

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra mechaniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Membránové zastřešení sportovní tribuny

Robin Blažek

2020

### **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Membránové zastřešení sportovní tribuny* vypracoval samostatně za odborného vedení vedoucího Ing. arch., Ing. Františka Denka, Ph.D., a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

.....

podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. arch., Ing. Františku Denkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. arch. Aleši Vaňkovi, M. Eng. za zapůjčení literatury k danému tématu a Ing. Michalu Netušilovi, Ph.D. za rady ohledně práce se specializovaným softwarem.

**MEMBRÁNOVÉ ZASTŘEŠENÍ  
SPORTOVNÍ TRIBUNY**

**MEMBRANE ROOF FOR  
SPORTS TRIBUNE**

**Anotace:**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem membránového zastřešení tribuny sportovního stadionu ve Žďáru nad Sázavou. Zdrojem základních rozměrů a koncepce projektu je architektonická studie, která měla za cíl zrekonstruování celého sportovního areálu. Cílem práce je na základě studie a vykonané rešerše předběžně navrhnout možné tvarové a konstrukční varianty membránového zastřešení, vzájemně porovnat jejich výhody/nevýhody, a následně jednu konkrétní alternativu podrobněji rozpracovat. Součástí finálního návrhu bude také výkresová část. Práce obsahuje i část teoretickou, která se věnuje obecně problematice návrhu membránových konstrukcí včetně popisu použitého softwaru.

**Klíčová slova:** membránová konstrukce, membránová teorie, tribuna, Dlubal RFEM, RF-FORM-FINDING modul, zastřešení

**Annotation:**

This thesis focuses on design of membrane roofing for sports stadium in Žďár nad Sázavou. Source of basic dimensions and idea of the whole project is an architectural study focused on reconstruction of the sports area. Objective of the thesis is a draft of several structural membrane systems, their mutual comparison and one of the systems is designed more detailed. Drawing part is also included in final design. There is also a theoretical part, that deals with the general idea of designing membrane structures including a description of the used software.

**Keywords:** membrane construction, membrane theory, tribune, Dlubal RFEM, RF-FORM-FINDING modul, roofing



## SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Blažek Robin

Název diplomové práce: Membránové zastřešení sportovní tribuny

Základní část: ..... podíl: 100 %

Formulace úkolů: - rešerše membránových konstrukcí, materiálového řešení, konstrukčních detailů;  
- teorie membránových konstrukcí, výpočetní přístupy, popis dostupného softwaru;  
- návrh variant konstrukčního a tvarového uspořádání;  
- výběr finální varianty, podrobné konstrukční řešení, statický výpočet;  
- výkresová část

Podpis vedoucího DP: ..... Datum: 02.10.2019

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

### Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce .....	10
3	Zadání – zastřešení sportovní tribuny stadionu Bouchalky .....	11
4	Teorie výpočtu membránových konstrukcí.....	13
4.1	Skořepiny .....	13
4.1.1	Ohybová teorie skořepin .....	14
4.1.2	Membránová teorie skořepin .....	15
4.2	Nelineární analýza .....	15
4.2.1	Rozdíly mezi výpočty tzv. I., II. a III. řádem.....	16
4.2.2	Geometrická nelinearita .....	17
4.2.3	Materiálová nelinearita .....	17
4.2.4	Metody řešení nelineárních algebraických rovnic .....	17
4.3	Popis softwaru.....	19
4.3.1	Dlubal RFEM.....	19
4.3.2	Dlubal RF-Form-Finding .....	20
5	Historie, principy a materiály membránových konstrukcí .....	22
5.1	Historie.....	22
5.2	Principy navrhování membránových konstrukcí .....	23
5.2.1	Postup návrhu.....	23
5.2.2	Základní typy membránových konstrukcí.....	23
5.3	Materiály .....	25
5.3.1	Textilní membrány .....	26
5.3.2	Fóliové materiály .....	28
5.3.3	Lana.....	29
6	Rešerše membránových konstrukcí .....	30
6.1	Vysoká pec č.1 – AP Atelier.....	30
6.2	Olympijský stadion – GMP Architekten.....	32
6.3	Lord’s Cricket Ground – Populous .....	34
6.4	Abenstein Arena – Kiefer & Teschner.....	36
6.5	Elspe Grandstand – Koch Membranen GmbH.....	38
7	Varianty konstrukčních systémů .....	40
7.1	Varianta typu sedlo (vypnutí membrány přes oblouky).....	41
7.1.1	Popis.....	41
7.1.2	Předběžný návrh.....	43
7.2	Varianta typu pagoda .....	49
7.2.1	Popis.....	49



7.2.2	Předběžný návrh.....	51
7.3	Varianta „hypar“ .....	56
7.3.1	Popis.....	56
7.3.2	Předběžný návrh.....	59
7.4	Zhodnocení variant .....	63
8	Podrobné konstrukční řešení finální varianty .....	64
8.1	Změny vůči předběžnému návrhu.....	64
8.2	Zatížení .....	65
8.2.1	Zatížení sněhem .....	65
8.2.2	Zatížení větrem .....	66
8.2.3	Proměnné zatížení - údržba.....	68
8.2.4	Zatížení teplotou .....	68
8.3	3D model a kombinace zatížení.....	68
8.4	Návrh jednotlivých prvků konstrukce.....	72
8.4.1	Stabilitní výpočet .....	72
8.4.2	Návrh sloupu.....	73
8.4.3	Návrh nosníku.....	75
8.4.4	Návrh oblouku .....	77
8.4.5	Návrh táhel pod oblouky.....	80
8.4.6	Návrh kotevních lan .....	80
8.4.7	Návrh okrajových lan membrány.....	80
8.4.8	Návrh membrány.....	81
8.4.9	Posouzení membrány při MSP.....	82
8.4.10	Reakce v kotvení.....	83
9	Výkresová část.....	84
9.1	Půdorys a podélný řez C-C' .....	85
9.2	Příčné řezy A-A', B-B' .....	86
9.3	Detail A – schéma ukotvení sloupu .....	87
9.4	Detail B, C – schéma montážního spoje nosníku, schéma ukotvení táhla .....	88
9.5	Detail D – příprava ocelové konstrukce pro připojení membrány .....	89
10	Závěr .....	90
11	Zdroje.....	91
11.1	Seznam použité literatury.....	91
11.2	Seznam použitých norem.....	95
11.3	Seznam použitého softwaru .....	95

## 1 Úvod

Mezi hlavní prvky moderní architektury můžeme bezesporu zařadit návrh lehkých a vzdušných konstrukcí, překonávání velkých rozponů pomocí minimálního počtu podpor a využívání zakřivených tvarů inspirovaných velmi často přírodou.

Typickým zástupcem tohoto druhu jsou membránové konstrukce. Vyznačují se prostorovým zakřivením ve 2 či více směrech. Díky nejnovějším materiálům můžeme těžit nejenom z jejich velmi nízké plošné hmotnosti, vysoké únosnosti, ale také životnosti, či odolnosti vůči UV záření. Častou aplikací bývá zastřešení stadionů, tribun, letištních hal a kulturních míst. Pro svou práci jsem si vybral zastřešení tribuny fotbalového stadionu.

## 2 Cíle práce

Pro diplomovou práci byly zvoleny následující cíle:

- Teorie membránových konstrukcí, výpočetní přístupy, popis použitého softwaru
- Rešerše membránových konstrukcí, materiálového řešení a konstrukčních detailů
- Předběžný návrh variant konstrukčního a tvarového uspořádání
- Výběr finální varianty, její podrobné konstrukční řešení a statický výpočet
- Výkresová část

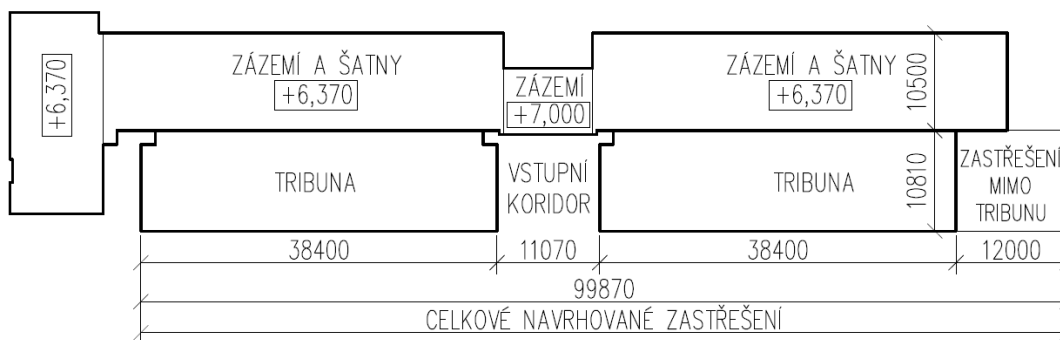
### 3 Zadání – zastřešení sportovní tribuny stadionu Bouchalky

Jak již bylo zmíněno výše, hlavním tématem práce je návrh zastřešení pro novou tribunu fotbalového stadionu Bouchalky ve Žďáru nad Sázavou. Mým hlavním podkladem byla dokumentace ze studie rekonstrukce celého sportovního areálu, který přiléhá k fotbalovému hřišti.



Obrázek 1 – Návrh zastřešení tribuny ze studie - vizualizace <sup>[1]</sup>

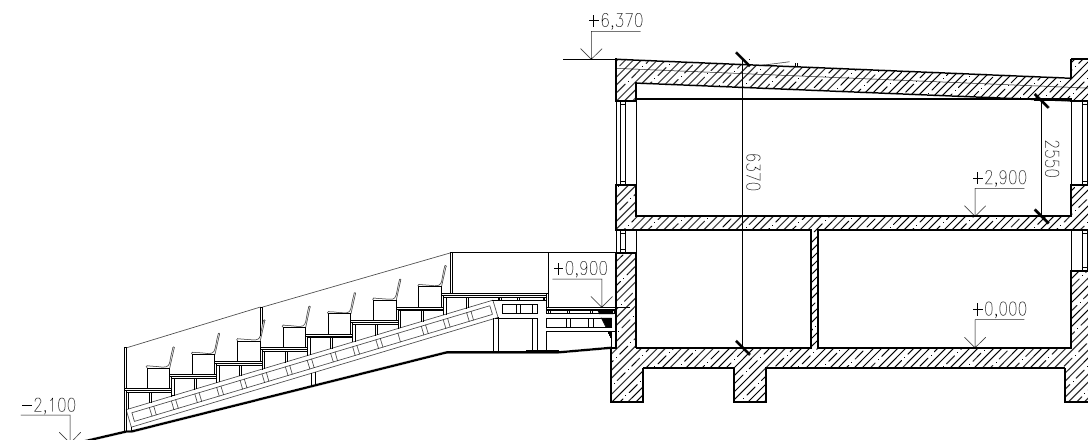
Navrhované zastřešení má za cíl pokrýt půdorysnou plochu tribuny, konkrétně o rozměrech 87,9 x 10,9 m. Ve studii bylo předpokládáno prodloužení zastřešení na jedné straně i mimo tribunu, zhruba na celkovou délku 100 m. V rámci podkladů byl i navržen jeden konkrétní tvar membránové konstrukce, který jsem se pokusil co nej přesněji dodržet a zařadil ho mezi možné varianty (označeno jako varianta č.3).



Obrázek 2 – Podklady ze studie – půdorysné schéma objektu

Ze zpracované dokumentace také vyplývalo, že ihned za tribunou vznikne novostavba fotbalových šaten a zázemí pro diváky. Návrh tohoto objektu není zahrnut v mé práci, avšak jeho výstavbu jsem bral jako nezbytnou vzhledem k tomu, že do něj

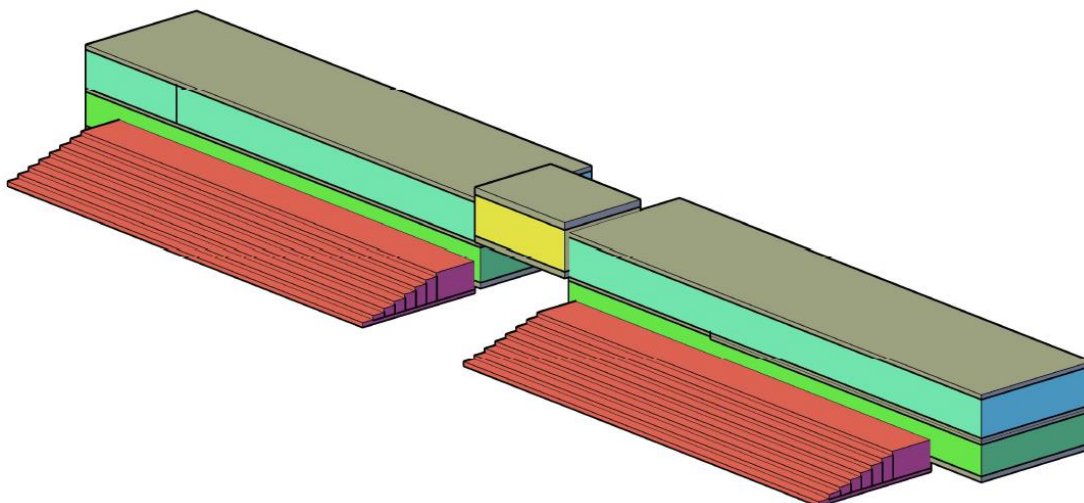
bude membránová konstrukce ukotvena. Při reálném komplexním řešení projektu by tato stavba musela být i dispozičně koordinována s návrhem kotvení membrány.



Obrázek 3 – Podklady ze studie – typický řez tribunou a objektem zázemí

Zeměpisná poloha objektu hraje při návrhu membránových konstrukcí velkou roli, což platí i v tomto případě. Celkové řešení je velmi ovlivněno tím, že Žďár nad Sázavou se nachází v oblasti, kde dochází k výskytu velkého zatížení sněhem i větrem.

Odvodnění zastřešení tribuny se předpokládá svedením veškeré vody na střechu objektu za tribunou, kde by bylo dále vyřešeno již v rámci projektu daného objektu.



Obrázek 4 – Podklady ze studie – schéma hmot objektů

## 4 Teorie výpočtu membránových konstrukcí

Základní teoretické poznatky o fungování konstrukcí ve stavu takzvané membránové napjatosti vychází z nadřazené skupiny konstrukcí zvaných skořepiny. V následující části budou proto popsány charakteristické vlastnosti jak skořepinových, tak membránových konstrukcí.

### 4.1 Skošepiny

Jedná se o plošné konstrukce, které jsou charakteristické svoji zakřivenou střednicovou plochou a tloušťkou výrazně menší než zbylé dva rozměry. Zakřivení může být v jednom či obou hlavních směrech a značně přispívá k příznivému rozložení vnitřních sil. Dle způsobu namáhání můžeme rozlišit tyto základní typy:

- a) Tlustostěnné skořepiny
  - platí, že tloušťka skořepiny je srovnatelná s minimálním poloměrem křivosti
  - protože zde dochází k silně nelineárnímu rozložení napětí po tloušťce skořepiny, nelze aplikovat Kirchhoffovu teorii tenkých desek
- b) Tenkostěnné skořepiny
  - zanedbávají se vlivy smykových sil na deformaci normál ke střednicové ploše, lze tak uvažovat lineární rozložení normálových napětí
- c) Nelineární tenkostěnné skořepiny
  - velikost deformace přibližně rovna tloušťce konstrukce, nutnost zvažít zavedení geometrické nelinearity do výpočtu
- d) Membrány
  - specifický druh skořepin, u kterých se nevyskytují žádné ohybové ani kroutící momenty a základním tvarovým principem je prostorové zakřivení ve 2 směrech
  - dochází k namáhání pouze normálovými a smykovými silami
  - výsledný stav konstrukce se nazývá membránová napjatost, při kterém platí lineární rozložení napětí po tloušťce konstrukce

Pro výpočet skořepin se využívá poznatků dvou hlavních teorií:

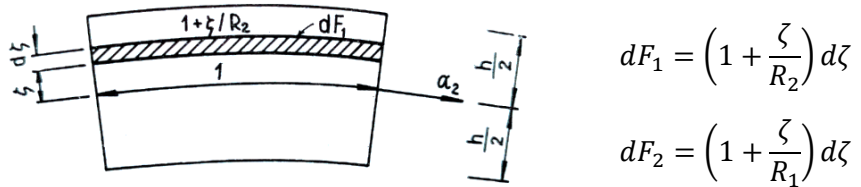
- Ohybová teorie skořepin
- Membránová teorie skořepin

#### 4.1.1 Ohybová teorie skořepin

Vychází z Kirchhoffovy teorie ohybu tenkých desek. V praxi se také hovoří o tzv. technické teorii tenkých desek. Formulují 2 základní předpoklady:

- normály ke střednicové ploše skořepiny jsou jejími normálami i po deformaci a současně se vzdálenost 2 bodů na normále nezmění
- normálové napětí ve směru normály je zanedbatelné v porovnání se složkami působícími rovnoběžně se střednicovou plochou

Využívá se pro výpočet klasických skořepin a řešení vede na 8 neznámých silových účinků. Pokud je diferenciál jednotkové plochy řezu v obou směrech dán následujícími vzorci:



Obrázek 5 – Diferenciál jednotkové plochy [2]

Pak neznámé vnitřní síly lze definovat takto:

$$n_1 = \int \sigma_{11} dF_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} \left(1 + \frac{\zeta}{R_2}\right) d\zeta \quad n_2 = \int \sigma_{22} dF_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{22} \left(1 + \frac{\zeta}{R_1}\right) d\zeta$$

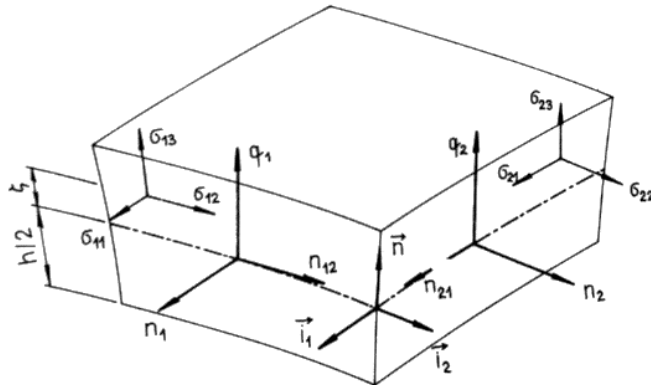
$$n_{12} = \int \sigma_{12} dF_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{12} \left(1 + \frac{\zeta}{R_2}\right) d\zeta \quad n_{21} = \int \sigma_{21} dF_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{21} \left(1 + \frac{\zeta}{R_1}\right) d\zeta$$

$$q_1 = \int \sigma_{13} dF_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{13} \left(1 + \frac{\zeta}{R_2}\right) d\zeta \quad q_2 = \int \sigma_{23} dF_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{23} \left(1 + \frac{\zeta}{R_1}\right) d\zeta$$

$$m_1 = \int \sigma_{11} \zeta dF_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} \zeta \left(1 + \frac{\zeta}{R_2}\right) d\zeta \quad m_2 = \int \sigma_{22} \zeta dF_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{22} \zeta \left(1 + \frac{\zeta}{R_1}\right) d\zeta$$

$$m_{12} = \int \sigma_{12} \zeta dF_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{12} \zeta \left(1 + \frac{\zeta}{R_2}\right) d\zeta \quad m_{21} = \int \sigma_{21} \zeta dF_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{21} \zeta \left(1 + \frac{\zeta}{R_1}\right) d\zeta$$

$$n_{12} = n_{21}; \quad m_{12} = m_{21}$$



Obrázek 6 – Označení vnitřních sil na skořepině [2]

### 4.1.2 Membránová teorie skořepin

Je charakterizována tím, že vnitřní síly mají výslednici převážně v tečné rovině ke střednicové ploše. Vliv sil působících ve směru normál ke střednici, ohybových a také kroutících momentů je zde minimální. Takové fungování konstrukce potom označujeme jako membránový stav napjatosti skořepin. Jedná se o velmi efektivní přenos zatížení. Řešení je tedy omezeno na pouhé 3 složky vnitřních sil.

$$m_1 = m_2 = m_{12} = m_{21} = 0$$

$$q_1 = q_2 = 0$$

$$n_1 = \frac{Eh}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$$

$$n_2 = \frac{Eh}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)$$

$$n_{12} = n_{21} = t = \frac{Eh}{2(1 + \mu)} \gamma$$

Membránový stav napjatosti se objevuje u dvou základních typů konstrukcí.

- a) Prvním typem jsou tzv. dokonale ohebné membrány. Ty se vyznačují tím, že zatížení odolávají pouze silami v tečném směru k jejich střednicové ploše. Lze konstatovat, že vztah pro osovou tuhost  $E \cdot h$  je konečná hodnota, avšak hodnota  $E \cdot h^3$  se již blíží nule. Typickým zástupcem jsou jednovrstvé textilní membrány.
- b) Do stavu membránové napjatosti lze také uvést ohybově tuhé skořepiny, a to pomocí zatížení, vhodně zvoleného tvaru a uložení. V konstrukci pak dochází opět ke vzniku sil v tečném směru k jejich střednici.

Může dojít, a v praxi také dochází, k tomu, že se na konstrukci lokálně vyskytnou ohybové účinky. Jedná se většinou o oblast u kotvení membrány či místa nespojitosti zatížení. V těchto místech pak dochází k tzv. lokálním poruchám membránové napjatosti. Vhodným návrhem detailů a problematických míst se snažíme tomuto jevu vyhnout.

## 4.2 Nelineární analýza

Výpočet membránových konstrukcí se vyznačuje nutným použitím nelineární analýzy. V následující kapitole budou popsány základní rozdílnosti od lineárního výpočtu a také obecné principy, které se při nelineární analýze používají.

## 4.2.1 Rozdíly mezi výpočty tzv. I., II. a III. řádem

### 4.2.1.1 I. řád

Prvním řádem rozumíme výpočet s použitím lineární analýzy. Jedná se o aplikování zatížení na nedeformovanou konstrukci. Výsledkem jsou vnitřní síly, napětí, či deformace na prvcích. Výpočet je „jednokrokový“, přímý, bez nutnosti opakování. Výhodou je princip superpozice, který nám umožňuje jednoduše kombinovat výsledky jednotlivých zatěžovacích stavů pomocí prostého sčítání. Jedná se o standardní metodu používanou pro většinu konstrukcí.

### 4.2.1.2 II. řád

Pokud hovoříme o výpočtu II. řádem, je tím myšleno aplikování zatížení na již zdeformovanou konstrukci. Metoda se používá pro analýzu štíhlých konstrukcí, které jsou zatížené výraznými osovými silami a současně silami příčnými nebo počátečními imperfekcemi. Rozeznáváme dvě základní metody řešení<sup>[3]</sup>. V první metodě výpočet začne určením normálových sil pomocí I. řádu a na základě těchto výsledků se sestaví matice počátečních napětí. Výpočet se poté opakuje, ovšem pro již modifikovanou matici. Při rozložení konstrukce na dostatečný počet prvků se řešení s rozvojem blíží přesnému řešení. Druhá metoda využívá vícekový výpočet, prováděný pomocí iteračních metod (viz kapitola 4.2.4). V normě jsou definovaná základní kritéria, která nám říkají, kdy je nutné výpočet II. řádem aplikovat. Oproti lineárnímu výpočtu I. řádem zde odpadá výhoda v podobě principu superpozice, a zároveň tak narůstají nároky na výpočetní výkon a čas.

Metoda 1:  $K(\lambda) \cdot d = f$

$$K(\lambda) = K_0 - \lambda \cdot K_\sigma$$

$\lambda$  ... *parametr zatížení*

$K_\sigma$  ... *matice počátečních napětí*

$K_0$  ... *matice tuhosti z I. řádu*

Metoda 2:  $K_0 \cdot d = f$

$$K_1 \cdot d \neq f \rightarrow K_1 \cdot \Delta d = f - K_1 \cdot d$$

$$K_1 \cdot (d + \Delta d) = f$$

$K_1$  ... *mat. tuhosti po deformaci*

### 4.2.1.3 III. řád

V případě III. řádu se jedná opět o aplikování zatížení na zdeformovanou konstrukci, avšak do rovnic vstupuje nejen deformace, ale i rotace prvků. To je zásadní rozdíl, který umožňuje konstrukci zanalyzovat i při velkých deformacích. Z toho také vyplývá, že II. řád je omezen malými deformacemi. Membránové konstrukce jsou typickými prvky, při jejichž výpočtu je nutné aplikovat teorii velkých deformací.



#### 4.2.2 Geometrická nelinearita

Je to nelinearita plynoucí z geometrických rovnic. Ty definují vztahy mezi posunutím a deformací.

#### 4.2.3 Materiálová nelinearita

Jedná se o nelinearitu vycházející z konstitutivních (fyzikálních) rovnic. Definují nám vztah mezi napětím a přetvořením. V praxi se s ní setkáváme v podobě nelineárního pracovního diagramu daného materiálu.

#### 4.2.4 Metody řešení nelineárních algebraických rovnic

Metoda konečných prvků je reprezentována základním vztahem, který definuje rovnost mezi součinem matice tuhosti s vektorem posunutí na levé straně rovnice a vektorem zatížení na straně druhé.

$$K \cdot d = f$$

Při nelineární úloze se formulace změní tak, že matice tuhosti je funkcí posunutí, a tudíž nemůže být explicitně dohledána bez kompletní znalosti vektoru posunutí.

$$K(d) \cdot d = f$$

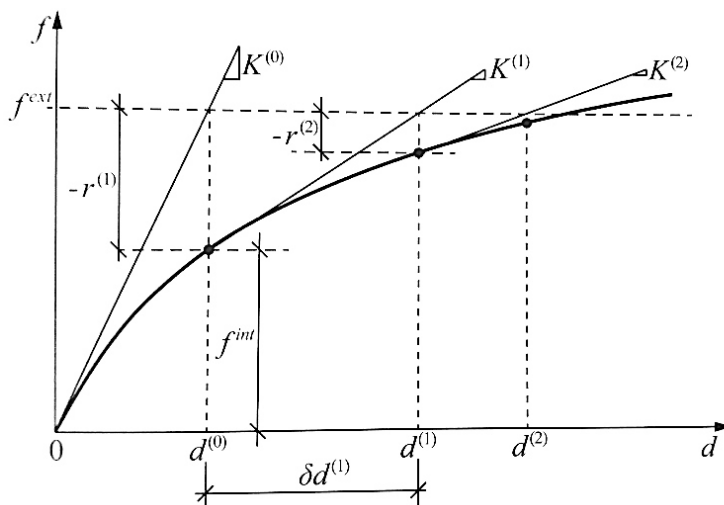
Vzhledem k nemožnosti přímého řešení soustavy se užívá iteračních metod. Jejich princip se zakládá na postupném zpřesňování řešení, přičemž dílčí kroky jsou řešeny lineárně.

$$K(d^{(i)}) \cdot d^{(i+1)} = f \quad \Rightarrow \quad d^{(i+1)} = K^{-1}(d^{(i)}) \cdot f$$

V praxi se běžně využívá následujících iteračních metod.

##### 4.2.4.1 Newton-Raphsonova metoda

Metoda často nazývána také jako „metoda tečen“. Principem je hledání řešení, při kterém je vektor nevyvážených sil nulový. V každé iteraci je sestavena nová matice

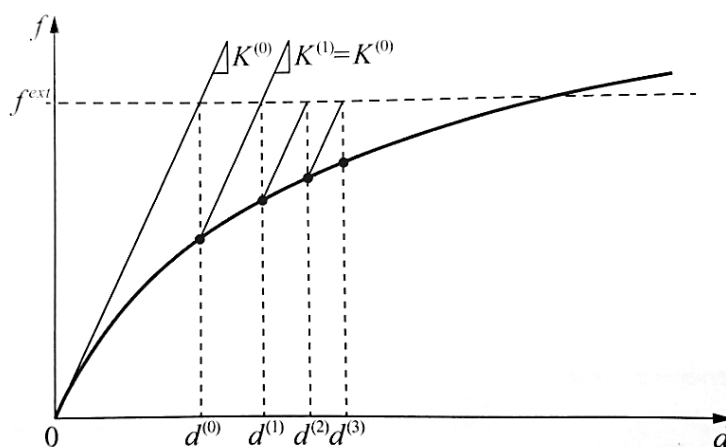


Obrázek 7 – Princip Newton-Raphsonovy metody [4]

tuhosti, vypočítán přírůstek vektoru „ $d$ “ a celkové „ $d$ “ v  $i$ -té iteraci je rovno postupné sumaci přírůstků. Pokud řešení konverguje, v každém kroku reziduum „ $r$ “ postupně klesá až k nule. Ve statických MKP softwarech bývá používána pro tzv. řešení III. řádem (teorie velkých deformací).

#### 4.2.4.2 Modifikovaná Newton-Rhapsonova

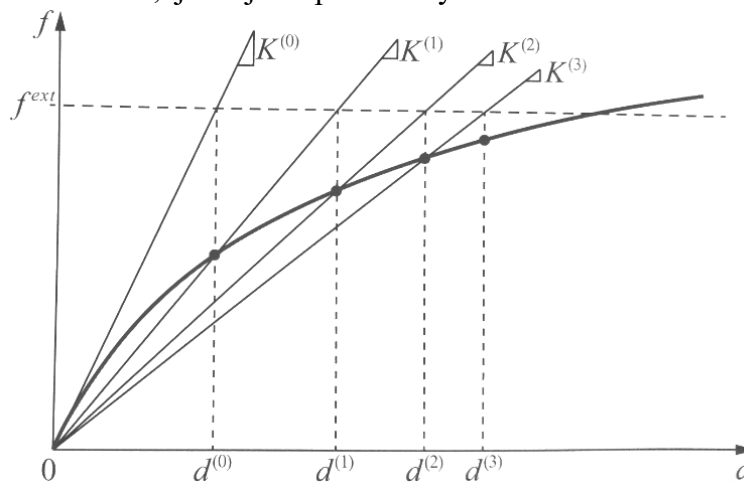
Jedná se o upravenou verzi předchozí metody. Používá stejné principy výpočtu s tím rozdílem, že matici tuhosti spočítá pouze jednou, hned na začátku a používá ji poté v každém iteračním kroku. K řešení je tedy potřeba více iterací, ale jednotlivé kroky jsou mnohem rychlejší.



