

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

# MEMBRÁNY NAD KRUHOVÝM A ELIPTICKÝM PŮDORYSEM

PRESTRESSED MEMBRANES ABOVE CIRCULAR AND ELLIPTICAL PLAN

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ING. PAVLÍNA JUCHELKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

PROF. ING. JIŘÍ STRÁSKÝ, DSC.

BRNO 2013

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Předpjatá membrána, lano, visutá lanová střecha, kruhový půdorys, eliptický půdorys, fotbalový stadion

## **KEY WORDS**

Prestressed membrane, tendon, suspension cable roof, circular plan, elliptical plan, football stadium

Práce je uložena na Ústavu betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

**OBSAH**

1 ÚVOD.....	5
2 REŠERŠE .....	6
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	7
4 STUDIJNÍ KONSTRUKCE MEZIKRUŽÍ.....	8
4.1 Popis konstrukce .....	8
4.2 Postup výstavby .....	9
4.3 Výpočetní model .....	10
4.4 Výchozí stav.....	10
4.5 Samokotvený systém.....	12
4.6 Dotvarování a smršťování.....	13
5 STUDIE OPTIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ ELIPSY .....	15
5.1 Úvod.....	15
5.2 Vztah mezi křivostí a tvarem zatížení.....	15
5.3 Zatížení dvou elips .....	16
6 ZASTŘEŠENÍ FOTBALOVÉHO STADIONU .....	17
6.1 Úvod.....	17
6.2 Popis konstrukce .....	17
6.3 Výchozí stav.....	19
6.4 Porovnání optimálního návrhu s nevhodným .....	21
7 ZÁVĚR.....	23
7.1 Studijní konstrukce mezikruží .....	23
7.2 Optimální zatížení elipsy .....	23
7.3 Zastřešení sportovního stadionu.....	24
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	26
CURRICULUM VITAE.....	29
ABSTRACT .....	30



## 1 ÚVOD

Visuté lanové střechy jsou konstrukce, jejichž použití ve stavební praxi má nezastupitelné místo, a to nejen kvůli značné variabilnosti v typech zastřešení a možnosti překlenout plochy značných rozměrů, ale také díky jejich poměrně jednoduché výstavbě nevyžadující skruž a značné úspoře materiálů. Patří mezi konstrukce plně odpovídající dnešní moderní době, kdy se neplní pouze funkční požadavky zastřešení, ale je také kladen důraz na estetické působení a začlenění do urbanistického celku. Takovéto stavby se pak často stávají symboly měst a podávají svědectví o vyspělosti stavebního inženýrství v dané společnosti.

Disertační práce se zabývá rotačně symetrickými visutými lanovými střešními konstrukcemi nad kruhovým, resp. eliptickým půdorysem, kdy střešní plášť je tvořen předpjatou betonovou membránou. V první, rešeršní části práce podává ucelený pohled na řešenou problematiku. Je zde uveden souhrn odborné literatury zabývající se problematikou nejen lanových střešních konstrukcí, ale také řešením samotného lana. Dále jsou popsány základní typy konstrukčních systémů s ohledem na způsoby členění dle různých hledisek. Konstrukce, které jsou předmětem práce, jsou pak do jednotlivých kategorií začleněny. Rovněž jsou stručně zmíněny materiály, které se pro visuté konstrukce používají, a je popsáno možné zatížení. Nakonec jsou uvedeny z pohledu autorky zajímavé realizované rotačně symetrické visuté střešní konstrukce nad kruhovým půdorysem z hlediska historického vývoje. Na základě shrnutí řešené problematiky jsou stanoveny cíle, které jsou postupně naplněny v druhé, stěžejní části práce.

Druhá část disertační práce je rozdělena do následujících 3 kapitol:

### **Kapitola 4 – studijní konstrukce mezikruží (metodika výpočtu)**

Pro stanovení metodiky výpočtu rotačně symetrické visuté lanové střechy byla zvolena studijní konstrukce mezikruží nad kruhovým půdorysem o průměru 70 m, pomocí níž jsou popsány teoretické základy potřebné k analýze tohoto typu konstrukce.

### **Kapitola 5 – studie optimálního zatížení elipsy**

Hlavním cílem práce je vytvořit funkční konstrukční systém vycházející ze studijní konstrukce mezikruží, který může být použit pro zastřešení tribun sportovního stadionu. Protože většina hřišť zaujímá obdélníkový půdorys, je vhodné adaptovat kruhový půdorys zastřešení na eliptický. Tím obvodové prstence přejdou do tvaru uzavřených eliptických křivek. Proto byla provedena studie optimálního zatížení elipsy v rovině křivky, kterou se zabývá kapitola 5.

### **Kapitola 6 – zastřešení sportovního stadionu (aplikace)**

Zastřešení sportovního stadionu je provedeno ve dvou variantách – nad kruhovým a eliptickým půdorysem. Pomocí studijní konstrukce mezikruží je zformulována metodika statické analýzy tohoto typu konstrukcí, která je dále na zastřešení stadionu aplikována.

## 2 REŠERŠE

Použití lana jako hlavního nosného prvku konstrukce se stalo ve stavební praxi poměrně běžnou záležitostí, a to jak v mostním, tak v pozemním stavitelství. Díky tomu existuje poměrně rozsáhlý soubor odborné literatury zabývající se problematikou statické analýzy nejen samotného lana, ale také celých lanových konstrukčních systémů.

V současné době se visuté střechy často používají pro zastřešení tribun sportovních stadionů, avšak tradiční stavební materiály (tzn. ocel a beton), dříve používané jako střešní plášť, se nahrazují především vysokopevnostními tkaninami, které jsou upnuty v lanové síti. Tento konstrukční systém umožňuje vytvořit velmi rozmanité tvary dle představ architektů a stavebních inženýrů. Otázkou však zůstává, zda to není z hlediska klimatických zatížení (tíha sněhu a sání větru) již příliš extrémní odlehčení konstrukce. Pro ilustraci je zde uvedeno zastřešení sportovního stadionu postaveného v posledních letech – Green Point Stadium v Kapském městě v Jihoafrické republice (viz *Obr. 2.1*).

Stadion projektovala známá projekční kancelář Schlaich Bergermann und Partner a byl postaven v letech 2007–2010. Vnější rozměry stadionu jsou  $290 \times 265$  m. Zastřešení stadionu je tvořeno záměrně zvlněným vnějším prstencem, jehož křivost má vytvářet protipól k Stolové hoře, příhradovými nosníky a skleněnými panely. Konstrukční systém se inspiroje již dříve postavenými konstrukcemi, kdy mezi dvěma obvodovými prstenci jsou radiálně vedena lana nesoucí střešní plášť. V případě kapského stadionu nosné kabely nesou vyložené příhradové nosníky délky přibližně 60 m, mezi jejichž horními pásnicemi je vedena lanová síť.

Střešní plášť se skládá ze dvou vrstev. Horní vrstva je z panelů z laminátového bezpečnostního skla uložených do lanové sítě a je to vůbec poprvé, kdy bylo sklo jako materiál pro střešní plášť sportovního stadionu použito. Tato vrstva zvyšuje tíhu zastřešení a tím působí především proti vztlaku větru. Ve spodní části je mezi radiální kabely upnuta průsvitná textilní membrána na bázi skleněných vláken (PVC), jejímž účelem je vytvořit vyrovnaný a hladký podhled a tím vylepšit nejen vizuální vzhled, ale také zlepšit akustické vlastnosti a klimatické podmínky uvnitř stadionu.



*Obr. 2.1: Stadion Green Point v Kapském městě v listopadu 2009 (převzato z [26])*

### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tématem předložené disertační práce jsou visuté lanové konstrukce nad kruhovým a eliptickým půdorysem. Kruhové střechy byly až doposud poměrně často realizovány a jejich statické působení a konstrukční řešení je uvedeno v mnoha odborných publikacích. Poznatky uvedené v odborné literatuře slouží jako odrazový můstek pro dosažení stanovených cílů vědecké práce.

Z uspořádání střechy půdorysně ve tvaru mezikruží, tvořící celistvý pás, je patrné její možné použití, a to jako zastřešení tribun hlediště sportovního stadionu. Díky tvaru hrací plochy, která většinou bývá obdélníkového tvaru, se však jako vhodnější varianta zastřešení jeví konstrukce eliptického půdorysu, která se lépe přizpůsobuje tvaru zastavěné plochy, a nevzniknou tak zbytečná hluchá místa. Konstrukce nad eliptickým (či oválným) půdorysem doposud byly realizovány velmi zřídka a většinou se tvar elipsy blížil ke kružnici. Hlavním cílem disertační práce je proto vyvinout funkční statický a konstrukční systém střechy nad eliptickým půdorysem pro libovolně zvolenou velikost a tvar elipsy, který by bylo možné efektivně využít pro zastřešení obdélníkových tvarů sportovišť. Pro vývoj a optimalizaci eliptické konstrukce jsou stanoveny jednotlivé dílčí cíle, které by postupně měly vést k dosažení hlavního cíle předložené práce.

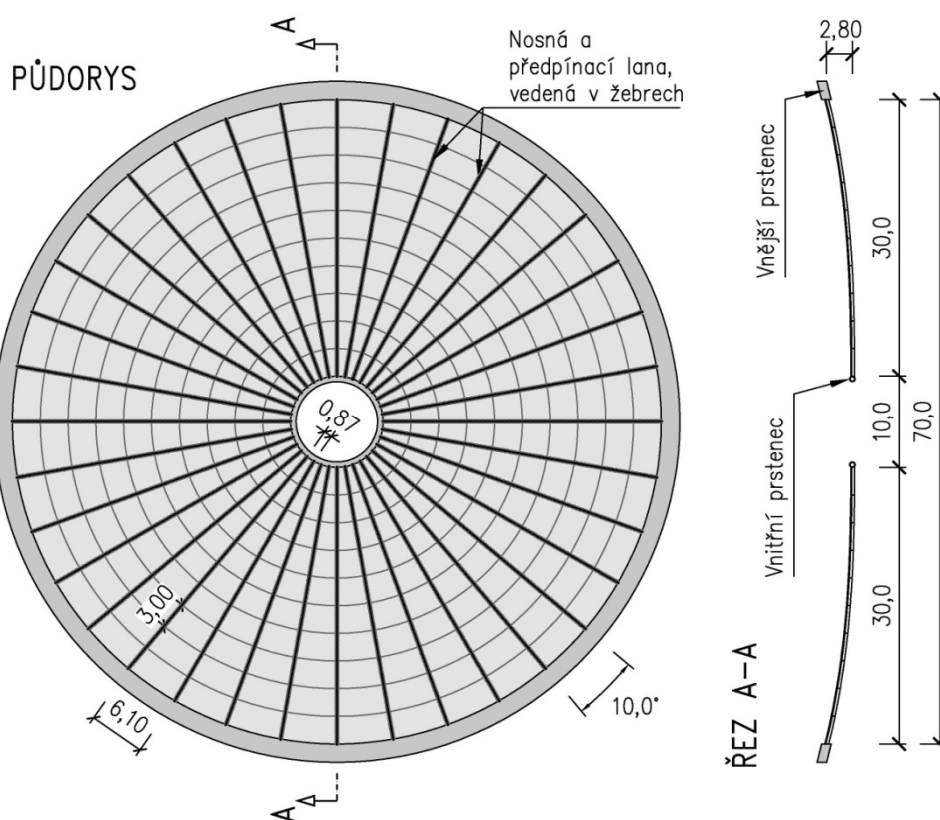
Dílčí cíle disertační práce:

