



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

**Stabilizace ocelového oblouku nekovovou membránou**

Stabilization of the steel arch by non-metallic membrane

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Ondřej Svoboda**

Doktorský studijní program : **Stavební inženýrství**

Studijní obor : **Konstrukce a dopravní stavby**

Školitel : **prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.**

---

**Praha, leden 2019**



## **PROHLÁŠENÍ**

Jméno doktoranda: Ing. Ondřej Svoboda

Název disertační práce: Stabilizace ocelové konstrukce nekovovou membránou

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Josefa Macháčka, Dr.Sc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: GAČR č. 103-13-25781S

V Praze dne 30.01.2019

.....  
podpis

## **Poděkování**

Největší dík patří mému školiteli prof. Ing. Josefu Macháčkovi DrSC. za všechny odborné konzultace, cenné rady a nekonečnou trpělivost, bez čehož by předkládaná disertační práce nemohla vzniknout. Dále bych rád vyzdvihl jeho velkou pomoc a zapojení při přípravě odborných článků, publikací a prezentací a to jak tuzemských, tak zejména mezinárodních.

Další dík patří i členům katedry ocelových a dřevěných konstrukcí za pomoc při přípravě experimentu a věcné připomínky při finální konzultaci předkládané práce. Též členům Experimentálního centra fakulty stavební děkuji za sběr dat a jejich dílčí vyhodnocení při realizaci experimentu.

Zmiňovaný experiment by nemohl vzniknout bez technické, personální a materiálové podpory firem ARCHTEX a EXCON.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za neutuchající podporu, kterou mi po celou dobu tvorby práce poskytovali.

Práce vznikla za podpory Grantové Agentury České Republiky v rámci grantu č. 103-13-25781S.

Praha, leden 2019

Ondřej Svoboda

## **Abstrakt**

Disertační práce ve své rešeršní části shrnuje problematiku komplexních membránových konstrukcí včetně dosavadních materiálových a výpočetních možností.

V experimentální části je představen model reálné konstrukce, na němž je v mnoha variantách zatížení zkoumáno chování dané konstrukce. Na základě dat z modelu je též validován model ve výpočetním programu SOFiSTiK a je prokázána jeho vhodnost k následné parametrické studii.

Parametrická studie je zaměřena na soustavu paralelních oblouků s různou vzájemnou geometrií. V primární studii je zkoumán vliv geometrického uspořádání na stabilitu a vzpěrnou únosnost středového trubkového oblouku. Navazující studie ukazují vliv tuhosti krajních oblouků, různé míry předpětí v membránové ploše a v poslední řadě také výhody použití symetrického I-průřezu.

## **Abstract**

The PhD Thesis summarizes in its bibliographic search problems of complex membrane structures including current material and computational options.

A model of real structure is presented in the experimental part and the behaviour of given structure is investigated under various loadings. Based on received data the finite element model in program SOFiSTiK is validated to prove its suitability to the subsequent parametric study.

The parametrical study is focused on a system of parallel arches with various mutual geometry. Influence of geometrical arrangement on stability and strength of central steel arch is of the primary interest. Following studies show influence of stiffness supplied by boundary arches, various pretension in the membrane plane and last but not least advantages of a usage of a symmetrical I-profile.

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Současný stav řešené problematiky .....	9
2.1 Rozdělení a příklady realizovaných konstrukcí .....	9
2.1.1 Membránové konstrukce .....	9
2.1.2 Ostatní atraktivní konstrukce .....	13
2.2 Materiály a konstrukce lineárních nosných prvků .....	15
2.2.1 Lana .....	15
2.2.2 Popruhy .....	16
2.2.3 Keder profily .....	17
2.3 Materiály a technologie pro nekovové membrány .....	17
2.3.1 Výroba .....	17
2.3.2 Materiálové vlastnosti potahovaných tkanin .....	18
2.4 Teoretické problémy při řešení membránových konstrukcí .....	21
2.4.1 Předpětí a jeho dopad na stabilitu membránového povrchu .....	21
2.4.2 Určení zatížení membránové plochy .....	25
2.4.3 Kombinace zatížení a únosnosti jednotlivých prvků .....	27
2.4.4 Docílení požadovaného tvaru membrány .....	29
2.4.5 Metody spojování dílčích pruhů v celistvý povrch .....	30
2.4.6 Metody přenesení sil v okrajových oblastech .....	31
2.4.7 Detaily rohových oblastí .....	32
2.5 Současný stav řešení obloukových konstrukcí .....	33
2.5.1 Pevnostní posudek průřezu .....	33
2.5.2 Stabilitní posouzení oblouků v rovině .....	34
3. Vytýčení cílů disertační práce .....	38
3.1 Cíle experimentální části .....	38
3.2 Cíle teoretické části .....	39
4. Experimentální část .....	40
4.1 Teoretická a praktická příprava experimentu .....	40
4.2 Popis modelu .....	41
4.2.1 Materiálové a geometrické charakteristiky .....	41
4.2.2 Popis měřících a zatěžovacích bodů .....	44
4.3 Způsoby zatěžování .....	45
4.4 Metodika vyhodnocení a výstupy z experimentu .....	47
4.4.1 Způsob měření dat .....	47

4.4.2	Statistická metoda pro vyhodnocení dat z jednotlivých měření	47
4.4.3	Výstupy ze symetrického zatěžování	49
4.4.4	Výstupy z nesymetrického zatěžování	50
5.	Numerická analýza provedeného experimentu	52
5.1	Popis programu SOFiSTiK	52
5.2	Popis numerického modelu	52
5.2.1	Geometrie, materiál a tvorba sítě	52
5.2.2	Popis výpočetní metody	55
5.3	Samotný oblouk	55
5.3.1	Symetrické zatížení	55
5.3.1	Nesymetrické zatížení	56
5.4	Kompletní membránová konstrukce	57
5.4.1	Symetrické zatížení	57
5.5	Konstrukce stejného typu jako v experimentu, ale s reálnými rozměry	58
5.5.1	Geometrické a materiálové charakteristiky	58
5.5.2	Zatížení	59
5.5.3	Výpočet a posouzení	60
6.	Parametrická studie	63
6.1	Citlivostní studie	64
6.2	Vliv parametrů rozpětí, vzepětí a rozteče u studie s pěti oblouky se symetrickým trubkovým průřezem	65
6.2.1	Samostatně stojící oblouky	65
6.2.2	Komplexní typy konstrukcí s membránou s pevným okrajovým uložením	70
6.2.3	Komplexní typy konstrukcí s membránou s různou tuhostí okrajových příhradových oblouků	83
6.2.4	Sestava oblouků s jednoose symetrickým průřezem a pevným okrajovým uložením	87
6.3	Závěry z parametrické studie	91
7.	Závěr	92
7.1	Výsledky a výstupy z experimentální části	92
7.2	Teoretická část	92
7.3	Přínosy práce k řešené problematice	93
7.4	Náměty pro další výzkumnou činnost	94
8.	Seznam obrázků a tabulek	95
8.1	Seznam obrázků	95

8.2 Seznam tabulek .....	98
9. Seznam použité literatury .....	99
9.1 Normy.....	99
9.2 Publikace .....	99
9.3 Webové stránky .....	101
10. Vlastní publikace autora .....	102
11. Přílohy .....	104

# 1. Úvod

Disertační práce je zaměřena na problematiku stabilizace ocelové konstrukce textilní membránou a ovlivnění stability a únosnosti podpůrného ocelového oblouku v závislosti na jeho rozpětí, vzepětí a vzdálenosti od ostatních podpůrných částí komplexní membránové konstrukce.

S ohledem na náročnost komplexních výpočtů membránové konstrukce (jak časovou tak softwarovou) je pro potřeby inženýrské praxe účelné mít jednoduchý a dostupný návod, jak v nižším stupni stavební dokumentace relativně přesně a bezpečně navrhnout podpůrnou konstrukci pro nosnou plochu membrány.

Cílem disertační práce je stanovit pro dané typy konstrukcí zjednodušený postup pro stabilitní posouzení podpůrného ocelového oblouku, které je ovlivněno zejména celkovým geometrickým uspořádáním, tuhostí membrán a způsobem jejich uložení i různou mírou předpětí v membránové ploše.

Práce je členěna do šesti základních kapitol:

- 1) Současný stav řešené problematiky – v této části je stručně shrnutý současný stav poznání v oblasti membránových konstrukcí, stability štíhlých plochých ocelových oblouků a interakce nekovových membrán s podpůrnou konstrukcí.
- 2) Vytýčení cílů disertační práce.
- 3) Experimentální část.
- 4) Numerická analýza provedeného experimentu.
- 5) Parametrická studie – tato kapitola, jako stěžejní část celé práce, popisuje na parametrické studii různých typů konstrukcí vliv geometrie, tuhosti membrány a obvodových prvků a různé míry předpětí na stabilitu středového podpůrného oblouku. Konkrétně se jedná o porovnání součinitelů kritické délky v závislosti na zvolených parametrech.
- 6) Závěr – zde jsou shrnuty zásadní poznatky z výzkumu a náměty na další práci.



## 2. Současný stav řešené problematiky

S vývojem stavebních materiálů, zejména materiálů na bázi plastických hmot a vysokopevnostních ocelí a novými možnostmi při samotné výstavbě, vznikala od počátku osmdesátých let 20. století řada zajímavých, neokoukaných staveb, označovaných jako „*membránové konstrukce*“. Tyto konstrukce se vyznačují zejména svou lehkostí a subtilností i při velkém rozpětí a výhradně tahovým namáháním po celé ploše zakřiveného povrchu. Tím je dokonale využita mechanická vlastnost použitého materiálu, kterou je relativně vysoká pevnost v tahu.

Prvotním problémem u membránových konstrukcí je nalezení správné geometrie výsledného tvaru (*formfinding*) [6], [7]. To je podstatné jak z hlediska celkové napjatosti a tuhosti (více zakřivené plochy jsou prostorově tužší a vzniká u nich menší napětí než u ploch málo zakřivených), tak z konstrukčního hlediska, kde se jedná o detaily okrajových a rohových oblastí a zejména o odvodnění finální konstrukce. Nejdůležitějším aspektem pro vyhovující stabilitu výsledné membrány je, aby měl povrch dvojí křivost. Směr s konkávní křivostí přenáší veškerá gravitační zatížení, zatímco konvexní směr zatížení od sání větru a v případě otevřených membrán i od podfouknutí větrem.

Velká pozornost se musí věnovat výrobě materiálu samotné membrány, montáži (tzn. vnesení požadovaného předpětí) a spojení membrány s podpůrnou konstrukcí přímo na staveništi [8], [9].

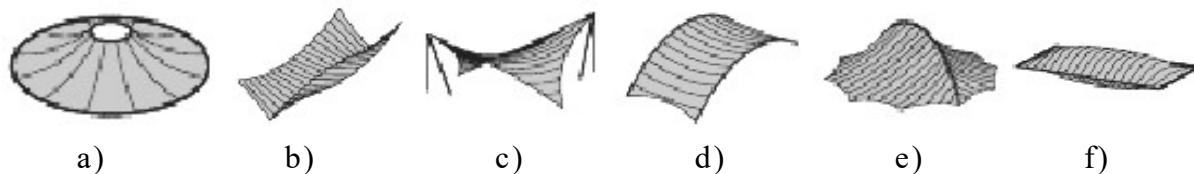
Práce se soustředí na vyšetření vzájemného ovlivnění hlavní nosné ocelové konstrukce, zejména štíhlých ocelových oblouků, a samotné membrány.

### 2.1 Rozdělení a příklady realizovaných konstrukcí

#### 2.1.1 Membránové konstrukce

Dělení membránových konstrukcí je možné provést na základě různých způsobů podepření okrajů či částí plochy [10], [11], (obr. 1).

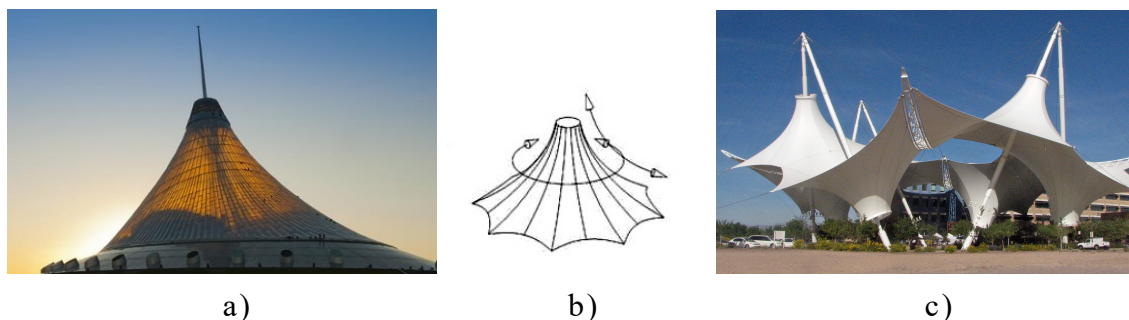
Samotná membrána může být uchycena buďto bodově, poddajně podél volných okrajů, nebo pevným podepřením podél tuhých okrajů.



**Obr. 1 Topologie membránových konstrukcí**  
 a) Konstrukce s vystouplým bodem (high-point)  
 b) Konstrukce s hřebenem a údolím  
 c) Markýza  
 d,e) Membrána podepřená obloukem  
 f) Pneumaticky předepnutý polštář

### 2.1.1.1 Kuželové membrány podepřené uprostřed plochy jedním či více body (high-point structures)

Mezi takové konstrukce se řadí ty membrány, které jsou podepřeny tlačným prvkem uvnitř plochy a vytvářejí kuželovitou plochu. Doposud největší stavbou tohoto typu je zábavní centrum Khan Shatyr v Kazašské metropoli Astana (obr. 2 a,c).



**Obr. 2 Příklady „high-point“ konstrukcí**  
 a) Khan Shatyr Entertainment Centre – Astana ([www.dezeen.com](http://www.dezeen.com));  
 b) Princip high-point konstrukcí [1];  
 c) SkySong shade structure – Phoenix (USA) ([www.ftlstudio.com](http://www.ftlstudio.com))

Výše uvedená konstrukce je však výjimečným představitelem tohoto typu, a tak u ní ani nelze nalézt zásadní přednosti těchto konstrukcí. Jednou z nich je i způsob vnesení předpětí. Předpětí se do takovéto membránové plochy nejlépe vnáší zvýšením vrcholové části, nebo naopak stažením poddajných okrajů, či bodů na okraji k zemi.

### 2.1.1.2 Membrány s hřebenem a údolím

Konstrukce, kde jsou výrazné vrcholové a údolní linie, označujeme jako membrány s hřebenem a údolím. Vrcholová i údolní linie může být tvořena jak pevným obloukovým prvkem v podobě ocelové konstrukce, tak poddajným lanovým prvkem. Příkladem takové konstrukce, byť s rovnými hřbetními a údolními liniemi, může být třeba zastřešení tribun fotbalového stadionu v Seville (obr. 3).



Obr. 3 Estadio Olympicko – Sevilla, Španělsko (<http://www.sattler-ag.com>)

### 2.1.1.3 Markýzy (hyperbolické paraboloidy)

Přístřešek (markýza) ve tvaru zborcené plochy hyperbolického paraboloidu (tzv. hyperu), může být kotven buďto bodově v rozích plachty, nebo spojitě podél okrajů. Tento typ je nejjednodušším příkladem membránové architektury a pro svou jednoduchost a atraktivnost je hojně využíván jak pro plnohodnotné zastřešení, tak pouze jako přístřešek a ochrana před sluncem (obr. 4).



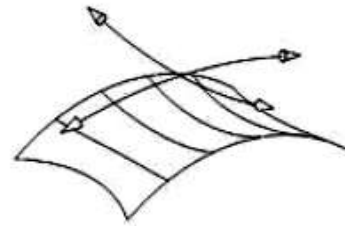
Obr. 4 Slunečníky pro soukromého investora – Abu Dhabi (<http://www.sattler-ag.com>)

#### 2.1.1.4 Obloukové konstrukce

Obloukem podepřené membrány jsou svým tvarem velmi podobné membránám s výraznými vrcholovými a údolními liniemi, nicméně rozdíl v těchto typech je takový, že u obloukové membrány je výrazný jeden hlavní nosný oblouk (obr. 5) a samotná membrána se z něj dále snižuje k okrajům a je kotvena buď přímo, nebo přes další podpůrné konstrukce do země.



a)



b)

**Obr. 5** Příklady obloukové geometrie

a) Superplash – Německo (<http://www.sattler-ag.com>);

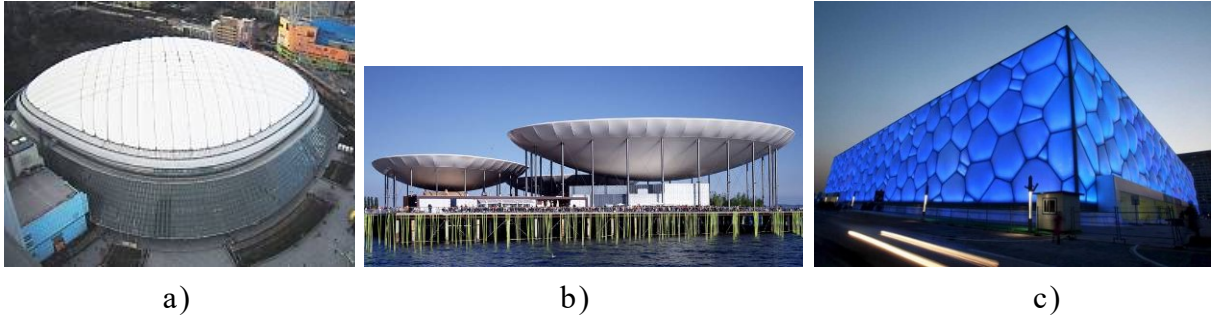
b) Princip obloukových konstrukcí [1];

#### 2.1.1.5 Komplexní konstrukce

Komplexními konstrukcemi rozumíme takové stavby, které nejdou jednoznačně klasifikovat do jednoho z výše uvedených typů. Jedná se o kombinaci dvou a více typologií, z nichž žádná není výrazně převládající.

#### 2.1.1.6 Pneumaticky podepřené konstrukce

Tento typ vícevrstevných membránových konstrukcí se dále dělí na přetlakové halové konstrukce (obr. 6a), konstrukce s velkými přetlakovými polštáři (obr. 6b) a konstrukce z vícevrstevných membránových elementů, které jsou k sobě připojeny pomocí různých konstrukčních detailů (obr. 6c). Obecně vykazují vícevrstvé membrány mnohem lepší tepelně izolační vlastnosti a jsou proto hojně využívány jako obvodové pláště budov, nebo přímo jako střešní krytiny.

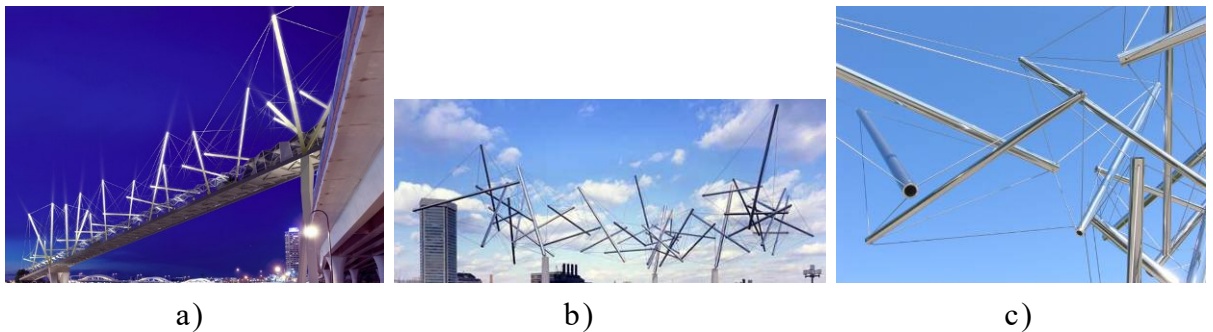


Obr. 6 Pneumaticky předepnuté membrány  
 a) Big egg - Tokio ([www.japan-guide.com](http://www.japan-guide.com));  
 b) Galets Expo 2002, Neuchatel – Švýcarsko([www.tensinet.com](http://www.tensinet.com));  
 c) Vodní kostka – Peking ([www.swimming.about.com](http://www.swimming.about.com))

## 2.1.2 Ostatní atraktivní konstrukce

### 2.1.2.1 Konstrukce s pouze taženými a tlačnými prvky

Takovéto konstrukce se v odborné literatuře označují jako „*Tensegrity Structures*“. Objasnění jejich principů je nejlépe patrné z definice, kterou ve své disertační práci uveřejňuje Valentín Gómez Jáuregui [12]: *Tensegrity (tensile integrity) je konstrukční princip založený na použití izolovaných tlačných komponent uvnitř sítě tažených prvků, přičemž tlačené prvky (nejběžněji vzpěry nebo tyče) nejsou v žádném vzájemném kontaktu a předepnuté tažené prvky (zpravidla lana nebo táhla) prostorově ohraničují a definují celý systém.*



Obr. 7 „Tensegrity structures“  
 a) Kurilpa bridge Brisbane (<http://tensegritychiro.com>);  
 b) Skulptura od Kennetha Snelsona ([www.childrenhospital.com](http://www.childrenhospital.com));  
 c) Detailní záběr na „volně plující“ tlačené prvky ([www.compadre.org](http://www.compadre.org))

## Vlastnosti

- Tyto konstrukce jsou velmi subtilní a nemají prakticky žádné neefektivní části.
- Vlivem komplexního předpětí není jejich stabilita závislá na gravitaci a vnějších podporách, při vhodné konfiguraci lze dosáhnout „superstability“.
- Přidáním dalších komponent mohou být relativně jednoduše rozšiřovány a zpevňovány.
- Se zvyšující se mírou předpětí roste jejich únosnost a tuhost.
- Vzhledem k izolaci tlačných prvků a jejich relativně krátké délce dochází vesměs pouze k namáhání prakticky v pouze prostém tlaku, s minimálním namáháním na vzpěr.
- Konstrukce působí a funguje jako celek, takže nedochází k lokálnímu přetížení jednotlivých prvků [13].

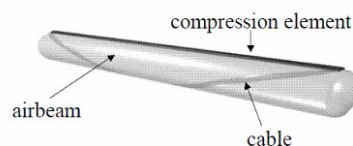
### 2.1.2.2 Vnitřně předepnuté (pneumatické) konstrukce

Vnitřně předepnuté konstrukce, anglickým výrazem označované jako „*Tensairity Structures*“, jsou velmi podobné, jako výše uvedené „*Tensegrity Structures*“. Prostorová síť tažených prvků je zde nahrazena vnitřně předepnutým prostorovým prvkem, který plní funkci taženého elementu. Takovým prvkem je většinou vícevrstvý, přetlakem předepnutý membránový polštář, jenž je v místech extrémních tahových napětí vyztužen přidavným lanovým prvkem.

Jak je z obrázku zřejmé (obr. 8a), takováto konstrukce je schopna přenášet i velmi velká zatížení.



a)



b)



c)

**Obr. 8** „*Tensairity structures*“

- a) Testování mostku s pneumatickým polštářem (<http://blog.construmatica.com>);  
b) Princip „*Tensairity*“ konstrukce ([www.flickr.com](http://www.flickr.com));  
c) Lávka pro chodce ([www.canobbio.com](http://www.canobbio.com))

## 2.2 Materiály a konstrukce lineárních nosných prvků

Lineární nosné prvky se v membránových konstrukcích využívají zejména pro ukotvení membrány na jejím okraji. Membrána může být na okraji kotvena buďto poddajně (v případě ocelových lan a textilních popruhů) nebo s pevným okrajem v případě upínacích lišt s keder profily (relativně tuhý prvek ve tvaru kabelu vyrobený z jednotného PVC vlákna). Ocelová lana slouží i jako kotvící prvky podpůrné ocelové konstrukce.

### 2.2.1 Lana

Lana jsou vinuta z pramenů okolo jádra, přičemž každý pramen je dále vinut z drátů s mezí pevnosti až 1770 MPa. Dráty jsou buď z uhlíkové nebo z korozivzdorné oceli a jsou zpevňovány tažením za studena a patentováním. Směr vinutí pramene i celého lana může být buď pravotočivý nebo levotočivý, čemuž odpovídá označení „Z“ a „S“ pro pramen, resp. „Z“ a „S“ pro celé lano.

Podle konstrukce vrchní vrstvy se rozlišují otevřené spirálové prameny, částečně uzavřené spirálové prameny, plně uzavřené spirálové prameny a kruhová stáčená pramencová lana.

Všechna lana musí mít protikorozní úpravu, která se dá rozdělit do následujících kategorií.

1. Ochrana jednotlivých drátů (galvanizace = potažení eutektickou slitinou zinku (95 %) a hliníku (5 %)).
2. Vnitřní protikorozní ochrana lana (aplikace vhodné výplňové sloučeniny do mezer mezi dráty – nejčastěji zinkový prach rozptýlený v syntetickém oleji).
3. Venkovní protikorozní ochrana (nátěr ve 4-6 vrstvách, který je nanesen až po zatížení lana).
4. Případně vložení lana do plastového obalu.
5. Vhodně zvolené detaily (zejména odklon dešťové vody).

Spojení konců lan je provedeno buďto splétáním (možné pouze u vinutých pramencových lan) nebo pomocí koncových spojů.

Koncové spoje se dělí na 2 typy podle toho, jakou formou probíhá přenos síly mezi lanem a lanovou koncovkou:

- I. Přenos síly pomocí tření a materiálové soudržnosti.
- II. Přenos síly pomocí tření a tvarovou úpravou konce lana.

**Lanové spojky** jsou vyrobeny z vysokopevnostní oceli nebo z ocelového odlitku s kónickými vnitřními stěnami. Přenos síly z lana do kónického odlitku probíhá třením, dále chemicko-mechanickou materiálovou vazbou a poté z odlitku do těla spojky pomocí tvarové úpravy, tj. vzájemným zaklesnutím. Kónický odlitek může být plněn kovem nebo plastovým plnivem na bázi polyesteru či epoxidové pryskyřice.

**Nalisované koncovky** jsou vyrobeny z hliníku či oceli a přenos síly z lana na koncovku je realizován zaklesnutím koncovky a lana. Nejčastěji používaným typem stálého ukončení lana je nalisovaná hliníková objímka. Nevýhodou nalisovaných koncovek je, že ve výsledku vytváří excentrický spoj.

**Lanové svorky** se používají pro lana s maximálním průměrem do 40 mm a jsou vhodné pouze pro dočasné konstrukce. Během montáže se musí věnovat pozornost tomu, aby sedla svorek byla na straně zatíženého lana a aby vzdálenost mezi svorkami byla 1-3 násobek jejich šířky. Při správném rozmístění svorek ve spoji přenáší každá z nich přibližně stejné zatížení.

### 2.2.2 Popruhy

V membránových konstrukcích se popruhy používají zejména pro vyztužení volných okrajů, kde by tečnové napětí podél okraje mohlo způsobit vzájemné posunutí mezi membránou a lanem protaženým v kapse při okraji.

Popruhy mohou být vyrobeny z polyesteru nebo polyamidu, ale vzhledem k vyšší pevnosti v tahu a lepším vlastnostem při smršťování se nejčastěji používají popruhy polyesterové. Ty jsou k membráně přišity nebo přilepeny.



### 2.2.3 Keder profily

Použitím upínacích keder lišt a keder profilů se vytváří na membránové konstrukci tuhý okraj. Přenos síly z membrány do okolní konstrukce je zajištěn upínacími lištami, do kterých je uzavřen keder profil. Keder funguje jako lineární nosný prvek navržený na příčný tah. Průměr profilu je od 5 do 12 mm a nejčastěji se vyrábí z jednotného PVC vlákna, polypropylenu nebo polyuretanu (obr. 9).

V závislosti na rozsahu přenášených sil mohou být plastové kedery nahrazeny ocelovými lany a hliníkovými upínacími lištami.



Obr. 9 Komponenty pro kotvení pomocí keder profilů  
a) Keder profil protažený kapsou v membráně vytvořenou přehnutím a svařením tkaniny;  
b) Dvoudílná upínací keder lišta

## 2.3 Materiály a technologie pro nekovové membrány

Plošné nosné prvky lze rozdělit do dvou základních skupin - potahované tkaniny a fólie. Pro výrobu tkanin se nejčastěji používají kombinace PES (polyester) nebo PET (polyethylen) vláken potažených PVC (polyvinylchlorid) a skleněných vláken potažených PTFE (polytetrafluoretylen). Na výrobu fólií se nejběžněji využívají materiály na bázi polymerů jako ETFE (ethylen tetrafluorethylen kopolymer), THV (tetrafluoroethylen-hexafluoropropylen-vinylidfluoride-terpolymer) a novější EFEP, což je ETFE modifikovaný o hexafluoropropylen.

### 2.3.1 Výroba

#### 2.3.1.1 Potahované tkaniny

Výroba tkaniny se provádí splétáním na splétacích strojích. Pro tkaniny membránových konstrukcí se nejčastěji používají 2 typy splétání; *plátnová vazba* (nejjednodušší a nejhustší proplétání, kdy dochází ke křížení osnovy a útku hned za sebou) a *košíková vazba* (což je modifikovaná plátnová vazba se dvěma vlákny osnovy a útku u sebe). U obou typů jsou vlákna osnovy během tkaní držena pod konstantním tahem, a tím je ve směru osnovy zajištěn větší modul pružnosti.

Většina typů vysokopevnostních polyesterových tkanin je splétána na jehlovém stavu ve standardní šířce 2,05 - 2,5 m (max. 5 m) až do kontinuální délky 2200 m.

Potahování tkanin výrazně ovlivňuje životnost finálního výrobku. S různou kombinací a tloušťkou dílčích vrstev tkaniny, zátěru a finální úpravy povrchu může být zabráněno různým škodlivým vlivům. Zátěr pro polyesterové tkaniny je PVC-P (polyvinylchlorid-plastisol) v běžné tloušťce 0,08 - 0,25 mm.

Při speciálních požadavcích na pevnost, životnost a požární odolnost se používají tkaniny ze skelných vláken potažené PTFE zátěrem. Tyto tkaniny mají větší nároky na manipulaci a vzhledem k náchylnosti k zauzlování a k lámání vyžadují i speciální okrajové detaily.

### **2.3.1.2 Fólie**

Fluoroplastické fólie, v tloušťkách od 50 do 250 mikrometrů, jsou vyráběny jako tenké nebo foukané filmy nejčastěji z ETFE a THV.

### **2.3.2 Materiálové vlastnosti potahovaných tkanin**

Na finální chování tkaniny mají zásadní vliv materiálové vlastnosti použitého vlákna. Vzhledem k rozměrové stálosti, odolnosti proti chemickým a fyzikálním vlivům a velké mechanické odolnosti jsou nejčastěji používána PET vlákna. Tato vlákna jsou následně splétána do příze a to buďto pravotočivě „Z“ nebo levotočivě „S“.

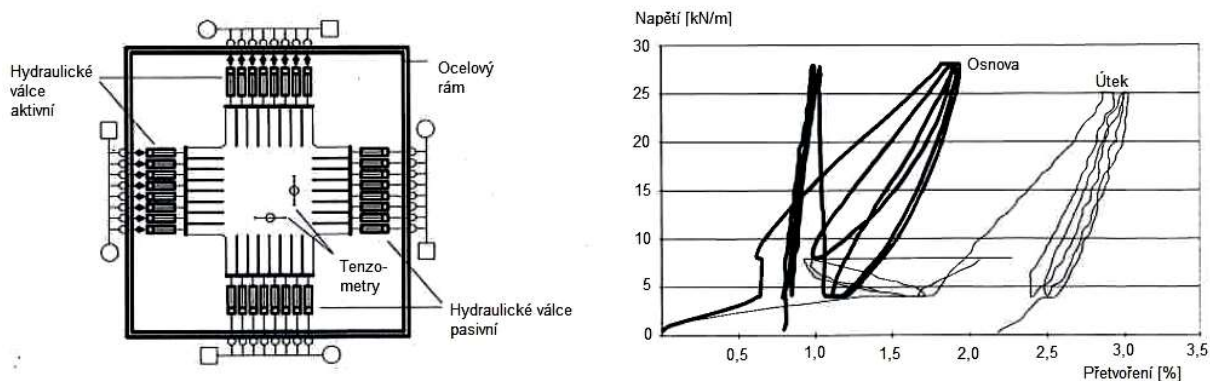
Protože je tkanina zatížena pouze tahovými osovými silami, lze konstruovat subtilní konstrukce kopírující průběh těchto sil. Jistá míra poddajnosti takovéto konstrukce je výhodná, protože pomáhá rozložit napěťové špičky v rohových a okrajových oblastech.

Nejdůležitějšími materiálovými vlastnostmi textilií jsou pevnost, tuhost, tendence k šíření trhlin a relaxační a dotvarovací vlastnosti (tab. 1, podle [14]).

**Tab. 1 Materiálové a mechanické vlastnosti tkanin**

	materiál	plošná hm.	pevnost v tahu
		(g/m <sup>2</sup> )	osnova/útek (N/5cm)
bez povrchové úpravy	bavlněné tkaniny	350 - 520	1700/1000 – 2500/2000
	tkaniny z PTFE	300 – 700	2390/2210 – 4470/4510
s povrchovou úpravou	PES/PVC typ I	800	3000/3000
	typ II	900	4400/3950
	typ III	1050	5750/5100
	typ IV	1300	7450/6400
	typ V	1450	9800/8300
	typ VI	2000	13000/13000
	skelná vlákna/PTFE	800-1550	3500/3500 – 7500/6500
skelná vlákna/silikon	800-1270	3500/3000 – 6600/6000	

Vzhledem k ortogonálně anizotropní podstatě tkanin dochází při zatížení k nezanedbatelnému ovlivňování vláken osnovy a útku. Vliv příčného zkrácení při působení tahové síly popisuje Poissonova konstanta, která je u tkanin stanovena experimentálně buďto jednoosým, nebo přesnějším dvouosým „biaxiálním“ testem (obr. 10). Mez pevnosti a modul pružnosti jsou u těchto tkanin výrazně závislé na čase a proto je zapotřebí uvádět tyto hodnoty i s příslušnými časovými údaji.



**Obr. 10 Schéma biaxiálního testu (vlevo); Příklad pracovního diagramu pro materiál skelná vlákna/PTFE (vpravo)**

Vyhodnocení výsledků z biaxiálního testu je provedeno ze vztahů [4][15][16]:

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} \\ E_{1122} & E_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Převvedeno na soustavu rovnic

$$n_{11} = E_{1111}(\varepsilon_{11} + \nu_{12}\varepsilon_{22}) \quad (2)$$

$$n_{22} = E_{2222}(\nu_{21}\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \quad (3)$$

kde  $n_{11}, n_{22}$  - tahová síla pro směr osnovy resp. útku,  
 $E_{1111}, E_{2222}$  - modul pružnosti pro směr osnovy resp.  
 útku,  
 $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$  - poměrné přetvoření pro směr osnovy resp.  
 útku,  
 $\nu$  - Poissonův součinitel.

V první fázi zatěžování se zatěhuje ve směru osnovy<sub>7</sub> (tj. pro  $\Delta n_{11} \neq 0$  a  $\Delta n_{22} = 0$ ), z čehož jsou získány hodnoty přetvoření  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}$ . V druhé fázi zatěžování je zatěhuje ve směru útku (tj.  $\Delta n_{11} = 0$  a  $\Delta n_{22} \neq 0$ ), a analogicky se získají hodnoty  $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ . Kombinací rovnic (2) a (3) je dosaženo vztahů pro výpočet ve směru osnovy:

$$\Delta n_{11} = E_{1111}\Delta\varepsilon_{11} + E_{1122}\Delta\varepsilon_{12} \quad (4)$$

$$0 = E_{1122}\Delta\varepsilon_{12} + E_{2222}\Delta\varepsilon_{22} \quad (5)$$

respektive ve směru útku:

$$0 = E_{1111}\Delta\varepsilon_{11} + E_{1122}\Delta\varepsilon_{12} \quad (6)$$

$$\Delta n_{11} = E_{1122}\Delta\varepsilon_{12} + E_{2222}\Delta\varepsilon_{22} \quad (7)$$

Odtud je možné stanovit moduly pružnosti  $E_{1111}, E_{1122}, E_{2222}$ .

Výslednou membránu, což je prostorově zakřivená plocha vytvořená z rovinných pásů tkaniny, nelze vytvarovat z jednoho kusu surové tkaniny, ale

musí být pečlivě nastříhána na jednotlivé proužky a v místech spojů také příčně kompenzována. Proužky se spojí sešitím, svařením nebo kombinací obou metod. Pevnost membrány je tak dána pevností jednotlivých spojů. Orientace spojů vůči dominantnímu směru zatížení výrazně ovlivňuje chování membrány jako celku. Při příčném namáhání spoje dochází k úbytku pevnosti membrány až o 50 % oproti pevnosti tkaniny. Leží-li naopak spoj rovnoběžně s dominantním směrem zatížení, je membrána ve spoji tužší a v okolí spoje může docházet k lokálnímu přetížení tkaniny. V obou případech je spoj problematickou oblastí a při výpočtu se musí tyto skutečnosti vzít v úvahu.

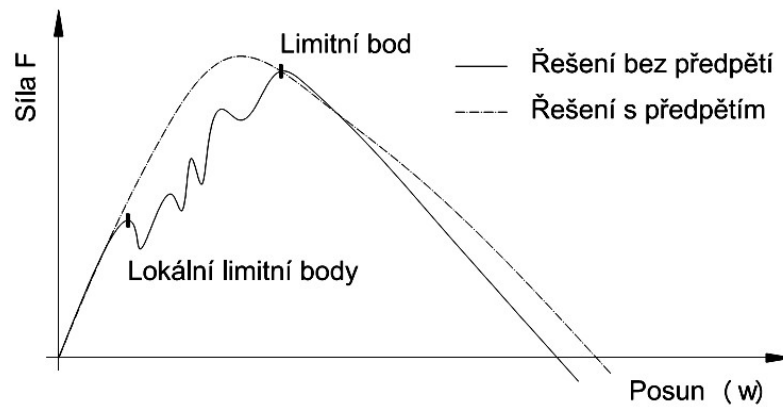
## **2.4 Teoretické problémy při řešení membránových konstrukcí**

### **2.4.1 Předpětí a jeho dopad na stabilitu membránového povrchu**

Tenké membránové konstrukce jsou velmi náchylné k lokální ztrátě stability, po níž následuje přeskok do nového rovnovážného stavu. Tento jev nemusí být nutně pro konstrukci nebezpečný, ale pro výpočetní systémy založené na numerickém řešení soustavy rovnic představuje mnohdy nepřekonatelné problém [17].

Z matematického hlediska dochází při ztrátě stability k singularizaci matice tuhosti konstrukce (determinant je roven nule). Z toho důvodu není možné matici tuhosti konstrukce invertovat a nemůžeme vyřešit hledané neznámé [18]. Při přeskoku do nového rovnovážného stavu má matice tuhosti záporný determinant a nevyrovnané síly počítané k nové konfiguraci se mohou zvětšovat i v rámci jednoho přírůstku zatížení. V takovém případě ani zmenšování přírůstku zatížení neumožní nalézt nový rovnovážný stav. Pomoci by mohlo větší zvětšení kroku, avšak pokud je takových bodů více za sebou, je prakticky nemožné detekovat nový rovnovážný stav.

Při řešení problému ztráty lokální stability nám pomáhá tzv. matice počátečních napětí  $\Delta K_{NL}$ , která se přičítá k původní matici konstrukce. Je výhodné ji do výpočtu zavést již od počátku zatěžování pomocí vneseného předpětí. Tím je nová matice konstrukce stabilnější a umožní nalézt limitní bod (globální ztráta stability) (obr. 11).



Obr. 11 Stabilizace matice tuhosti konstrukce pomocí matice počátečních napětí (předpětím)

$$\Delta K = \Delta K_L + \Delta K_{NL} \quad (8)$$

$$\Delta K_L = \int_V \delta(\Delta \varepsilon) \cdot (\Delta \sigma) dv = \int_V \delta(\Delta \varepsilon) \cdot D(\Delta \varepsilon) dv \quad (9)$$

$$\Delta K_{NL} = \int_V \delta(\Delta \varepsilon) \cdot \sigma dv \quad (10)$$

kde

$\Delta \varepsilon$  je přírůstek deformace

$\Delta \sigma$  je přírůstek napětí

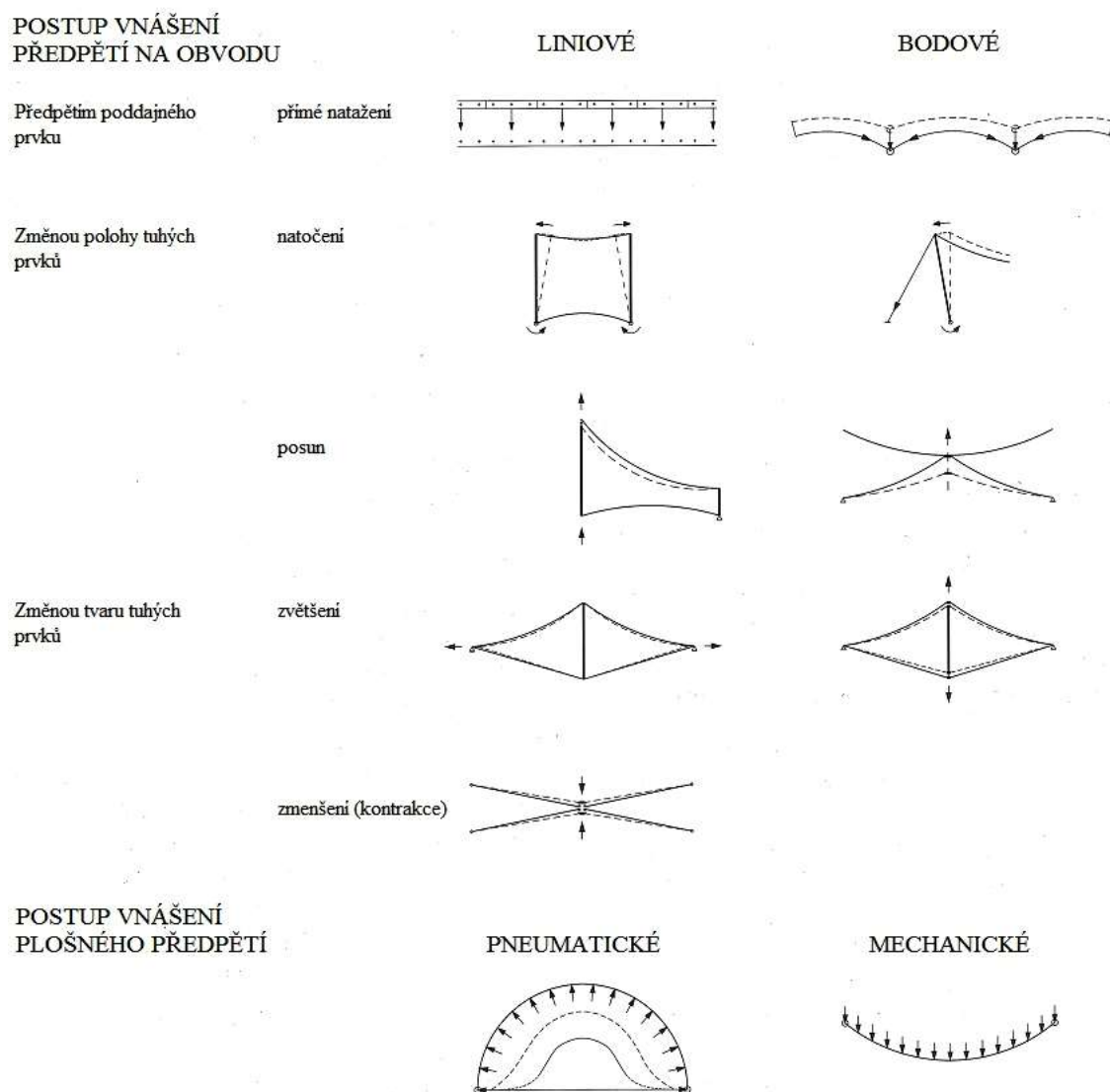
$\sigma$  je celkové napětí

Pro aktualizovanou Lagrangeovskou formulaci (AL) je nutné na počátku přírůstků aktualizovat polohu a napjatost konstrukce. Přírůstková lineární matice tuhosti konstrukce a matice počátečních napětí je pak v každém kroku přepočítána k novému stavu [19].

Jak vyplývá z rovnic, kladné  $\Delta K_{NL}$  matici regularizuje, tudíž kladné předpětí pomáhá v počáteční fázi stabilizovat řešení. Naopak záporné napětí urychluje dosažení limitního bodu. Je tedy zřejmé, že pokud je řešena lanová nebo plachtová konstrukce, je nezbytné ji předepnout. Pro praktický výpočet tedy není nutné hledat počáteční tvar konstrukce (průhyb od vlastní tíhy), protože postupným vnášením předpětí a přitěžováním se konstrukce automaticky dostane do správného předepsaného tvaru.

### 2.4.1.1 Možnosti vnesení předpětí do různých typů konstrukcí

S ohledem na velikost a typ konstrukce je několik možností, jak plochu membrány předepnout a uvést ji tak do požadovaného tvaru. Pro všechny velikosti a typy konstrukcí ovšem platí, že v jakékoliv fázi montáže či vnášení předpětí nesmí být překročena únosnost jakéhokoliv prvku konstrukce. Vyžaduje-li si to rozměr a důležitost stavby, musí být zavedeny speciální zatěžovací stavy v předpokládaných kritických stavech montáže a tyto stavy musí být náležitě posouzeny. Přehled základních způsobů vnášení předpětí je patrný z obrázku (obr. 12), nicméně v běžné praxi se velmi často objevuje kombinace více způsobů u jedné konstrukce.



Obr. 12 Možnosti vnesení předpětí do membránové konstrukce [20]

**a) Liniové vnesení předpětí do obvodového prvku**

Tento způsob je možný pouze za předpokladu, že obvodový prvek na okraji membrány je ohybově tuhý a umožní tak rovnoměrnou distribuci síly z napínacího zařízení do plochy membrány. S ohledem na počet napínacích zařízení, na jejich rozteč a na napínací délku se musí zvolit počet napínacích kroků tak, aby bylo předpětí vneseno co možná nejrovnoměrněji a nebyl přetížen nějaký prvek systému. S ohledem na ortogonálně anizotropní materiálové vlastnosti membrány může být finálního předpětí v obou směrech dosaženo pouze napínáním ve směru jednom. Vzhledem k vyššímu modulu pružnosti ve směru osnovy oproti útku se ve směru osnovy napíná větší silou na menší vzdálenosti a ve směru útku menší silou na vzdálenosti větší.

**b) Liniové vnesení předpětí naklopením či posunem nosníků**

Ideálním řešením, jak vnést do membrány mezi dvěma či více oblouky požadované předpětí, je ukotvení membrány na skloněné oblouky a jejich následné narovnání do správné polohy. Stejně tak můžeme membránu předeprnout svislým či vodorovným posunem nosníků.

**c) Bodové vnesení předpětí**

Tohoto typu vnesení předpětí se musí užít u bodově podepřených konstrukcích, jejichž okraj je nejčastěji vyztužen ocelovým lanem či v případech malých konstrukcí popruhem. Tyto výztužné okrajové prvky se sbíhají k rohům membránového povrchu, kde jsou kotveny do výztužných ocelových kotevních desek (viz dále 2.4.7). Posunem těchto pevných bodů se do konstrukce vnese požadované předpětí. Bod může být přemístěn přímo, pomocí napínacího zařízení k fixní podpoře, nebo nepřímo tak, že je uchycen k vrcholu kyvného sloupu, jenž je zkrácením dvou táhel natočen do požadované polohy.

Stejně tak u kuželových membrán s podpůrnými sloupy může být efektivně docíleno předpětí v membránové ploše prodloužením či naopak zkrácením podpůrných prvků.

**d) Plošné předpětí**



U konstrukcí s jednou křivostí (synklastické plochy) nemůže být předpětí vneseno předepnutím prvků ve vzájemně kolmých směrech, ale musí být vyvozeno konstantním tlakem kolmo na membránovou plochu. U lanových střech toho je možné docílit přitížením střešní konstrukce balastem, u membránových ploch přetlakem či podtlakem. Typickými příklady jsou přetlakové haly či stále oblíbenější polštáře z ETFE.