Obrázek 8 – Princip Modifikované Newton-Rhapsonovy metody <sup>[4]</sup>

#### 4.2.4.3 Picardova metoda

Metoda známá také pod označením „přímá iterační metoda“ nebo „metoda sečen“. Začíná se s počátečním odhadem vektoru posunu ( $d^{(0)}$ ), který je získán jako lineární řešení pro počáteční matici tuhosti  $K^{(0)}$ . Obecně je doporučována pro výpočet se základními nelinearitami, jako je například vyloučení tahu/tlaku na prutu. Ve



Obrázek 9 – Princip Picardovy metody <sup>[4]</sup>

statických softwarech (např. SCIA Engineer, Dlubal RFEM) je tato metoda defaultně využívána pro výpočet geometrických nelinearit při výpočtu II. řádem. V porovnání s ostatními metodami konverguje většinou pomaleji, výpočet je však stabilnější.

#### **4.2.4.4 Kombinace Newton-Raphsonovy a Picardovy metody**

Jak z názvu vyplývá, jedná se kombinaci obou výše zmíněných metod. Výpočet započne několika kroky pomocí Picardovy metody, která je vcelku rychlá a málo citlivá na problémy s nestabilitou. Po přiblížení k řešení se začne používat metoda Newton-Raphsonova, kterou se docílí nalezení rovnováhy.

### **4.3 Popis softwaru**

Vzhledem ke specifickým vlastnostem membránových konstrukcí je při jejich návrhu nutné použít výpočetní software, který dokáže na základě vstupních parametrů dohledat počáteční tvar konstrukce, a poté tento nalezený tvar podrobit zatížení při analýze velkých deformací. Já jsem si pro svoji práci vybral program od firmy Dlubal, která do svého standardního výpočetního softwaru MKP pro 3D modely RFEM doplnila před pár lety i specializovaný RF-FormFinding modul, který umožňuje s membránou pracovat již včetně nalezení počátečního tvaru.

V následujících podkapitolách se zaměřím na popis konkrétních funkcí programu, které jsem při výpočtu používal.

#### **4.3.1 Dlubal RFEM**

Jak již bylo zmíněno, RFEM slouží pro analýzu nosných konstrukcí pomocí metody konečných prvků (dále pouze MKP). Při modelování membránových konstrukcí je využívána analýza tzv. velkých deformací (nebo také III.řád). Důvodem je to, že do výpočtu vstupují nelineární vztahy. Geometrická nelinearita je automaticky zařazena do výpočtu zvolením konkrétního druhu prvku. V mém konkrétním případě jsou to plošné prvky typu „membrána“ a poté také vypínací a kotevní pruty typu „lano“. V ideálním případě, bychom si před podrobným návrhem nechali udělat v laboratoři biaxiální test konkrétní tkaniny použité na membránu a na základě výsledků zanesli do programu přesné materiálové charakteristiky, a to včetně nelineárního pracovního diagramu. K tomu slouží modul RF-MAT-NL, kde lze přesně definovat vztah mezi přetvořením a napětím v materiálu.

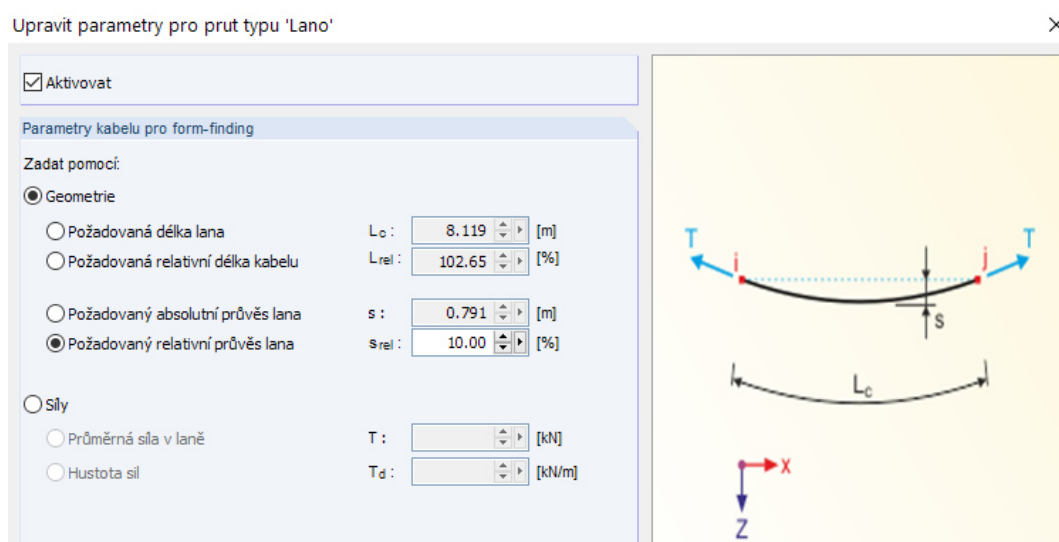
Pokud pracovní diagram k dispozici nemáme, je nutné použít klasický lineárně isotropní (ortotropní) elastický materiál, kde jako vstupy pro konkretizaci potřebujeme tyto charakteristiky: objemová tíha, Youngův modul pružnosti, smykový modul pružnosti, Poissonův součinitel. RFEM bohužel nemá ve svém katalogu žádné předdefinované textilní membrány, je tedy nutné vždy nadefinovat svůj konkrétní materiál. U lan je situace o něco lepší. V katalogu najdeme několik variant vinutých lan, která jsou přesně definována dle výrobců.

Dalším důležitým krokem při modelování membránové konstrukce je nastavení generování sítě konečných prvků. Pro tento druh konstrukcí se doporučuje zvolit tvorbu konečných prvků ve tvaru trojúhelníků, protože trojúhelníková síť dokáže daleko lépe vystihnout zakřivené tvary, které jsou pro membrány typické.

Při výpočtu pomocí teorie velkých deformací dochází k řešení soustavy nelineárních rovnic principem iteračního postupu. Daný software disponuje nabídkou několika iteračních metod, které jsou vyjmenované a stručně popsány v kapitole 4.2.4.

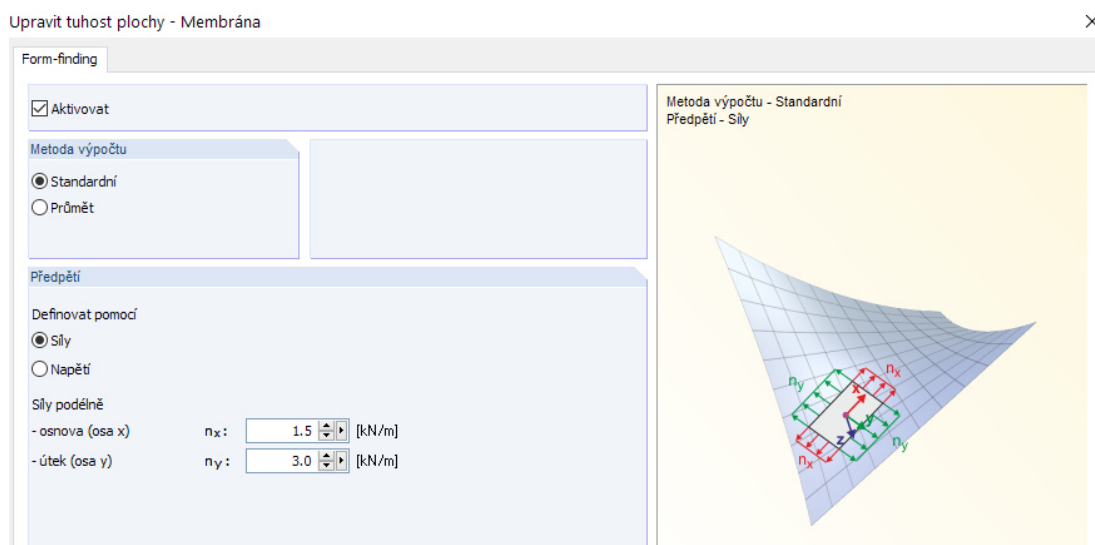
#### 4.3.2 Dlubal RF-Form-Finding

Základním úkolem tohoto přídatného modulu je nalezení rovnovážného tvaru membránových a lanových prvků. Principem tzv. form-findingu je hledání takové geometrické polohy prvků, při níž jsou dodrženy námi zadaná napětí/předpětí v membránách a lanech, a současně jsou splněny statické a geometrické okrajové podmínky. Nalezení počátečního rovnovážného tvaru je nezbytnou podmínkou pro následující statický výpočet vnitřních sil, deformací apod.



Obrázek 10 – Dialogové okno pro definici lana ve FormFinding modulu

V RFEM je nutné tento přídatný modul aktivovat při tvorbě nového modelu. Poté se uživateli zpřístupní možnosti zadání speciálních vstupních údajů, které se používají právě pro form-finding. U lanových prvků si může uživatel vybrat, jakým způsobem chce definovat počáteční stav lana z následujících způsobů: délka lana absolutní, délka lana relativní (v %), absolutní průvěs lana, relativní průvěs lana (v %), průměrná síla v laně, hustota sil v laně. U membrán je pak vstupní hodnotou buď požadovaná předpínací síla či napětí.



Obrázek 11 – Dialogové okno pro definici membrány ve FormFinding modulu

Zde je vhodné zmínit, že u membrán jsou k dispozici 2 základní metody výpočtu počátečního tvaru. Metoda předepisovaného tahu (tzv. standardní), která je v podstatě univerzálně použitelná na jakýkoli tvar. Ovšem u určitých typů tvarů se může stát, že nalezený tvar zcela neodpovídá naší představě (většinou se jedná o tvary vzniklé rotací, např. pagoda). V těchto případech se doporučuje použít metodu průmětovou.

Uživatel má dále k dispozici několik voleb, jak iterační výpočet form-findingu ovlivnit. Lze nastavit maximální počet iterací, který chceme provést, stejně jako toleranci kritérií konvergence (v podstatě přesnost) či rychlost konvergence. Výsledkem je poté nalezený rovnovážný stav konstrukce, který lze dále zatěžovat příslušnými zatěžovacími stavy, tak jak je obvyklé. Příslušné deformace od zatěžovacích stavů jsou již vztahovány k počátečnímu rovnovážnému tvaru.

## 5 Historie, principy a materiály membránových konstrukcí

### 5.1 Historie

Mezi počátky textilních membránových konstrukcí lze zařadit již první stany a přístřešky staré stovky, mnohdy i tisíce let. Historie membránových konstrukcí v podobě, jak je známe dnes, sahá však na počátek 20. století. Mezi průkopníky je nutné zmínit jméno Vladimíra Grigorjeviče Šuchova, jehož práce se stala základním kamenem pro spoustu jeho pokračovatelů. Zabýval se zakřivenými plochami, lanovými soustavami a také membránami. Mezi jeho známá a realizovaná díla patří např. Šuchovova věž (obr. 12), nebo rotunda z roku 1896.



Obrázek 12 – Šuchovova věž – foto<sup>[5]</sup>

V obou případech šlo o složitou lanovou síť, v případě rotundy pak navíc pokrytou tenkou membránou. Další významnou osobností, která se postarala o rozvoj membránové architektury, je Frei Otto. Od druhé poloviny dvacátého století vznikaly jeho realizace lanových a také membránových konstrukcí. Ve svých publikacích přicházel s novými poznatky, které posunuly



Obrázek 13 – Olympijský stadion v Mnichově – foto<sup>[6]</sup>

navrhování tohoto typu konstrukcí od zkoušení fyzických modelů k éře matematického modelování, která v podstatě přetrvává dodnes. Jednou z nejnámějších realizací je bezpochyby areál pro olympijské hry v roce 1972 v Mnichově. Kompletní zastřešení stadionu a přilehlého olympijského parku patří

dodnes k monumentálním dílům. Použita byla kombinace membránového zastřešení, s podpůrnou ocelovou konstrukcí, která byla vynášena a kotvena rozsáhlou lanovou soustavou.

Současně se na scéně začala objevovat jména Kenza Tange, Roger Taillibert či Buckminster Fuller. Všichni více či méně s Otto Freiem spolupracovali a podíleli se tak na překotném rozvoji membránových a lanových konstrukcí ve druhé polovině minulého století. S příchodem moderních výpočetních technologií a nových materiálů se tyto konstrukce staly běžnou součástí dnešní architektury.

## **5.2 Principy navrhování membránových konstrukcí**

### **5.2.1 Postup návrhu**

Na počátku vzniká architektonický návrh v podobě skic, fyzických či počítačových 3D modelů. V následující fázi se dílo přesouvá k specialistovi na membránové konstrukce, kdy dochází k sestavení komplexního modelu, ověření tvaru a návrhu podoby podpůrné ocelové konstrukce. Jedním z nejdůležitějších kroků v těchto prvních dvou fázích je nalezení vhodného počátečního tvaru konstrukce, tzv. form-finding (dále také viz kap. 4.3.2). Součástí druhé fáze je také tvorba stříhových plánů, které jsou nutné pro výrobu membrány.

V poslední fázi přichází na řadu inženýr specialista na statiku ocelových konstrukcí, který podrobně navrhne a posoudí podpůrnou konstrukci. Celý postup by se dal označit za iterační, kdy mnohdy dochází k předávání dat mezi jednotlivými profesemi a vzájemným úpravám.

### **5.2.2 Základní typy membránových konstrukcí**

Typologicky lze rozdělit tento druh konstrukcí na 2 základní typy:

- a) Mechanicky předpínané membrány
- b) Pneumaticky vypínané konstrukce

Vzhledem k mému konkrétnímu zadání objektu se zde budu zabývat především prvním typem.

#### **5.2.2.1 Mechanicky předpínané membrány**

Jak již bylo řečeno v teoretické části práce, membrána sama o sobě nemá ohybovou tuhost. Přenos zatížení je zde zajištěn jeho rozkladem do účinků normálových sil. Nutnou podmínkou pro tuto vlastnost je dodržení tvarových požadavků na prostorové zakřivení minimálně ve dvou směrech. Pokud bychom

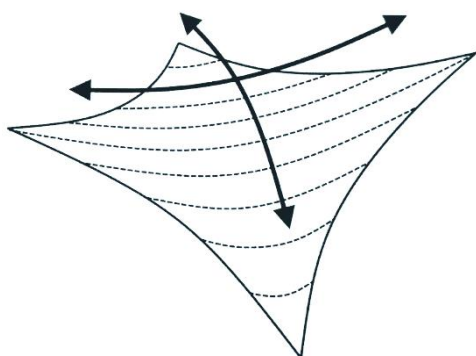
vypnuly plachtu pouze do rovné plochy, měla by jen funkci obalu, nikoli však funkci nosnou. Obecně platí, že čím rovinatější tvar, tím musí být materiál membrány více předeprnut, aby byl schopen odolat danému zatížení. Tím je samozřejmě vnášeno větší napětí do podpůrné ocelové konstrukce a návrh se stává neefektivním.

#### 5.2.2.1.1 Tvarové uspořádání

Rozeznáváme několik základních tvarů:

##### a) Hyperbolický paraboloid – tzv. hypar

Bodová membrána, v praxi označována jako hypar, vznikne vypnutím membrány mezi čtyři a více bodů, které neleží v jedné rovině. U dvou na sebe kolmých řezů je zde patrné jedno zakřivení ve směru konkávním a druhé v konvexním. Jedním z nejčastějších konstrukčních řešení je zde vypnutí na sloupy, které jsou ukotvené šikmými lany k základu.



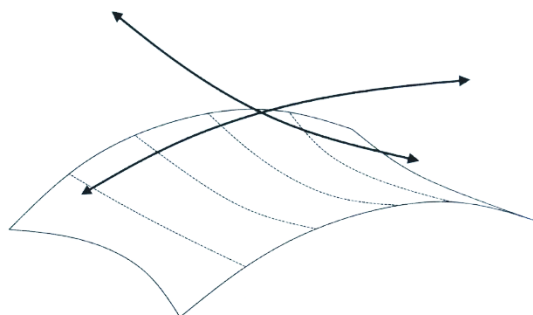
Obrázek 14 – Schéma hyperu <sup>[7]</sup>



Obrázek 15 – Realizace hyperu - foto <sup>[8]</sup>

##### b) Sedlo

Membrána vypnutá v jednom směru přes oblouky a v druhém prohnutím mezi nimi. Opět zde lze nalézt konkávní i konvexní tvar v na sebe kolmých řezech. Oblouk musí být pevně ukotven, a to ať už táhly či vzpěrami. Ve směru kolmém na oblouky bývá velmi časté liniové upnutí membrány k nosné ocelové konstrukci.



Obrázek 16 – Schéma sedla <sup>[7]</sup>

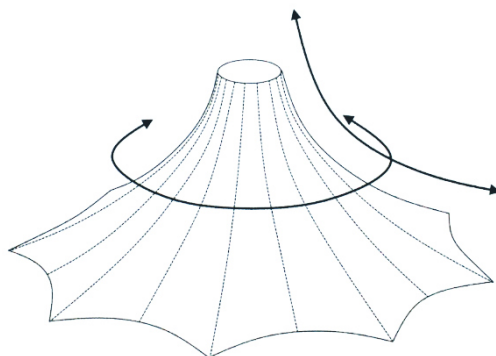


Obrázek 17 – Realizace sedla - foto <sup>[9]</sup>



### c) Pagoda a trychtýř

Membrána je ukotvena mezi dvě uzavřené kružnice, které mají odlišný průměr a jsou relativně daleko vzdálené od sebe. Volbou pořadí kružnic nad sebou určíme, zda se jedná o pagodu (menší průměr výše) či o trychtýř (menší průměr níže). Případným vyosením a deformací kružnice lze vytvořit další modifikaci ve tvaru kapky.



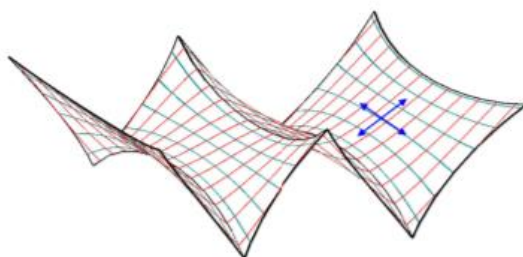
Obrázek 18 – Schéma pagody <sup>[7]</sup>



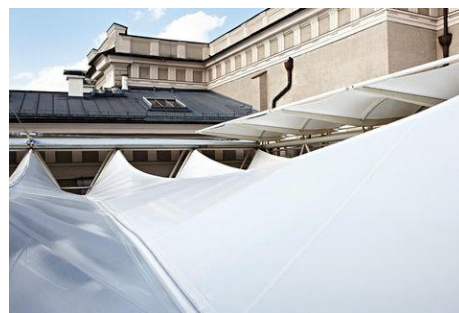
Obrázek 19 – Realizace trychtýře - foto <sup>[10]</sup>

### d) Lomenice

Poměrně specifické použití má poslední ze základních tvarů. Využívá se při velkém nepochybně delší a kratší strany zastřešovaného půdorysu. Lomenice je vytvořena konstrukcí hřebene a obloukovým vypnutím úžlabí, zajištěné prohnutými lany. Často je tento typ konstrukce použit u pohyblivých konstrukcích zastřešení.



Obrázek 20 – Schéma lomenice <sup>[11]</sup>



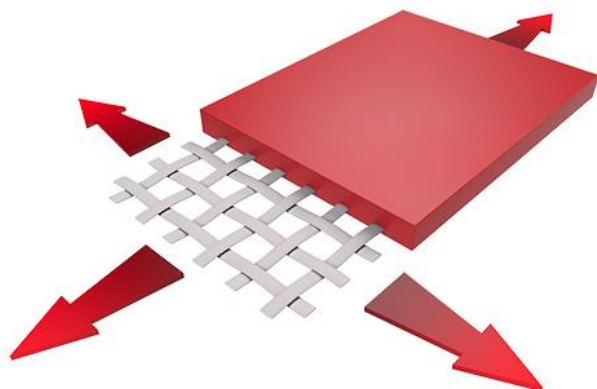
Obrázek 21 – Realizace lomenice - foto <sup>[12]</sup>

## 5.3 Materiály

Díky moderní technologii a výraznému rozvoji materiálového inženýrství v posledních desetiletích máme dnes na výběr velké množství materiálů o nejrůznějších vlastnostech. Mezi základní parametry při výběru patří objemová hmotnost, pevnost v tahu, požární odolnost, či průsvitnost. V membránových konstrukcích se běžně setkáváme se třemi základními druhy materiálů: textilní membrány, fólie a lana, která jsou nedílnou součástí podpůrné konstrukce.

### 5.3.1 Textilní membrány

Textilní jednovrstvé membrány patří mezi běžně používané. Existuje mnoho druhů, vždy se však jedná o kompozit z několika částí. Nosnou vnitřní složkou bývají buď vlákna na bázi polyesterů, PTFE (poly-tetra-fluor-ethylen), nebo také vlákna skleněná či aramidová. Ve všech případech hovoříme o vysokopevnostních vláknech,

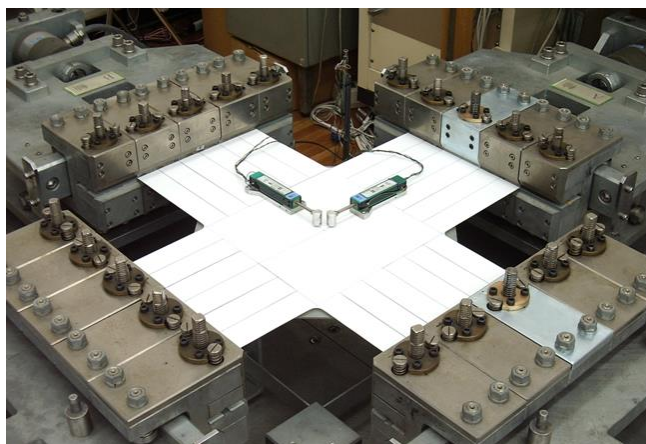


Obrázek 22 – Schéma jednovrstvé membrány<sup>[13]</sup>

kteří zajišťují materiálu potřebnou pevnost a tuhost. Ve specifikacích od výrobců se pevnostní údaje vyskytují jako pevnost v tahu v daném směru v dekanewtonech na šířku pětcentimetrového proužku membrány (daN/5cm). Materiál má většinou odlišné pevnosti ve směru osnovy a ve směru útku, i když výrobci již nabízejí typy s téměř shodnou pevností v obou směrech.

Typické hodnoty se pohybují v rozmezích 250-1300 daN/5cm. Pro zjištění těchto charakteristik se používá biaxiálního testu, kdy se v obou směrech měří napětí a protažení.

Druhou významnou částí je obalení nosných vláken. Běžně se jedná o povrchovou úpravu pomocí PVC, PTFE nebo silikonu. Ta zajišťuje odolnost proti povětrnostním podmínkám, celkovou životnost kompozitu, snadnější údržbu a v neposlední řadě také ovlivňuje jeho



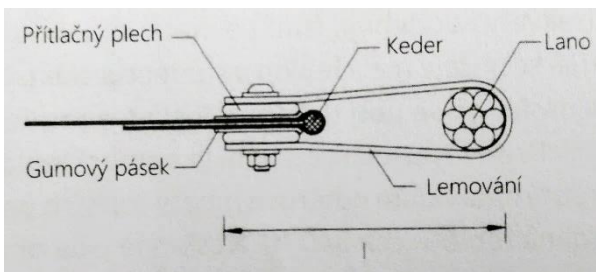
Obrázek 23 – Biaxiální test materiálu - foto<sup>[14]</sup>

průsvitnost. Celková tloušťka všech vrstev dohromady se běžně pohybuje v rozmezí 0,6-1,4mm při hmotnosti 750-1750 kg/m<sup>2</sup>.

Spoje textilních membrán dělíme obecně na trvalé (svařované, lepené) a dočasné (keder lišty, upínací desky). Svařované švy se používají nejčastěji pro spojování jednotlivých řezů materiálu k sobě. Vyznačují se vodotěsností i UV

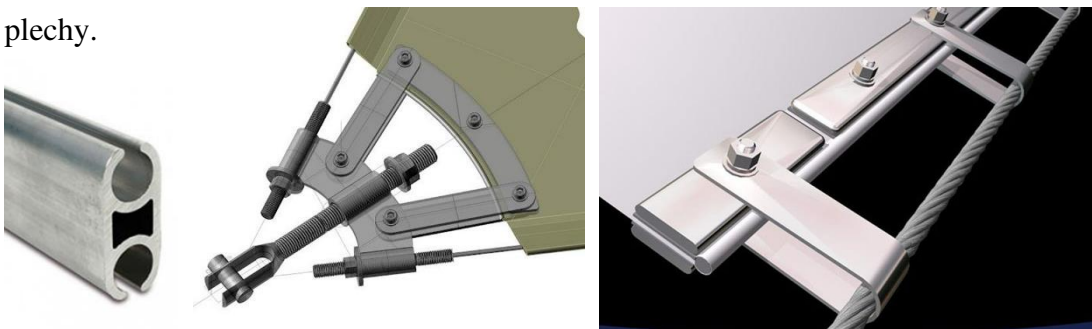
stabilitou. Svařování probíhá většinou dílensky. U tenčích tkanin je provedení jednodušší kvůli špatné vodivosti plastů. Spoje dočasné se používají k ukotvení membrány k podpůrné ocelové konstrukci. To je prováděno běžně pomocí šroubových spojů přes ocelové příložky.

Tkanina se nejčastěji ukončuje pomocí kedru (PVC provazec). K liniovému připojení k dalším konstrukcím poté slouží keдр lišty všech možných druhů a

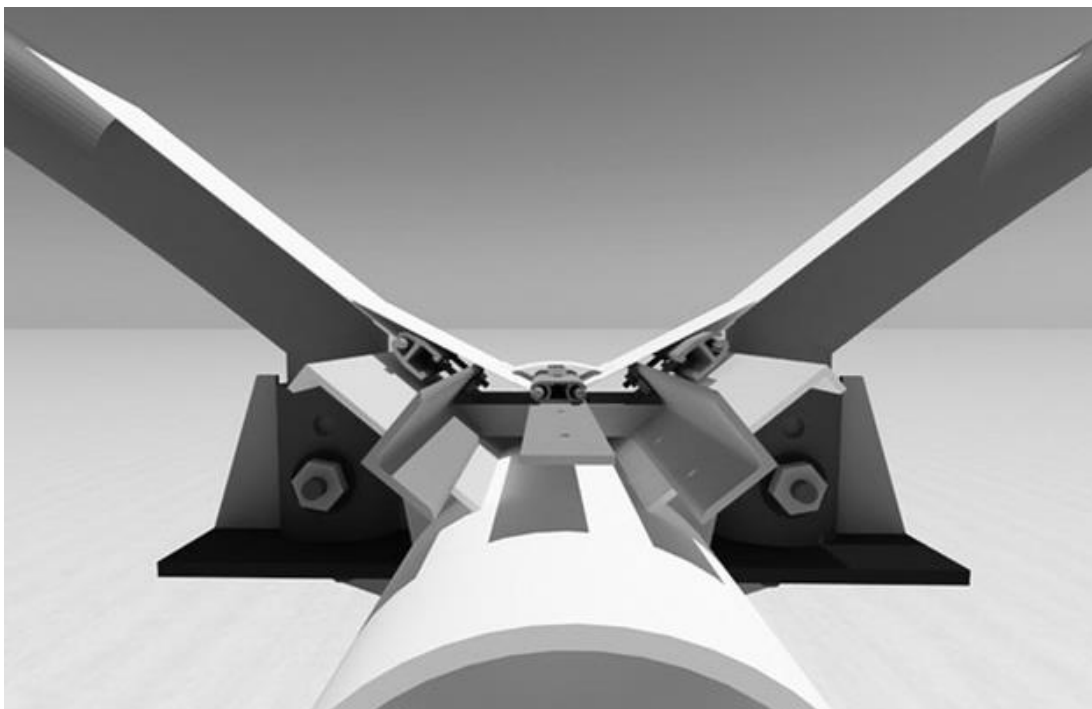


Obrázek 24 – Schéma – detail použití kedru <sup>[7]</sup>

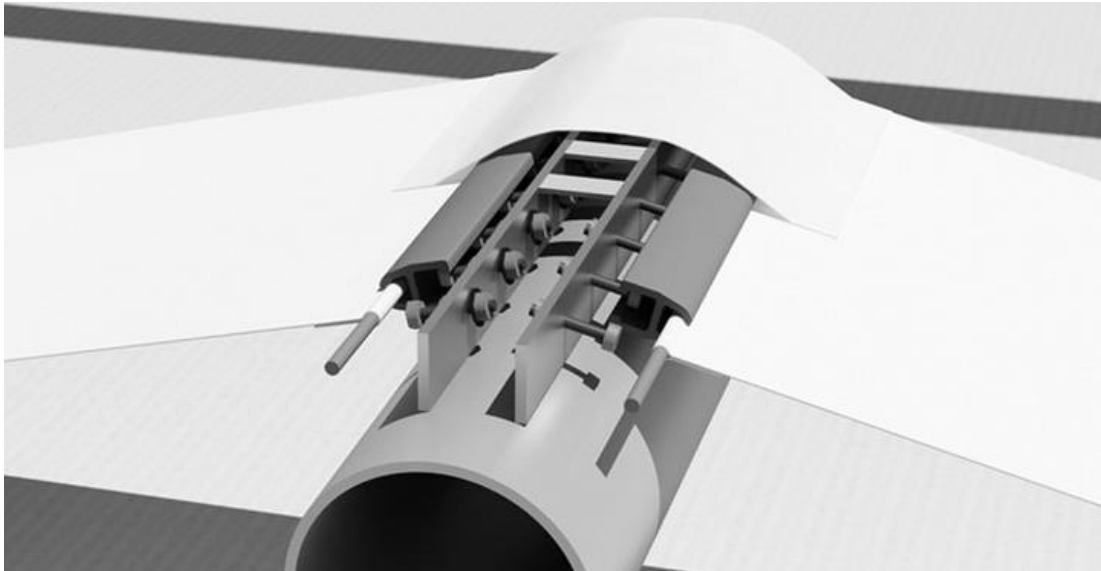
tvary. Pro bodové ukotvení se používají nárožní plechy a platle, principem je však opět ukončení membrány pomocí kedru a připojení k plechu buď přes lištu či přítlačné plechy.