1. Prvním krokem práce je vytvoření studijní visuté lanové konstrukce tvaru mezikruží, která bude sloužit především k pochopení statického působení tohoto typu zastřešení, které je popsáno v odborné literatuře, a to pomocí analýzy konkrétních výsledků z výpočetních modelů vytvořených v MKP programu. Rovněž bude provedena analýza reologických účinků, protože se jedná o velmi atypickou konstrukci a reologie visutých lanových střech byla doposud opomíjena.
2. Odezva kružnice na působící zatížení v rovině křivky je obecně známá a podrobně popsána. Zatížení a odezva eliptické křivky se však v odborných publikacích téměř nevyskytuje vzhledem k složitému analytickému řešení, které neexistuje v uzavřeném tvaru. Proto dalším krokem bude studie optimálního zatížení elipsy s ohledem na její minimální ohybové namáhání a vývoj praktického postupu pro stanovení odezvy elipsy na působící zatížení tak, aby jej bylo možné použít v běžně stavební praxi.
3. Poté budou získané poznatky z analýzy studijní konstrukce mezikruží a ze studie optimálního zatížení uzavřených křivek aplikovány na konstrukci velkého rozpětí tvořící zastřešení tribun hlediště zvoleného sportovního stadionu, a to ve dvou variantách – nad kruhovým a eliptickým půdorysem. V závěru pak budou obě výsledné konstrukce porovnány a diskutovány výhody a nevýhody obou variant.

## 4 STUDIJNÍ KONSTRUKCE MEZIKRUŽÍ

### 4.1 POPIS KONSTRUKCE

Pro popsání způsobu výpočtu visutých lanových střeš nad kruhovým půdorysem byla navržena studijní konstrukce ve tvaru mezikruží o vnějším průměru 70 m. Studovaná rotačně symetrická konstrukce je tvořena membránou z lehkého konstrukčního betonu, která je nesena, a následně také předepnuta, lany radiálně vedenými mezi obvodovými prstenci. Základní rozměry konstrukce jsou zobrazeny na **Obr. 4.1**. Půdorysný průměr vnějšího prstence je 70 m a vnitřní prstenec zaujímá průměr 10 m. Šířka pásu betonové membrány je tedy 35 m. Vzájemná poloha prstenců ve svislém směru je 2,8 m (průvės membrány). Radiálně vedená lana, která svírají konstantní středový úhel o velikosti  $10^\circ$ , rozdělují membránu na 36 řad prefabrikovaných segmentů. Tvar segmentů v příčném řezu je zobrazen na **Obr. 4.2**. Jedná se o desku tloušťky 100 mm, která je na radiálních hranách opatřena žebry výšky 400 mm, ve kterých jsou lana. Půdorysné rozmístění lan přímo souvisí s rozměry betonových segmentů, jejichž délka se pohybuje v rozmezí od 0,87 m do 6,1 m. Šířka segmentů je konstantní a má velikost 3,0 m.



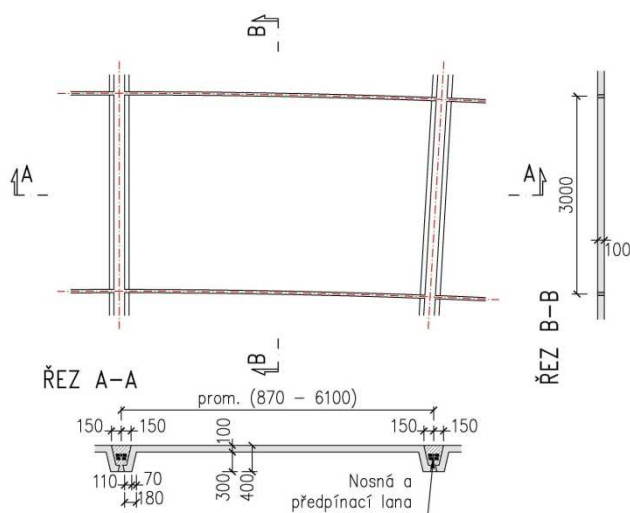
**Obr. 4.1:** Schéma uspořádání studijní konstrukce mezikruží

Lana plní v konstrukci dvojí funkci. První skupinou jsou tzv. nosná lana, která jsou vedena mezi obvodovými prstenci a na která se při výstavbě pokládají prefabrikované segmenty. Každé žebro obsahuje 6 nosných lan. Druhou skupinou

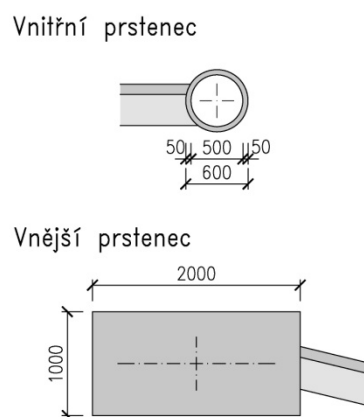


lan jsou lana předpínací, kterými je do již zmonolitněné konstrukce vnesena tlaková rezerva, díky níž nevznikají v betonové membráně od proměnných zatížení nežádoucí tahová napětí. Každé žebro opět obsahuje 6 předpínacích lan.

Konstrukce tvoří tzv. *samokotvený systém*, ve kterém jsou vodorovné síly z kotvení lan přenášeny do obvodových prstenců a vyvozují v nich tlaková (vnější prstenec) a tahová (vnitřní prstenec) namáhání. Ze způsobu namáhání vyplývá volba materiálů, a proto vnější prstenec je navržen jako železobetonový obdélníkový průřez a vnitřní prstenec tvoří trubka z konstrukční oceli (**Obr. 4.3**).



**Obr. 4.2:** Rozměry prefabrikovaných panelů



**Obr. 4.3:** Rozměry průřezů vnitřního a vnějšího prstence

## 4.2 POSTUP VÝSTAVBY

Ze statického hlediska lze výstavbu konstrukce rozdělit do dvou hlavních fází, které obsahují několik dílčích kroků. Hraničním stavem mezi hlavními fázemi výstavby je tzv. *výchozí stav*, od kterého by měly začínat všechny výpočty.

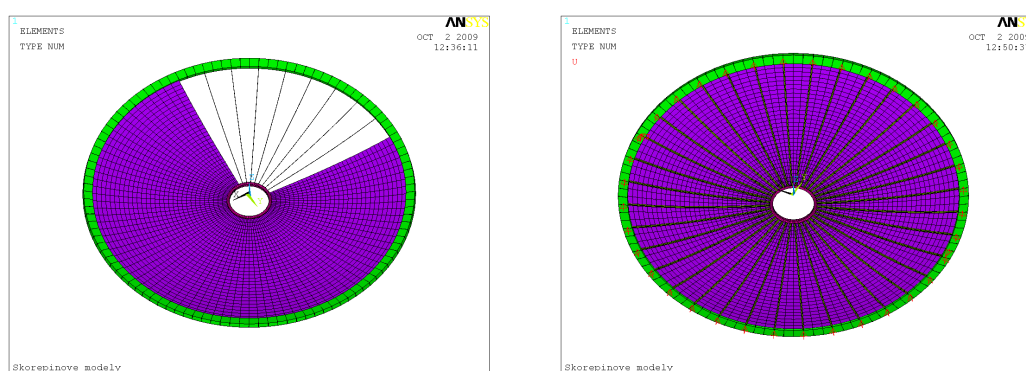
V 1. fázi výstavby je provedena betonáž vnějšího prstence a montáž vnitřního prstence. Poté jsou mezi oběma obvodovými prstenci natažena nosná lana, na která je následně vnitřní prstenec zavěšen do požadované polohy. V dalším kroku jsou na lana pokládány a upevňovány betonové segmenty. Následně se do žeber osadí předpínací lana. Protože se tato fáze nachází před výchozím stavem, jsou při statické analýze jednotlivé dílčí kroky prováděny zpětně, tedy dochází k odlehčování konstrukce a konstrukce staticky působí jako zatížené *lano*.

V 2. fázi výstavby dojde k zalití spár mezi segmenty navzájem a také krajních spár u obvodových prstenců. Po dosažení dostatečné pevnosti výplně spár jsou dopnuta předpínací lana v žebrech na napětí cca 1100 MPa tak, aby byla do membrány vnesena tlaková rezerva, která eliminuje tahová napětí v betonu od proměnných zatížení. V této fázi výstavby již konstrukce působí jako *předpjatá membrána* a ve statické analýze jsou jednotlivé dílčí kroky prováděny dopředně.

### 4.3 VÝPOČETNÍ MODEL

Statická analýza navržené předpjaté membrány je provedena pomocí prostorového výpočetního modelu vytvořeného v programu ANSYS (*Obr. 4.4*). Vzhledem k charakteru konstrukce jsou výpočty prováděny geometricky nelineárně plnou Newton-Raphsonovou metodou. V modelu je zohledněn postup výstavby konstrukce a jsou použity standardní typy prutových a deskostěnových prvků.

Konstrukce je podepřena po obvodě vnějšího prstence v místech kotvení lan tuhými svislými vazbami a pružnými vodorovnými vazbami. Tím je umožněno volné stlačení vnějšího prstence účinkem normálové síly, vyvolané radiálním účinkem horizontálních složek kotevních sil z lan (viz samokotvený systém). Tento způsob podepření reprezentuje uložení zastřešení prostřednictvím ložisek.



**Obr. 4.4:** Výpočetní model B.1 s plošnými prvky  
(vlevo model bez části segmentů, vpravo pohled zespodu na žebra a podpory)

### 4.4 VÝCHOZÍ STAV

Prostorový tvar membrány je dán průvševými křivkami lan, která jsou zatížena vlastní tíhou konstrukce. Z hlediska statické analýzy lze průvševé křivky lan získat nalezením tzv. *výchozího stavu* konstrukce. Jedná se o takovou fázi výstavby konstrukce, kdy betonové panely jsou volně zavěšeny na nosná lana a vlastní tíha konstrukce je v rovnováze s radiálními účinky lana. Od tohoto stavu by měly začínat všechny výpočty předpjaté membrány. Řešením výchozího stavu je určení průvševé křivky a napětí v laně od působícího zatížení. Po zadání stanovené geometrie lana a jeho napjatosti do výpočetního modelu a provedení výpočtu se správnost řešení projeví tím, že na konstrukci od působící vlastní tíhy budou svislé deformace blízké nule. Zatížení a radiální síly jsou tedy v rovnováze. Výchozím stavem zatíženého lana se zabývala řada autorů, např. Kadlčák [8].