Pokud je u membránové plochy či jiných předepnutých prvků důvodné podezření, že by vlivem dotvarování a klimatických změn mohly postupně ztratit část ze svého předpětí, je žádoucí tento aspekt zohlednit při návrhu koncových detailů tak, aby byla možná pozdější rektifikace a dopnutí celého systému [20].

#### **2.4.2 Určení zatížení membránové plochy**

Obecně platí, že zatížení membránové plochy či všech ostatních částí tvořících komplexní konstrukci, by měla být stanovena podle příslušné národní normy platné pro zatížení pozemních staveb [1][2][3].

##### **2.4.2.1 Stálé zatížení**

Stálé zatížení pro membrány tvoří:

- a) tíha samotné membrány;
- b) tíha výztužných a spojovacích prvků;
- c) tíha nosných rámců, které jsou součástí membránové konstrukce a podpírají ji;
- d) tíha izolace a ostatních pevných součástí konstrukce, pokud ji přímo podporují, nebo ji zatěžují.

##### **2.4.2.2 Ostatní zatížení**

Ostatní zatížení jako světla, mikrofony, rozvody, požární rozstřikovače a další vybavení nezbytné pro plnění funkce konstrukce se má uvažovat jako stálé zatížení, pokud je trvale připevněno ke konstrukci, nebo jako užité zatížení,

pokud je pouze dočasné. Obě tato zatížení se mají vyloučit pro případ, že by působily na konstrukci příznivě (typicky pro případ sání větrem).

#### **2.4.2.3 Zatížení sněhem, ledem a deštěm**

Hodnoty pro výpočet zatížení sněhem je možné brát jak ze sněhových map, tak v současné době přesněji (a většinou i výhodněji) ze statistických měření příslušného hydrometeorologického ústavu. V úvahu se musí vzít deformace konstrukce pod takovýmto zatížením a případná kumulace sněhu či vody v místech potencionálních „jezírek“. Jako minimální se doporučuje hodnota  $0,3 \text{ kN/m}^2$ , která případně nahrazuje zatížení deštěm či nečistotami (listí, prach,...).

Může-li nastat sjíždění sněhu nebo ledu (vzhledem k velkému sklonu membránové ploch), musí se do výpočtu zahrnout lokální přetížení způsobené tímto jevem a případně vyhodnotit i tvorbu potenciálních trhlin.

#### **2.4.2.4 Zatížení větrem**

Určit zatížení větrem na membránové konstrukci bývá díky její tvarové rozmanitosti velmi obtížné, avšak tyto účinky zatížení je vždy nutné zahrnout do statického výpočtu a to obzvláště v případě, jedná-li se o lehké stavební konstrukce. V normách [3] bohužel nejsou uvedeny postupy pro výpočet zatížení na zborcených plochách, které obvykle membránové prvky vytváří, ale jsou uvedeny pouze vztahy pro rovinné nebo válcové přístřešky. V případě, že se jedná o tvarově velmi rozmanitou konstrukci, je možné zatížení stanovit buďto experimentálně ve větrném tunelu, nebo pomocí numerické simulace proudění označované jako CFD (Computational Fluid Dynamics) [21] za použití softwaru. Zapomenout se nesmí ani na dynamické účinky větru, jako je flutter (rozkmitání konstrukce ve směru kolmém na směr větru) na volném okraji membránové konstrukce či posouzení na resonanci jak dílčích částí, tak celku.

Pro výpočet pomocí CFD je důležité, kromě určení primárního tvaru posuzované konstrukce, také nastavení vstupních parametrů proudícího média. V případě posouzení zatížení větrem je výplňové médium vzduch s příslušnými hodnotami hustoty, teploty, dynamické viskozity a rychlosti, na kterou chceme konstrukci posoudit.

CFD analýza se jeví jako vhodný nástroj pro posouzení tvarově rozmanitých konstrukcí, které pod vlivem zatížení výrazně nemění svůj tvar. S ohledem na velkou poddajnost membránových konstrukcí je však do výpočtu potřeba zahrnout

i vliv deformace konstrukce pod zatížením, přičemž změna tvaru konstrukce může mít za následek změnu tlakového pole na membráně. Z tohoto pohledu je lepší použít nástroje Fluid-structure interaction (FSI), který kombinuje výpočet proudění s výpočtem pevnostním.

### 2.4.3 Kombinace zatížení a únosnosti jednotlivých prvků

#### 2.4.3.1 Hodnoty převzaté z norem ASCE [4][5]

Kromě součinitelů zatížení pro různé kombinace zatížení (viz dále tab. 4) uvádí tato americká norma i *redukční součinitele pevnosti materiálů* pro různé typy kombinací  $\beta$  (tab. 3), a také zavádí tzv. *součinitel životnosti  $L_t$* , který zohledňuje předpokládanou zbytkovou pevnost použitých materiálů a spojů (tab. 2) na konci životnosti konstrukce.

**Tab. 2** Součinitel životnosti pro příčně namáhané švy a spoje

Šev nebo Spoj	Hodnota
Svařovaný spoj	Stejná jako pro základní materiál
Lepný spoj	50 % pevnosti základního materiálu
Šev - nechráněný	60 % pevnosti základního materiálu
Šev - chráněný proti povětrnosti a slunečnímu záření	90 % pevnosti základního materiálu
Mechanický spoj	Stejně jako pro švy

Součinitel životnosti pro materiály membrány, nekovových kabelů a popruhů je stanoven na základě následujících vztahů a kritérií.

- a) Pro membrány, nekovové kabely a popruhy, jejichž zbytková pevnost na konci životnosti je větší než 75 % pevnosti počáteční a které jsou fixní po celou dobu životnosti konstrukce, by měl být brán součinitel  $L_t = 0,75$ .

- b) Pokud je koncová pevnost nižší než 75 % pevnosti počáteční, má být součinitel  $L_t$  úměrně redukován.
- c) U prvků, které jsou vystaveny zvýšené manipulaci, či prvky dočasných a skládaných konstrukcí, by součinitele životnosti  $L_t$  neměl přesáhnout hodnotu 0,6.

**Tab. 3** Zatěžovací kombinace a příslušný redukční součinitele pevnosti materiálu

Charakteristika	Kombinace zatížení	Redukční součinitel pevnosti materiálu $\beta$
(stálé zatížení)	předpětí + stálé	<b>0,17</b>
(sníh)	předpětí + stálé + sníh	<b>0,27</b>
(vítr)	předpětí + stálé + vítr	<b>0,33</b>
(teplota, sedání, dotvarování)	předpětí + stálé + teplota (ostatní)	<b>0,27</b>

Z výše uvedeného vyplývá, že při finálním posouzení musí být určena návrhová pevnost použitých materiálů s použitím příslušného redukčního součinitele zatížení a součinitele životnosti.

Pro jednoosou napjatost v membráně platí vztah (11),

$$T_r = \beta L_t T_s \geq T_f \quad (11)$$

pro dvojosou (biaxiální) napjatost v membráně vztahy (12)(13)(14),

$$T_r = \beta L_t T_{sw} \geq T_{fw} \quad (12)$$

$$T_r = \beta L_t T_{sf} \geq T_{ff} \quad (13)$$

$$0,8\beta L_t (T_{sw} + T_{sf}) \geq T_{fw} + T_{ff} \quad (14)$$

případně pro nekovové kabely a popruhy podle vztahu (15).

$$T_r = \beta L_t T_s \geq T_f \quad (15)$$

kde  $T_r$  - návrhová únosnost daného prvku v daném směru,  
 $T_f; T_{ff}; T_{fw}$  - návrhová působící síla (osnova resp. útek),  
 $T_s; T_{sf}; T_{sw}$  - charakteristická pevnost materiálu v daném směru.

**Tab. 4** Kombinační součinitele zatížení

Charakteristika	Kombinace zatížení
(stálé zatížení)	1,4×(předpětí + stálé)
(sníh)	1,0×(předpětí + stálé) + 1,6×(sníh; déšť; užité na střeše)
(vítr)	1,0×(předpětí + stálé) + 1,6×vítr
(teplota)	1,0×(předpětí + stálé) + 1,2×teplota

#### 2.4.4 Docílení požadovaného tvaru membrány

Jak již bylo dříve popsáno, membrána nemůže být vyrobena z jednoho kusu materiálu, ale musí být rozčleněna do jednotlivých pásů, které jsou následně spojeny. Tento postup je označován jako výroba membrány (*fabrication*).

Prostorový tvar membrány se promítne do roviny (rozvinutí – *development*) a u jednotlivých proužků se určí patřičné kompenzace.

Jelikož je tvar membrány závislý na materiálu, jsou zde dva velmi odlišné způsoby promítání do roviny. U tkanin se používá promítání skutečných délek a u fólií promítání skutečných úhlů.

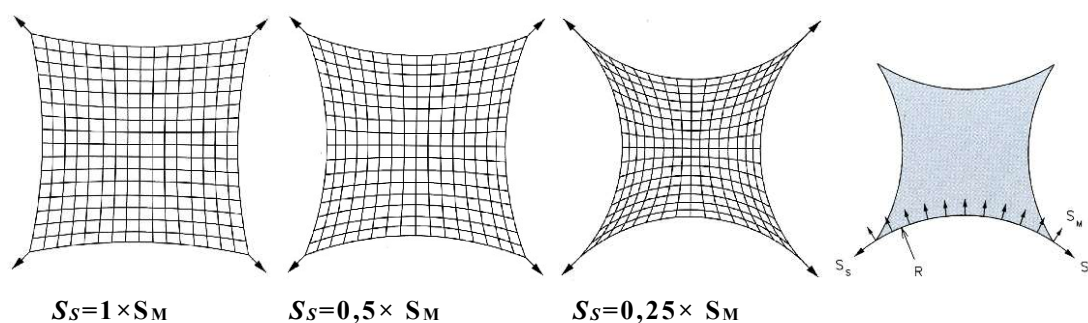
Geometricky rozvinutý povrch se musí dále opravit s ohledem na předpokládané zatížení a dotvarování. Případ, kdy materiál odebíráme, se nazývá kompenzace a v případě přidání dalšího materiálu (zejména v oblastech se zvýšenou tuhostí okolo kotvení nebo v oblasti rohů) se jedná o dekompenzaci. Spojením plochých proužků opravených kompenzačními hodnotami vzniká požadovaná geometrie membrány.

Vzhledem k anizotropnímu chování tkaniny má na výsledný tvar membrány vliv také orientace jednotlivých proužků a tím i rozdělení tuhosti po ploše membrány. Toto rozdělení má vliv na deformaci membrány i primární nosné konstrukce. Hlavním nosným směrem v membráně je směr s největším napětím.

V tomto směru je vhodné orientovat vlákna osnovy, která jsou tužší než vlákna útku, a membrána tak bude schopná přenést větší zatížení a méně se deformovat.

Na výsledný tvar membránové konstrukce má též vliv uchycení jejích okrajů. Toto uchycení je pevné nebo poddajné (viz 2.4.6). U zakřivených poddajných okrajů jsou rozhodujícími parametry: síla v okrajovém laně ( $S_S$ ), poloměr zakřivení okraje ( $R$ ) a napětí v membráně ( $S_M$ ) [22]. Vzájemný vztah mezi těmito veličinami je (obr. 13):

$$S_S = R \cdot S_M \quad (16)$$



Obr. 13 Změna zakřivení koncového lana v závislosti na působící síle  $S_S$

Aby membrána byla schopná přenést požadované zatížení, musí být aktivní ve směrech požadovaných křivostí a ukotvena. Rozhodující pro volbu směru napínání je, jak velká síla a na jaké vzdálenosti se musí do membrány vnést. Při vhodné orientaci dílčích proužků membrány může být požadované dvouosé napjatosti docíleno pouze předepnutím ve směru útku (viz 2.4.1).

#### 2.4.5 Metody spojování dílčích pruhů v celistvý povrch

Metody spojování dílčích povrchů se odvíjejí od toho, zda se žádá spoj trvalý nebo dočasný/obnovitelný.

Nejčastěji používaným typem trvalého spojení je spoj svařovaný, jehož pevnost závisí na svařovací teplotě a obvykle dosahuje 60-95 % pevnosti základní tkaniny. Tradičním typem trvalého spojení je spoj šitý, který má ovšem tu nevýhodu, že jehlice proděraví povrch membrány a oblast v místě spoje musí být dodatečně ochráněna proti vniknutí vody a ostatních degenerativních vlivů. Jen výjimečně používaným trvalým spojením je spoj lepený, který se užívá pro skelné

tkaniny potažené silikonovým zátěrem, neboť tento typ tkaniny nemůže být vzhledem ke své vnitřní struktuře svařen.

Nejdůležitějším obnovitelným spojem pro přenos velkých sil je upínací lišta s drážkou pro keder profil. Tento spoj je kombinací spojení pomocí tření a tvarového zaseknutí. Pokud takovýto spoj spojuje dvě zakřivené plochy, musí být délka spoje úměrná zakřivení tak, aby nedocházelo k mačkání a deformaci povrchu v okolí spoje. Současně se musí vzít v úvahu rozdílná tuhost membrány uvnitř upínací lišty, na volném povrchu a odlišná tuhost spojovacího prvku.

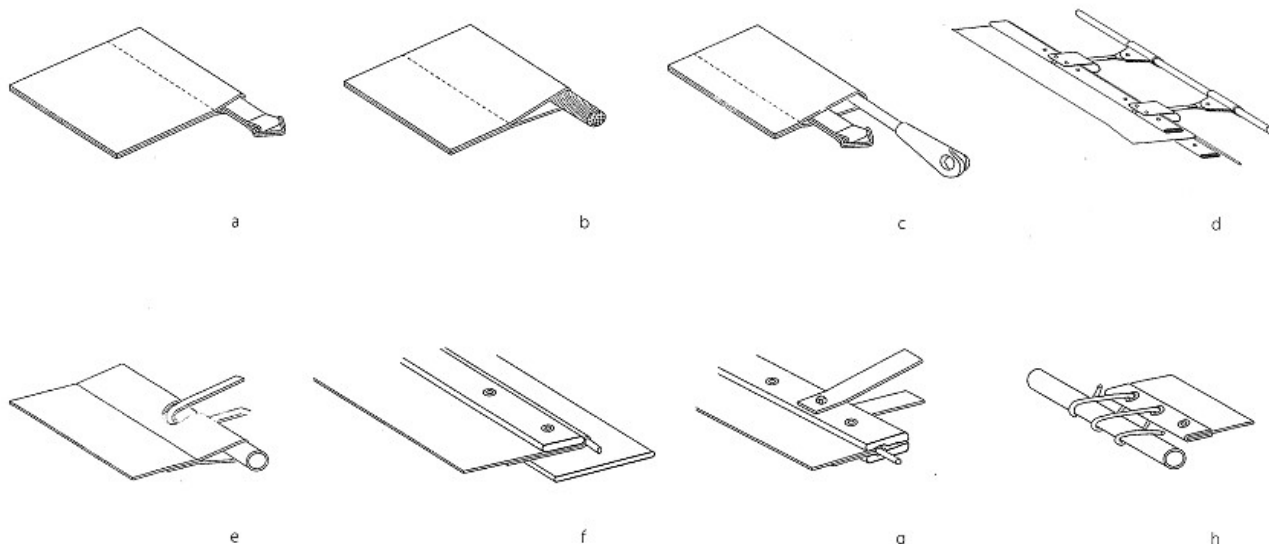
Pro méně zatížené nebo dočasné spojení dvou částí membránové konstrukce se mohou použít spoje se smyčkami.

#### **2.4.6 Metody přenesení sil v okrajových oblastech**

Pro stabilizaci prostorově zakřiveného povrchu membrány musí být okrajové síly v membráně přeneseny do primární nosné konstrukce lineárními nosnými prvky. Tyto prvky mohou tvořit pro povrch membrány pevné nebo poddajné podepření podle toho, zda jsou tuhé či ohebné (obr. 14).

Okrajový prvek probíhající zakřiveně podél celého okraje membrány, který postupně sbírá síly z membránového povrchu a vede je dále ke kotvení, se nazývá poddajný okrajový detail. Tento detail je nejčastěji tvořen lanem, které prochází skrz kapsu vytvořenou na okraji membrány. Není-li tření mezi lanem a kapsou lemu dostatečné, přidávají se k okraji ploché pásy (nejčastěji z popruhů) které přenášejí tangenciální síly do kotvení. Jestliže není možné vést lano přímo kapsou (u konstrukcí velkých rozponů s velkým průměrem lan), může být lano vedeno i externě. V tomto případě je membrána uchycena přes keder profil do upínací lišty a ta je následně ocelovými pásky připojena k obvodovému lanu.

Pevný okrajový detail vznikne, je-li tangenciální síla přenášena do lineárního pevného prvku spojeného přímo s hlavní nosnou konstrukcí. Tohoto ukotvení se nejlépe dosáhne pomocí upínacích lišt s keder drážkou, které jsou přímo přišroubovány na primární nosnou konstrukci.



**Obr. 14** Možnosti poddajného (a, b, c, d) a pevného (e, f, g, h) uchycení membrány.

a) Volný konec opatřený popruhem

b) Lano prostrčené kapsou

c) Lano prostrčené kapsou s přidáním popruhem pro přenos rovnoběžných sil

d) Keder lišty přichycené k obvodovému lanu

e) Trubka prostrčená kapsou kotvená pomocí ocelových pásků

f) Keder lišty kotvené přímo do ocelové konstrukce

g) Keder lišty kotvené pomocí ocelových pásků do další konstrukce

h) Šněrovací spoj připojený k pevné obvodové trubce



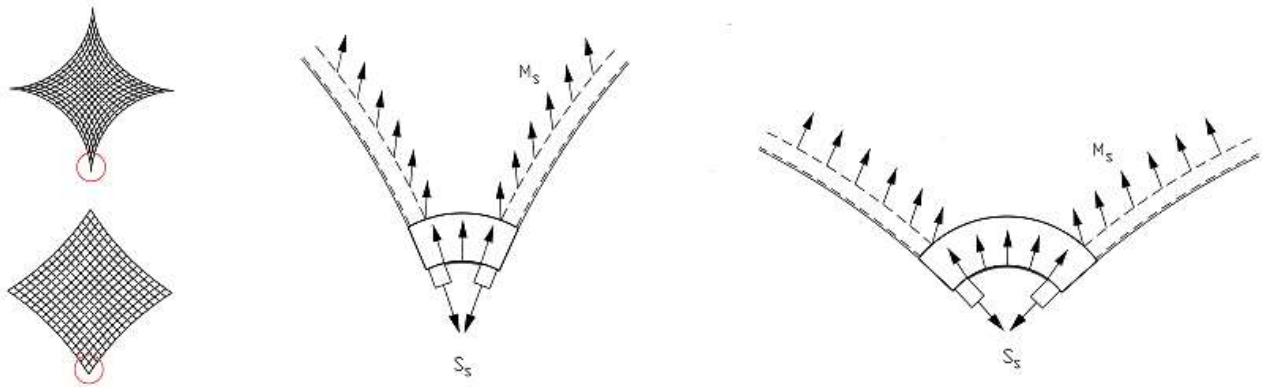
**Obr. 15** Detail platle s možnou rektifikací pro kotvení obvodových lan a membrány.

#### 2.4.7 Detaily rohových oblastí

Roh membrány představuje místo kde se stýkají dva okraje a kde nesmí docházet k vzájemným posunům těchto okrajů a membrány. Spojení okrajů je realizováno přes ocelovou desku, tzv. *platli* (obr. 15). Vzhledem k výrazně



rozdílným napjatostem při změnách zatížení je tato oblast extrémně namáhána a nesmí v ní docházet ke zvlnění plachty. Čím ostřejší je úhel mezi dvěma okraji, tím důležitější je schopnost detailu jako celku zabránit posunu membrány od rohu a zvlnění povrchu (obr. 16).



Obr. 16 Působení sil v rohové oblasti s ohledem na ostrost svíraného úhlu.

## 2.5 Současný stav řešení obloukových konstrukcí

V ideálním stavu je podpůrná konstrukce, v tomto případě část kružnicového oblouku s kruhovým průřezem, řešena společně v interakci s přilehlou membránovou plochou a veškeré parametry nutné pro globální posouzení konstrukce se počítají ze společného působení všech prvků. V případě, že nelze modelovat celou konstrukci společně a musí se posoudit pouze samostatně stojící oblouk, je třeba udělat posudek pevnostní a stabilitní. Zejména u štíhlých oblouků je stabilitní posudek zcela zásadní a má fatální dopad na dimenzování průřezu.

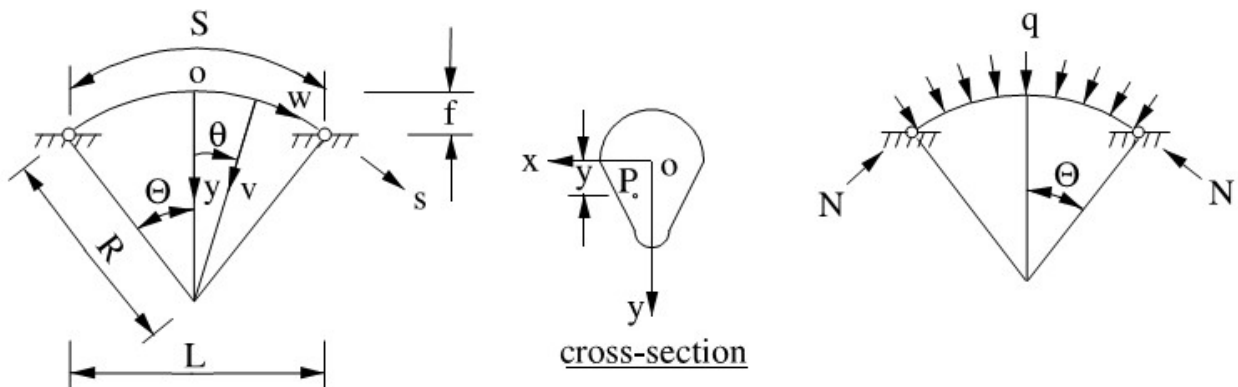
### 2.5.1 Pevnostní posudek průřezu

Pevnost průřezu o ploše  $A$  a materiálu s návrhovou pevností  $f_y/\gamma_M$  je dána vztahem:

$$N = \frac{A \times f_y}{\gamma_M} \quad (17)$$

## 2.5.2 Stabilitní posouzení oblouků v rovině

Pro správné řešení problému stability je třeba nejprve rozhodnout, zda se jedná o klasický (vysoký oblouk), na který je možné uplatnit běžné teorie řešení podle Timoshenka a Gere [30] a Simitse [31], nebo o štíhlý oblouk, kde zejména řešení u oblouku s vysokou modifikovanou štíhlostí bývá značně na straně nebezpečné. Jako kritérium pro plochý lze porovnat hodnotu svíraného úhlu  $\Theta$  (obr. 17).



Obr. 17 Schéma veličin pro interpretaci geometrie oblouku.

Pokud

$$2\Theta \leq 90^\circ \quad (18)$$

jedná se o klasický vysoký oblouk, u nějž lze vycházet z běžných principů návrhu. V opačném případě se jedná o oblouk plochý a je třeba postupovat dle 2.5.2.1.

### 2.5.2.1 Ploché oblouky

I u plochých oblouků je třeba vzít v úvahu průběh zatížení a způsob uložení v podporách. Podle studie [28] se dá na základě modifikované štíhlosti oblouku rozhodnout, jaká bude vzpěrná únosnost oblouku a první vlastní tvar vybočení v rovině a zda dojde k elastické ztrátě stability při konstantním radiálním zatížení.

Pro kloubově uložený oblouk je aktuální síla v ose průřezu oblouku (za předpokladu neměnné délky střednice) rovna

$$\bar{N} = \frac{\pi^2 EI_x}{(R\Theta)^2} = \frac{\pi^2 EI_x}{(S/2)^2} = N_p \quad (19)$$

a dalšími úpravami [29] je pak stanoven zjednodušený vzorec pro kritickou sílu při nesymetrické ztrátě stability plochého, kloubově uloženého oblouku:

$$N_{sb} = q_{sb} R \approx \left( 0,26 \pm 0,74 \sqrt{1 - 0,63 \frac{\pi^4}{\lambda_s^2}} \right) N_p \quad (20)$$

a pro symetrickou ztrátu stability (prolomení oblouku ve 3 sinusových půlvlnách):

$$N_{ss} = q_{ss} R \approx (0,15 + 0,006 \lambda_s^2) N_p \quad (21)$$

přičemž  $\lambda_s$  je modifikovaná štíhlost oblouku získaná ze vztahu:

$$\lambda_s = \frac{R\Theta^2}{i_x} = \frac{S^2}{4i_x R} \quad (22)$$

kde

- $R$  - poloměr oblouku,
- $S$  - délka střednice oblouku,
- $\Theta$  -  $\frac{1}{2}$  svíraného úhlu oblouku,
- $i_x$  - poloměr setrvačnosti příslušný ke směru vybočení v rovině.

$$i_x = \sqrt{I_x / A} \quad (23)$$

kde

- $I_x$  - moment setrvačnosti k příslušné ose,
- $A$  - plocha průřezu.

Z výše uvedených vztahů lze odvodit hranice jednotlivých typů kolapsu v závislosti na velikosti modifikované štíhlosti kloubově uložených oblouků.

Oblouk kolabuje z pevnostního hlediska a ke ztrátě stability nedochází, když

$$\lambda_s \leq 3,88 \quad (24)$$

V případě, že je modifikovaná štíhlost v rozmezí

$$3,88 \leq \lambda_s \leq 7,38 \quad (25)$$

dochází pouze ke ztrátě stability symetrickým prolomením středu oblouku, čemuž odpovídají 3 sinusové půlvlny (s prolomením středu nad osu oblouku).

Interval modifikované štíhlosti pro kloubově uložený oblouk v rozmezí

$$7,38 \leq \lambda_s \leq 9,38 \quad (26)$$

predikuje možnost vybočení jak symetrické (3 sinusové půlvlny), tak nesymetrické (jednostranné prolomení oblouku ve 2 sinusových půlvlnách).

Pokud je

$$9,38 \leq \lambda_s \quad (27)$$

dochází pouze k nesymetrickému vybočení a to jednostranným prolomením oblouku.

Analogicky je pro vetknutý oblouk aktuální síla v ose průřezu oblouku (za předpokladu neměnné délky střednice) rovna

$$\bar{N} \approx \frac{(1,4303\pi)^2 EI_x}{(S/2)^2} = N_{FB} \quad (28)$$

kritická síla při nesymetrické ztrátě stability

$$N_{sb} \approx \left( 0,6 \pm 0,4 \sqrt{1 - 30,686 \frac{\pi^2}{\lambda_s^2}} \right) N_{FB} \quad (29)$$

a při symetrické ztrátě stability

$$N_{ss} = q_{ss} R \approx (0,36 + 0,0011\lambda_s^2) N_p \quad (30)$$

Stejně jako u kloubově uloženého oblouku lze z výše uvedených vztahů odvodit hranice jednotlivých typů kolapsu v závislosti na velikosti modifikované štíhlosti oblouků.

Pokud

$$\lambda_s \leq 9,87 \quad (31)$$

potom nedochází ke ztrátě stability v rovině a konstrukce je natolik stabilní, že nejprve dojde k pevnostnímu porušení.

V případě, že je modifikovaná štíhlost v rozmezí

$$9,87 \leq \lambda_s \leq 17,40 \quad (32)$$

dochází pouze ke ztrátě stability symetrickým prolomením středu oblouku, čemuž odpovídají 3 sinusové půlvlny ( s prolomením středu nad osu oblouku ).

Interval modifikované štíhlosti pro vetknutý oblouk v rozmezí

$$17,40 \leq \lambda_s \leq 18,60 \quad (33)$$

predikuje možnost vybočení jak symetrické (3 sinusové půlvlny), tak nesymetrické (jednostranné prolomení oblouku ve 2 sinusových- půlvlnách)

Pokud je

$$18,60 \leq \lambda_s \quad (34)$$

dochází pouze k nesymetrickému vybočení a to jednostranným prolomením oblouku.

V případě osamělého břemene působícího ve středu oblouku se limitní hodnoty modifikované štíhlosti nijak zásadně neliší oproti těm, získaným při výpočtu s konstantním radiálním zatížením.

### **3. Vytýčení cílů disertační práce**

Cílem disertační práce je stanovení míry stabilizace ocelové obloukové konstrukce v závislosti na jeho geometrii, rozteči od ostatních přidružených konstrukcí, velikosti předpětí a mechanických vlastnostech integrované nekovové membrány. V parametrické studii budou sledovány zásadní parametry ovlivňující vlastnosti konstrukčního celku, a to zejména:

- tloušťka a tuhost samotné membrány,
- velikost rovnoměrného předpětí v membráně,
- míra nerovnoměrnosti předpětí v membráně,
- různé geometrie podpůrné ocelové konstrukce,
- poměr tuhostí ocelového prvku a připojené membrány.

Parametrická studie bude dále sloužit jako podklad pro vypracování doporučujícího podkladu pro výpočet a efektivnější návrh ocelové konstrukce s integrovanou membránou.

#### **3.1 Cíle experimentální části**

- Návrh modelu reálné membránové konstrukce podporované oblouky. Výběr materiálů, stanovení montážního postupu, vystrojení měřidly deformací a napětí, návrh způsobu zatěžování.
- Experimentální ověření konstrukce bez stabilizace membránou.
- Experimentální ověření stabilizace ocelového oblouku nekovovou membránou a zvýšení stabilitní únosnosti vyšetřovaného oblouku.

- Experimentální ověření významu velikosti předpětí na stabilizaci oblouku nekovovou membránou.

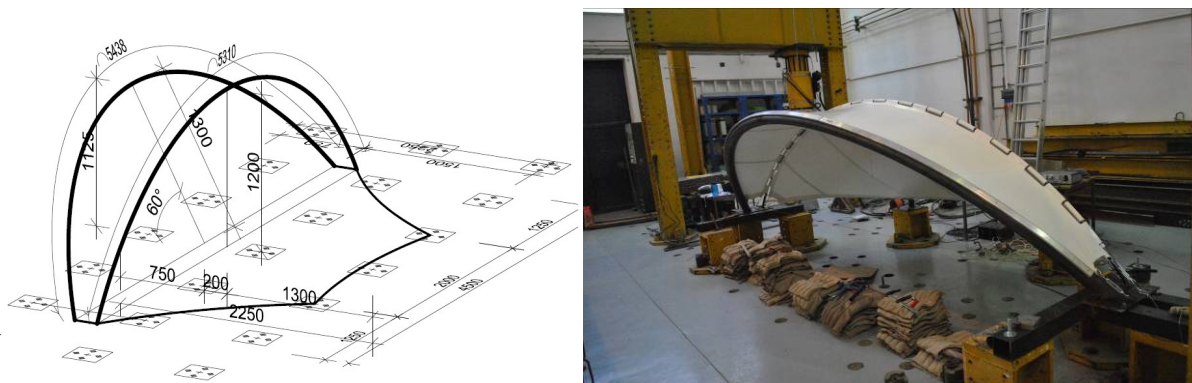
### **3.2 Cíle teoretické části**

- Ověření vhodnosti softwaru SOFiSTiK pro výpočet membránových konstrukcí. Validace numerického modelu podle experimentálních dat.
- Vytvoření parametrické studie sestavy oblouků propojených textilní membránou.
- Stabilitní a pevnostní analýza oblouků stabilizovaných membránou, se zaměřením na sestavu více oblouků.
- Analýza vnitřních oblouků sestavy pro stanovení kritické síly a součinitele kritické délky pro stabilitní posouzení.
- Určení vlivu tuhosti okrajových příhradových oblouků na stabilitu vnitřního vyšetřovaného oblouku.
- Možnost využití symetrických I-průřezů jako výhodné alternativy s převládajícím momentem setrvačnosti k jedné ose.
- Ověření výsledků parametrické studie na konstrukci jiné geometrie – zvětšené geometrii z experimentální části.

## 4. Experimentální část

Experiment, uskutečněný v průběhu listopadu a prosince 2013, umožnil porovnání chování samostatného oblouku a kompletní membránové konstrukce, vystavené stejnému zatížení. Z naměřených dat lze stanovit míru stabilizace subtilního podpůrného oblouku textilní membránou a s tím spojené příznivé ovlivnění napětí a deformace na zkoumaném oblouku.

V rámci experimentální části disertační práce bylo provedeno celkem 8 zkoušek různé konfigurace v Experimentálním centru Fakulty stavební. Z těchto osmi zkoušek bylo 5 zkoušek provedeno na samostatném vetknutém oblouku, a 3 zkoušky proběhly na kompletní konstrukci s textilní membránou představující zmenšený model zastřešení koncertního pódia (obr. 18 vpravo).



Obr. 18 Geometrie a pohled na kompletní model v laboratoři

### 4.1 Teoretická a praktická příprava experimentu

Prvotní návrhy a typy membránových konstrukcí byly navrženy v programu Formfinder ([www.formfinder.at](http://www.formfinder.at)), dále staticky posouzeny v programu EASY a finální návrh byl poté zpracován v programu SOFiSTiK, kde byl model na základě dat z experimentu též validován. Návrhy a posudky samostatně stojícího oblouku byly provedeny v programu SCIA Engineer. Program Formfinder pracuje na principu metody „force-density“, tedy převedení membrány na soustavu lan a následného výpočtu rovnosti sil v jednotlivých uzlech křížení. Nezohledňuje tedy žádné materiálové a mechanické vlastnosti použitých komponentů. V programu EASY pak již byly jednotlivým prvkům přiřazeny materiálové charakteristiky



z knihovny programu a byl proveden výpočet společně s vykreslením výsledků v programu R-STAB.

Za typologicky nejvhodnější konstrukci byla vybrána soustava nakloněného a svislého („vnitřního“) oblouku z trubek propojených membránou, jednak z důvodu reálnosti konstrukce, relativně lehkému modelování v programech a pro jednoduchost zatěžování vnitřního oblouku osamělými břemeny. Hlavním předmětem zkoumání byl tedy vnitřní subtilní oblouk, na kterém se měřila napjatost a deformace ve třech místech. Napjatost v polovině oblouku a ve vetknutí, deformace (svislé a vodorovné jak v rovině, tak z roviny) v polovině a ve čtvrtinách. Ve zmíněných místech byla napjatost na průřezu měřena ve čtyřech bodech odpovídajícím lokálním osám průřezu.

Experiment byl realizován v kooperaci s firmou Archtex (dodávka, výpočet kompenzace a montáž membrány) a s firmou EXCON (dodávka ocelových oblouků).

## 4.2 Popis modelu

Kompletní model se sestával ze dvou kružnicových oblouků z kruhových trubek, obvodových ocelových vinutých lan, membrány z textilní tkaniny a kotevních pomůcek nutných k uchycení membrány na oblouky a ke vnesení nutného předpětí. Rozměry modelu  $L \times B \times H$  jsou  $4500 \times 2250 \times 1200$  [mm] (obr. 18 vlevo).

### 4.2.1 Materiálové a geometrické charakteristiky

#### 4.2.1.1 Ocelové oblouky

Vnitřní oblouk, který byl hlavním předmětem zkoumání, byl navržen jako svislý, s osovou délkou oblouku  $S_1 = 5310 \text{ mm}$ , poloměrem  $R_1 = 2709,4 \text{ mm}$ , svírajícím úhlem  $2\Theta_1 = 112,290^\circ$  (vysoký oblouk) a průřezem TR 26,9x3,2. Materiálový certifikát udává hodnoty pro mez kluzu  $f_{yk1} = 475 \text{ MPa}$ , mez pevnosti v tahu  $f_{uk1} = 595 \text{ MPa}$ , tažnost 27,1%. Modul pružnosti  $E_1$  v dostupném testu nebyl uveden a proto je vzat standardně  $E_1 = 210 \text{ GPa}$ .

Vnější oblouk, jenž fixoval okraj samotné membrány mezi oblouky, byl navržen, v porovnání s obloukem vnitřním, z masivního kruhového průřezu TR

88,9x3,2. Podle materiálového certifikátu je mez kluzu  $f_{yk2} = 460 \text{ MPa}$ , mez pevnosti v tahu  $f_{uk2} = 574 \text{ MPa}$ , tažnost 27,9%. Modul pružnosti  $E_2$  opět nebyl v dostupném testu uveden a proto je jeho hodnota opět zavedena standardně  $E_2 = 210 \text{ GPa}$ . Vnější oblouk je od svislé roviny ukloněn o  $30^\circ$ , osová délka oblouku je  $S_2 = 5439 \text{ mm}$ , poloměr  $R_2 = 2600,0 \text{ mm}$  a svírající úhel  $2\Theta_2 = 119,922^\circ$  (vysoký oblouk). Výroba oblouků podle požadovaného zadání byla provedena specializovanou firmou (obr. 19).



Obr. 19 Ohýbání vnějšího oblouku v dílně JPB Jirkov

#### 4.2.1.2 Membrána

Na membránovou plochu byla použita polyesterová textilie potažená vrstvou PVC s horním zátěrem z PVDF firmy Ferrari®, typ Précontraint 702S (váha  $830 \text{ g/m}^2$ ). Tato textilie byla vyvinuta firmou Serge Ferrari a její jedinečnost spočívá zejména v mechanických vlastnostech. Vzhledem k předepnutí vláken osnovy i útku při tkaní tkaniny i při jejím potahování, vykazuje tkanina téměř shodné chování ve směru osnovy i útku. Současně je základní tkanina pokryta poměrně silnou krycí vrstvou PVC a PVDF, což prodlužuje její životnost výrazně nad 20 let.

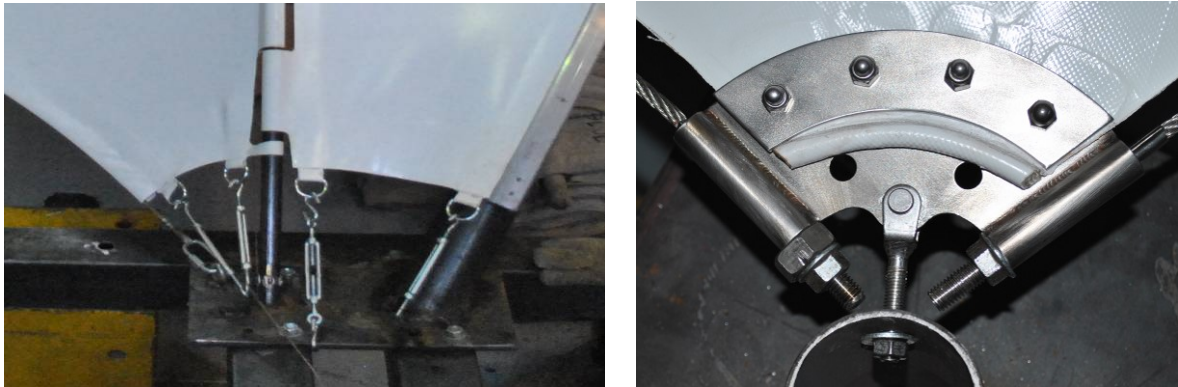
Pro stanovení mechanických vlastností textilie Précontraint 702S byl proveden rozsáhlý test laboratoří Lab BLUM Stuttgart [22]. Z testu byly převzaty hodnoty meze pevnosti při přetržení  $\sigma_{ult} = 56 \text{ kN/m}$  a charakteristická pracovní mez pevnosti jako  $\sigma_{max} = \sigma_{ult} / 5 \approx 11,2 \text{ kN/m}$ . Vzhledem k malým rozměrům modelu byla stanovena hodnota předpětí na  $\sigma_p \approx 0,5 \text{ kN/m}$ .

Později Galliot a Luchsinger [24], [25] vytvořili na základě provedených experimentů [22] nelineární model v programu ANSYS, v němž na základě různých poměrů namáhání ve směrech osnovy a útku stanovili pět charakteristických parametrů dané plachty pro jednotlivé poměry zatížení. Jedná se o Youngův modul pružnosti ve směru osnovy  $E_w^{nl} = 635,3 \text{ kN/m}$  a útku  $E_f^{nl} = 661,9 \text{ kN/m}$  pro poměr namáhání v obou směrech 1:1, změnu Youngova modulu pružnosti  $\Delta E_w = 295,0 \text{ kN/m}$  resp.  $\Delta E_f = 168,5 \text{ kN/m}$  a Poissonovu konstantu  $\nu_{wf} = 0,196$ .

V předběžném výpočetním modelu však byla uvažována membrána zjednodušeně jako isotropický materiál s Youngovým modulem pružnosti  $E_{wf} = 660,0 \text{ kN/m}$  a Poissonovým součinitelem  $\nu_{wf} = 0,230$ .

#### 4.2.1.3 Obvodové prvky

Membrána byla k vnějšímu masivnímu ukloněnému oblouku kotvena pomocí standardní hliníkové upínací lišty s keder profilem a spojení s vnitřním obloukem bylo zajištěno střídáním vystříhaných kapes po obou stranách oblouku (obr. 20 vlevo).



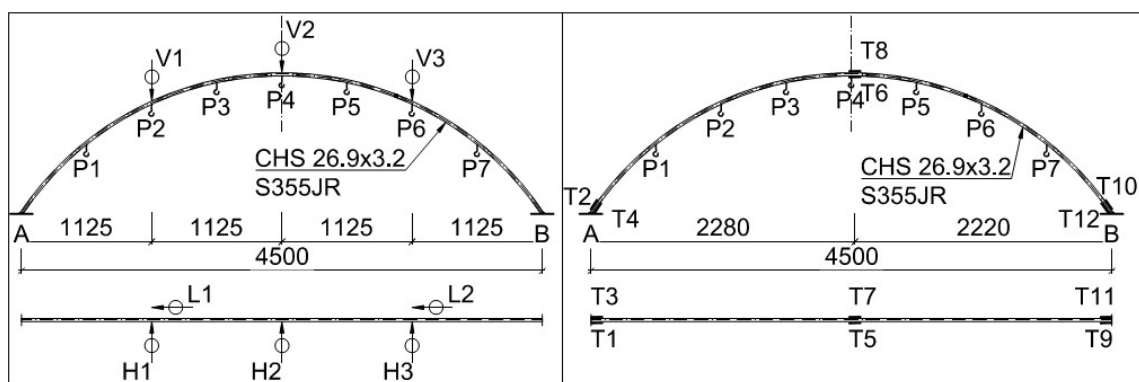
Obr. 20 Kotevní a předpínací prvky membrány (vlevo); Kotvení obvodových lan do ocelové platle kloubově chycené k pevnému bodu (vpravo)

Volný okraj membránové plochy byl vyztužen standardním vinutým ocelovým lankem 7 x 7 firmy CarlStahl s průměrem 6 mm, které bylo protaženo kapsou na okraji mebrány. Ocelová lanka byla kotvena v místech pevných kloubů do nerezových platlí, přičemž rektifikace předpětí byla umožněna dotažením či povoláním matic na nalisovaných závitových koncovkách (obr. 20 vpravo).

Kotvení lanka v místě u oblouku bylo provedeno na navařené očko pomocí rapid článku bez možnosti rektifikace.

#### 4.2.2 Popis měřících a zatěžovacích bodů

Vnitřní subtilní oblouk byl zatěžován bodově (v místech P1 - P7, obr. 21) v osminách půdorysného průmětu oblouku tak, aby bylo docíleno co možná nejrovnoměrnější distribuce normálové síly simulující rovnoměrné zatížení a současně tak, aby nedocházelo k velkému momentovému namáhání.

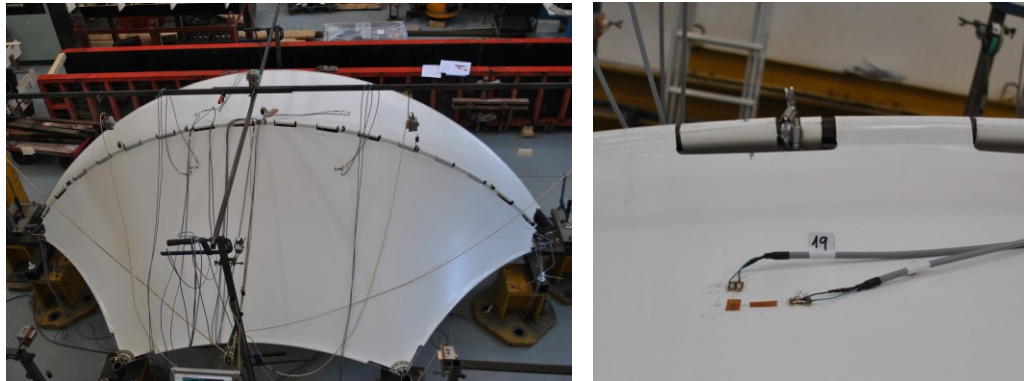


Obr. 21 Zatěžovací body a rozmístění potenciometrů (vlevo); Rozmístění tenzometrů (vpravo)

S ohledem na předpokládané tvary vybočení oblouku jak v rovině (jednostranné prolomení oblouku), tak z roviny (náklon oblouku v jedné půlplně) bylo pro snímání deformací umístěno na zkoumaný oblouk celkem 8 potenciometrů. Do čtvrtin a do poloviny oblouku (nad zatěžovací body P2, P4, P6) byly umístěny potenciometry měřící svislou deformaci (V1, V2, V3) a horizontální deformaci z roviny oblouku (H1, H2, H3). Pouze ve čtvrtinách oblouku nad body P2 a P6 byly umístěny potenciometry měřící podélnou deformaci (L1, L2) (obr. 21 vlevo). S ohledem na předpokládanou symetrii vlastního tvaru vybočení v rovině, a tudíž nulový posun středu oblouku v podélném směru, nebyl ve středu oblouku umístěn potenciometr pro snímání podélné deformace a tato hodnota nebyla měřena.

Vnitřní oblouk byl dále osazen celkem 12 tenzometry, které byly umístěny ve třech bodech oblouku vždy ve skupině po čtyřech tak, aby byly na sebe kolmé a na kruhové trubce měřily hlavní napětí pro namáhání v rovině a z roviny. Umístění tenzometrů je patrné z obr. 21, přičemž u vetknutí jsou tenzometry posunuty o

50 mm po střednici oblouku od ideálního bodu vetknutí a tenzometry T5 - T8 v polovině rozpětí jsou posunuty o 30 mm směrem k podpoře „B“, aby bylo možné do předpokládaného středu oblouku umístit zatěžovací bod P4.



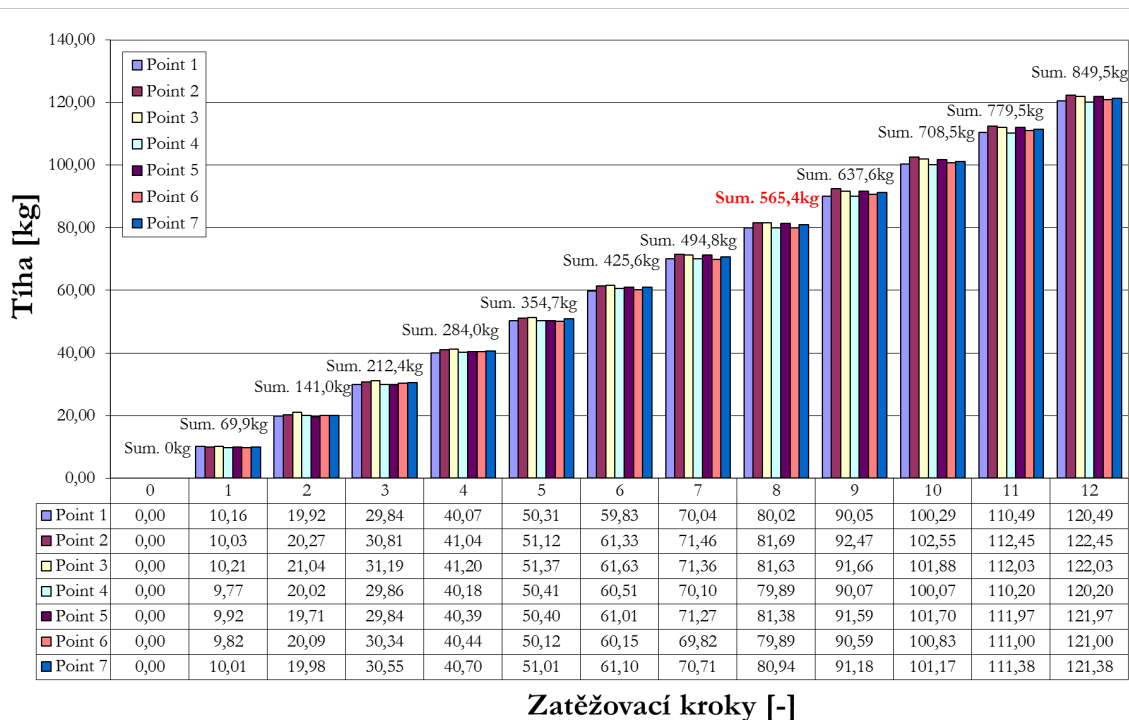
**Obr. 22 Rozmístění tenzometrů na membráně (vlevo); Detail tenzometrů T19, T20 (vpravo)**

Po provedených experimentech na samostatném oblouku a kompletaci celého modelu membránou byly dodatečně osazeny proti sobě kontrolní tenzometry T13 a T14 do středu vnějšího masivního oblouku a dále tenzometry T15 – T22 ve čtyřech místech membrány po dvojicích kolmo na sebe (obr. 22).