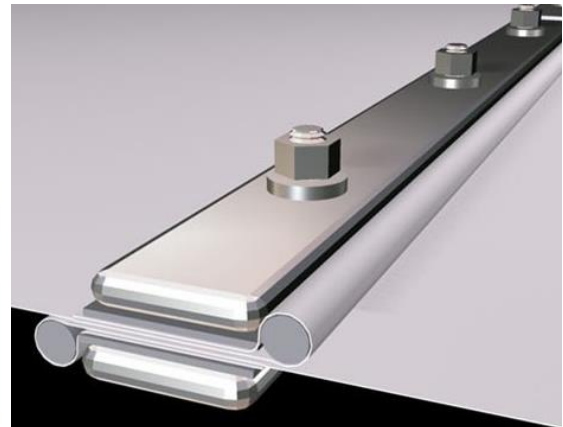
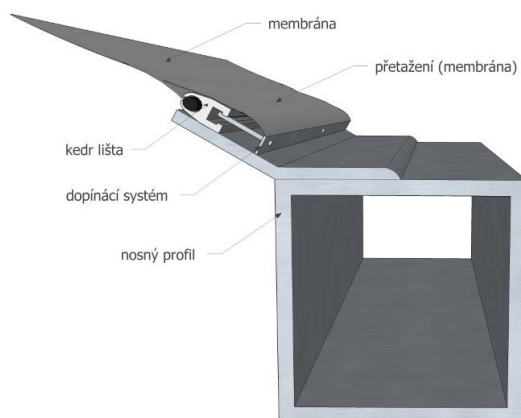
Obrázek 25 – Zleva: lišta pro keдр; detail bodového kotvení tkaniny; detail liniového ukončení <sup>[15,16,17]</sup>



Obrázek 26 – Konstrukční detail napojení membrán na ocelovém nosníku – varianta 1<sup>[18]</sup>



Obrázek 27 – Konstrukční detail napojení membrán na ocelovém nosníku – varianta 2 <sup>[18]</sup>



Obrázek 28 – Zleva: detail připoje keдр lišty k ocelové konstrukci<sup>[19]</sup>; liniové spojení membrán <sup>[17]</sup>

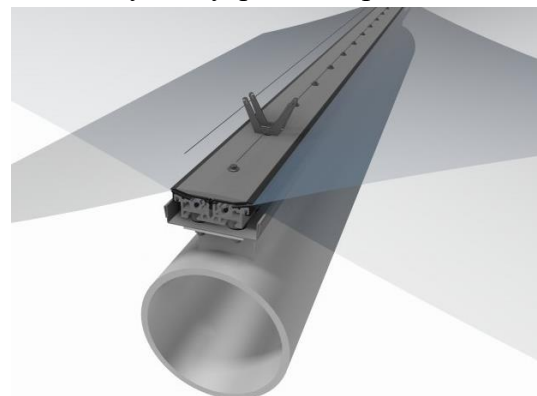
### 5.3.2 Fóliové materiály



Obrázek 29 – Realizace ETFE polštářů - foto <sup>[20]</sup>

účely organizací NASA se postupem času stal běžně rozšířeným i ve stavebnictví. Vyznačuje se vysokou odolností vůči UV

Typické použití je pro přetlakově předpínané membránové konstrukce. Nejpoužívanějším je fólie typu ETFE. Materiál vyvinutý původně pro kosmické



Obrázek 30 – Detail napojení ETFE polštářů <sup>[17]</sup>

záření, současně však vysokou průchodností světla (včetně UV záření). Toho se hojně využívá např. na fotbalových stadionech, kde může sloužit jako zastřešení, ochrana proti dešti a zároveň neškodí stíněním trávníku. V praxi se nejčastěji setkáme buď s přetlakovými polštáři nebo rukávy. Fólie se vyrábí v tloušťkách 100–250 mikronů a v případě polštářů s přtlakem cca 220 Pa se udává její nosnost okolo 250 kg/m<sup>2</sup>. Realizují se v jedné nebo i více vrstvách.

### 5.3.3 Lana

Ve výčtu materiálů nelze opomenout nerezová lana. Ty mohou sloužit buď pro vypínání okrajů samotné membrány nebo také pro kotvení celé konstrukce do základu. Nejčastěji se užívají lana vinutá, jejichž pramen čítá 19, 37 nebo 61 drátů (označení 1x19, 1x37, 1x61). Důležitou odlišností od ocelových tyčí je menší modul pružnosti lan (hodnota v rozmezí 90-160 GPa), čímž je redukována jejich normálová tuhost.



Obrázek 31 – Schéma vinutého lana <sup>[21]</sup>

Důležitým detailem, který také ovlivňuje celkovou únosnost lan, jsou lanové koncovky. Existuje několik základních typů, podle využití v konstrukci. Mezi ty nejpoužívanější řadíme smyčky (s očnicí/bez očnice) a lisované vidličky.



Obrázek 32 – Koncovky lan – s okem, vidlička, oboustranná vidlička, vidlička s napínákem <sup>[22]</sup>



Obrázek 33 – Napojení lana k patce přes koncovku <sup>[23]</sup>

## 6 Rešerše membránových konstrukcí

### 6.1 Vysoká pec č.1 – AP Atelier



Obrázek 34 – Vysoká pec č.1 – foto <sup>[24]</sup>

(Vitkovice, ČR – 2012)

Jedná se o projekt revitalizace vysoké pece ve starém průmyslovém areálu na výrobu železa. Součástí obnovy byla i realizace pohyblivého membránového zastřešení pódia pro pořádání kulturních akcí. Výsledné půdorysné rozměry zastřešeného prostoru jsou

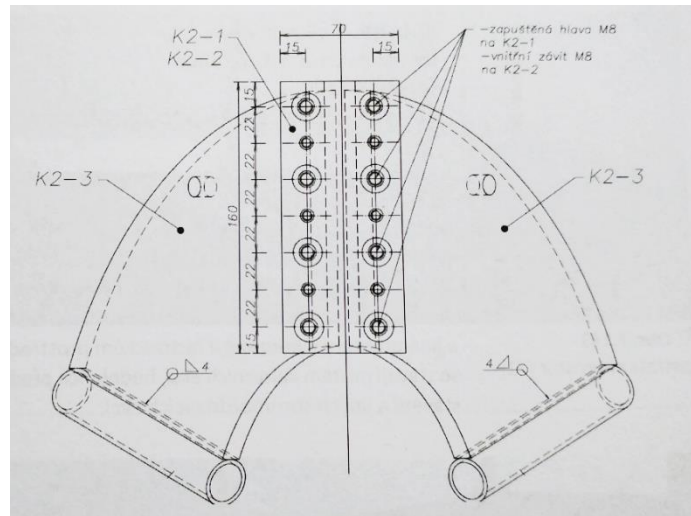
25x33m. Tvarově jde o lomenici o 9 polích s prostorovým zakřivením. Nosná pohyblivá konstrukce je tvořena trojbokými ocelovými vazníky. Tuhost v příčném směru je zajištěna 3 mezilehlými příhradovými vazníky. Jako materiál membrány byla zvolena kompozitní textilie Serge Ferrari Preconstraint 702. Vnitřní vlákna jsou z PES textilie s nánosem PVC a finální úpravou je zalakování. Celková tloušťka materiálu je pak pouhých 0,56mm. Tvarová stálost je zajišťována zavěšením horních hřebenů na nosná nerezová lana a vložením obloukových trubek do spodních úžlabí. Pro manuální předepnutí membrány jsou použity pákové mechanismy. Výsledkem je možnost zastřešení zhruba 800 m<sup>2</sup> plochy během pár minut.



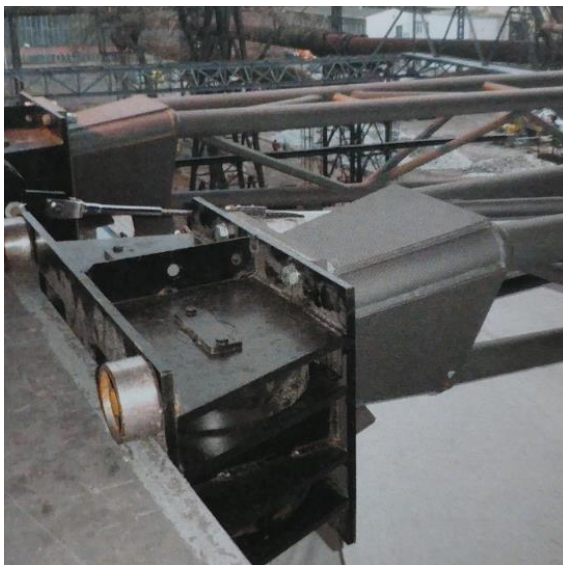
Obrázek 35 – Vysoká pec č.1 – foto – zaparkované zastřešení <sup>[25]</sup>



Obrázek 36 – Vysoká pec č.1 – foto – nosníky <sup>[25]</sup>



Obrázek 37 – Vysoká pec č.1 – detail platle <sup>[7]</sup>



Obrázek 38 – Vysoká pec č.1 – pojezd nosníků <sup>[7]</sup>



Obrázek 39 – Vysoká pec č.1 – pohled zespodu <sup>[25]</sup>

## 6.2 Olympijský stadion – GMP Architekten

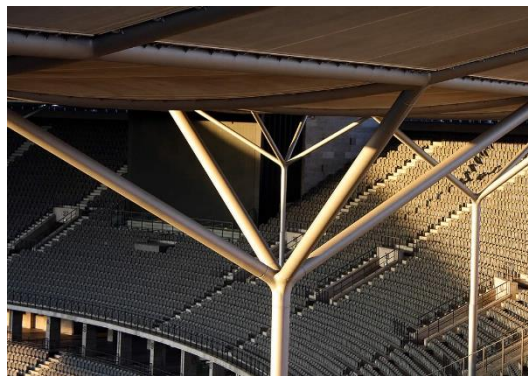


Obrázek 40 – Olympijský stadion – foto<sup>[26]</sup>

(Berlín, NĚM – 2004)

Jedním z nejznámějších zástupců membránového zastřešení sportovních stadionů je bezpochyby Olympijský stadion v Berlíně. Původní betonová konstrukce stadionu pochází z roku 1936. Membránové zastřešení bylo součástí rozsáhlé modernizace v letech 2000-

2004. Hlavní nosnou konstrukci tvoří 76 ocelových příhradových nosníků. Jejich konzolová část směrem do středu stadionu má na délku téměř 50 metrů. Horní pás je přímý, spodní pak zaoblený, oba jsou tvořeny trubkou kruhového průřezu o velikosti 323,9 mm. Maximální výšku nabývají vazníky v místě uložení vnitřních sloupů a je to přibližně 5,5m. Sloupy mají proměnný průřez v rozmezí 250–350 mm a v místě podepření nosníků se větví na 4 podpory. Membrána je zde provedena ve 2 vrstvách. Při spodní úrovni vazníků tvoří podhled a zároveň servisní lávku. Při horním povrchu tvoří krycí vrstvu ocelové konstrukce a je zde vypnuta přes příčné oblouky z trubek o vzezření 60-200 cm. Materiálem je PTFE membrána se skleněnými vlákny. Zastřešená plocha je o velikosti necelých 27000 m<sup>2</sup>.

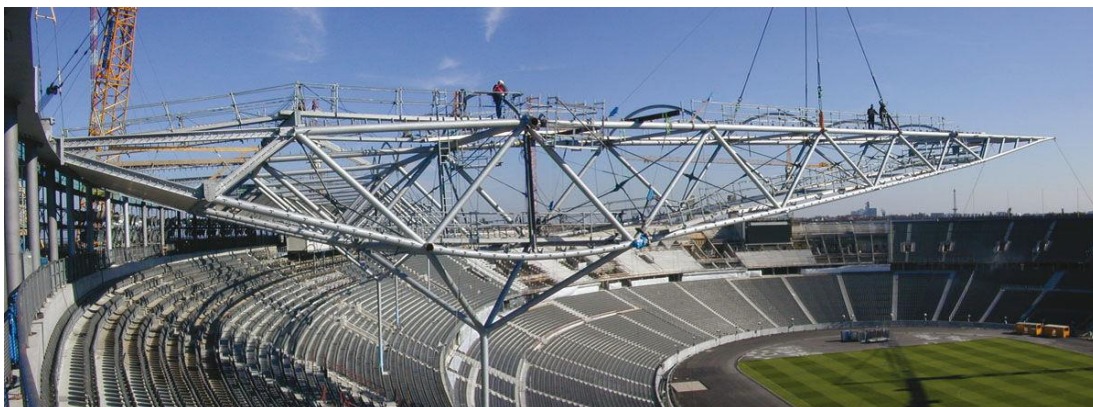


Obrázek 41 – Olympijský stadion – foto – podpory nosníků<sup>[27]</sup>



Obrázek 42 – Olympijský stadion – montážní spoj<sup>[28]</sup>





Obrázek 43 – Olympijský stadion – nosná ocelová konstrukce během výstavby<sup>[28]</sup>



Obrázek 44 – Olympijský stadion – výsledná podoba ocelové konstrukce<sup>[29]</sup>



Obrázek 45 – Olympijský stadion – foto – pohled do vnitřku ocelové konstrukce<sup>[27]</sup>

### 6.3 Lord's Cricket Ground – Populous



Obrázek 46 – Lord's Cricket Ground - foto<sup>[30]</sup>

(Londýn – VB, 2016)

Lord's Cricket Ground je londýnský kriketový klub a zároveň název jeho stadionu. V roce 2016 prošla hlavní tribuna (Warner Stand) kompletní rekonstrukcí. Nově realizovaná konstrukce je

velmi unikátní. Hlavní nosnou funkci plní 11 nosníků z lepeného dřeva. Jejich průřez dosahuje rozměrů až 900 x 350 mm, celková délka přesahuje 23 m a největší konzolová část měří více než 12 m. Na výrobu bylo použito dřevo z amerických bílých dubů. Nosníky jsou pak mezi sebou propojeny obloukovými trubkami kruhového průřezu. Přes trubky je následně předepnuta PTFE membrána. Vzhledem k blízké okolní zástavbě však byl použit velmi neobvyklý druh, tzv. Tensotherm. Jedná se v podstatě o 2 vrstvy PTFE vláken, mezi kterými je sevřena tepelně-izolační vrstva na bázi aerogelu. Zde byla celková tloušťka 1,6cm, která měla zajistit nejen tepelně-technické nároky, ale také akustické. Dle prováděcí firmy se jednalo o první použití tohoto materiálu v Evropě.



Obrázek 47 – Lord's Cricket Ground – pohled na vazníky<sup>[30]</sup>



Obrázek 48 – Lord's Cricket Ground – instalace vazníků<sup>[31]</sup>



Obrázek 49 – Lord's Cricket Ground – pohled na odkrytou konstrukci<sup>[32]</sup>



Obrázek 50 – Lord's Cricket Ground – ocelová konstrukce oblouků<sup>[33]</sup>



Obrázek 51 – Lord's Cricket Ground – instalace membrány<sup>[33]</sup>

## 6.4 Abenstein Arena – Kiefer & Teschner



Obrázek 52 – Abenstein Arena – foto <sup>[34]</sup>

(Gersthofen – NĚM, 2005)

Jedná se o membránové zastřešení tribuny na fotbalovém hřišti v Gersthofenu na jihu Německa. Zvoleno bylo jedno z typických tvarových řešení, konkrétně soustava pagod. Zastřešení pokrývá hlediště o délce 54 m. Konstrukce je dělena na 9 polí, přičemž každé pole obsahuje

jednu pagodu a je vymezeno příhradovými nosníky z trubek kruhového průřezu. Ničím nerušený výhled diváků je zaručen díky čtyřem masivním sloupům v zadní části tribuny, na kterých jsou vyvěšeny jednotlivé vrcholy. Jako materiál zde byla použita celkem standardní jednovrstvá PTFE membrána se skleněnými vlákny. Celá konstrukce se vyznačuje rozsáhlým lanový systémem, který zajišťuje přenos zatížení až do kotvení. Díky tvaru a absenci podpor v zorném úhlu diváků působí celé řešení velmi vzhledně.



Obrázek 53 – Abenstein Arena – foto <sup>[35]</sup>



Obrázek 54 – Abenstein Arena – foto <sup>[36]</sup>



Obrázek 55 – Abenstein Arena – foto - detail ukotvení lan do základů <sup>[37]</sup>



Obrázek 56 – Abenstein Arena – foto - hlavní sloup <sup>[35]</sup>

## 6.5 Elspe Grandstand – Koch Membranen GmbH



Obrázek 57 – Elspe Grandstand – foto <sup>[38]</sup>

(Elspe – NĚM, 2015)

Již od roku 1978 se v městečku Elspe nacházelo nad tribunou pro 4400 diváků membránové zastřešení. To bylo v roce 2015 lehce poupraveno a textilní membrána vyměněna za novou. Zajímavým faktem je, že membrána nebyla měněna z důvodu své

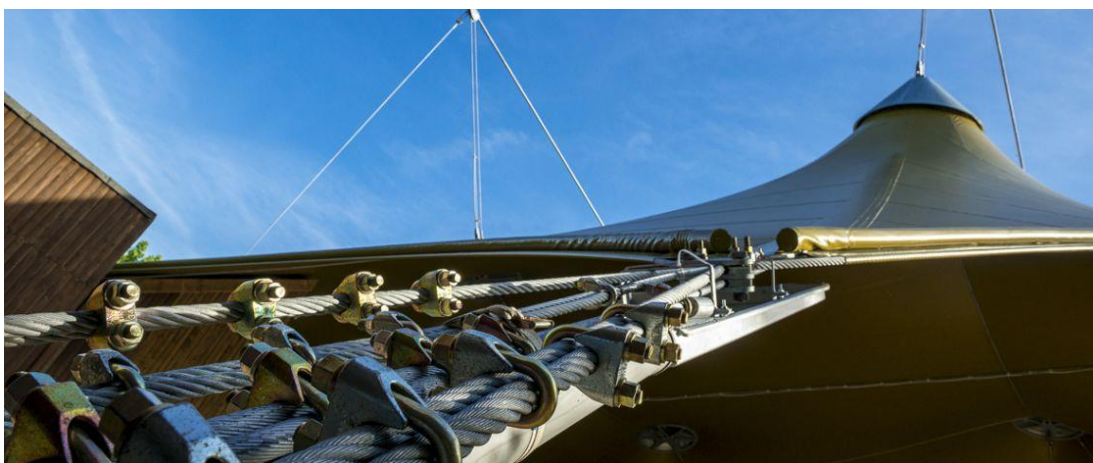
nefunkčnosti, ale pouze z pohledových důvodů, kdy organizátoři každoročního festivalu chtěli dodat místu nový impuls díky výrazné barvě nového zastřešení. Konstrukce fungovala stále bezchybně i po 37 letech od výstavby, a to i přesto, že se nachází v relativně náročných klimatických podmínkách (oblast s výrazným zatížením sněhem). Zastřešení pokrývá plochu o rozměrech 77 x 40 m a řadí se tak vůbec k největším svého druhu v Evropě. Nosnou funkci zde zajišťují 2 dvojice mohutných sloupů na okrajích hlediště. Sloupy jsou kruhového průřezu s náběhem. V nejsilnějším místě dosahuje průměr sloupu 1,5 m. Tyto profily tvoří podporu pro ukotvení 2 lan, každé o tloušťce 72 mm. Ty zajišťují vynášení celkově devíti vrcholů vzniklých pagod. Na zadní straně je pak membrána ještě ukotvena k betonové stěně na 8 místech. Materiálově se nově jedná o Valmex FR Mehatop F Type V, dosahující pevnosti v tahu až 1000daN/5cm. Nosná vlákna jsou tvořena PES a vnější ochrannou vrstvou je povlak z PVC.



Obrázek 58 – Elspe Grandstand – foto shora <sup>[38]</sup>



*Obrázek 59 – Elspe Grandstand – foto zepředu <sup>[38]</sup>*



*Obrázek 60 – Elspe Grandstand – foto – detail kotevnicích lan <sup>[38]</sup>*



*Obrázek 61 – Elspe Grandstand – foto – detail spoje kotevnicích lan s okrajovými lany membrány <sup>[38]</sup>*

## 7 Varianty konstrukčních systémů

V následující části budou prezentovány jednotlivé konstrukční a tvarové varianty. Společným parametrem návrhu bude dodržení umístění objektu, konkrétně tedy okrajová část města Žďár nad Sázavou. Tato oblast se vyznačuje celkem náročnými povětrnostními podmínkami. Na sněhové mapě spadá oblast až do IV. kategorie, pro kterou platí charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi o velikosti  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Na větrné mapě se jedná o větrnou oblast III. kategorie s výchozí základní rychlostí větru o velikosti  $27,5 \text{ m/s}$ . Vzhledem k tomu, že u konstrukce zastřešení tribuny jsou právě tato dvě zatížení rozhodující (a v podstatě také jediná, se kterými se běžně uvažuje), je těmito poměrně vysokými hodnotami návrh velmi ovlivněn.

Původní představa prezentovaná v architektonické studii, která mi sloužila jako podklad, předpokládala rozestupy mezi hlavními nosnými vazbami o velikosti 12 m. Domnívám se, že vezmeme-li v úvahu zmíněné náročné přírodní podmínky, bylo by daleko vhodnější a efektivnější rozpon mezi vazbami zmenšit. Hlavních vazeb by bylo více, na straně druhé by však byly o něco subtilnější a na pohled více odpovídající vzdušné a lehké podstatě membránových konstrukcí. Přesto jsem se ve své práci pokusil zachovat původně plánovaný rozpon 12 m (s výjimkou první varianty).

Navržení jednotlivých variant bude provedeno v rozsahu předběžného návrhu konstrukce. Základním výstupem by měl být přesně definovaný tvar membránové konstrukce a dimenze prvků hlavní vazby podpůrné ocelové konstrukce. V tomto předběžném výpočtu nebudou řešeny detaily. Hlavním cílem je navrhnout takovou konstrukci, která odolá převažujícím zatížením (tlaku/sání) a zároveň bude zajištěna funkce odvedení vody ze střechy pryč.

Při návrhu hlavní vazby hraje velkou roli únosnost tlačných prvků při vzpěru, především pak u sloupů. Vzhledem ke složitosti konstrukce již nebylo možné zařadit jednotlivé pruty do klasických Eulerových případů a jednoduše určit vzpěrnou délku. Proto jsem využil možnost stabilitního výpočtu přímo v programu RFEM. Výpočet byl proveden pro kombinaci, při které vznikala největší tlak. Výsledkem stabilitního výpočtu jsou vlastní tvary vybočení konstrukce a k nim příslušný součinitel kritického zatížení. Software zároveň dopočítává i vzpěrnou délku pro jednotlivé pruty. Tu jsem poté využil do svého předběžného návrhu.

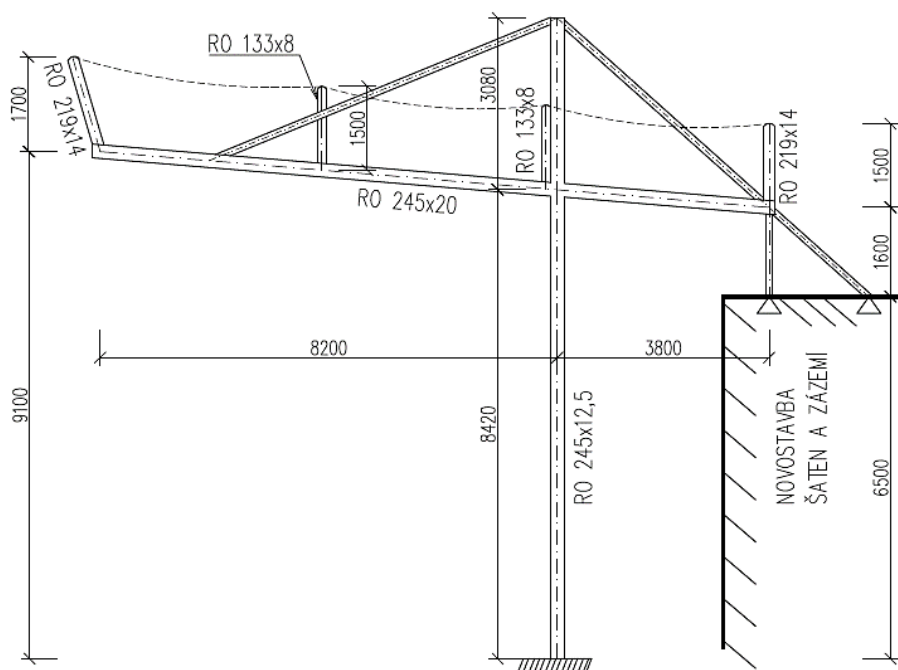


Při návrhu jednotlivých prvků byl použit bezpečný konzervativní postup, který kombinaci namáhání posuzuje jako lineární sumaci jednotlivých složek využití průřezu. Z tohoto důvodu jsem proto mnohdy přistoupil na celkové využití průřezu až kolem 90 %. Při podrobnějším výpočtu bychom dostali hodnoty nižší.

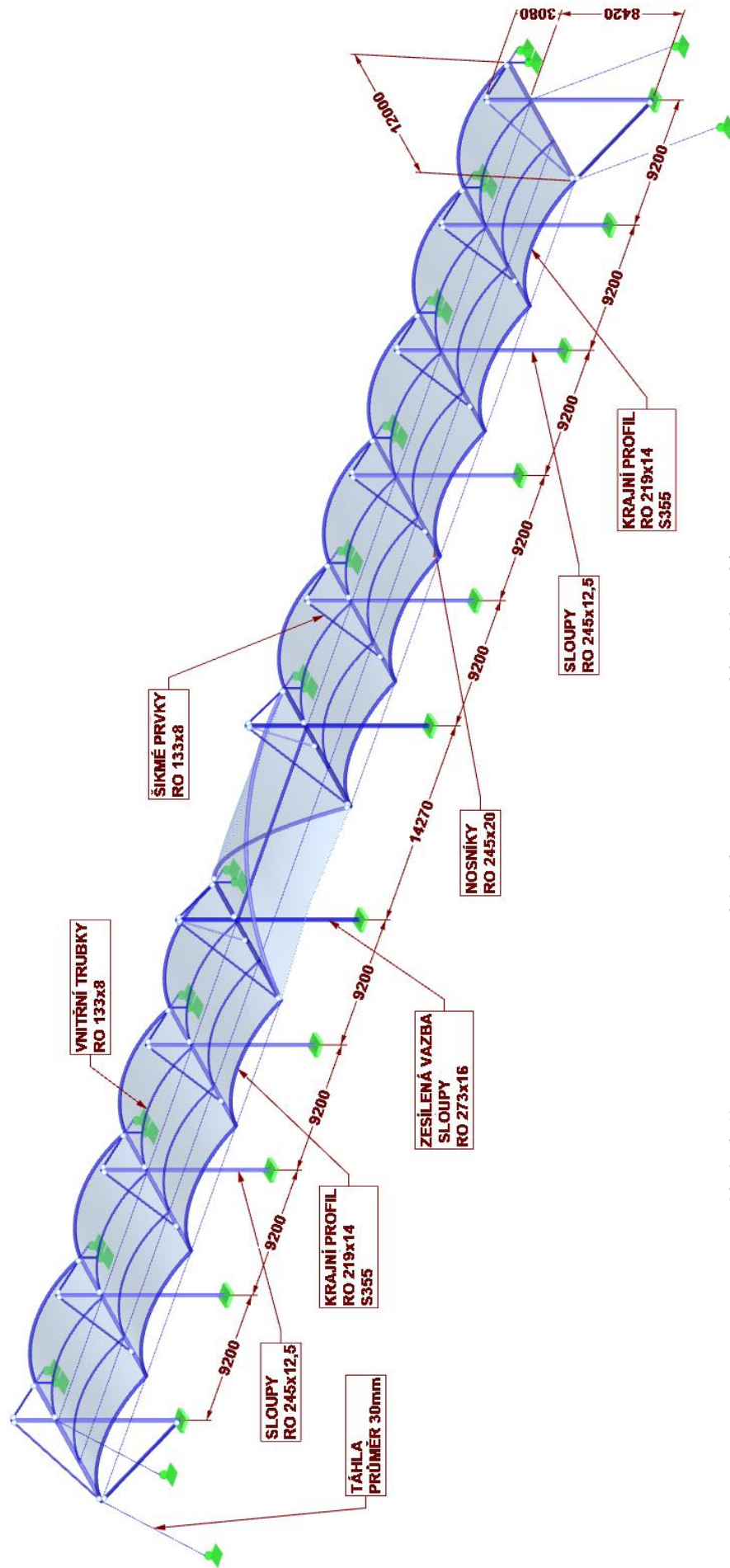
## 7.1 Varianta typu sedlo (vypnutí membrány přes oblouky)

### 7.1.1 Popis

Hlavní typická vazba je tvořena sloupem z trubky RO 245x12,5 mm a nosníkem profilu RO 245x20 mm. V části nad nosníkem je vazba doplněna šikmými vzpěrami na obě strany. Ty zajišťují přenos zatížení mezi nosníkem a sloupem. Vazby jsou od sebe vzdáleny 9,2 m a jsou propojené čtyřmi obloukovými trubkami. Obloukové profily tvořící hranu krajních polí musí být mnohem větších dimenzí z toho důvodu, že jsou namáhány membránovým tahem pouze z jedné strany. To znamená vznik velkých momentů v místě napojení na nosník a koncentraci napětí. Zároveň je to také důvod, proč jsou tyto profily navrženy z oceli S355. Ocelová konstrukce je pak doplněna táhly pod oblouky ukotvenými v místě napojení obloukových trubek na nosníky. To přispívá k celkové tuhosti konstrukce a také pomáhá redukci deformací. Samotná membrána je pak liniově ukotvena k hornímu pásu nosníku a v druhém směru napínána přes jednotlivé kruhové trubky. Jedná se o velmi časté tvarové řešení používané na mnoha stadionech.



