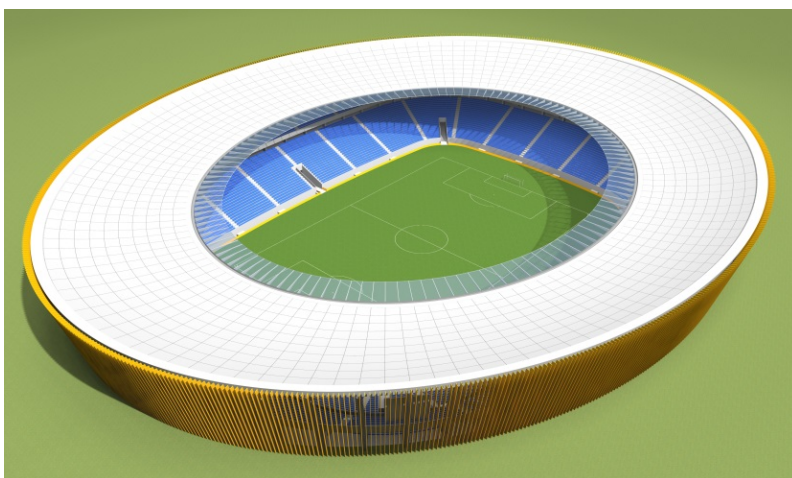


# LANOVÁ STŘECHA NAD ELIPTICKÝM PŮDORYSEM

## 1 Úvod

V roce 2012 byla v rámci projektu *TA02011322 Prostorové konstrukce podepřené kabely a/nebo oblouky* řešena statická analýza návrhu visuté lanové střechy nad eliptickým půdorysem o vnějších rozměrech 220 x 180 m zastřešující tribuny sportovního stadionu pro cca 30 000 diváků s velikostí hřiště 68 x 105 m. Na **Obr. 1** je zobrazena vizualizace navrženého zastřešení předpjatou membránou.



**Obr. 1** Vizualizace navrženého zastřešení.

Na přelomu roku 2013 a 2014 byl vytvořen funkční model konstrukce střechy v měřítku 1:110 o vnějších půdorysných rozměrech 1,0 x 0,818 m, viz **Obr. 2**. Jednotlivé konstrukční prvky modelu jsou provedeny z překližky. Segmenty membrány jsou na nosná lanka uloženy v drážce tak, aby bylo možné konstrukci střechy opakovaně rozebírat a demonstrovat tak postup výstavby tohoto typu zastřešení. V následujícím textu je stručně popsáno uspořádání navrženého zastřešení a vytvořeného modelu.



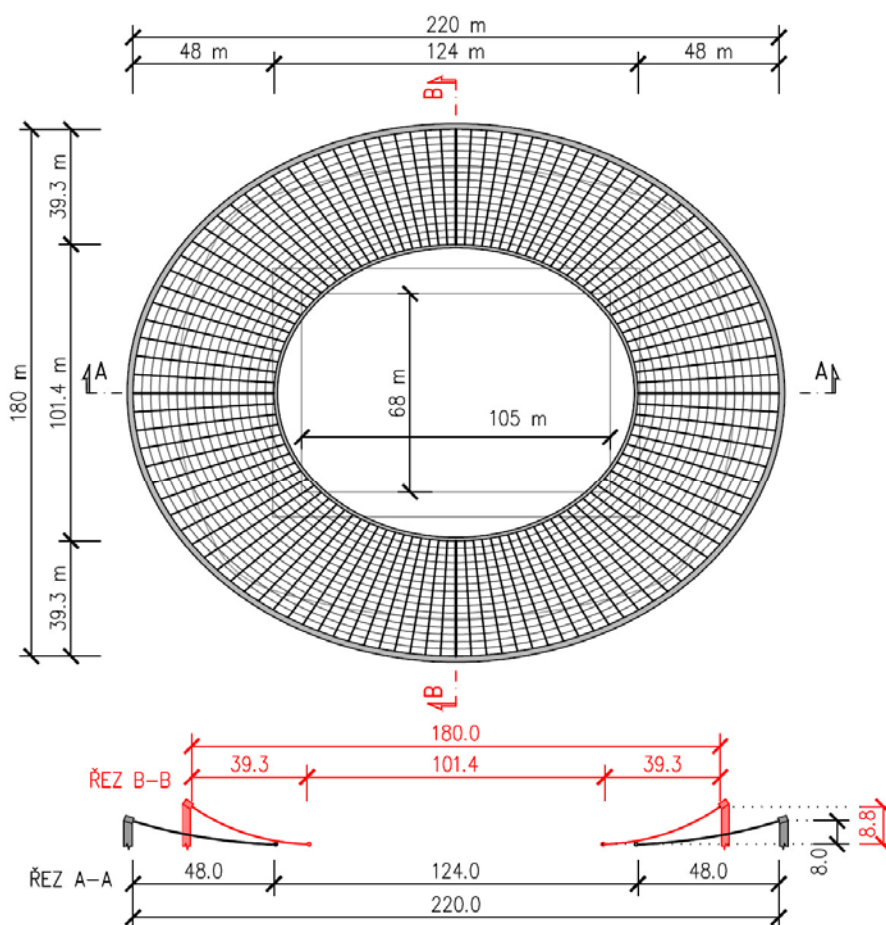
**Obr. 2** Model navrženého zastřešení.