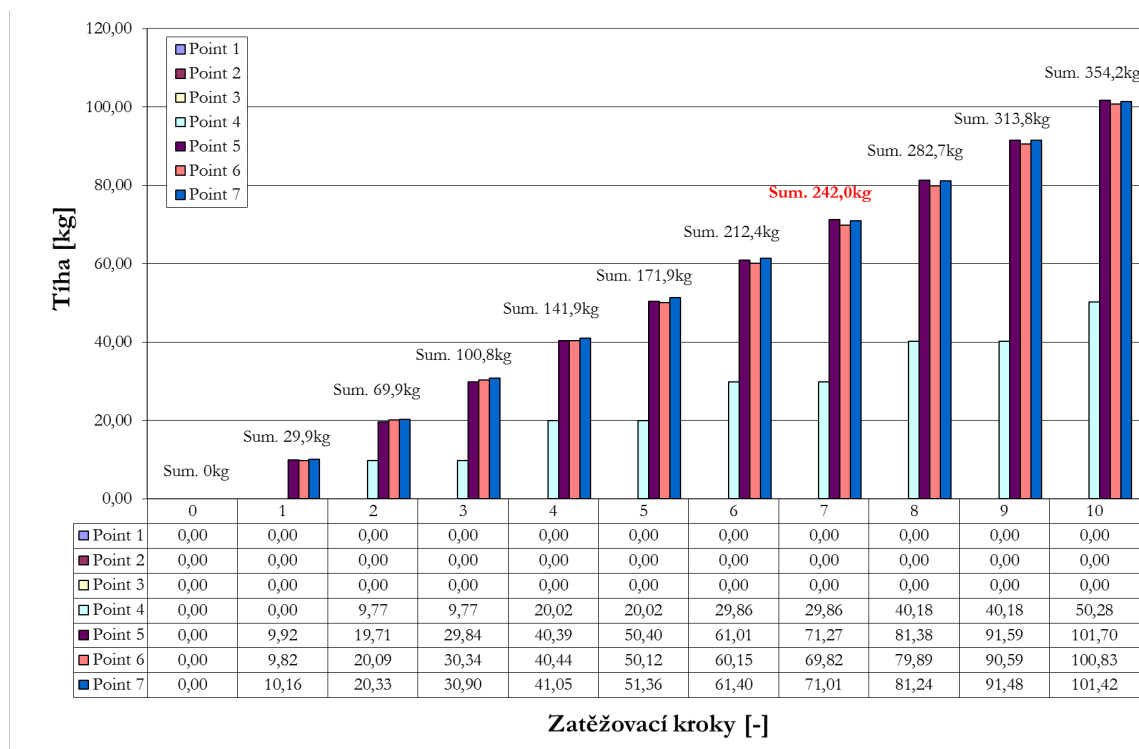
### **4.3 Způsoby zatěžování**

Test byl v zásadě rozdělen na dvě etapy, kdy v první etapě (5 zatěžovacích stavů) byl zatěžován samostatný vnitřní oblouk a ve druhé etapě (3 zatěžovací stavy), s použitím stejných přírůstků zatížení pro jednotlivé zatěžovací stavy jako pro zatěžovací stavy z první etapy, byla zatěžovaná kompletní konstrukce s membránou.

Zatěžování bylo realizováno pomocí přesně zvážených pytlíků plněných ocelovými broky (obr. 18 vpravo), kalibrovanými ocelovými závažími, či přesně zváženými ocelovými tyčemi. Přírůstky mezi jednotlivými zatěžovacími kroky byly dány tíhou pytlíků a závaží a činili přibližně 10 kg na každém zatěžovacím místě (bodu  $P_i$ ).



**Obr. 23** Zatěžovací schéma pro symetrické zatížení konstrukce s membránou (samostatný oblouk do zatěžovacího kroku 8)



**Obr. 24** Zatěžovací schéma pro nesymetrické zatížení konstrukce s membránou (samostatný oblouk do zatěžovacího kroku 7)

Pro demonstraci stabilizujícího vlivu textilní membrány byly vybrány dva způsoby zatěžování. V prvním případě byly oblouk a později i kompletní konstrukce zatěžovány symetricky podle předepsaného zatěžovacího schématu (obr. 23), ve druhém případě se jednalo o jednostranné, nesymetrické zatěžování (obr. 24). V obou grafech jsou červeně vyznačeny hodnoty celkového zatížení, při němž bylo přerušeno zatěžování samotného oblouku ať už s ohledem na přílišné deformace, nebo s blížícím se dosažením meze kluzu oceli.

#### **4.4 Metodika vyhodnocení a výstupy z experimentu**

##### **4.4.1 Způsob měření dat**

Měření na komplexní konstrukci s membránou probíhalo v několika bodech na oblouku a na povrchu membrány. Ve třech bodech na oblouku byly instalovány potenciometry pro určení posunů (na bodech 2 a 6 byly měřeny posuny ve všech směrech x, y, z a v bodě 4 (ve vrcholu) byly vzhledem k předpokládané symetrii měřeny pouze hodnoty ve směrech y, z). Opět ve třech bodech na oblouku (50 mm od vetknutí a poté taktéž ve vzdálenosti 50 mm od vrcholu oblouku) byly v každém bodě osově symetricky po povrchu průřezu instalovány 4 tenzometry pro měření napětí oblouku. Současně byla provedena i kontrolní měření napětí na povrchu textilní membrány a to ve čtyřech vybraných bodech na povrchu, ve vzájemně kolmých směrech. Celkový počet měřených veličin byl tedy při komplexní sestavě 22 tenzometrů a 8 potenciometrů.

Konstrukce byla zatěžována v jednotlivých krocích a po zatížení bylo nutné nechat konstrukci ustálit. Vzhledem k tomu, že ani po prvotním ustálení nebyla soustava úplně klidná a docházelo k mírným výkyvům v hodnotách deformací i napětí, byly odečítány hodnoty v časových intervalech od 10 do 40s a ty byly dále statisticky zpracovány. Příklad jednoho souboru dat (neúplný počet sloupců) po „měření\_6\_0007“ i se způsobem statistického vyhodnocení je patrný z obr. 25.

##### **4.4.2 Statistická metoda pro vyhodnocení dat z jednotlivých měření**

Pro každý soubor dat z dílčího senzoru byl stanoven průměr z naměřených hodnot, jakožto hlavní vypovídající parametr daného souboru. Vzhledem k velkým rozptylům v naměřených hodnotách u některých měření, které byly způsobeny pokračujícím dotvarováním a ustalováním konstrukce po vnesení zatížení, bylo nezbytné na základě dalších statistických veličin vyjmout extrémní krajní hodnoty,

a pro tyto případy stanovit opravený průměr. Opravený průměr vylučoval z naměřených hodnot tzv. odlehlá pozorování, tedy ty hodnoty, které se nacházely za vnitřními hradbami daného souboru dat. Za odlehlé pozorování (35) lze považovat tu hodnotu  $x_i$ , která je od dolního, resp. horního kvartilu vzdálena více než 1,5násobek interkvartilového rozpětí (36):

$$\left[ (x_i < x_{0,25} - 1,5 \times IQR) \vee (x_i > x_{0,75} + 1,5 \times IQR) \right] \Rightarrow x_i \text{ je odlehlým pozorováním} \quad (35)$$

$$IQR = x_{0,75} - x_{0,25} \quad (36)$$

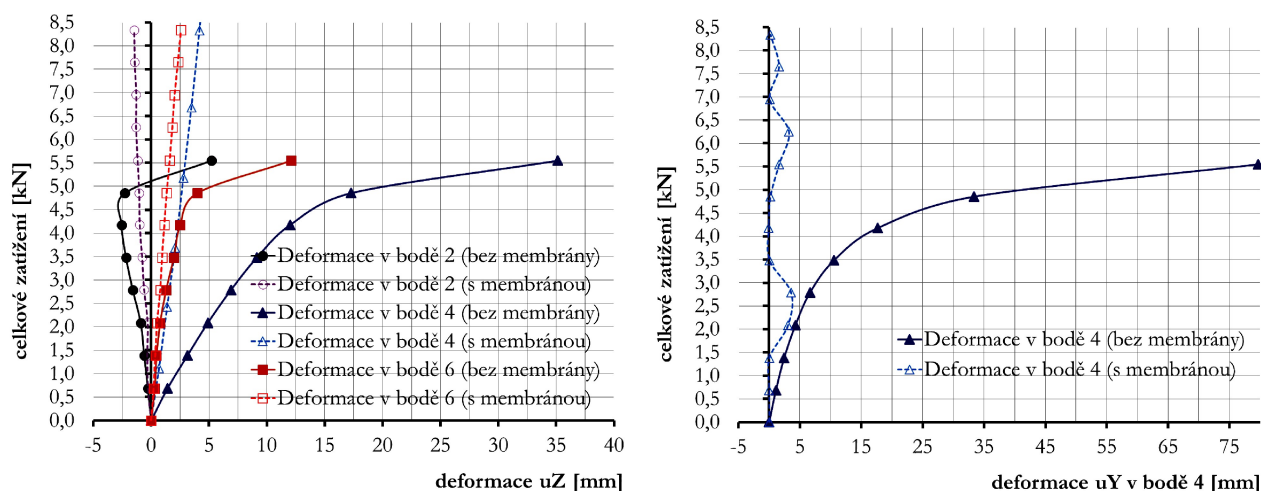
Time s	Tenzo 1 um/m	Tenzo 2 um/m	Tenzo 3 um/m	Tenzo 4 um/m	Tenzo 5 um/m	Tenzo 6 um/m	Tenzo 7 um/m	Tenzo 8 um/m	Tenzo 9 um/m	Tenzo 10 um/m	Tenzo 11 um/m	Tenzo 12 um/m	Tenzo 13 um/m
0	-40,3687	-1034,17	153,6173	964,194	-76,0832	-181,145	9,094254	99,51634	3,110758	-491,722	-108,454	425,1791	10,40813
1	-39,7707	-1033,69	153,4977	963,7159	-79,7917	-182,641	13,40206	101,1909	-5,08489	-485,265	-100,015	415,9114	10,40813
2	-40,5481	-1037,1	154,574	967,004	-76,6814	-179,769	9,393406	97,60257	0,119645	-500,213	-105,342	433,7891	10,52777
3	-39,5912	-1034,29	153,6173	964,194	-79,373	-183,837	12,26528	101,3703	-2,03396	-482,634	-102,828	414,4166	10,6474
4	-40,5481	-1038,89	154,5142	968,0801	-77,8178	-180,128	10,59002	98,0212	-1,6152	-498,718	-103,606	431,3974	10,40813
5	-40,1893	-1036,56	153,7967	966,0474	-78,2963	-182,521	11,7268	100,3536	-0,83751	-490,885	-104,324	423,0864	10,22868
6	-40,3687	-1038,77	154,2153	968,3791	-78,4758	-181,504	11,42765	99,27712	-2,63218	-490,945	-102,948	423,0266	10,70722
7	-40,3089	-1038,47	154,5142	968,14	-77,5786	-181,385	10,76951	99,15751	-0,89733	-498,539	-104,444	431,3376	10,40813
8	-39,7707	-1038,89	154,3348	968,6182	-78,8347	-181,983	11,96612	99,87518	-2,1536	-488,075	-103,008	420,2762	11,00663
9	-40,0099	-1038,77	154,3348	968,4987	-77,1599	-181,564	10,05154	99,15751	-0,65804	-498,18	-103,965	431,8758	10,46795
10	-40,1893	-1040,51	154,3946	969,4553	-79,4926	-181,325	12,62426	99,69576	-2,1536	-493,098	-103,127	425,4182	10,76704
11	-39,7109	-1037,82	154,3348	967,9008	-76,4421	-182,461	9,453237	99,99479	0,239289	-492,679	-105,462	425,5378	10,52777
12	-40,4285	-1042,18	155,471	971,7272	-79,7917	-180,607	12,5046	98,0212	-4,18756	-501,11	-100,973	433,8489	11,06612
13	-39,4716	-1037,1	153,6173	966,7648	-75,9636	-183,12	9,453237	101,3105	3,110758	-487,358	-108,394	419,9772	9,989416
14	-39,8903	-1043,61	155,4112	972,8632	-80,3898	-180,188	12,56443	97,60257	-5,98223	-504,039	-108,454	436,7787	10,6474
15	-39,1128	-1037,34	153,6173	967,4823	-76,4421	-183,179	9,812221	100,8321	4,008092	-490,347	-108,993	423,9833	10,58758
16	-39,8903	-1044,19	154,9926	973,7009	-79,1936	-180,308	12,26528	98,55946	-4,60631	-499,077	-100,254	430,9789	10,34832
17	-38,6942	-1038,53	153,6173	968,678	-76,7412	-182,162	10,47036	99,99479	0,777689	-499,077	-105,881	432,7726	10,76704
18	-39,651	-1044,51	154,9328	974,1162	-78,1767	-181,325	10,88917	98,79868	-0,83751	-493,217	-104,444	425,7172	10,40813
19	-38,8736	-1038,89	153,3183	968,7976	-77,6384	-182,162	11,54731	100,2938	-2,81165	-501,708	-102,409	434,3272	10,58758
median	-39,8903	-1038,65	154,3348	968,2595	-77,9973	-181,534	11,15841	99,60605	-1,25627	-493,157	-103,786	425,6275	10,52777
průměr	-39,8693	-1038,71	154,2362	968,418	-78,0182	-181,666	11,11354	99,53129	-1,25627	-494,344	-103,867	426,9818	10,54571
kvartil 2	-39,8903	-1038,65	154,3348	968,2595	-77,9973	-181,534	11,15841	99,60605	-1,25627	-493,157	-103,786	425,6275	10,52777
směr.odch	0,52078	3,004593	0,6238	2,845431	1,33698	1,089886	1,261543	1,154398	2,63082	5,849313	2,723905	6,241077	0,243051
rozptyl	0,285486	9,502714	0,409607	8,522605	1,881595	1,25037	1,675254	1,402774	7,285487	36,01523	7,810164	41,0011	0,062183
-10%	-39,8969	-1038,67	154,2186	968,3625	-78,0006	-181,651	11,09858	99,53628	-1,28618	-494,456	-103,882	427,1356	10,54771
Maximum	-38,6942	-1033,69	155,471	974,1187	-75,9636	-179,769	13,40206	101,3703	4,008092	-482,634	-98,4588	436,7787	11,06612
75tý percentil	-39,6361	-1037,1	154,5292	968,962	-76,7262	-181,011	12,26528	100,3088	0,149556	-490,751	-102,723	432,1	10,66236
25tý percentyl	-40,3239	-1039,3	153,6173	966,9442	-79,2384	-182,476	9,991712	98,73887	-2,67705	-499,077	-105,372	423,0714	10,40813
Minimum	-40,5481	-1044,51	153,3183	963,7156	-80,3898	-183,837	9,094254	97,60257	-5,98223	-504,039	-108,993	414,4166	9,989416
mezikvartilové rozpětí RQ	0,687763	2,1964	0,911905	2,017838	2,512182	1,46567	2,273564	1,569899	2,826602	8,325907	2,64851	9,028565	0,254222
1,5*RQ	1,031645	3,2946	1,367857	3,026756	3,768273	2,198505	3,410345	2,354848	4,239903	12,48886	3,972765	13,54285	0,381333
3*RQ	2,06329	6,5892	2,735715	6,053513	7,536547	4,39701	6,820691	4,709697	8,479806	24,97772	7,94553	27,0857	0,762666
horní vnitřní hradba	-38,6045	-1033,81	155,897	971,9888	-72,958	-178,812	15,67562	102,6636	4,389459	-478,262	-98,7506	445,6428	11,04369
dolní vnitřní hradba	-41,3555	-1042,59	152,2494	963,9174	-83,0067	-184,675	6,581367	96,38402	-6,91695	-511,566	-109,345	409,5286	10,0268
dolní vnější hradba	-42,3871	-1045,89	150,8816	960,8907	-86,775	-186,873	3,171022	94,02917	-11,1569	-524,054	-113,317	395,9857	9,645468
horní vnější hradba	-37,5728	-1030,51	157,2649	975,0155	-69,1897	-176,614	19,08597	105,0185	8,629362	-465,773	-94,7778	459,1857	11,42502
horní extrém	OK	POZOR	OK	POZOR	OK	OK	OK	OK	OK	OK	POZOR	OK	POZOR
dolní extrém	OK	POZOR	OK	POZOR	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	POZOR
opravený průměr	-39,8693	-1038,02	154,2362	967,7476	-78,0182	-181,666	11,11354	99,53129	-1,25627	-494,344	-104,151	426,9818	10,54771

Obr. 25 Postup statistického vyhodnocení naměřených dat při experimentu. Zobrazeno měření 6 (nesymetrické zatěžování komplexní konstrukce s membránou), krok 07. Tabulka je vzhledem k množství měřených veličin neúplná.



### 4.4.3 Výstupy ze symetrického zatěžování

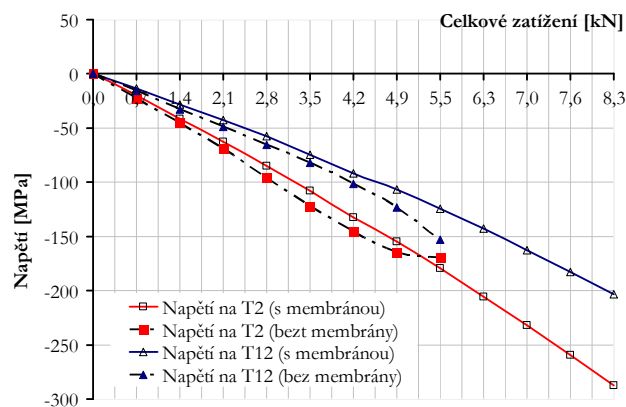
Průběh svislých a vodorovných deformací od symetrického zatížení (obr. 23) na vnitřním oblouku je zobrazen na obr. 26. Samostatný oblouk vybočil z roviny při celkovém zatížení  $F_0 = 5,5 \text{ kN}$ , zatímco zatěžování s membránou bylo ukončeno těsně před dosažením meze kluzu na vnitřním oblouku, při celkovém zatížení  $F_M = 8,3 \text{ kN}$ . Průběh deformací oblouku stabilizovaného membránou vykazuje ve svislém směru menší a téměř lineární chování, v příčném směru je pak stabilizační účinek membrány naprosto zásadní (obr. 26 vpravo).



Obr. 26 Symetrické zatěžování: Svislé deformace (vlevo); Příčné deformace (vpravo)

Potenciometr V1 ukazuje při kritickém zatížení náhlý přeskok ze záporných do kladných hodnot. Bod P2 měl od začátku tendenci mírně stoupat (lanko potenciometru se zkracovalo, tzn. deformace byla v záporných hodnotách) až do dosažení kritického zatížení. Vlivem výrazného naklonění celého oblouku a prodloužení lanka svislého potenciometru došlo k náhlému přeskoku do kladných hodnot. Náhlý nárůst vodorovné příčné deformace je patrný z obrázku (obr. 26 vpravo).

Průběh deformací při odtížení není zobrazen, nicméně při celkovém odtížení konstrukce vykazovala téměř ideální elastické chování.



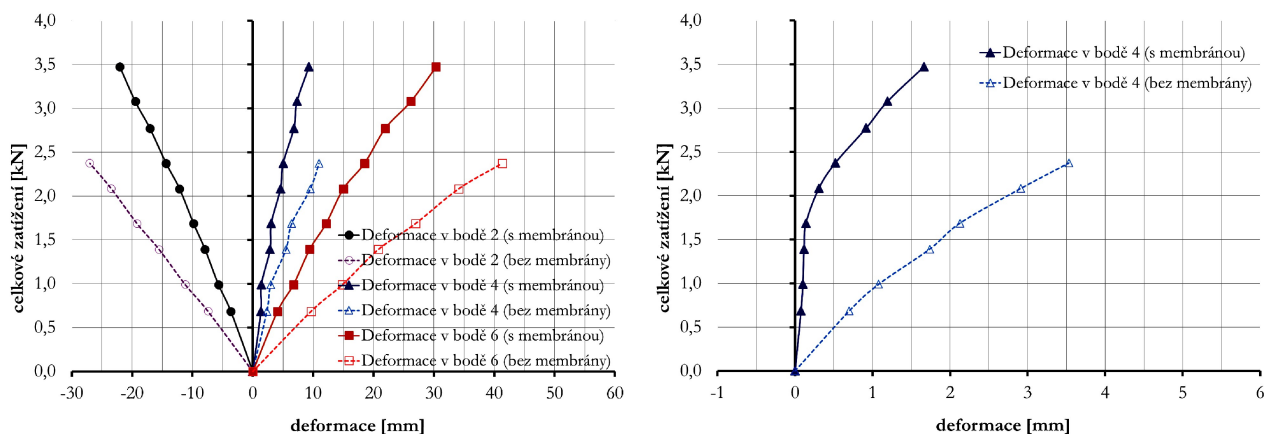
Obr. 27 Průběh napětí od symetrického zatěžování na tenzometrech 2 a 12

U symetrického zatížení je zjevný zásadní vliv membrány na příčné držení oblouku. Samostatně stojící oblouk zkolabuje ztrátou stability z roviny oblouku, zatímco u konstrukce s membránou k tomuto jevu nedochází. Při experimentální analýze měla membrána na zkoumaný oblouk takový vliv, že ke ztrátě stability vůbec nedošlo a měření muselo být ukončeno s ohledem na blížící se dosažení meze kluzu oceli.

#### 4.4.4 Výstupy z nesymetrického zatěžování

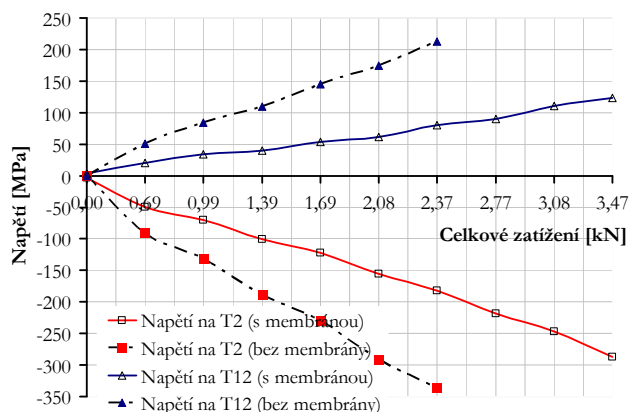
Průběh svislých a příčných deformací od nesymetrického zatěžování je zobrazen na obr. 28, průběh napětí na tenzometrech T2 a T12 je zobrazen na obr. 29.

Testování samostatného oblouku bylo přerušeno při celkovém zatížení  $F_0 = 2,37 \text{ kN}$ , přičemž maximální svislá deformace v zatěžovacím bodě P6 dosáhla hodnoty  $\delta_0 = 41,3 \text{ mm}$  a příčná deformace ve vrcholu (bod P4) hodnoty  $\eta_0 = 3,5 \text{ mm}$ . Z grafu (obr. 29) je patrné, že další přitěžování by pravděpodobně mělo za následek vznik plastických deformací, a proto byl test v této fázi přerušen.



Obr. 28 Nesymetrické zatěžování: Svislé deformace (vlevo); Příčné deformace (vpravo)

Při stejném celkovém zatížení jako u konfigurace se samostatným obloukem, tj.  $F_0 = F_M = 2,37 \text{ kN}$ , vykazovala konstrukce s membránou podstatně nižší deformace ( $\delta_M = 18,5 \text{ mm}$  resp.  $\eta_M = 0,5 \text{ mm}$ ) i napětí. Konstrukce s membránou byla dále přitěžována až na hodnotu celkového zatížení  $F_M = 3,47 \text{ kN}$ , přičemž i při tomto zatížení se konstrukce chovala mnohem stabilněji než samostatný oblouk.



Obr. 29 Průběh napětí od nesymetrického zatěžování na tenzometrech 2 a 12

Stabilizační efekt membrány na vnitřní oblouk je pro nesymetrické zatížení a předpokládané vybočení oblouku z roviny zásadní. Při prolamování oblouku dochází ke snižování napětí v membráně v oblasti zatížené části konstrukce a naopak k nárůstu napjatosti a zvýšení stabilizace v oblasti, která se snaží vybočit.

## **5. Numerická analýza provedeného experimentu**

V programu SOFiSTiK byla provedena geometricky nelineární numerická analýza s imperfekcemi (GNIA) a to jak pro samostatný oblouk, tak posléze pro kompletní konstrukci s membránou.

### **5.1 Popis programu SOFiSTiK**

Program SOFiSTiK pracuje na principu výpočtu metodou konečných prvků s tím, že finální nejvhodnější výpočetní metodu iterace je možné zvolit na základě typu posuzované konstrukce. Výpočty je možné provádět geometricky nelineární analýzou (GNA, GNIA, nazývané v softwaru a v Německu nesprávně teorií 3. řádu), popřípadě zjednodušenou teorií 2. řádu, u níž jsou geometrické vztahy v lineární formě, avšak u malých deformací často používané).

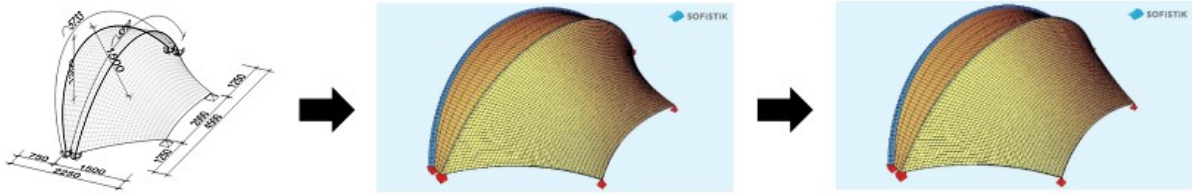
Velikou výhodou programu je možnost modelování, výpočtu i posouzení prutových prvků společně s membránovými. Současně program umožňuje přesné vnesení počátečních hodnot předpětí jak do lanových, tak do membránových prvků, výpočet předepnutého tvaru a následné uložení takto vypočítaného tvaru konstrukce jako počátečního pro veškeré další výpočty.

### **5.2 Popis numerického modelu**

#### **5.2.1 Geometrie, materiál a tvorba sítě**

##### **5.2.1.1 Vložení geometrie**

Geometrie byla modelována v programu AutoCAD. Skutečné souřadnice zatěžovacích bodů, které byly odměřeny na reálně konstrukci v laboratoři, byly vneseny přímo do modelu a následně jimi byla proložena spojitá, zaoblená křivka, vytvářející střednici zkoumaného oblouku. Stejným způsobem byla geometricky zadaná obvodová lana a nakonec byl mezi hraničními křivkami uvažované membrány AutoCADem automaticky generován povrch s nejmenší plochou (obr. 30).

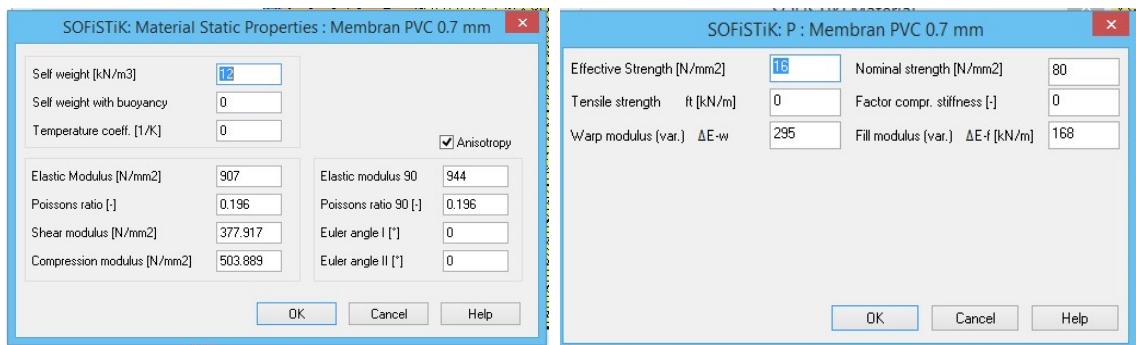


Obr. 30 Postup vytvoření FEM modelu

### 5.2.1.2 Materiálové vlastnosti a počáteční deformace

Materiálové charakteristiky pro ocelové oblouky byly převzaty z dostupných inspekčních certifikátů. Geometrie oblouků byla zavedena podle měření na skutečně provedené konstrukci přímo v laboratoři. Z měření vyplynulo, že vnitřní zkoumaný oblouk byl od samého počátku mírně deformován jak v rovině (ve tvaru jednostranného prolomení u bodu P6), tak z roviny, přičemž příčná výchylka vrcholu oblouku z roviny činila  $w_0 = 5,5 \text{ mm}$ .

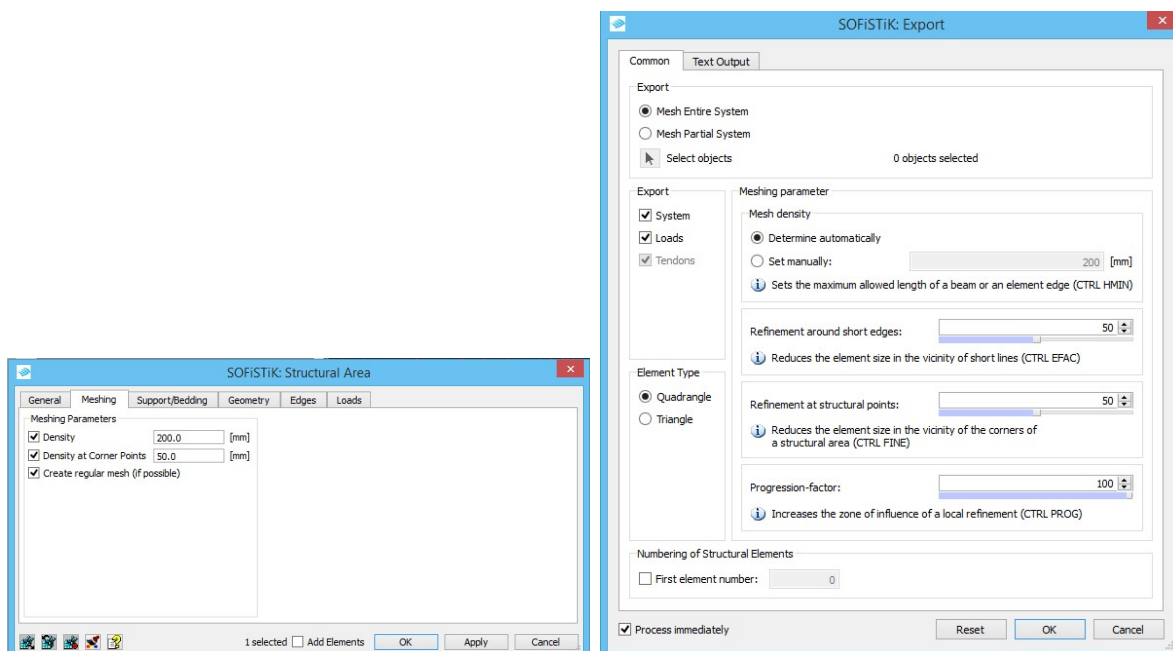
Membrána Ferrari<sup>®</sup>, typ Précontraint 702S, byla v podrobné numerické analýze uvažována jako ortotropní materiál. Z výzkumu [24] a [25] daného materiálu vyplývají hodnoty modulů pružnosti  $E_f^{1:1} = 634,9 \text{ kN/m}$  a  $E_w^{1:1} = 661,9 \text{ kN/m}$  (viz odst. 4.2.1.), které byly proto uvažovány v analýze. S ohledem na vstupní požadavky programu, který požaduje udávat modul pružnosti v Pascalech, byla zavedena tomu odpovídající jednotná tloušťka membrány  $t_M = 0,7 \text{ mm}$ , ekvivalentní modul pružnosti  $E_f = 907 \text{ MPa}$ ,  $E_w = 944 \text{ MPa}$  a Poissonův součinitel  $\nu = 0,197$ . Oproti reálnému modelu však není v numerické analýze postihnuto vystřídání „kapes“ oboustranné membrány na prostředním oblouku (obr. 18, obr. 20), ale membrána je v modelu kotvena spojitě kloubově, přes celou délku vnitřního oblouku.



**Obr. 31** Systémová okna pro vložení požadovaných materiálových a pevnostních charakteristik

### 5.2.1.3 Generování sítě

Parametry sítě pro plochu membrány (nikoliv vlastní síť) byly zadávány manuálně, s primárním cílem vytvořit pravidelnou čtyřúhelníkovou síť s maximální délkou hrany elementu 50mm. Pro pravidelnou čtvercovou síť není možné vytvořit lokální zjemnění sítě v rozích či kolem koncentrace zatížení bez toho, aniž by se prvotní prostorově zakřivená síť složitě dělila. Pravidelné čtyřúhelníkové elementy neumožňují napojení mimo vrcholy a tak je logické, že požadavky pravidelnosti a zhuštění sítě jdou proti sobě. Nicméně, při volbě nepravidelné čtyřúhelníkové sítě již program umožňuje lokální zhuštění podle požadavků (obr. 32).



**Obr. 32** Systémová okna pro tvorbu sítě strukturální plochy

## **5.2.2 Popis výpočetní metody**

Program ASE (General Static Analysis of Finite Element Structures), který je použit jak pro lineární analýzu, tak pro geometricky nelineární výpočty, používá při iteracích modifikovanou Newton - Raphsonovu (mN-R) metodu s konstantní maticí tuhosti. Tato metoda je v programu SOFiSTiK dále akcelerována algoritmem napsaným Crisfieldem [26].

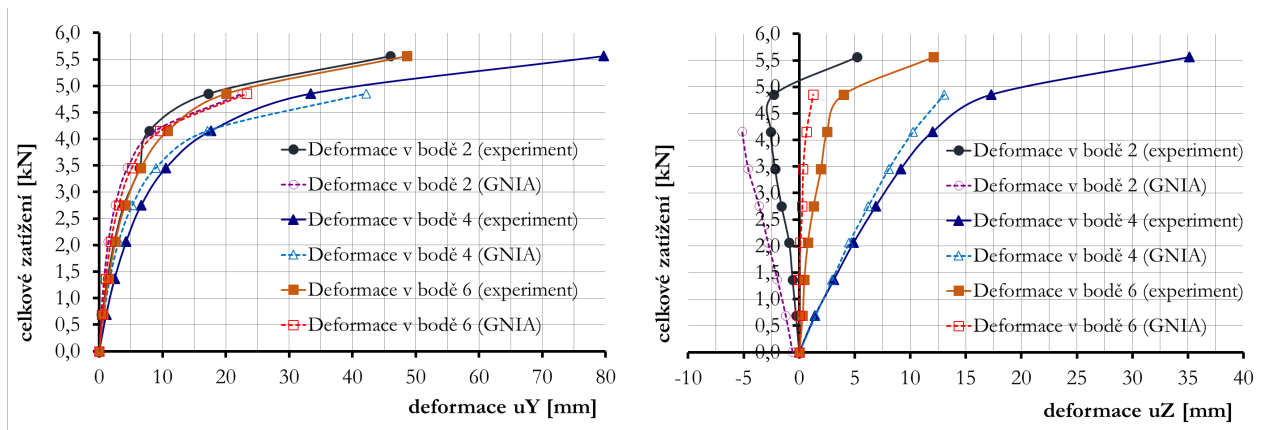
### **5.2.2.1 Předpětí**

Počáteční geometrie celé konstrukce, včetně povrchu membrány, jak bylo zmíněno v 5.2.1.1, je generována programem AutoCAD. Předpětí je do výpočtu zavedeno přímo hodnotami  $PREX = \dots \text{ kN/m'}$  resp.  $PREY = \dots \text{ kN/m'}$  ve směrech lokálních os „x“ a „y“ elementů sítě. Pro navození předpětí podobnému při experimentu (nebo alespoň stejnému poměru předpětí membrány mezi oblouky a od oblouku k lanům) byly voleny poměry předpětí mezi membránami tak, aby bylo dosaženo odklonu vrcholu středového oblouku o 12 mm od vnějšího ukloněného oblouku. Tento odklon odpovídá deformované konstrukci při experimentu po aktivaci předpětí v membráně.

## **5.3 Samotný oblouk**

### **5.3.1 Symetrické zatížení**

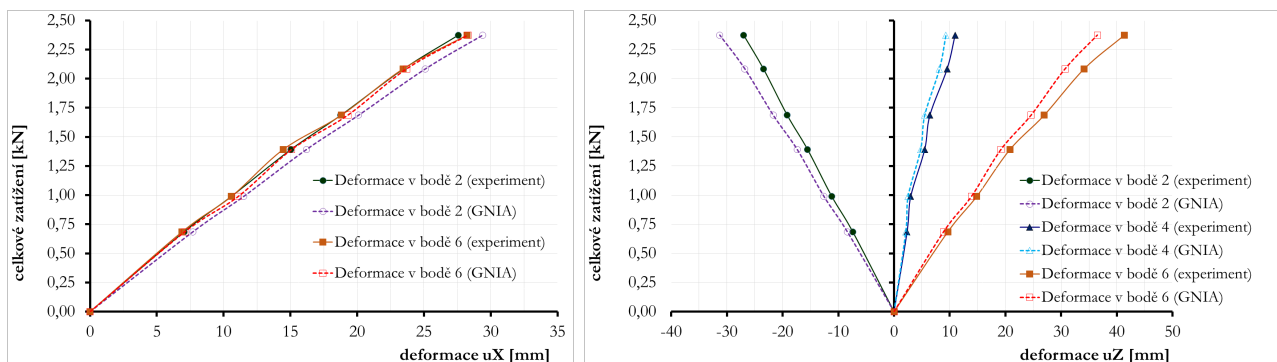
Přírůstky zatížení v analýze jsou stejné, jako při experimentu. Z níže uvedených grafů (obr. 33) je patrné, že analyticky získaný průběh deformací na samotném oblouku velmi dobře koresponduje s výsledky dosaženými v experimentu. Z příčné deformace vrcholu oblouku od symetrického zatížení je zřejmé, že výpočetní program predikuje dřívější dosažení kritického zatížení než samotný experiment (obr. 33 vlevo).



**Obr. 33** Příčné deformace vrcholu oblouku od symetrického zatěžování (vlevo); Svislé deformace od symetrického zatěžování (vpravo)

### 5.3.1 Nesymetrické zatížení

Přírůstky zatížení v analýze jsou opět stejné, jako při experimentu. Současně je po každém přírůstku zatížení aktualizována geometrie modelu a následný krok je přidáván na deformovanou konstrukci.



**Obr. 34** Podélné deformace bodů P2 a P6 oblouku od nesymetrického zatěžování (vlevo); Svislé deformace od nesymetrického zatěžování (vpravo)

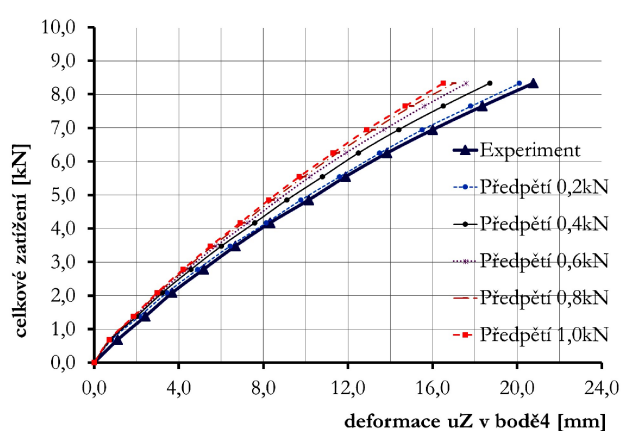
Průběh deformací v podélném směru v bodech P2 a P6 a svislých deformací ve všech měřených bodech je patrný na grafech (obr. 34). I zde byla prokázána velice dobrá shoda mezi výsledky experimentálního měření a hodnotami získanými z nelineární analýzy.



## 5.4 Kompletní membránová konstrukce

### 5.4.1 Symetrické zatížení

Porovnání experimentálních a numerických výsledků je uvedeno na grafu (obr. 35) a v tabulce (tab. 5). V numerické analýze je rovnoměrné předpětí membrány modelováno v několika variantách ( $P_x = P_y = 0,1$  až  $1,0$  kN/m) tak, aby z posunu křivek deformací pro jednotlivá předpětí bylo možné pozorovat přiblížení k experimentálním hodnotám. Teprve značné snížení počátečního předpětí vedlo k uspokojivému přiblížení výpočetního modelu a reality z experimentu.



**Obr. 35** Porovnání experimentálně zjištěných svislých deformací vrcholu oblouku s deformacemi získanými z programu SOFiSTiK s různou mírou předpětí; Symetrické zatěžování.

**Tab. 5** Vliv předpětí v membráně na deformaci ve vrcholu oblouku (od symetrického zatížení)

experiment		Předpětí 0,2 kN/m		Předpětí 0,4 kN/m		Předpětí 0,6 kN/m		Předpětí 0,8 kN/m		Předpětí 1,0 kN/m	
total load	defl.	defl.	exp/GNIA	defl.	exp/GNIA	defl.	exp/GNIA	defl.	exp/GNIA	defl.	exp/GNIA
[kN]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
0,00	0,00	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%
0,69	1,11	0,82	-36%	0,77	-45%	0,74	-50%	0,72	-54%	0,71	-56%
1,38	2,42	2,14	-13%	2,01	-21%	1,93	-26%	1,89	-28%	1,86	-30%
2,08	3,69	3,43	-8%	3,22	-15%	3,10	-19%	3,02	-22%	2,97	-24%
2,79	5,18	4,90	-6%	4,59	-13%	4,40	-18%	4,28	-21%	4,21	-23%
3,48	6,68	6,43	-4%	6,02	-11%	5,77	-16%	5,60	-19%	5,50	-21%
4,17	8,33	8,14	-2%	7,60	-10%	7,27	-15%	7,05	-18%	6,91	-21%
4,85	10,14	9,77	-4%	9,11	-11%	8,69	-17%	8,42	-20%	8,25	-23%
5,55	11,89	11,60	-2%	10,80	-10%	10,20	-17%	9,91	-20%	9,70	-23%
6,25	13,86	13,50	-3%	12,50	-11%	11,90	-16%	11,50	-20%	11,30	-23%
6,95	16,01	15,50	-3%	14,40	-11%	13,70	-17%	13,20	-21%	12,90	-24%
7,65	18,35	17,80	-3%	16,50	-11%	15,60	-18%	15,00	-22%	14,70	-25%
8,33	20,77	20,10	-3%	18,70	-11%	17,60	-18%	17,00	-22%	16,50	-26%

Důvody pro potřebné rapidní snížení numerického předpětí membrány oproti odhadovanému předpětí zavedeném při experimentu jsou zejména v následujících odlišnostech:

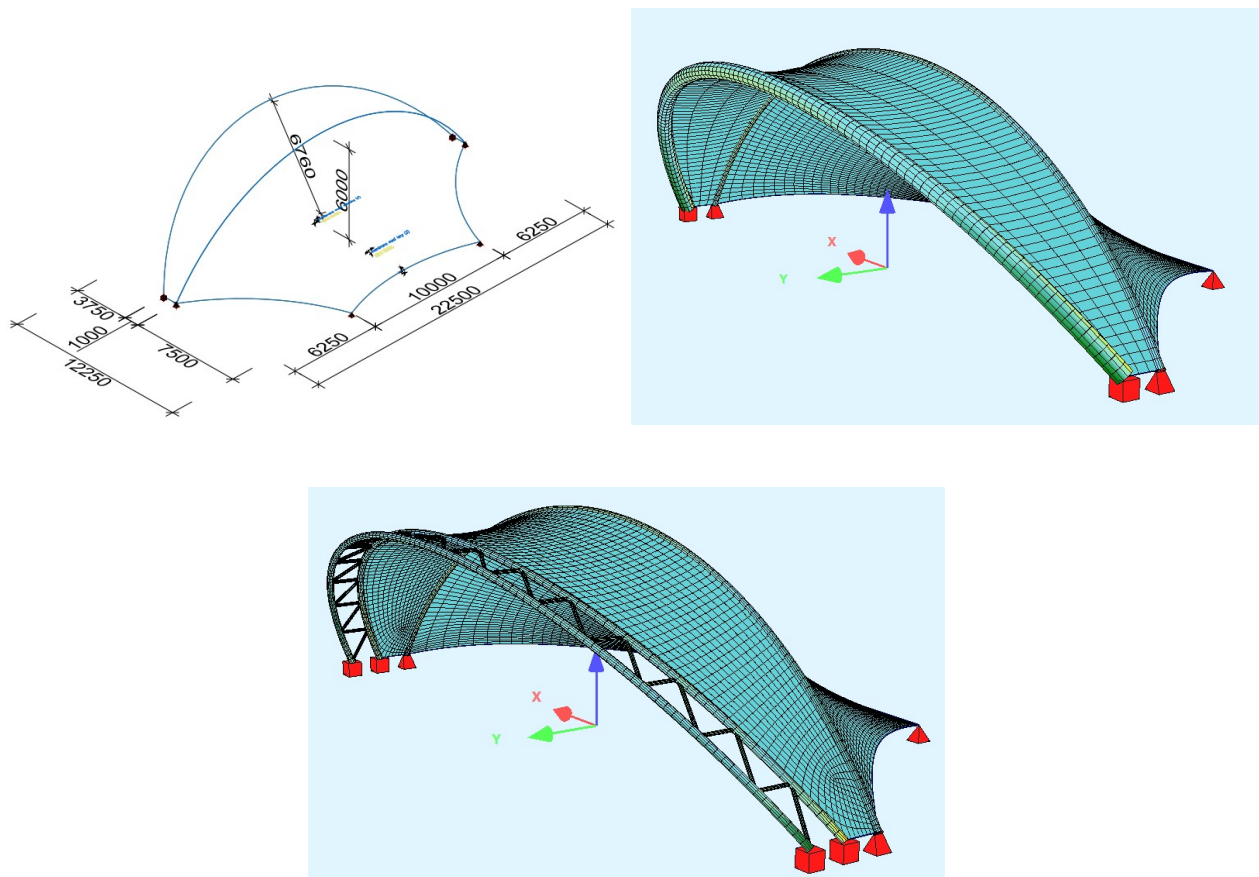
- celkové nerovnoměrné předpětí membrány při experimentu,
- vliv vystřídání „kapes“ membrány po obou stranách vnitřního oblouku oproti výpočetnímu modelu, a tím pádem i různá distribuce napětí v prouzcích membrány s kapsami oproti proužkům s mezerou,
- možnost prokluzu membrány po ocelovém oblouku při experimentu (při montáži membrány byl vnitřní oblouk namazán vazelínou, aby bylo možné těsné kapsy na oblouk navléci),
- zjednodušeném modelování rohových oblastí na styku membrány, ocelového oblouku a lanka a v prostoru kotvení membrány mezi oblouky.

## **5.5 Konstrukce stejného typu jako v experimentu, ale s reálnými rozměry**

### **5.5.1 Geometrické a materiálové charakteristiky**

Experimentální model zastřešení koncertního podia byl zvětšen tak, aby představoval reálnou konstrukci s praktickým využitím. Na této konstrukci je demonstrována efektivnost zastřešení textilní membránou a funkčnost tohoto řešení.