Obrázek 62 – Varianta sedlo – schéma hlavní typické vazby



Obrázek 63 – Varianta sedlo – schéma konstrukce s popisy hlavních prvků

Největší otázkou zde byla volba velikosti jednoho pole membrány. V praxi se velmi často používá poměr stran cca od 1:1 až k 1:0,6. V mém návrhu se nakonec vyskytnou pole v poměru stran zhruba 1:0,45. Vzhledem ke snaze použít co nejméně hlavních vazeb, byl zvolen rozpon 9,2 m. Nabízelo se tedy rozdělení vzniklého prostoru pouze jedním středovým obloukem a vznikla by pole o velikosti 9,2 x 6 m. S přihlédnutím k velkému zatížení tlakem sněhu však bylo nakonec zvoleno zmenšení polí na výslednou hodnotu 9,2 x 4 m, což výrazně pomohlo při redukci deformací samotné membrány.

Mezi výhody bych určitě zařadil uzavřenost konstrukčního systému z pohledu přenosu zatížení, kdy do přiléhající budovy jsou přenášeny v podstatě pouze tahové/tlakové síly ve svislém směru v místech hlavních vazeb. Dobrá je v tomto případě i tvarová stabilita, která je dána především ukotvením membrány k tuhému prvku ze všech stran. Mezi negativa lze zařadit provedení tuhého spojení mezi krajní obloukovou trubkou a nosníkem. Nepochybně by se jednalo o zdroj komplikací, především při samotné realizaci. Dochází zde k velké koncentraci napětí, tudíž by v daném místě pravděpodobně muselo dojít k zesílení konstrukce.

## 7.1.2 Předběžný návrh

### 7.1.2.1 Výpočet zatížení

#### Zatížení sněhem

- Návrhová lokalita: Žďár nad Sázavou (kraj Vysočina)
- Sněhová oblast IV.:  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- Výška oblouku:  $h = 1,5 \text{ m}$
- Rozpětí oblouku:  $b = 9,2 \text{ m}$
- Protože se jedná o přístřešek válcového tvaru, dle normy by bylo nutné uvážit více stavů zatížení sněhem – nenavátý a 2 případy navátého sněhu
- Pro účely předběžného návrhu je však zatížení sněhem omezeno pouze na variantu celoplošného zatížení – nenavátý sníh
- Tvarový součinitel – celoplošné zatížení:  $\mu = 0,8$
- Typ krajiny – normální:  $C_e = 1,0$
- Teplotní součinitel:  $C_t = 1,0$
- Zatížení sněhem:  $s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0$

$$\underline{s = 1,60 \text{ kN/m}^2}$$

### Zatížení větrem

- Větrná oblast III.:  $v_{ref} = 27,5 \text{ m/s}$
- Referenční střední tlak větru:  $q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 473 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
- Kategorie terénu III.: oblast pravidelně pokrytá vegetací, budovami nebo překážkami
- Referenční výška:  $h = 10 \text{ m}$
- Součinitel expozice:  $c_e(z) = 1,7 \rightarrow z \text{ grafu } \check{C}SN \text{ EN}$
- Výsledný tlak větru:  $w(z) = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{p,net} = 0,473 \cdot 1,7 \cdot c_{p,net}$   
$$\underline{w(z) = 0,80 \cdot c_{p,net}}$$

Pro účely předběžného návrhu jsem se zaměřil především na deformaci membrány, proto zde bylo zjednodušeně uvažováno pouze celoplošné zatížení. Jeho velikost byla vypočítána dle normy pro sedlové přístřešky. Uvažován byl horší směr, tedy ve smyslu uzavřeného přístřešku (součinitel plnosti byl uvažován hodnotou 1,0). Součinitel  $c_{p,net}$  byl zprůměrován přes poměry jednotlivých ploch.

- Součinitel plnosti:  $\varphi = 1,0$
- Oblasti a příslušný součinitel:
  - A – poměr plochy 48% -  $c_{p,net} = -1,3 / +0,9$
  - B – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -2,2 / +1,9$
  - C – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -1,6 / +1,4$
  - D – poměr plochy 16% -  $c_{p,net} = -2,1 / +0,4$
- Výsledný průměrný součinitel rozdílů tlaků:  $c_{p,net} = -1,6 / +1,1$
- Celoplošné průměrné sání větru:  
$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 * (-1,6) = \underline{-1,3 \text{ kN/m}^2}$$
- Celoplošný průměrný tlak větru:  
$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 * (+1,1) = \underline{+0,9 \text{ kN/m}^2}$$

### Kombinace zatížení

- Byly uvažovány pouze dvě základní kombinace pro MSÚ (považovány za nejhorší):
- $KZ_1 = 1,35 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,5 \cdot Q_{v,tlak}$
- $KZ_2 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_{v,sání}$

- Podobným způsobem byly vytvořeny i kombinace pro MSP:
- $KZ_3 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,0 \cdot Q_{v,tlak}$
- $KZ_4 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_{v,sání}$

### 7.1.2.2 Materiály

- Membrána: Valmex Mehatop F1 FR1400 Type IV.
  - hmotnost: 1350 g/m<sup>2</sup>
  - tloušťka: 1,1 mm
  - pevnost v tahu: 800/700 daN/5cm
  - nosná vlákna: PES; krycí vrstva: PVC
  - počáteční předepnutí: 1kN/m – oba směry
- Ocel: S235, krajní oblouky S355
- Lana: Pfeifer PV – spirální lana, E = 160GPa
- Táhla: DETAN S – ocel S520

### 7.1.2.3 Návrh sloupu

#### Tlak:

$$N_{max} = 700 \text{ kN (tlak)}$$

#### NÁVRH: RO 245 x 12,5 mm (ocel S235)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{8500}{82,3} = 109,6$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{109,6}{93,9} = 1,17$$

$$z \text{ tabulky: } \chi = 0,524$$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,524 \cdot 9130 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1094,6 \text{ kN} \geq N_{max} = 700 \text{ kN}$$

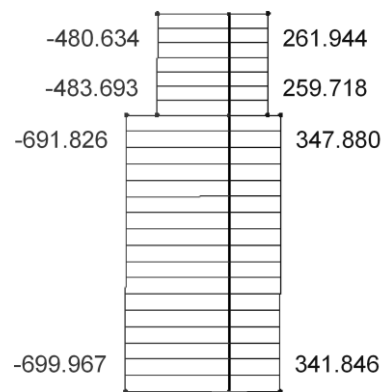
VYHOVUJE

#### Tah: $N_{max} = 342 \text{ kN (tah)}$

$$N_{Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 9130 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 2146 \text{ kN} \geq N_{max} = 342 \text{ kN}$$

VYHOVUJE



Obrázek 64 – Vykreslení N (MSÚ)

**Ohyb:**

$$M_{y,max} = 16,6 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 11,8 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 676000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 16,6 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 11,8 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

**Posouzení na smyk:**

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1400 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

$$V_{pl,Rd} = 190 \text{ kN} \geq V_{ed} = 65,5 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

**Kombinace namáhání:**

$$N_{max} = 700 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 16,6 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 11,8 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{700}{1094,6} + \frac{16,6}{158,9} + \frac{11,8}{158,9} \leq 1$$

$$0,82 \leq 1$$

VYHOVUJE

**7.1.2.4 Návrh nosníku****Tlak:**

$$N_{max} = 535 \text{ kN (tlak)}$$

**NÁVRH: RO 245 x 20,0 mm (ocel S235)**

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{6050}{79,9} = 75,7$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{75,7}{93,9} = 0,80$$

z tabulky:  $\chi = 0,796$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,796 \cdot 14140 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 2645 \text{ kN} \geq N_{max} = 535 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

**Ohyb:**

$$M_{y,max} = 147 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 23 \text{ kNm}$$

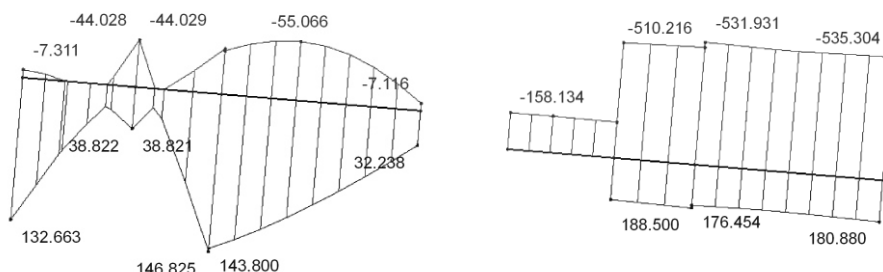
$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 1020000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 239,7 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 147 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 239,7 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 23 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE



Obrázek 65 – Vykreslení vlevo  $M_y$  a vpravo  $N$  na nosníku (MSÚ)

**Kombinace namáhání:**

$$N_{max} = 532 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 147 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 23 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{532}{2645} + \frac{147}{239,7} + \frac{23}{239,7} \leq 1$$

$$0,90 \leq 1$$

VYHOVUJE

**Posouzení na smyk:**

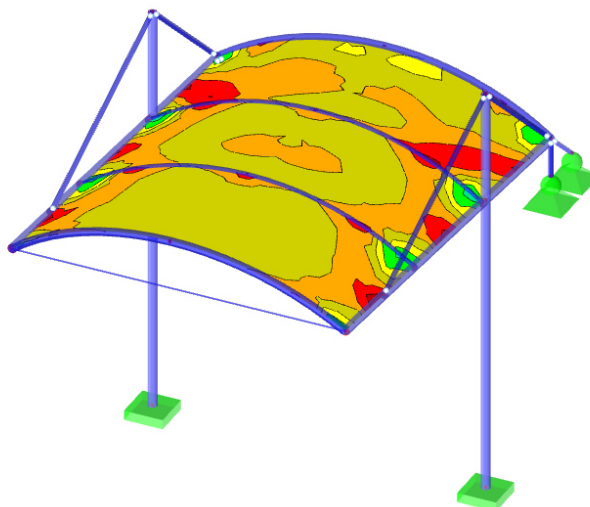
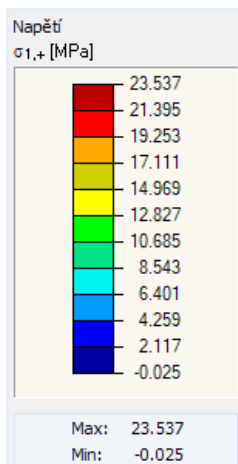
$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{9000 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

$$V_{pl,Rd} = 1221 \text{ kN} \geq V_{ed} = 92,1 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

### 7.1.2.5 Posouzení membrány



Obrázek 66 – Vykreslení hlavního napětí σ<sub>1</sub> (MSÚ)

$$\sigma_{Rk} = \frac{\sigma_m}{50 \cdot t} = \frac{7000}{50 \cdot 1,1} = 127,3 \text{ MPa}$$

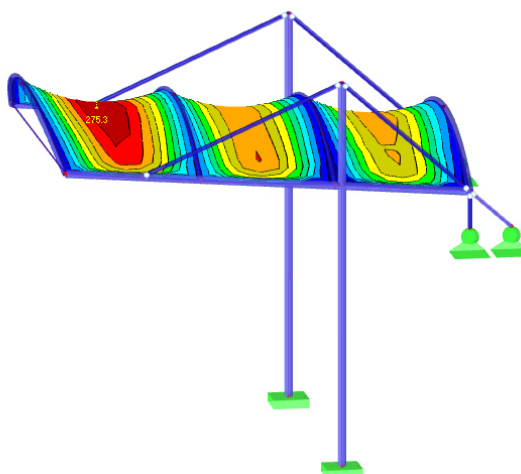
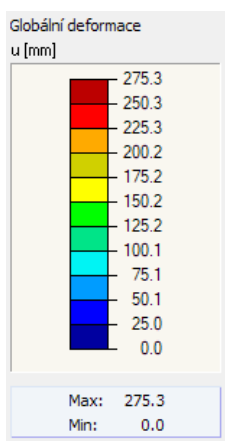
$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{Rk}}{\gamma_m} = \frac{127,3}{2,5} = 50,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd} = 50,9 \text{ MPa} \geq \sigma_1 = 23,6 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

- Napětí v druhém směru (σ<sub>2</sub>) bylo menší, tudíž není třeba posuzovat

### 7.1.2.6 Posouzení MSP



Obrázek 67 – Vykreslení deformací na membráně typického pole (MSP)

- Deformace membrány dosahuje hodnoty 275 mm. I při této hodnotě však zůstává zachována její funkce odvodu vody, tudíž lze hodnotu uvažovat jako přijatelnou.

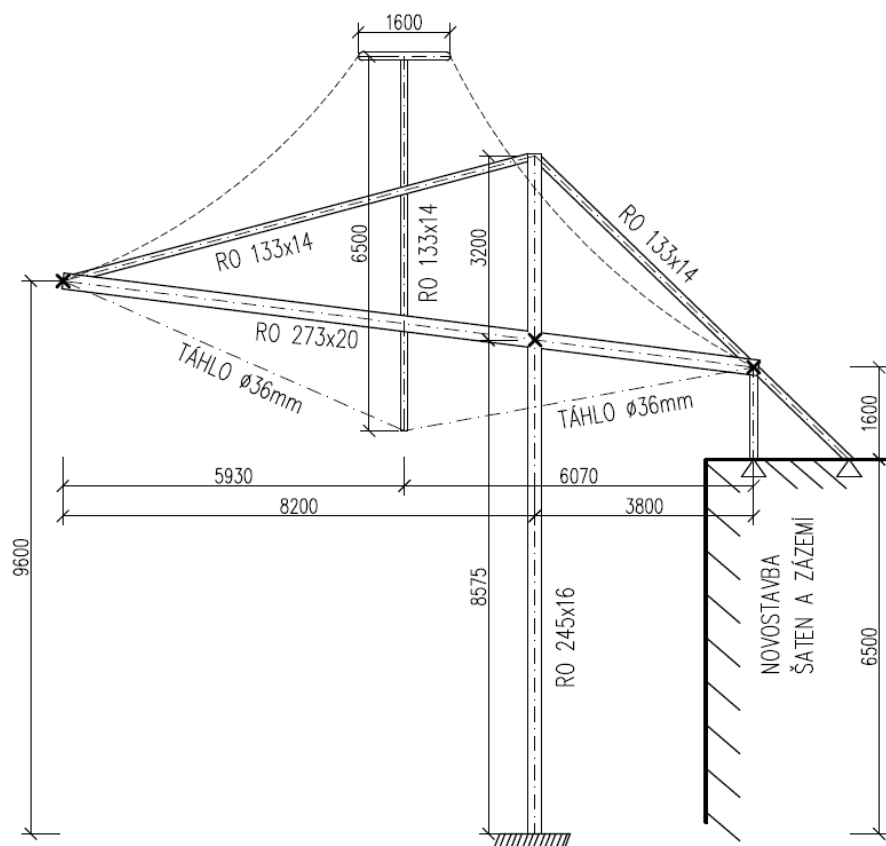


## 7.2 Varianta typu pagoda

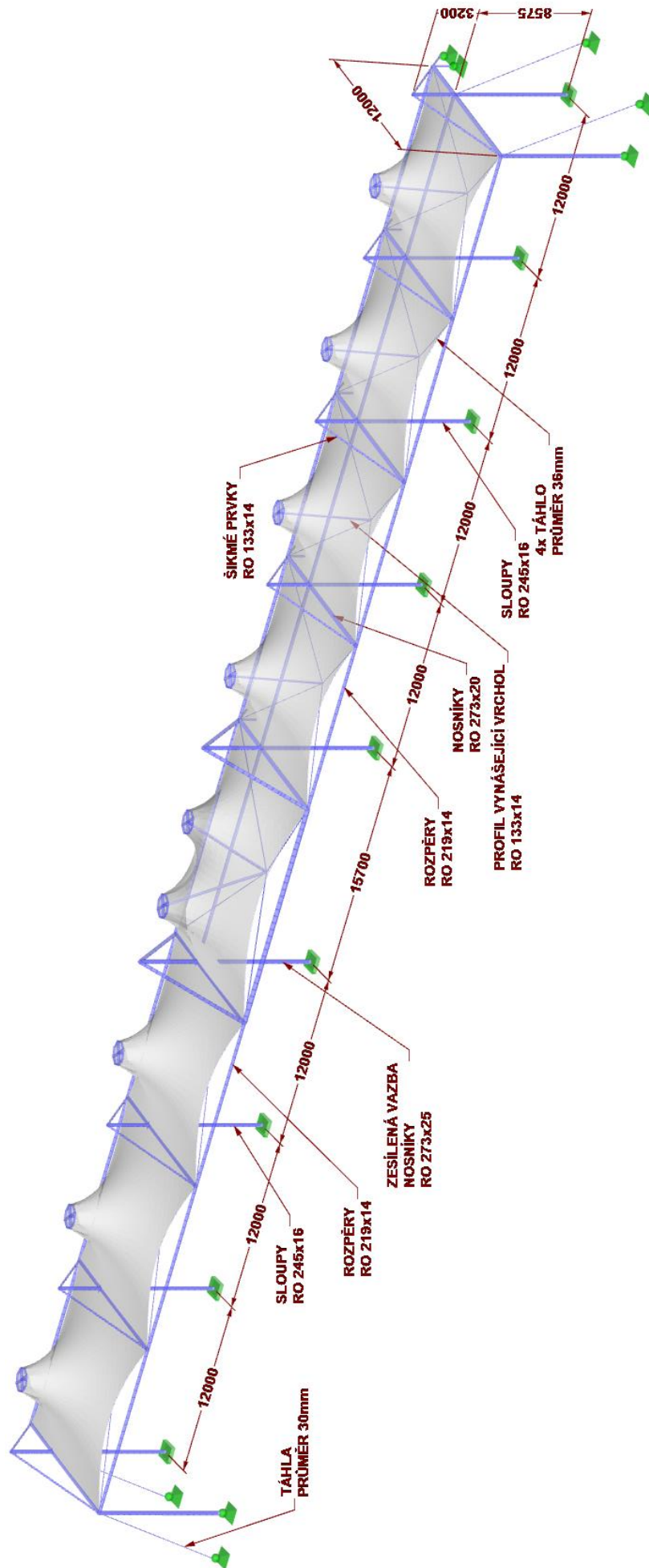
### 7.2.1 Popis

Hlavní vazbu tvoří sloup kruhového průřezu RO 245x16 mm a nosník RO 273x20 mm. V horní části nad nosníkem se opět nachází dvojice vzpěr, doplňující přenos zatížení v hlavní vazbě. Samotný pagodový tvar membránové plochy je vytvořen vynesemím vrcholu pomocí pevného prvku uprostřed pagody, jehož polohu zajišťují 4 táhla. Tento systém táhel a pevného prvku nám umožňuje vynést vrchol i v místě, kde není možné umístit klasický sloupový prvek ukotvený do základů. Díky tomu se podařilo použít tvar pagody, a přesto žádným konstrukčním prvkem nenarušit výhled diváků z hlediště.

Rozpětí vazeb zde bylo zvoleno 12 m, díky čemuž vznikla čtvercová pole, která jsou pro tento tvar membránových konstrukcí optimální. S přihlédnutím k vzniklé ploše a velkým zatížením klimatickými podmínkami bylo i zde nutné konzolové nosníky ještě pomocí kyvné stojky ukotvit do přilehlé budovy. Pomáhá to k lepšímu přerozdělení sil, především při sání větru zespona zastřešení. Do budovy jsou vnášeny převážně tahové a tlakové síly ve svislém směru.



Obrázek 68 – Varianta pagoda – schéma hlavní typické vazby



Obrázek 69 – Varianta pagoda – schéma konstrukce s popisy hlavních prvků

Atypické pole uprostřed mezi tribunami o velikosti 15,7 x 12 m bylo vyřešeno v podstatě analogickým způsobem. Vzhledem k velikosti pole jsou zde však vrcholy dva, které jsou podepřeny šikmým tuhým prvkem se společným bodem ukotvení k táhlům. Pravdou je to, že obdélníkový půdorys není pro pagodu ideálním tvarem, což se ukázalo i v tomto případě. Nalezení funkčního tvaru v tomto poli bylo velmi obtížné. Výsledná dvojice vrcholů však funguje bezpečně a osobně ji považuji i za vzhledné řešení, zapadající do celého konceptu varianty.

Mezi výrazná pozitiva této varianty bych zařadil efektivní přenos zatížení pomocí soustavy táhlo-tlačený prvek, značnou křivost zajišťující dostatečnou stabilitu tvaru a v neposlední řadě celkový design. Dle mého názoru se jedná o pohledově velmi pěkné a staticky efektivní řešení. Při hledání negativ je určitě nezbytné zmínit velkou náročnost, ať už při výrobě membrány (kompenzace řezů na pagodě), tak i při samotné realizaci, kdy vyzvedávání vrcholu a jeho fixace při vnášení předpětí do konstrukce by bylo nepochybně mnohem náročnější než u ostatních variant. Tato skutečnost by se pravděpodobně promítla i v rozpočtu. Negativem tohoto řešení je také v podstatě veškerý přenos zatížení pomocí normálových sil v nosníku. Vzhledem k velké délce nosníků a zatížením obrovským tlakem (cca 1200 kN) bylo nutné použít již velmi mohutné a těžké profily.

## 7.2.2 Předběžný návrh

### 7.2.2.1 Výpočet zatížení

#### Zatížení sněhem

- Geografické údaje - viz 7.1.2.1
- Sněhová oblast IV.:  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- Tvar pagody byl přirovnán k sedlové střeše
- Převýšení zastřešení od nosníku:  $h = 3,9 - 5,4 \text{ m}$
- Průměrné převýšení:  $h_p = 4,65 \text{ m}$
- Průměrný sklon:  $\alpha = 38^\circ$
- Tvaroví součinitelé:  $\mu_1 = 0,8 \cdot \frac{60-\alpha}{30} = 0,6$  ;  $\mu_2 = 1,6$
- V normě se nachází dva stavy zatížení sněhem na vícelodní sedlovou střechu. Pro účely předběžného návrhu bylo uvažováno pouze s variantou celoplošného zatížení. Jelikož je pravdou, že v jednom směru by zde k navátí sněhu

docházelo, hodnotu tvarového součinitele pro celoplošné zatížení jsem tedy o 20 % navýšil.

- Výsledná hodnota zatížení sněhem:

$$s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \cdot 1,2 = 0,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0 \cdot 1,2$$

$$\underline{s = 1,4 \text{ kN/m}^2}$$

### Zatížení větrem

- Základní údaje stejné jako v předchozí variantě – viz 7.1.2.1
- Výsledný tlak větru:  $w(z) = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{p,net} = 0,473 \cdot 1,7 \cdot c_{p,net}$

$$\underline{w(z) = 0,80 \cdot c_{p,net}}$$

- Opět bylo pro zjednodušení modelu uvažováno celoplošné zatížení membrány, a to především kvůli tomu, že deformace membrány je důležitým ukazatelem její funkčnosti. Zatížení bylo přirovnáno v normě k sedlovému přístřešku. Součinitel  $c_{p,net}$  byl zprůměrován přes poměry jednotlivých ploch.

- Oblasti a příslušný součinitel:

A – poměr plochy 48% -  $c_{p,net} = -1,4 / +1,3$

B – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -1,8 / +1,9$

C – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -1,4 / +1,6$

D – poměr plochy 16% -  $c_{p,net} = -2,0 / +0,7$

- Výsledný průměrný součinitel rozdílů tlaků:  $c_{p,net} = -1,6 / +1,4$
- Celoplošné průměrné sání větru:

$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 * (-1,6) = \underline{-1,3 \text{ kN/m}^2}$$

- Celoplošný průměrný tlak větru:

$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 * (+1,4) = \underline{+1,1 \text{ kN/m}^2}$$

### Kombinace zatížení

- Kombinace byly vytvořeny shodným způsobem jako v předešlé variantě

- MSÚ:

- $KZ_1 = 1,35 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,5 \cdot Q_{v,tlak}$

- $KZ_2 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_{v,sání}$

- MSP:

- $KZ_3 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,0 \cdot Q_{v,tlak}$

- $KZ_4 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_{v,sání}$

### 7.2.2.2 Materiály

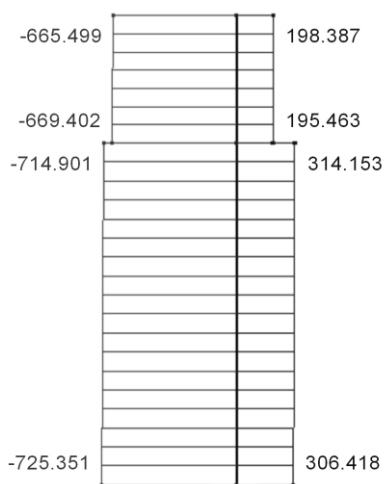
- Membrána: Valmex Mehatop F1 FR1400 Type IV
  - hmotnost: 1350g/m<sup>2</sup>, tloušťka: 1,1 mm
  - pevnost v tahu: 800/700 daN/5cm
  - nosná vlákna: PES ; krycí vrstva: PVC
  - počáteční předepnutí: 1kN/m – oba směry
- Ocel: S235
- Lana: Pfeifer PV – spirální lana, E = 160GPa
- Táhla: DETAN S – ocel S520

### 7.2.2.3 Návrh sloupu

#### Tlak:

$$N_{max} = 725 \text{ kN (tlak)}$$

#### NÁVRH: RO 245 x 16,0 mm (ocel S235)



Obrázek 70 – Vykreslení N (MSÚ)

#### Tah:

$$N_{max} = 314,2 \text{ kN (tah)}$$

$$N_{Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 11510 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 2705 \text{ kN} \geq N_{max} = 292 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

#### Ohyb:

$$M_{y,max} = 21,8 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 37,7 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 840000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{8150}{81,2} = 100,4$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{100,4}{93,9} = 1,08$$

z tabulky:  $\chi = 0,589$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,589 \cdot 11510 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1593,2 \text{ kN} \geq N_{max} = 725 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 21,8 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 37,7 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

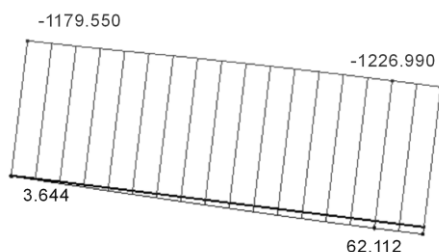
### Kombinace namáhání:

$$N_{max} = 725 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 21,8 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 37,7 \text{ kNm}$$

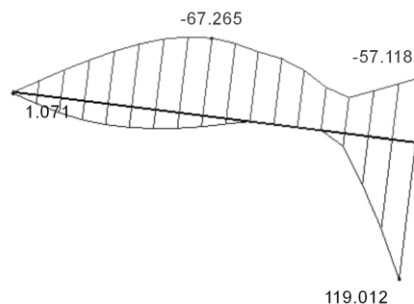
$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{725}{1593,2} + \frac{21,8}{197,4} + \frac{37,7}{197,4} \leq 1$$

$$0,76 \leq 1 \quad \text{VYHOVUJE}$$

### 7.2.2.4 Návrh nosníku



Obrázek 71 – Vykreslení N (MSÚ)



Obrázek 72 – Vykreslení My (MSÚ)

### Tlak:

$$N_{max} = 1227 \text{ kN (tlak)}$$

### NÁVRH: RO 273 x 20,0 mm (ocel S235)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{6900}{89,7} = 76,9$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{75,8}{93,9} = 0,82$$

$$\text{z tabulky: } \chi = 0,784$$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,784 \cdot 15900 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 2930 \text{ kN} \geq N_{max} = 1227 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

### Ohyb:

$$M_{y,max} = 119 \text{ kNm} ; M_{z,max} - \text{zanedbatelné}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 1280000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 300,8 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 119 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

### Kombinace namáhání:

$$N_{max} = 1227 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 119 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{1227}{2930} + \frac{119}{300,8} \leq 1$$

$$0,82 \leq 1$$

VYHOVUJE

### Posouzení na smyk:

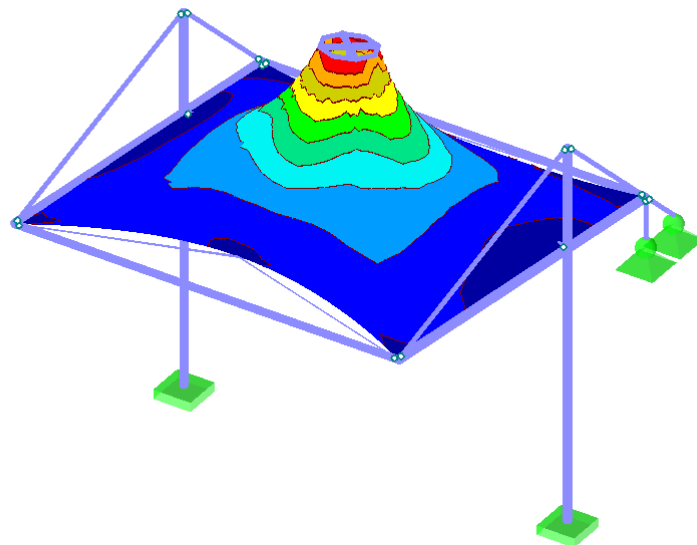
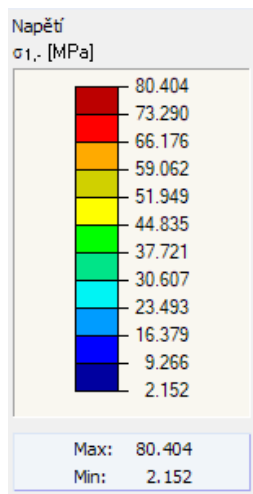
$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{10120 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

$$V_{pl,Rd} = 1373,0 \text{ kN} \geq V_{ed} = 89,1 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

### 7.2.2.5 Návrh membrány



Obrázek 73 – Vykreslení hlavního napětí  $\sigma_1$  na membráně (MSÚ)

$$\sigma_{Rk} = \frac{\sigma_m}{50 \cdot t} = \frac{7000}{50 \cdot 1,1} = 127,3 \text{ MPa}$$

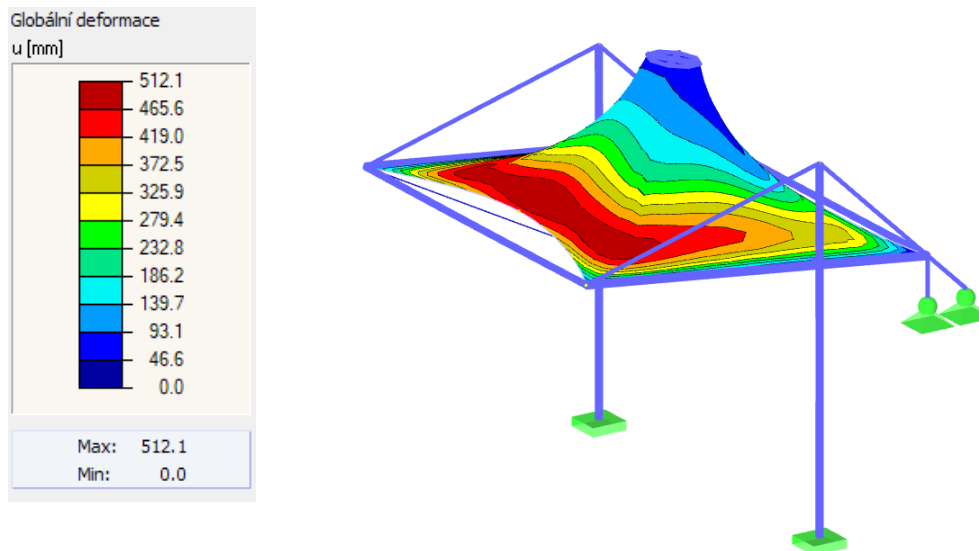
$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{Rk}}{\gamma_m} = \frac{127,3}{2,5} = 50,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd} = 50,9 \text{ MPa} \geq \sigma_1 = 45 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

- Extrémní napětí ve vrcholu pagody bude pokryto pomocí zdvojení vrstvy materiálu zhruba v horním metru a půl od vrcholu.
- Napětí ve druhém směru ( $\sigma_2$ ) bylo menší, tudíž není třeba posuzovat

#### 7.2.2.6 Posouzení MSP



Obrázek 74 – Vykreslení deformací na membráně typického pole (MSP)

- Maximální deformace membrány byla přibližně 512 mm. Její funkce odvodu vody při tom byla zachována, tudíž stav lze vyhodnotit jako vyhovující.

