>Obrázek 4.3 Schéma posuzovaného průřezu pro stanovení N a M ve směru x</i>	67
<i>Obrázek 4.4 Schéma T průřezu pro posouzení na MSP</i>	69
<i>Obrázek 4.5 Stanovení průřezu pro posouzení MSÚ</i>	86
<i>Obrázek 4.6 Posuzované průřezy pro MSÚ v ose x a v ose y</i>	87

## 8.2 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1- Nalezené výchozí tvary lanové sítě</i>	45
<i>Tabulka 2- Navržené předpínací nosné kabely</i>	52
<i>Tabulka 3 - Navržené předpínací kabely skořepiny</i>	62
<i>Tabulka 4 - Vnitřní síly desky skořepiny ve vybraných bodech v jednotlivých časech</i>	64
<i>Tabulka 5 – Vnitřní síly žeber skořepiny v jednotlivých časech</i>	65
<i>Tabulka 6 – Vnitřní síly žeber a desky skořepiny od jednotlivých zatěžovacích stavů</i>	67
<i>Tabulka 7- Konečné stanovení vnitřních sil v každém bodě od jednotlivých zatěžovacích stavů</i>	68
<i>Tabulka 8 – Vyčíslené kombinační rovnice – návrhové hodnoty vnitřních sil <math>N_{ed}</math> a <math>M_{ed}</math></i>	83