V případě konstrukce ve tvaru mezikruží jsou jednotlivá lana (za lano je považovaná skupina všech nosných lan vedených v jednom žebře) vedena radiálně mezi oběma prstenci a vlastní tíha panelů má tvar lichoběžníkového zatížení. Díky rotační symetrii a konstantnímu středovému úhlu jsou všechny řady segmentů stejné. Proto postačí vyšetřovat pouze jedno lano. Stanovená napjatost a průvševá křivka je pak stejná pro všechna nosná lana v konstrukci.

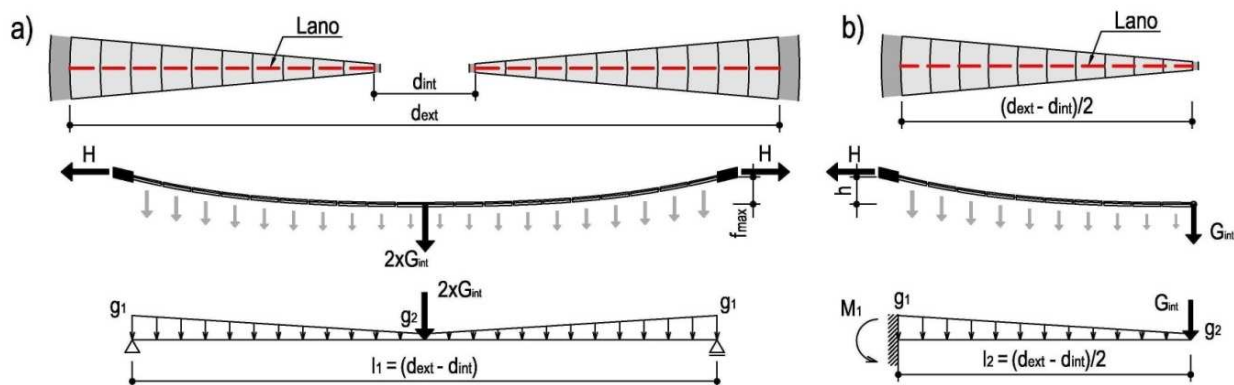
Řešení výchozího stavu konstrukce se provádí pomocí náhradního nosníku, který v případě mezikruží může být zvolen dvěma způsoby. Prvním způsobem je řešení výchozího stavu na průběžném laně, zakotveném pouze do vnějšího prstence, které je zatíženo složeným lichoběžníkovým zatížením a bodovou silou představující tíhu části vnitřního prstence (*Obr. 4.5a*). Jedná se tedy o lano podepřené neposuvně v krajních bodech ve stejné výšce. Pak je rozpětí lana a náhradního nosníku ( $L-d$ ). Rovnice průvšové křivky má tvar:

$$z(x) = \frac{M(x)}{H} \quad (1.1)$$

Druhým způsobem je řešení části konstrukce mezi vnějším a vnitřním prstencem (*Obr. 4.5b*). Pak se jedná o lano s bodem volně posuvným ve svislém směru zatížené lichoběžníkovým zatížením a osamělou silou. Náhradním nosníkem je konzola a rovnice průvšové křivky má tvar:

$$z(x) = \frac{M(x)}{H} + h, \quad \text{kde } h = -\frac{M_1}{H} \quad (1.2)$$

Tyto rovnice jsou odvozeny např. v Kadlčákovi [8]. Veličiny v rovnicích jsou:  $z(x)$  je z-ová pořadnice průvšové křivky lana,  $M(x)$  je ohybový moment na náhradním nosníku od působícího zatížení,  $H$  je vodorovná složka tahové síly v laně,  $h$  je svislá vzdálenost mezi vnitřním a vnějším prstencem a  $M_1$  je ohybový moment ve vetknutí na konzole.

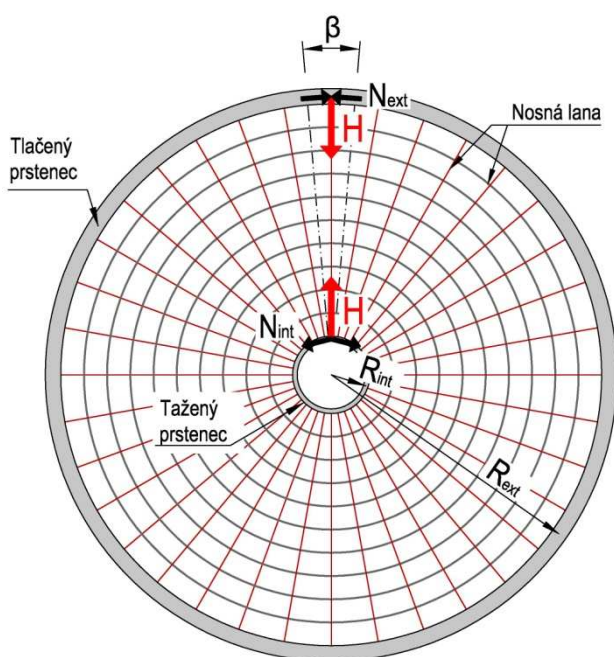


**Obr. 4.5:** Alternativy stanovení výchozího stavu mezikruží  
a) průběžné lano, b) lano s volně posuvným bodem ve svislém směru

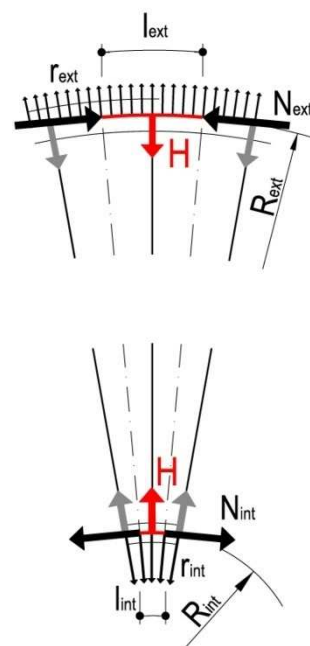
Při působení svislého zatížení je síla  $H$  konstantní po délce lana. Tato síla je však neznámá a nedá se stanovit pouze ze statických podmínek rovnováhy. Proto je nutné zavést jednu doplňující geometrickou nebo statickou podmínku. Jedním ze způsobů výpočtu je volba průvšové křivky v bodě (většinou se jedná o maximální průvš  $z_{max}$ ). Řešením náhradního nosníku je znám ohybový moment ve stejném bodě. Z těchto veličin lze následně stanovit vodorovnou sílu  $H$  a získat tak hodnotu jedné neznámé v rovnici a tedy i svislé pořadnice všech bodů průvšové křivky lana.

#### 4.5 SAMOKOTVENÝ SYSTÉM

Konstrukce ve výchozím stavu při uvedeném podepření na ložiskách tvoří tzv. *samokotvený systém*. To znamená, že vodorovné složky kotevních sil z nosných lan  $H$  jsou zachyceny obvodovými prstenci. Konstrukce je v rovnováze, a pokud jsou povoleny vodorovné posuny, ohybově nenamáhá spodní stavbu. Ve výchozím stavu kotevní síly vyvozují ve vnějším prstenci tlakové a ve vnitřním prstenci tahové namáhání (viz **Obr. 4.6**). V případě rovnoměrného zatížení vznikají v prstencích pouze normálové síly. Ohybové namáhání je minimální a je způsobeno radiálními účinky od osových sil v prstencích, které jsou dány mírou zakřivení prvku.



**Obr. 4.6:** Schéma působení lan na prstence



**Obr. 4.7:** Schéma působení lan na prstence - detail

Vztah mezi jednotlivými parametry udává pro vnější prstenec následující rovnice:

$$r_{ext} = \frac{N_{ext}}{R_{ext}} = \frac{H}{l_{ext}}, \quad (1.3)$$

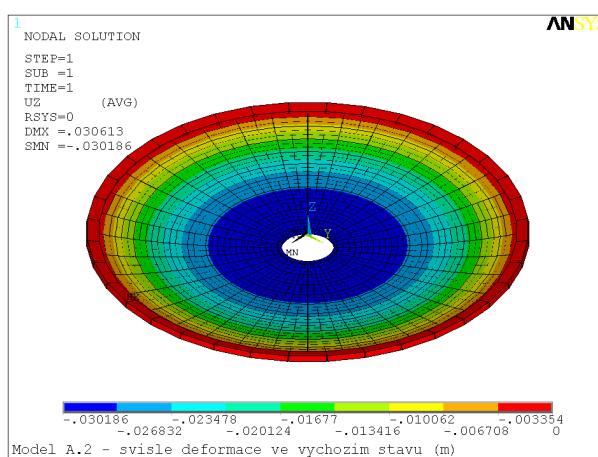
kde  $r_{ext}$  jsou radiální účinky na vnějším prstenci,  $N_{ext}$  je normálová síla ve vnějším prstenci,  $R_{ext}$  je poloměr vnějšího prstence a  $l_{ext}$  je délka části vnějšího prstence mezi kotvením lan (viz **Obr. 4.7**). Pro vnitřní prstenec platí stejná rovnice s příslušným indexováním.

Lze dokázat, že velikost normálových sil v obou prstencích se rovná, síly pouze mají opačné znaménko, tedy:

$$N_{ext} = N_{int}. \quad (1.4)$$

Po zmonolitnění již nedochází k výraznému nárůstu normálových sil v prstencích. Při vnesení předpětí prostřednictvím předpínacích lan se betonová membrána vlivem radiálních účinků lan nadzvedne a opře se o prstence. Tím svou tuhostí zachytává vodorovné složky sil z předpínacích lan a díky tomu je do ní vnesena tlakové napětí.

Vlivem normálových sil v prstencích dochází k jejich osovému stlačení (vnější prstenec) a roztažení (vnitřní prstenec). Díky tomu nejsou ve výchozím stavu svislé deformace nulové, jak bylo deklarováno. Díky vodorovným deformacím prstenců dochází k nárůstu svislých deformací konstrukce jako celku (viz *Obr. 4.8*). Nulových deformací by bylo dosaženo pouze za předpokladu tuhých prstenců. Protože jsou však průřezy prstenců navrženy reálných velikostí a běžných materiálů, k jejich deformaci dochází, nejedná se však o chybu ve výpočtu.