Reálná konstrukce byla zvětšena 5krát oproti modelu z experimentu. Půdorysné rozměry  $L \times B \times H$  jsou tedy 22500 x 12250 x 6000 [mm] (obr. 36). Hlavními nosnými prvky jsou ukloněný trubkový oblouk s průřezem TR 457x10 a svislý trubkový oblouk TR 193,7x10 v materiálu S355JR. Obvodové prvky jsou uvažovány jako splétaná pramencová lana 1x19 s průměrem  $D = 20$  mm a mezi kluzu oceli  $f_y = 1520$  MPa. Zakřivenou plochu tvoří membrána Ferrari® typ Précontraint 1002S. Moduly pružnosti dané membrány jsou  $E_f^{1:1} = 976,0$  kN/m,  $E_w^{1:1} = 830,2$  kN/m a Poissonův součinitel  $\nu = 0,213$ .



Obr. 36 Geometrie konstrukce a vizualizace 3D modelu po předpětí včetně alternativy s příhradovým vnějším ukloněným obloukem

### 5.5.2 Zatížení

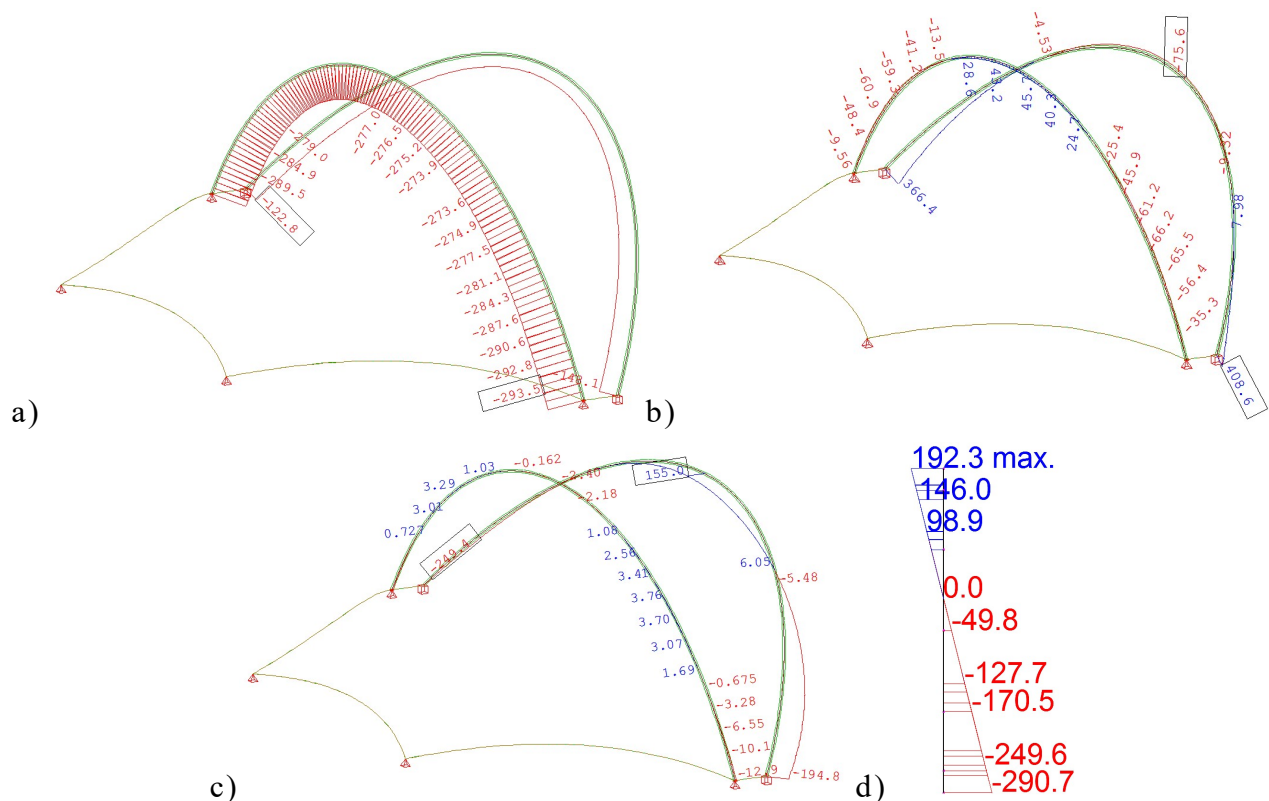
Předpětí v membráně bylo zvoleno co nejvíce rovnoměrné a současně tak, aby po předepnutí konstrukce nebyl odklon svislého oblouku oproti ideálnímu svislému stavu větší než  $L/1000 = 22,5$  mm. Tyto podmínky splňuje rovnoměrné předpětí v ukloněné membráně mezi obloukem a lany  $PREX = 10,00$  kN/m' resp.  $PREY = 10,00$  kN/m' ve směrech lokálních os „x“ a „y“ a rozdílné předpětí  $PREX = 10,00$  kN/m' resp.  $PREY = 6,70$  kN/m' mezi oběma ocelovými oblouky. Předpětí v obvodových lanech je pak stanoveno na 140 kN, přičemž se ve fázi formfinding programem dopočítá příslušný poloměr.

Krom předpětí a vlastní hmotnosti konstrukce byly uvažovány i dva zatěžovací stavy: LC100 – Zatížení sněhem s charakteristickou hodnotou  $1$  kN/m<sup>2</sup> a LC200 – Zatížení větrem s charakteristickou hodnotou  $2$  kN/m<sup>2</sup>, která zahrnuje součet sání na vnější straně uvažovaného zastřešení a tlaku na vnitřní stranu, jako

efektu „podfouknutí“ celé konstrukce. Zatížení sněhem LC100 je uvažováno jako svislé zatížení v globálním souřadném systému, s přihlédnutím k aktualizované geometrii konstrukce po předepnutí. Zatížení od větru LC200 je potom uvažováno kolmo k ploše membrány.

### 5.5.3 Výpočet a posouzení

Vlastní výpočet byl proveden GNIA stejně jako u experimentálního modelu v programu SOFiSTiK, přičemž vlastní zatěžování probíhalo v jednotlivých zatěžovacích krocích s přírůstkem zatížení rovným 1/20 celkové návrhové hodnoty.



**Obr. 37 Průběh vnitřních sil od předpětí a návrhové hodnoty zatížení sněhem ( $1 \text{ kN/m}^2$ ) na reálné konstrukci.**

a) Normálová síla

b) Moment k lokální ose  $y$

c) Moment k lokální ose  $z$

d) Rozložení napětí po průřezu v nejvíce namáhaném místě středního oblouku

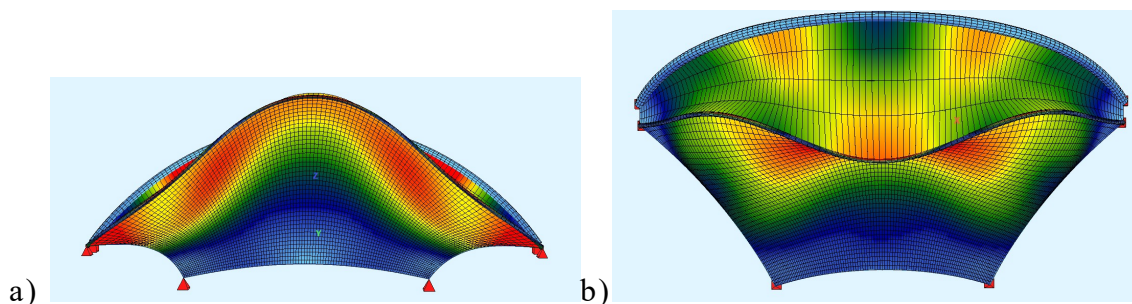
Vzhledem k výpočtu GMNIA stačí navržené průřezy posoudit na prostý tlak a ohyb a v tomto ohledu daná konstrukce vyhoví.

V následující parametrické studii byla zkoumána stabilita středového oblouku. Hodnoty pro součinitel kritické délky jsou uvedeny v tabulce (tab. 6) pro dva poměry  $H/L$ , grafická interpretace jednotlivých tvarů vybočení je zobrazena na obrázcích (obr. 38).

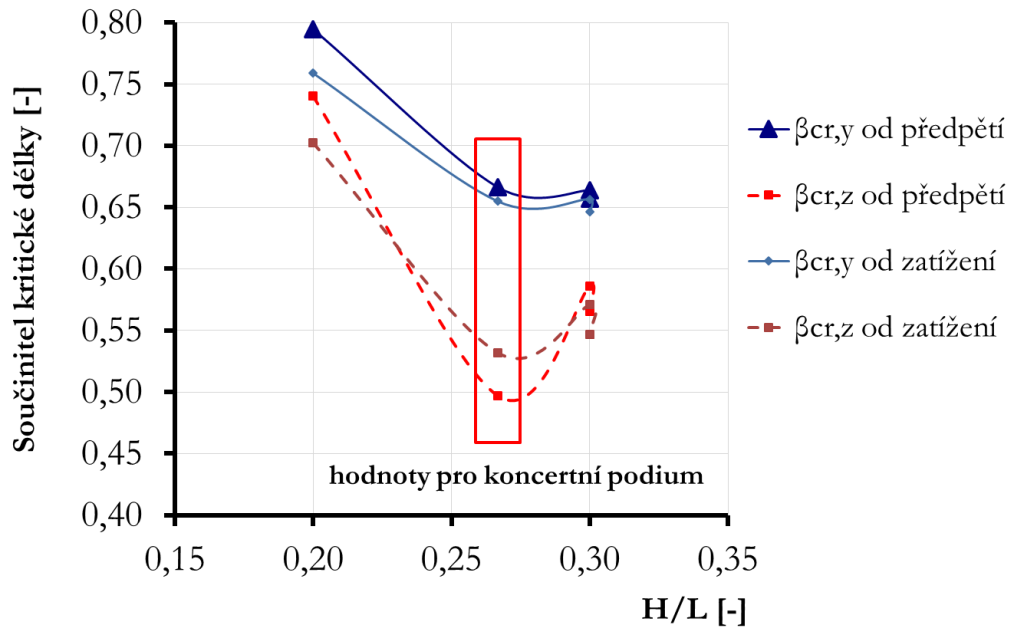
**Tab. 6 Kritické hodnoty a únosnosti ve vzpěru středového oblouku jak pouze od předpětí, tak od svislého zatížení  $1 \text{ kN/m}^2$**

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	$L_{\text{teor}}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,Rd,y}$	$N_{b,Rd,z}$
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
B06_1-5_10000-předpětí	TR 108x7	0,20	11 035	26,3	11,67	13,44	306,9	353,5	2	2	0,79	0,74	244,9	228,2	788,5	261,9	295,8
B06_1-5_10000-zatížení	TR 108x7	0,20	11 035	64,7	5,20	6,07	336,4	392,7	2	2	0,76	0,70	233,9	216,5	788,5	283,6	323,1
001_Koncertní podium-předpětí	TR 194x10	0,27	26 550	133,0	10,99	19,77	1461,7	2629,4	3	3	0,67	0,50	271,6	202,5	2052,1	1107,3	1528,3
001_Koncertní podium-zatížení	TR 194x10	0,27	26 550	241,4	6,27	9,50	1513,6	2293,3	3	3	0,65	0,53	266,9	216,8	2052,1	1134,5	1442,7
C06_3-10_10000_1y=1,00-předpětí	TR 108x5,6	0,30	12 250	27,0	11,00	14,12	297,0	381,2	2	2	0,66	0,59	224,2	197,9	639,5	247,2	302,5
C06_3-10_10000_1y=1,00-zatížení	TR 108x5,6	0,30	12 250	54,4	5,58	7,38	303,6	401,5	2	2	0,66	0,57	221,8	192,9	639,5	251,8	314,7
C06_3-10_10000-předpětí	TR 108x5,6	0,30	12 250	26,9	11,27	15,23	303,2	409,7	2	2	0,66	0,57	222	190,9	639,5	251,5	319,5
C06_3-10_10000-zatížení	TR 108x5,6	0,30	12 250	54,8	5,72	7,98	313,5	437,3	2	2	0,65	0,55	218,3	184,8	639,5	258,6	335,2

Z tabulky i přiloženého grafu součinitele kritické délky (obr. 39) vyplývá, že i konstrukce s rozdílnou geometrií membrány vykazuje stejné chování jako konstrukce podobných poměrů  $H/L$ .



**Obr. 38 Ztráta stability konstrukce koncertního podia od zatížení předpětím**  
a) Symetrické vybočení středu oblouku v rovině se součinitelem kritického zatížení;  $\alpha_{cr,y} = 10,99$   
b) Ztráta stability středového oblouku z roviny;  $\alpha_{cr,z} = 19,77$



Obr. 39 Porovnání součinitelů kritické délky z tabulky (tab. 6)

## 6. Parametrická studie

Parametrická studie si klade za cíl vytvořit rozsáhlou databázi součinitelů kritické délky pro stabilitní analýzu ocelových podpůrných oblouků v závislosti na odlišné geometrii jednotlivých sestav a použitých materiálech.

Hlavními parametry studie jsou (obr. 40):

$$L = 6 \div 20 \text{ m}$$

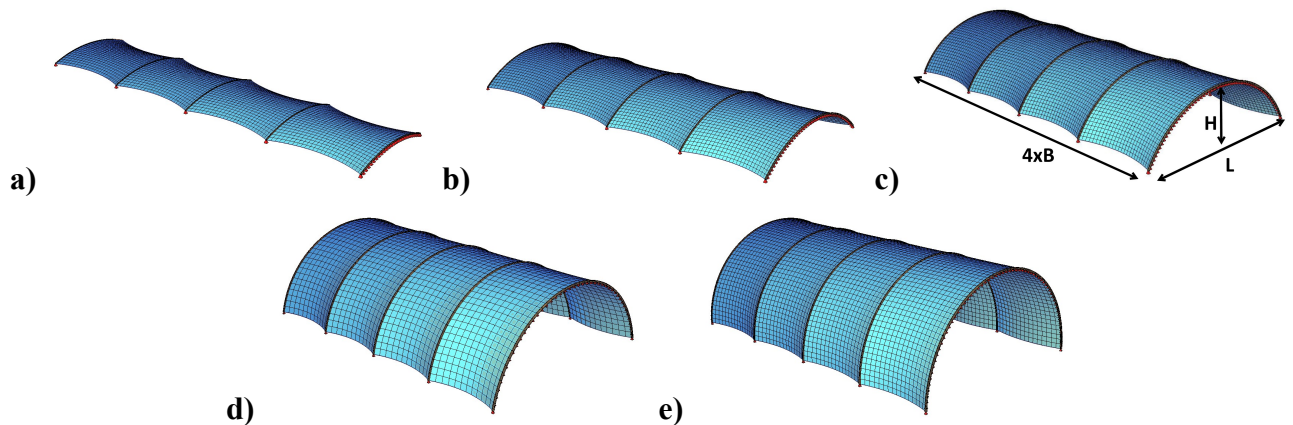
$$H = (1/10) \times L \div (1/2) \times L$$

$$B = 4 \div 10 \text{ m}$$

- teoretické rozpětí oblouku (po 2 m)

- vzepětí oblouku

- rozteč mezi oblouky (po 2 m)



Obr. 40 Rozsah geometrií použitých při parametrické studii

Vedlejšími parametry vyšetřované ve vybraných případech jsou:

$$PREX, PREY = 5 \text{ a } 10 \text{ kN/m'}$$

- rovnoměrné předpětí v membráně ve směru  $X$  a  $Y$  (referenční předpětí pro všechny varianty je 5 kN/m')

$$t_{memb} = 0,701; 1,401$$

- tloušťka membrány [mm]

Určující veličinou získanou z programu SOFiSTiK je součinitel kritického zatížení  $\alpha_{cr}$  pro zkoumaný střední oblouk, a to jak pro vybočení v rovině, tak i z roviny. V závislosti na  $\alpha_{cr}$  jsou pak v grafech porovnány součinitele kritické délky  $\beta_{cr,y}$  resp.  $\beta_{cr,z}$ .

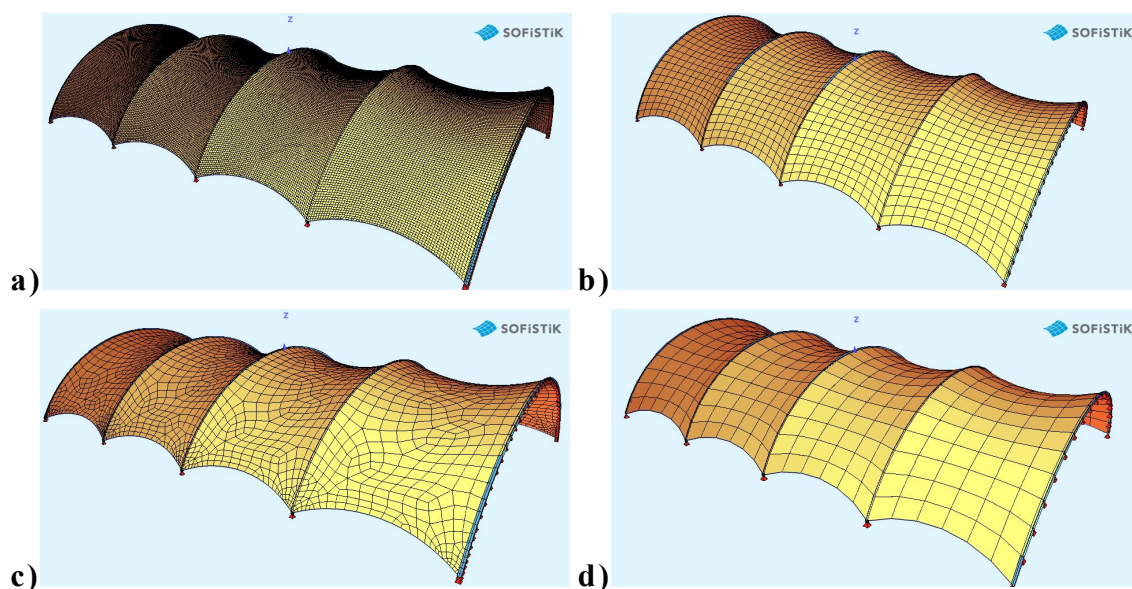
Jednotné značení výpočetních modelů a vyšetřovaných případů je následující:

## B06\_1-5\_6000\_XXX-YY

<b>B</b>	= typová skupina oblouků se stejným poměrem $H/L$
<b>06</b>	= Parametr „B“ – osová vzdálenost oblouků (06 = 6,000 m)
<b>1-5</b>	= Parametr „H/L“ – poměr vzepětí ku rozpětí (1-5 = 1/5)
<b>6000</b>	= Parametr „L“ – rozpětí oblouků
<b>_XXX-YY</b>	= Doplnkové informace o předpětí, geometrii a uložení

### 6.1 Citlivostní studie

Pro zefektivnění mnoha set výpočtů realizovaných při parametrické studii, byla na vybraném modelu konstrukce, použitém při parametrické studii, provedena citlivostní studie sítě velikosti ok v ploše membrány. Při stejných vstupních parametrech zatížení konstrukce a se stejnou metodou výpočtu byly provedeny analýzy s maximální velikostí použitých konečno-prvkových segmentů 100, 200, 500 a 1000 mm. V porovnání s teoretickým rozpětím oblouku 17 150 mm se přibližně jedná o prvky odpovídající 1/20, 1/50, 1/100 a 1/200 délky zkoumaného oblouku. Současně byly u vybrané sítě s velikostí ok 500 mm provedeny výpočty s pravidelnou a nepravidelnou sítí, s prvky čtvercovými a trojúhelníkovými a nakonec i s variantou zhuštění sítě v rohových oblastech na 100 mm, s dosahem 1,5 násobku základní velikosti (obr. 41).



Obr. 41 Různé jemnosti sítě použité v citlivostní studii: a) 100 mm; b) 500 mm; c) 500 mm + zjemnění v rozích na 100 mm; d) 1000 mm



Z výsledků citlivostní studie prezentovaných v tabulce (tab. 7) je patrné, že přílišné zjemňování sítě nepřináší zásadní odchylky ve výsledcích napjatosti ani součinitele kritického zatížení oproti sítím hrubším. Současně lze konstatovat, že doba výpočtu u sítí menších než 500 mm, tzn. přibližně 1/50 délky připojené podpurné konstrukce, je tak velká, že by neúnosně protahovala tvorbu parametrické studie s minimálním přínosem na přesnost výsledků.

**Tab. 7 Vliv jemnosti sítě na dobu výpočtu, napjatost a součinitel kritického zatížení**

		typ prvku sítě					
		čtyřúhelník					
	základní velikost prvku [mm]	100	200	500	500	1000	500
	zjemnění v rozích/ na krátkých hranách [mm]	100	200	500	500 nepravidelná	1000	100 nepravidelná
	Progression factor [-]	77	77	77	77	77	77
	počet prvků QUAD [-]	42408	10664	1632	1434	408	2636
	počet neznámých [-]	255912	64704	10056	8868	2568	16464
	doba tvorby sítě [s]	121	29	7	4	3	5
	doba výpočtu předpětí [s]	130 + 117	22 + 12	4 + 2	6 + 3	2 + 2	8 + 13
	doba nelineárního výpočtu vybraného zat. stavu LC110 [s]	844	212	37	35	12	162
	maximální dosažený "load factor" [-]	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051
	napětí v plošném prvku při "lf" = 1,051 [MPa]	12,89	12,88	12,61	12,67	12,33	12,86
	součinitele kritického zatížení pro LC110 [-]	4,90 ; 7,85	4,93 ; 7,88	4,94 ; 7,88	4,94 ; 7,87	4,92 ; 7,85	4,94 ; 7,87

Z výše uvedeného se jeví jako nejvhodnější délka hrany sítě odpovídající přibližně 1/50 připojovaného oblouku. Z tohoto důvodu byla zvolena největší možná délka 250 mm pro geometrie s rozpětím 6 ÷ 10 m a 500 mm pro varianty s rozpětím 12 ÷ 20 m (shodně pro všechna vzepětí).

U samostatně stojících oblouků bylo vzhledem k malému počtu rovnic při výpočtu zvolena jednotná délka konečného prvku 100 mm pro všechny varianty geometrií oblouků.

## **6.2 Vliv parametrů rozpětí, vzepětí a rozteče u studie s pěti oblouky se symetrickým trubkovým průřezem**

### **6.2.1 Samostatně stojící oblouky**

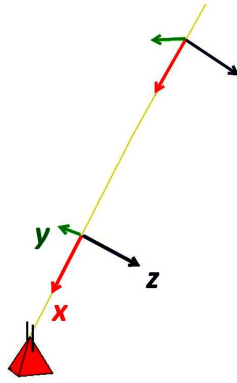
#### **6.2.1.1 Volba zatížení a výběrového kritéria**

Nejprve byly pro všechny kombinace rozpětí a vzepětí oblouků navrženy průřezy kruhových trubek tak, aby jejich využití bylo v rozmezí 80 ÷ 90 %

(tab. 8). Štíhlost zvolených oblouků byla v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí v intervalu  $210 \div 530$  pro  $\lambda_y$  a  $210 \div 360$  pro  $\lambda_z$ . Jako referenční hodnota zatížení je vzato  $6 \text{ kN/m'}$  působících ve směru lokální osy  $z$  (obr. 42), což přibližně odpovídá komplexní membránové konstrukci s roztečí oblouků  $B = 6,000 \text{ m}$ .

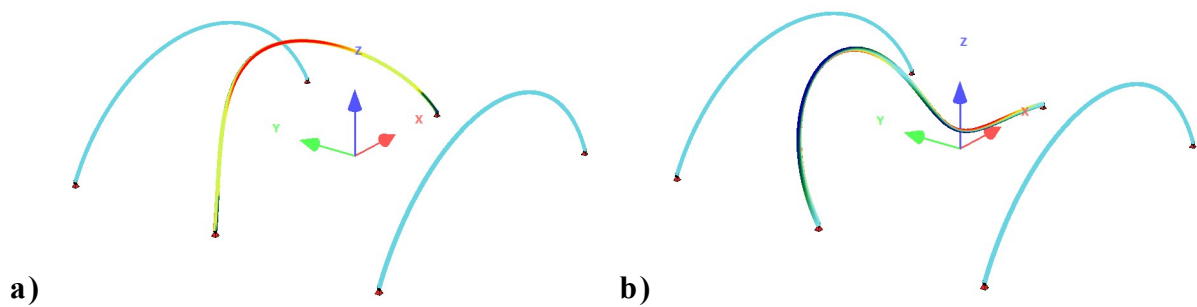
**Tab. 8** Návrh podpůrných oblouků pro jednotlivé geometrie na teoretické využití  $80 \div 90\%$ . Žluté buňky jsou doplněny z programu SOFiSTiK, zelené buňky jsou dále porovnávané hodnoty.

	TR	$I_{\text{teor}}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$	$N_{EK}/N_{b,RD,y}$	$N_{EK}/N_{b,RD,z}$
A06_1-10_06000_obl-kl	TR 82,5x6,3	6 159	47,8	5,02	1,31	2	1	1,00	0,98	535	201	58	23,8%	82,1%
A06_1-10_08000_obl-kl	TR 108x6,3	8 212	64,2	4,99	1,31	2	1	1,00	0,98	715	268	78	23,9%	82,1%
A06_1-10_10000_obl-kl	TR 133x6,3	10 265	80,7	4,90	1,28	2	1	1,00	0,98	890	331	96	24,4%	84,0%
A06_1-10_12000_obl-kl	TR 159x6,3	12 317	97,5	4,93	1,29	2	1	1,00	0,98	1073	402	117	24,2%	83,3%
A06_1-10_14000_obl-kl	TR 194x5,6	14 370	114,2	5,16	1,35	2	1	1,00	0,98	1177	484	143	23,6%	80,0%
A06_1-10_16000_obl-kl	TR 194x9	16 423	133,8	5,15	1,35	2	1	1,00	0,98	1857	592	169	22,6%	79,1%
A06_1-10_18000_obl-kl	TR 219x9	18 476	151,9	5,24	1,37	2	1	1,00	0,98	2108	682	195	22,3%	78,0%
A06_1-10_20000_obl-kl	TR 245x8	20 529	168,8	4,88	1,28	2	1	1,00	0,98	2115	703	202	24,0%	83,6%
B06_1-5_06000_obl-kl	TR 76x4,5	6 621	26,5	4,58	1,36	2	1	1,01	0,92	359	105	34	25,2%	78,6%
B06_1-5_08000_obl-kl	TR 89x6,3	8 828	35,7	4,16	1,24	2	1	1,00	0,92	581	132	42	27,0%	85,4%
B06_1-5_10000_obl-kl	TR 108x7	11 035	45,0	4,28	1,27	2	1	1,00	0,92	788	172	54	26,2%	83,3%
B06_1-5_12000_obl-kl	TR 127x7	13 242	54,4	4,13	1,23	2	1	1,00	0,92	937	201	63	27,1%	85,9%
B06_1-5_14000_obl-kl	TR 152x6,3	15 449	63,7	4,17	1,24	2	1	1,00	0,92	1024	236	75	27,0%	85,4%
B06_1-5_16000_obl-kl	TR 168x7	17 655	73,4	4,15	1,23	2	1	1,00	0,92	1257	272	85	27,0%	85,9%
B06_1-5_18000_obl-kl	TR 194x6,3	19 862	82,9	4,14	1,23	2	1	1,00	0,92	1319	305	96	27,2%	86,1%
B06_1-5_20000_obl-kl	TR 219x6,3	22 069	92,7	4,37	1,30	2	1	1,00	0,92	1494	359	114	25,8%	81,6%
C06_3-10_06000_obl-kl	TR 70x4,5	7 350	20,8	3,57	1,27	2	1	1,02	0,85	329	67	25	31,2%	83,5%
C06_3-10_08000_obl-kl	TR 82,5x7	9 800	28,0	3,57	1,27	2	1	1,02	0,85	589	91	34	30,6%	82,8%
C06_3-10_10000_obl-kl	TR 108x5,6	12 250	35,1	3,61	1,29	2	1	1,02	0,85	640	115	43	30,6%	81,9%
C06_3-10_12000_obl-kl	TR 133x5	14 699	42,3	3,63	1,29	2	1	1,02	0,85	714	138	52	30,6%	82,1%
C06_3-10_14000_obl-kl	TR 133x8	17 149	50,2	3,37	1,20	2	1	1,01	0,85	1115	156	57	32,3%	87,4%
C06_3-10_16000_obl-kl	TR 152x8	19 599	57,9	3,42	1,22	2	1	1,01	0,85	1285	182	67	31,8%	86,0%
C06_3-10_18000_obl-kl	TR 168x9	22 049	66,0	3,60	1,28	2	1	1,01	0,85	1596	219	81	30,2%	81,9%
C06_3-10_20000_obl-kl	TR 194x7	24 499	72,9	3,33	1,19	2	1	1,01	0,85	1460	222	82	32,8%	88,4%
D06_3-10_06000_obl-kl	TR 70x4,5	8 299	18,8	2,91	1,25	2	1	1,05	0,80	329	50	22	37,6%	84,6%
D06_3-10_08000_obl-kl	TR 82,5x7	11 066	25,4	2,90	1,25	2	1	1,05	0,80	589	68	30	37,2%	83,9%
D06_3-10_10000_obl-kl	TR 114x4,5	13 832	31,7	2,90	1,25	2	1	1,05	0,80	550	84	37	37,7%	84,6%
D06_3-10_12000_obl-kl	TR 133x5	16 599	38,4	2,95	1,28	2	1	1,05	0,79	714	104	47	37,0%	82,5%
D06_3-10_14000_obl-kl	TR 152x5	19 365	45,0	2,80	1,21	2	1	1,05	0,80	820	116	52	38,9%	87,2%
D06_3-10_16000_obl-kl	TR 159x7	22 132	52,4	2,87	1,24	2	1	1,04	0,79	1187	139	62	37,6%	84,6%
D06_3-10_18000_obl-kl	TR 178x7	24 898	59,4	2,85	1,24	2	1	1,04	0,79	1335	157	70	37,8%	84,6%
D06_3-10_20000_obl-kl	TR 194x7	27 664	66,4	2,70	1,17	2	1	1,04	0,79	1460	166	74	39,9%	89,6%
E06_1-2_06000_obl-kl	TR 70x5,6	9 425	18,4	2,46	1,28	2	1	1,10	0,77	402	42	22	43,6%	82,1%
E06_1-2_08000_obl-kl	TR 89x6,3	12 566	24,8	2,45	1,28	2	1	1,10	0,76	581	57	30	43,7%	82,0%
E06_1-2_10000_obl-kl	TR 108x7	15 708	31,4	2,51	1,32	2	1	1,10	0,76	788	74	40	42,6%	79,4%
E06_1-2_12000_obl-kl	TR 127x7	18 850	38,0	2,42	1,27	2	1	1,10	0,76	937	86	46	44,1%	82,5%
E06_1-2_14000_obl-kl	TR 152x6,3	21 991	44,5	2,44	1,28	2	1	1,10	0,76	1024	101	54	43,9%	82,0%
E06_1-2_16000_obl-kl	TR 168x7	25 133	51,6	2,42	1,28	2	1	1,10	0,76	1257	117	63	44,1%	81,9%
E06_1-2_18000_obl-kl	TR 194x6,3	28 174	58,2	2,42	1,28	2	1	1,10	0,76	1319	131	71	44,3%	82,1%
E06_1-2_20000_obl-kl	TR 194x9	31 416	66,5	2,36	1,25	2	1	1,10	0,75	1857	148	80	45,0%	83,6%



Obr. 42 Lokální souřadný systém oblouku

Pro dané zatížení byly na základě grafické interpretace výsledků (obr. 43) stanoveny součinitele  $\alpha_{cr}$ , kritické síly  $N_{cr,y/z}$ , a návrhové síly  $N_{b,Rd}$  podle vztahů EN 1993-1-1, které se porovnály s vnitřní silou  $N_{Ek}$ .



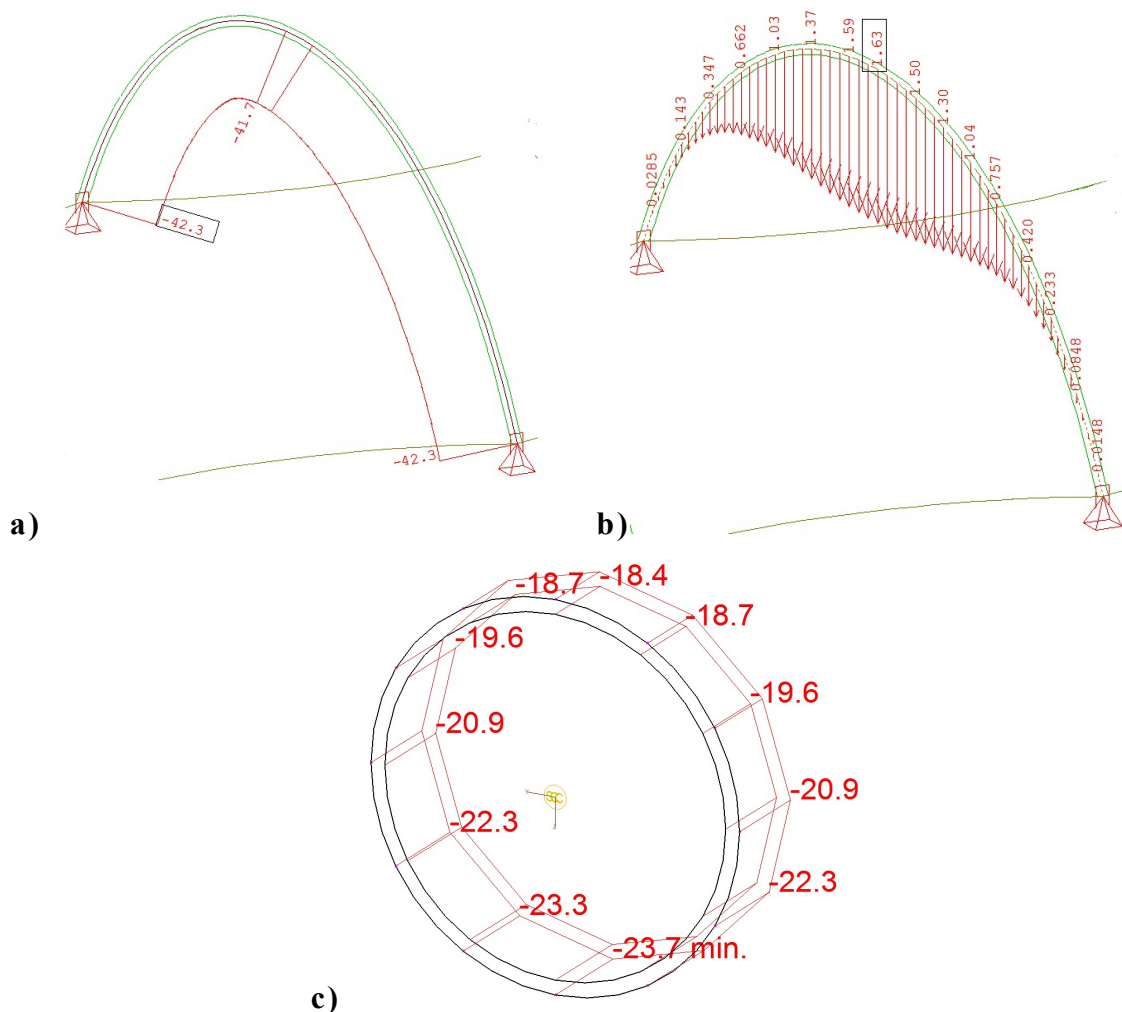
Obr. 43 První dva vlastní tvary vybočení pro samostatně stojící oblouk: C06\_3-10\_12000  
 a) Ztráta stability středového oblouku z roviny  $\alpha_{cr,z} = 1,29$   
 b) Jednostranné prolomení oblouku v rovině se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,y} = 3,63$

### 6.2.1.2 Postup výpočtu

Oblouk bez počáteční imperfekce byl vyšetřen GNIA, přičemž celkové zatížení bylo rozděleno na 10 dílčích přírůstků. Po každém přírůstku byla aktualizována geometrie oblouku a tento stav byl vzat jako počáteční pro další zatěžovací krok. Průběh normálové síly, napětí a deformace pro vybraný případ C06\_3-10\_12000 je patrný z obrázku (obr. 44)

Na vybraném případě je zřejmé, že při působení plného zatížení je zvolený průřez využit pouze na 6 % své prosté únosnosti a celková deformace oblouku je  $u_z/L = 0,11 \text{ ‰}$  délky oblouku.

Lineárně stabilitní analýza (LBA) samostatně stojících oblouků byla provedena na všech typech oblouků zvolených pro studii, přičemž jako základní tvar byla použita deformovaná konstrukce ze zatěžovacího kroku se 100% zatížením. Z této lineární analýzy byly získány první vlastní tvary vybočení v rovině i z roviny. Z dřívějších poznatků (viz kapitola 2.5.2.1 „Stabilitní posouzení plochých oblouků“) by se dalo usuzovat, že má význam se zabývat i symetrickou ztrátou stability v rovině, ale u zvolených průřezů toto při analýze samostatně stojícího oblouku nenastalo.



Obr. 44 Grafické výstupy od zatížení  $6\text{ kN/m}^2$  na typu konstrukce C06\_3-10\_12000

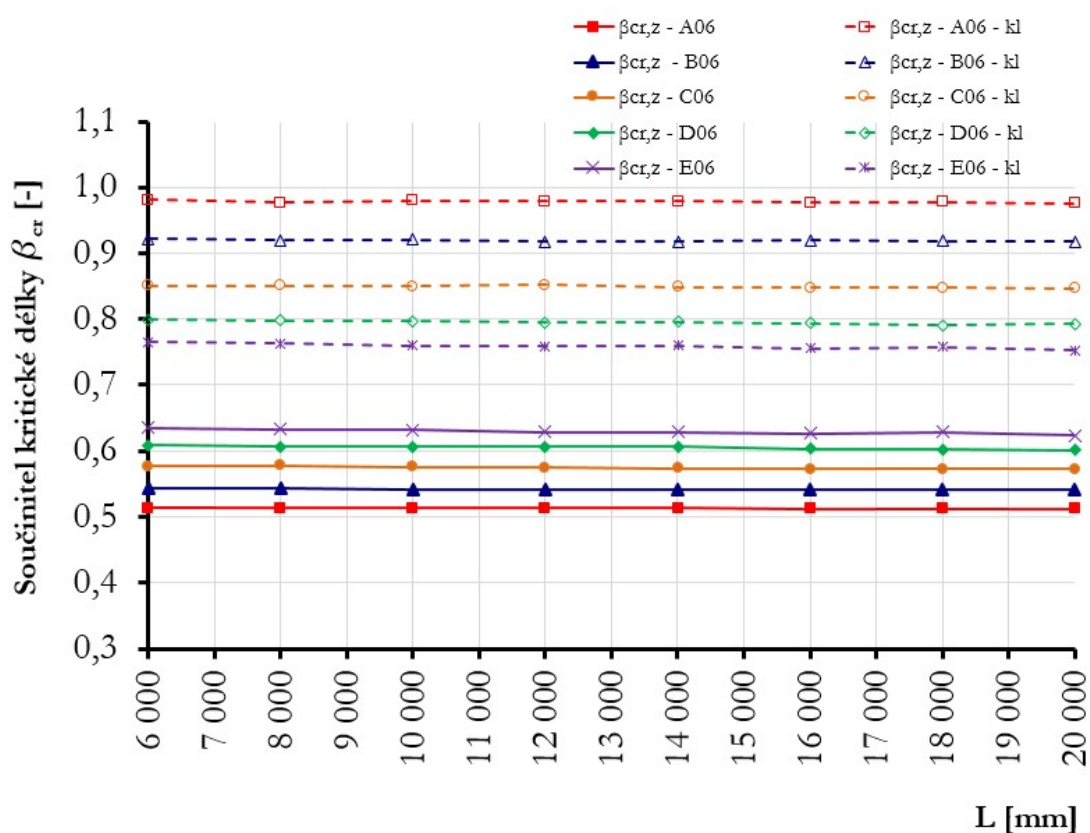
a) Návrhová normálová síla  $N_{Ed}$  pro výpočet  $N_{cr,y/z}$

b) Svislá deformace  $u_z$  [mm]

c) Napětí po průřezu v nejvíce namáhaném místě [MPa]

S ohledem na uložení oblouků v parametrické studii s membránou kloubově pouze ve své rovině byly provedeny srovnávací výpočty pro součinitel  $\beta_{cr,z}$  i na

samostatně stojících obloucích (obr. 45). Jako referenční geometrie byla vzata pro všechny typy vzepětí rozteč mezi oblouky  $B = 6,000$  m.



Obr. 45  $\beta_{cr,z}$  samostatně stojících oblouků v závislosti na uložení (XXX – kl = kloubové uložení v rovině i z roviny oblouku), vzepětí „ $H$ “ a rozpětí „ $L$ “

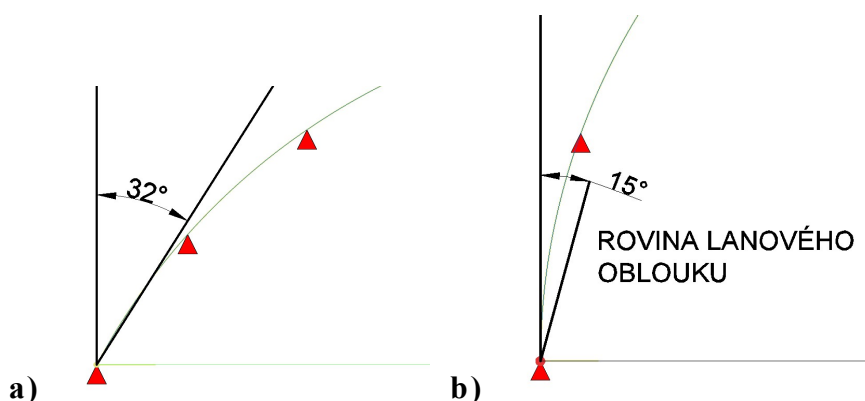
Plochý oblouk s poměrem  $H/L = 1/10$  se v tomto případě choval téměř jako ideální sloup s příslušným kloubovým, resp. vetknutým uložením. S narůstajícím poměrem  $H/L$  se vliv uložení oblouku postupně vytrácel. U komplexní konstrukce s membránou již vliv uložení neměl žádný vliv (viz. kapitola 6.2.2.5, obr. 54)

## 6.2.2 Komplexní typy konstrukcí s membránou s pevným okrajovým uložením

### 6.2.2.1 Tvorba modelu s membránou

Pro každý typ konstrukce byl v programu SOFiCAD vytvořen samostatný 3D model. Oblouky byly modelovány s odpovídajícími parametry pro každý typ (tj. s průřezy získanými v 6.2.1.1) a byly modelovány jako ideálně svislé, bez počáteční imperfekce.

Obvodová kotevní lana byla již ve tvaru přibližně odpovídajícímu předpokládanému zakřivení po vnesení předpětí, což je výhodné pro lepší a rychlejší konvergenci modelu ve fázi hledání předepnutého tvaru (FORM-FINDING). Rovina okrajových lanových oblouků byla přibližně rovna tečné rovině nosných oblouků v místě kotvení a poloměr zakřivení lan  $R_L$  byl odhadnut jako rozteč mezi oblouky  $B/10$ . Pouze u skupiny E s poměrem vzepětí ku rozpětí  $\frac{1}{2}$  byla rovina okrajových lan odkloněna od svislice o  $15^\circ$  (obr. 46).

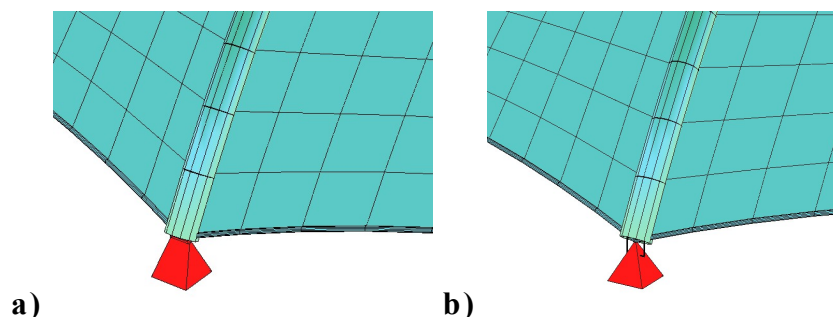


Obr. 46 Uklonění počáteční roviny lanových prvků vůči hlavním obloukům  
a) Tečná rovina pro případy A – D (pro případ „C“ konkrétně  $32^\circ$ )  
b) Úklon od svislé tečné roviny u případě E

Vlastní membránová plocha byla v programu generována automaticky mezi stanovenými obvodovými liniemi (vždy protilehlá dvojice oblouků a lan) jako plocha s nejmenším povrchem bez započítání předpětí a materiálových charakteristik (obr. 48a).

Oblouky u konstrukce s membránou jsou kotveny kloubově ve své rovině a vetknutě z roviny (obr. 47a). Ve vybraných případech byly počítány i modely s kloubovým uložením (obr. 47b) tak, aby bylo možné věrohodně porovnat případy

se samostatně stojícími oblouky. Prostorová stabilita je zajištěna zabráněním rotace kolem lokální osy  $x$ .



**Obr. 47** Varianty uložení nosných oblouků  
a) Rovinný kloub  
b) Dvousměrný kloub

Na základě dalších poznatků je možné oblouky kotvit všesměrným kloubem, přičemž na výslednou stabilitní únosnost to nemá zásadní vliv. Obvodové lanové prvky jsou kotveny kloubově a membrána je k ostatním prvkům kotvena vetknutě, přičemž tento přípoj není rozhodující vzhledem k membránovému působení.

Pro potřeby parametrické studie byly krajní nosné oblouky kolmo na rovinu oblouků souvisle podepřeny liniovou podporou, takže bylo zabráněno jejich jakékoliv deformaci. V nadstavbě parametrické studie bylo přidáno 15 případů, kde byly krajní oblouky tvořeny příhradovou konstrukcí s různou tuhostí, viz kapitola 6.2.3.

#### 6.2.2.2 Hledání počátečního tvaru = „FORM-FINDING“

Rozhodujícím parametrem při hledání výsledného předepnutého tvaru membránové konstrukce před působením vnějšího zatížení je vlastní předpětí v membránové ploše a síla v případných poddajných obvodových prvcích – lanech.

Jako referenční hodnota pro všechny typy konstrukcí bylo vzato rovnoměrné předpětí jak ve směru lokální osy  $x$  tak  $y$ ,  $PREX = PREY = 5 \text{ kN/m}'$ . U vybraných typů konstrukce byly taktéž zkoumány různé velikosti předpětí v rozsahu  $PREX = PREY = 5$  a  $10 \text{ kN/m}'$ . Rozdílné hodnoty ve směrech lokálních souřadných os nebyly zkoumány a mohou být předmětem dalšího výzkumu.

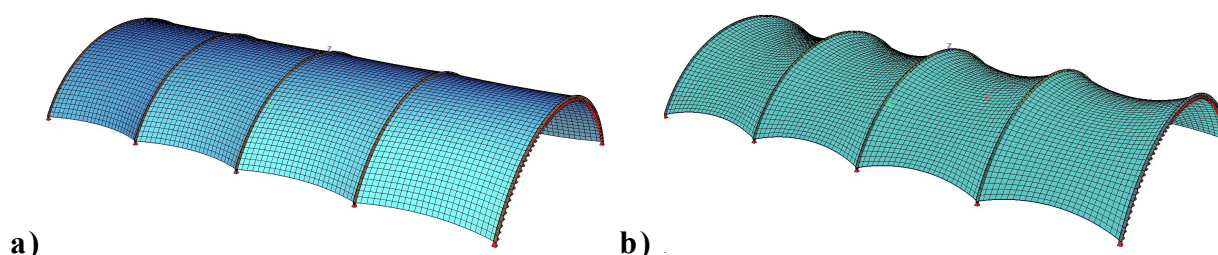
Příslušná síla v obvodových lanech byla vzata pro každý případ individuálně z rovnice (16).

Při výpočtu počátečního tvaru po předpětí bylo postupováno podle „teorie III. řádu“, zahrnující vliv velkých deformací membránových a lanových prvků.

Počáteční průvės lan byl ve výpočtu zanedbán (v programování zavedeno proměnnou „CABLE0“), což je z hlediska velikostí následných deformací při předpínání zcela legitimní. Přírůstek předpětí byl rozdělen do 10 nebo 20 zatěžovacích kroků podle typu konstrukce a její schopnosti konvergovat ke stabilnímu řešení a po každém přírůstku byla aktualizována geometrie modelu a směr lokálního předpínání.