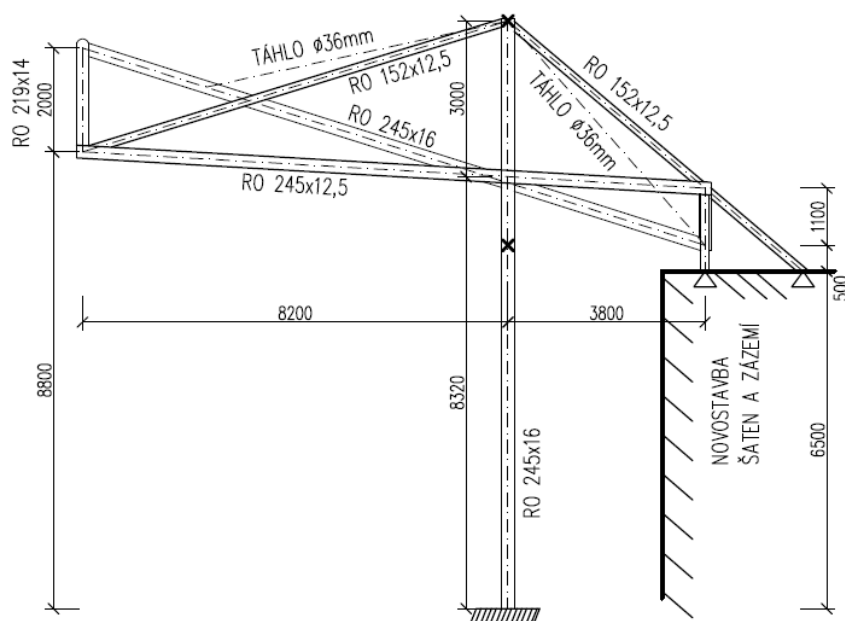
### 7.3 Varianta „hypar“

#### 7.3.1 Popis

Jedná se o variantu, ve které jsem se snažil co možná nejvíce dodržet tvarové řešení ze studie. Po vytvoření modelu na základě podkladů jsem došel k závěru, že pro dané rozpětí 12 m a pro konkrétní danou lokalitu je tato varianta nepřijatelná. Při zatížení sněhem a tlakem větru docházelo ve střední části membránového pole k tak velké deformaci, že se vytvářela místa, odkud již neodtékala voda. To bylo způsobeno především malou křivostí plochy ve střední třetině pole. Vrcholy (horní i spodní) byly vynášeny pouze lokálně (bodově) a jelikož po stranách je membrána liniově upnuta k nosníku, nedošlo k dostatečnému zakřivení.

Pokusil jsem se tedy upravit variantu tak, aby konstrukce membrány získala větší křivost, tedy více kopírovala tvar klasického hyperbolického paraboloidu a zároveň bylo dodrženo rozpětí 12 m. Toho se mi podařilo dosáhnout tuhým prvkem vloženým do poloviny rozpětí, který je na obou stranách vynášen šikmými vzpěrami.

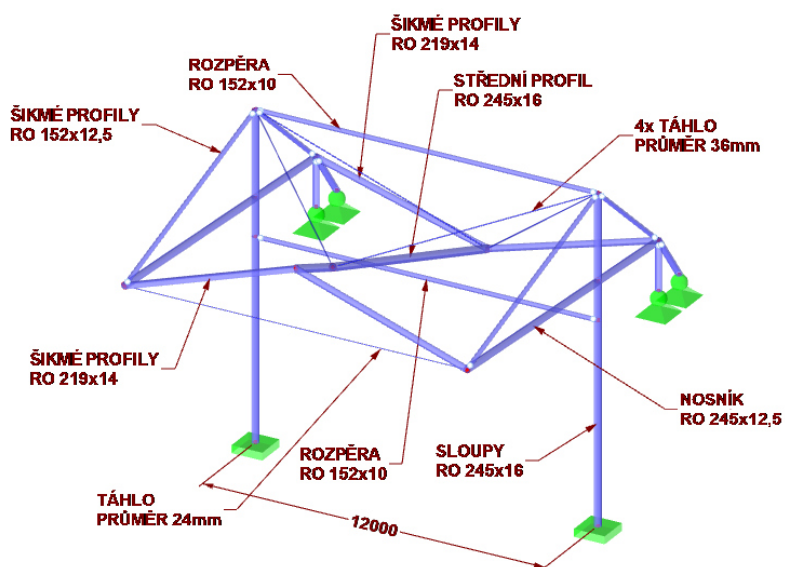




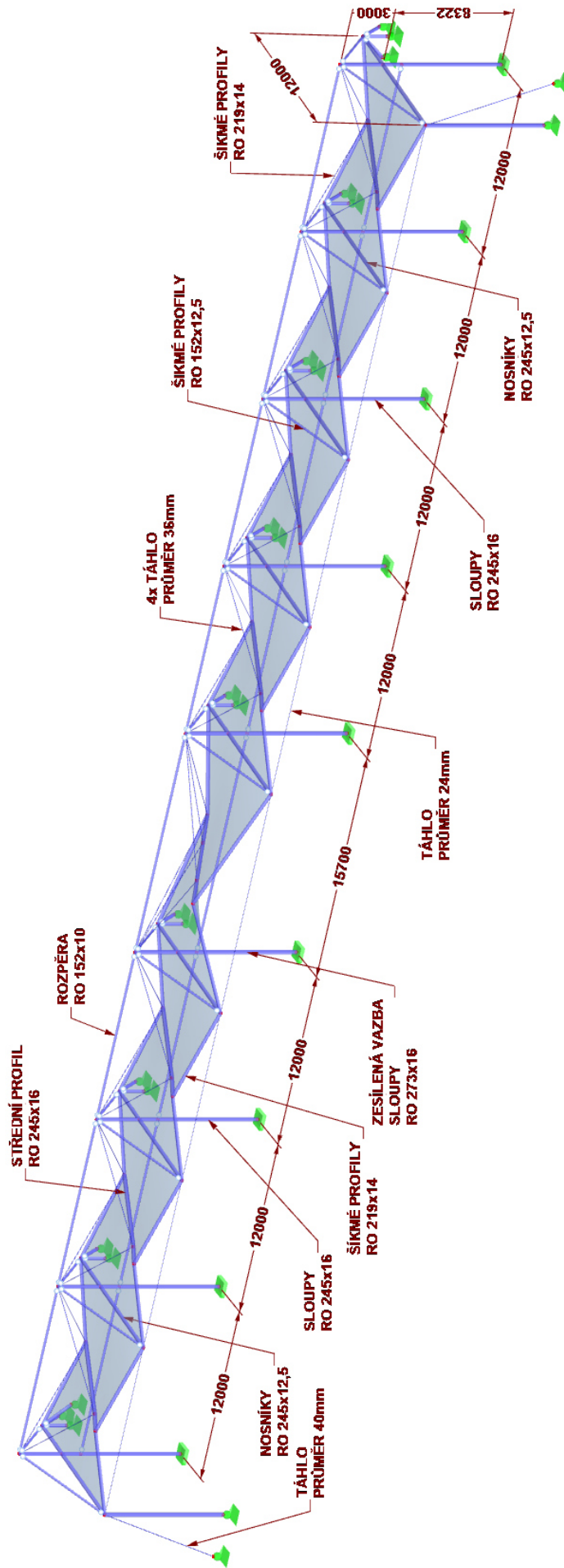
Obrázek 75 – Varianta hýpar – schéma hlavní typické vazby

Toto řešení umožnilo vytvoření téměř ideálního hyperbolického paraboloidu i bez nutnosti kotvení středních prvků do přiléhající budovy, které by vnášely do objektu velké síly ve vodorovném směru. K redukci deformací zde slouží táhla vedoucí z vrcholů sloupů vynášející středový profil. Celková tuhost byla navýšena pomocí příčných prvků, které zajišťují dostatečnou stabilitu celé konstrukce.

Výsledná konstrukce je vcelku složitá a rozhodně bych ji neoznačil za optimální. Obsahuje mnoho prvků a realizace by byla jistě velmi komplikovaná. Daný tvar není vhodný pro tak velké rozpory v takto náročných klimatických podmínkách.



Obrázek 76 – Varianta hýpar – schéma konstrukce typického pole bez zobrazení membrány



Obrázek 77 – Varianta hypar – schéma konstrukce s popisy hlavních prvků

## 7.3.2 Předběžný návrh

### 7.3.2.1 Výpočet zatížení

#### Zatížení sněhem

- Geografické údaje – viz. 7.1.2.1
- Sněhová oblast IV.:  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- Tvar zborcené plochy byl přirovnán k sedlové střeše
- Průměrný sklon:  $\alpha = 20^\circ$
- Tvaroví součinitelé:  $\mu_1 = 0,8$  ;  $\mu_2 = 0,8 \cdot \frac{0,8 \cdot \alpha}{30} = 1,3$
- V normě se nachází dva stavy zatížení sněhem na vícelodní sedlovou střechu. Pro účely předběžného návrhu bylo uvažováno pouze s variantou celoplošného zatížení. K navátí sněhu na určitá místa by zde docházelo. Rozhodně ne však v plném rozsahu, jak uvádí norma, protože celkový sedlový tvar je ještě zároveň sklopen ve druhém směru jako střecha pultová. Pro výpočet jsem hodnotu tvarového součinitele pro celoplošné zatížení o 10 % navýšil, aby vznikla rezerva na zatížení navátím.
- Výsledná hodnota zatížení sněhem:

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

#### Zatížení větrem

- Základní údaje stejné jako v předchozí variantě – viz 7.1.2.1
  - Výsledný tlak větru:  $w(z) = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{p,net} = 0,473 \cdot 1,7 \cdot c_{p,net}$
- $$\underline{w(z) = 0,80 \cdot c_{p,net}}$$
- Opět bylo pro zjednodušení modelu uvažováno celoplošné zatížení membrány, a to především kvůli tomu, že deformace membrány je důležitým ukazatelem její funkčnosti. Zatížení bylo přirovnáno v normě k sedlovému přístřešku. Součinitel  $c_{p,net}$  byl zprůměrován přes poměry jednotlivých ploch.
  - Oblasti a příslušný součinitel:
    - A – poměr plochy 48% -  $c_{p,net} = -1,4 / +1,1$
    - B – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -2,2 / +1,9$
    - C – poměr plochy 18% -  $c_{p,net} = -1,6 / +1,5$
    - D – poměr plochy 16% -  $c_{p,net} = -2,1 / +0,4$
  - Výsledný průměrný součinitel rozdílů tlaků:  $c_{p,net} = -1,7 / +1,2$

- Celoplošné průměrné sání větru:

$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 \cdot (-1,7) = \underline{-1,4 \text{ kN/m}^2}$$

- Celoplošný průměrný tlak větru:

$$w_{(z)} = 0,8 \cdot c_{p,net} = 0,8 \cdot (+1,2) = \underline{+1,0 \text{ kN/m}^2}$$

### Kombinace zatížení

- Kombinace byly vytvořeny shodným způsobem jako v předešlé variantě

- MSÚ:  $KZ_1 = 1,35 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,5 \cdot Q_{v,tlak}$

$$KZ_2 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot Q_{v,sání}$$

- MSP:  $KZ_3 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_s + 0,6 \cdot 1,0 \cdot Q_{v,tlak}$

$$KZ_4 = 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot Q_{v,sání}$$

### 7.3.2.2 Materiály

- Membrána: Valmex Mehatop F1 FR1400 Type IV.

- hmotnost:  $1350 \text{ g/m}^2$ , tloušťka: 1,1 mm

- pevnost v tahu: 800/700 daN/5cm

- nosná vlákna: PES ; krycí vrstva: PVC

- počáteční předpětí:  $1,0 \text{ kN/m}$  – oba směry

- Ocel: S235

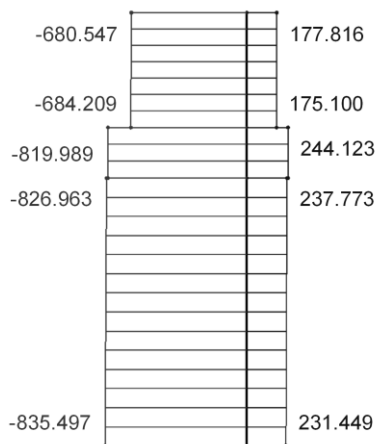
- Lana: Pfeifer PV – spirální lana,  $E = 160 \text{ GPa}$

### 7.3.2.3 Návrh sloupu

#### Tlak:

$$N_{max} = 835,5 \text{ kN (tlak)}$$

#### NÁVRH: RO 245 x 16,0 mm (ocel S235)



Obrázek 78 – Vykreslení N (MSÚ)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{7300}{81,2} = 89,9$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{89,9}{93,9} = 0,97$$

z tabulky:  $\chi = 0,666$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,666 \cdot 11510 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1801 \text{ kN} \geq N_{max} = 835,5 \text{ kN} \text{ VYHOVUJE}$$

**Ohyb:**

$$M_{y,max} = 31 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 22 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 840000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 31 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 22 \text{ kNm}$$

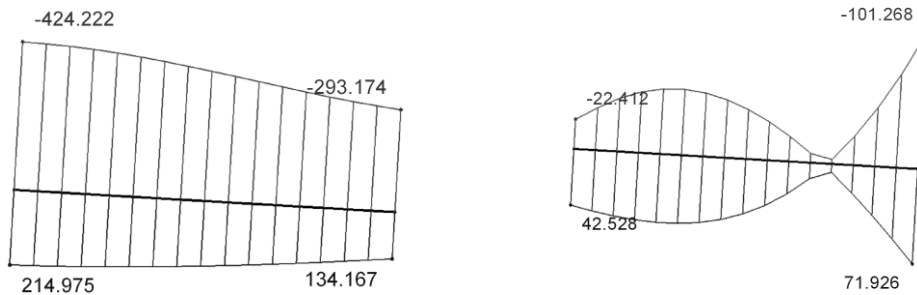
VYHOVUJE

**Kombinace namáhání:**

$$N_{max} = 835,5 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 31 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 22 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{835,5}{1801} + \frac{31}{197,4} + \frac{22}{197,4} \leq 1$$

$$0,75 \leq 1 \text{ VYHOVUJE}$$

**7.3.2.4 Návrh nosníku**

Obrázek 79 – Vykreslení vlevo  $N$  a vpravo  $M_y$  na nosníku (MSÚ)

**Tlak:**

$$N_{max} = 424,2 \text{ kN (tlak)}$$

**NÁVRH: RO 245 x 12,5 mm (ocel S235)**

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{7000}{82,3} = 85,1$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{85,1}{93,9} = 0,91$$

$$\text{z tabulky: } \chi = 0,727$$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,727 \cdot 9130 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1559,8 \text{ kN} \geq N_{max} = 424,2 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

### Ohyb:

$$M_{y,max} = 101,3 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 8,5 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 676350 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 101,3 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 8,5 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

### Kombinace namáhání:

$$N_{max} = 293 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 101,3 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 8,5 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{293}{1559,8} + \frac{101,3}{158,9} + \frac{8,5}{158,9} \leq 1$$

$$0,88 \leq 1$$

VYHOVUJE

### Posouzení na smyk:

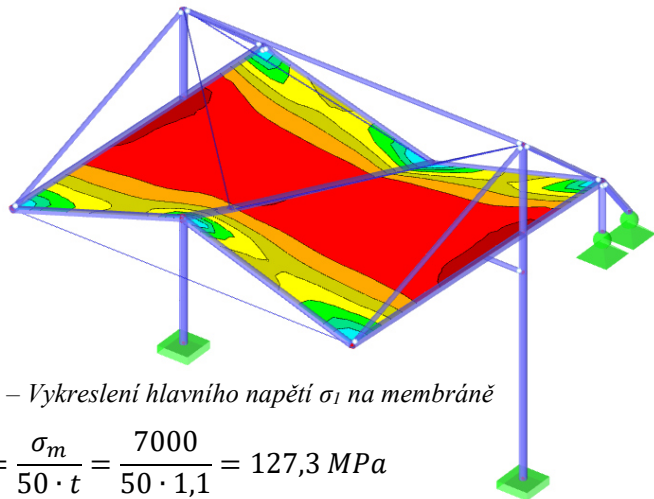
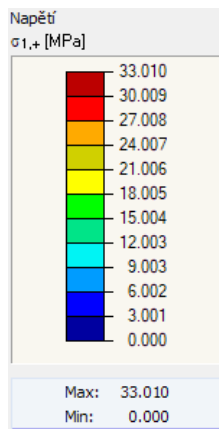
$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{5813 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

$$V_{pl,Rd} = 788,7 \text{ kN} \geq V_{ed} = 67,6 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

### 7.3.2.5 Návrh membrány



Obrázek 80 – Vykreslení hlavního napětí  $\sigma_1$  na membráně

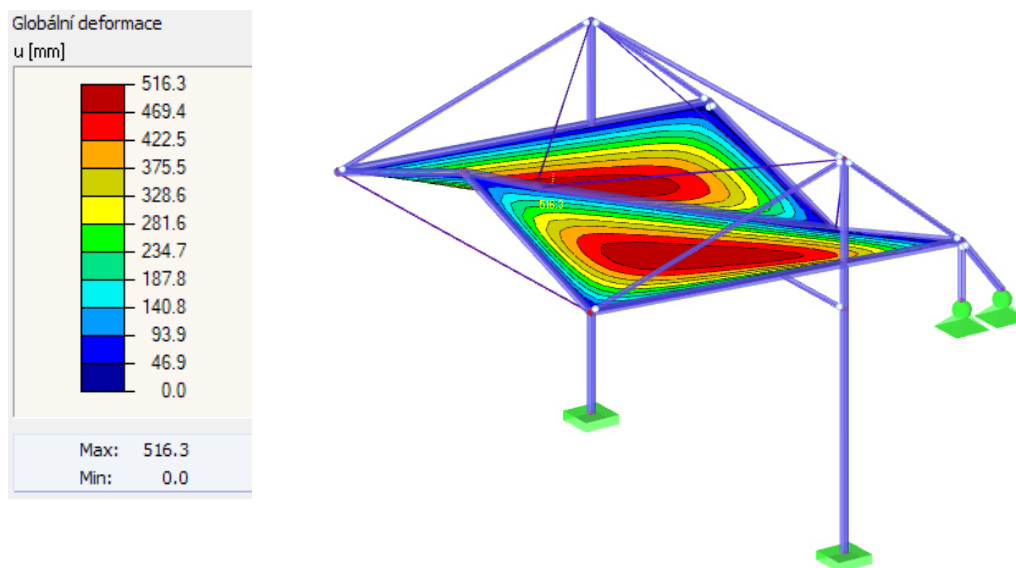
$$\sigma_{Rk} = \frac{\sigma_m}{50 \cdot t} = \frac{7000}{50 \cdot 1,1} = 127,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{Rk}}{\gamma_m} = \frac{127,3}{2,5} = 50,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd} = 50,9 \text{ MPa} \geq \sigma_1 = 33,0 \text{ MPa} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- Napětí ve druhém směru ( $\sigma_2$ ) bylo menší, tudíž není třeba posuzovat

### 7.3.2.6 Posouzení MSP



Obrázek 81 – Vykreslení deformace na membráně (MSP)

- Maximální deformace membrány byla přibližně 516 mm. Její funkce odvodu vody při tom byla zachována, tudíž stav lze vyhodnotit jako vyhovující.

## 7.4 Zhodnocení variant

Při porovnání variant lze uvážit několik kritérií. Jedním z nich je určitě množství materiálu, které z velké části tvoří celkové náklady na realizaci. Výsledné hodnoty ukázaly, že na variantu číslo 2 a 3 (pagoda a hyper) je potřeba přibližně stejné množství materiálu, a to konkrétně okolo 74 tun oceli. U varianty s pagodami je navíc nutné počítat s daleko větší spotřebou membránového materiálu, vzhledem k výškovému charakteru varianty. Zajímavým faktem je hmotnost oceli nutná k první obloukové variantě. I přes zmenšené rozpory na 9,2 m, a tudíž nutnosti mít celkově o 2 hlavní vazby více než v ostatních variantách, váží výsledná ocelová konstrukce necelých 60 tun. Byla zde tedy dokázána určitá neefektivnost a nevhodnost volby rozpětí 12 m v tak náročných přírodních podmínkách.

Pokud zvážíme náročnost konstrukcí na realizaci, opět by první oblouková varianta byla pravděpodobně tou nejjednodušší. Konstrukce pagody s vrcholem vynášeným táhly je sama o sobě o něco komplikovanější, natož pak na takto velký rozpon. Varianta hyperu by vzhledem k členitosti vyžadovala spoustu montážních spojů a dle mého názoru by její realizace byla také náročná.

Hledisko vzhledu je do jisté míry čistě subjektivní záležitost. Z mého pohledu bych za nejelegantnější řešení označil pagodu. Naopak nejméně vzhledná je pro mne poslední varianta (hypar).

Pro podrobnější návrh jsem si vybral variantu první, s membránou pnutou přes oblouky. Tento typ zastřešení je pro tribuny stadionů velmi používaný a je dobrou kombinací pěkného designu a relativně jednoduchého provedení (v porovnání s ostatními variantami).

## **8 Podrobné konstrukční řešení finální varianty**

### **8.1 Změny vůči předběžnému návrhu**

Na základě výsledků z předběžného návrhu došlo při finálním řešení vybrané obloukové varianty k následujícím změnám.

#### **a) Úprava tvaru**

V původní variantě byla jednotlivá pole mezi nosníky ukončena vždy obloukovými trubkami. Vzhledem k jejich funkci zde byla nutnost tyto prvky tuze připojovat k nosníku tak, aby byly schopny přenášet moment vznikající tahem od membrány. V daných podmínkách pak docházelo k velkému namáhání prvků v místě tohoto spoje.

Ve snaze odstranit toto problematické místo jsem v následném návrhu přistoupil k výměně těchto okrajových profilů za prvky lanové. Dojde sice k částečné změně tvaru, ale bude eliminováno místo s lokální koncentrací napětí. Jedná se o typické řešení u zastřešení tribun na sportovních stadionech.

#### **b) Zvětšení rozponu na 12 m**

I přes neoptimální poměry stran vzniklých polí jsem se pokusil navrhnout variantu na rozpon mezi vazbami o velikosti 12 m tak, jak bylo původně v zadání ze studie. Díky úpravě a) bylo z konstrukce vyřazeno nejvíce namáhané místo, a tudíž byl zde prostor pro navýšení rozponu bez zbytečného navyšování dimenzí prvků. Zvýšení rozponu si dále vyžádalo zvětšení vzepětí oblouků z původních 1,5 m na 2,1 m.



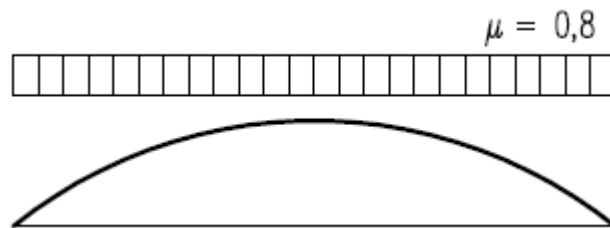
## 8.2 Zatížení

### 8.2.1 Zatížení sněhem

- Návrhová lokalita: Žďár nad Sázavou (kraj Vysočina)
- Sněhová oblast IV.:  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- Výška oblouku:  $h = 2,1 \text{ m}$
- Rozpětí oblouku:  $b = 12,0 \text{ m}$
- Typ krajiny – normální:  $C_e = 1,0$
- Teplotní součinitel:  $C_t = 1,0$
- Protože se jedná o přístřešek válcového tvaru, dle normy bylo nutné uvážit více stavů zatížení sněhem – 2 případy nenavátého a jeden případ navátého sněhu

#### Stav I. – nenavátý sníh I

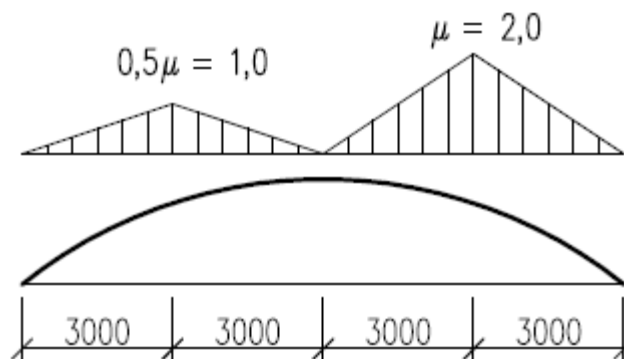
- Tvarový součinitel – celoplošné zatížení:  $\mu = 0,8$
- Zatížení sněhem:  $s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0$   
 $s = 1,60 \text{ kN/m}^2$



Obrázek 82 – Schéma zatížení sněhem – stav I.

#### Stav II. – nenavátý sníh II

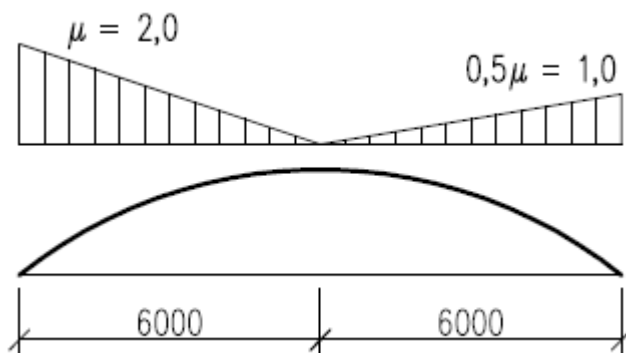
- Poměr rozpětí a vzezpečí oblouku:  $\frac{h}{b} = \frac{2,1}{12} = 0,18$
- Z grafu dle EN:  $\mu = 2$
- Zatížení sněhem:  $s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0$   
 $s = 4,00 \text{ kN/m}^2$



Obrázek 83 – Schéma zatížení sněhem – stav II.