## 2 Popis navrženého zastřešení

Rozměry vnější elipsy jsou ovlivněny rozměry tribun hlediště fotbalového stadionu, a tedy pro zvolený půdorys je navržena délka hlavní poloosy 110 m a vedlejší poloosy 90 m. Šířka pásu nad tribunami ve směru hlavní osy elipsy byla zvolena o velikosti 48 m. Z toho vyplývá délka hlavní poloosy vnitřní elipsy 62 m. Délka vedlejší poloosy vnitřní elipsy pak vyplývá ze studie optimálního zatížení dvou elips z hlediska eliminace ohybového namáhání obvodových nosníků ve vodorovném směru. Jedním ze závěrů studie bylo, že pokud poměr délek poloos  $b/a$  vnější a vnitřní elipsy je stejný, pak jejich křivosti  $K$  jsou vzájemně lineárně závislé a nulové ohybové namáhání vyvolá stejné zatížení, s průběhem lineárně závislým na křivosti. S ohledem na tento závěr je délka vedlejší poloosy vnitřní elipsy navržena následujícím způsobem

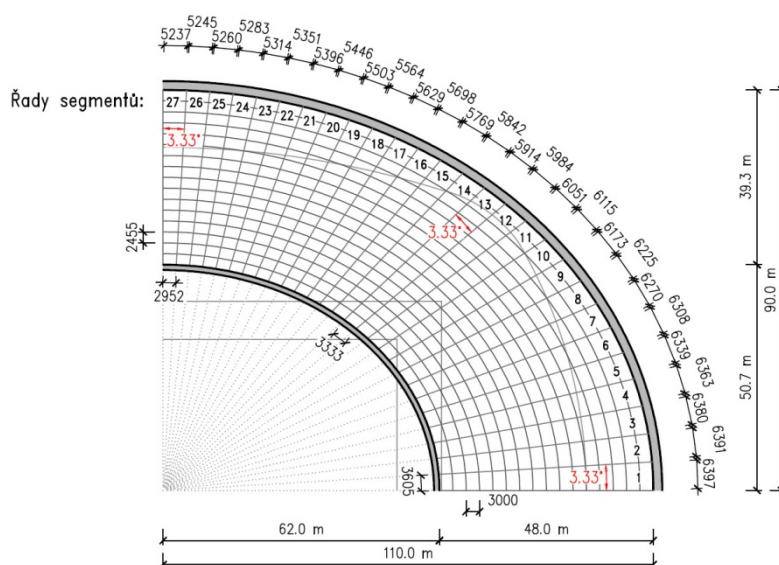
$$\frac{b_{\text{int}}}{a_{\text{int}}} = \frac{b_{\text{ext}}}{a_{\text{ext}}} \Rightarrow b_{\text{int}} = a_{\text{int}} \cdot \frac{b_{\text{ext}}}{a_{\text{ext}}} = 62 \cdot \frac{90}{110} = 50,73 \text{ m.}$$

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 (**Obr. 3**).