Výsledný tvar poté sloužil jako výchozí pro všechny další výpočty. Tedy jak pro pevnostní, tak pro stabilitní analýzu, přičemž deformací konstrukce se „vykrytalizoval“ počáteční tvar pro výpočet stability.

Na obrázcích je patrná změna geometrie z plochy s minimálním povrchem na plochu předepnutou (obr. 48b).



Obr. 48 Tvorba výpočetního modelu

- a) Plocha s minimálním povrchem mezi oblouky a obvodovými lany generovaná programem SOFiCAD
- b) Plocha po předepnutí jak membrány tak obvodových lan

### 6.2.2.3 Způsoby zatížení

Hlavním zatěžovacím stavem pro celou studii bylo zatížení představující zatížení sněhem, tedy působící svisle v globálním souřadném systému. Ve vybraných případech byl analyzován druhý zatěžovací stav, který počítal s lokálním souřadným systémem, přičemž je jasné, že toto zatížení nemůže v reálné konstrukci nastat (maximálně v omezené míře při zatížení větrem a to pouze u otevřených přístřešků, kde se můžeme setkat i s „podfouknutím“ membránové konstrukce). Oba tyto zatěžovací stavy byly zavedeny v zadávací fázi tvorby modelu v nadstavbovém programu pro AutoCAD – SOFiCAD a následně bylo zatížení již v programu SOFiSTiK aktualizováno k příslušné výpočetní ploše jednak po prvotní fázi FORM-FINDING, tak poté i před každým zatěžovacím krokem na aktuální deformované konstrukci.

Pro přímé porovnání efektu membránového působení bylo, opět ve vybraných případech, zavedeno i liniové zatížení pouze na oblouky (v reálné konstrukci představující například ostatní stálé zatížení od vzduchotechniky či



zvukových systémů), které odpovídalo zatížení použitým při návrhu samostatně stojících oblouků. Tedy pro všechny případy hodnota  $6 \text{ kN/m'}$  ve směru lokální osy  $z$ . Porovnání těchto zatěžovacích stavů má nejprůkazněji vyjádřit vliv stabilizačního efektu membrány na podpůrné ocelové oblouky.

#### **6.2.2.4 Zatěžování konstrukce s membránou – postup výpočtu**

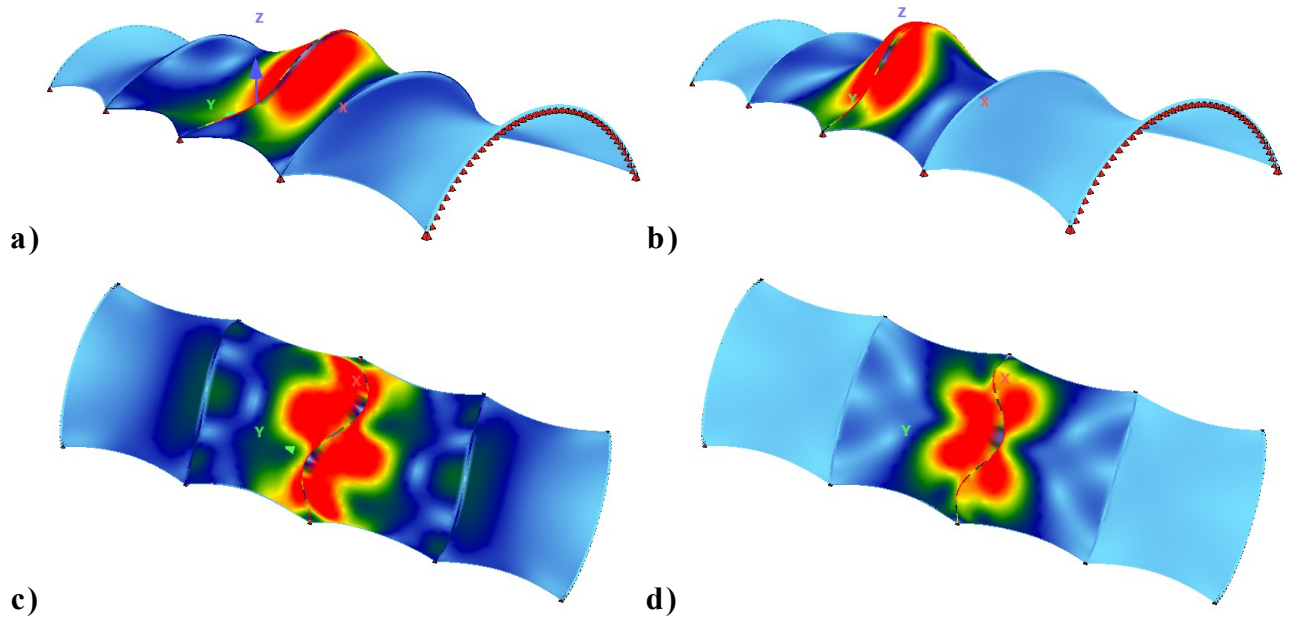
Pro všechny typy konstrukcí platí, že jako výchozí zatěžovací stav je vzata konstrukce po předepnutí včetně vzniklých deformací a napětí. Tyto počáteční imperfekce jsou výchozími hodnotami k výpočtu podle teorie II. řádu pro pevnostní posouzení. Pro stabilitní posouzení je rozhodující stav konstrukce, kdy je dosaženo plného (nebo maximálního možného) zatížení na membránové ploše

Je zatěžováno ve 20 krocích pro každý zatěžovací stav a po každém dílčím přírůstku je aktualizována geometrie. Detailní popis naprogramování jednoho zatěžovacího kroku je popsán v příloze (11.3.5), včetně popisů jednotlivých symbolů a programovaných zkratk.

#### **6.2.2.5 Výsledky parametrické studie u typů konstrukcí s pěti paralelními oblouky a kloubovým uložením oblouků pouze ve své rovině**

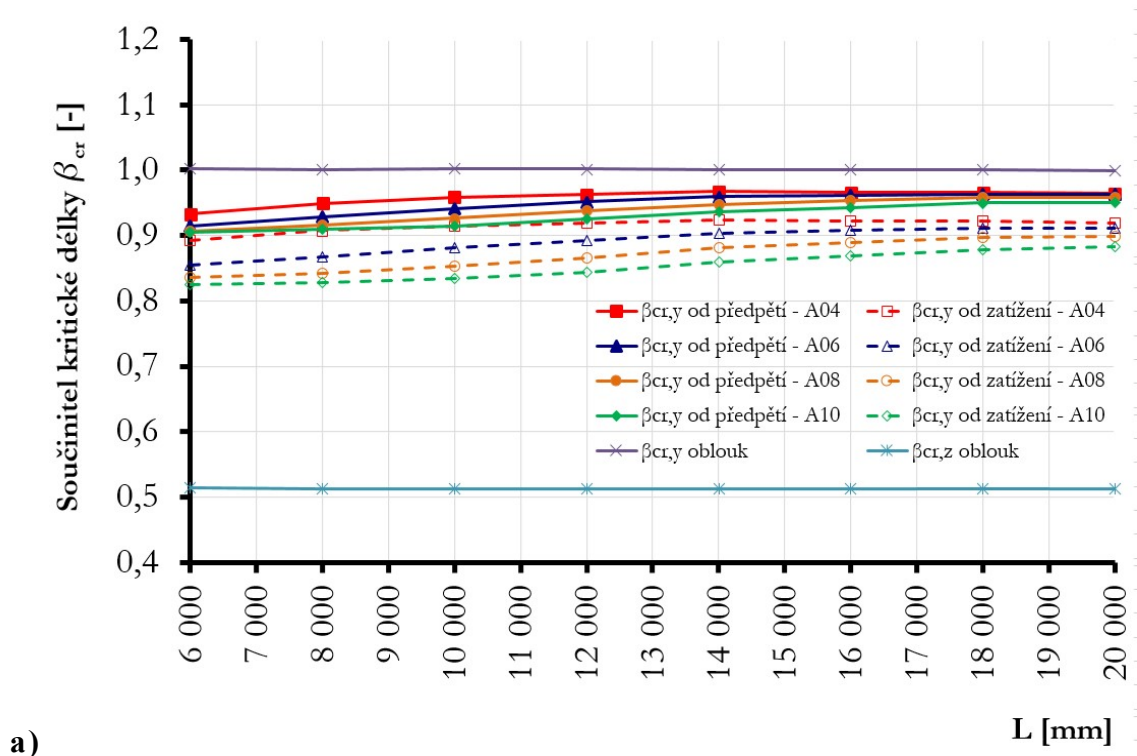
Hlavní veličiny pro parametrickou studii odečtené z programu SOFiSTiK byly normálová síla ve vyšetřovaném oblouku  $N_{Ek}$ , součinitele kritického zatížení pro vybočení v rovině  $\alpha_{cr,y}$  a z roviny  $\alpha_{cr,z}$  a počet sinusových půlvln pro dané vybočení určený graficky z příslušných tvarů (obr. 49). Vždy byly pro výpočet použity součinitele pro první vlastní tvar ztráty stability jak v rovině, tak z roviny a tomu odpovídající počet sinusových půlvln. Na základě těchto hodnot byly pro všechny typy geometrií vypočítány součinitele kritické délky  $\beta_{cr,y}$  resp.  $\beta_{cr,z}$ . Ty byly porovnány v grafech jako hlavní výstupy z parametrické studie a lze je použít při předběžném oddělném návrhu konstrukcí s podobnou topologií.

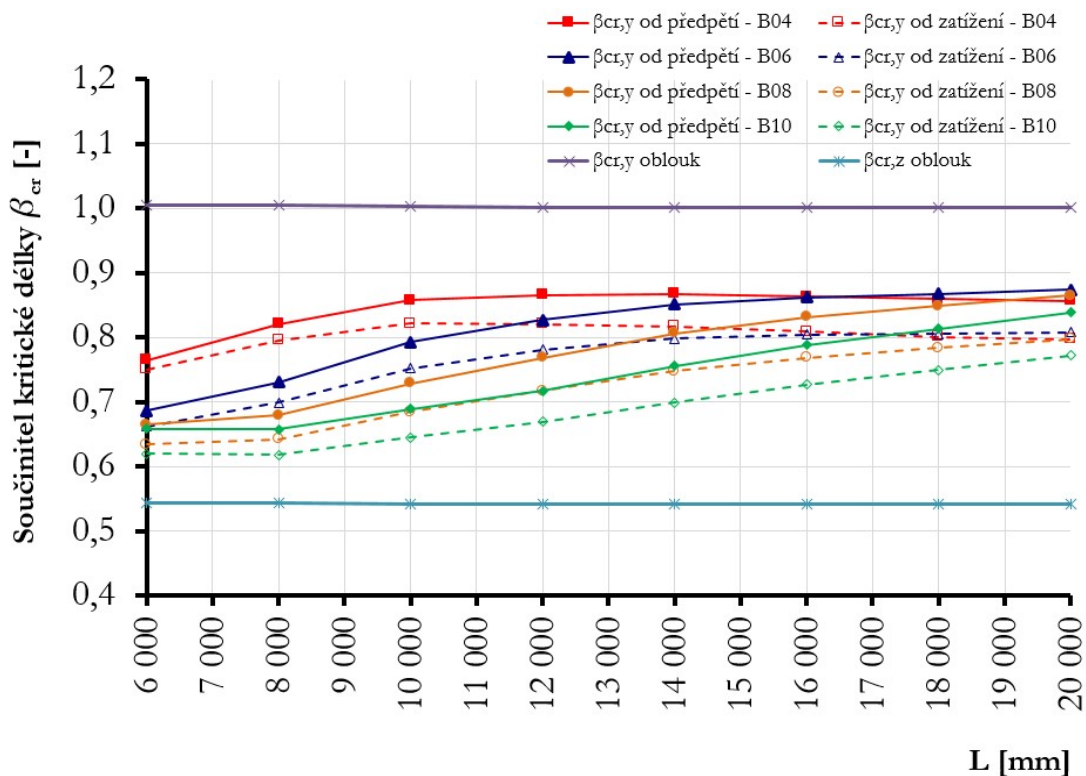
Všechny výpočtové hodnoty a zdrojová data prezentovaných grafů jsou uvedeny v tabulkách v části přílohy 11.2.



**Obr. 49 4 základní tvary vybočení komplexní membránové konstrukce**  
 a) Jednostranné prolomení oblouku v rovině –  $n_y = 2$   
 b) Symetrické vybočení v rovině ve 3 půlvlnách –  $n_y = 3$   
 c) Asymetrické vybočení z roviny ve dvou sinusových půlvlnách –  $n_z = 2$   
 d) Vybočení z roviny v jedné půlvlně –  $n_z = 1$

Převládajícími tvary vybočení byly jednostranné prolomení oblouku v rovině (obr. 49a) a asymetrické vybočení oblouku z roviny (obr. 49c).





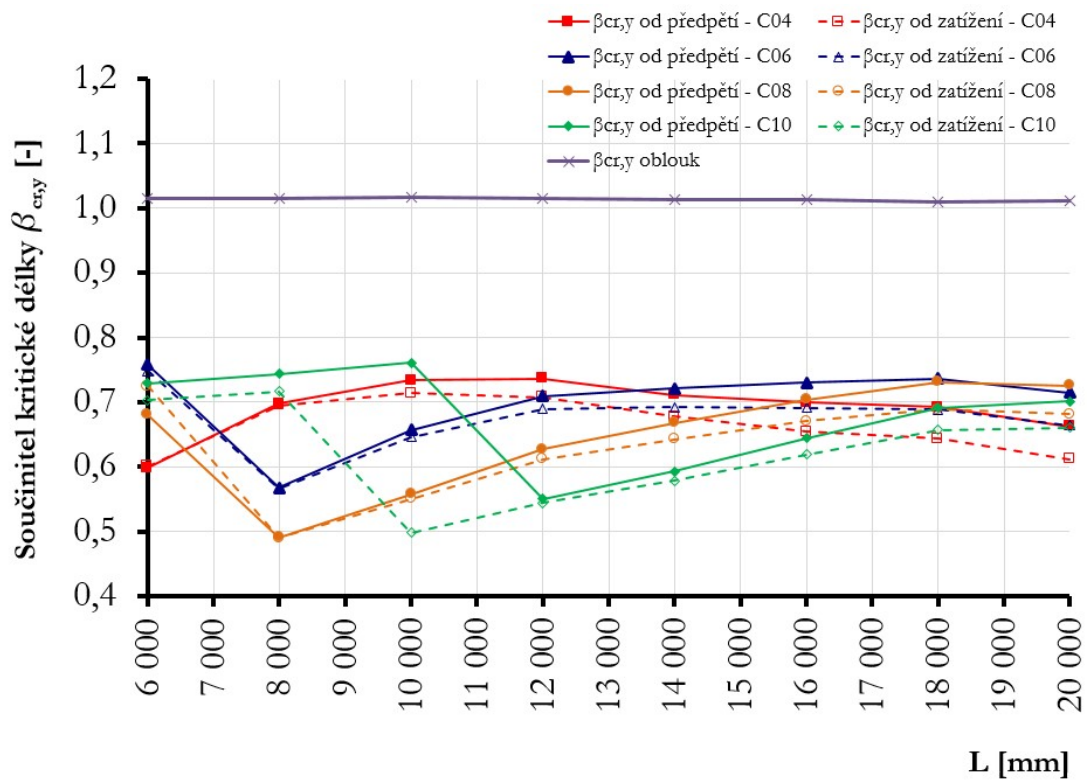
b)

**Obr. 50** Součinitele kritické délky  $\beta_{cr}$  na samostatně stojícím zatíženém oblouku ( $\beta_{cr,y/z}$  oblouk), na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků  $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.

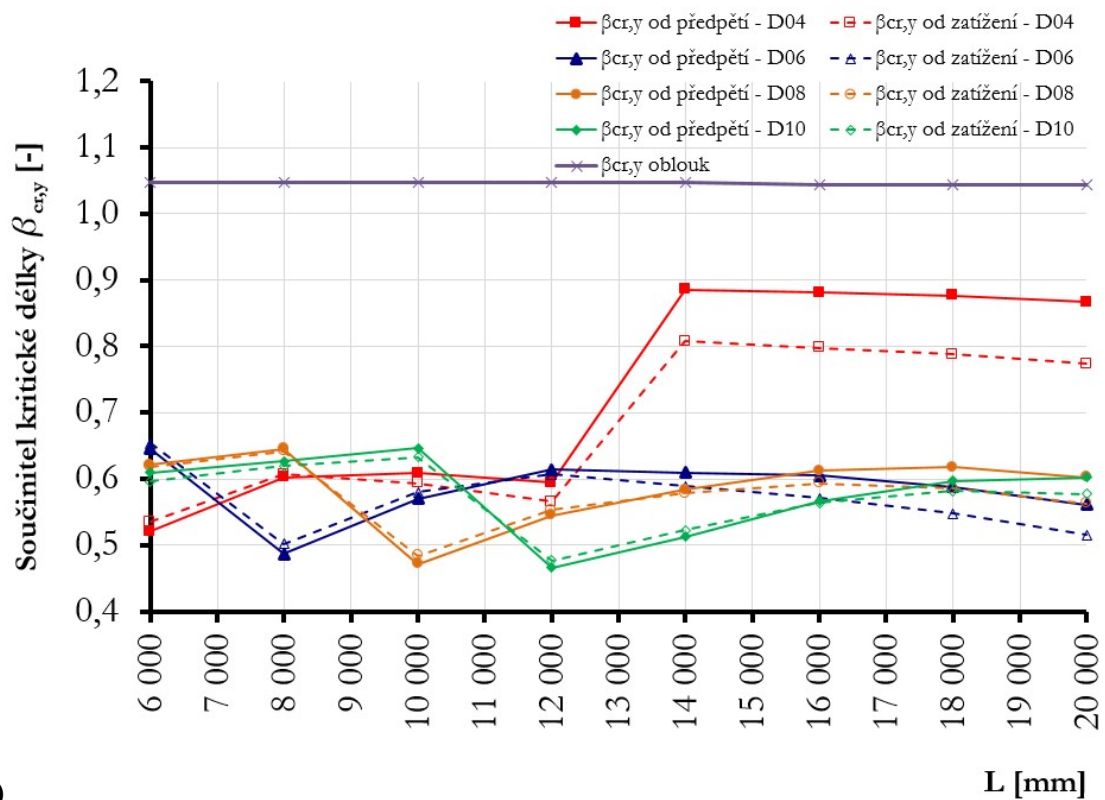
a) Geometrie typu „A“ =>  $H/L = 1/10$

b) Geometrie typu „B“ =>  $H/L = 1/5$

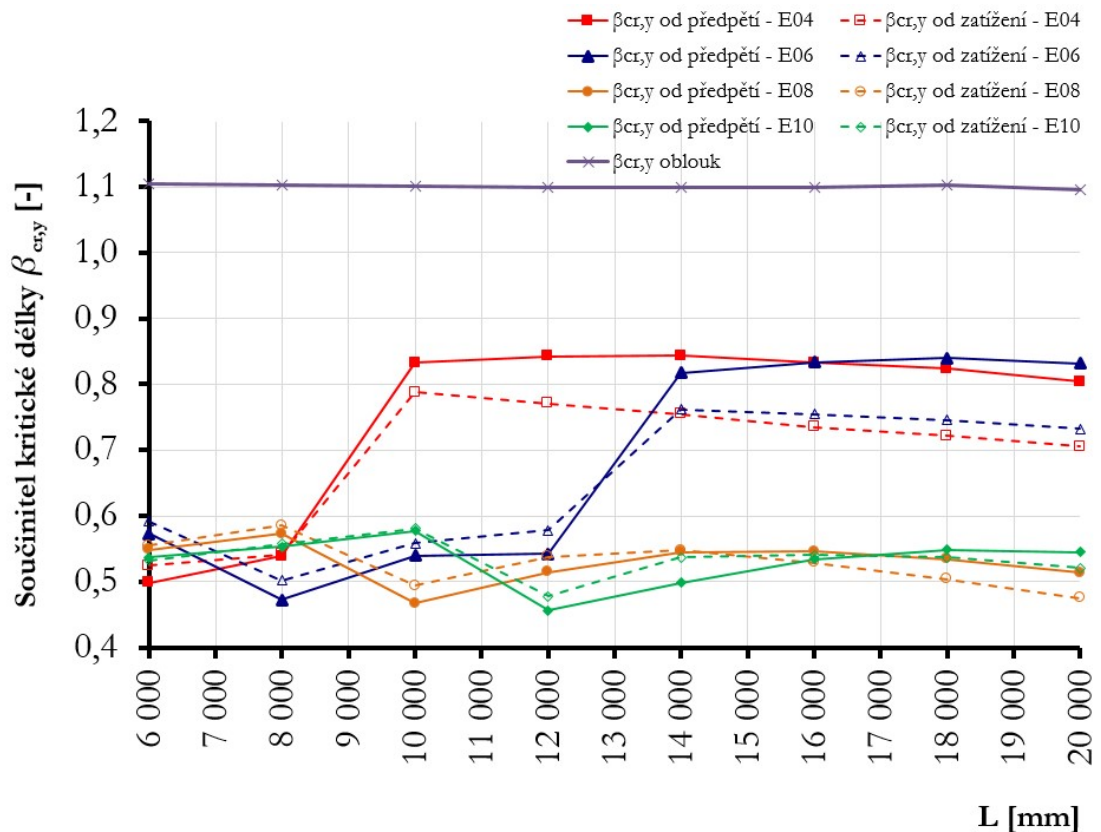
U prvních dvou typů geometrií, tedy s poměrem  $H/L = 1/10$  resp.  $1/5$ , nedošlo minimálně u prvních pěti vlastních tvarů k vybočení komplexní konstrukce z roviny. Proto nejsou pro tyto dva typy uvedeny součinitele  $\beta_{cr,z}$ . Hodnoty  $\beta_{cr,y}$  (obr. 50) byly shodně pro všechny tyto případy vypočítány z jednostranného prolomení oblouku. Porovnáním hodnot  $\beta_{cr,y}$  od předpětí a od plně zatížené konstrukce je zřejmé, že u konstrukcí s malým vzepětím má dotvarování membrány pod zatížením vliv na součinitel kritické délky. Po zatížení a dotvarování membrány byly součinitele kritické délky přibližně o 10% menší v porovnání s hodnotami pouze od předpětí.



a)



b)



c)

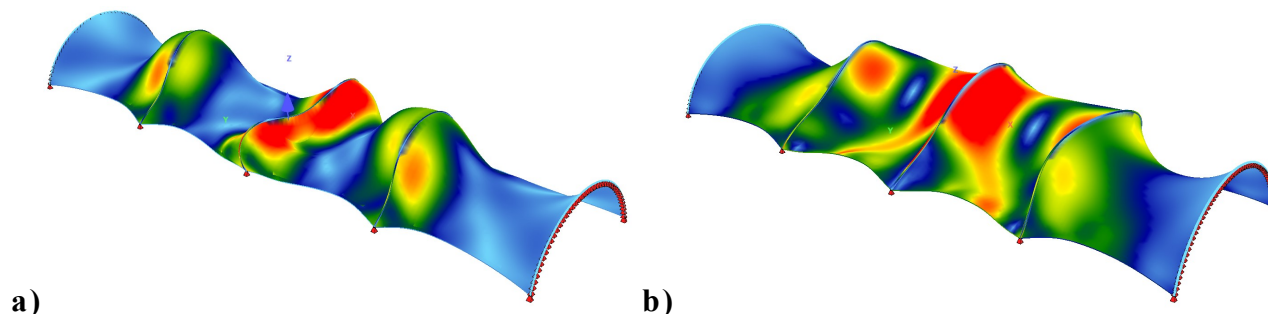
**Obr. 51** Součinitele kritické délky  $\beta_{cr,y}$  na samostatně stojícím zatíženém oblouku, na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků  $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.

- $\beta_{cr,y}$  geometrie typu „C“ =>  $H/L = 3/10$
- $\beta_{cr,y}$  geometrie typu „D“ =>  $H/L = 2/5$
- $\beta_{cr,y}$  geometrie typu „E“ =>  $H/L = 1/2$

Průběh součinitele kritické délky v rovině  $\beta_{cr,y}$  (obr. 51) byl výrazně ovlivněn počtem sinusových půlvln při prvním tvaru vybočení. Výrazné skoky v průběhu  $\beta_{cr,y}$  indikují u dané geometrie změnu prvního tvaru vybočení z jednostranného prolomení se dvěma sinusovými půlvlnami na symetrické prolomení se třemi půlvlnami.

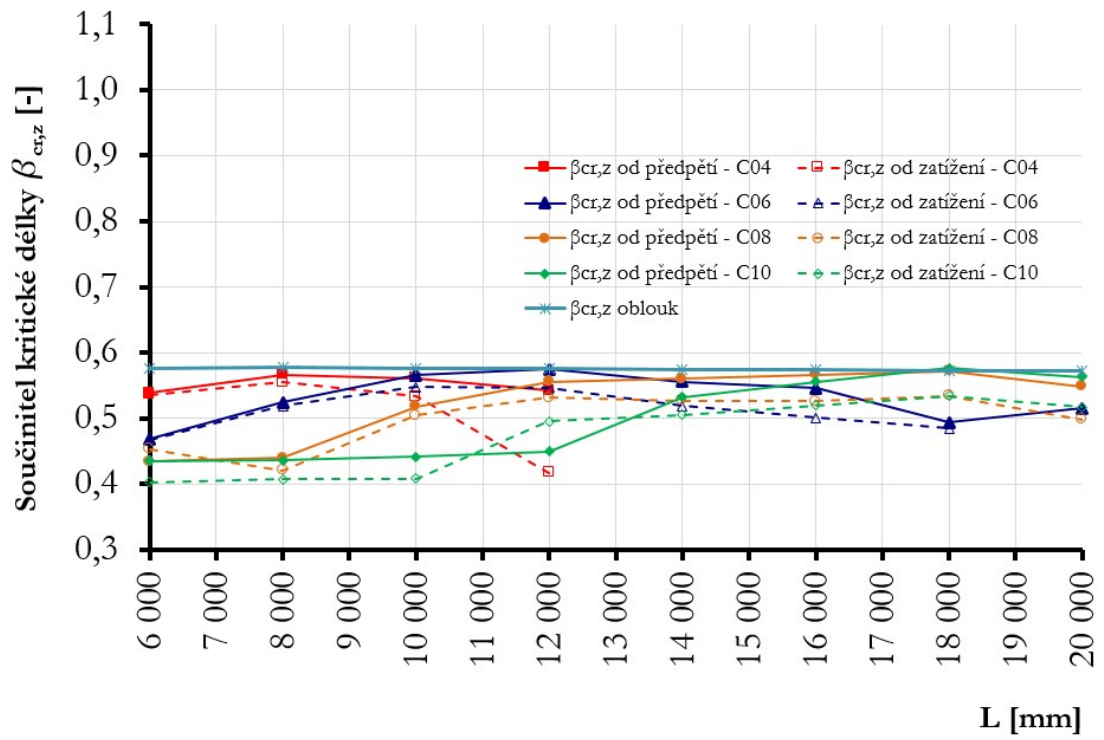
U konstrukcí typu „C“ ÷ „E“, byla vysledována závislost mezi poměrem rozpětí ku rozteči  $L/B$  a počtem sinusových půlvln při prvním tvaru vybočení oblouku v rovině. Vždy platí, že pokud je  $L/B < 1$ , konstrukce ztrácí stabilitu v rovině symetrickým prolomením ve třech půlvlnách. Pokud je navržená geometrie v intervalu  $1 < L/B < (2 \div 5)$  dochází ke ztrátě stability v rovině jednostranným prolomením oblouku. Horní hranice intervalu  $L/B$  je nepřímo

úměrná poměru  $H/L$ . Pro geometrii „D“, tedy  $H/L = 2/5$ , je horní hranice intervalu  $L/B \approx 3,5$ , pro  $H/L = 1/2$  je pak horní hranice  $L/B \approx 2$ . Nad hranicí tohoto intervalu dochází opět k symetrickému prolomení ve třech půlvlnách.

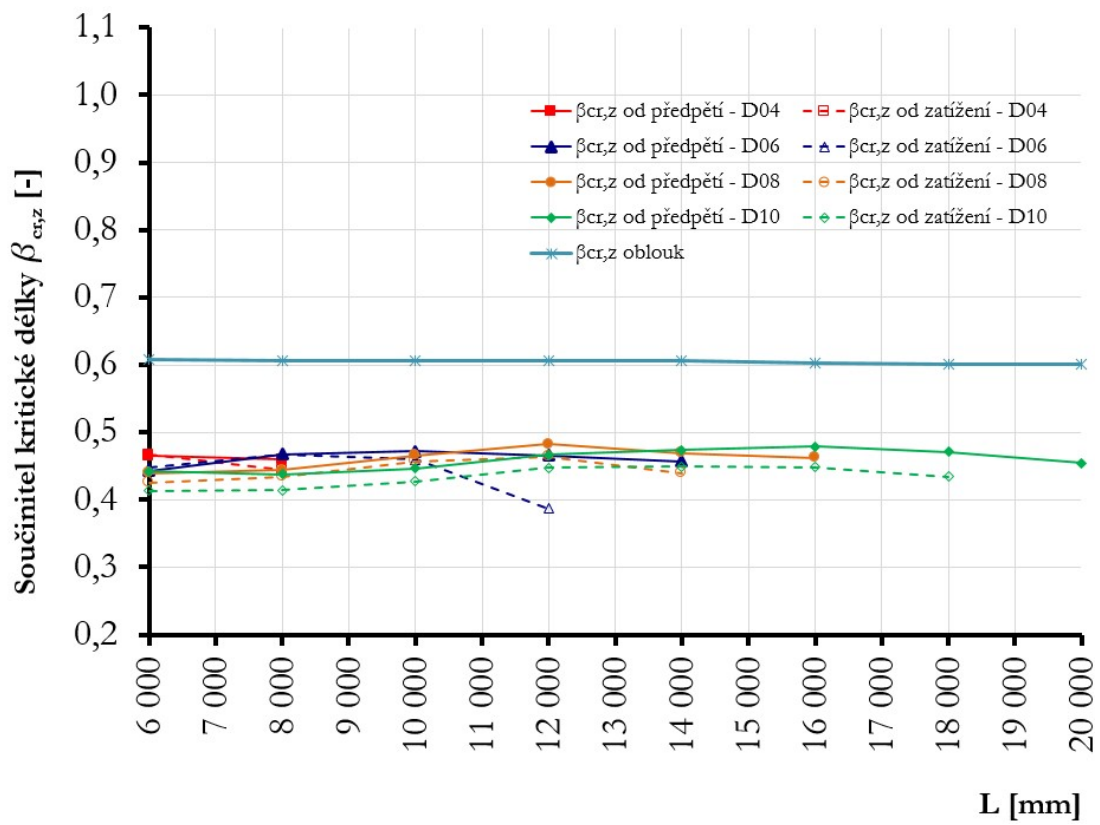


**Obr. 52 První vlastní tvary vybočení v rovině**  
**a) D08\_12-5\_08000 -  $\alpha_{cr,y} = 8,03$ ;  $n_y = 3$**   
**b) D08\_12-5\_10000 -  $\alpha_{cr,y} = 6,52$ ;  $n_y = 2$**

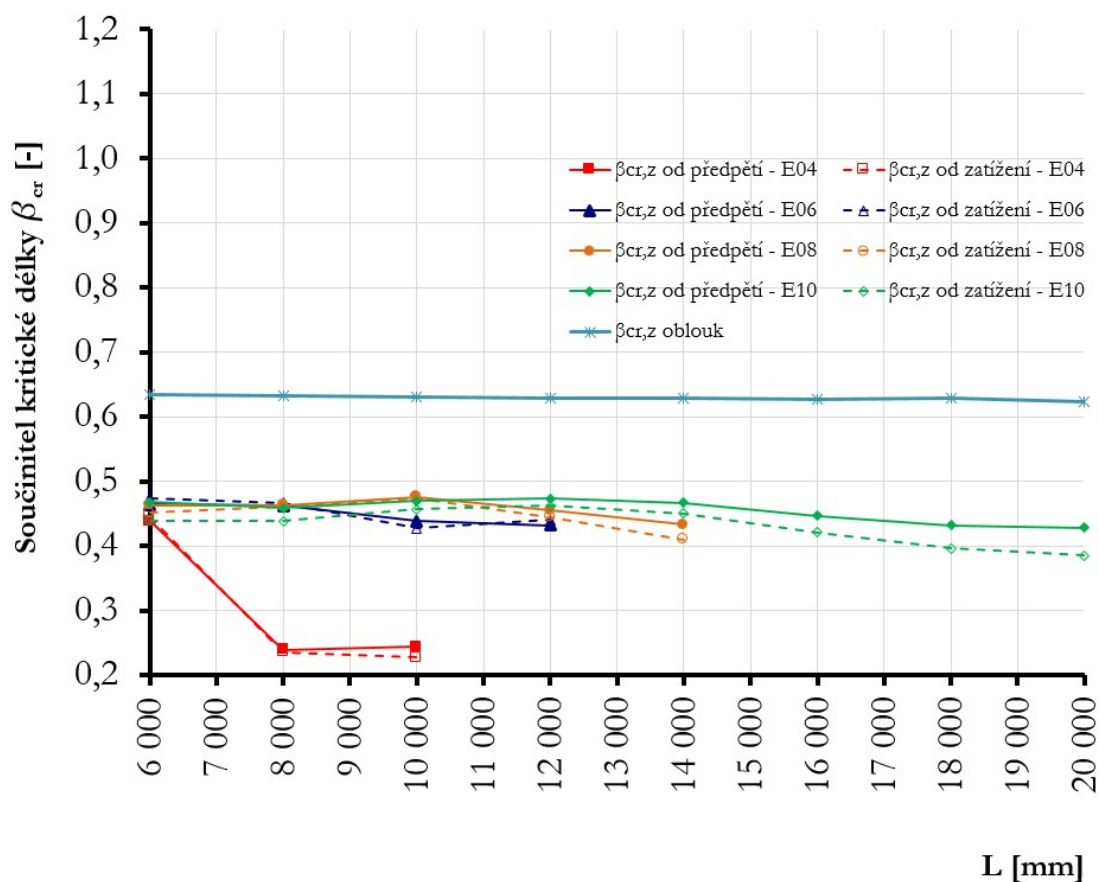
Obecně lze konstatovat, že pokud je konstrukce navržena s vhodnou dispozicí, tj. poměr rozpětí ku rozteči oblouků je v intervalu  $1 < L/B < 4$  a poměr vzepětí ku rozpětí odpovídá geometriím „B“ ÷ „D“, tedy  $1/5 < H/L < 2/5$ , chová se konstrukce předvídatelně a ke ztrátě stability v rovině oblouku dochází jednostranným prolomením se dvěma sinusovými půlvlnami.



a)



b)



c)

Obr. 53 Součinitele kritické délky  $\beta_{cr,z}$  na samostatně stojícím zatíženém oblouku, na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků  $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.

a)  $\beta_{cr,z}$  geometrie typu „C“ =>  $H/L = 3/10$

b)  $\beta_{cr,z}$  geometrie typu „D“ =>  $H/L = 2/5$

c)  $\beta_{cr,z}$  geometrie typu „E“ =>  $H/L = 1/2$

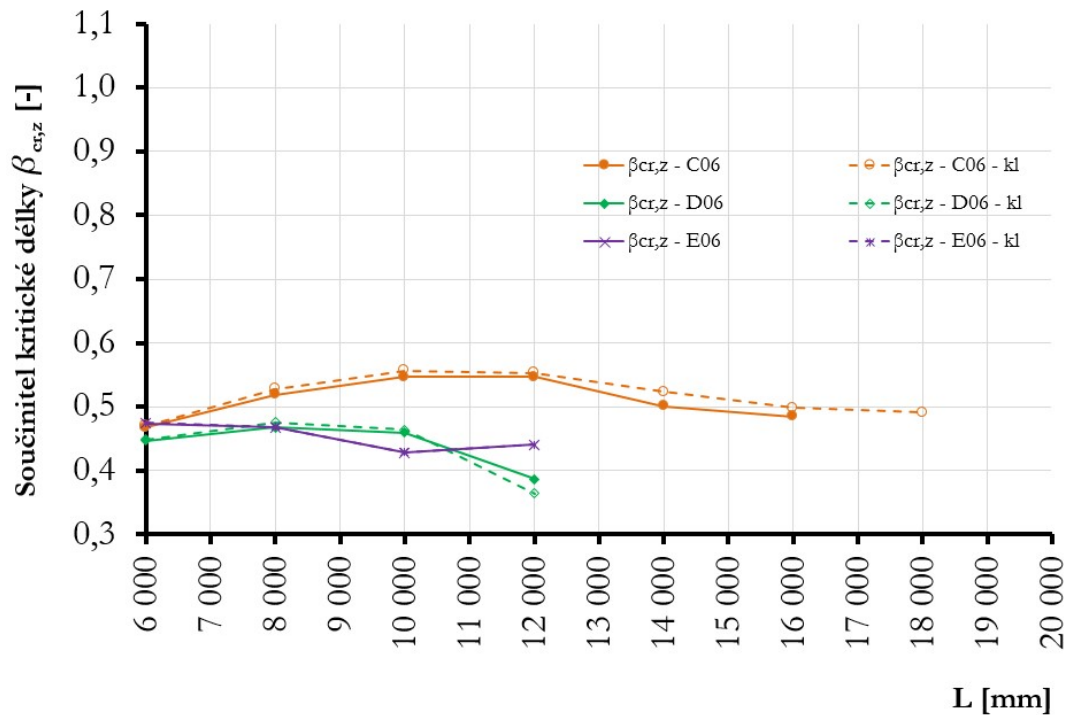
Pro součinitel kritické délky při ztrátě stability z roviny  $\beta_{cr,z}$  u geometrií „C“ ÷ „E“ lze stejně jako pro  $\beta_{cr,y}$  vyvodit jistou závislost mezi poměry  $L/B$  resp.  $H/L$  (obr. 53).

Bez ohledu na poměr  $L/B$  nedochází ke ztrátě stability z roviny oblouku, pokud je  $H/L < 1/5$ . V případě, že  $H/L \approx 3/10$ , dojde ke ztrátě stability z roviny oblouku asymetrickým vybočením ve dvou půlvlnách při poměru  $L/B < 3$ . U typů obloukových konstrukcí, kde  $H/L > 2/5$  ztrácí komplexní soustava ocelový oblouk – membrána stabilitu z roviny, když je poměr  $L/B < 2$ . Při  $L/B > 2$  převládá prostorové držení středového oblouku připojenou membránou.



### 6.2.2.6 Výsledky doplňkové studie s pěti paralelními oblouky a pevným okrajovým uložením

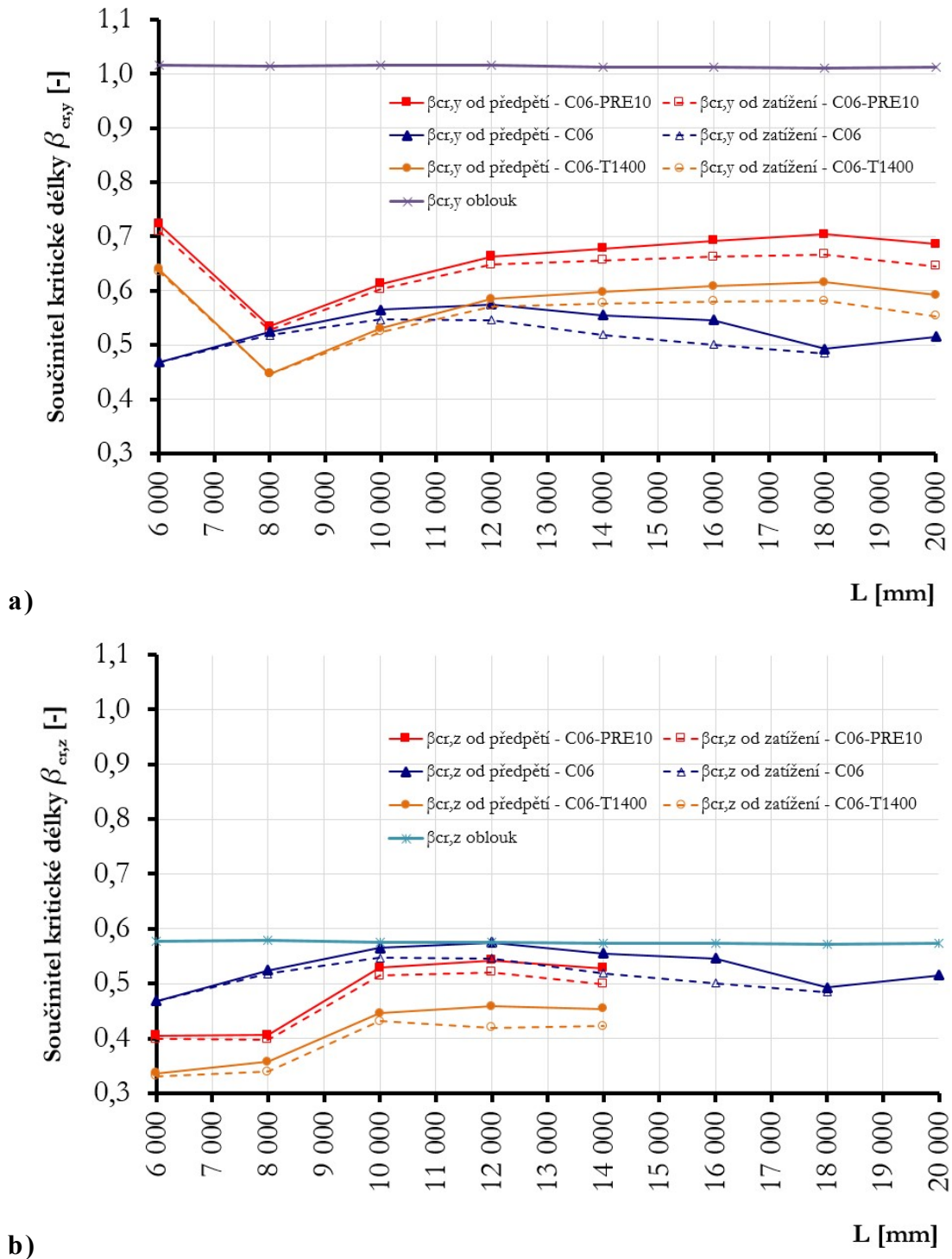
První zkoumanou změnou oproti základní studii bylo uložení podpůrných oblouků na všesměrný kloub. Studie byla provedena na geometriích všech vzepětí i rozpětí a s roztečí oblouků  $B = 6,000\text{m}$ .



Obr. 54 Porovnání součinitelů kritické délky  $\beta_{cr,z}$  u kloubově uložených oblouků a oblouků uložených kloubově pouze ve své rovině. Geometrie „C“ ÷ „E“, rozteč  $B = 6,000\text{m}$ .

Z grafického porovnání hodnot součinitele kritické délky  $\beta_{cr,z}$  (obr. 54) u membránových konstrukcí s oblouky uloženými kloubově nebo kloubově pouze ve své rovině je zřejmé, že vliv uložení nemá na ztrátu stability z roviny žádný vliv. Stejně jako u základní parametrické studie nejsou hodnoty pro typy geometrií „A“ a „B“ a pro určitá rozpětí ostatních geometrií uvedeny, neboť opět nedošlo v prvních pěti vlastních tvarech ke ztrátě stability z roviny oblouku.

Dvěma posledními parametry, které byly vyšetřeny pouze u geometrií C06\_3-10\_XX XXX, byly zvětšené rovnoměrné předpětí  $PREX = PREY = 10 \text{ kN/m}^2$  a zvětšená tloušťka membrány na  $t_{memb} = 1,401 \text{ mm}$ .



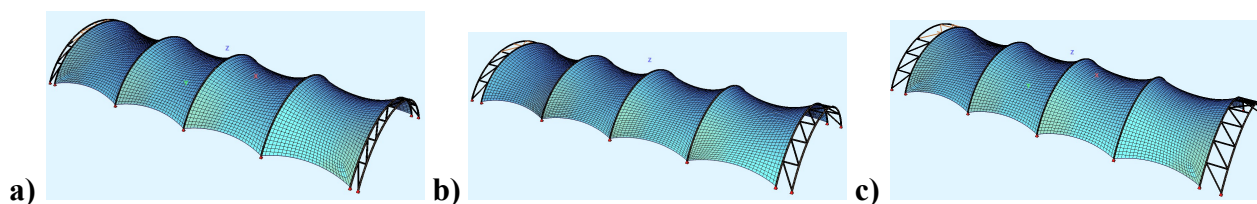
Obr. 55 Porovnání součinitelů kritické délky  $\beta_{cr,y}$  (a) a  $\beta_{cr,z}$  (b) u geometrií C06\_3-10 v závislosti na tloušťce membrány a velikosti předpětí v membráně

Z uvedených grafů (obr. 55) je zřejmé, že samotné zvětšení rovnoměrného předpětí, ani zvětšená tloušťka membrány neměly na stabilitu konstrukce v rovině oblouku zásadní vliv a zapříčinily pouze zvýšené namáhání průřezu podpůrného oblouku (viz. tabulky v přílohové části 11.2.3).

Naopak na ztrátu stability oblouku z roviny mají oba tyto faktory zásadní dopad.

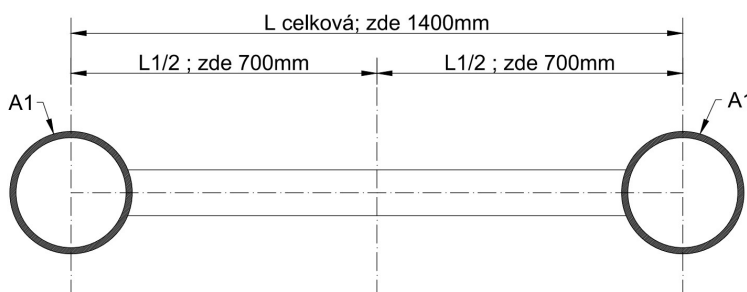
### 6.2.3 Komplexní typy konstrukcí s membránou s různou tuhostí okrajových příhradových oblouků

Na vybraných geometriích s rozpětím oblouků  $L = 10000$  mm a roztečí oblouků  $B = 6000$  mm byla provedena studie s proměnným parametrem tuhosti okrajových příhradových oblouků.



Obr. 56 Příklad 3 různých tuhostí pro geometrii C06\_3-10\_10000

Určujícím kritériem byl poměr momentů setrvačnosti dvojice trubek tvořící hlavní pásy těchto příhradových nosníků. Vzhledem k tomu, že byl zvolen u obou pásů stejný průřez, jednalo se pouze o modifikaci osové vzdálenosti (obr. 57). Mezi třemi různými momenty setrvačnosti byl zvolen poměr  $\frac{1}{4} : 1 : 2$ , čemuž odpovídají osové vzdálenosti 700 mm, 1000 mm a 1400 mm (obr. 56).



Obr. 57 Průřez příhradovým nosníkem.