*Obr. 4.8: Svislé deformace ve výchozím stavu*

#### 4.6 DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ

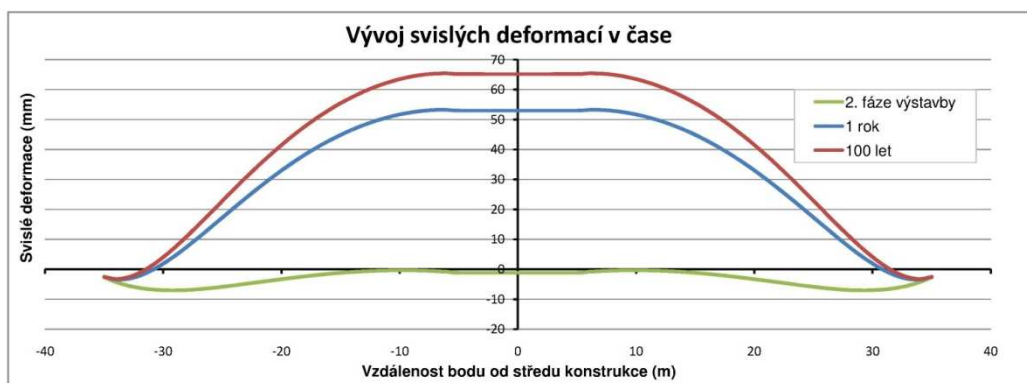
Předpjatá membrána je tvořena lehkým konstrukčním betonem třídy LC40/50. Materiálové charakteristiky lehkého konstrukčního betonu lze získat pomocí charakteristik klasického betonu stejné třídy vynásobením příslušnými součiniteli  $\eta$ , které jsou definovány v příslušné normě, viz [35]. Do výpočtu těchto součinitelů vstupuje horní mez objemové hmotnosti po vysušení  $\rho$  pro příslušnou třídu. V případě navržené konstrukce byla zvolena třída objemové hmotnosti D1,6, které odpovídá objemová hmotnost v rozmezí 1401–1600 kg/m<sup>3</sup>. Objemová hmotnost vyztuženého betonu se pak má uvažovat hodnotou 1750 kg/m<sup>3</sup>. Pro porovnání jsou základní parametry obyčejného a lehkého betonu stejné třídy uvedeny v *Tab. 4.1*. Je patrné, že lehký beton má stejnou hodnotu pevnosti v tlaku jako obyčejný beton. Pevnost v tahu je cca o 14 % menší. Výrazný rozdíl je pak v modulu pružnosti a součiniteli dotvarování, jejichž hodnoty jsou v případě lehkého betonu téměř poloviční oproti obyčejnému betonu. Naopak smršťování vysycháním se má uvažovat hodnotou o 20 % větší. Velikost celkového smršťování lze ovlivnit řadou metod. V případě lehkých betonů je možné např. použít pórovité kamenivo vodou nasycené a tím značně snížit hodnoty autogenního smršťování.

<b>C40/50</b>	<b>LC40/50</b>	$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$	
$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$			$f_{lck} = 40 \text{ MPa}$
$f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$	$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot 1600/2200 = 0,836$		$f_{lctm} = 0,836 \cdot 3,5 = 2,9 \text{ MPa}$
$E_{cm} = 35,2 \text{ GPa}$	$\eta_E = (1600/2200)^2 = 0,529$		$E_{lcm} = 0,529 \cdot 35,2 = 18,6 \text{ GPa}$
$\varphi(\infty, t_0) = 1,450$	$(1600/2200)^2 = 0,529$		$\varphi(\infty, t_0) = 0,529 \cdot 1,450 = 0,767$
$\varepsilon_{cd,0} = 3,2\text{E-}4$	$\eta_3 = 1,2$		$\varepsilon_{lcd,0} = 1,2 \cdot 3,2\text{E-}4 = 3,9\text{E-}4$

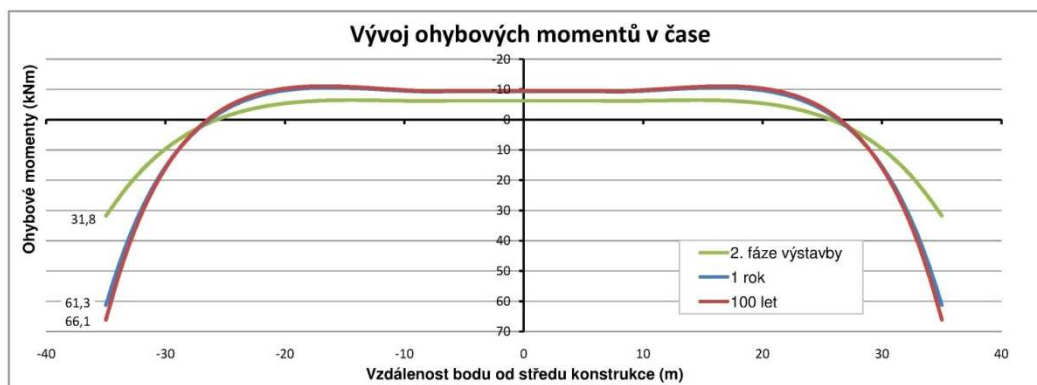
**Tab. 4.1:** Základní parametry obyčejného a lehkého betonu válcové pevnosti 40 MPa

Pro výpočet dotvarování a smršťování byly použity tyto vstupní parametry: třída cementu N, relativní vlhkost RH = 70%, stáří betonu prefabrikovaných segmentů při osazení do konstrukce  $t_0 = 60$  dní, doba ošetřování 7 dní, náhradní rozměr průřezu  $h_0$  od 103 do 113 mm.

Vyhodnocení je zobrazeno v následujících grafech. Vlivem smršťování a dotvarování dochází k svislým deformacím konstrukce směrem nahoru. Těmto deformacím pak odpovídá i nárůst ohybových momentů v místě vetknutí do vnějšího prstence. Velký dopad na konstrukci má převážně smršťování. Po dokončení konstrukce mají momenty velikost cca 32 kNm. Po jednom roku narostou na hodnotu 61 kNm a ve 100 letech se zvýší pouze o 5 kNm.



**Obr. 4.9:** Vývoj svislých deformací v čase



**Obr. 4.10:** Vývoj ohybových momentů v čase

## 5 STUDIE OPTIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ ELIPSY

### 5.1 ÚVOD

Významnou částí statického výpočtu visuté lanové střechy je stanovení vnitřních sil a deformací obvodových nosníků od působícího zatížení. Obecně lze říci, že se jedná o analýzu zatížení působícího na uzavřené křivky, a to jak v rovině křivky, tak zároveň kolmo na rovinu křivky. V případě zatížení v rovině křivky působí na obvodové nosníky vodorovné složky kotvení nosných lan, díky kterým dochází ke stlačení, resp. roztažení, nosníků. Ve svislém směru pak na obvodové nosníky působí především zatížení vlastní tíhou, radiální účinky předpětí a proměnné zatížení.

Jedním z cílů disertační práce je vyvinout funkční konstrukční uspořádání visuté lanové konstrukce nad eliptickým půdorysem, ve kterém by obvodové nosníky v půdorysném průmětu zaujímaly tvar elipsy. Tato změna tvaru křivky významným způsobem ovlivňuje působení obvodových nosníků ve vodorovném směru. Vodorovné deformace křivky zatížené v rovině se skládají ze dvou částí – deformace od normálové síly  $N$  a od ohybového momentu  $M$ . Při určitém tvaru zatížení mohou být ohybové momenty  $M$  nulové a tedy i odpovídající deformace jsou nulové. Tento stav přirozeně nastává u konstrukce mezikružní, kdy nedochází ke globálnímu ohybovému namáhání obvodových prstenců, pouze k lokálnímu ohybu mezi kotvením lan vlivem radiálních účinků. V případě eliptické konstrukce by však mohlo docházet ke značnému ohybovému namáhání obvodových elips a jejich nadměrnému vodorovnému zdeformování, které by mohlo mít za následek nárůst svislých deformací do té míry, že konstrukci by nebylo možné vůbec postavit.

Cílem studie je tedy nalezení optimálního zatížení elipsy z hlediska eliminace ohybového namáhání ve vodorovném směru a nalezení vhodného inženýrského přístupu pro jeho stanovení. Závěry studie dále slouží k návrhu zastřešení nad eliptickým půdorysem.

### 5.2 VZTAH MEZI KŘIVOSTÍ A TVAREM ZATÍŽENÍ

Obecně vztah mezi křivostí a působícím zatížením v rovině křivky platí následující vztah:

$$r = N \cdot \frac{1}{R} = N \cdot K, \quad (1.5)$$

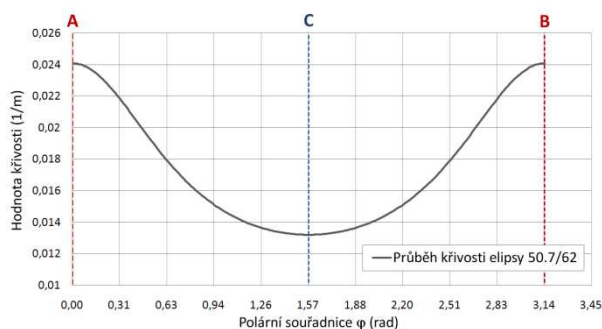
kde  $r$  je radiální zatížení v rovině křivky,  $N$  je normálová síla,  $R$  je poloměr křivosti a  $K$  je křivost. Ze zápisu rovnice je patrné, že normálová síla  $N$  bude v zakřiveném prutu konstantní právě tehdy, když zatížení  $r$  bude  $N$ -násobkem křivosti  $K$ . Obecně lze tedy říci, že optimálního zatížení křivky z hlediska eliminace vodorovných ohybových momentů je dosaženo právě tehdy, když radiální zatížení  $r$  je lineárně závislé na křivosti  $K$ . Pak normálová síla  $N$  je konstantní, ohybové momenty  $M$  jsou nulové a dochází pouze k osovému stlačení, resp. roztažení křivky.

V případě kružnice je poloměr křivosti  $R$  po délce křivky konstantní, a tedy i průběh křivosti  $K$  po délce je konstantní, tedy rovnoměrný. Z toho vyplývá, že normálová síla  $N$  bude po délce kružnice konstantní v případě působení spojitého rovnoměrného zatížení.

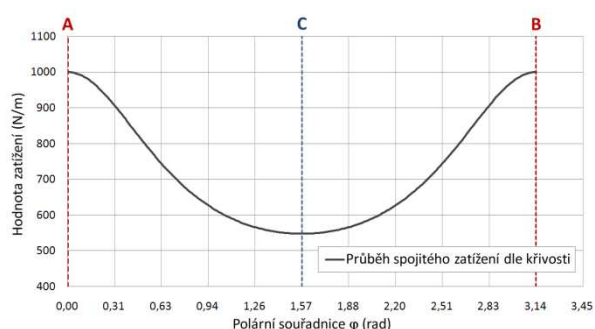
Průběh křivosti elipsy  $K$  (viz **Graf 5.1**) lze stanovit např. dle rovnice:

$$K(t) = \frac{a \cdot b}{(a^2 \cdot \sin^2 t + b^2 \cdot \cos^2 t)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1.6)$$

kde  $t$  je parametr a  $a$ , resp.  $b$ , jsou délky hlavní, resp. vedlejší poloosy, elipsy. Kotevní síly z lan pak musí být navrženy tak, aby na obvodové elipsy působilo zatížení stejného průběhu, jako je průběh křivosti elipsy, viz **Graf 5.2**. Toho lze aktivně dosáhnout proměnným průvěsem lan po délce obvodových elips, který lze konstrukčně provést výškovým zvlněním vnější elipsy.