**Obr. 3** Konstrukční uspořádání zastřešení.

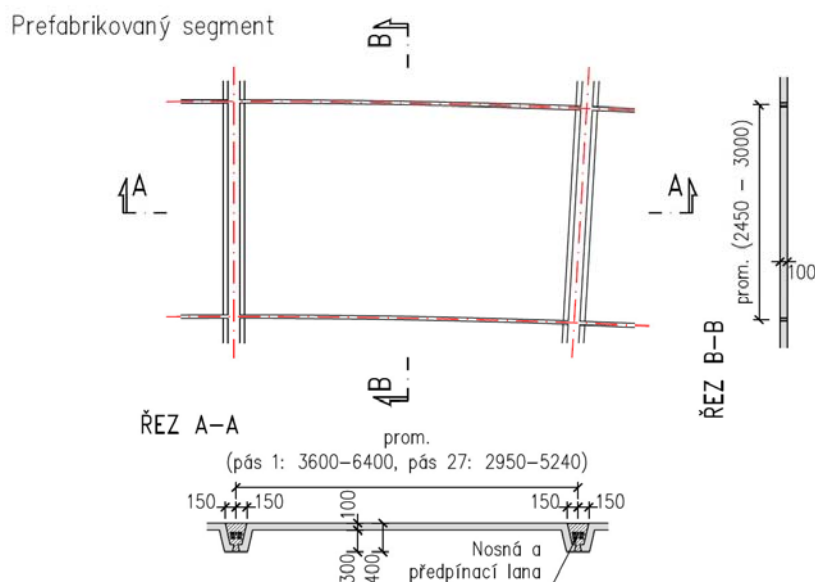
V důsledku nerovnoměrné křivosti elipsy je možné radiální lana trasovat několika způsoby a tím ovlivnit délku jednotlivých segmentů. Na uvedeném zastřešení bylo zvoleno trasování s dodržением konstantního středového úhlu mezi jednotlivými skupinami radiálních lan. Velikost úhlu byla zvolena tak, aby se rozměry segmentů v podélném směru pohybovaly v rozumných mezích. Zvolený středový úhel tedy je  $10/3^\circ$  a rozděluje skořepinu na 108 řad segmentů. Tento způsob trasování lan je nejvýhodnější z hlediska pracnosti při projektování a modelování konstrukce. Délka hrany segmentů, přilehlé k vnější elipse, se pak pohybuje od 6,397 m (při hlavním vrcholu) do 5,237 m (při vedlejších vrcholech). Délka hrany přiléhající k vnitřní elipse je v rozmezí 3,605 - 2,952 m (**Obr. 4**).



**Obr. 4** Schéma rozměrů segmentů v rámci jednoho kvadrantu.

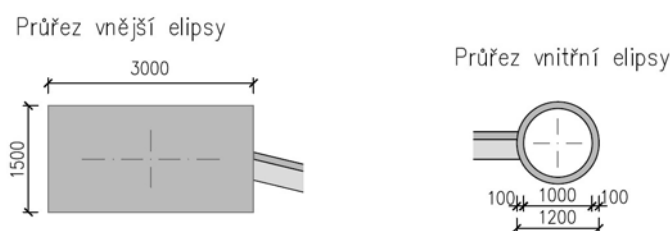
Stanovení velikosti vzepětí eliptické střechy opět vychází ze studie zatížení elipsy. Nulové ohybové namáhání elipsy vyvolá zatížení lineárně závislé na křivosti elipsy. Aby obvodové elipsy nebyly ohybově namáhány a tedy nedocházelo k značným vodorovným posunům, které dále způsobují velké svislé deformace střechy, je nutné tomuto průběhu přizpůsobit velikost kotevních sil v lanech. Navíc tíha jednotlivých řad segmentů připadající na jednotlivá lana se díky zmenšující se šířce pásu střechy směrem k vedlejší ose také zmenšuje. Z těchto důvodů velikost kotevních sil lan, působících na obvodové elipsy, musí být po délce střechy proměnná. Toho lze aktivně dosáhnout různou velikostí průvřsů jednotlivých lan. Vnější elipsa pak má tvar prostorové křivky, jejíž 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 průvřs střechy 8,0 m. Ve vedlejších vrcholech pak průvřs dosahuje velikosti 8,8 m (**Obr. 3**). Tyto hodnoty jsou dané výpočtem, který byl podrobně popsán dílčí zprávou projektu z roku 2012.