K určení tuhosti ekvivalentní liniové pružné podpory byla použita síla  $F_1 = 10,0$  kN působící ve směru osy  $y$  ve vrcholu příhradového oblouku. Vodorovná deformace  $\eta$  pak udává poddajnost konstrukce. Ekvivalentní tuhost liniové podpory je poté vyjádřena vztahem

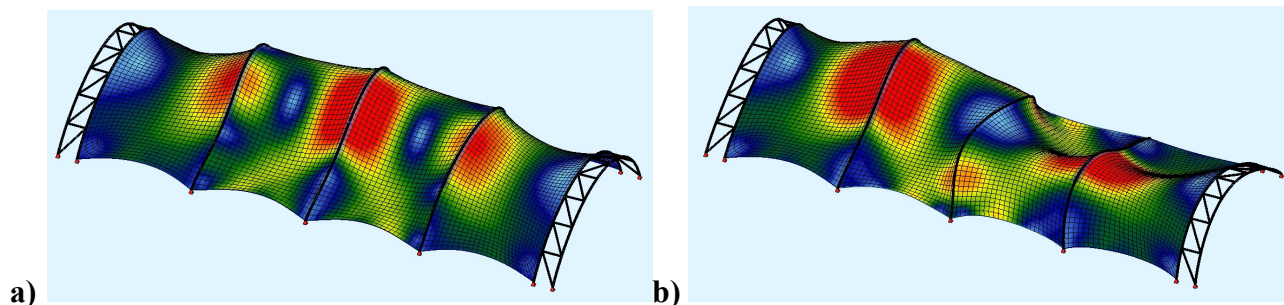
$$k_{pR} = F_1 / (\eta \times L_{teor}) \quad (37)$$

kde  $L_{teor}$  - teoretická délka oblouku

**Tab. 9 Tuhost jednotlivých krajních příhradových obloukových nosníků v závislosti na osových vzdálenostech průřezů  $L_{os}$  a poměru vzepětí ku rozpětí oblouků  $H/L$ ; (ve žlutých buňkách jsou hodnoty odečtené z programu)**

TYP KONSTRUKCE	TR	$L_{os}$	$I_y$	$I_{y1,00}/I_{yi}$	$H/L$	$F_1$	$\eta$	$k_{pR}$	$\eta_{1,00}/\eta_i$
	[-]	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[-]	[-]	[kN]	[mm]	[kN/mb]	[-]
			10 <sup>6</sup>						
A06_1-10_10000_Iy=0,25	TR 133x6,3	500	323,5	26%	1/10	10,00	2,03	479,9	231%
A06_1-10_10000_Iy=1,00	TR 133x6,3	1000	1 263,9	100%	1/10	10,00	0,88	1107,0	100%
A06_1-10_10000_Iy=2,00	TR 133x6,3	1400	2 467,6	195%	1/10	10,00	0,66	1476,0	75%
B06_1-5_10000_Iy=0,25	TR 108x7	500	283,3	25%	1/5	10,00	4,47	202,7	189%
B06_1-5_10000_Iy=1,00	TR 108x7	1000	1 116,2	100%	1/5	10,00	2,37	382,4	100%
B06_1-5_10000_Iy=2,00	TR 108x7	1400	2 182,4	196%	1/5	10,00	1,82	497,9	77%
C06_3-10_10000_Iy=0,25	TR 108x5,6	500	229,9	25%	3/10	10,00	10,90	74,9	167%
C06_3-10_10000_Iy=1,00	TR 108x5,6	1000	905,5	100%	3/10	10,00	6,54	124,8	100%
C06_3-10_10000_Iy=2,00	TR 108x5,6	1400	1 770,2	195%	3/10	10,00	5,16	158,2	79%
D06_2-5_10000_Iy=0,25	TR 114x4,5	500	198,2	25%	2/5	10,00	23,80	30,4	155%
D06_2-5_10000_Iy=1,00	TR 114x4,5	1000	778,7	100%	2/5	10,00	15,40	46,9	100%
D06_2-5_10000_Iy=2,00	TR 114x4,5	1400	1 521,7	195%	2/5	10,00	12,40	58,3	81%
E06_1-2_10000_Iy=0,25	TR 108x7	500	283,3	25%	1/2	10,00	40,00	15,9	143%
E06_1-2_10000_Iy=1,00	TR 108x7	1000	1 116,2	100%	1/2	10,00	28,00	22,7	100%
E06_1-2_10000_Iy=2,00	TR 108x7	1400	2 182,4	196%	1/2	10,00	23,40	27,2	84%

Z daného je zřejmé, že čtvrtinový moment setrvačnosti odpovídá v závislosti na poměru  $H/L$  poddajnosti, která je 1,5 ÷ 2,5krát větší, než u srovnávací jednotkové příhrady. Dvojnásobný moment setrvačnosti charakterizuje konstrukci, jejíž poddajnost je 75 ÷ 85 % vzhledem ke srovnávací jednotkové příhradovině.



Obr. 58 Ztráta stability u geometrie C06\_3-10\_10000\_Iy=1,00

a) Jednostranné prolomení oblouku v rovině se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,y} = 11,00$

b) Ztráta stability středového oblouku z roviny vyvolaná asymetrickou ztrátou stability vnějších oblouků v rovině  $\alpha_{cr,z} = 14,12$

I u konstrukcí s poddajnými okrajovými podmínkami je prvním vlastním tvarem při ztrátě stability jednostranné prolomení oblouku v rovině (obr. 58a). Z toho je patrné, že pokud jsou příhradové nosníky schopné přenést zatížení od předpětí a ostatního zatížení, nemá jejich tuhost zásadní vliv na stabilitu konstrukce jako celku. Ani u případu vybočení středového oblouku z roviny nemají krajní příhrady zásadní vliv, neboť toto vybočení je zapříčiněno současnou asymetrickou ztrátou stability přilehlých oblouků v rovině (obr. 58b).

Tab. 10 Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným předpětím  $PREX = PREY = 5 \text{ kN/m}'$

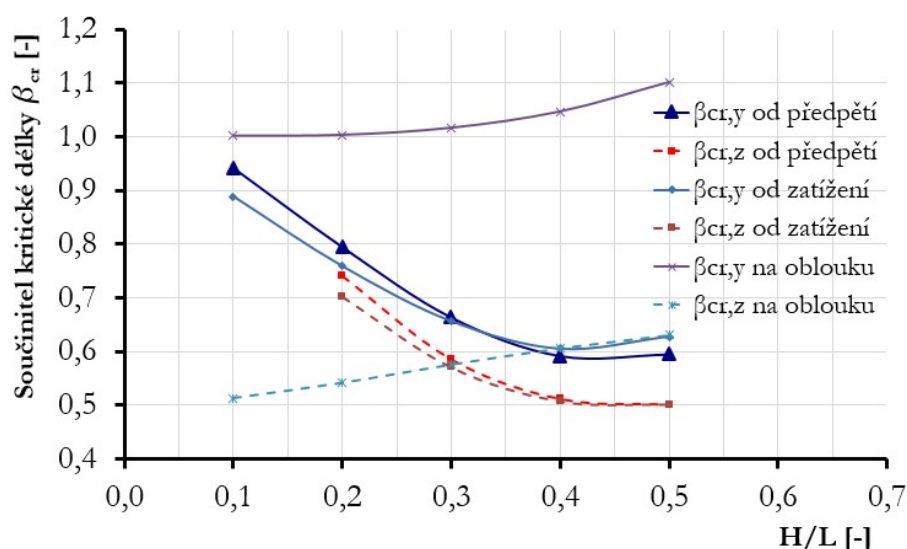
TYP KONSTRUKCE	$L_{teor}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$
	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
A06_1-10_10000_Iy=0,25	10 265	26,9	16,65		447,9	0,0	2	X	0,94	X	215,4	X	890,2	367,8	X
A06_1-10_10000_Iy=1,00	10 265	26,9	16,65		447,9	0,0	2	X	0,94	X	215,4	X	890,2	367,8	X
A06_1-10_10000_Iy=2,00	10 265	26,9	16,65		447,9	0,0	2	X	0,94	X	215,4	X	890,2	367,8	X
B06_1-5_10000_Iy=0,25	11 035	26,3	11,67	13,44	306,9	353,5	2	2	0,79	0,74	244,9	616,6	788,5	261,9	295,8
B06_1-5_10000_Iy=1,00	11 035	26,3	11,67	13,43	306,9	353,2	2	2	0,79	0,74	244,9	616,6	788,5	261,9	295,6
B06_1-5_10000_Iy=2,00	11 035	26,3	11,67	13,42	306,9	352,9	2	2	0,79	0,74	244,9	616,6	788,5	261,9	295,4
C06_3-10_10000_Iy=0,25	12 250	27,0	11,01	14,18	297,3	382,9	2	2	0,66	0,58	224,1	675,7	639,5	247,4	303,5
C06_3-10_10000_Iy=1,00	12 250	27,0	11,00	14,12	297,0	381,2	2	2	0,66	0,59	224,2	675,7	639,5	247,2	302,5
C06_3-10_10000_Iy=2,00	12 250	27,0	10,98	14,06	296,5	379,6	2	2	0,66	0,59	224,5	675,7	639,5	246,8	301,5
D06_2-5_10000_Iy=0,25	13 832	28,0	10,30	13,82	288,4	387,0	2	2	0,59	0,51	211	714	549,5	235,0	294,1
D06_2-5_10000_Iy=1,00	13 832	28,0	10,26	13,70	287,3	383,6	2	2	0,59	0,51	211,4	714	549,5	234,3	292,3
D06_2-5_10000_Iy=2,00	13 832	28,0	10,23	13,57	286,4	380,0	2	2	0,59	0,51	211,7	714	549,5	233,7	290,3
E06_1-2_10000_Iy=0,25	15 708	29,6	9,21	12,88	272,6	381,2	2	2	0,59	0,50	259,9	877,7	788,5	235,9	315,2
E06_1-2_10000_Iy=1,00	15 708	29,6	9,12	12,84	270,0	380,1	2	2	0,60	0,50	261,2	877,7	788,5	233,9	314,4
E06_1-2_10000_Iy=2,00	15 708	29,6	9,06	12,68	268,2	375,3	2	2	0,60	0,50	262	877,7	788,5	232,5	311,1

Na základě charakteristické normálové síly v oblouku jak od samotného předpětí v membráně (tab. 10), tak od kombinace předpětí a vnějšího zatížení

(tab. 11) a součinitelů kritického zatížení pro dané směry vybočení byly stanoveny součinitele kritické délky a jim odpovídající vzpěrné únosnosti oblouků. U velmi plochého oblouku  $H/L = 1/10$  nedošlo v prvních pěti vlastních tvarech vybočení k vybočení z roviny, tudíž hodnoty nejsou v tabulce zaznamenány. Pro porovnání jsou uvedeny i hodnoty pro samostatně stojící oblouk zatížený ekvivalentním zatížením  $6,0 \text{ kN/m}'$  ve směru lokální osy  $z$  (tab. 11).

U konstrukce s membránou dochází ke ztrátě stability vždy ve dvou sinusových půlvlnách  $n_y = n_z = 2$ , u samostatně stojícího oblouku je ztráta stability z roviny pouze v jedné půlvlně,  $n_z = 2$ .

Vývoj součinitele kritického zatížení v závislosti na poměru  $H/L$  na konstrukcích s označením „ $I_y = 1,00$ “ a na samostatně stojícím oblouku je znázorněn na grafu (obr. 59).



**Obr. 59** Součinitel kritické délky v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí pro oblouk a konstrukce s referenční tuhostí 1,00

Lze konstatovat, že stabilizace oblouku vrcholí u poměru  $H/L = 2/5$ , a to bez ohledu na okrajové tuhosti příhradových poddajných oblouků. Stejně jako u případů řešených v hlavní části studie nedochází u poměru  $H/L = 1/10$  ke ztrátě stability z roviny u prvních pěti vlastních tvarů.

**Tab. 11 Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným svislým zatížením 1 kN/m<sup>2</sup>**

TYP KONSTRUKCE	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	α <sub>cr,y</sub>	α <sub>cr,z</sub>	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	β <sub>cr,y</sub>	β <sub>cr,z</sub>	λ <sub>y</sub>	λ <sub>z</sub>	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>
	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
A06_1-10_10000_oblouk	10 265	80,8	4,90	4,67	395,9	377,3	2	1	1,00	0,51	229,1	117,4	890,2	331,7	318,4
A06_1-10_10000_Iy=0,25	10 265	85,4	5,78		493,6	0,0	2	X	0,90	X	205,2	X	890,2	397,9	X
A06_1-10_10000_Iy=1,00	10 265	87,0	5,78		502,9	0,0	2	X	0,89	X	203,3	X	890,2	403,8	X
A06_1-10_10000_Iy=2,00	10 265	85,3	5,78		493,0	0,0	2	X	0,90	X	205,3	X	890,2	397,5	X
B06_1-5_10000_oblouk	11 035	45,0	4,28	3,67	192,6	165,2	2	1	1,00	0,54	309,2	167	788,5	172,0	149,1
B06_1-5_10000_Iy=0,25	11 035	64,7	5,20	6,09	336,4	394,0	2	2	0,76	0,70	233,9	216,2	788,5	283,6	323,9
B06_1-5_10000_Iy=1,00	11 035	64,7	5,20	6,07	336,4	392,7	2	2	0,76	0,70	233,9	216,5	788,5	283,6	323,1
B06_1-5_10000_Iy=2,00	11 035	64,7	5,20	6,07	336,4	392,7	2	2	0,76	0,70	233,9	216,5	788,5	283,6	323,1
C06_3-10_10000_oblouk	12 250	35,1	3,61	2,81	126,7	98,6	2	1	1,02	0,58	343,3	194,6	639,5	114,8	90,6
C06_3-10_10000_Iy=0,25	12 250	54,7	5,60	7,43	306,3	406,4	2	2	0,65	0,57	220,8	191,7	639,5	253,7	317,6
C06_3-10_10000_Iy=1,00	12 250	54,4	5,58	7,38	303,6	401,5	2	2	0,66	0,57	221,8	192,9	639,5	251,8	314,7
C06_3-10_10000_Iy=2,00	12 250	54,0	5,57	7,35	300,8	396,9	2	2	0,66	0,57	222,8	194	639,5	249,8	312,0
D06_2-5_10000_oblouk	13 832	31,7	2,90	2,16	91,9	68,5	2	1	1,05	0,61	373,6	216,5	549,5	84,1	63,5
D06_2-5_10000_Iy=0,25	13 832	50,5	5,45	7,83	275,2	395,4	2	2	0,60	0,50	215,9	180,2	549,5	226,2	298,7
D06_2-5_10000_Iy=1,00	13 832	50,8	5,41	7,70	274,8	391,2	2	2	0,61	0,51	216,1	181,1	549,5	225,9	296,4
D06_2-5_10000_Iy=2,00	13 832	50,9	5,39	7,61	274,4	387,3	2	2	0,61	0,51	216,3	182	549,5	225,6	294,4
E06_1-2_10000_oblouk	15 708	31,4	2,51	1,91	78,8	60,0	2	1	1,10	0,63	483,4	277,1	788,5	73,8	56,6
E06_1-2_10000_Iy=0,25	15 708	47,8	5,09	8,11	243,3	387,7	2	2	0,63	0,50	275,1	217,9	788,5	213,0	319,6
E06_1-2_10000_Iy=1,00	15 708	48,2	5,03	7,89	242,4	380,3	2	2	0,63	0,50	275,6	220	788,5	212,4	314,6
E06_1-2_10000_Iy=2,00	15 708	50,2	4,52	7,30	226,9	366,5	2	2	0,65	0,51	284,9	224,2	788,5	200,0	305,0

#### 6.2.4 Sestava oblouků s jednoose symetrickým průřezem a pevným okrajovým uložením

Na základě poznatků získaných v kapitole 6.2 byla u vybraných geometrických sestav ověřena možnost ještě efektivnějšího využití podpůrné ocelové obloukové konstrukce za použití jednoose symetrických průřezů profilu „I“. Soubor dat obsahuje kompletní sestavu geometrií C06\_3-10 a dále krajní a střední typy z geometrií A06\_1-10, B06\_1-5, D06\_2-5 a E06\_1-2.

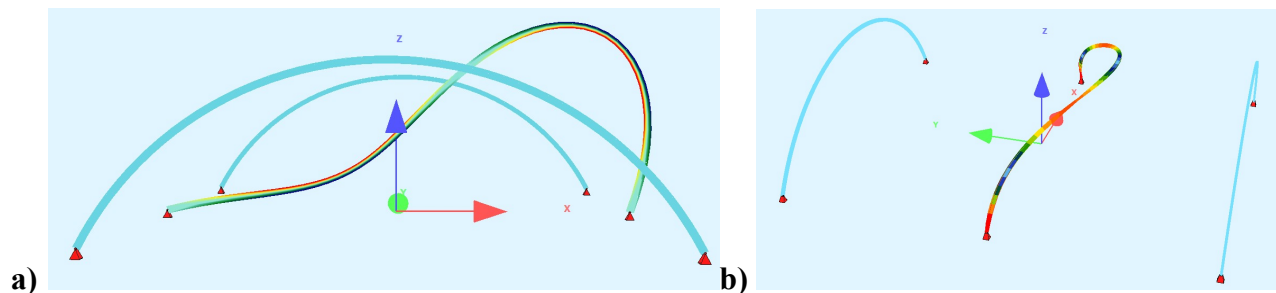
Stejně jako v kapitole 6.2 byl nejprve pro každou geometrii navržen samostatně stojící oblouk a posléze řešena konstrukce v interakci s membránou.

Pro určení stabilitních parametrů a únosnosti samostatně stojícího oblouku je oblouk uložen kloubově v rovině oblouku a vetknutě z roviny.

##### 6.2.4.1 Samostatně stojící oblouky s průřezem z „IPE-profilů“

U všech typů konstrukcí nastal v případě samostatně stojícího oblouku kolaps ztrátou stability z jeho roviny, když vrchol oblouku vybočil v jedné sinusové půlvlně (obr. 60b). Uvažované zatížení oblouků, které pro danou rozteč oblouků odpovídá zatížení 1 kN/m<sup>2</sup> na plochu membrány (u všech typů geometrie

s označením „X06\_x-xx“ to odpovídá zatížení 6 kN/m') bylo pro samostatně stojící oblouky vždy výrazně větší, než byl daný oblouk schopen přenést, a proto byl výpočet ukončen předčasně. Většinou limitní přítěžovací krok odpovídal cca 10% předpokládaného zatížení. Tomu odpovídají i velmi malé hodnoty normálové síly následně použité pro výpočet parametrů pro vzpěrnou únosnost (tab. 12).

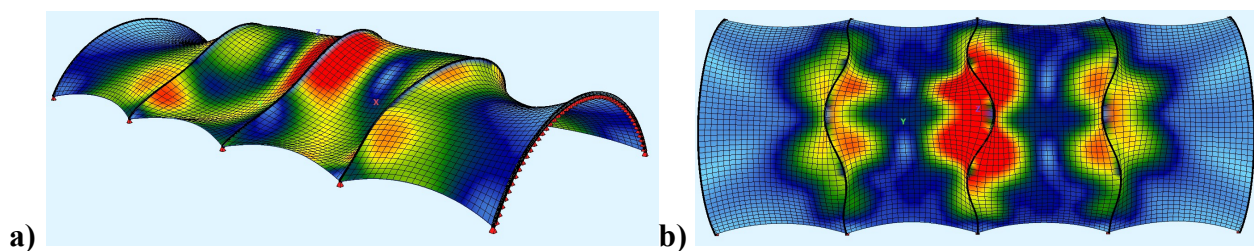


**Obr. 60** Ztráta stability u geometrie C06\_3-10\_10000\_IPE120, axonometrické pohledy  
a) Jednostranné prolomení oblouku v rovině se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,y} = 39,06$   
b) Ztráta stability středového oblouku z roviny v jedné sinusové půlplně se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,z} = 1,01$

#### 6.2.4.2 Oblouky s průřezem z „IPE-profilů“ v interakci s nekovovou membránou

Na základě poznatků z 0 o průběhu ztráty stability na konstrukcích s pěti paralelními oblouky trubkového průřezu jednostranným prolomením oblouku v rovině byla zvolena pro tuto studii sada IPE profilů. Profily jsou orientovány svisle tak, že větší moment setrvačnosti vzdoruje právě tomuto vybočení v rovině.

První vlastní tvar pro ztrátu stability byl ve všech případech stejný, a to jednostranné prolomení oblouku ve dvou sinusových půlplních ( $n_y = 2$ ) (obr. 61a). Vybočení z roviny bylo u prvních dvou typů geometrie „A“ a „B“ ve čtyřech půlplních ( $n_z = 4$ ), u ostatních typů pouze ve třech půlplních (obr. 61b).



**Obr. 61** Ztráta stability u geometrie C06\_3-10\_10000\_IPE120



a) Jednostranné prolomení oblouku v rovině se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,y} = 12,22$

b) Ztráta stability středového oblouku z roviny ve třech sinusových půlvlnách se součinitelem kritického zatížení  $\alpha_{cr,z} = 14,52$

Vývoj součinitele kritické délky pro různé poměry  $H/L$  a zatížení pouze od předpětí je patrné v tabulce (tab. 12) a pro konstrukci zatíženou  $1 \text{ kN/m}^2$  na plochu membrány v tabulce (tab. 13).

**Tab. 12** Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku z profilu IPE. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným předpětím  $\text{PREX} = \text{PREY} = 5 \text{ kN/m}^2$

TYP KONSTRUKCE	PRŮŘEZ	$I_{\text{teor}}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$
	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
A06_1-10_10000_oblouk	IPE 140	10 265	24,0	17,64	1,01	423,4	24,2	2	1	1,00	0,60	179,3	374,8	583,1	318,9	23,2
A06_1-10_10000	IPE 140	10 265	25,9	18,27	25,90	473,2	670,8	2	4	0,95	0,46	169,6	285	583,1	343,5	415,4
B06_1-5_10000_oblouk	IPE 120	11 035	8,4	25,91	1,00	216,6	8,4	2	1	1,00	0,75	224,9	572,3	469,0	180,4	8,1
B06_1-5_10000	IPE 120	11 035	25,7	12,62	18,51	324,3	475,7	2	4	0,82	0,40	183,8	303,5	469,0	247,8	314,5
C06_3-10_10000_oblouk	IPE 120	12 250	4,5	39,06	1,01	174,6	4,5	2	1	1,00	0,92	250,5	778,8	469,0	149,8	4,4
C06_3-10_10000	IPE 120	12 250	26,7	12,22	14,52	326,3	387,7	2	3	0,73	0,30	183,2	252,1	469,0	248,9	279,6
D06_2-5_10000_oblouk	IPE 140	13 832	3,8	60,95	1,03	229,2	3,9	2	1	1,01	1,12	243,8	937,6	583,1	195,3	3,8
D06_2-5_10000	IPE 140	13 832	27,1	14,27	13,91	386,7	377,0	2	3	0,78	0,34	187,7	285,1	583,1	298,9	293,3
E06_1-2_10000_oblouk	IPE 160	15 708	3,4	75,41	1,02	257,1	3,5	2	1	1,07	1,28	254,5	1094	713,2	221,5	3,4
E06_1-2_10000	IPE 160	15 708	28,6	15,13	12,52	432,7	358,1	2	3	0,82	0,38	196,2	323,5	713,2	342,0	294,1

**Tab. 13** Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku z profilu IPE. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným svislým zatížením  $1 \text{ kN/m}^2$

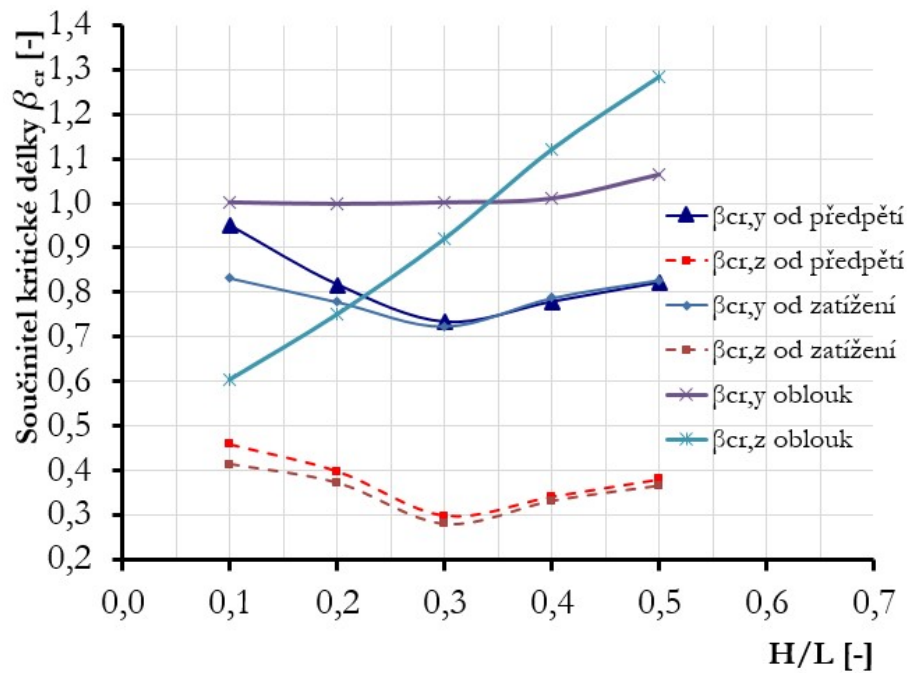
TYP KONSTRUKCE	PRŮŘEZ	$I_{\text{teor}}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$
	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
A06_1-10_10000	IPE 140	10 265	99,6	6,18	8,33	615,5	829,7	2	4	0,83	0,41	148,7	73,82	583,1	399,0	450,8
B06_1-5_10000	IPE 120	11 035	64,9	5,51	8,41	357,6	545,8	2	4	0,78	0,37	175	83,6	469,0	265,2	335,8
C06_3-10_10000	IPE 120	12 250	55,1	6,10	7,90	336,1	435,3	2	3	0,72	0,28	180,5	70,21	469,0	254,2	299,7
D06_2-5_10000	IPE 140	13 832	51,1	7,41	7,78	378,7	397,6	2	3	0,79	0,33	189,6	79,98	583,1	294,3	305,0
E06_1-2_10000	IPE 160	15 708	52,7	8,09	7,34	426,3	386,8	2	3	0,83	0,37	197,7	87,26	713,2	338,1	313,2

Z grafu (obr. 62) je zřejmé, že pro samostatně stojící oblouk nemá na vzpěr v rovině oblouku poměr rozpětí ku vzepětí  $H/L$  zásadní vliv. Na druhou stranu pro vybočení z roviny je tento poměr zcela zásadní.

Dále je patrné, že zvětšování poměru  $H/L$  má za následek přibližování křivek součinitelů vzpěrných délek pouze od předpětí a od předpětí se zatížením jak pro vybočení v rovině, tak pro vybočení z roviny. Důvodem je, že pro malé poměry  $H/L$  má přitížení v ploše membrány výraznější vliv na její dotvarování a finální

tvár konstrukce, přičemž více zakřivená plocha membrány lépe stabilizuje podpůrný oblouk. Od poměru  $H/L \approx 3/10$  je počáteční zakřivení plochy tak výrazné, že přitěžování již nemá významnější vliv na ovlivnění stability vnitřního oblouku.

V neposlední řadě je z grafu patrné, že jako nejstabilnější se jeví oblouková konstrukce s poměrem  $H/L \approx 3/10$ .



Obr. 62 Součinitel kritické délky v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí pro geometrie „X06\_x-xx\_10000“

### 6.3 Závěry z parametrické studie

Pro zjednodušené modelování soustavy ocelový oblouk – textilní membrána lze samostatně navrhnout podpůrný oblouk tak, aby při ekvivalentním zatížení vyhověl na posouzení při ztrátě stability jednostranným prolomením oblouku ve své rovině. U vhodně zvoleného dispozičního řešení není vlastní tvar vybočení z roviny rozhodující a ve většině případů není ani v první trojici vlastních tvarů ztráty stability.

Současně lze s výhodou využít poznatků ohledně redukce součinitele kritické délky v závislosti na poměru  $H/L$ . Součinitel s označením  $\beta_{cr,y}$  se pohybuje od 0,60 při poměru  $H/L = 2/5$  až 0,95 pro poměr 1/10.

V kapitole 6.2.3, kde byl zkoumán vliv tuhosti okrajové příhradové konstrukce, bylo prokázáno, že pokud je okrajový nosník schopen přenést zatížení, které vyvolá plošné zatěžování celé konstrukce (typicky zatížení sněhem či větrem), není jeho příčná tuhost zásadním parametrem pro výpočet vzpěrné únosnosti středního podpůrného oblouku. Na vybočení středového oblouku v rovině nemá tuhost okrajového příhradového nosníku prakticky žádný vliv a vybočení z roviny nastává v kombinaci s asymetrickou ztrátou stability okrajových oblouků a nosníků v rovině, což příčná tuhost příhradových nosníků taktéž zásadně neovlivní. Porovnáním různých geometrií se v tomto ohledu jako nejstabilnější jevila konstrukce s poměrem  $H/L = 2/5$ .

V poslední kapitole parametrické studie bylo prokázáno efektivní využití symetrického IPE-profilu. Průřez musí být orientován tak, že převládající moment setrvačnosti vzdoruje ztrátě stability v rovině oblouku. V tomto geometrickém uspořádání byla nejstabilnější konstrukce s poměrem  $H/L = 3/10$ .

## **7. Závěr**

### **7.1 Výsledky a výstupy z experimentální části**

U symetrického zatížení je zjevný vliv membrány na příčné držení oblouku. Samostatně stojící oblouk zkolabuje ztrátou stability z roviny oblouku, zatímco u konstrukce s membránou k tomuto jevu nedochází. Při experimentální analýze měla membrána na zkoumaný oblouk takový vliv, že ke ztrátě stability vůbec nedošlo a měření muselo být ukončeno s ohledem na blížící se dosažení meze kluzu oceli.

Stabilizační efekt membrány na vnitřní oblouk je pro nesymetrické zatížení a předpokládané vybočení oblouku z roviny zásadní. Při prolamování oblouku dochází ke snižování napětí v membráně v oblasti zatížené části konstrukce a naopak k nárůstu napjatosti a zvýšení stabilizace v oblasti, která se snaží vybočit.

Z vlastní realizace experimentu lze konstatovat, že nejdůležitějším okamžikem bylo správné vnesení předpětí jak do obvodových lanových prvků, tak do samotné plochy membrány. Míra předpětí a jeho rovnoměrné rozdělení v ploše membrány má určující vliv na další chování konstrukce při zatěžování.

### **7.2 Teoretická část**

Pro obloukovou konstrukci s membránou (válcový typ membránové konstrukce) je zásadní ztráta stability podpůrného ocelového oblouku v jeho rovině, tzv. jednostranné prolomení oblouku. Pokud je navržen samostatný oblouk na 80 ÷ 90 % své stabilitní únosnosti pro vybočení z roviny (tomu odpovídá stabilitní únosnost v rovině při jednostranném prolomení 25 ÷ 40 %), pak rozhodující únosnost komplexní konstrukce s membránou nastává při ztrátě stability oblouku v rovině (při ekvivalentním zatížení na plochu membrány je shodný oblouk stabilitně využit v rozsahu 20 ÷ 30 % podle uvažované geometrie).

Při odděleném modelování tedy lze při návrhu podpůrného oblouku pominout první vlastní tvar vybočení z roviny a pro výpočet kritické síly bezpečně uvažovat pouze vybočení v rovině, tzv. jednostranné prolomení oblouku. Teoretické využití se v takovém případě výrazně neliší od komplexního modelu s membránou, protože

příspěvek membrány k navýšení kritické síly pro vybočení v rovině je částečně eliminován vnesením přidané normálové síly od předepnuté membrány.

U všech konstrukcí s pevným okrajovým uložením bylo vyzorováno v závislosti na poměrech  $H/L$  a  $B/L$  obdobné chování vyšetřovaného podpůrného oblouku při ztrátě stability jak v rovině, tak z roviny.

Obecně lze konstatovat, že pokud je konstrukce navržena s vhodnou dispozicí, tj. poměr rozpětí ku rozteči oblouků  $L/B$  je v intervalu  $1 < L/B < 4$  a poměr vzepětí ku rozpětí  $H/L$  odpovídá geometriím „B“ ÷ „D“, tedy  $1/5 < H/L < 2/5$ , chová se konstrukce předvídatelně a ke ztrátě stability v rovině oblouku dochází jednostranným prolomením se dvěma sinusovými půlvlnami.

Obdobné vztahy lze prezentovat i u ztráty stability oblouku z roviny. Bez ohledu na poměr  $L/B$  nedochází ke ztrátě stability z roviny oblouku, pokud je  $H/L < 1/5$ . V případě, že  $H/L \approx 3/10$ , dojde ke ztrátě stability z roviny oblouku asymetrickým vybočením ve dvou půlvlnách při poměru  $L/B < 3$ . Nad tento poměr je konstrukce z roviny stabilní. U typů obloukových konstrukcí, kde  $H/L > 2/5$  ztrácí komplexní soustava ocelový oblouk – membrána stabilitu z roviny, když je poměr  $L/B < 2$ . Při  $L/B > 2$  převládá prostorové držení středového oblouku připojenou membránou.

Vybrané případy parametrické studie s rozdílným uložením podpůrných oblouků, nebo poddajným okrajovým uložením v podobě příhradových obloukových nosníků, neprokázaly významné změny ve stabilitním chování vyšetřovaného středového oblouku. Jediný významnější efekt mělo zvětšení předpětí nebo zvětšení tloušťky membrány na příčnou stabilitu zkoumaného oblouku.

Jako vhodné průřezy pro uvedené typy konstrukcí se jeví symetrické průřezy s převládajícím momentem setrvačnosti k jedné své ose. Správnou orientací takovýchto průřezů lze maximálně využít stabilizační efekt membrány při vybočení z roviny a tím vytvořit maximálně efektivní návrh podpůrné konstrukce.

### **7.3 Přínosy práce k řešené problematice**

Práce prezentuje přínos a oporu pro běžnou inženýrskou praxi při navrhování komplexních soustav ocelové konstrukce s nekovovou membránou. Poznatky

získané v parametrické studii v oblasti stability ocelového oblouku, který podpírá nekovovou membránu a kterou je příčně držen, vedou k výrazně lepší využitelnosti při navrhování profilů a tím i k ekonomičtějším návrhům.

Zásadním zjištěním je možnost eliminace tvaru vybočení z roviny podpůrného oblouku ve fázi odděleného modelování. Jako první vlastní tvar při ztrátě stability je pak při dodržení dispozičních zásad prezentovaných v kapitole 6.2.2.5 možné uvažovat jednostranné prolomení oblouku v rovině s tím, že součinitel kritické vzpěrné délky se v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí  $H/L$  pohybuje v rozmezí  $0,60 \div 0,95$ .

Současně se dá s výhodou aplikovat zjištění z 6.2.2.6, že není rozhodující způsob uložení podpůrných oblouků. Výsledky s oblouky uloženými na všesměrný kloub, nebo kloubově pouze ve své rovině nevykazovaly prakticky žádné rozdíly.

#### **7.4 Náměty pro další výzkumnou činnost**

Výzkum by mohl dále pokračovat rozšířením parametrické studie na konstrukcích se stejnými geometriemi, ale s různým poměrem předpětí v membráně ve směrech lokálních os „x“ a „y“.

Z provedeného experimentu a následného numerického modelu jak vlastního experimentu, tak zvětšené reálné konstrukce koncertního podia je zřejmé, že na ztrátu stability z roviny středového oblouku má vliv i sklon připojené membránové plochy. Toto v parametrické studii řešeno nebylo a bylo by vhodné další numerické vyšetřování v této oblasti.

Jistě by bylo možné rozšířit výzkum o jiné typy geometrií podpůrných prvků, jako jsou například eliptický či parabolický oblouk.

V neposlední řadě by stála za rozšíření studie se symetrickými průřezy s převládajícím momentem setrvačnosti k jedné ose, nastíněná v poslední kapitole (6.2.4) parametrické studie.

## 8. Seznam obrázků a tabulek

### 8.1 Seznam obrázků

Obr. 1	Topologie membránových konstrukcí.....	10
Obr. 2	Příklady „high-point“ konstrukcí.....	10
Obr. 3	Estadio Olympicko – Sevilla, Španělsko ( <a href="http://www.sattler-ag.com">http://www.sattler-ag.com</a> ).....	11
Obr. 4	Slunečníky pro soukromého investora – Abu Dhabi ( <a href="http://www.sattler-ag.com">http://www.sattler-ag.com</a> ).....	11
Obr. 5	Příklady obloukové geometrie.....	12
Obr. 6	Pneumaticky předepnuté membrány .....	13
Obr. 7	„Tensegrity structures“ .....	13
Obr. 8	„Tensairity structures“ .....	14
Obr. 9	Komponenty pro kotvení pomocí keder profilů .....	17
Obr. 10	Schéma biaxiálního testu (vlevo); Příklad pracovního diagramu pro materiál skelná vlákna/PTFE (vpravo) .....	19
Obr. 11	Stabilizace matice tuhosti konstrukce pomocí matice počátečních napětí (předpětím) .....	22
Obr. 12	Možnosti vnesení předpětí do membránové konstrukce [20] .....	23
Obr. 13	Změna zakřivení koncového lana v závislosti na působící síle $S_S$ .....	30
Obr. 14	Možnosti poddajného (a, b, c, d) a pevného (e, f, g, h) uchycení membrány. ....	32
Obr. 15	Detail platle s možnou rektifikací pro kotvení obvodových lan a membrány. ....	32
Obr. 16	Působení sil v rohové oblasti s ohledem na ostrost svíraného úhlu. ....	33
Obr. 17	Schéma veličin pro interpretaci geometrie oblouku.....	34
Obr. 18	Geometrie a pohled na kompletní model v laboratoři .....	40
Obr. 19	Ohýbání vnějšího oblouku v dílně JPB Jirkov.....	42
Obr. 20	Kotevní a předpínací prvky membrány (vlevo); Kotvení obvodových lan do ocelové platle kloubově chycené k pevnému bodu (vpravo) .....	43
Obr. 21	Zatěžovací body a rozmístění potenciometrů (vlevo); Rozmístění tenzometrů (vpravo).....	44
Obr. 22	Rozmístění tenzometrů na membráně (vlevo); Detail tenzometrů T19, T20 (vpravo).....	45
Obr. 23	Zatěžovací schéma pro symetrické zatížení konstrukce s membránou (samostatný oblouk do zatěžovacího kroku 8) .....	46

Obr. 24	Zatěžovací schéma pro nesymetrické zatížení konstrukce s membránou (samostatný oblouk do zatěžovacího kroku 7) .....	46
Obr. 25	Postup statistického vyhodnocení naměřených dat při experimentu. Zobrazeno měření 6 (nesymetrické zatěžování komplexní konstrukce s membránou), krok 07. Tabulka je vzhledem k množství měřených veličin neúplná. ....	48
Obr. 26	Symetrické zatěžování: Svislé deformace (vlevo); Příčné deformace (vpravo) .....	49
Obr. 27	Průběh napětí od symetrického zatěžování na tenzometrech 2 a 12 .....	50
Obr. 28	Nesymetrické zatěžování: Svislé deformace (vlevo); Příčné deformace (vpravo) .....	51
Obr. 29	Průběh napětí od nesymetrického zatěžování na tenzometrech 2 a 12 .....	51
Obr. 30	Postup vytvoření FEM modelu .....	53
Obr. 31	Systémová okna pro vložení požadovaných materiálových a pevnostních charakteristik .....	54
Obr. 32	Systémová okna pro tvorbu sítě strukturální plochy .....	54
Obr. 33	Příčné deformace vrcholu oblouku od symetrického zatěžování (vlevo); Svislé deformace od symetrického zatěžování (vpravo) .....	56
Obr. 34	Podélné deformace bodů P2 a P6 oblouku od nesymetrického zatěžování (vlevo); Svislé deformace od nesymetrického zatěžování (vpravo) .....	56
Obr. 35	Porovnání experimentálně zjištěných svislých deformací vrcholu oblouku s deformacemi získanými z programu SOFiSTiK s různou mírou předpětí; Symetrické zatěžování .....	57
Obr. 36	Geometrie konstrukce a vizualizace 3D modelu po předpětí včetně alternativy s příhradovým vnějším ukloněným obloukem .....	59
Obr. 37	Průběh vnitřních sil od předpětí a návrhové hodnoty zatížení sněhem ( $1 \text{ kN/m}^2$ ) na reálné konstrukci. ....	60
Obr. 38	Ztráta stability konstrukce koncertního podia od zatížení předpětím .....	61
Obr. 39	Porovnání součinitelů kritické délky z tabulky (tab. 6) .....	62
Obr. 40	Rozsah geometrií použitých při parametrické studii .....	63
Obr. 41	Různé jemnosti sítí použité v citlivostní studii: a) 100 mm; b) 500 mm; c) 500 mm + zjemnění v rozích na 100 mm; d) 1000 mm .....	64
Obr. 42	Lokální souřadný systém oblouku .....	67
Obr. 43	První dva vlastní tvary vybočení pro samostatně stojící oblouk: C06_3-10_12000 .....	67
Obr. 44	Grafické výstupy od zatížení $6 \text{ kN/m}^2$ na typu konstrukce C06_3-10_12000 .....	68



Obr. 45	$\beta_{cr,z}$ samostatně stojících oblouků v závislosti na uložení (XXX – kl = kloubové uložení v rovině i z roviny oblouku), vzepětí „H“ a rozpětí „L“	69
Obr. 46	Uklonění počáteční roviny lanových prvků vůči hlavním obloukům	70
Obr. 47	Varianty uložení nosných oblouků	71
Obr. 48	Tvorba výpočetního modelu	72
Obr. 49	4 základní tvary vybočení komplexní membránové konstrukce	74
Obr. 50	Součinitele kritické délky $\beta_{cr}$ na samostatně stojícím zatíženém oblouku ( $\beta_{cr,y/z}$ oblouk), na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.	75
Obr. 51	Součinitele kritické délky $\beta_{cr,y}$ na samostatně stojícím zatíženém oblouku, na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.	77
Obr. 52	První vlastní tvary vybočení v rovině	78
Obr. 53	Součinitele kritické délky $\beta_{cr,z}$ na samostatně stojícím zatíženém oblouku, na konstrukci po předepnutí a na konstrukci pod plošným zatížením v závislosti na rozpětí oblouků $L$ . Oblouky byly uloženy kloubově pouze ve své rovině.	80
Obr. 54	Porovnání součinitelů kritické délky $\beta_{cr,z}$ u kloubově uložených oblouků a oblouků uložených kloubově pouze ve své rovině. Geometrie „D“ ÷ „E“, rozteč $B = 6,000\text{m}$ .	81
Obr. 55	Porovnání součinitelů kritické délky $\beta_{cr,y}$ (a) a $\beta_{cr,z}$ (b) u geometrií C06_3-10 v závislosti na tloušťce membrány a velikosti předpětí v membráně	82
Obr. 56	Příklad 3 různých tuhostí pro geometrii C06_3-10_10000	83
Obr. 57	Průřez příhradovým nosníkem	83
Obr. 58	Ztráta stability u geometrie C06_3-10_10000_Iy=1,00	85
Obr. 59	Součinitel kritické délky v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí pro oblouk a konstrukce s referenční tuhostí 1,00	86
Obr. 60	Ztráta stability u geometrie C06_3-10_10000_IPE120, axonometrické pohledy	88
Obr. 61	Ztráta stability u geometrie C06_3-10_10000_IPE120	88
Obr. 62	Součinitel kritické délky v závislosti na poměru vzepětí ku rozpětí pro geometrie „X06_x-xx_10000“	90

## 8.2 Seznam tabulek

Tab. 1	Materiálové a mechanické vlastnosti tkanin .....	19
Tab. 2	Součinitel životnosti pro příčně namáhané švy a spoje .....	27
Tab. 3	Zatěžovací kombinace a příslušný redukční součinitele pevnosti materiálu .....	28
Tab. 4	Kombinační součinitele zatížení .....	29
Tab. 5	Vliv předpětí v membráně na deformaci ve vrcholu oblouku (od symetrického zatížení) .....	57
Tab. 6	Kritické hodnoty a únosnosti ve vzpěru středového oblouku jak pouze od předpětí, tak od svislého zatížení $1 \text{ kN/m}^2$ .....	61
Tab. 7	Vliv jemnosti sítě na dobu výpočtu, napjatost a součinitel kritického zatížení .....	65
Tab. 8	Návrh podpůrných oblouků pro jednotlivé geometrie na teoretické využití $80 \div 90\%$ . Žluté buňky jsou doplněny z programu SOFiSTiK, zelné buňky jsou dále porovnávané hodnoty. ....	66
Tab. 9	Tuhost jednotlivých krajních příhradových obloukových nosníků v závislosti na osových vzdálenostech průřezů $L_{os}$ a poměru vzepětí ku rozpětí oblouků $H/L$ ; (ve žlutých buňkách jsou hodnoty odečtené z programu) .....	84
Tab. 10	Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným předpětím $PREX = PREY = 5 \text{ kN/m}'$ .....	85
Tab. 11	Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným svislým zatížením $1 \text{ kN/m}^2$ .....	87
Tab. 12	Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku z profilu IPE. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným předpětím $PREX = PREY = 5 \text{ kN/m}'$ .....	89
Tab. 13	Charakteristiky pro výpočet vzpěrné únosnosti středového zkoumaného oblouku z profilu IPE. Konstrukce zatížena pouze rovnoměrným svislým zatížením $1 \text{ kN/m}^2$ .....	89

## 9. Seznam použité literatury

### 9.1 Normy

- [1] **ČSN EN 1991-1-1**; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*; Český normalizační institut; Praha 2004
- [2] **ČSN EN 1991-1-3**; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*; Český normalizační institut; Praha 2005
- [3] **ČSN EN 1994-1-4**; *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*; Český normalizační institut; Praha 2007
- [4] **ASCE Standard**; *Tensile Membrane Structures*; American Society of Civil Engineering, Reston, Virginia 2010; ISBN 978-0-7844-1097-4; 42 str.
- [5] **ASCE Standard**; *Tensile Fabric Structures: Design, Analysis, and Construction*; American Society of Civil Engineering, Reston, Virginia 2013; ISBN 978-0-7844-1289-3; 173 str.