### Stav III. – navátý sněh

- Poměr rozpětí a vzepětí oblouku:  $\frac{h}{b} = \frac{2,1}{12} = 0,18$
- Z grafu dle EN:  $\mu = 2$
- Zatížení sněhem:  $s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0$   
 $s = 4,00 \text{ kN/m}^2$



Obrázek 84 – Schéma zatížení sněhem – stav III.

### 8.2.2 Zatížení větrem

- Větrná oblast III.:  $v_{ref} = 27,5 \text{ m/s}$
- Referenční střední tlak větru:  $q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 473 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
- Kategorie terénu III.: oblast pravidelně pokrytá vegetací, budovami nebo překážkami
- Referenční výška:  $h = 10 \text{ m}$
- Součinitel expozice:  $c_e(z) = 1,7 \rightarrow z \text{ grafu ČSN EN}$
- Výsledný tlak větru:  $w(z) = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{p,net} = 0,473 \cdot 1,7 \cdot c_{p,net}$   
 $w(z) = 0,80 \cdot c_{p,net}$
- Objekt normově spadá do kategorie „přístřešky“. Zatížení se zde většinou uvažuje v podobě sil na jednotlivou vazbu. V případě membránové konstrukce jsem ale použil alternativu zatížení přímo plochy samotné membrány. Tvar jsem přirovnal k sedlové střeše, kdy průměrný úhel sklonu jsem vyhodnotil jako  $15^\circ$ .
- V návrhu bylo uvažováno se dvěma směry:
  - Příčný směr – „Y“ – v tomto směru se za tribunou nachází budova
  - Podélný směr – „X“ – ve směru délky fotbalového hřiště

### Příčný směr „Y“

- Součinitel plnosti:  $\varphi = 1,0$

- **Tlak větru na membránu:**

	A	B	C	D
$C_{p,net}$	+0,9	+1,9	+1,4	+0,4
$w$ [kN/m <sup>2</sup> ]	+0,7	+1,5	+1,1	+0,3

- **Sání zespod na membránu:**

	A	B	C	D
$C_{p,net}$	-1,3	-2,2	-1,6	-2,1
$w$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-1,0	-1,7	-1,3	-1,7

### Podélný směr „X“

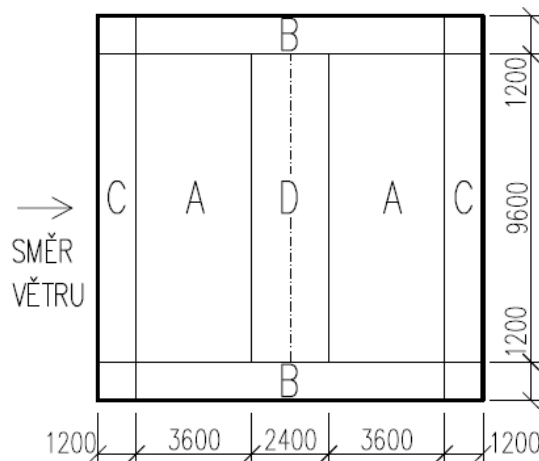
- Součinitel plnosti:  $\varphi = 0$

- **Tlak větru na membránu:**

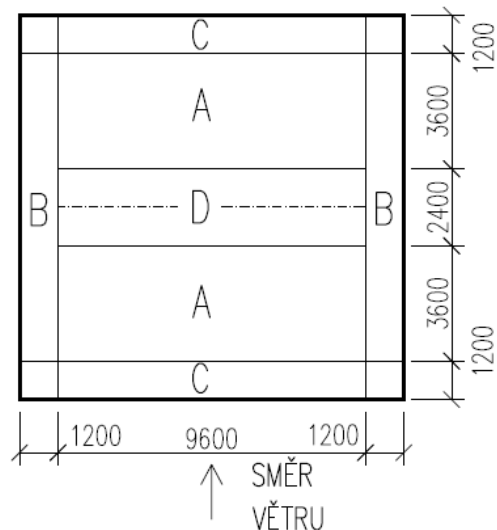
	A	B	C	D
$C_{p,net}$	+0,9	+1,9	+1,4	+0,4
$w$ [kN/m <sup>2</sup> ]	+0,7	+1,5	+1,1	+0,3

- **Sání zespod na membránu:**

	A	B	C	D
$C_{p,net}$	-0,9	-1,7	-1,4	-1,8
$w$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0,7	-1,4	-1,1	-1,4



Obrázek 85 - Schéma účinku podélného větru



Obrázek 86 - Schéma účinku příčného větru

- Z výsledků je vidět, že hodnoty pro tlak shora na membránu nezávisí na součiniteli plnosti. Jediným rozdílem je drobné přeskupení oblastí. Zároveň při porovnání hodnot sání jsou v podélném směru všechny oblasti zatíženy menším účinkem než ve směru opačném. Pro zjednodušení a zmenšení počtu kombinací byl tedy tlak i sání uvažován pouze v příčném směru.

### Zatížení na profily

- Maximální průměr profilu:  $b = 300 \text{ mm}$
- Kinematická viskozita vzduchu:  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Reynoldsovo číslo:  $Re = b \cdot v(z)/\nu = 0,3 \cdot 27,5/(15 \cdot 10^{-6}) = 550000$
- Ekvivalentní drsnost pro pozinkovanou ocel:  $k = 0,2 \text{ mm}$
- Součinitel síly:  $c_{f,0} = 0,5 \rightarrow z \text{ grafu } \check{C}SN \text{ EN}$
- Součinitel koncového efektu:  $\psi_\lambda = 1,0 \rightarrow \text{bezpečně bez koncového efektu}$
- Součinitel síly:  $c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,5 \cdot 1 = 0,5$
- Výsledné liniové zatížení:  $\underline{w_p} = c_f \cdot q_p \cdot b = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,3 = \underline{0,1 \text{ kN/m}}$
- Všechny zatěžovací stavy od větru budou doplněny tímto liniovým zatížením na jednotlivé profily v daném směru větru

#### **8.2.3 Proměnné zatížení - údržba**

- Užitná kategorie H: střechy nepřístupné s výjimkou běžné údržby a oprav
- Plošné zatížení:  $q_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$
- Zatížení je menší než výše uvažované zatížení klimatickými podmínkami. Vzhledem k tomu, že se údržba vylučuje za současné plné pokrývky sněhem, není toto zatížení ve výpočtu uvažováno.

#### **8.2.4 Zatížení teplotou**

- Minimální teplota ve stínu pro lokalitu:  $T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow z \text{ mapy } \check{C}SN$
- Maximální teplota ve stínu pro lokalitu:  $T_{max} = 35 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow z \text{ mapy } \check{C}SN$
- Povrch – jasně světlý:  $T_{out,min} = T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$   
$$T_{out,max} = T_{max} + 15^\circ = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$
- Předpokládaná teplota při realizaci:  $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Výsledné zatěžovací teploty:  $\Delta T_{max} = T_{out,max} - T_0 = 50 - 15 = +35^\circ\text{C}$   
$$\Delta T_{min} = T_{out,min} - T_0 = -30 - 15 = -45^\circ\text{C}$$

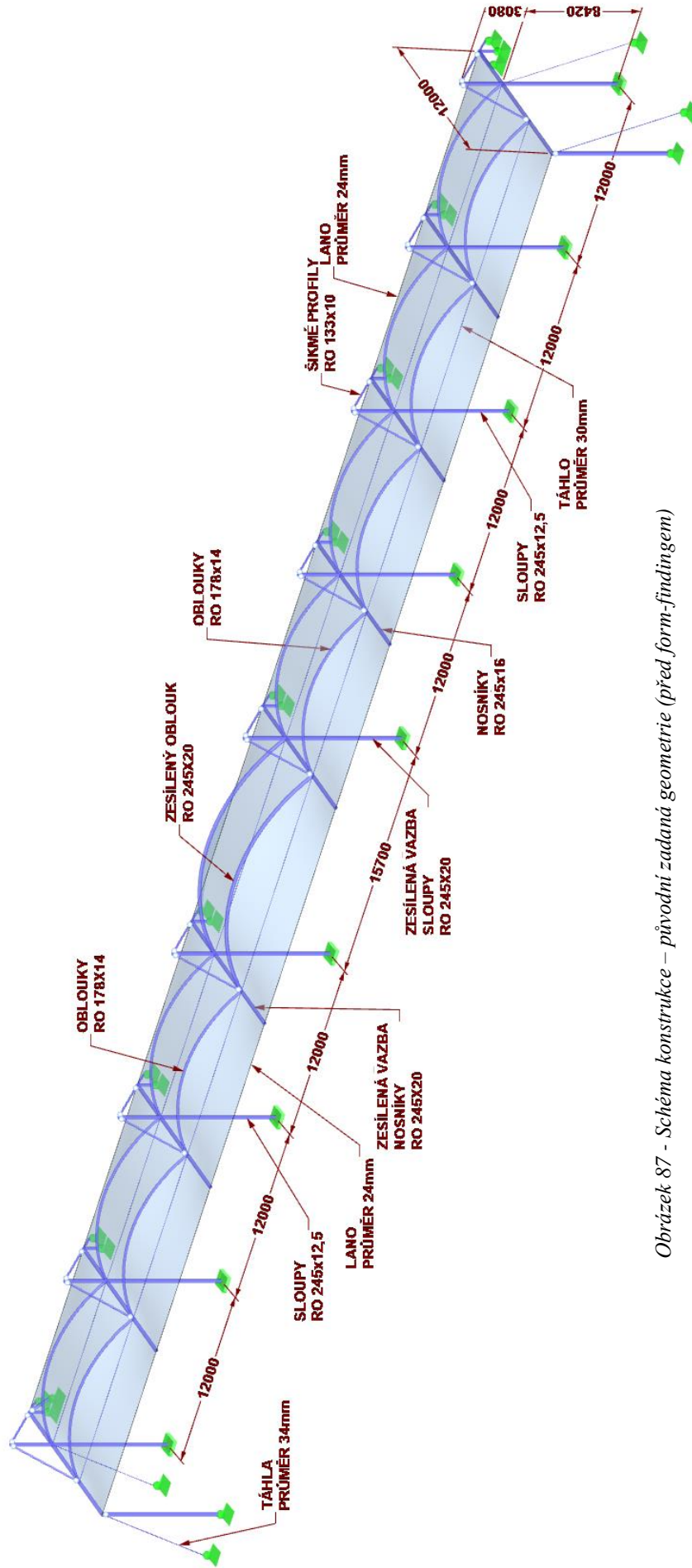
### **8.3 3D model a kombinace zatížení**

- Pro výpočet vnitřních sil a deformací byl použit 3D model konstrukce v softwaru Dlubal RFEM a jeho přídatných modulů
- Ručně vypočítané zatížení bylo zadáno v jednotlivých zatěžovacích stavech a poté byly z klasických normových kombinací vybrány ty pravděpodobně s největšími účinky. Jejich výčet je následující:

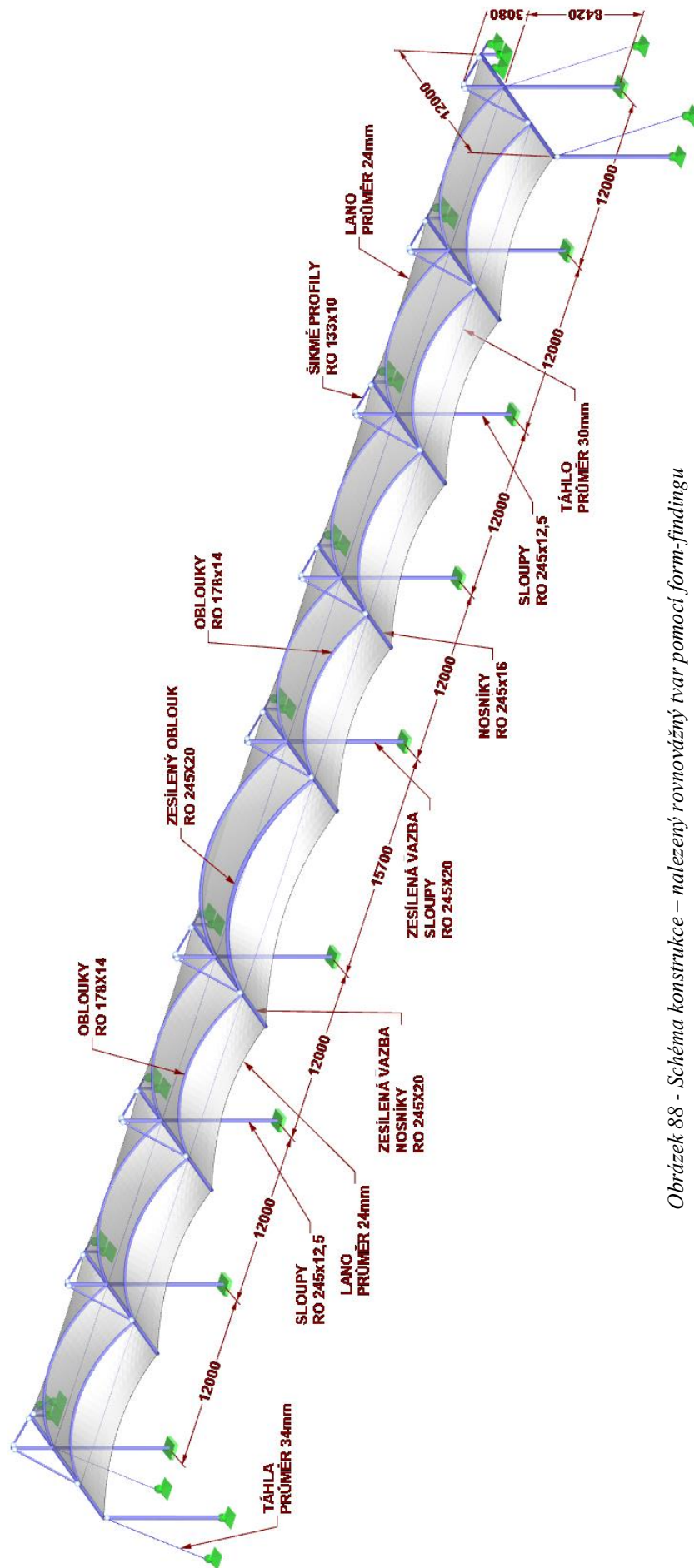
Přehled a označení zatěžovacích stavů		
ZS0	FF	Form-finding (nutný vždy před výpočtem dalších stavů)
ZS1	G	Vlastní tíha
ZS2	P	Předpětí
ZS3	Q <sub>s1</sub>	Sníh nenavátý I.
ZS4	Q <sub>s2</sub>	Sníh nenavátý II.
ZS5	Q <sub>s3</sub>	Sníh navátý
ZS6	Q <sub>v1</sub>	Vítr – tlak
ZS7	Q <sub>v2</sub>	Vítr – sání
ZS8	Q <sub>T-</sub>	Teplota – minimální
ZS9	Q <sub>T+</sub>	Teplota – maximální

Přehled a označení kombinací zatížení		
KZ1	--	$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P$
KZ2	MSÚ	$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS3 + 0,9 \cdot ZS6$
KZ3		$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS3 + 0,9 \cdot ZS6 + 0,9 \cdot ZS8$
KZ4		$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS4 + 0,9 \cdot ZS6$
KZ5		$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS4 + 0,9 \cdot ZS6 + 0,9 \cdot ZS8$
KZ6		$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS5 + 0,9 \cdot ZS6$
KZ7		$1,35 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS5 + 0,9 \cdot ZS6 + 0,9 \cdot ZS8$
KZ8		$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS7$
KZ9		$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS7 + 0,9 \cdot ZS8$
KZ10		$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,5 \cdot ZS7 + 0,9 \cdot ZS9$
KZ11		MSP
KZ12	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS3 + 0,6 \cdot ZS6 + 0,6 \cdot ZS8$	
KZ13	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS4 + 0,6 \cdot ZS6$	
KZ14	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS4 + 0,6 \cdot ZS6 + 0,6 \cdot ZS8$	
KZ15	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS5 + 0,6 \cdot ZS6$	
KZ16	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS5 + 0,6 \cdot ZS6 + 0,6 \cdot ZS8$	
KZ17	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS7$	
KZ18	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS7 + 0,6 \cdot ZS8$	
KZ19	$1,0 \cdot ZS1 + 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot ZS7 + 0,6 \cdot ZS9$	

Přehled a označení kombinací výsledků			
KV1	MSÚ	Návrhová	Max. hodnoty z KZ2 – KZ10
KV2	MSP	Charakteristická	Max. hodnoty z KZ11 – KZ19



Obrázek 87 - Schéma konstrukce – původní zadaná geometrie (před form-findingem)



Obrázek 88 - Schéma konstrukce – nalezený rovnovážný tvar pomocí form-findingu

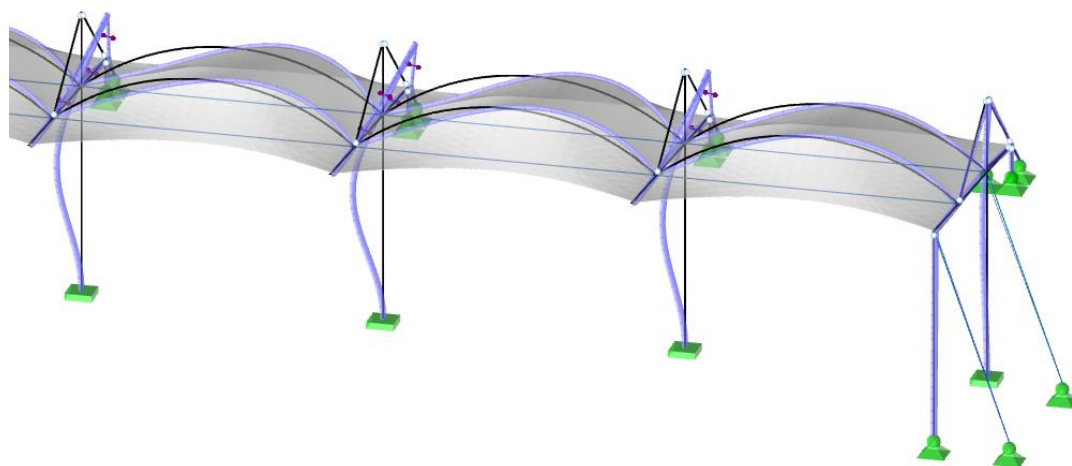
## 8.4 Návrh jednotlivých prvků konstrukce

Prvky byly navrženy a posouzeny na oba mezní stavy MSÚ i MSP. Při posuzování kombinací namáhání byl již použit podrobnější postup podle ČSN EN 1993-1-1 kapitoly 6.3.3 pomocí interakčních součinitelů. Určení těchto součinitelů bylo provedeno pomocí přílohy B.1 k uvedené ČSN. V porovnání s pružným sčítáním jednotlivých účinků, které bylo použito v předběžných návrzích, dochází k redukci využití průřezů přibližně okolo 10-20 % v závislosti na rozhodujícím namáhání.

### 8.4.1 Stabilitní výpočet

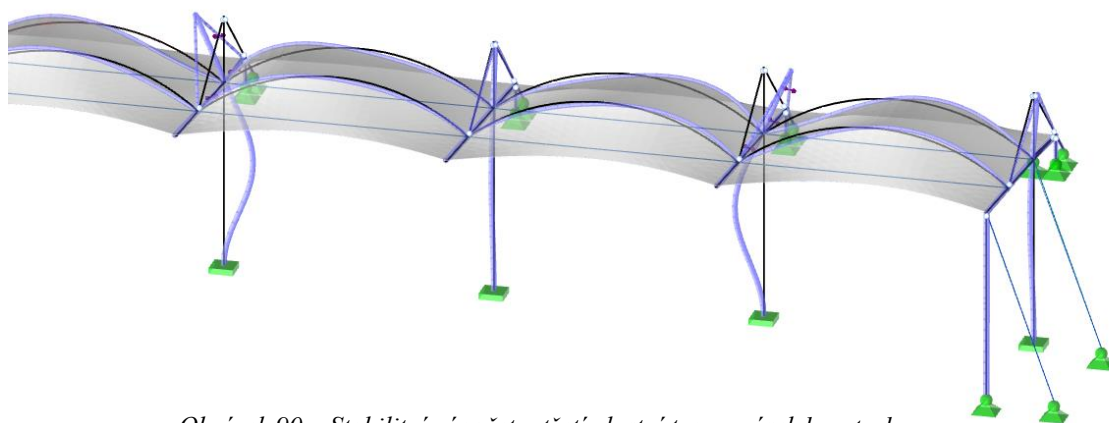
Bylo vybráno několik kombinací, při kterých dochází ke vzniku největších normálových sil v prvcích a pro ně byl proveden stabilitní výpočet. Jako rozhodující se ukázala kombinace KZ5. Její součinitel kritického zatížení je pro první tvar vybočení roven hodnotě 6,23. Vzpěrné délky v následujících posouzeních jsou převzaty z tohoto stabilitního výpočtu.

**První vlastní tvar vybočení:  $\alpha_{cr,1} = 6,23$**  (černě osově původní tvar, barevně vybočení)



Obrázek 89 – Stabilitní výpočet – první vlastní tvar – výsek konstrukce

**Třetí vlastní tvar vybočení:  $\alpha_{cr,3} = 7,45$**  (černě osově původní tvar, barevně vybočení)



Obrázek 90 – Stabilitní výpočet – třetí vlastní tvar – výsek konstrukce

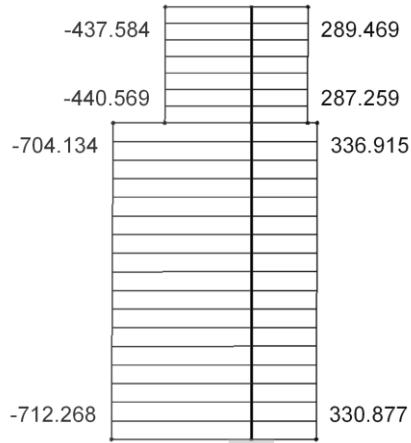


## 8.4.2 Návrh sloupu

**NÁVRH: RO 245 x 12,5 mm (ocel S235)**

**Tlak:**

$$N_{max} = 712,2 \text{ kN (tlak)}$$



Obrázek 91 – Vykreslení N (MSÚ)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{6950}{82,3} = 84,4$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{84,4}{93,9} = 0,90$$

z tabulky:  $\chi = 0,734$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,734 \cdot 9130 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1574 \text{ kN} \geq N_{max} = 712,2 \text{ kN}$$

**VYHOVUJE**

**Ohyb:**

$$M_{y,max} = 30,3 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 24,8 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 676000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 30,3 \text{ kNm}$$

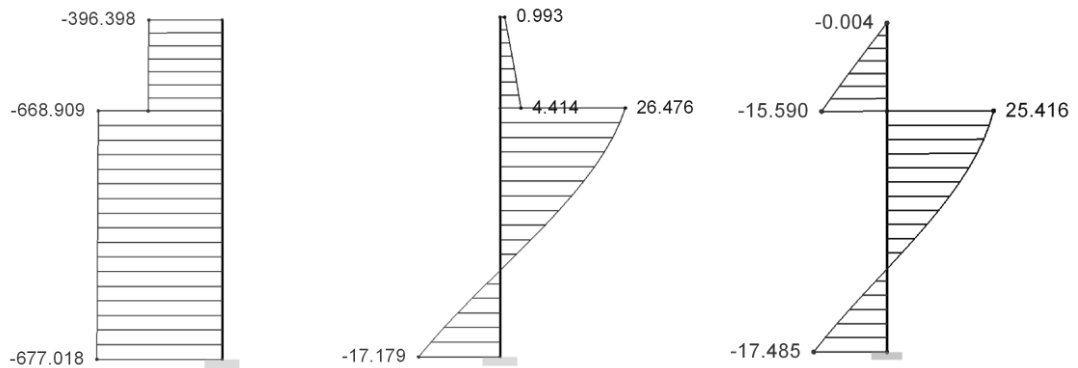
**VYHOVUJE**

$$M_{pl,Rd} = 158,9 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 24,8 \text{ kNm}$$

**VYHOVUJE**

**Kombinace namáhání:**

Vybrána nejnepříznivější kombinace (KZ3):



Obrázek 92 – Zleva: vykreslení N, My a Mz na sloupu (KZ3)

$$N_{max} = 668,9 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 26,5 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 25,4 \text{ kNm}$$

Součinitel  $C_m$  ekvivalentního konstantního momentu:

$C_{my} = 0,9 \rightarrow$  případ vybočení s posuvem styčníků – typické pro sloupy

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,71) \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,32 \not\geq 0,4 \rightarrow \text{musím vzít větší hodnotu} \rightarrow C_{mz} = 0,4$$

Výpočet interakčních součinitelů  $k_{ij}$ :

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{yy} = 0,9 \cdot (1 + (1,05 - 0,2) \cdot \frac{668,9}{1353,8}) \leq 0,9 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{668,9}{1353,8})$$

$$k_{yy} = 1,28 \not\leq 1,26 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow k_{yy} = 1,26$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{mz} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{zz} = 0,4 \cdot (1 + (1,05 - 0,2) \cdot \frac{668,9}{1353,8}) \leq 0,4 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{668,9}{1353,8})$$

$$k_{zz} = 0,65 \not\leq 0,6 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow k_{zz} = 0,6$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 0,6$$

$$k_{yz} = 0,36$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,26$$

$$k_{zy} = 0,76$$

Posouzení kombinace namáhání:

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{668,9}{1574} + 1,26 \cdot \frac{26,5}{158,9} + 0,36 \cdot \frac{25,4}{158,9} \leq 1$$

$$0,70 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{668,9}{1574} + 0,76 \cdot \frac{26,5}{158,9} + 0,6 \cdot \frac{25,4}{158,9} \leq 1$$

$$0,66 \leq 1$$

VYHOVUJE

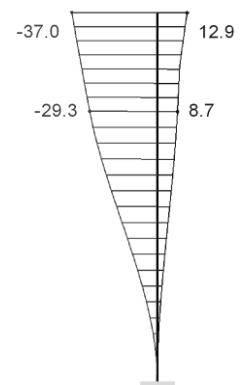
**Posouzení MSP:**

Pro posouzení MSP na sloupu byl zvolen limit vodorovných průhybů pro vrcholy sloupů jednopodlažních budov ( $L/300$ ).

$$u_{max} = 37 \text{ mm} \leq u_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{11500}{300}$$

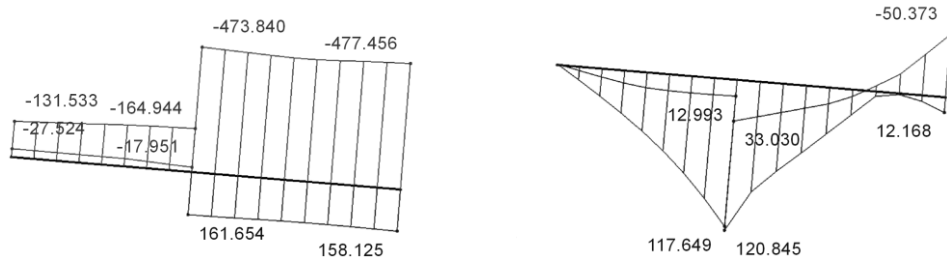
$$u_{max} = 37 \text{ mm} \leq u_{lim} = 38,3 \text{ mm}$$

VYHOVUJE



Obrázek 93 –  
Vodorovné posuny  
(MSP)

### 8.4.3 Návrh nosníku



Obrázek 94 – Vykreslení  $N$  a  $M_y$  na nosníku (MSÚ)

#### Tlak:

$$N_{max} = 477,5 \text{ kN (tlak)}$$

#### NÁVRH: RO 245 x 16,0 mm (ocel S235)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{7450}{81,2} = 91,8$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{91,8}{93,9} = 0,98$$

z tabulky:  $\chi = 0,680$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,680 \cdot 11510 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 1839,3 \text{ kN} \geq N_{max} = 477,5 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

#### Ohyb:

$$M_{y,max} = 120,8 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 37,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 840000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 120,8 \text{ kNm}$$

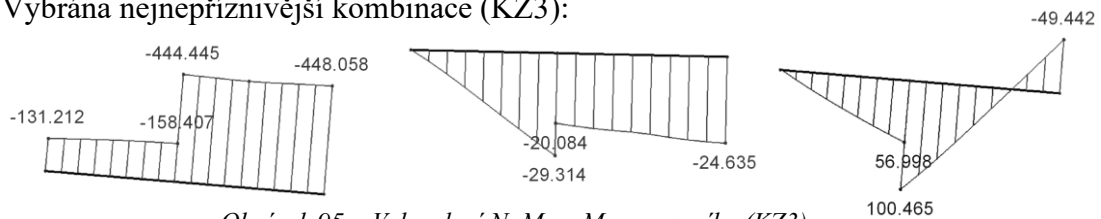
VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 197,4 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 37,1 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

#### Kombinace namáhání:

Vybrána nejnepříznivější kombinace (KZ3):



Obrázek 95 – Vykreslení  $N$ ,  $M_y$  a  $M_z$  na nosníku (KZ3)

$$N_{max} = 444,4 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 100,5 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 29,3 \text{ kNm}$$

Výpočet součinitele  $C_m$  ekvivalentního konstantního momentu:

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,49) \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,4 \geq 0,4 \rightarrow \text{musím vzít větší hodnotu} \rightarrow \mathbf{C_{my} = 0,4}$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot 0,81 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,92 \geq 0,4 \rightarrow \text{musím vzít větší hodnotu} \rightarrow \mathbf{C_{mz} = 0,92}$$

Výpočet interakčních součinitelů  $k_{ij}$ :

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{yy} = 0,4 \cdot (1 + (1,06 - 0,2) \cdot \frac{444,4}{1687,8}) \leq 0,4 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{444,4}{1687,8})$$

$$k_{yy} = 0,49 \not\leq 0,48 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow \mathbf{k_{yy} = 0,48}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{mz} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{zz} = 0,92 \cdot (1 + (1,06 - 0,2) \cdot \frac{444,4}{1687,8}) \leq 0,92 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{444,4}{1687,8})$$

$$k_{zz} = 1,13 \not\leq 1,11 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow \mathbf{k_{zz} = 1,11}$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,11$$

$$\mathbf{k_{yz} = 0,67}$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,2$$

$$\mathbf{k_{zy} = 0,29}$$

Posouzení kombinace namáhání:

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{444,4}{1839,3} + 0,48 \cdot \frac{100,5}{197,4} + 0,67 \cdot \frac{29,3}{197,4} \leq 1$$

$$0,60 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{444,4}{1687,8} + 0,29 \cdot \frac{100,5}{197,4} + 1,11 \cdot \frac{29,3}{197,4} \leq 1$$

$$0,57 \leq 1$$

VYHOVUJE

**Posouzení na smyk:**

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{7328 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

$$V_{pl,Rd} = 994,2 \text{ kN} \geq V_{ed} = 79,2 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

### Posouzení MSP:

Posudek spočívá v ověření splnění limitních hodnot pro okamžitý průhyb od charakteristických kombinací (obálka MSP). Posuzuje se relativní průhyb daného prvku v dané kombinaci.