**Graf 5.1:** Průběh křivosti elipsy mezi hlavními vrcholy A, B



**Graf 5.2:** Průběh zatížení dle křivosti

### 5.3 ZATÍŽENÍ DVOU ELIPS

Dále ze studie optimálního zatížení elipsy vplynula konstrukční podmínka pro návrh eliptického zastřešení. Lze dokázat, že pokud dvě elipsy mají stejný poměr  $b/a$ , pak jejich křivosti  $K_1$  a  $K_2$  jsou vzájemně lineárně závislé a nulové ohybové namáhání v obou elipsách vyvodí zatížení  $r$  s právě jedním poměrem hodnot v hlavním a vedlejším vrcholu  $r_C/r_A$ . Toto lze zapsat následující rovnicí:

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2} \Rightarrow \frac{r_{C,1}}{r_{A,1}} = \frac{r_{C,2}}{r_{A,2}}. \quad (1.7)$$

Tato podmínka je dále použita pro návrh předpjaté membrány nad eliptickým půdorysem.



## 6 ZASTŘEŠENÍ FOTBALOVÉHO STADIONU

### 6.1 ÚVOD

V předložené práci je navržena další možná aplikace visuté lanové střechy tvaru mezikruží, a to jako zastřešení tribun fotbalového stadionu. Vzhledem k velikosti stadionu je třeba modifikovat rozměry původního návrhu, a to nejen základní rozměry uspořádání střechy, ale také jednotlivých konstrukčních prvků. Zastřešení je navrženo na velikost hrací plochy o rozměrech  $68 \times 105$  m, které vyplývají z doporučení fotbalové asociace FIFA. Kapacita přilehlých tribun je uvažována pro přibližně 30 000 diváků. Tím je dána velikost nutné půdorysné plochy zastřešení. Nad touto plochou je navrženo zastřešení využívající statický systém visuté lanové konstrukce tvaru mezikruží, a to ve dvou variantách dle tvaru půdorysu – střecha nad kruhovým a eliptickým půdorysem.

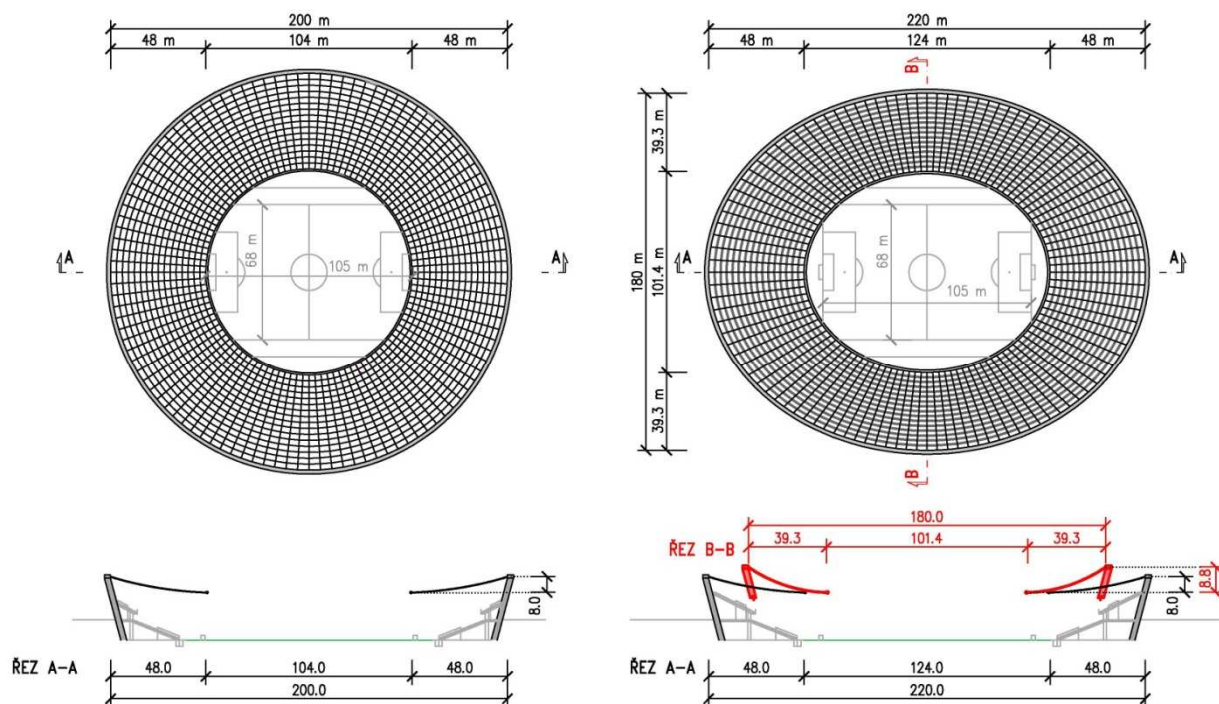
První kruhová varianta vychází přímo ze studijního mezikruží o průměru 70 m. Druhá varianta zastřešení je dána modifikací kruhového půdorysného tvaru na eliptický se zachováním velikosti průvěsu střechy i dimenzí a materiálů jednotlivých konstrukčních prvků. Obě varianty zastřešení vychází ze statického řešení střechy tvaru mezikruží, a proto všechny popsané postupy a rovnice uvedené v kap. 4. lze aplikovat pro statickou analýzu zastřešení sportovního stadionu. V případě kruhového půdorysu se jedná o totožné statické řešení. V případě eliptického půdorysu je však potřeba provést několik úprav v konstrukčním uspořádání s ohledem na závěry vyplývající ze studie zatížení elipsy, která je uvedena v kap. 5. Výpočetní modely pro obě varianty jsou vytvořeny pomocí stejných předpokladů a nástrojů výpočetního programu ANSYS.

### 6.2 POPIS KONSTRUKCE

Střecha nad kruhovým půdorysem přímo vychází z konstrukčního řešení studijní membrány ve tvaru mezikruží o vnějším průměru 70 m, který je zvětšen s ohledem na velikost zastřešované plochy na 200 m (viz *Obr. 6.1*). Půdorysný průměr vnitřního prstence je zvolen délky 104 m a šířka střešního pásu nad tribunami je tedy 48 m. Šířka panelů je opět 3 m. Středový úhel, který svírají jednotlivé skupiny lan a vymezují tak rozměr segmentů v podélném směru, je  $10/3^\circ$  a rozdělují membránu na 108 řad segmentů. Velikost úhlu byla zvolena tak, aby délka hrany panelů při vnějším prstenci byla přibližně stejná jako ve výchozí konstrukci mezikruží. Délka hran se pak mění v rozmezí od 3,03 m do 5,82 m. Tvar segmentů v podélném směru je zachován dle studijní konstrukce, tj. tloušťka desky je 0,1 m a rozměry žebra jsou  $0,4 \times 0,3$  m. Segmenty jsou uloženy na nosná lana, která jsou zakotvena do obvodových prstenců. V každém žeburu je umístěno 12 lan plnících nosnou funkci a 14 lan sloužících pro předeptnutí celistvé membrány.

Konstrukce opět tvoří tzv. samokotvený systém, kdy vodorovné síly z kotvení lan jsou přenášeny do obvodových prstenců a vyvozují v nich tlaková (vnější prsteneček)

a tahová (vnitřní prstenec) namáhání. Vzájemná výšková poloha obou nosných prstenců je 8 m. Vzhledem k větším základním rozměrům zastřešení je i velikost průřezů obvodových prstenců vhodně upravena. Vnější prstenec je tvořen železobetonovým obdélníkovým průřezem, jehož rozměry jsou  $3,0 \times 1,5$  m. Vnitřní prstenec je z ocelové trubky většího průměru 1,2 m a tloušťky stěny 100 mm. Použité materiály mají stejné charakteristiky jako na studijní konstrukci mezikruží.



**Obr. 6.1:** Varianty zastřešení sportovního stadionu

Visutá lanová střecha nad eliptickým půdorysem vznikla modifikací kruhové střechy a je zřejmé, že pro obdélníkový tvar plochy stadionu je úspornější na zastavěné území (viz **Obr. 6.1**). Rozměry vnější elipsy jsou dány velikostí zastřešované plochy, a tedy hlavní poloosa je navržena délky 110 m a vedlejší poloosa 90 m. V případě kruhové střechy je šířka pásu nad tribunami 48 m. Aby byl tento rozměr částečně zachován, je délka hlavní poloosy vnitřní elipsy 62 m. Délka vedlejší poloosy vnitřní elipsy pak vyplývá z jednoho ze závěrů studie optimálního zatížení dvou elips. S ohledem na tento závěr je délka vedlejší poloosy vnitřní elipsy navržena následujícím způsobem:

$$\frac{b_{int}}{a_{int}} = \frac{b_{ext}}{a_{ext}} \Rightarrow b_{int} = a_{int} \cdot \frac{b_{ext}}{a_{ext}} = 62 \cdot \frac{90}{110} = 50,73 \text{ m.}$$

Šířka pásu střechy nad tribunami je tedy proměnná, a to v rozmezí od 48 m ve směru hlavní osy do 39,3 m ve směru vedlejší osy.

Dalším rozdílem v konstrukčním řešení mezi kruhovou a eliptickou střechou je průvės. Předpoklad ke stanovení velikosti průvèsu eliptické střechy opět vychází

ze závěrů studie zatížení elipsy. Jak již bylo řečeno, nulové ohybové namáhání elipsy vyvolá zatížení lineárně závislé na křivosti elipsy. V případě kružnice je křivost rovnoměrná po celé délce křivky, a protože jednotlivé řady segmentů jsou stejné, pak i tíha připadající na jednotlivé skupiny lan je stejná. To vede k rovnoměrnému, tedy stejnému, průvěs střechy po celé její délce.

V případě elipsy má křivost přibližně kosinusový průběh. Aby obvodové elipsy nebyly ohybově namáhány, a tedy nedocházelo k značným vodorovným posunům, které dále způsobují velké svislé deformace střechy, je nutné tomuto průběhu přizpůsobit velikost kotevních sil v lanech. Toho lze aktivně dosáhnout různou velikostí průvěsu jednotlivých lan. Vnější elipsa pak má tvar prostorové křivky, jejímž půdorysným průmětem je elipsa a ve svislém směru po rozbalení je „zvlněná“. Mezi hlavními a vedlejšími vrcholy elipsy pak má zvlnění přibližně kosinusový průběh. V hlavních vrcholech elipsy je průvěs střechy 8,0 m. Ve vedlejších vrcholech pak průvěs dosahuje velikosti 8,8 m. Pokud by průvěs střechy byl navržen po celé délce stejný, pak by konstrukční systém nebyl funkční a projevilo by se to velkými svislými deformacemi střechy ve výchozím stavu. Jak je však patrné z vizualizací eliptické varianty, zvlnění vnější elipsy a tedy proměnný průvěs plochy zastřešení není při tak velkých rozměrech konstrukce téměř viditelný (viz *Obr. 6.2*).