Plocha panelů z lehkého konstrukčního betonu je rovinná. Půdorysný tvar segmentů je přibližně lichoběžníkový s tloušťkou desky 0,1 m a rozměry žebra 0,4 x 0,3 m. Segmenty jsou uloženy na nosná lana, která jsou zakotvena do obvodových nosníků. V každém žebře je umístěno 12 lan plnicích nosnou funkcí a 14 lan sloužících pro předepnutí celistvé skořepiny. Jednotlivá lana mají průřezovou plochu  $150 \text{ mm}^2$  (**Obr. 5**).



**Obr. 5** Tvar prefabrikovaných segmentů.

Konstrukce tvoří tzv. samokotvený systém, kdy vodorovné síly z kotvení lan jsou přenášeny do obvodových nosníků a vyvozují v nich tlaková (vnější elipsa) a tahová (vnitřní elipsa) namáhání. Z toho pak vyplývá volba průřezů a materiálů obvodových eliptických nosníků. Vnější nosník je tvořen železobetonovým obdélníkovým průřezem, jehož rozměry jsou 3,0 x 1,5 m (**Obr. 6**). Vnitřní nosník je z ocelové trubky většího průměru 1,2 m a tloušťky stěny 100 mm.



**Obr. 6** Průřezy obvodových elips.

### 3 Postup výstavby

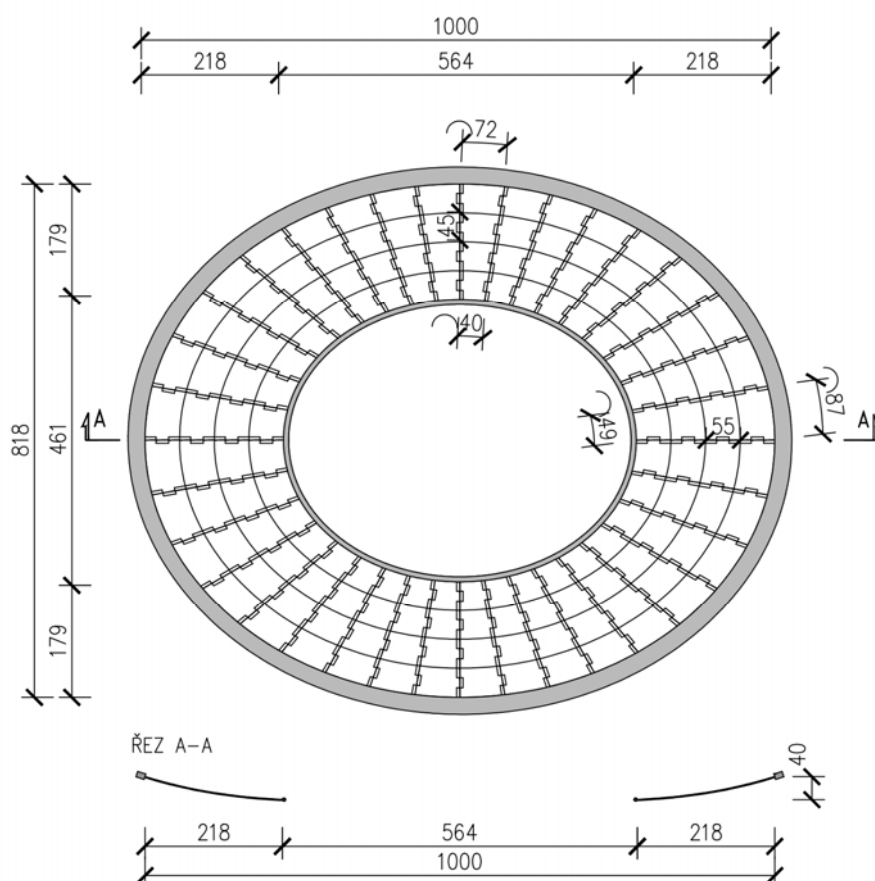
Nespornou výhodou visutých lanových střech je právě jejich postup výstavby, který dovoluje poměrně rychlé a na okolí téměř nezávislé zbudování konstrukce. Ze statického hlediska lze výstavbu konstrukce rozdělit do dvou hlavních fází. Hraničním stavem mezi hlavními fázemi výstavby je tzv. *výchozí* (nebo též *rovnovážný*) *stav*, od kterého by měly začínat všechny výpočty.