- a) Část mezi sloupem a horní vřpěrou – posuzováno jako nosník:

$$u_{max} = 17,8 - 4,6 \leq u_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{4415}{250}$$

$$u_{max} = 13,2 \text{ mm} \leq u_{lim} = 17,6 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- b) Převíslá část nosníku – posuzováno jako konzola

$$u_{max} = 30,5 - 10,1 \leq u_{lim} = \frac{2L}{250} = \frac{2 \cdot 3815}{250}$$

$$u_{max} = 20,4 \text{ mm} \leq u_{lim} = 30,5 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

- c) Celý prut dohromady – posuzováno jako nosník

$$u_{max} = 30,5 - 2,9 \text{ mm} \leq u_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{8230}{250}$$

$$u_{max} = 27,6 \text{ mm} \leq u_{lim} = 32,9 \text{ mm}$$

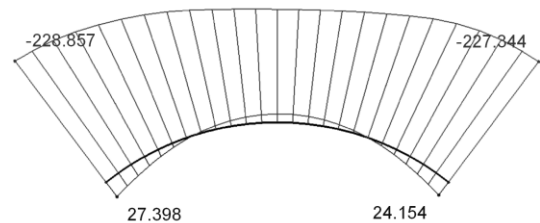
VYHOVUJE

### 8.4.4 Návrh oblouku

**Tlak:**

$$N_{max} = 228,9 \text{ kN (tlak)}$$

**NÁVRH: RO 178 x 14,0 mm (ocel S235)**



Obrázek 96 – Vykreslení N na oblouku (MSÚ)

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} = \frac{6450}{58,2} = 110,8$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9$$

$$\lambda^- = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{110,8}{93,9} = 1,18$$

z tabulky:  $\chi = 0,543$

$$N_{Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,543 \cdot 7213 \cdot \frac{235}{1,0} \geq N_{max}$$

$$N_{Rd} = 920,4 \text{ kN} \geq N_{max} = 228,9 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

**Ohyb:**

$$M_{y,max} = 28,5 \text{ kNm} ; M_{z,max} = 42,7 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \chi \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1 \cdot 377000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 \geq M_{ed}$$

$$M_{pl,Rd} = 88,6 \text{ kNm} \geq M_{y,max} = 28,5 \text{ kNm}$$

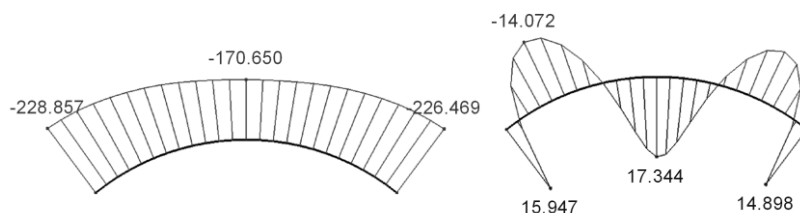
VYHOVUJE

$$M_{pl,Rd} = 88,6 \text{ kNm} \geq M_{z,max} = 42,7 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

**Kombinace namáhání:**

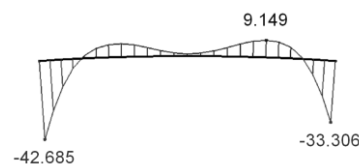
Vybrána nejnepříznivější kombinace (KZ5):



Obrázek 97 – Vykreslení N a My na oblouku (KZ5)

$$N_{max} = 228,9 \text{ kN (tlak)} ; M_{y,max} = 15,9 \text{ kNm} ;$$

$$M_{z,max} = 42,7 \text{ kNm}$$



Obrázek 98 – Vykreslení Mz na oblouku (KZ5)

Výpočet součinitele  $C_m$  ekvivalentního konstantního momentu:

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,82) \geq 0,4$$

$$C_{my} = 0,76 \geq 0,4 \rightarrow \text{musím vzít větší hodnotu} \rightarrow C_{my} = \mathbf{0,76}$$

$$C_{mz} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,21) \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,27 \not\geq 0,4 \rightarrow \text{musím vzít větší hodnotu} \rightarrow C_{mz} = \mathbf{0,4}$$

Výpočet interakčních součinitelů  $k_{ij}$ :

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{yy} = 0,76 \cdot (1 + (1,18 - 0,2) \cdot \frac{228,9}{920,4}) \leq 0,76 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{228,9}{920,4})$$

$$k_{yy} = 0,95 \not\leq 0,91 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow k_{yy} = \mathbf{0,91}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}) \leq C_{mz} \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}})$$

$$k_{zz} = 0,4 \cdot (1 + (1,18 - 0,2) \cdot \frac{228,9}{920,4}) \leq 0,4 \cdot (1 + 0,8 \cdot \frac{228,9}{920,4})$$

$$k_{zz} = 0,50 \not\leq 0,48 \rightarrow \text{uvažuje se menší hodnota} \rightarrow \mathbf{k_{zz} = 0,48}$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 0,48$$

$$\mathbf{k_{yz} = 0,29}$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,91$$

$$\mathbf{k_{zy} = 0,55}$$

Posouzení kombinace namáhání:

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{228,9}{920,4} + 0,91 \cdot \frac{15,9}{88,6} + 0,29 \cdot \frac{42,7}{88,6} \leq 1$$

$$0,62 \leq 1$$

VYHOVUJE

$$\frac{N_{ed}}{N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{228,9}{920,4} + 0,55 \cdot \frac{15,9}{88,6} + 0,48 \cdot \frac{42,7}{88,6} \leq 1$$

$$0,65 \leq 1$$

VYHOVUJE

Posouzení na smyk:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{4592 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \geq V_{ed}$$

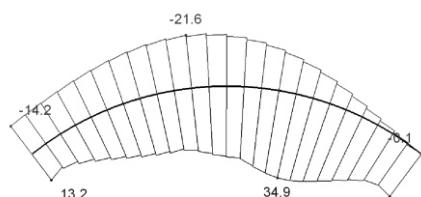
$$V_{pl,Rd} = 623,0 \text{ kN} \geq V_{ed} = 35,8 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- Protože smyková síla je menší než polovina plastické smykové únosnosti průřezu, lze zanedbat její účinek na únosnost v ohybu.

Posouzení MSP:

Posudek spočívá v ověření splnění limitních hodnot pro okamžitý průhyb od charakteristických kombinací (obálka MSP). Posuzuje se relativní průhyb daného prvku v dané kombinaci.



Obrázek 99 – Svislé průhyby na oblouku (MSP)

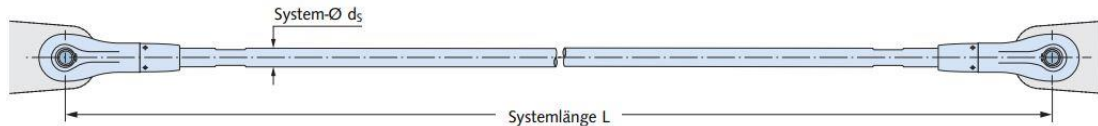
$$u_{max} = 34,9 - 5,4 \leq u_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{12000}{250}$$

$$u_{max} = 29,5 \text{ mm} \leq u_{lim} = 48,0 \text{ mm}$$

VYHOVUJE

#### 8.4.5 Návrh táhel pod oblouky

- Bude použito systémové táhlo Halfen Detan – plná tyč
- Ukotvení do nosníku – viz výkresová část – detail C
- Dle výrobce: **NÁVRH „Halfen Detan S–Zugstabsystem- S520N–Ø30mm“**



Obrázek 100 – Schéma systémového táhla Halfen DETAN<sup>[39]</sup>

- Posouzení na tah:  $N_{t,Rd} = 290,6 \text{ kN} \geq N_{ed} = 198,6 \text{ kN}$

VYHOVUJE

- Táhla budou při osazování předepnuta na sílu  $P = 65 \text{ kN}$ , která zajistí jejich setrvání v tahu ve všech zatěžovacích stavech.

#### 8.4.6 Návrh kotevních lan

- Bude použito nerezové lano od společnosti Fatzer
- Dle výrobce: **NÁVRH „Fatzer - DIN 1.4401 – Ø34mm“**
- Modul pružnosti:  $E = 130 \pm 10 \text{ MPa}$
- Minimální mez pevnosti:  $F_{min} = 968 \text{ kN}$
- Součinitel vlivu koncovky:  $k_e = 0,9$
- Charakteristická mez pevnosti:  $F_{uk} = F_{min} \cdot k_e = 968 \cdot 0,9 = 871 \text{ kN}$
- Návrhová mez pevnosti:  $F_{Rd} = F_{uk}/1,5 = 871/1,5 = 581 \text{ kN}$
- Posouzení:  $F_{Rd} = 581 \text{ kN} \geq N_{ed} = 523,4 \text{ kN}$

VYHOVUJE

- Lana budou při osazování předepnuta na sílu  $P = 50 \text{ kN}$ , která zajistí jejich setrvání v tahu ve všech zatěžovacích stavech.

#### 8.4.7 Návrh okrajových lan membrány

- Bude použito nerezové lano od společnosti Fatzer
- Modul pružnosti:  $E = 130 \pm 10 \text{ MPa}$
- Dle výrobce: **NÁVRH „Fatzer - DIN 1.4401 – Ø24mm“**
- Minimální mez pevnosti:  $F_{min} = 489 \text{ kN}$
- Součinitel vlivu koncovky:  $k_e = 0,9$
- Charakteristická mez pevnosti:  $F_{uk} = F_{min} \cdot k_e = 489 \cdot 0,9 = 440 \text{ kN}$
- Návrhová mez pevnosti:  $F_{Rd} = F_{uk}/1,5 = 440/1,5 = 293 \text{ kN}$
- Posouzení:  $F_{Rd} = 293 \text{ kN} \geq N_{ed} = 211,8 \text{ kN}$  VYHOVUJE



### 8.4.8 Návrh membrány

- Materiál: **Valmex Mehatop F1 FR1400 Type IV.**

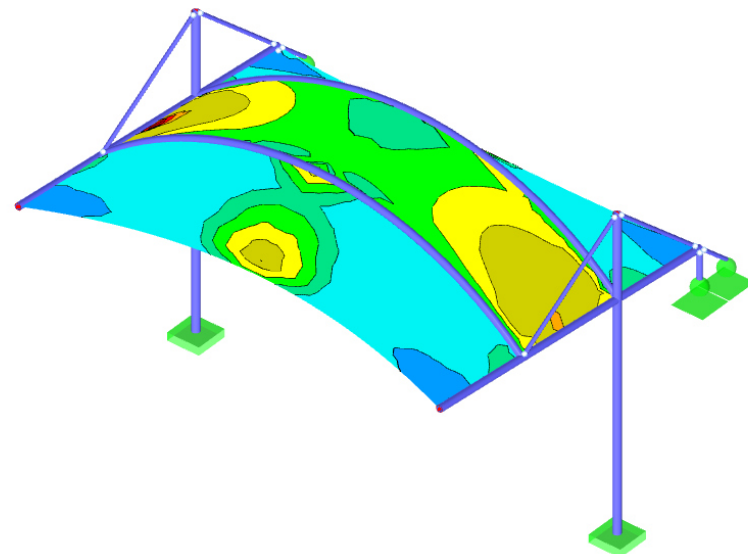
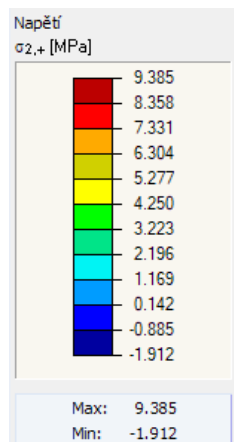
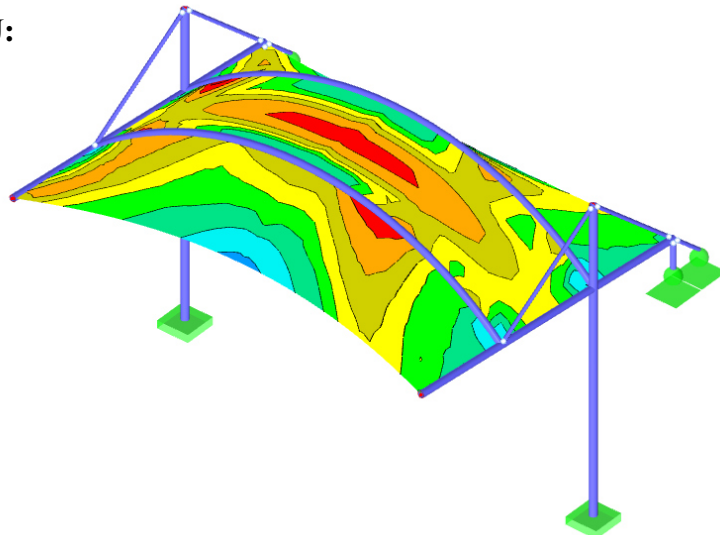
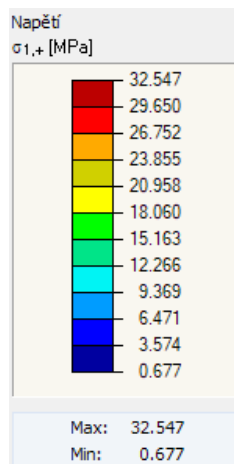
- hmotnost: 1350 g/m<sup>2</sup>, tloušťka: 1,1 mm

- pevnost v tahu: 800/700 daN/5cm

- nosná vlákna: PES ; krycí vrstva: PVC

- počáteční předpětí: 1,0 kN/m – oba směry

#### Posouzení napětí MSÚ:



Obrázek 101 – Průběh hlavních napětí na membráně v největším poli –  $\sigma_1$  (nahore),  $\sigma_2$  (dole) - MSÚ

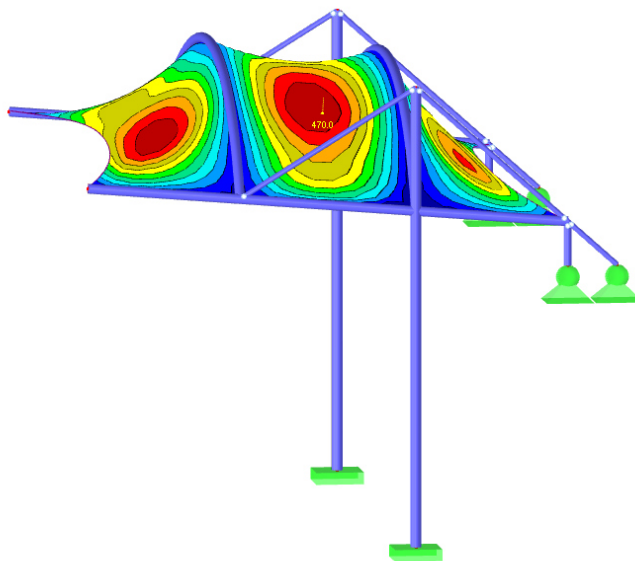
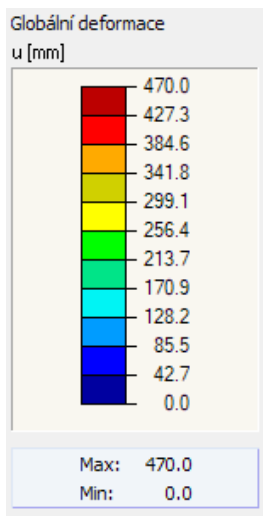
- Posouzení bylo provedeno na hlavním (největším) poli, jelikož zde napětí dosáhla maximálních hodnot.

$$\sigma_{Rk} = \frac{\sigma_m}{50 \cdot t} = \frac{7000}{50 \cdot 1,1} = 127,3 \text{ MPa}$$

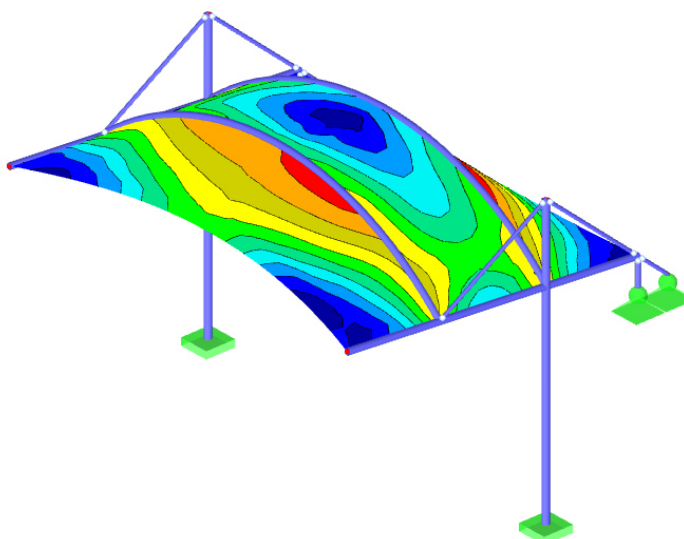
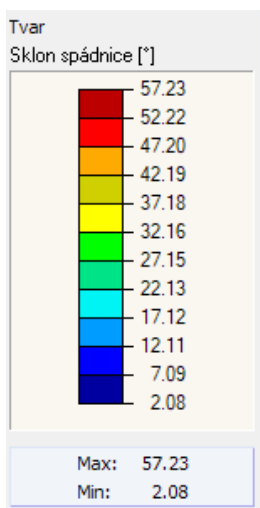
$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{Rk}}{\gamma_m} = \frac{127,3}{2,5} = 50,9 \text{ MPa}$$

$$\underline{\sigma_{Rd} = 50,9 \text{ MPa} \geq \sigma_1 = 32,5 \text{ MPa} \text{ VYHOVUJE}}$$

## 8.4.9 Posouzení membrány při MSP



Obrázek 102 – Deformace membrány v největším poli

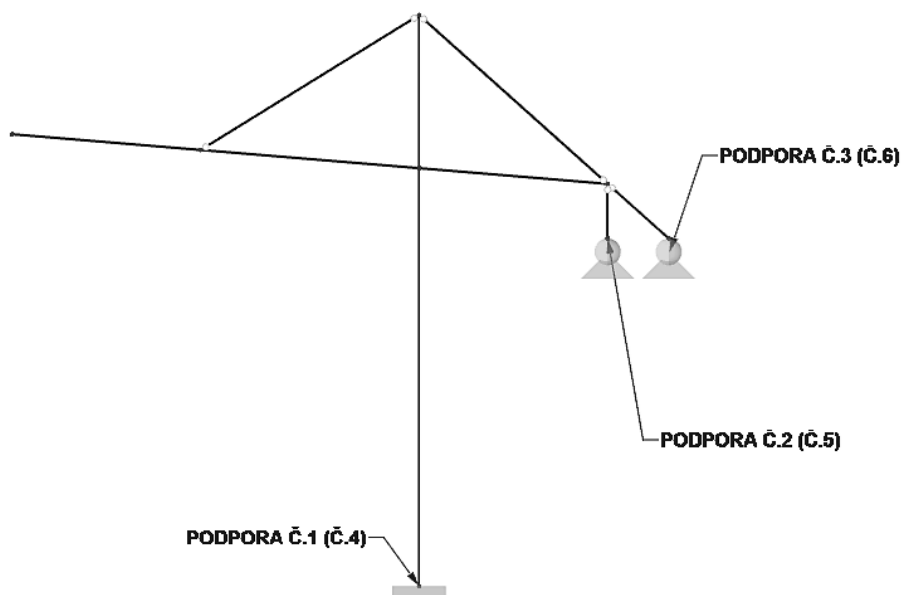


Obrázek 103 – Vykreslení sklonů spádnice při maximální deformaci membrány v největším poli

Maximální deformace membrány dosahuje hodnoty cca 470 mm. I při takto velké deformaci je však zachována funkce odvodu vody. To dokazuje i přiložený obrázek s vykreslenými sklony na deformovaném zastřešení. Minimální sklon jsou 2°, přičemž se jedná o relativně malé, lokální oblasti. Celkově lze tedy deformace vyhodnotit jako přijatelné.

#### 8.4.10 Reakce v kotvení

Na následujícím schématu je uvedené označení jednotlivých podpor. První číslo označuje podporu v typickém poli, číslo v závorce potom podporu v největším poli.



Obrázek 104 – Schéma číselování podpor

V tabulce jsou vypsány jednotlivé maximální hodnoty reakcí, kterých bylo dosaženo při MSÚ. Nejsou zde uvedeny výsledky vodorovných posouvajících sil ani kroutícího momentu okolo svislé osy podpory, protože jejich hodnoty dosahovaly maximálně 10-15 kN (kNm). Uvedené údaje ve sloupci „Rz“ zobrazují v plusových hodnotách svislé tahové reakce, v záporných pak reakce svislé tlakové. Veškeré podpory by musely být dimenzovány tak, aby bezpečně přenesly tato zatížení:

Číslo podpory	Rz [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	+330 / -710	+5 / -18	+16 / -18
2	+160 / -110	-	-
3	+9 / -25	-	-
4	+370 / -831	+8 / -36	+18 / -28
5	+190 / -125	-	-
6	+15 / -29	-	-

## **9 Výkresová část**

**9.1 Půdorys a podélný řez C-C‘**

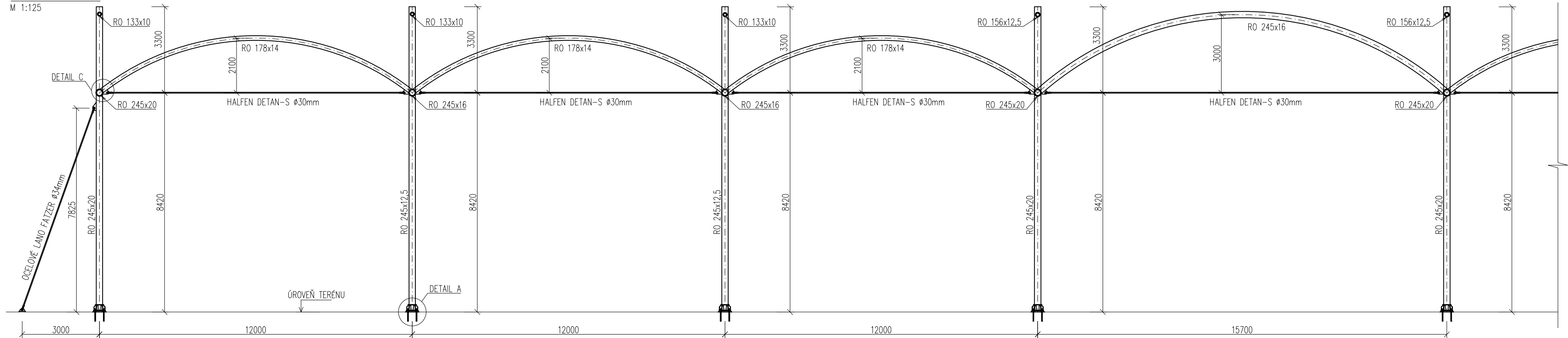
**9.2 Příčné řezy A-A‘, B-B‘**

**9.3 Detail A – schéma ukotvení sloupu**

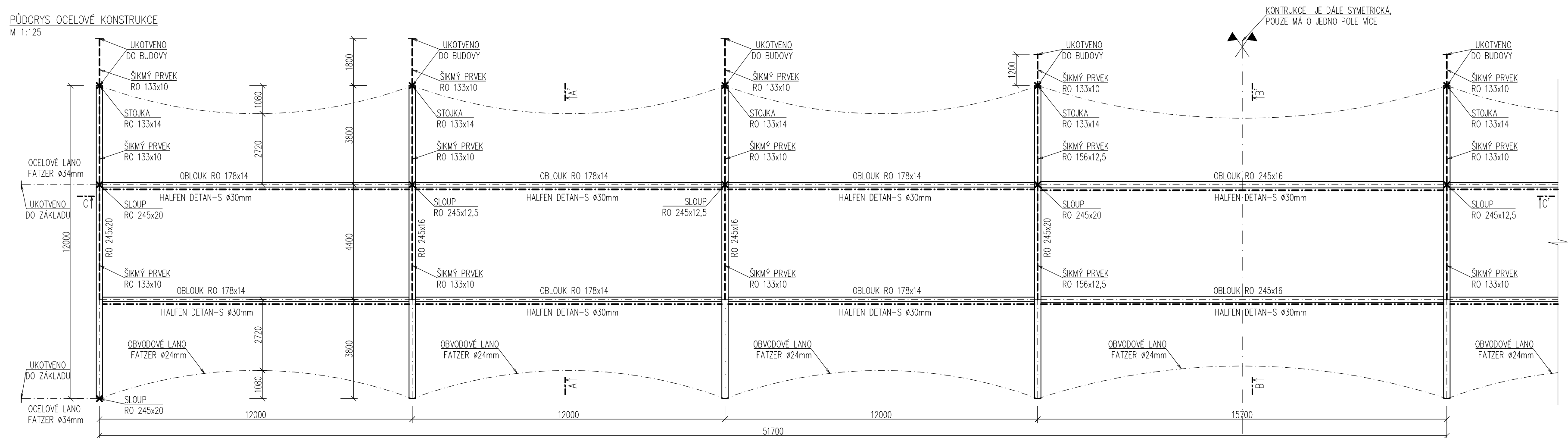
**9.4 Detail B, C – schéma montážního spoje nosníku, schéma ukotvení táhla**