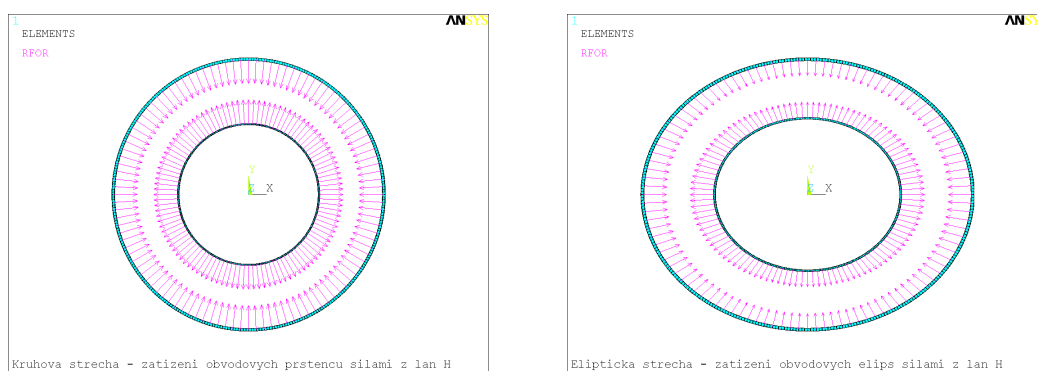


*Obr. 6.2: Vizualizace eliptické varianty zastřešení stadionu*

### 6.3 VÝCHOZÍ STAV

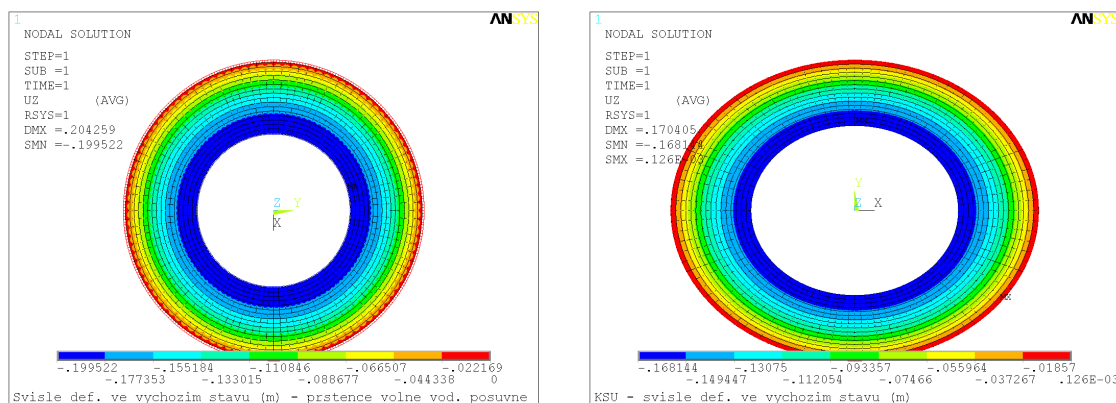
Stanovení výchozího stavu zastřešení fotbalového stadionu lze provést stejným způsobem jako v případě studijní konstrukce mezikruží, viz kap. 4.4. Po zadání stanovené geometrie lan a jejich napjatosti do výpočetního modelu a provedení výpočtu se správnost řešení projeví tím, že na konstrukci jsou od vlastní tíhy svislé deformace nulové. Protože jsou lana kotvena do poddajných obvodových nosníků, bude vždy docházet ke svislé deformaci konstrukce vlivem stlačení, resp. roztažení, těchto nosníků. Je však nutné navrhnout napjatost v lanech tak, aby nedocházelo k nežádoucímu globálnímu ohybovému namáhání a tedy k velkým nerovnoměrným vodorovným a svislým deformacím. Toho je dosaženo právě tehdy, když radiální zatížení je lineárně závislé na křivosti.

Na **Obr. 6.3** je zobrazeno radiální zatížení obvodových nosníků pro obě varianty zastřešení, které je tvořeno vodorovnými složkami sil z lan. Je patrné, že velikost sil skutečně odpovídá křivosti obvodových nosníků. V případě kruhové varianty zastřešení je velikost sil po délce prstenců stejná a tvoří tedy rovnoměrné radiální zatížení. Stejně velikosti sil je dosaženo konstantním průvěsem střechy. V případě eliptické varianty se velikost mění v souladu s křivostí elips. Proměnných velikostí sil v lanech je dosaženo proměnným průvěsem střechy, který je konstrukčně proveden pomocí výškového zvlnění vnější elipsy.



**Obr. 6.3:** Průběh vodorovných sil  $H$  po délce obvodových prstenců, resp. elips

Svislé deformace konstrukce ve výchozím stavu jsou vykresleny na **Obr. 6.4**. Vlivem normálové síly dojde k rovnoměrnému stlačení, resp. roztažení, obvodových nosníků. Tento vodorovný posun způsobí nárůst svislých deformací, jejichž velikost je však vzhledem k rozměrům konstrukce v rozumných mezích. Z průběhu svislé deformace je patrné, že jsou v obou variantách zastřešení rovnoměrné a nedochází tedy k ohybovému namáhání ve vodorovném směru. To svědčí o správném návrhu celkového konstrukčního uspořádání. Při nevhodném návrhu konstrukčního systému by docházelo k značnému ohybovému namáhání obvodových nosníků a jejich vodorovným posunům, které by vedly k značným svislým deformacím a zvlnění celé membrány. Nevhodný návrh konstrukce a jeho důsledky jsou ukázány dále.



**Obr. 6.4:** Svislé deformace konstrukce ve výchozím stavu (vlevo kruhová varianta, vpravo eliptická varianta)

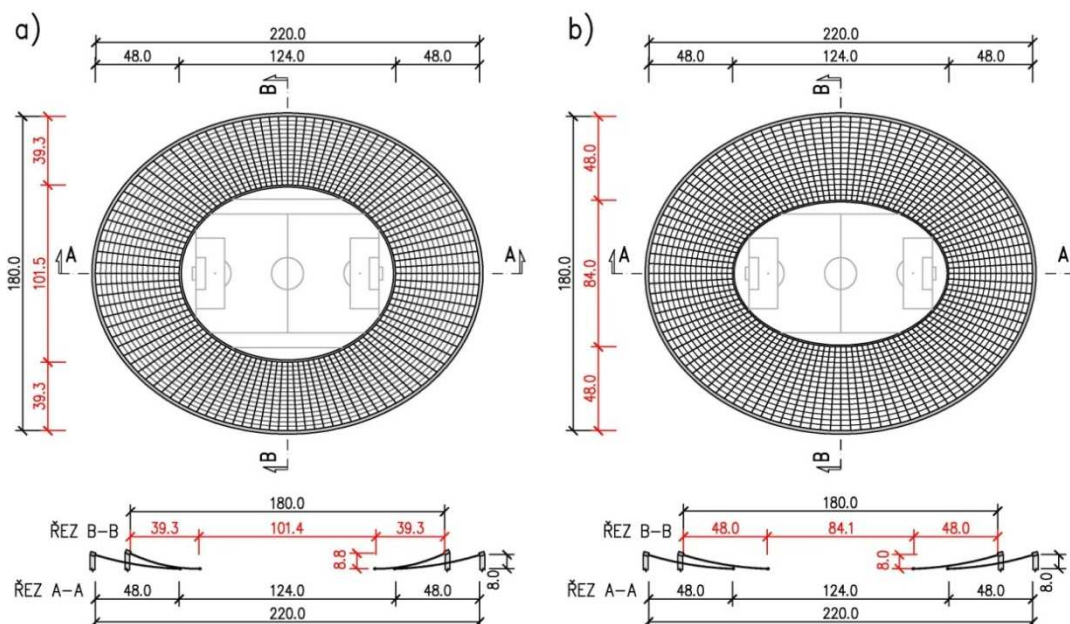
## 6.4 POROVNÁNÍ OPTIMÁLNÍHO NÁVRHU S NEVHODNÝM

Uvedené konstrukční uspořádání nad eliptickým půdorysem, při kterém jsou dodrženy předpoklady vedoucí k bezmomentovému namáhání obvodových elips, je neekonomičtější variantou konstrukce. Všechny odchylky od tohoto řešení vedou k nárůstu rozměrů obvodových elips, k větší spotřebě materiálů a tedy i stavebních nákladů. Pro porovnání je dále uveden nevhodný návrh zastřešení nad eliptickým půdorysem (viz *Obr. 6.5*). Nevhodný návrh se od optimálního liší pouze ve dvou přístupech k základním rozměrům, které jsou v obrázku vyznačeny červeně. Všechny ostatní parametry (průřezy, materiály, apod.) zůstaly shodné.

Prvním „logickým“ přístupem k návrhu konstrukce nad eliptickým půdorysem je zachovat šířku pásu nad tribunami konstantní, tedy 48 m. Tento předpoklad vede k návrhu délky vedlejší poloosy vnitřní elipsy 42 m. Při této hodnotě však není dodržen stejný poměr  $b/a$  pro obě obvodové elipsy, tedy:

$$\frac{b_{ext}}{a_{ext}} = \frac{90}{110} = 0,818 \neq \frac{b_{int}}{a_{int}} = \frac{42}{62} = 0,677.$$

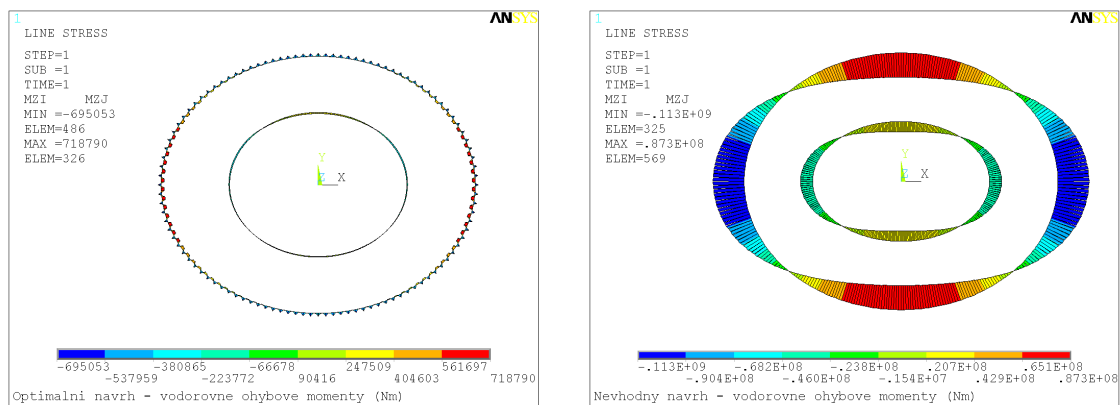
Druhým „logickým“ přístupem je zachovat průvės střechy neměnný v rámci celé plochy. Tímto však dojde k neoptimálnímu zatížení obvodových elips, které vede k velkému ohybovému namáhání ve vodorovném směru.