V 1. fázi výstavby je provedena betonáž vnější elipsy na svislých nosných prvcích a montáž vnitřní elipsy na montážní plošině. Poté jsou mezi oběma obvodovými elipsami natažena nosná lana, na která je následně vnitřní elipsa zavěšena do požadované polohy.

V dalším kroku jsou na lana pokládány a upevňovány betonové segmenty. Následně se do žebër osadí předpínací lana. V 2. fázi výstavby dojde k zalití spár mezi segmenty navzájem a také krajních spár u obvodových eliptických nosníků. 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 provozních zatížení.

## 4 Popis modelu

Funkční model konstrukce střechy byl vytvořen v měřítku 1:110, kterému následně odpovídají vnější půdorysné rozměry 1,0 x 0,818 m. Základní rozměry modelu zastřešení jsou zobrazeny na **Obr. 7**. Pro příjemnější práci s jednotlivými prvky malých rozměrů bylo přistoupeno ke zjednodušení tím, že jednotlivé řady jsou tvořeny pouze 4 segmenty namísto skutečných 16. Celková plocha zastřešení je složena ze 144 segmentů. Dále je zanedbáno výškové zvlnění vnější obvodové elipsy.



**Obr. 7** Základní rozměry modelu zastřešení.

Jednotlivé konstrukční prvky modelu jsou provedeny z překližky tl. 4 mm, jak je možné vidět na fotografiích výseku modelu konstrukce (**Obr. 8**). Segmenty membrány jsou na nosná lanka uloženy v drážce tak, aby bylo možné konstrukci střechy opakovaně rozebírat a demonstrovat

tak postup výstavby tohoto typu zastřešení. Lanka jsou do vnitřní elipsy tvořené mosaznou trubičkou o průměru 6 mm přikotvena napevno. Do vnější elipsy jsou lanka upevněna v ustavovacích šroubech zapuštěných do obvodové elipsy vytvořené z překližky tak, aby bylo možné měnit volnou délku lanek a tím rektifikovat průvės střechy. Tímto způsobem lze simulovat vnášení předpětí do zmonolitněné skořepiny.



**Obr. 8** Funkční model – jednotlivé konstrukční prvky a celkový pohled.

## 5 Závěr

Za pomoci funkčního fyzikálního modelu bylo vyvinuto optimální konstrukční uspořádání visuté lanové střechy z předpjatého betonu nad eliptickým půdorysem, přičemž funkční model konstrukce názorně ilustroval její působení. Model potvrdil nejen statickou funkčnost navrženého zastřešení, ale rovněž ukázal elegantnost a čistotu tvaru předpjaté membrány. V roce 2013 byl rovněž udělen patent číslo 303990 s názvem **Visutá lanová střecha** týkající se optimálního návrhu předpjaté membrány nad eliptickým půdorysem. Původci patentu jsou Ing. Pavlína Juchelková a prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.

Závěrem je možné říci, že předpjatou membránu lze považovat za plnohodnotnou alternativu zastřešení tribun sportovního stadionu, která navíc vykazuje nízkou spotřebu materiálů a technicky nenáročnou výstavbu