**9.5 Detail D – příprava ocelové konstrukce pro připojení membrány**

PODÉLNÝ ŘEZ C-C'  
M 1:125



PŮDORYS OCELOVÉ KONSTRUKCE  
M 1:125

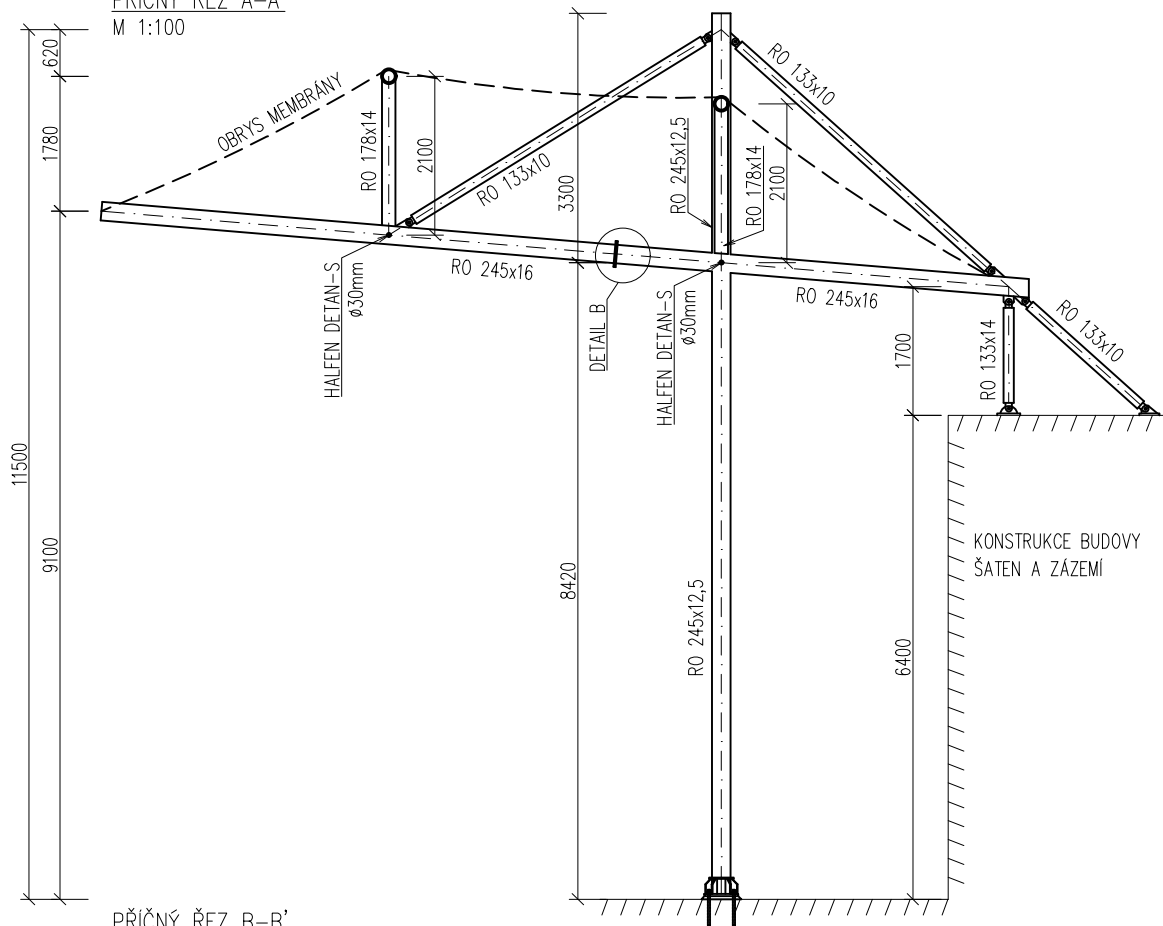


MATERIÁLY:  
 OCEL S235  
 TÁHLA – S520N  
 OBVODOVÁ A KOTEVNÍ LANA – NEREZ – DIN 1.4401

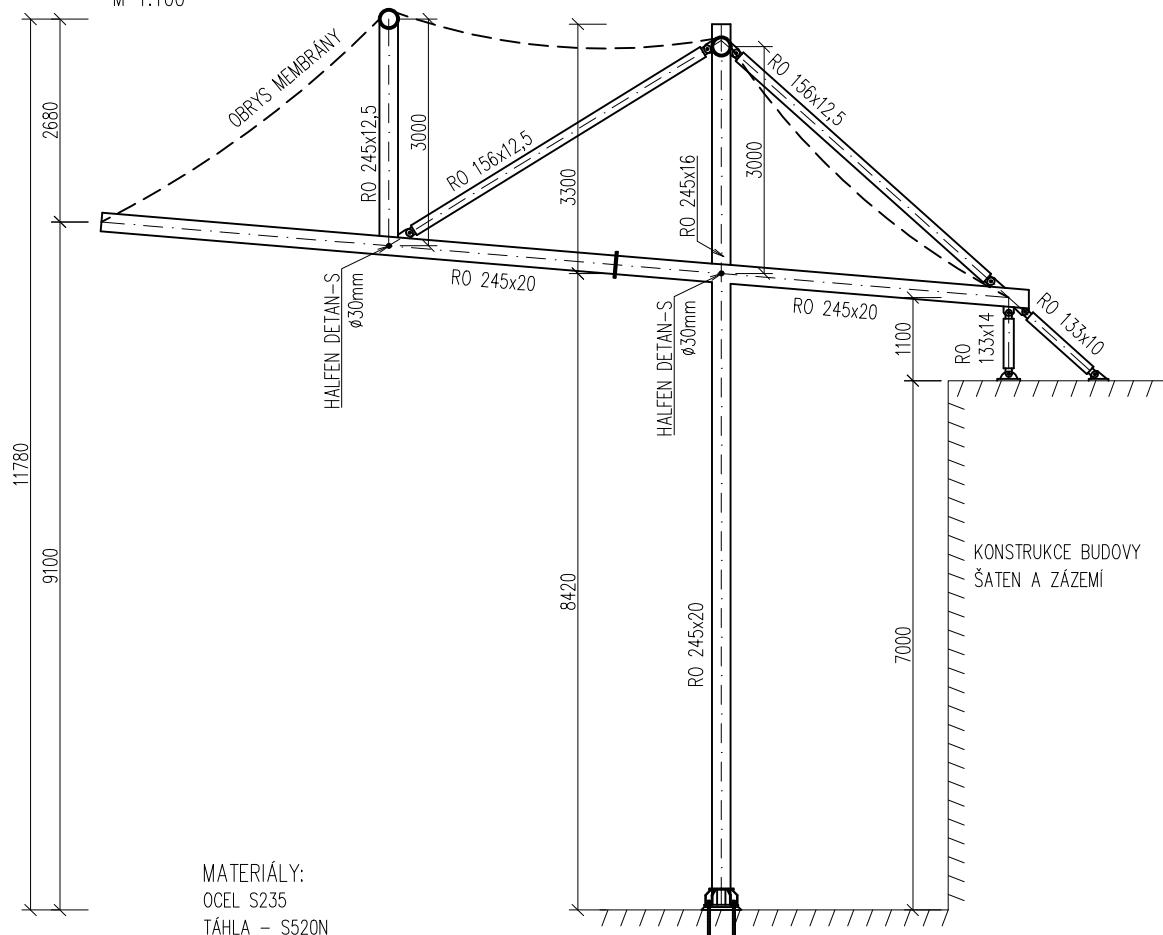
POZN.: SOUČÁSTI PRÁCE NENÍ ŘEŠENÍ ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ ANI KOTVENÍ DO BUDOVI

Příloha č.2

PŘÍČNÝ ŘEZ A-A'  
M 1:100



PŘÍČNÝ ŘEZ B-B'  
M 1:100



MATERIÁLY:  
 OCEL S235  
 TÁHLA - S520N  
 OBVODOVÁ A KOTEVNÍ LANA - NEREZ - DIN 1.4401

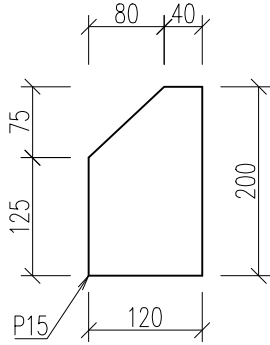
POZN.: SOUČÁSTÍ PRÁCE NENÍ ŘEŠENÍ ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ ANI KOTVENÍ DO BUDOVY

Příloha č.3

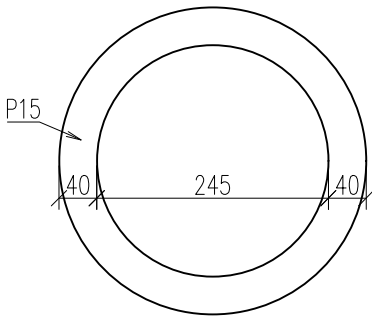
DETAIL A – UKOTVENÍ SLOUPU

M 1:8

VÝZTUHA P15

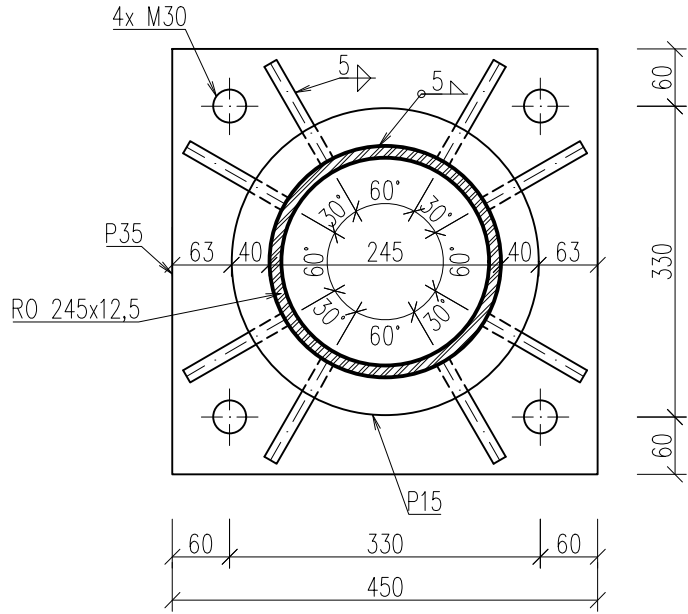


VÝZTUHA – "PRSTÝNEK"

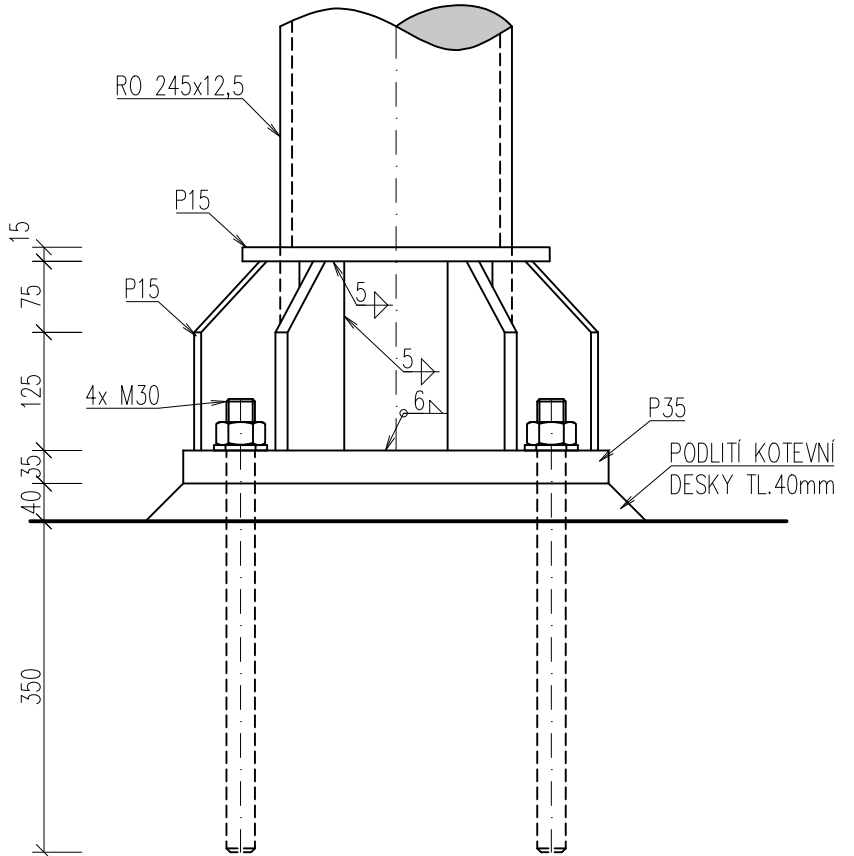


MATERIÁLY:  
 OCEL S235  
 KOTVY HILTI HIT-V 8.8 M30  
 KOTEVNÍ DESKA S355

PŮDORYS



POHLED ZE STRANY

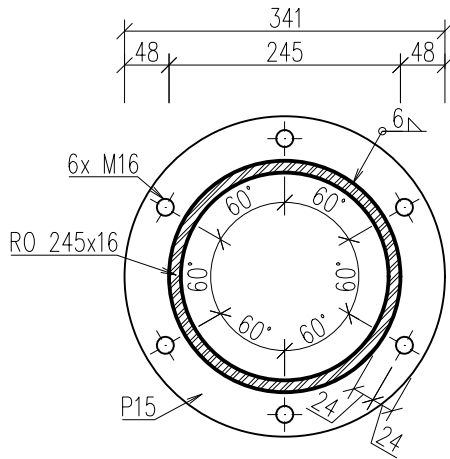


Příloha č.4

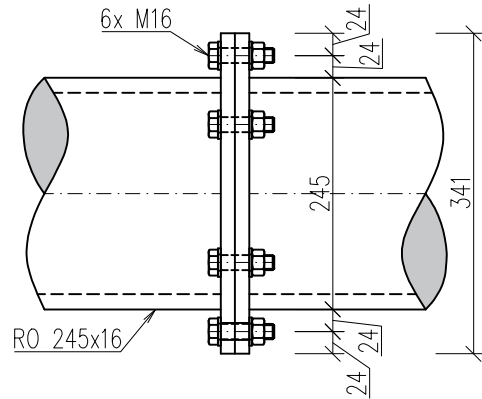
DETAIL B – MONTÁŽNÍ SPOJ NA NOSNÍKU

M 1:8

ŘEZ



POHLED ZE STRANY



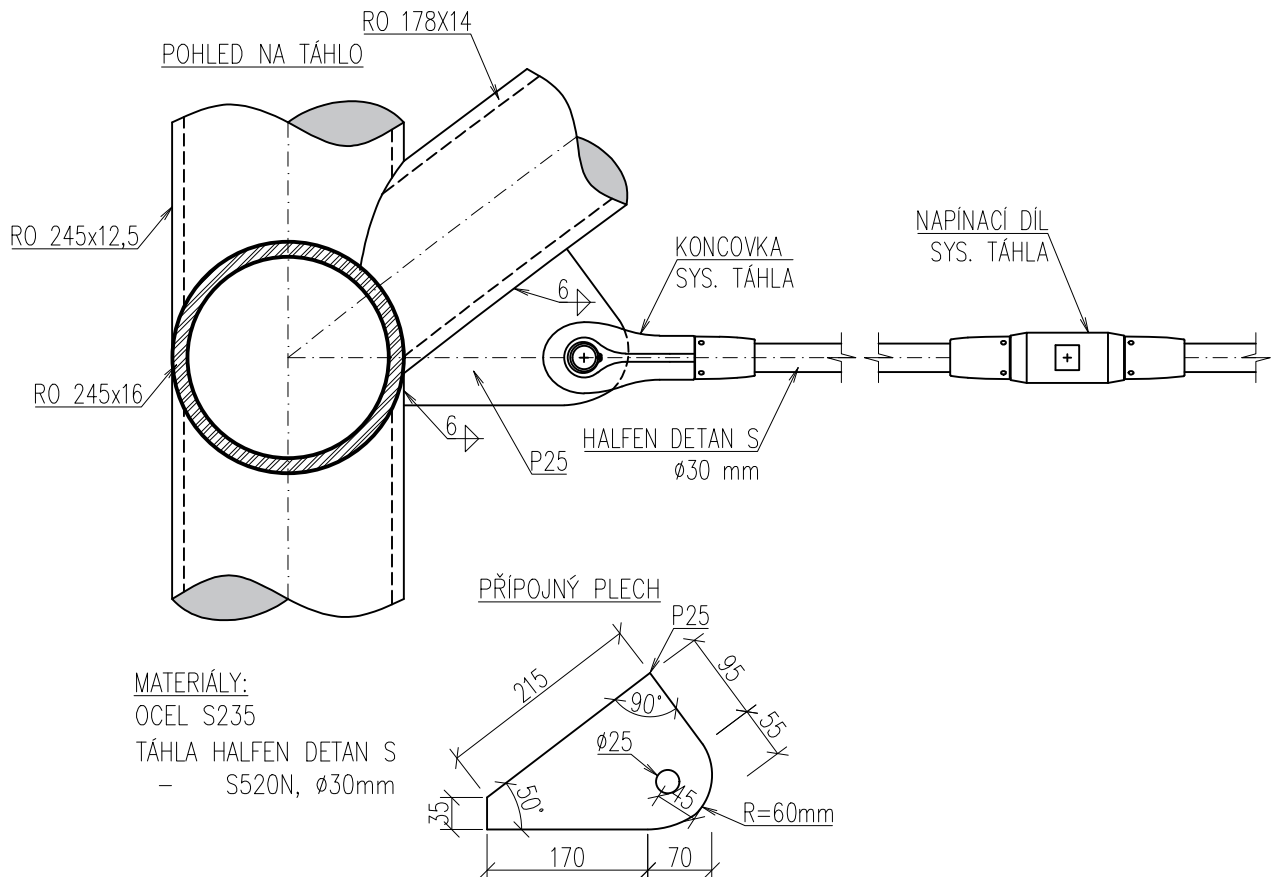
MATERIÁLY:

OCEL S235

ŠROUBY 8.8 M16

DETAIL C – KOTVENÍ SYSTÉMOVÝCH TÁHEL POD OBLUKY

M 1:8



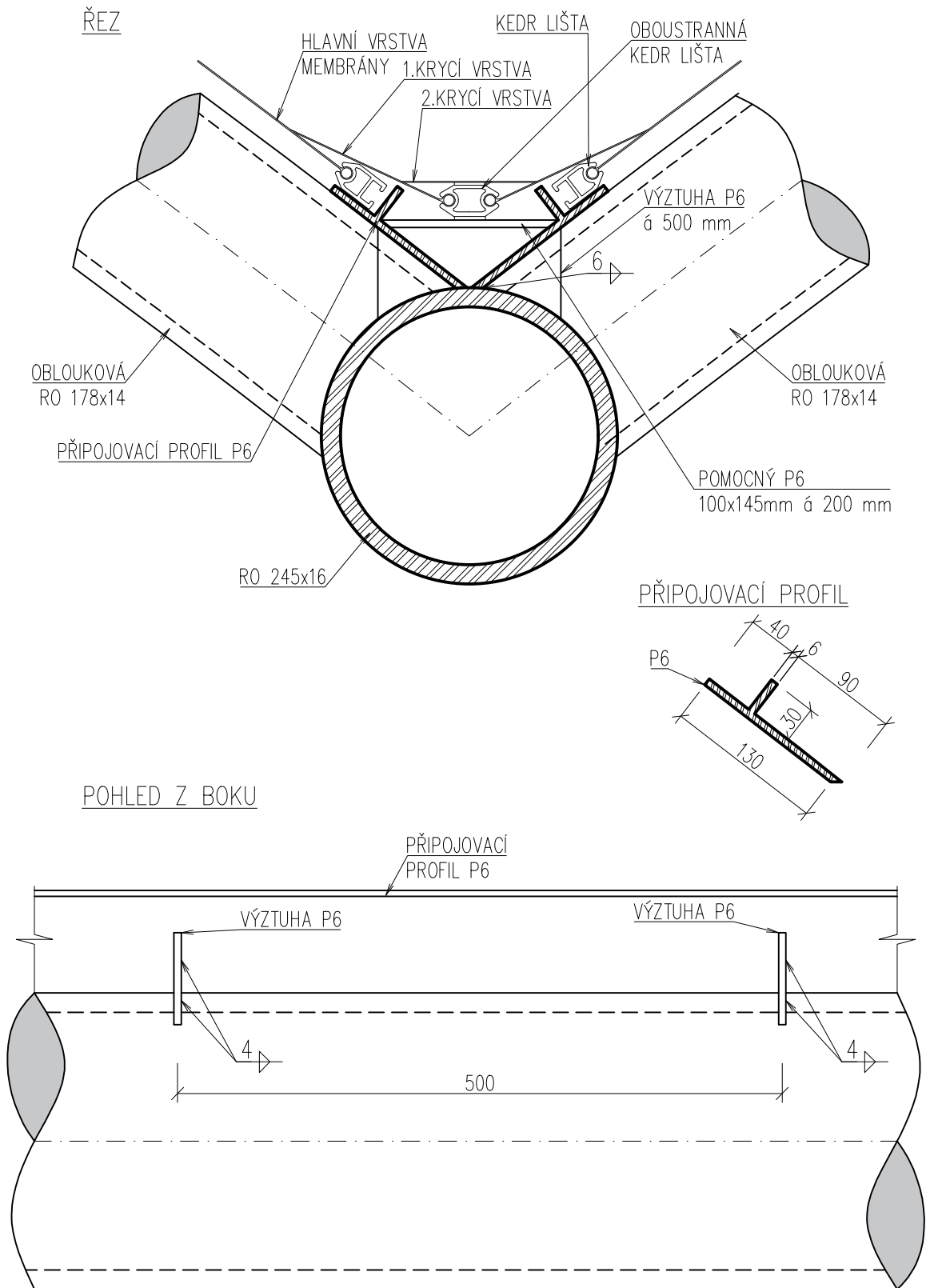
MATERIÁLY:

OCEL S235

TÁHLA HALFEN DETAN S  
– S520N,  $\phi$ 30mm



DETAIL D – PŘÍPRAVA NOSÍKU PRO PŘIPOJENÍ MEMBRÁNY  
M 1:5



## 10 Závěr

Membránové konstrukce získávají v poslední době na velké popularitě. Jejich lehkost a vzdušnost v kombinaci s různorodými tvarovými možnostmi z nich činí velmi atraktivní alternativu k běžným konstrukcím. Tato práce mi umožnila získat přehled o tom, jaké jsou dnešní možnosti membránových zastřešení, co všechno jejich návrh obnáší, a také jaká jsou jejich rizika či nedostatky. Velkým přínosem pro mne bylo i osvojení práce s novým softwarem.

V diplomové práci se podařilo dosáhnout vytyčených cílů. Byly vytvořeny možné tvarové varianty a zdůrazněny jejich výhody, nevýhody a požadavky na podpůrnou ocelovou konstrukci. Podrobněji byla řešena varianta oblouková, která je velmi hojně v praxi používána. Návrhu předcházela rešeršní část, která mi pomohla se zorientovat jak po stránce teoretické, tak i praktické ve smyslu materiálových možností a obecně principu navrhování tohoto typu staveb.

Výsledný návrh zastřešení tribuny byl velmi ovlivněn náročnými klimatickými podmínkami dané lokality. Rozpětí 12 m není samo o sobě problematické, v kombinaci s velkým zatížením sněhem a větrem se však stává poměrně komplikované. Bylo nutné použít prvky o velkých průřezech a také velkých tloušťkách stěn. Ve finálním řešení se podařilo dodržet téměř veškeré podmínky dané zadáním, především zmíněné rozpětí a náročné klimatické prostředí. Oproti studii byl zvolen jiný tvar. Hlavním důvodem byla nízká křivost původního řešení. Dle mého názoru je výsledné tvarové uspořádání, kdy je membrána pnutá přes oblouky a na koncích ukončována lanem, mnohem vhodnějším řešením.

Závěrem je vhodné zmínit, že navrhování membránových konstrukcí má svá specifika a v praxi se jím zabývají většinou specializované firmy, které mnohdy zajišťují i případnou realizaci.

## 11 Zdroje

### 11.1 Seznam použité literatury

- 1) Sportovní areál ve Žďáře nad Sázavou. In: *Mozkyt.cz* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.mozkyt.cz/projekt/vsechny/sportovni-areal-ve-zdare-nad-sazavou/>
- 2) SERVÍT, Radim a Jiří ŠEJNOHA. *Teorie pružnosti a plasticity II*. Praha: SNTL, 1984.
- 3) Výpočet podle 2. řádu. In: *Finesoftware.eu* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.finesoftware.eu/help/finec/cs/vypocet-podle-2-radu-01/>
- 4) NĚMEC, Ivan, Miroslav TRCALA a Václav REK. *Nelineární mechanika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5519-1.
- 5) Šuchovova televizní a rozhlasová věž na moskevské Šabolovce. In: *Idnes.cz* [online]. 20 March 2014 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/moskva-suchovova-vez.A140320\\_120939\\_zahranicni\\_aha](https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/moskva-suchovova-vez.A140320_120939_zahranicni_aha)
- 6) Olympic Stadium Munich. In: *Pixabay.com* [online]. 16 December 2014 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/olympic-stadium-munich-stadium-565522/>
- 7) KOPŘIVA, Miloš, Michal NETUŠIL, Henri ACHTEN a Zdeněk HIRNŠAL. *Membránová architektura*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05693-6.
- 8) FEKT Brno, objekt T12. In: *Archtex.cz* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.archtex.cz/cs/fekt.html?f=2>
- 9) Fabric Roof by Tensile Structure Manufacturer. In: *Aakrutitenso.com* [online]. 2016 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.aakrutitenso.com/fabric-roof-food-court-in-amritsar-punjab.htm>
- 10) King's Mill Hospital. In: *Jjcarter.com* [online]. 2015 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.jjcarter.com/case-studies/kingsmill-hospital>
- 11) VECKO, Jan. *Návrhové limity jednovrstvých membránových polí*. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- 12) Alte Residenz, Salzburg: Membrandach aus PVC-PES-Gewebe und ETFE Folie. In: *Membranbau-to.de* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.membranbau-to.de/de/projekt-galerien/alte-residenz-salzburg-membrandach-aus-pvc-pes-gewebe-und-etfe-folie>

- 13) Our technologies. In: *Sergeferrari.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.sergeferrari.com/serge-ferrari/our-technologies>
- 14) ISO accredited laboratory. In: *Makmax.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.makmax.com/about/randd.html>
- 15) Alukederschienne blank 21x50 mm starke Ausführung. In: *Bstarke.de* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.bstarke.de/index.php/alukederschienne-2070.html>
- 16) Corner Plate Types. In: *Tensaform.com* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.tensaform.com/en/technical-informations/detailings/corner-plate-types/>
- 17) Design Details. In: *Birdair.com* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://www.birdair.com/resources/design-details>
- 18) Detailings. In: *Tensaform.com* [online]. [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://www.tensaform.com/en/technical-informations/detailings/membrane-fixing-types/>
- 19) ALEŠ, Vaněk. Přípoj membrány. Praha, 2019.
- 20) Centre national de natation en construction. In: *Commons.wikimedia.org* [online]. 26 September 2006 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Watercube.jpg>
- 21) High-load Surface Steel Cable For Industrial Applications: Open Spiral Strand. In: *Archiexpo.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.archiexpo.com/prod/redaelli/product-61094-1654218.html>
- 22) Rope Fittings. In: *Bdir.com* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.bdir.com/resources/rope-fittings>
- 23) NETUŠIL, Michal. Ocelová konstrukce jako nedílná součást membránové architektury. In: *Tzb-info.cz* [online]. ČVUT Praha, 2016, 11 April 2016 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/14026-ocelova-konstrukce-jako-nedilna-soucast-membranove-architektury>
- 24) Vysoká pec, Ostrava-Vítkovice: Největší mobilní membránové zastřešení v ČR. In: *Archtex.cz* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.archtex.cz/cs/vitkovice.html?f=1>
- 25) Reaktivace vysoké pece č.1 v NKP Dolní oblast Vítkovic. In: *Excon.cz* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.excon.cz/reference/reaktivace-vysoke-pece-c1-v-nkp-dolni-oblast-vitkovic>

- 26) Olympic Stadium. In: *Berlin.de* [online]. 19 November 2015 [cit. 2019-11-23].  
Dostupné z: <https://www.berlin.de/en/attractions-and-sights/3560924-3104052-olympic-stadium.en.html>
- 27) Olympiastadion Berlin Führung der Extraklasse. In: *Icke.info* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.icke.info/olympiastadion-berlin-fuehrung-der-extraklasse/>
- 28) Olympiastadion Berlin – Tribünenüberdachung. In: *Bauforumstahl.de* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://bauforumstahl.de/bauprojekte/olympiastadion-berlin-tribuenenueberdachung/>
- 29) Detail of the stadium's roof. In: *Pbase.com* [online]. 15 February 2008 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.pbase.com/phsan/image/93476391>
- 30) Lord's Cricket Ground - Warner Stand. In: *Hess-timber.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.hess-timber.com/en/references/detail/lords-cricket-ground-warner-stand/>
- 31) Lord's Warner Stand. In: *Americanhardwood.org* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.americanhardwood.org/index.php/en/library/image-gallery/lords-warner-stand-2>
- 32) Lords Cricket Ground – Fabric Roof Installation. In: *Can.ltd.uk* [online]. January 2017 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.can.ltd.uk/casestudies/lords-cricket-ground-fabric-roof-installation>
- 33) Lord's Cricket Ground. In: *Lanarosrl.it* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.lanarosrl.it/en/cricket.php>
- 34) TSV Gersthofen. In: *Sattler-global.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.sattler-global.com/textile-architecture/cable-structure-1481.jsp>
- 35) Abenstein Arena. In: *Stadionwelt.de* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: [https://www.stadionwelt.de/sw\\_stadien/index.php?stadion=abenstein-arena&folder=sites&site=fotos&id=5210&page=2](https://www.stadionwelt.de/sw_stadien/index.php?stadion=abenstein-arena&folder=sites&site=fotos&id=5210&page=2)
- 36) Tensile Stadium Structure. In: *Tensilecarparking.in* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://tensilecarparking.in/stadium-tensile-structure.html>
- 37) Grandstand Roofing TSV Gersthofen. In: *Pinterest.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/569705421595073041/>
- 38) Amphitheater Elspe. In: *Mehler-textnologies.com* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.mehler-textnologies.com/casestudies/amphitheater-elspe/>

- 39) Detan Stabsysteme. In: *Halfen.com* [online]. 2016 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: [http://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/tensionrodsystem/DT\\_16.1.pdf](http://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/tensionrodsystem/DT_16.1.pdf)
- 40) SOKOL, Zdeněk a František WALD. *Ocelové konstrukce: tabulky*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06032-2.
- 41) MACHÁČEK, Josef. *Navrhování ocelových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8 ; Navrhování hliníkových konstrukcí : příručka k ČSN EN 1999-1*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-86-3.
- 42) KRÁL, Jaromír. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem: příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-05-3.
- 43) HOLICKÝ, Milan, Jana MARKOVÁ a Miroslav SÝKORA. *Zatížení stavebních konstrukcí: příručka k ČSN EN 1991*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-89-4.
- 44) STRANGHÖNER, Natalie, Jörg UHLEMANN a spol. *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Office of the European Union, 2016. ISBN 978-92-79-54702-7
- 45) FORSTER, Brian a Marijke MOLLAERT. *European design guide for tensile surface structures*. TensiNet, 2004. ISBN 90-8086-871-X.
- 46) *Příklady použití membrán a fólií v architektuře: sborník 1. mezinárodní membránové konference: 23.11. 2012, Praha*. Editor Aleš VANĚK. Praha: ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05278-5.
- 47) *Tensile fabric structures: design, analysis, and construction*. Editor Craig G. HUNTINGTON. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013. ISBN 978-0-7844-1289-3.
- 48) SEIDEL, Michael. *Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction*. Berlin: Ernst, c2009. ISBN 978-3-433-02922-0.

## 11.2 Seznam použitých norem

- ČSN EN 1990 (730002): *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- ČSN EN 1991-1-3 (730035): *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- ČSN EN 1991-1-4 (730035): *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- ČSN EN 1991-1-5 (730035): *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- ČSN EN 1993-1-1 (731401): *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

## 11.3 Seznam použitého softwaru

- Dlubal RFEM v5.20.02 + RF-FORM-FINDING modul
- Formfinder 5.0 (beta)
- AutoCAD 2018
- MS Office 2016