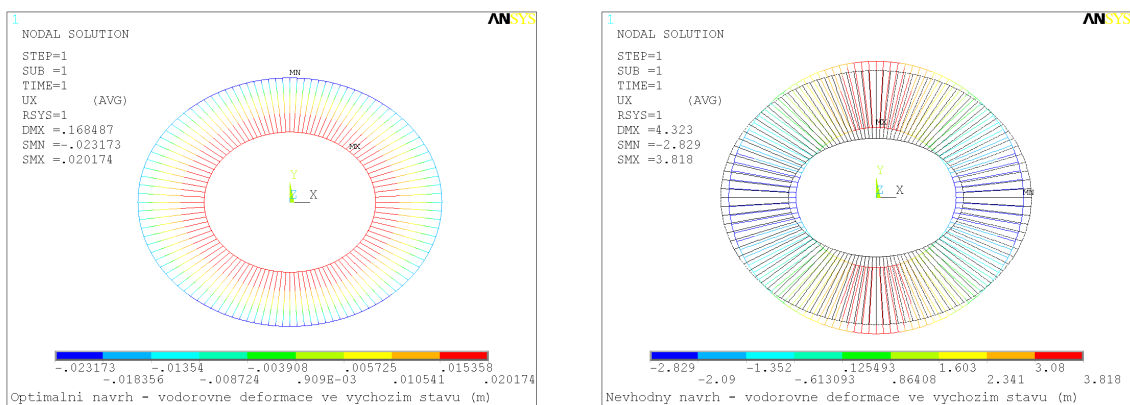
*Obr. 6.5:* Schéma konstrukčního uspořádání nad eliptickým půdorysem:  
a) optimální návrh, b) nevhodný návrh

Na *Obr. 6.6* jsou vykresleny vodorovné ohybové momenty na obvodových elipsách. V případě optimálního návrhu dochází pouze k lokálnímu ohybovému namáhání mezi kotvením lan, které je způsobeno radiálními účinky vlivem

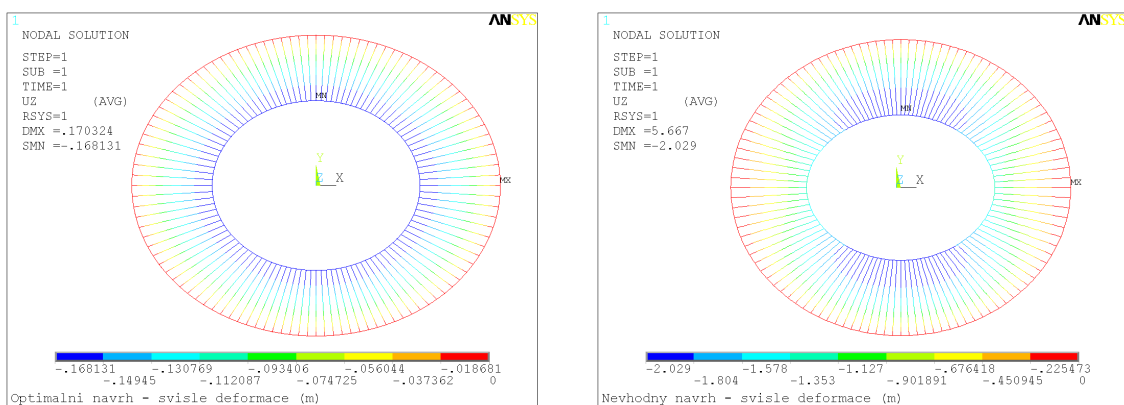
zakřivení. V případě nevhodného návrhu jsou obvodové elipsy zatíženy v podstatě rovnoměrným vodorovným zatížením, které způsobuje nerovnoměrné vodorovné ohybové momenty značných hodnot a tedy značné nerovnoměrné vodorovné deformace elips - *Obr. 6.7*. Důsledkem vodorovných posunů je pak nárůst svislých deformací konstrukce (viz *Obr. 6.8*). Při optimálním návrhu jsou svislé deformace způsobeny pouze osovým stlačením/roztahením elips a dosahují hodnoty pouhých 0,17 m. V případě nevhodného návrhu dosahují svislé deformace velikosti až 2,0 m a je zřejmé, že tyto deformace by při reálné stavbě byly nepřijatelné.



*Obr. 6.6: Vodorovné ohybové momenty na obvodových elipsách (Nm)*



*Obr. 6.7: Vodorovné deformace ve výchozím stavu v radiálním směru (m)*



*Obr. 6.8: Svislé deformace (m)*

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce bylo navrhnout optimální konstrukční uspořádání visuté lanové střechy nad eliptickým půdorysem tvořené předpjatou betonovou membránou, které vychází z klasického řešení mezikruží. Navrženou eliptickou konstrukci je pak možné použít pro zastřešení tribun fotbalového stadionu.

### 7.1 STUDIJNÍ KONSTRUKCE MEZIKRUŽÍ (METODIKA VÝPOČTU)

Pro stanovení metodiky výpočtu visuté lanové střechy tvořené předpjatou betonovou membránou byla zvolena studijní konstrukce mezikruží nad kruhovým půdorysem o průměru 70 m, pomocí níž byly popsány teoretické základy potřebné k analýze tohoto typu konstrukce. Bylo popsáno navržené konstrukční uspořádání, předpokládaný postup výstavby a obecné statické působení konstrukce jako celku i během její výstavby. Dále byl vysvětlen pojem samokotveného systému a vykreslen průběh vnitřních sil na obvodových prstencích v jednotlivých fázích výstavby a při působení proměnného zatížení.

Protože hlavním nosným prvkem jsou lana, prvním krokem analýzy konstrukce je stanovení tzv. výchozího stavu (tj. tvaru a napjatosti zatížených lan), který vychází z řešení dokonale ohebného lana. V případě konstrukce ve tvaru mezikruží je možné řešit výchozí stav lan dvěma způsoby, a to jako průběžné lano nebo jako lano s volně posuvným bodem ve svislém směru. Pro porovnání byly oba způsoby výpočtu číselně vyjádřeny. Závěrem lze říci, že oba způsoby výpočtu si jsou plně ekvivalentní a závisí na volbě projektanta, který způsob zvolí pro výpočet.

Statická analýza konstrukce byla prováděna pomocí výpočetních modelů metodou konečných prvků v programu ANSYS. Byly vytvořeny různé úrovně modelů od jednoduchých prutových náhrad až po komplexní deskostěnový model. Po vzájemném srovnání jednotlivých modelů lze formulovat několik závěrů. Prutový model jednoho pásu je vhodný pro seznámení s chováním konstrukce a pro odladění výchozího stavu zatíženého lana s uvážením reálné tuhosti podpor. Pro získání účinků na obvodových prstencích je již nutné volit prostorové modely. Prostorový prutový model je dostačující pro vykreslení vnitřních sil na obvodových prstencích. Protože je však důležité zohlednit také prostorové působení konstrukce v příčném směru a nesymetrické zatížení, je nutné konstrukci počítat na komplexním deskostěnovém modelu, který dává ucelený pohled na chování konstrukce. V dalším výzkumu proto bylo upuštěno od použití prutových modelů a bylo dále pracováno pouze s deskostěnovými modely, které jsou pro ucelený výpočet nejvhodnější.

Popsaná metodika výpočtu visuté lanové střechy tvaru mezikruží byla dále aplikována při statické analýze zastřešení fotbalového stadionu. Vzhledem k obdélníkovému tvaru hřiště je vhodné provést zastřešení nad eliptickým půdorysem, proto dalším krokem práce bylo definovat optimálního zatížení elipsy, kterou v návrhu zaujímají obvodové nosníky.

## 7.2 OPTIMÁLNÍ ZATÍŽENÍ ELIPSY

Obvodové nosníky jsou zatíženy lokálně v rovině křivky radiálními silami od kotvení nosných a předpínacích lan. Aby nedocházelo k velkému ohybovému namáhání, a tedy vodorovným deformacím obvodových elips, které pak následně způsobuje nárůst svislých deformací celé membrány, je nutné najít optimální zatížení elipsy. Proto byla provedena studie zatížení elipsy v rovině křivky. Cílem studie bylo nalezení optimálního zatížení elipsy z hlediska eliminace ohybového namáhání této křivky a nalezení vhodného a jednoduchého inženýrského přístupu pro jeho stanovení. Na základě této studie jsou zformulovány dva hlavní závěry, které zaručují funkční statický systém visuté lanové střechy nad eliptickým půdorysem, a lze je tedy obecně použít pro návrh zastřešení libovolné velikosti.

### 1. závěr – optimální zatížení elipsy

Aby nedocházelo ke globálnímu ohybovému namáhání elipsy v rovině křivky, musí být radiální zatížení v rovině elipsy  $r$  lineárně závislé na její křivosti  $K$ . Pak normálová síla  $N$  je konstantní po délce elipsy a z diferenciální podmínky rovnováhy zakřiveného prvku vyplývá, že ohybové momenty jsou nulové. Platí rovnice:

$$r = N \cdot K, \quad N = \text{konst.}$$

### 2. závěr – zatížení dvou elips

Pokud dvě elipsy mají stejný poměr  $b/a$ , resp. jejich číselné excentricity  $\varepsilon$  si jsou rovny, pak jejich křivosti  $K_1$  a  $K_2$  jsou vzájemně lineárně závislé a nulové ohybové namáhání v obou elipsách vyvodí zatížení  $r$ , lineárně závislé na křivosti, s právě jedním poměrem hodnot v hlavním a vedlejším vrcholu  $r_C/r_A$ . Toto obecně platí pro  $n$  elips a lze napsat:

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2} = \dots = \frac{b_n}{a_n} = \text{konst.} \Rightarrow \frac{r_{C,1}}{r_{A,1}} = \frac{r_{C,2}}{r_{A,2}} = \dots = \frac{r_{C,n}}{r_{A,n}} = \text{konst.}$$

pro  $N = \text{konst.}, M = 0$

Z uvedené závislosti vyplývá, že je nutné navrhnout konstrukční systém nad eliptickým půdorysem tak, aby se poměr délek poloos vnější a vnitřní elipsy  $b/a$  rovnal. Pak je konstrukce plně funkční a nedochází k nežádoucím deformacím.

Oba uvedené závěry jsou stěžejní pro návrh optimálního konstrukčního uspořádání visuté lanové střechy nad eliptickým půdorysem.

## 7.3 ZASTŘEŠENÍ SPORTOVNÍHO STADIONU

Na základě metodiky výpočtu, která byla zformulována pomocí studijní konstrukce mezikruží, a poznatků ze studie optimálního zatížení elipsy bylo navrženo zastřešení tribun fotbalového hřiště s velikostí hrací plochy  $68 \times 105$  m



s předpokládanou kapacitou 30 000 diváků. Zastřešení bylo navrženo ve dvou alternativách – nad kruhovým a eliptickým půdorysem.

Kruhová varianta vychází přímo z konstrukčního uspořádání studijní konstrukce mezikruží. Konstrukce byla upravena s ohledem na požadovanou velikost půdorysu pomocí odpovídajícího zvětšení hlavních rozměrů konstrukce (půdorysné průměry obvodových prstenců, průvės střechy, středový úhel mezi radiálně vedenými lany) i průřezů jednotlivých konstrukčních prvků (průřez obvodových prstenců, velikost segmentů, počty lan). Materiálové charakteristiky zůstaly stejné. Kruhová varianta přirozeně splňuje oba formulované závěry studie, protože šířka pásu membrány nad tribunami je konstantní. Radiální síly z lan pak vyvozují rovnoměrné, tedy konstantní zatížení, které odpovídá křivostem obvodových prstenců, které jsou rovněž konstantní. Díky tomu nedochází ke globálnímu ohybovému namáhání obvodových prstenců, a tedy ani k nárůstu deformací.

Eliptická varianta pak vyšla z kruhové varianty adaptací na eliptický půdorys. Pro návrh konstrukčního řešení eliptické střechy byly použity závěry formulované na základě studie optimálního zatížení elipsy, protože návrh eliptické varianty již není intuitivní. Nejdůležitějším momentem při návrhu konstrukčního uspořádání eliptické varianty byla myšlenka vytvořit výškové zvlnění vnější elipsy, díky kterému je dosaženo proměnného průvěsu střechy po délce obvodových elips. Touto konstrukční úpravou lze aktivně ovlivnit velikost sil v lanech tak, aby obvodové elipsy byly zatíženy požadovaným způsobem, tedy aby zatížení bylo lineárně závislé na křivosti. Pro doložení důležitosti dodržení formulovaných zásad při návrhu eliptické varianty bylo provedeno porovnání optimálního a nevhodného konstrukčního uspořádání zastřešení.

Na závěr lze říci, že požadovaného cíle vytvořit konstrukční uspořádání nad eliptickým půdorysem bylo úspěšně dosaženo. Z uvedených výsledků je patrné, že navržený statický systém zastřešení je plně funkční. Byla prokázána realizovatelnost a efektivita. Získané poznatky lze obecně použít pro návrh visuté lanové střechy nad kruhovým nebo eliptickým půdorysem tvořené předpjatou betonovou membránou nesenou radiálně vedenými lany mezi vnějším a vnitřním prstencem, resp. elipsou. Tyto poznatky pak lze rovněž využít při návrhu konstrukce s použitím jiného střešního pláště než betonového, jako např. vysokopevnostní tkaniny, plasty nebo sklo.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ****ODBORNÁ LITERATURA**

- [1] AGUILÓ, Miguel. *Grandes Cubiertas Españolas*. Madrid: ACS, Actividades de Construcción y Servicios, S.A., 2011. ISBN: 978-84-695-0811-4.
- [2] BARNES, Michael a Michael DICKSON. *Widespan Roof Structure*. Sborník příspěvků mezinárodního sympozia „Widespan Enclosures“. London: Thomas Telford Publishing, 2000. ISBN: 0-7277-2877-6.
- [3] BÖGL A KRÝSL. Top fotbal v leverkusenské BayAréně. *mbmagazín*. 2010, č. 2, s. 14-17
- [4] BRAUN, A., Z. VERŠIĆ a T. VIDOVIĆ. The Reconstruction of the French Pavilion at the Student Centre in Zagreb from the Aspect of Energy Efficiency. In: *Proceedings of International Conference „Energy Management in Cultural Heritage“*. Zagreb, 2011. Dostupné z: <http://www.an-patrimoine-echanges.org>
- [5] BUCHHOLDT, H. A. *An introduction to cable roof structures*, Second edition. London : Thomas Telford, 1999. ISBN 0-7277-2624-2.
- [6] ENGEL, Heino. *Structure Systems*. Ostfildern-Ruit: Gerd Hatje Publishers, 1997. ISBN 3-7757-0706-9.
- [7] IRVINE, Max. *Cable structures*. New York: Dover Publication, Inc., 1992. ISBN 0-486-67127-5.
- [8] KADLČÁK, Jaroslav. *Statika nosných lan visutých střeš*. Praha: ACADEMIA, 1990. ISBN 80 200 0251 0.
- [9] KADLČÁK, Jaroslav. *Statics of Suspension Cable roofs*. Rotterdam: A.A.Balkema, 1994. ISBN 90 5410 618 2.
- [10] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí I*. Brno: VUTIUM, 2001. ISBN 80-214-1877-X.
- [11] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí II*. Brno: VUTIUM, 2001. ISBN 80-214-1648-3.
- [12] KOLÁŘ, Ivan a Lenka POSPÍŠILOVÁ. *Diferenciální geometrie křivek a ploch - elektronické skriptum* [online]. MUNI, 2008 [cit. 2011-11-08]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/elportal/estud/prif/js08>
- [13] KOLÁŘ, V., I. NĚMEC a V. KANICKÝ. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.
- [14] KRISHNA, Perm. *Cable-suspended roof*. New York: McGraw-Hill, 1978.

- [15] MENN, Christian. *Prestressed concrete bridges*. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 1990. ISBN 3-7643-2414-7.
- [16] MIKULČÁK, Jiří a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, 1988. ISBN 80-85849-84-4.
- [17] NĚMEC, Ivan. *Nelineární mechanika*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno, 2006.
- [18] RÜHLE, Herrmann a kol. *Priestorové strešné konštrukci, 1. diel Betón, drevo, keramika*. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1978.
- [19] RÜHLE, Herrmann a kol. *Priestorové strešné konštrukci, 2. diel Ocel' a plastické hmoty*. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1979.
- [20] STRÁSKÝ, Jiří. *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. London: Thomas Telford, 2005. ISBN 0 7277 3282 X.
- [21] STRÁSKÝ, Jiří. Visuté předpjaté střechy, část 1. *Beton TKS*. 2005, č. 5, s. 10-15. ISSN 1213-3116.
- [22] STRÁSKÝ, Jiří. Visuté předpjaté střechy, část 2. *Beton TKS*. 2006, č. 1, s. 21-27. ISSN 1213-3116.
- [23] TIBERT, Gunnar. *Numerical Analyses of Cable Roof Structures*. Stockholm: KTH, TS-Högskoletryckeriet, 1999. Licentiate Thesis. ISSN 1103-4270.
- [24] ZŮDA, Karel. *Mosty IV, Půdorysně zakřivené mostní konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1971.

## INTERNETOVÉ ODKAZY

- [25] All-Russia Exhibition 1896. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 29. 9. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/All-Russia\\_Exhibition\\_1896](http://en.wikipedia.org/wiki/All-Russia_Exhibition_1896).
- [26] City of Cape Town FIFA 2010. Cape Town Stadia. *Capetown.gov.za* [online]. ©2009 [cit. 2011-11-8]. Dostupné z: <http://www.capetown.gov.za/en/FIFA2010/Pages/CapeTownStadium.aspx>
- [27] Roman architecture [online]. [cit. 2011-08-18]. Dostupné z: <http://myhomepage.ferris.edu/~norcrossa/2006WEB/RomanArch.html>
- [28] Structure of the Colosseum. *Mariamilani.com* [online]. [cit. 2011-08-18]. Dostupné z: [http://www.mariamilani.com/colosseum/colosseum\\_structure.htm](http://www.mariamilani.com/colosseum/colosseum_structure.htm)

- [29] Italy guides. The Roman Coliseum. *ItalyGuides.it* [online] ©20011 [cit. 2011-08-18]. Dostupné z:  
[http://www.italyguides.it/us/roma/rome/ancient\\_roman\\_empire/roman\\_colosseum.htm](http://www.italyguides.it/us/roma/rome/ancient_roman_empire/roman_colosseum.htm)
- [30] Elipsa. In: *Wikipedia: the free encyklopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 30. 1. 2013 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Elipsa>
- [31] Kružnice. In: *Wikipedia: the free encyklopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 2. 2. 2013 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kružnice>

## TECHNICKÉ NORMY

- [32] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 100 s. Třídící znak 87512.
- [33] ČSN EN 1991-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 52 s. Třídící znak 72773.
- [34] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 124 s. Třídící znak 77516.
- [35] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 202 s. Třídící znak 88406.

## MANUÁLY K VÝPOČETNÍM PROGRAMŮM

- [36] *Release 10.0 Documentation for ANSYS* © 2005 SAS IP, Inc.
- [37] *Midas CIVIL Online Manual* [online]. © 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. Dostupné z:  
[http://manual.midasuser.com/EN\\_Common/Civil/795/index.htm](http://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/795/index.htm)

## CURRICULUM VITAE

### OSOBNÍ ÚDAJE

<b>Jméno</b>	<b>PAVLÍNA JUCHELKOVÁ</b>
Datum narození	11. 12. 1982
Trvalé bydliště	Pod Lesem 227, Branka u Opavy 747 41
Státní příslušnost	ČR

### VZDĚLÁNÍ

2007 - dosud	<b>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební</b> Doktorské studium, prezenční forma Obor: Konstrukce a dopravní stavby Státní doktorská zkouška vykonána dne 18. 6. 2010
2002 - 2007	<b>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební</b> Magisterské studium, prezenční forma Obor: Konstrukce a dopravní stavby Udělen titul Ing.
1998 - 2002	<b>Mendelovo gymnázium v Opavě</b> Zakončeno maturitní zkouškou

### PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2007 - dosud	<b>Stráský, Hustý a partneři s.r.o.</b> Bohunická 50, 619 00 Brno Asistent projektanta
--------------	--

### PEDAGOGICKÉ ZKUŠENOSTI

2007 - 2009	<b>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební</b> Výuka předmětů v rámci Ústavu betonových a zděných konstrukcí
-------------	--

### JAZYKOVÉ ZNALOSTI

Mateřský jazyk	čeština
Ostatní jazyky	angličtina, španělština

**ABSTRACT**

This doctoral thesis deals with suspension cable roof structures with an internal girder above a circular and elliptical plan which can be used for roofing of football stadium terraces. The methodology of analysis is based on a basic annular cable roof structure of an external diameter of 70 m. The roof structure is designed as a prestressed membrane from the precast panels made from lightweight structural concrete which are supported with the bearing and prestressing tendons that are radially led between the two peripheral rings. The structural arrangement and the process of construction which are typical for this type of structures are described. The static system is specified and the terms wedded to annular suspension cable roof like self-anchored system or equilibrium state are also defined. Several calculation models were created for static analysis – from the simplest beam model to the complete shell model and the possibilities of their application are studied. Finally, the results of static analysis are discussed in detail.

The main aim of the doctoral thesis is to design a roofing of football stadium terraces using the structures of a basic annular cable roof; and present two alternatives – above circular and elliptical plan. The circular alternative comes directly from basic annulus, only the main dimensions of the new-designed structure are correspondingly extended with respect to the size of the built-up area. The elliptical alternative is an alteration of the circular design. As the radial tendons are anchored to the flexible peripheral curved girders, and the structures form the self-anchored system, the horizontal tendon forces load the peripheral girders radially. Because of that, it is essential to design a state of stress in tendon to prevent the undesirable global bending moments on the peripheral girders, and subsequently large non-uniform horizontal and vertical displacements of structure. The circular alternative complies naturally with these conditions. In case of the elliptical alternative, it is necessary to specify the optimal load of peripheral ellipse to eliminate non-uniform horizontal displacements. Therefore, a study of the optimal load of ellipse is carried out. On the basis of the study, two basic requirements to structural arrangement of the elliptical roof are formulated which should be adhered during the design to avoid an inadmissible increase in horizontal and vertical displacements. To illustrate the importance of a correct design, the optimal and unsuitable structural arrangements are compared. Finally, the results of static analysis of the circular and elliptical roof are again discussed in detail.