### 9.2 Publikace

- [6] **Pauletti, R.M.O**, Brasil, R.M.L.R.F. ; *Design and analysis of tension structures using general purpose finite element programs. Proc. Textile Composites and Inflatable Structures*, CIMNE, Barcelona, 2003, 6 s.
- [7] **Kulbach Valdek (DSc, Emer Prof)**; *Cable structures - design and static analysis*; Estonian Academy Publishers; Tallinn, 2007; ISBN: 978-9985-50-396-6; 224 str.
- [8] **Wakefield, D.S.** ; *Engineering analysis of tension structures: theory and practice*. Eng. Structures, Vol. 21, No. 8, 1999, s. 680-690
- [9] **Pauletti, R.M.O**, Brasil, R.M.L.R.F. ; *Structural analysis and construction of the membrane roof of the Memorial dos Povos de Belém do Pará*. 2<sup>nd</sup> Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras, Caracas, 2005, 10 s.
- [10] **Seidel Michael** ; *Tensile Surface Structures – a practical guide to cable and membrane construction*; Institut für Architektur und

- Entwerfen; Technische Universität sien; Berlin 2009; ISBN: 978-3-433-02922-0; 229 str.
- [11] **Lewis, W. J.** ; *Tension structures – Form and behaviour*. Thomas Telford Publishing, 2003, 256 s.
- [12] **Jáuregui Valentín Gómez** ; *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*; PUbliCan – Ediciones de la Universidad de Cantabria 2010; ISBN: 978-84-8102-575-0; 296 str.
- [13] **Kadlčák Jaroslav** ; *Statics of Suspension Cable Roofs*. Balkema Publishers, 1995, 295 s.
- [14] **Hirnšal Zdeněk** ; *Textilní architektura*. Časopis Fasády; Leden 2005; str. 24 – 27; Webové stránky: <http://www.archtex.cz/clanky/fasady.pdf>
- [15] **Minami H.; Motobayashi S.** ; *Biaxial deformation properte of coated plain-weave fabrics*; Proceeding of International Symposium on Architectural Fabric Structures; Orlando 1984; Vol.1
- [16] **Membrane Structure Association of Japan** ; *Testing method for elastic constants of membrane materials*; Standard, Tokyo 1995
- [17] **Fajman Petr** ; *Modelování a výpočty lanových a plachtových konstrukcí*, časopis Ocelové konstrukce, Praha 5/2001, ISSN 1212-7388; str. 25 – 28
- [18] **Hüttner Miloš ; Fajman Petr** ; *Statická analýza lanových konstrukcí deformační metodou*; Stavební Obzor – výběr 2/2012; ISSN 1210-4027; str. 56 – 62
- [19] **Bittnar Zdeněk.; Šejnoha Jiří.** ; Numerické metody mechaniky 2; Vydavatelství ČVUT 1992; ISBN 80-01-00901-7; str. 121 – 202
- [20] **Jermoljev David** ; *Implementace nekovových membrán do ocelových konstrukcí – Doktorská disertace*; České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební; Praha 2014; 113 str.
- [21] **Křížan Jiří** ; *Možnosti využití CFD analýzy ve stavebnictví*; časopis Konstrukce, 5/2012, ISSN 1213-8762; str. 13 – 15
- [22] **Malerba, P.G.; Patlou, M.; Quagliaroli, M.** ; *An Extended Force Density Method for the form Finding of cable systems with new forms*; Structural Engineering and Mechanics, Vol. 42, No. 2 (2012), str. 191 – 210
- [23] **Laboratorium BLUM Stuttgart** ; *Report on biaxial test Précontraint 702*; Webové stránky <http://arcae.net/ARC1010-Pisco/>; 2005
- [24] **C. Galliot, R. H. Luchsinger** ; *A simple model describing the non/linear biaxial tensile behaviour of PVC/coated polyester fabric*

*for use in finite element analysis*; Composite structure, Vol. 90, No. 4, 2009, s. 438-447

- [25] **C. Galliot, R. H. Luchsinger** ; *Non-linear properties of PVC-coated fabric used in tensairity structures*; ICCM17, 27-31 July 2009, Edinburgh, UK, 10str.
- [26] **SOFiSTiK AG**; *Manual book, program ASE*; Oberschleissheim, Germany; <http://www.sofistik.com/>
- [27] **D.W.Hodges**; *Non-linear inplane deformation and buckling of rings and high arches*; International Journal of Non-Linear Mechanics 34; 1999; str. 723—737
- [28] **M.A. Bradford, Y.-L. Pi**; *Design of steel arches against in-plane stability*; Advances in Steel Structures, Vol.I; 2002 published by Elsevier Science Ltd., 10str.
- [29] **M.A. Bradford, Y.-L. Pi, B. Uy**; *In-plane stability of arches*; International Journals of Solids and Structures 39, 2002, str. 105-125
- [30] **S. Timoshenko, J.M.Gere**; *Theory of Elastic Stability*; New York 1961
- [31] **G.J. Simitses**; *An introduction to the elastic stability of Structures*; Prentice-Wall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1976

### **9.3 Webové stránky**

- [1] <http://blog.construmatica.com>
- [2] [www.flickr.com](http://www.flickr.com)
- [3] [www.canobbio.com](http://www.canobbio.com)
- [4] <http://www.carlstahl-architektur.de/en/news.html>
- [5] <http://www.ferrari-architecture.fr/Lightweight-composite-textiles?langue=EN>
- [6] <http://www.officium.de/>
- [7] <http://www.to-experts.com/?lang=en>

## 10. Vlastní publikace autora

1. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Steel arch stabilized by a textile membrane*; In: Applied Mechanics and Materials. 2016, vol. 821, p. 733-740. ISSN 1662-7482.
2. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Behaviour of steel arch stabilized by a textile membrane*; In: 2nd International Conference Innovative Materials, Structures and Technologies - Book of Abstracts. Riga: Riga Technical University, 2015, p. 118. ISBN 78-9934-10-742-9.
3. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Behaviour of steel arch stabilized by a textile membrane*; In: The 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies". Bristol: IOP Publishing Ltd, 2015, p. 1-7. ISSN 1757-8981.
4. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Influence of textile membrane on stability of supporting steel arch*; In: Engineering mechanics 2015. Prague: Institute of Theoretical and Applied Mechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2015, p. 312-313. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-86246-42-0.
5. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Stabilization Effect of a Textile Membrane on Steel Tube Supporting Arch*; In: Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space and Composite Structures. Singapore: CI-PREMIERE PTE LTD, 2014, p. 361-367. ISBN 978-981-09-0077-9
6. **Svoboda, O.:** *Vliv předpětí v membráně na stabilizaci štíhlého podpůrného ocelového oblouku*; In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 20.5. a 22.9. 2015. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2015, s. 59-64. ISBN 978-80-01-05741-4.
7. **Svoboda, O. - Macháček, J.:** *Behaviour of Steel Arch in Interaction with Non-metallic Membrane*; In: Eurosteel 2014. Brussels: ECCS

European Convention for Constructional Steelwork, 2014, p. 981-982.  
ISBN 978-92-9147-121-8.

8. **Svoboda, O.:** *Stabilizace ocelové konstrukce nekovou membránou*; In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2014, s. 39-42. ISBN 978-80-01-05522-9.
9. **Svoboda, O.:** *Interaction of nonmetallic membrane and steel structure*; In: Ninth International PhD&DLA Symposium Abstracts book. 2013, p. 151. ISBN 978-963-7298-54-7.
10. **Svoboda, O.:** *Interakce nekovových membrán a ocelové konstrukce*; In: Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2013, čl. č. 6, s. 17-18. ISBN 978-80-01-05289-1.

## **11. Přílohy**

**11.1** - Přílohy k experimentální části

**11.2** - Přílohy k výpočtové části parametrické studie

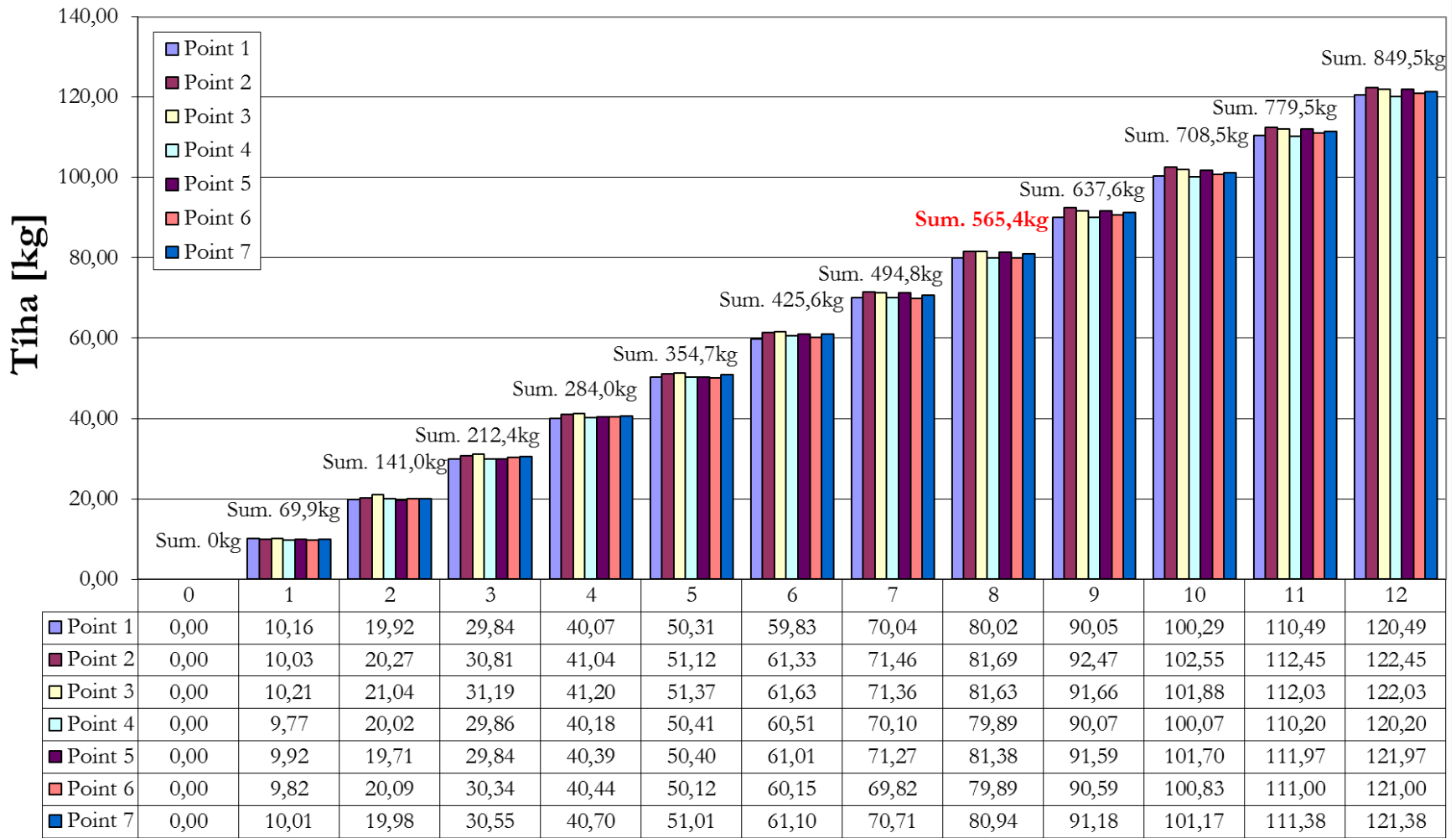
**11.3** - Přílohy k programování v programu SOFiSTiK



11.1.1 - Symetrické zatěžování oblouku bez membrány („mereni\_3“) a ekvivalentní s membránou („mereni\_5“)

Body zatěžování	1		2		3		4		5		6		7		Suma zatížení			
Postup zatěžování	1		3		2		4		2		3		1					
	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	zatěžování	odtěžování
Zatěžovací kroky	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]		
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	mereni_5_0003	mereni_5_0021
1	0,100	0,100	0,098	0,098	0,100	0,100	0,096	0,096	0,097	0,097	0,096	0,096	0,098	0,098	0,686	0,686	mereni_5_0004	
2	0,096	0,195	0,100	0,199	0,106	0,206	0,101	0,196	0,096	0,193	0,101	0,197	0,098	0,196	0,698	1,384	mereni_5_0005	mereni_5_0020
3	0,097	0,293	0,103	0,302	0,100	0,306	0,097	0,293	0,099	0,293	0,101	0,298	0,104	0,300	0,700	2,084	mereni_5_0006	
4	0,100	0,393	0,100	0,403	0,098	0,404	0,101	0,394	0,103	0,396	0,099	0,397	0,100	0,399	0,702	2,786	mereni_5_0007	mereni_5_0019
5	0,100	0,494	0,099	0,501	0,100	0,504	0,100	0,495	0,098	0,494	0,095	0,492	0,101	0,500	0,694	3,480	mereni_5_0008	
6	0,093	0,587	0,100	0,602	0,101	0,605	0,099	0,594	0,104	0,599	0,098	0,590	0,099	0,599	0,695	4,175	mereni_5_0009	mereni_5_0018
7	0,100	0,687	0,099	0,701	0,095	0,700	0,094	0,688	0,101	0,699	0,095	0,685	0,094	0,694	0,679	4,854	mereni_5_0010	
8	0,098	0,785	0,100	0,801	0,101	0,801	0,096	0,784	0,099	0,798	0,099	0,784	0,100	0,794	0,693	5,547	mereni_5_0011	mereni_5_0017
9	0,098	0,883	0,106	0,907	0,098	0,899	0,100	0,884	0,100	0,898	0,105	0,889	0,100	0,894	0,708	6,255	mereni_5_0012	
10	0,100	0,984	0,099	1,006	0,100	0,999	0,098	0,982	0,099	0,998	0,100	0,989	0,098	0,992	0,695	6,950	mereni_5_0013	mereni_5_0016
11	0,100	1,084	0,097	1,103	0,100	1,099	0,099	1,081	0,101	1,098	0,100	1,089	0,100	1,093	0,697	7,647	mereni_5_0014	
12	0,098	1,182	0,098	1,201	0,098	1,197	0,098	1,179	0,098	1,197	0,098	1,187	0,098	1,191	0,687	8,334	mereni_5_0015	

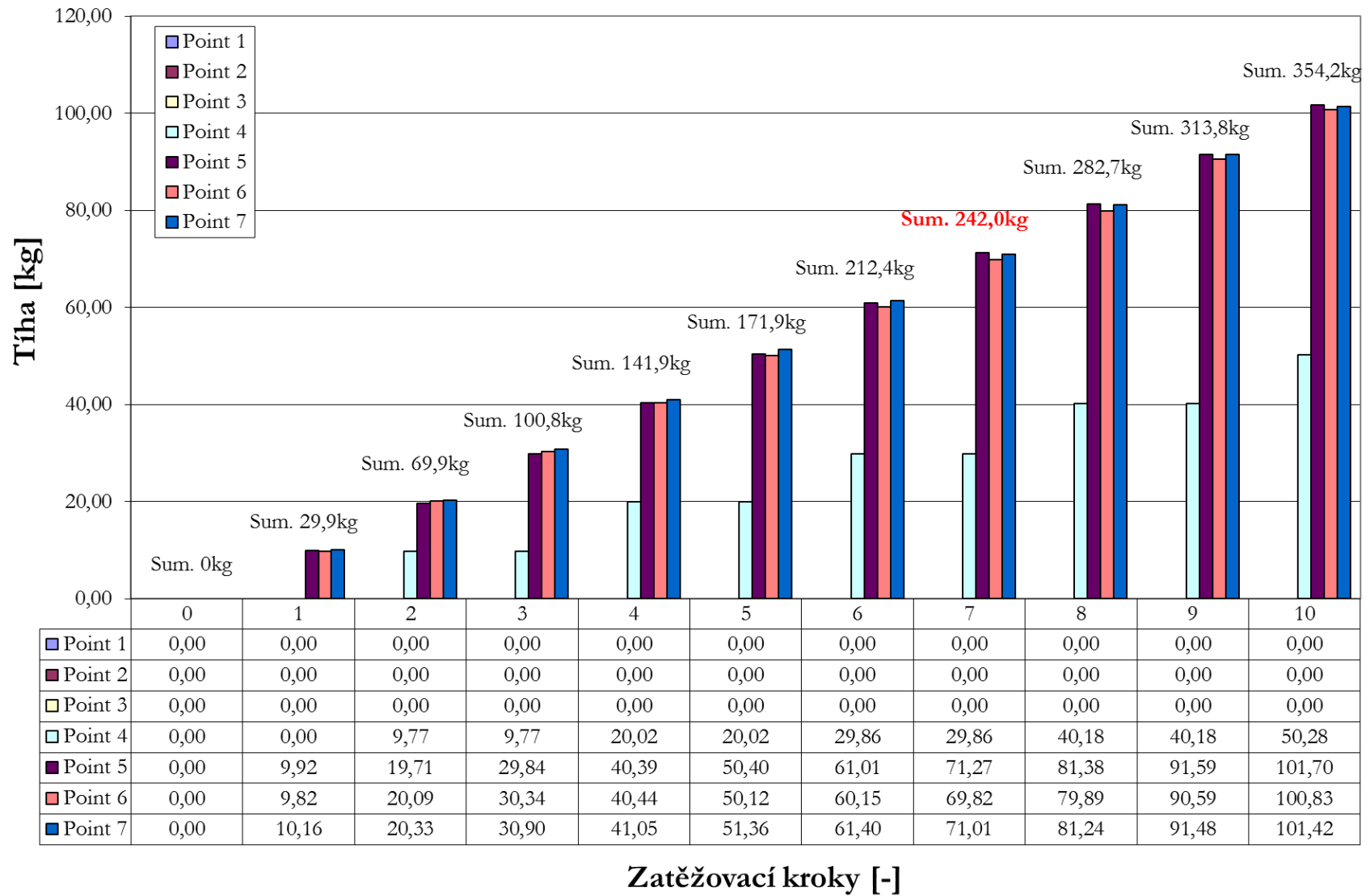
Červeně zvýrazněno ukončení zatěžování pro samostatný oblouk bez podpory membrány.



Zatěžovací kroky [-]

11.1.2 - Nesymetrické zatěžování oblouku bez membrány („mereni\_8“) a ekvivalentní s membránou („mereni\_6“)

Body zatěžování	1		2		3		4		5		6		7		Suma zatížení			
Postup zatěžování	1		3		2		4		2		3		1					
	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem	přírůstek	celkem		
Zatěžovací kroky	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]		
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	mereni_6_0000	mereni_6_0014
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,992	0,992	0,982	0,982	1,016	1,016	2,990	2,990		
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,977	0,977	0,979	1,971	1,027	2,009	1,017	2,033	4,000	6,990	mereni_6_0001	mereni_6_0013
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,977	0,977	1,013	2,984	1,025	3,034	1,057	3,090	3,095	10,085	mereni_6_0002	
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,025	2,002	1,055	4,039	1,010	4,044	1,015	4,105	4,105	14,190	mereni_6_0003	mereni_6_0012
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,002	1,001	5,040	0,968	5,012	1,031	5,136	3,000	17,190	mereni_6_0004	
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,984	2,986	1,061	6,101	1,003	6,015	1,004	6,140	4,052	21,242	mereni_6_0005	mereni_6_0011
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,986	1,026	7,127	0,967	6,982	0,961	7,101	2,954	24,196	mereni_6_0006	
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,032	4,018	1,011	8,138	1,007	7,989	1,023	8,124	4,073	28,269	mereni_6_0007	mereni_6_0010
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,018	1,021	9,159	1,070	9,059	1,024	9,148	3,115	31,384	mereni_6_0008	
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,010	5,028	1,011	10,170	1,024	10,083	0,994	10,142	4,039	35,423	mereni_6_0009	
<b>Poznámky:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jednostranné zatěžování od samého začátku</li> <li>- v prostředním bodě byly přidávány přírůstky vždy v sudých zatěžovacích krocích</li> <li>- první čtení bylo nulové, druhé po druhém přitěžovacím kroku</li> <li>- čtení při odlehčování byla prováděna po dvou zatěžovacích krocích</li> </ul>																	









číslo měření [-]	krokl [-]	total load [kN]	Tenzo 1 um/m	Tenzo 2 um/m	Tenzo 3 um/m	Tenzo 4 um/m	Tenzo 5 um/m	Tenzo 6 um/m	Tenzo 7 um/m	Tenzo 8 um/m	Tenzo 9 um/m	Tenzo 10 um/m	Tenzo 11 um/m	Tenzo 12 um/m	Bod 2			Bod 4 = střed			Bod 6		
															uX mm	uZ mm	uY mm	Pot 1 - U mm	Pot 2 - U mm	Pot 3 - U mm	Pot 4 - U mm	Pot 5 - U mm	Pot 6 - U mm
mereni_3_0000	0	0,00	0,962869	0,017929	-1,7341		-0,93908	0,293135	-2,14194	0,053825	1,058854	-1,22572	0,945683	0,346792115	0,000818	0,001948	0,001227	-0,00059	0,000628	-0,00056	-0,00132	-1,1E-05	
mereni_3_0001	1	0,69	15,07642	-108,979	-11,7962		-7,70511	-62,1511	-18,1015	43,47316	-15,6082	49,20268	-1,8609	-75,19627109	-0,51276	-0,28718	0,531802	-1,4152	-1,09157	-0,60767	0,313919	-0,06343	
mereni_3_0002	2	1,37	27,74121	-217,001	-20,0672		-13,2215	-125,213	-35,7553	87,55784	-34,6839	103,6311	-1,55098	-157,8450013	-1,26165	-0,60058	1,316031	-3,12727	-2,4418	-1,48309	0,465704	-0,24605	
mereni_3_0003	3	2,07	37,97335	-328,408	-24,1358		-15,9231	-188,475	-56,1432	132,2174	-57,0641	155,671	2,510691	-234,1161411	-1,91547	-0,90418	2,408714	-4,89762	-4,26383	-2,53892	0,777816	-0,29189	
mereni_3_0004	4	2,75	47,10563	-456,941	-21,8715		-15,2033	-259,437	-81,4576	183,135	-87,0027	204,7354	12,55864	-310,8713382	-2,77158	-1,59165	3,900419	-6,89226	-6,64101	-4,07981	1,292139	-0,17592	
mereni_3_0005	5	3,45	42,71057	-580,59	-6,18422		-5,25103	-326,538	-116,005	229,9488	-130,431	249,9648	36,14513	-391,1827532	-3,67971	-2,17563	6,373351	-9,14337	-10,5505	-6,57087	1,959686	-0,00656	
mereni_3_0006	6	4,15	9,927713	-694,169	40,03553		22,42316	-394,521	-169,929	275,8229	-201,52	302,0543	87,13241	-484,0563594	-1,64129	-2,55858	7,883032	-12,0096	-17,66	-10,8369	2,499202	0,062732	
mereni_3_0007	7	4,85	-93,9146	-785,524	164,1813		101,8107	-455,806	-279,211	311,0633	-348,02	345,8918	218,1617	-587,1848031	-2,28118	-2,28199	17,26114	-17,2731	-33,4064	-20,0853	3,981979	0,357453	
mereni_3_0008	8	5,56	-446,256	-808,751	560,3663		367,3585	-500,686	-589,566	312,9595	-770,131	360,2806	623,9556	-727,6135152	-1,74068	5,200978	46,00371	-35,1256	-79,6625	-48,6141	12,09345	2,513262	
mereni_3_0009	9	4,85	-109,795	-781,635	182,1402		112,7304	-456,393	-299,89	310,2447	-364,935	337,1065	232,1038	-579,6211464	-2,34116	-2,15448	18,3446	-17,1168	-35,4968	-18,1624	4,246132	0,469312	
mereni_3_0010	10	4,15	-0,25044	-690,135	50,82331		29,43216	-395,796	-189,383	276,421	-211,386	292,2853	96,27039	-474,9108656	-1,66236	-2,54301	8,336587	-11,5329	-19,0948	-8,5772	2,650222	0,165211	
mereni_3_0011	11	3,45	33,82098	-576,631	2,287699		-0,44185	-328,587	-133,787	231,2756	-139,027	237,8338	42,83377	-381,3922358	-0,84686	-2,12351	3,868048	-8,59815	-11,8682	-3,99344	2,008015	0,040735	
mereni_3_0012	12	2,75	40,05972	-453,392	-15,8481		-12,2	-262,017	-98,1342	185,489	-93,9828	191,1503	16,41379	-300,1326213	0,098143	-1,29282	1,106603	-6,44391	-7,73888	-1,4413	1,359033	-0,17211	
mereni_3_0013	13	2,07	33,01	-325,104	-20,5753		-14,1126	-191,201	-71,3586	135,2123	-61,9565	142,2959	3,862302	-223,1665228	1,039187	-0,64145	-0,59242	-4,46571	-4,99431	0,265919	0,795185	-0,27998	
mereni_3_0014	14	1,37	24,38569	-213,794	-18,1221		-11,9852	-127,211	-50,2839	90,781	-37,2356	92,29137	-1,40281	-146,3066569	1,762096	-0,2824	-1,76079	-2,62512	-3,57444	1,386387	0,457401	-0,22621	
mereni_3_0015	15	0,69	13,10073	-105,947	-11,8925		-7,16507	-64,2903	-32,2581	46,39018	-17,3673	40,05377	-2,05707	-64,78592595	2,308332	0,064274	-2,5683	-0,94422	-1,66408	2,298812	0,287822	-0,10245	
mereni_3_0016	16	0,00	-0,05233	3,679274	-1,323		-0,82992	-1,22439	-15,7953	2,20159	0,089733	-7,15501	0,130929	9,8917965	3,107002	0,570885	-3,02151	0,716903	-0,58397	3,015018	-0,10536	-0,15529	

- Barevně zvýrazněné jsou tenzometry umístěné na samotné membráně, kde je zřejmé, že vlastní předpínání má na tuto konstrukci větší vliv, než samotné zatěžování



### 11.2.1 - Zdrojové tabulky k základní parametrické studii

Oblouky jsou uloženy kloubově ve své rovině a vetknutě z roviny. V membráně je rovnoměrné předpětí 5 kN/m'

Světle žluté buňky jsou hodnoty odečtené z programu (oranžové buňky znamenají, že hodnota nebyla dopočítána)

Zelené buňky jsou hodnoty porovnávané ve studii

Světle zelené buňky znamenají, že výpočet konvergoval k plnému zatížení, v jiném případě je uveden součinitel maximálního možného zatížení

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	$\eta_y$	$\eta_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
A04_1-10_06000_předpětí	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	16,3	16,98			276,8	0,0	2	X	0,93	X	212,5	X	535,4	226,2	X	7,2%	X
A04_1-10_06000_membrána	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	43,5	6,96			302,8	0,0	2	X	0,89	X	203,2	X	535,4	243,0	X	17,9%	X
A04_1-10_08000_předpětí	TR 108x6,3	1/10	8 212	18,9	18,86			356,5	0,0	2	X	0,95	X	216,4	X	714,6	293,1	X	6,4%	X
A04_1-10_08000_membrána	TR 108x6,3	1/10	8 212	57,7	6,76			390,1	0,0	2	X	0,91	X	206,8	X	714,6	315,4	X	18,3%	X
A04_1-10_10000_předpětí	TR 133x6,3	1/10	10 265	20,9	20,67			432,0	0,0	2	X	0,96	X	219,4	X	890,2	357,0	X	5,9%	X
A04_1-10_10000_membrána	TR 133x6,3	1/10	10 265	71,7	6,61			473,9	0,0	2	X	0,92	X	209,4	X	890,2	385,1	X	18,6%	X
A04_1-10_12000_předpětí	TR 159x6,3	1/10	12 317	22,8	22,81			520,1	0,0	2	X	0,96	X	219,5	X	1072,9	429,8	X	5,3%	X
A04_1-10_12000_membrána	TR 159x6,3	1/10	12 317	85,7	6,65			569,9	0,0	2	X	0,92	X	209,7	X	1072,9	463,3	X	18,5%	X
A04_1-10_14000_předpětí	TR 194x5,6	1/10	14 370	24,3	25,99			631,6	0,0	2	X	0,97	X	208,6	X	1176,6	512,4	X	4,7%	X
A04_1-10_14000_membrána	TR 194x5,6	1/10	14 370	99,3	6,97			692,1	0,0	2	X	0,92	X	199,3	X	1176,6	550,9	X	18,0%	X
A04_1-10_16000_předpětí	TR 194x9	1/10	16 423	28,7	25,77			739,6	0,0	2	X	0,97	X	242,1	X	1856,9	629,4	X	4,6%	X
A04_1-10_16000_membrána	TR 194x9	1/10	16 423	116,8	6,95			811,8	0,0	2	X	0,92	X	231,1	X	1856,9	681,9	X	17,1%	X
A04_1-10_18000_předpětí	TR 219x9	1/10	18 476	31,4	27,17			853,1	0,0	2	X	0,97	X	240,2	X	2107,9	724,4	X	4,3%	X
A04_1-10_18000_membrána	TR 219x9	1/10	18 476	132,0	7,10			937,2	0,0	2	X	0,92	X	229,2	X	2107,9	785,3	X	16,8%	X
A04_1-10_20000_předpětí	TR 245x8	1/10	20 529	32,9	26,93			886,0	0,0	2	X	0,96	X	236,1	X	2114,5	748,8	X	4,4%	X
A04_1-10_20000_membrána	TR 245x8	1/10	20 529	145,5	6,70			974,9	0,0	2	X	0,92	X	225,1	X	2114,5	812,3	X	17,9%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
A06_1-10_06000_oblouk	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	47,8	5,02	4,78		240,0	228,5	2	1	1,00	0,51	228,3	117,0	535,4	200,8	192,6	23,8%	24,8%
A06_1-10_06000_předpětí	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	19,1	15,10			288,4	0,0	2	X	0,91	X	208,2	X	535,4	233,8	X	8,2%	X
A06_1-10_06000_membrána	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	61,3	5,38			329,8	0,0	2	X	0,85	X	194,7	X	535,4	259,7	X	23,6%	X
A06_1-10_08000_oblouk	TR 108x6,3	1/10	8 212	64,2	4,99	4,75		320,4	305,0	2	1	1,00	0,51	228,2	117,0	714,6	268,1	257,1	23,9%	25,0%
A06_1-10_08000_předpětí	TR 108x6,3	1/10	8 212	23,5	15,87			372,9	0,0	2	X	0,93	X	211,5	X	714,6	304,2	X	7,7%	X
A06_1-10_08000_membrána	TR 108x6,3	1/10	8 212	83,0	5,14			426,6	0,0	2	X	0,87	X	197,8	X	714,6	338,4	X	24,5%	X
A06_1-10_10000_oblouk	TR 133x6,3	1/10	10 265	80,7	4,90	4,67		395,4	376,9	2	1	1,00	0,51	229,3	117,4	890,2	331,4	318,1	24,4%	25,4%
A06_1-10_10000_předpětí	TR 133x6,3	1/10	10 265	26,9	16,66			448,2	0,0	2	X	0,94	X	215,4	X	890,2	368,0	X	7,3%	X
A06_1-10_10000_membrána	TR 133x6,3	1/10	10 265	103,9	4,92			511,2	0,0	2	X	0,88	X	201,7	X	890,2	409,0	X	25,4%	X
A06_1-10_12000_oblouk	TR 159x6,3	1/10	12 317	97,5	4,93	4,70		480,7	458,3	2	1	1,00	0,51	228,3	116,9	1072,9	402,3	386,2	24,2%	25,2%
A06_1-10_12000_předpětí	TR 159x6,3	1/10	12 317	29,8	17,88			532,8	0,0	2	X	0,95	X	216,9	X	1072,9	438,5	X	6,8%	X
A06_1-10_12000_membrána	TR 159x6,3	1/10	12 317	124,5	4,86			605,1	0,0	2	X	0,89	X	203,5	X	1072,9	486,0	X	25,6%	X
A06_1-10_14000_oblouk	TR 194x5,6	1/10	14 370	114,2	5,16	4,92		589,3	561,9	2	1	1,00	0,51	215,9	110,6	1176,6	484,3	465,5	23,6%	24,5%
A06_1-10_14000_předpětí	TR 194x5,6	1/10	14 370	32,1	20,01			642,3	0,0	2	X	0,96	X	206,8	X	1176,6	519,4	X	6,2%	X
A06_1-10_14000_membrána	TR 194x5,6	1/10	14 370	144,4	5,01			723,4	0,0	2	X	0,90	X	194,9	X	1176,6	570,0	X	25,3%	X
A06_1-10_16000_oblouk	TR 194x9	1/10	16 423	133,8	5,15	4,91		689,1	657,0	2	1	1,00	0,51	250,9	128,5	1856,9	591,5	567,1	22,6%	23,6%
A06_1-10_16000_předpětí	TR 194x9	1/10	16 423	37,0	20,13			744,8	0,0	2	X	0,96	X	241,3	X	1856,9	633,2	X	5,8%	X
A06_1-10_16000_membrána	TR 194x9	1/10	16 423	167,9	4,98			836,1	0,0	2	X	0,91	X	227,7	X	1856,9	699,3	X	24,0%	X
A06_1-10_18000_oblouk	TR 219x9	1/10	18 476	151,9	5,24	5,00		796,0	759,5	2	1	1,00	0,51	248,7	127,3	2107,9	681,9	654,3	22,3%	23,2%
A06_1-10_18000_předpětí	TR 219x9	1/10	18 476	40,2	21,32			857,1	0,0	2	X	0,96	X	239,7	X	2107,9	727,3	X	5,5%	X
A06_1-10_18000_membrána	TR 219x9	1/10	18 476	189,3	5,06			957,9	0,0	2	X	0,91	X	226,7	X	2107,9	800,0	X	23,7%	X
A06_1-10_20000_oblouk	TR 245x8	1/10	20 529	168,8	4,88	4,65		823,7	784,9	2	1	1,00	0,51	244,8	125,4	2114,5	703,0	673,8	24,0%	25,1%
A06_1-10_20000_předpětí	TR 245x8	1/10	20 529	42,0	21,11			886,6	0,0	2	X	0,96	X	236,0	X	2114,5	749,3	X	5,6%	X
A06_1-10_20000_membrána	TR 245x8	1/10	20 529	208,9	4,74			990,2	0,0	2	X	0,91	X	223,3	X	2114,5	823,0	X	25,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
A08_1-10_06000_oblouk	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	47,8	5,02	4,78		240,0	228,5	2	1	1,00	0,51	228,3	117,0	535,4	200,8	192,6	23,8%	24,8%
A08_1-10_06000_předpětí	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	20,3	14,44			293,1	0,0	2	X	0,91	X	206,5	X	535,4	236,9	X	8,6%	X
A08_1-10_06000_membrána	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	75,3	4,58			344,9	0,0	2	X	0,84	X	190,4	X	535,4	268,6	X	28,0%	X
A08_1-10_08000_oblouk	TR 108x6,3	1/10	8 212	64,2	4,99	4,75		320,4	305,0	2	1	1,00	0,51	228,2	117,0	714,6	268,1	257,1	23,9%	25,0%
A08_1-10_08000_předpětí	TR 108x6,3	1/10	8 212	25,9	14,76			382,3	0,0	2	X	0,92	X	208,9	X	714,6	310,3	X	8,3%	X
A08_1-10_08000_membrána	TR 108x6,3	1/10	8 212	106,2	4,26			452,4	0,0	2	X	0,84	X	192,1	X	714,6	353,9	X	30,0%	X
A08_1-10_10000_oblouk	TR 133x6,3	1/10	10 265	80,7	4,90	4,67		395,4	376,9	2	1	1,00	0,51	229,3	117,4	890,2	331,4	318,1	24,4%	25,4%
A08_1-10_10000_předpětí	TR 133x6,3	1/10	10 265	30,7	15,07			462,6	0,0	2	X	0,93	X	212,0	X	890,2	377,7	X	8,1%	X
A08_1-10_10000_membrána	TR 133x6,3	1/10	10 265	134,8	4,05			545,9	0,0	2	X	0,85	X	195,1	X	890,2	430,4	X	31,3%	X
A08_1-10_12000_oblouk	TR 159x6,3	1/10	12 317	97,5	4,93	4,70		480,7	458,3	2	1	1,00	0,51	228,3	116,9	1072,9	402,3	386,2	24,2%	25,2%
A08_1-10_12000_předpětí	TR 159x6,3	1/10	12 317	34,8	15,77			548,8	0,0	2	X	0,94	X	213,7	X	1072,9	449,3	X	7,7%	X
A08_1-10_12000_membrána	TR 159x6,3	1/10	12 317	162,6	3,96			643,9	0,0	2	X	0,87	X	197,3	X	1072,9	510,2	X	31,9%	X
A08_1-10_14000_oblouk	TR 194x5,6	1/10	14 370	114,2	5,16	4,92		589,3	561,9	2	1	1,00	0,51	215,9	110,6	1176,6	484,3	465,5	23,6%	24,5%
A08_1-10_14000_předpětí	TR 194x5,6	1/10	14 370	38,2	17,24			658,6	0,0	2	X	0,95	X	204,3	X	1176,6	529,8	X	7,2%	X
A08_1-10_14000_membrána	TR 194x5,6	1/10	14 370	188,8	4,03			760,9	0,0	2	X	0,88	X	190,0	X	1176,6	592,0	X	31,9%	X
A08_1-10_16000_oblouk	TR 194x9	1/10	16 423	133,8	5,15	4,91		689,1	657,0	2	1	1,00	0,51	250,9	128,5	1856,9	591,5	567,1	22,6%	23,6%
A08_1-10_16000_předpětí	TR 194x9	1/10	16 423	43,8	17,30			757,7	0,0	2	X	0,95	X	239,2	X	1856,9	642,7	X	6,8%	X
A08_1-10_16000_membrána	TR 194x9	1/10	16 423	218,8	3,99			873,0	0,0	2	X	0,89	X	222,9	X	1856,9	725,2	X	30,2%	X
A08_1-10_18000_oblouk	TR 219x9	1/10	18 476	151,9	5,24	5,00		796,0	759,5	2	1	1,00	0,51	248,7	127,3	2107,9	681,9	654,3	22,3%	23,2%
A08_1-10_18000_předpětí	TR 219x9	1/10	18 476	47,6	18,21			866,8	0,0	2	X	0,96	X	238,3	X	2107,9	734,5	X	6,5%	X
A08_1-10_18000_membrána	TR 219x9	1/10	18 476	246,4	4,02			990,5	0,0	2	X	0,90	X	222,9	X	2107,9	822,9	X	29,9%	X
A08_1-10_20000_oblouk	TR 245x8	1/10	20 529	168,8	4,88	4,65		823,7	784,9	2	1	1,00	0,51	244,8	125,4	2114,5	703,0	673,8	24,0%	25,1%
A08_1-10_20000_předpětí	TR 245x8	1/10	20 529	50,0	17,93			896,5	0,0	2	X	0,96	X	234,7	X	2114,5	756,4	X	6,6%	X
A08_1-10_20000_membrána	TR 245x8	1/10	20 529	272,1	3,75			1020,4	0,0	2	X	0,90	X	220,0	X	2114,5	844,0	X	32,2%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
A10_1-10_06000_oblouk	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	47,8	5,02	4,78		240,0	228,5	2	1	1,00	0,51	228,3	117,0	535,4	200,8	192,6	23,8%	24,8%
A10_1-10_06000_předpětí	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	20,8	14,16			294,5	0,0	2	X	0,90	X	206,0	X	535,4	237,8	X	8,7%	X
A10_1-10_06000_membrána	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	83,0	4,26			353,6	0,0	2	X	0,83	X	188,0	X	535,4	273,6	X	30,3%	X
A10_1-10_08000_oblouk	TR 108x6,3	1/10	8 212	64,2	4,99	4,75		320,4	305,0	2	1	1,00	0,51	228,2	117,0	714,6	268,1	257,1	23,9%	25,0%
A10_1-10_08000_předpětí	TR 108x6,3	1/10	8 212	27,2	14,27			388,1	0,0	2	X	0,91	X	207,3	X	714,6	314,2	X	8,7%	X
A10_1-10_08000_membrána	TR 108x6,3	1/10	8 212	123,8	3,78			468,0	0,0	2	X	0,83	X	188,8	X	714,6	362,9	X	34,1%	X
A10_1-10_10000_oblouk	TR 133x6,3	1/10	10 265	80,7	4,90	4,67		395,4	376,9	2	1	1,00	0,51	229,3	117,4	890,2	331,4	318,1	24,4%	25,4%
A10_1-10_10000_předpětí	TR 133x6,3	1/10	10 265	33,1	14,33			474,3	0,0	2	X	0,91	X	209,4	X	890,2	385,4	X	8,6%	X
A10_1-10_10000_membrána	TR 133x6,3	1/10	10 265	161,9	3,52			569,9	0,0	2	X	0,83	X	191,0	X	890,2	444,6	X	36,4%	X
A10_1-10_12000_oblouk	TR 159x6,3	1/10	12 317	97,5	4,93	4,70		480,7	458,3	2	1	1,00	0,51	228,3	116,9	1072,9	402,3	386,2	24,2%	25,2%
A10_1-10_12000_předpětí	TR 159x6,3	1/10	12 317	38,2	14,74			563,1	0,0	2	X	0,93	X	210,9	X	1072,9	458,8	X	8,3%	X
A10_1-10_12000_membrána	TR 159x6,3	1/10	12 317	197,8	3,42			676,5	0,0	2	X	0,84	X	192,5	X	1072,9	529,7	X	37,3%	X
A10_1-10_14000_oblouk	TR 194x5,6	1/10	14 370	114,2	5,16	4,92		589,3	561,9	2	1	1,00	0,51	215,9	110,6	1176,6	484,3	465,5	23,6%	24,5%
A10_1-10_14000_předpětí	TR 194x5,6	1/10	14 370	42,6	15,83			674,4	0,0	2	X	0,94	X	201,9	X	1176,6	539,8	X	7,9%	X
A10_1-10_14000_membrána	TR 194x5,6	1/10	14 370	231,4	3,46			800,6	0,0	2	X	0,86	X	185,3	X	1176,6	614,6	X	37,7%	X
A10_1-10_16000_oblouk	TR 194x9	1/10	16 423	133,8	5,15	4,91		689,1	657,0	2	1	1,00	0,51	250,9	128,5	1856,9	591,5	567,1	22,6%	23,6%
A10_1-10_16000_předpětí	TR 194x9	1/10	16 423	49,2	15,77			775,9	0,0	2	X	0,94	X	236,4	X	1856,9	656,0	X	7,5%	X
A10_1-10_16000_membrána	TR 194x9	1/10	16 423	268,3	3,40			912,2	0,0	2	X	0,87	X	218,0	X	1856,9	752,2	X	35,7%	X
A10_1-10_18000_oblouk	TR 219x9	1/10	18 476	151,9	5,24	5,00		796,0	759,5	2	1	1,00	0,51	248,7	127,3	2107,9	681,9	654,3	22,3%	23,2%
A10_1-10_18000_předpětí	TR 219x9	1/10	18 476	53,7	16,44			882,8	0,0	2	X	0,95	X	236,1	X	2107,9	746,2	X	7,2%	X
A10_1-10_18000_membrána	TR 219x9	1/10	18 476	289,5	3,56		0,95	1030,6	0,0	2	X	0,88	X	218,5	X	2107,9	850,5	X	34,0%	X
A10_1-10_20000_oblouk	TR 245x8	1/10	20 529	168,8	4,88	4,65		823,7	784,9	2	1	1,00	0,51	244,8	125,4	2114,5	703,0	673,8	24,0%	25,1%
A10_1-10_20000_předpětí	TR 245x8	1/10	20 529	56,7	16,05			910,0	0,0	2	X	0,95	X	232,9	X	2114,5	766,2	X	7,4%	X
A10_1-10_20000_membrána	TR 245x8	1/10	20 529	305,7	3,45		0,90	1054,7	0,0	2	X	0,88	X	216,4	X	2114,5	867,4	X	35,2%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
B04_1-5_06000_oblouk	TR 76x4,5	1/5	6 621	26,5	4,58	3,92		121,4	103,9	2	1	1,01	0,54	262,8	142,0	358,8	105,3	91,5	25,2%	29,0%
B04_1-5_06000_předpětí	TR 76x4,5	1/5	6 621	16,2	12,95			209,8	0,0	2	X	0,76	X	199,9	X	358,8	167,2	X	9,7%	X
B04_1-5_06000_membrána	TR 76x4,5	1/5	6 621	29,2	7,47			218,1	0,0	2	X	0,75	X	196,0	X	358,8	172,3	X	16,9%	X
B04_1-5_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/5	8 828	35,7	4,16	3,56		148,5	127,1	2	1	1,00	0,54	302,3	163,4	581,1	132,2	114,4	27,0%	31,2%
B04_1-5_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/5	8 828	18,4	12,08			222,3	0,0	2	X	0,82	X	247,1	X	581,1	190,1	X	9,7%	X
B04_1-5_08000_membrána	TR 89x6,3	1/5	8 828	37,6	6,29			236,5	0,0	2	X	0,80	X	239,5	X	581,1	200,7	X	18,7%	X
B04_1-5_10000_oblouk	TR 108x7	1/5	11 035	45,0	4,28	3,67		192,6	165,2	2	1	1,00	0,54	309,2	167,0	788,5	172,0	149,1	26,2%	30,2%
B04_1-5_10000_předpětí	TR 108x7	1/5	11 035	19,9	13,23			263,3	0,0	2	X	0,86	X	264,5	X	788,5	228,7	X	8,7%	X
B04_1-5_10000_membrána	TR 108x7	1/5	11 035	45,9	6,26			287,3	0,0	2	X	0,82	X	253,2	X	788,5	247,2	X	18,6%	X
B04_1-5_12000_oblouk	TR 127x7	1/5	13 242	54,4	4,13	3,54		224,7	192,6	2	1	1,00	0,54	312,1	168,5	936,8	200,9	174,1	27,1%	31,3%
B04_1-5_12000_předpětí	TR 127x7	1/5	13 242	21,1	14,26			300,9	0,0	2	X	0,87	X	269,7	X	936,8	262,4	X	8,0%	X
B04_1-5_12000_membrána	TR 127x7	1/5	13 242	54,2	6,17			334,4	0,0	2	X	0,82	X	255,8	X	936,8	288,4	X	18,8%	X
B04_1-5_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/5	15 449	63,7	4,17	3,57		265,6	227,4	2	1	1,00	0,54	300,0	162,1	1023,7	236,1	204,5	27,0%	31,1%
B04_1-5_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/5	15 449	22,1	16,02			354,0	0,0	2	X	0,87	X	259,9	X	1023,7	306,4	X	7,2%	X
B04_1-5_14000_membrána	TR 152x6,3	1/5	15 449	62,5	6,38			398,8	0,0	2	X	0,82	X	244,9	X	1023,7	340,3	X	18,4%	X
B04_1-5_16000_oblouk	TR 168x7	1/5	17 655	73,4	4,15	3,56		304,6	261,3	2	1	1,00	0,54	310,4	167,6	1256,9	272,2	236,0	27,0%	31,1%
B04_1-5_16000_předpětí	TR 168x7	1/5	17 655	23,5	17,48			410,8	0,0	2	X	0,86	X	267,3	X	1256,9	357,6	X	6,6%	X
B04_1-5_16000_membrána	TR 168x7	1/5	17 655	71,6	6,53			467,5	0,0	2	X	0,81	X	250,6	X	1256,9	401,3	X	17,8%	X
B04_1-5_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/5	19 862	82,9	4,14	3,55		343,2	294,3	2	1	1,00	0,54	299,6	161,8	1318,8	305,0	264,6	27,2%	31,3%
B04_1-5_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/5	19 862	24,3	19,19			466,3	0,0	2	X	0,86	X	257,0	X	1318,8	402,6	X	6,0%	X
B04_1-5_18000_membrána	TR 194x6,3	1/5	19 862	80,1	6,71			537,5	0,0	2	X	0,80	X	239,4	X	1318,8	456,0	X	17,6%	X
B04_1-5_20000_oblouk	TR 219x6,3	1/5	22 069	92,7	4,37	3,74		405,1	346,7	2	1	1,00	0,54	293,5	158,6	1494,5	358,8	310,8	25,8%	29,8%
B04_1-5_20000_předpětí	TR 219x6,3	1/5	22 069	25,7	21,52			553,1	0,0	2	X	0,86	X	251,2	X	1494,5	474,9	X	5,4%	X
B04_1-5_20000_membrána	TR 219x6,3	1/5	22 069	89,2	7,16			638,7	0,0	2	X	0,80	X	233,8	X	1494,5	538,3	X	16,6%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
B06_1-5_06000_oblouk	TR 76x4,5	1/5	6 621	26,5	4,58	3,92		121,4	103,9	2	1	1,01	0,54	262,8	142,0	358,8	105,3	91,5	25,2%	29,0%
B06_1-5_06000_předpětí	TR 76x4,5	1/5	6 621	19,2	13,58			260,7	0,0	2	X	0,69	X	179,3	X	358,8	196,3	X	9,8%	X
B06_1-5_06000_membrána	TR 76x4,5	1/5	6 621	40,1	6,98			279,9	0,0	2	X	0,66	X	173,0	X	358,8	206,0	X	19,5%	X
B06_1-5_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/5	8 828	35,7	4,16	3,56		148,5	127,1	2	1	1,00	0,54	302,3	163,4	581,1	132,2	114,4	27,0%	31,2%
B06_1-5_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/5	8 828	23,3	12,04			280,5	0,0	2	X	0,73	X	219,9	X	581,1	232,0	X	10,0%	X
B06_1-5_08000_membrána	TR 89x6,3	1/5	8 828	53,0	5,78			306,3	0,0	2	X	0,70	X	210,5	X	581,1	249,4	X	21,3%	X
B06_1-5_10000_oblouk	TR 108x7	1/5	11 035	45,0	4,28	3,67		192,6	165,2	2	1	1,00	0,54	309,2	167,0	788,5	172,0	149,1	26,2%	30,2%
B06_1-5_10000_předpětí	TR 108x7	1/5	11 035	26,3	11,72			308,2	0,0	2	X	0,79	X	244,4	X	788,5	262,9	X	10,0%	X
B06_1-5_10000_membrána	TR 108x7	1/5	11 035	65,6	5,22			342,4	0,0	2	X	0,75	X	231,9	X	788,5	287,9	X	22,8%	X
B06_1-5_12000_oblouk	TR 127x7	1/5	13 242	54,4	4,13	3,54		224,7	192,6	2	1	1,00	0,54	312,1	168,5	936,8	200,9	174,1	27,1%	31,3%
B06_1-5_12000_předpětí	TR 127x7	1/5	13 242	28,5	11,56			329,5	0,0	2	X	0,83	X	257,7	X	936,8	284,6	X	10,0%	X
B06_1-5_12000_membrána	TR 127x7	1/5	13 242	77,7	4,76			369,9	0,0	2	X	0,78	X	243,2	X	936,8	315,1	X	24,7%	X
B06_1-5_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/5	15 449	63,7	4,17	3,57		265,6	227,4	2	1	1,00	0,54	300,0	162,1	1023,7	236,1	204,5	27,0%	31,1%
B06_1-5_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/5	15 449	30,1	12,20			367,2	0,0	2	X	0,85	X	255,2	X	1023,7	316,5	X	9,5%	X
B06_1-5_14000_membrána	TR 152x6,3	1/5	15 449	89,8	4,66			418,5	0,0	2	X	0,80	X	239,0	X	1023,7	354,9	X	25,3%	X
B06_1-5_16000_oblouk	TR 168x7	1/5	17 655	73,4	4,15	3,56		304,6	261,3	2	1	1,00	0,54	310,4	167,6	1256,9	272,2	236,0	27,0%	31,1%
B06_1-5_16000_předpětí	TR 168x7	1/5	17 655	32,0	12,85			411,2	0,0	2	X	0,86	X	267,2	X	1256,9	358,0	X	8,9%	X
B06_1-5_16000_membrána	TR 168x7	1/5	17 655	102,5	4,61			472,5	0,0	2	X	0,80	X	249,2	X	1256,9	405,0	X	25,3%	X
B06_1-5_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/5	19 862	82,9	4,14	3,55		343,2	294,3	2	1	1,00	0,54	299,6	161,8	1318,8	305,0	264,6	27,2%	31,3%
B06_1-5_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/5	19 862	33,2	13,78			457,5	0,0	2	X	0,87	X	259,5	X	1318,8	395,8	X	8,4%	X
B06_1-5_18000_membrána	TR 194x6,3	1/5	19 862	114,6	4,63			530,6	0,0	2	X	0,81	X	240,9	X	1318,8	450,9	X	25,4%	X
B06_1-5_20000_oblouk	TR 219x6,3	1/5	22 069	92,7	4,37	3,74		405,1	346,7	2	1	1,00	0,54	293,5	158,6	1494,5	358,8	310,8	25,8%	29,8%
B06_1-5_20000_předpětí	TR 219x6,3	1/5	22 069	34,8	15,28			531,7	0,0	2	X	0,87	X	256,2	X	1494,5	458,7	X	7,6%	X
B06_1-5_20000_membrána	TR 219x6,3	1/5	22 069	127,5	4,87			620,9	0,0	2	X	0,81	X	237,1	X	1494,5	525,4	X	24,3%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	$L_{teor}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$	$N_{EK}/N_{b,RD,y}$	$N_{EK}/N_{b,RD,z}$
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
B08_1-5_06000_oblouk	TR 76x4,5	1/5	6 621	26,5	4,58	3,92		121,4	103,9	2	1	1,01	0,54	262,8	142,0	358,8	105,3	91,5	25,2%	29,0%
B08_1-5_06000_předpětí	TR 76x4,5	1/5	6 621	20,4	13,60			277,4	0,0	2	X	0,66	X	173,8	X	358,8	204,8	X	10,0%	X
B08_1-5_06000_membrána	TR 76x4,5	1/5	6 621	50,8	6,01			305,3	0,0	2	X	0,63	X	165,7	X	358,8	217,8	X	23,3%	X
B08_1-5_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/5	8 828	35,7	4,16	3,56		148,5	127,1	2	1	1,00	0,54	302,3	163,4	581,1	132,2	114,4	27,0%	31,2%
B08_1-5_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/5	8 828	25,9	12,54			324,8	0,0	2	X	0,68	X	204,4	X	581,1	261,4	X	9,9%	X
B08_1-5_08000_membrána	TR 89x6,3	1/5	8 828	68,2	5,32			362,8	0,0	2	X	0,64	X	193,4	X	581,1	284,8	X	23,9%	X
B08_1-5_10000_oblouk	TR 108x7	1/5	11 035	45,0	4,28	3,67		192,6	165,2	2	1	1,00	0,54	309,2	167,0	788,5	172,0	149,1	26,2%	30,2%
B08_1-5_10000_předpětí	TR 108x7	1/5	11 035	30,4	12,02			365,4	0,0	2	X	0,73	X	224,5	X	788,5	304,2	X	10,0%	X
B08_1-5_10000_membrána	TR 108x7	1/5	11 035	85,1	4,86			413,6	0,0	2	X	0,68	X	211,0	X	788,5	337,0	X	25,3%	X
B08_1-5_12000_oblouk	TR 127x7	1/5	13 242	54,4	4,13	3,54		224,7	192,6	2	1	1,00	0,54	312,1	168,5	936,8	200,9	174,1	27,1%	31,3%
B08_1-5_12000_předpětí	TR 127x7	1/5	13 242	34,0	11,24			382,2	0,0	2	X	0,77	X	239,3	X	936,8	324,2	X	10,5%	X
B08_1-5_12000_membrána	TR 127x7	1/5	13 242	101,6	4,32			438,9	0,0	2	X	0,72	X	223,3	X	936,8	364,8	X	27,9%	X
B08_1-5_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/5	15 449	63,7	4,17	3,57		265,6	227,4	2	1	1,00	0,54	300,0	162,1	1023,7	236,1	204,5	27,0%	31,1%
B08_1-5_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/5	15 449	36,6	11,20			409,9	0,0	2	X	0,81	X	241,5	X	1023,7	348,6	X	10,5%	X
B08_1-5_14000_membrána	TR 152x6,3	1/5	15 449	117,6	4,05			476,3	0,0	2	X	0,75	X	224,0	X	1023,7	396,3	X	29,7%	X
B08_1-5_16000_oblouk	TR 168x7	1/5	17 655	73,4	4,15	3,56		304,6	261,3	2	1	1,00	0,54	310,4	167,6	1256,9	272,2	236,0	27,0%	31,1%
B08_1-5_16000_předpětí	TR 168x7	1/5	17 655	39,2	11,29			442,6	0,0	2	X	0,83	X	257,5	X	1256,9	382,2	X	10,3%	X
B08_1-5_16000_membrána	TR 168x7	1/5	17 655	134,1	3,86			517,6	0,0	2	X	0,77	X	238,1	X	1256,9	438,5	X	30,6%	X
B08_1-5_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/5	19 862	82,9	4,14	3,55		343,2	294,3	2	1	1,00	0,54	299,6	161,8	1318,8	305,0	264,6	27,2%	31,3%
B08_1-5_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/5	19 862	41,0	11,67			478,5	0,0	2	X	0,85	X	253,7	X	1318,8	411,8	X	10,0%	X
B08_1-5_18000_membrána	TR 194x6,3	1/5	19 862	144,2	3,89		0,95	560,9	0,0	2	X	0,78	X	234,3	X	1318,8	473,1	X	30,5%	X
B08_1-5_20000_oblouk	TR 219x6,3	1/5	22 069	92,7	4,37	3,74		405,1	346,7	2	1	1,00	0,54	293,5	158,6	1494,5	358,8	310,8	25,8%	29,8%
B08_1-5_20000_předpětí	TR 219x6,3	1/5	22 069	43,0	12,62			542,7	0,0	2	X	0,86	X	253,6	X	1494,5	467,1	X	9,2%	X
B08_1-5_20000_membrána	TR 219x6,3	1/5	22 069	153,6	4,16		0,90	639,0	0,0	2	X	0,80	X	233,7	X	1494,5	538,5	X	28,5%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
B10_1-5_06000_oblouk	TR 76x4,5	1/5	6 621	26,5	4,58	3,92		121,4	103,9	2	1	1,01	0,54	262,8	142,0	358,8	105,3	91,5	25,2%	29,0%
B10_1-5_06000_předpětí	TR 76x4,5	1/5	6 621	20,9	13,56			283,4	0,0	2	X	0,66	X	172,0	X	358,8	207,7	X	10,1%	X
B10_1-5_06000_membrána	TR 76x4,5	1/5	6 621	59,3	5,39			319,6	0,0	2	X	0,62	X	161,9	X	358,8	223,9	X	26,5%	X
B10_1-5_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/5	8 828	35,7	4,16	3,56		148,5	127,1	2	1	1,00	0,54	302,3	163,4	581,1	132,2	114,4	27,0%	31,2%
B10_1-5_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/5	8 828	27,2	12,75			346,8	0,0	2	X	0,66	X	197,8	X	581,1	275,1	X	9,9%	X
B10_1-5_08000_membrána	TR 89x6,3	1/5	8 828	81,7	4,81			393,0	0,0	2	X	0,62	X	185,8	X	581,1	302,1	X	27,0%	X
B10_1-5_10000_oblouk	TR 108x7	1/5	11 035	45,0	4,28	3,67		192,6	165,2	2	1	1,00	0,54	309,2	167,0	788,5	172,0	149,1	26,2%	30,2%
B10_1-5_10000_předpětí	TR 108x7	1/5	11 035	32,8	12,45			408,4	0,0	2	X	0,69	X	212,4	X	788,5	333,6	X	9,8%	X
B10_1-5_10000_membrána	TR 108x7	1/5	11 035	103,2	4,52			466,5	0,0	2	X	0,64	X	198,7	X	788,5	370,8	X	27,8%	X
B10_1-5_12000_oblouk	TR 127x7	1/5	13 242	54,4	4,13	3,54		224,7	192,6	2	1	1,00	0,54	312,1	168,5	936,8	200,9	174,1	27,1%	31,3%
B10_1-5_12000_předpětí	TR 127x7	1/5	13 242	37,5	11,68			438,0	0,0	2	X	0,72	X	223,5	X	936,8	364,2	X	10,3%	X
B10_1-5_12000_membrána	TR 127x7	1/5	13 242	114,8	4,38		0,90	502,8	0,0	2	X	0,67	X	208,6	X	936,8	407,9	X	28,1%	X
B10_1-5_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/5	15 449	63,7	4,17	3,57		265,6	227,4	2	1	1,00	0,54	300,0	162,1	1023,7	236,1	204,5	27,0%	31,1%
B10_1-5_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/5	15 449	41,3	11,29			466,3	0,0	2	X	0,76	X	226,4	X	1023,7	389,3	X	10,6%	X
B10_1-5_14000_membrána	TR 152x6,3	1/5	15 449	138,6	3,93		0,95	544,7	0,0	2	X	0,70	X	209,5	X	1023,7	442,7	X	31,3%	X
B10_1-5_16000_oblouk	TR 168x7	1/5	17 655	73,4	4,15	3,56		304,6	261,3	2	1	1,00	0,54	310,4	167,6	1256,9	272,2	236,0	27,0%	31,1%
B10_1-5_16000_předpětí	TR 168x7	1/5	17 655	44,8	10,99			492,4	0,0	2	X	0,79	X	244,2	X	1256,9	419,9	X	10,7%	X
B10_1-5_16000_membrána	TR 168x7	1/5	17 655	151,9	3,81		0,90	578,7	0,0	2	X	0,73	X	225,2	X	1256,9	482,3	X	31,5%	X
B10_1-5_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/5	19 862	82,9	4,14	3,55		343,2	294,3	2	1	1,00	0,54	299,6	161,8	1318,8	305,0	264,6	27,2%	31,3%
B10_1-5_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/5	19 862	47,4	10,98			520,5	0,0	2	X	0,81	X	243,3	X	1318,8	443,4	X	10,7%	X
B10_1-5_18000_membrána	TR 194x6,3	1/5	19 862	162,7	3,77		0,85	613,4	0,0	2	X	0,75	X	224,1	X	1318,8	510,4	X	31,9%	X
B10_1-5_20000_oblouk	TR 219x6,3	1/5	22 069	92,7	4,37	3,74		405,1	346,7	2	1	1,00	0,54	293,5	158,6	1494,5	358,8	310,8	25,8%	29,8%
B10_1-5_20000_předpětí	TR 219x6,3	1/5	22 069	50,1	11,52			577,2	0,0	2	X	0,84	X	245,9	X	1494,5	493,1	X	10,2%	X
B10_1-5_20000_membrána	TR 219x6,3	1/5	22 069	172,5	3,95		0,80	681,4	0,0	2	X	0,77	X	226,3	X	1494,5	568,8	X	30,3%	X



TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C04_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,8	3,57	2,77		74,3	57,6	2	1	1,02	0,58	321,5	182,5	328,7	66,7	52,6	31,2%	39,6%
C04_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	3/10	7 350	16,9	12,64	15,61		213,6	263,8	2	2	0,60	0,54	189,6	170,6	328,7	166,0	192,3	10,2%	8,8%
C04_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	3/10	7 350	26,2	8,08	10,17		211,7	266,5	2	2	0,60	0,54	190,4	169,7	328,7	164,9	193,5	15,9%	13,5%
C04_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,0	3,57	2,75		100,0	77,0	2	1	1,02	0,58	371,1	211,4	589,4	91,4	71,3	30,6%	39,3%
C04_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	3/10	9 800	18,9	11,20	16,97		211,7	320,7	2	2	0,70	0,57	255,0	207,2	589,4	182,4	259,5	10,4%	7,3%
C04_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	3/10	9 800	32,4	6,59	10,34		213,5	335,0	2	2	0,69	0,55	253,9	202,7	589,4	183,8	268,6	17,6%	12,1%
C04_3-10_10000_oblouk	TR 108x5,6	3/10	12 250	35,1	3,61	2,81		126,7	98,6	2	1	1,02	0,58	343,3	194,6	639,5	114,8	90,6	30,6%	38,7%
C04_3-10_10000_předpětí	TR 108x5,6	3/10	12 250	19,9	12,21	20,91		243,0	416,1	2	2	0,73	0,56	247,9	189,5	639,5	208,0	323,3	9,6%	6,2%
C04_3-10_10000_membrána	TR 108x5,6	3/10	12 250	39,0	6,59	11,82		257,0	461,0	2	2	0,71	0,53	241,1	180,0	639,5	218,4	348,0	17,9%	11,2%
C04_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	3/10	14 699	42,3	3,63	2,83		153,5	119,7	2	1	1,02	0,57	329,5	186,6	713,8	138,4	109,5	30,6%	38,6%
C04_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	3/10	14 699	20,7	14,10	26,00		291,9	538,2	2	2	0,74	0,54	239,0	176,0	713,8	247,5	400,6	8,4%	5,2%
C04_3-10_12000_membrána	TR 133x5	3/10	14 699	45,0	7,02	20,28		315,9	912,6	2	2	0,71	0,42	229,7	135,1	713,8	264,9	531,1	17,0%	8,5%
C04_3-10_14000_oblouk	TR 133x8	3/10	17 149	50,2	3,37	2,63		169,2	132,0	2	1	1,01	0,57	392,4	222,1	1115,3	155,5	122,7	32,3%	40,9%
C04_3-10_14000_předpětí	TR 133x8	3/10	17 149	22,2	15,47			343,4	0,0	2	X	0,71	X	275,4	X	1115,3	300,8	X	7,4%	X
C04_3-10_14000_membrána	TR 133x8	3/10	17 149	52,2	7,25			378,5	0,0	2	X	0,68	X	262,3	X	1115,3	328,2	X	15,9%	X
C04_3-10_16000_oblouk	TR 152x8	3/10	19 599	57,9	3,42	2,67		198,0	154,6	2	1	1,01	0,57	389,3	220,3	1284,8	181,9	143,6	31,8%	40,3%
C04_3-10_16000_předpětí	TR 152x8	3/10	19 599	23,2	17,90			415,3	0,0	2	X	0,70	X	268,8	X	1284,8	362,0	X	6,4%	X
C04_3-10_16000_membrána	TR 152x8	3/10	19 599	60,4	7,86			474,7	0,0	2	X	0,65	X	251,4	X	1284,8	407,8	X	14,8%	X
C04_3-10_18000_oblouk	TR 168x9	3/10	22 049	66,0	3,61	2,81		238,3	185,5	2	1	1,01	0,57	395,5	224,1	1595,9	219,2	172,6	30,1%	38,2%
C04_3-10_18000_předpětí	TR 168x9	3/10	22 049	24,7	20,55			507,6	0,0	2	X	0,69	X	271,0	X	1595,9	443,1	X	5,6%	X
C04_3-10_18000_membrána	TR 168x9	3/10	22 049	68,4	8,58			586,9	0,0	2	X	0,64	X	252,0	X	1595,9	504,4	X	13,6%	X
C04_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	3/10	24 499	72,9	3,33	2,60		242,8	189,5	2	1	1,01	0,57	374,8	212,1	1459,9	222,1	175,5	32,8%	41,5%
C04_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	3/10	24 499	24,9	22,78			567,2	0,0	2	X	0,66	X	245,2	X	1459,9	484,2	X	5,1%	X
C04_3-10_20000_membrána	TR 194x7	3/10	24 499	74,5	8,92			664,5	0,0	2	X	0,61	X	226,5	X	1459,9	554,8	X	13,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C06_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,8	3,57	2,77		74,3	57,6	2	1	1,02	0,58	321,5	182,5	328,7	66,7	52,6	31,2%	39,6%
C06_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,2	14,85	17,31		300,0	349,7	3	2	0,76	0,47	240,0	148,2	328,7	208,0	225,8	9,7%	8,9%
C06_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	3/10	7 350	34,9	8,83	10,04		308,2	350,4	3	2	0,75	0,47	236,7	148,0	328,7	211,2	226,0	16,5%	15,4%
C06_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,0	3,57	2,75		100,0	77,0	2	1	1,02	0,58	371,1	211,4	589,4	91,4	71,3	30,6%	39,3%
C06_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	3/10	9 800	24,4	13,09	15,36		319,4	374,8	2	2	0,57	0,52	207,6	191,6	589,4	258,6	292,9	9,4%	8,3%
C06_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	3/10	9 800	45,2	7,12	8,48		321,8	383,3	2	2	0,57	0,52	206,8	189,5	589,4	260,2	297,8	17,4%	15,2%
C06_3-10_10000_oblouk	TR 108x5,6	3/10	12 250	35,1	3,61	2,81		126,7	98,6	2	1	1,02	0,58	343,3	194,6	639,5	114,8	90,6	30,6%	38,7%
C06_3-10_10000_předpětí	TR 108x5,6	3/10	12 250	26,9	11,27	15,23		303,2	409,7	2	2	0,66	0,57	222,0	190,9	639,5	251,5	319,5	10,7%	8,4%
C06_3-10_10000_membrána	TR 108x5,6	3/10	12 250	54,8	5,72	7,98		313,5	437,3	2	2	0,65	0,55	218,3	184,8	639,5	258,6	335,2	21,2%	16,3%
C06_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	3/10	14 699	42,3	3,63	2,83		153,5	119,7	2	1	1,02	0,57	329,5	186,6	713,8	138,4	109,5	30,6%	38,6%
C06_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	3/10	14 699	28,7	10,95	16,71		314,3	479,6	2	2	0,71	0,57	230,3	186,4	713,8	263,7	369,4	10,9%	7,8%
C06_3-10_12000_membrána	TR 133x5	3/10	14 699	64,2	5,18	8,26		332,6	530,3	2	2	0,69	0,55	223,9	177,3	713,8	276,6	396,6	23,2%	16,2%
C06_3-10_14000_oblouk	TR 133x8	3/10	17 149	50,2	3,37	2,63		169,2	132,0	2	1	1,01	0,57	392,4	222,1	1115,3	155,5	122,7	32,3%	40,9%
C06_3-10_14000_předpětí	TR 133x8	3/10	17 149	30,7	10,87	18,35		333,7	563,3	2	2	0,72	0,56	279,4	215,0	1115,3	293,0	462,3	10,5%	6,6%
C06_3-10_14000_membrána	TR 133x8	3/10	17 149	74,5	4,87	8,67		362,8	645,9	2	2	0,69	0,52	267,9	200,8	1115,3	316,0	515,9	23,6%	14,4%
C06_3-10_16000_oblouk	TR 152x8	3/10	19 599	57,9	3,42	2,67		198,0	154,6	2	1	1,01	0,57	389,3	220,3	1284,8	181,9	143,6	31,8%	40,3%
C06_3-10_16000_předpětí	TR 152x8	3/10	19 599	32,2	11,84	21,18		381,2	682,0	2	2	0,73	0,55	280,5	209,7	1284,8	335,0	554,5	9,6%	5,8%
C06_3-10_16000_membrána	TR 152x8	3/10	19 599	85,0	5,00	9,54		425,0	810,9	2	2	0,69	0,50	265,7	192,4	1284,8	369,6	634,8	23,0%	13,4%
C06_3-10_18000_oblouk	TR 168x9	3/10	22 049	66,0	3,61	2,81		238,3	185,5	2	1	1,01	0,57	395,5	224,1	1595,9	219,2	172,6	30,1%	38,2%
C06_3-10_18000_předpětí	TR 168x9	3/10	22 049	33,9	13,22	29,49		448,2	999,7	2	2	0,74	0,49	288,4	193,1	1595,9	395,8	784,1	8,6%	4,3%
C06_3-10_18000_membrána	TR 168x9	3/10	22 049	96,3	5,32	10,75		512,3	1035,2	2	2	0,69	0,48	269,7	189,7	1595,9	446,8	804,8	21,6%	12,0%
C06_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	3/10	24 499	72,9	3,33	2,60		242,8	189,5	2	1	1,01	0,57	374,8	212,1	1459,9	222,1	175,5	32,8%	41,5%
C06_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	3/10	24 499	34,4	14,15	27,24		486,8	937,1	2	2	0,71	0,52	264,7	190,7	1459,9	422,9	730,5	8,1%	4,7%
C06_3-10_20000_membrána	TR 194x7	3/10	24 499	105,3	5,36			564,4	0,0	2	X	0,66	X	245,8	X	1459,9	482,1	X	21,8%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C08_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,8	3,57	2,77		74,3	57,6	2	1	1,02	0,58	321,5	182,5	328,7	66,7	52,6	31,2%	39,6%
C08_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	3/10	7 350	21,4	17,38	19,00		371,9	406,6	3	2	0,68	0,43	215,5	137,4	328,7	232,4	241,4	9,2%	8,9%
C08_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	3/10	7 350	43,3	7,58	8,64		328,2	374,1	3	2	0,72	0,45	229,4	143,2	328,7	218,6	233,0	19,8%	18,6%
C08_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,0	3,57	2,75		100,0	77,0	2	1	1,02	0,58	371,1	211,4	589,4	91,4	71,3	30,6%	39,3%
C08_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	3/10	9 800	27,3	15,64	19,52		427,0	532,9	2	2	0,49	0,44	179,6	160,7	589,4	321,8	371,0	8,5%	7,4%
C08_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	3/10	9 800	57,5	7,46	10,15		429,0	583,6	2	2	0,49	0,42	179,1	153,6	589,4	322,9	390,3	17,8%	14,7%
C08_3-10_10000_oblouk	TR 108x5,6	3/10	12 250	35,1	3,61	2,81		126,7	98,6	2	1	1,02	0,58	343,3	194,6	639,5	114,8	90,6	30,6%	38,7%
C08_3-10_10000_předpětí	TR 108x5,6	3/10	12 250	31,6	13,33	15,43		421,2	487,6	2	2	0,56	0,52	188,3	175,0	639,5	326,2	361,6	9,7%	8,7%
C08_3-10_10000_membrána	TR 108x5,6	3/10	12 250	70,7	6,10	7,28		431,3	514,7	2	2	0,55	0,50	186,1	170,3	639,5	331,9	374,8	21,3%	18,9%
C08_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	3/10	14 699	42,3	3,63	2,83		153,5	119,7	2	1	1,02	0,57	329,5	186,6	713,8	138,4	109,5	30,6%	38,6%
C08_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	3/10	14 699	34,7	11,59	14,80		402,2	513,6	2	2	0,63	0,56	203,6	180,2	713,8	323,1	387,9	10,7%	8,9%
C08_3-10_12000_membrána	TR 133x5	3/10	14 699	83,6	5,06	6,72		423,0	561,8	2	2	0,61	0,53	198,5	172,3	713,8	336,1	412,2	24,9%	20,3%
C08_3-10_14000_oblouk	TR 133x8	3/10	17 149	50,2	3,37	2,63		169,2	132,0	2	1	1,01	0,57	392,4	222,1	1115,3	155,5	122,7	32,3%	40,9%
C08_3-10_14000_předpětí	TR 133x8	3/10	17 149	37,8	10,31	14,66		389,7	554,1	2	2	0,67	0,56	258,5	216,8	1115,3	336,9	456,0	11,2%	8,3%
C08_3-10_14000_membrána	TR 133x8	3/10	17 149	97,2	4,33	6,44		420,9	626,0	2	2	0,64	0,53	248,8	204,0	1115,3	360,6	503,3	27,0%	19,3%
C08_3-10_16000_oblouk	TR 152x8	3/10	19 599	57,9	3,42	2,67		198,0	154,6	2	1	1,01	0,57	389,3	220,3	1284,8	181,9	143,6	31,8%	40,3%
C08_3-10_16000_předpětí	TR 152x8	3/10	19 599	40,0	10,24	15,84		409,6	633,6	2	2	0,70	0,57	270,7	217,6	1284,8	357,5	522,1	11,2%	7,7%
C08_3-10_16000_membrána	TR 152x8	3/10	19 599	110,6	4,09	6,65		452,4	735,5	2	2	0,67	0,53	257,5	202,0	1284,8	390,7	588,9	28,3%	18,8%
C08_3-10_18000_oblouk	TR 168x9	3/10	22 049	66,0	3,60	2,81		237,6	185,5	2	1	1,01	0,57	396,1	224,1	1595,9	218,7	172,6	30,2%	38,2%
C08_3-10_18000_předpětí	TR 168x9	3/10	22 049	42,3	10,74	17,60		454,3	744,5	2	2	0,73	0,57	286,4	223,7	1595,9	400,7	619,2	10,6%	6,8%
C08_3-10_18000_membrána	TR 168x9	3/10	22 049	125,1	4,10	6,81		512,9	851,9	2	2	0,69	0,53	269,6	209,2	1595,9	447,3	691,9	28,0%	18,1%
C08_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	3/10	24 499	72,9	3,33	2,60		242,8	189,5	2	1	1,01	0,57	374,8	212,1	1459,9	222,1	175,5	32,8%	41,5%
C08_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	3/10	24 499	43,1	10,95	19,20		471,9	827,5	2	2	0,73	0,55	268,8	203,0	1459,9	411,3	664,0	10,5%	6,5%
C08_3-10_20000_membrána	TR 194x7	3/10	24 499	131,0	4,09	7,65	0,95	535,8	1002,2	2	2	0,68	0,50	252,3	184,4	1459,9	460,6	767,3	28,4%	17,1%

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C10_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,8	3,57	2,77		74,3	57,6	2	1	1,02	0,58	321,5	182,5	328,7	66,7	52,6	31,2%	39,6%
C10_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	3/10	7 350	21,9	14,80	18,48		324,1	404,7	3	2	0,73	0,43	230,8	137,7	328,7	217,2	241,0	10,1%	9,1%
C10_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	3/10	7 350	51,0	6,83	9,28		348,3	473,3	3	2	0,70	0,40	222,7	127,4	328,7	225,3	255,1	22,6%	20,0%
C10_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,0	3,57	2,75		100,0	77,0	2	1	1,02	0,58	371,1	211,4	589,4	91,4	71,3	30,6%	39,3%
C10_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,6	14,67	18,94		419,6	541,7	3	2	0,74	0,44	271,7	159,4	589,4	317,9	374,5	9,0%	7,6%
C10_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	3/10	9 800	68,6	6,58	9,07		451,4	622,2	3	2	0,72	0,41	261,9	148,7	589,4	334,3	403,3	20,5%	17,0%
C10_3-10_10000_oblouk	TR 108x5,6	3/10	12 250	35,1	3,61	2,81		126,7	98,6	2	1	1,02	0,58	343,3	194,6	639,5	114,8	90,6	30,6%	38,7%
C10_3-10_10000_předpětí	TR 108x5,6	3/10	12 250	34,2	14,89	19,68		509,2	673,1	3	2	0,76	0,44	256,9	149,0	639,5	372,2	436,9	9,2%	7,8%
C10_3-10_10000_membrána	TR 108x5,6	3/10	12 250	85,5	6,18	9,20		528,4	786,6	2	2	0,50	0,41	168,1	137,8	639,5	381,1	468,7	22,4%	18,2%
C10_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	3/10	14 699	42,3	3,63	2,83		153,5	119,7	2	1	1,02	0,57	329,5	186,6	713,8	138,4	109,5	30,6%	38,6%
C10_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	3/10	14 699	38,7	13,49	20,29		522,1	785,2	2	2	0,55	0,45	178,7	145,7	713,8	392,3	498,2	9,9%	7,8%
C10_3-10_12000_membrána	TR 133x5	3/10	14 699	101,8	5,26	6,34		535,5	645,4	2	2	0,54	0,50	176,4	160,7	713,8	399,2	449,3	25,5%	22,7%
C10_3-10_14000_oblouk	TR 133x8	3/10	17 149	50,2	3,37	2,63		169,2	132,0	2	1	1,01	0,57	392,4	222,1	1115,3	155,5	122,7	32,3%	40,9%
C10_3-10_14000_předpětí	TR 133x8	3/10	17 149	43,0	11,50	14,27		494,5	613,6	2	2	0,59	0,53	229,5	206,0	1115,3	414,5	495,4	10,4%	8,7%
C10_3-10_14000_membrána	TR 133x8	3/10	17 149	118,3	4,39	5,76		519,3	681,4	2	2	0,58	0,50	223,9	195,5	1115,3	432,1	537,6	27,4%	22,0%
C10_3-10_16000_oblouk	TR 152x8	3/10	19 599	57,9	3,42	2,67		198,0	154,6	2	1	1,01	0,57	389,3	220,3	1284,8	181,9	143,6	31,8%	40,3%
C10_3-10_16000_předpětí	TR 152x8	3/10	19 599	46,3	10,58	14,21		489,9	657,9	2	2	0,64	0,56	247,5	213,6	1284,8	419,1	538,5	11,0%	8,6%
C10_3-10_16000_membrána	TR 152x8	3/10	19 599	134,9	3,93	5,58		530,2	752,7	2	2	0,62	0,52	237,9	199,6	1284,8	449,0	599,7	30,0%	22,5%
C10_3-10_18000_oblouk	TR 168x9	3/10	22 049	66,0	3,60	2,81		237,6	185,5	2	1	1,01	0,57	396,1	224,1	1595,9	218,7	172,6	30,2%	38,2%
C10_3-10_18000_předpětí	TR 168x9	3/10	22 049	49,3	10,33	14,87		509,3	733,1	2	2	0,69	0,58	270,5	225,5	1595,9	444,5	611,2	11,1%	8,1%
C10_3-10_18000_membrána	TR 168x9	3/10	22 049	146,3	3,85	5,83	0,95	563,3	852,9	2	2	0,66	0,53	257,2	209,0	1595,9	486,4	692,6	30,1%	21,1%
C10_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	3/10	24 499	72,9	3,33	2,60		242,8	189,5	2	1	1,01	0,57	374,8	212,1	1459,9	222,1	175,5	32,8%	41,5%
C10_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	3/10	24 499	50,7	9,97	15,50		505,5	785,9	2	2	0,70	0,56	259,7	208,3	1459,9	437,4	637,2	11,6%	8,0%
C10_3-10_20000_membrána	TR 194x7	3/10	24 499	143,4	3,97	6,49	0,80	569,3	930,7	2	2	0,66	0,52	244,7	191,4	1459,9	485,8	726,8	29,5%	19,7%

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
D04_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	2/5	8 299	18,8	2,91	2,16		54,7	40,6	2	1	1,05	0,61	374,6	217,4	328,7	50,1	37,7	37,6%	49,9%
D04_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	2/5	8 299	17,7	12,53	15,71		221,8	278,1	2	2	0,52	0,46	186,0	166,2	328,7	170,6	198,8	10,4%	8,9%
D04_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	2/5	8 299	25,1	8,35	10,98		209,6	275,6	2	2	0,54	0,47	191,4	166,9	328,7	163,7	197,7	15,3%	12,7%
D04_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,4	2,90	2,16		73,7	54,9	2	1	1,05	0,61	432,3	250,4	589,4	68,3	51,5	37,2%	49,3%
D04_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	2/5	11 066	19,5	11,42	19,60		222,7	382,2	2	2	0,60	0,46	248,6	189,8	589,4	190,8	297,2	10,2%	6,6%
D04_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	2/5	11 066	30,8	7,12	13,29		219,3	409,3	2	2	0,61	0,44	250,5	183,4	589,4	188,2	312,4	16,4%	9,9%
D04_3-10_10000_oblouk	TR 114x4,5	2/5	13 832	31,7	2,90	2,16		91,9	68,5	2	1	1,05	0,61	373,6	216,5	549,5	84,1	63,5	37,7%	49,9%
D04_3-10_10000_předpětí	TR 114x4,5	2/5	13 832	20,2	13,46			271,9	0,0	2	X	0,61	X	217,3	X	549,5	223,9	X	9,0%	X
D04_3-10_10000_membrána	TR 114x4,5	2/5	13 832	36,9	7,75			286,0	0,0	2	X	0,59	X	211,8	X	549,5	233,4	X	15,8%	X
D04_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	2/5	16 599	38,4	2,95	2,20		113,3	84,5	2	1	1,05	0,61	383,6	222,1	713,8	103,9	78,5	37,0%	48,9%
D04_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	2/5	16 599	21,0	16,74			351,5	0,0	2	X	0,59	X	217,8	X	713,8	289,7	X	7,2%	X
D04_3-10_12000_membrána	TR 133x5	2/5	16 599	43,6	8,90			388,0	0,0	2	X	0,57	X	207,3	X	713,8	314,0	X	13,9%	X
D04_3-10_14000_oblouk	TR 152x5	2/5	19 365	45,0	2,80	2,09		126,0	94,1	2	1	1,05	0,61	389,8	225,6	819,7	115,8	87,6	38,9%	51,4%
D04_3-10_14000_předpětí	TR 152x5	2/5	19 365	21,7	18,26			396,2	0,0	3	X	0,89	X	329,7	X	819,7	327,6	X	6,6%	X
D04_3-10_14000_membrána	TR 152x5	2/5	19 365	50,1	9,50			476,0	0,0	3	X	0,81	X	300,8	X	819,7	379,9	X	13,2%	X
D04_3-10_16000_oblouk	TR 159x7	2/5	22 132	52,4	2,87	2,15		150,4	112,7	2	1	1,04	0,60	429,3	248,0	1186,6	139,4	105,6	37,6%	49,6%
D04_3-10_16000_předpětí	TR 159x7	2/5	22 132	23,2	20,44			474,2	0,0	3	X	0,88	X	362,6	X	1186,6	403,3	X	5,8%	X
D04_3-10_16000_membrána	TR 159x7	2/5	22 132	57,7	10,03			578,7	0,0	3	X	0,80	X	328,2	X	1186,6	477,8	X	12,1%	X
D04_3-10_18000_oblouk	TR 178x7	2/5	24 898	59,4	2,85	2,14		169,3	127,1	2	1	1,04	0,60	429,1	247,6	1335,0	156,9	119,2	37,8%	49,8%
D04_3-10_18000_předpětí	TR 178x7	2/5	24 898	24,1	22,35			538,6	0,0	3	X	0,88	X	360,9	X	1335,0	457,6	X	5,3%	X
D04_3-10_18000_membrána	TR 178x7	2/5	24 898	64,6	10,34			668,0	0,0	3	X	0,79	X	324,1	X	1335,0	549,0	X	11,8%	X
D04_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	2/5	27 664	66,4	2,70	2,03		179,3	134,8	2	1	1,04	0,60	436,1	251,5	1459,9	166,4	126,5	39,9%	52,5%
D04_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	2/5	27 664	25,0	23,34			583,5	0,0	3	X	0,87	X	362,6	X	1459,9	496,3	X	5,0%	X
D04_3-10_20000_membrána	TR 194x7	2/5	27 664	71,4	10,26			732,6	0,0	3	X	0,77	X	323,6	X	1459,9	601,8	X	11,9%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
D06_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	2/5	8 299	18,8	2,91	2,16		54,7	40,6	2	1	1,05	0,61	374,6	217,4	328,7	50,1	37,7	37,6%	49,9%
D06_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	2/5	8 299	21,7	14,97	14,10		324,8	306,0	3	2	0,64	0,44	230,6	158,4	328,7	217,4	210,4	10,0%	10,3%
D06_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	2/5	8 299	33,7	9,38	8,92		316,1	300,6	3	2	0,65	0,45	233,8	159,8	328,7	214,3	208,3	15,7%	16,2%
D06_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,4	2,90	2,16		73,7	54,9	2	1	1,05	0,61	432,3	250,4	589,4	68,3	51,5	37,2%	49,3%
D06_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,8	13,22	14,35		341,1	370,2	2	2	0,49	0,47	200,9	192,8	589,4	272,5	290,2	9,5%	8,9%
D06_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	2/5	11 066	42,7	7,52	8,65		321,1	369,4	2	2	0,50	0,47	207,0	193,0	589,4	259,7	289,7	16,4%	14,7%
D06_3-10_10000_oblouk	TR 114x4,5	2/5	13 832	31,7	2,90	2,16		91,9	68,5	2	1	1,05	0,61	373,6	216,5	549,5	84,1	63,5	37,7%	49,9%
D06_3-10_10000_předpětí	TR 114x4,5	2/5	13 832	28,0	11,06	16,13		309,7	451,6	2	2	0,57	0,47	203,6	168,6	549,5	248,8	326,4	11,3%	8,6%
D06_3-10_10000_membrána	TR 114x4,5	2/5	13 832	50,6	5,92	9,42		299,6	476,7	2	2	0,58	0,46	207,0	164,1	549,5	242,3	337,5	20,9%	15,0%
D06_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	2/5	16 599	38,4	2,95	2,20		113,3	84,5	2	1	1,05	0,61	383,6	222,1	713,8	103,9	78,5	37,0%	48,9%
D06_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	2/5	16 599	29,6	11,12	19,35		329,2	572,8	2	2	0,61	0,47	225,0	170,6	713,8	274,3	417,5	10,8%	7,1%
D06_3-10_12000_membrána	TR 133x5	2/5	16 599	59,7	5,64	13,89		336,7	829,2	2	2	0,61	0,39	222,5	141,8	713,8	279,5	510,6	21,4%	11,7%
D06_3-10_14000_oblouk	TR 152x5	2/5	19 365	45,0	2,80	2,09		126,0	94,1	2	1	1,05	0,61	389,8	225,6	819,7	115,8	87,6	38,9%	51,4%
D06_3-10_14000_předpětí	TR 152x5	2/5	19 365	30,8	12,06	21,44		371,4	660,4	2	2	0,61	0,46	227,0	170,3	819,7	310,4	480,6	9,9%	6,4%
D06_3-10_14000_membrána	TR 152x5	2/5	19 365	68,8	5,78			397,7	0,0	2	X	0,59	X	219,4	X	819,7	328,6	X	20,9%	X
D06_3-10_16000_oblouk	TR 159x7	2/5	22 132	52,4	2,87	2,15		150,4	112,7	2	1	1,04	0,60	429,3	248,0	1186,6	139,4	105,6	37,6%	49,6%
D06_3-10_16000_předpětí	TR 159x7	2/5	22 132	32,5	13,76			447,2	0,0	2	X	0,61	X	248,9	X	1186,6	383,2	X	8,5%	X
D06_3-10_16000_membrána	TR 159x7	2/5	22 132	80,2	6,26			502,1	0,0	2	X	0,57	X	234,9	X	1186,6	423,7	X	18,9%	X
D06_3-10_18000_oblouk	TR 178x7	2/5	24 898	59,4	2,85	2,14		169,3	127,1	2	1	1,04	0,60	429,1	247,6	1335,0	156,9	119,2	37,8%	49,8%
D06_3-10_18000_předpětí	TR 178x7	2/5	24 898	33,7	15,79			532,1	0,0	2	X	0,59	X	242,1	X	1335,0	452,8	X	7,4%	X
D06_3-10_18000_membrána	TR 178x7	2/5	24 898	90,2	6,80			613,4	0,0	2	X	0,55	X	225,5	X	1335,0	511,4	X	17,6%	X
D06_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	2/5	27 664	66,4	2,70	2,03		179,3	134,8	2	1	1,04	0,60	436,1	251,5	1459,9	166,4	126,5	39,9%	52,5%
D06_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	2/5	27 664	34,8	17,79			619,1	0,0	2	X	0,56	X	234,7	X	1459,9	522,3	X	6,7%	X
D06_3-10_20000_membrána	TR 194x7	2/5	27 664	100,0	7,34			734,0	0,0	2	X	0,52	X	215,5	X	1459,9	602,8	X	16,6%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
D08_3-10_06000_oblouk	TR 70x4,5	2/5	8 299	18,8	2,91	2,16		54,7	40,6	2	1	1,05	0,61	374,6	217,4	328,7	50,1	37,7	37,6%	49,9%
D08_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	2/5	8 299	23,0	15,24	13,54		350,5	311,4	3	2	0,62	0,44	222,0	157,0	328,7	226,0	212,5	10,2%	10,8%
D08_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	2/5	8 299	41,8	8,45	7,94		353,2	331,9	3	2	0,62	0,43	221,1	152,1	328,7	226,9	219,9	18,4%	19,0%
D08_3-10_08000_oblouk	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,4	2,90	2,16		73,7	54,9	2	1	1,05	0,61	432,3	250,4	589,4	68,3	51,5	37,2%	49,3%
D08_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	2/5	11 066	29,2	14,94	14,04		436,2	410,0	3	2	0,65	0,44	266,4	183,2	589,4	326,6	312,7	8,9%	9,3%
D08_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	2/5	11 066	54,9	8,03	7,81		440,8	428,8	3	2	0,64	0,43	265,1	179,2	589,4	329,0	322,8	16,7%	17,0%
D08_3-10_10000_oblouk	TR 114x4,5	2/5	13 832	31,7	2,90	2,16		91,9	68,5	2	1	1,05	0,61	373,6	216,5	549,5	84,1	63,5	37,7%	49,9%
D08_3-10_10000_předpětí	TR 114x4,5	2/5	13 832	33,4	13,58	13,89		453,6	463,9	2	2	0,47	0,47	168,2	166,3	549,5	327,3	331,9	10,2%	10,1%
D08_3-10_10000_membrána	TR 114x4,5	2/5	13 832	65,8	6,52	7,32		429,0	481,7	2	2	0,48	0,46	173,0	163,2	549,5	315,7	339,6	20,8%	19,4%
D08_3-10_12000_oblouk	TR 133x5	2/5	16 599	38,4	2,95	2,20		113,3	84,5	2	1	1,05	0,61	383,6	222,1	713,8	103,9	78,5	37,0%	48,9%
D08_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	2/5	16 599	36,5	11,44	14,63		417,6	534,0	2	2	0,55	0,48	199,8	176,7	713,8	332,8	398,5	11,0%	9,2%
D08_3-10_12000_membrána	TR 133x5	2/5	16 599	77,5	5,23	7,43		405,3	575,8	2	2	0,55	0,46	202,8	170,1	713,8	325,1	418,9	23,8%	18,5%
D08_3-10_14000_oblouk	TR 152x5	2/5	19 365	45,0	2,81	2,09		126,5	94,1	2	1	1,04	0,61	389,1	225,6	819,7	116,2	87,6	38,7%	51,4%
D08_3-10_14000_předpětí	TR 152x5	2/5	19 365	38,7	10,46	16,22		404,8	627,7	2	2	0,58	0,47	217,5	174,6	819,7	333,5	464,9	11,6%	8,3%
D08_3-10_14000_membrána	TR 152x5	2/5	19 365	89,4	4,62	7,98		413,0	713,4	2	2	0,58	0,44	215,3	163,8	819,7	339,1	504,4	26,4%	17,7%
D08_3-10_16000_oblouk	TR 159x7	2/5	22 132	52,4	2,87	2,15		150,4	112,7	2	1	1,04	0,60	429,3	248,0	1186,6	139,4	105,6	37,6%	49,6%
D08_3-10_16000_předpětí	TR 159x7	2/5	22 132	41,0	10,65	18,70		436,7	766,7	2	2	0,61	0,46	251,9	190,1	1186,6	375,2	596,7	10,9%	6,9%
D08_3-10_16000_membrána	TR 159x7	2/5	22 132	102,7	4,53			465,2	0,0	2	X	0,59	X	244,1	X	1186,6	396,7	X	25,9%	X
D08_3-10_18000_oblouk	TR 178x7	2/5	24 898	59,4	2,85	2,14		169,3	127,1	2	1	1,04	0,60	429,1	247,6	1335,0	156,9	119,2	37,8%	49,8%
D08_3-10_18000_předpětí	TR 178x7	2/5	24 898	42,5	11,37			483,2	0,0	2	X	0,62	X	254,0	X	1335,0	416,0	X	10,2%	X
D08_3-10_18000_membrána	TR 178x7	2/5	24 898	111,9	4,80		0,95	537,1	0,0	2	X	0,59	X	240,9	X	1335,0	456,4	X	24,5%	X
D08_3-10_20000_oblouk	TR 194x7	2/5	27 664	66,4	2,70	2,03		179,3	134,8	2	1	1,04	0,60	436,1	251,5	1459,9	166,4	126,5	39,9%	52,5%
D08_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	2/5	27 664	43,9	12,26			538,2	0,0	2	X	0,60	X	251,7	X	1459,9	462,4	X	9,5%	X
D08_3-10_20000_membrána	TR 194x7	2/5	27 664	123,9	4,97		0,95	615,8	0,0	2	X	0,56	X	235,3	X	1459,9	519,9	X	23,8%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	$L_{teor}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$	$N_{EK}/N_{b,RD,y}$	$N_{EK}/N_{b,RD,z}$
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
D10_3-10_06000_oblounk	TR 70x4,5	2/5	8 299	18,8	2,91	2,16		54,7	40,6	2	1	1,05	0,61	374,6	217,4	328,7	50,1	37,7	37,6%	49,9%
D10_3-10_06000_předpětí	TR 70x4,5	2/5	8 299	23,4	15,52	13,12		363,2	307,0	3	2	0,61	0,44	218,1	158,1	328,7	229,9	210,8	10,2%	11,1%
D10_3-10_06000_membrána	TR 70x4,5	2/5	8 299	49,0	7,76	7,18		380,2	351,8	3	2	0,60	0,41	213,1	147,7	328,7	234,7	226,4	20,9%	21,6%
D10_3-10_08000_oblounk	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,4	2,90	2,16		73,7	54,9	2	1	1,05	0,61	432,3	250,4	589,4	68,3	51,5	37,2%	49,3%
D10_3-10_08000_předpětí	TR 82,5x7	2/5	11 066	30,6	15,13	13,80		463,0	422,3	3	2	0,63	0,44	258,6	180,5	589,4	340,0	319,4	9,0%	9,6%
D10_3-10_08000_membrána	TR 82,5x7	2/5	11 066	65,1	7,27	7,22		473,3	470,0	3	2	0,62	0,41	255,8	171,1	589,4	344,9	343,3	18,9%	19,0%
D10_3-10_10000_oblounk	TR 114x4,5	2/5	13 832	31,7	2,90	2,16		91,9	68,5	2	1	1,05	0,61	373,6	216,5	549,5	84,1	63,5	37,7%	49,9%
D10_3-10_10000_předpětí	TR 114x4,5	2/5	13 832	36,4	14,92	13,90		543,1	506,0	3	2	0,65	0,45	230,6	159,3	549,5	363,5	349,6	10,0%	10,4%
D10_3-10_10000_membrána	TR 114x4,5	2/5	13 832	80,5	7,02	6,86		565,1	552,2	3	2	0,63	0,43	226,0	152,4	549,5	371,1	366,7	21,7%	22,0%
D10_3-10_12000_oblounk	TR 133x5	2/5	16 599	38,4	2,96	2,20		113,7	84,5	2	1	1,04	0,61	383,0	222,1	713,8	104,2	78,5	36,8%	48,9%
D10_3-10_12000_předpětí	TR 133x5	2/5	16 599	41,4	13,81	13,74		571,7	568,8	2	2	0,47	0,47	170,7	171,2	713,8	417,0	415,6	9,9%	10,0%
D10_3-10_12000_membrána	TR 133x5	2/5	16 599	95,5	5,71	6,48		545,3	618,8	2	2	0,48	0,45	174,8	164,1	713,8	404,2	438,2	23,6%	21,8%
D10_3-10_14000_oblounk	TR 152x5	2/5	19 365	45,0	2,81	2,09		126,5	94,1	2	1	1,04	0,61	389,1	225,6	819,7	116,2	87,6	38,7%	51,4%
D10_3-10_14000_předpětí	TR 152x5	2/5	19 365	44,8	11,74	13,74		526,0	615,6	2	2	0,51	0,47	190,8	176,4	819,7	410,0	458,8	10,9%	9,8%
D10_3-10_14000_membrána	TR 152x5	2/5	19 365	109,3	4,63	6,25		506,1	683,1	2	2	0,52	0,45	194,5	167,4	819,7	398,3	491,1	27,4%	22,3%
D10_3-10_16000_oblounk	TR 159x7	2/5	22 132	52,4	2,87	2,15		150,4	112,7	2	1	1,04	0,60	429,3	248,0	1186,6	139,4	105,6	37,6%	49,6%
D10_3-10_16000_předpětí	TR 159x7	2/5	22 132	48,2	10,60	14,83		510,9	714,8	2	2	0,57	0,48	232,9	196,9	1186,6	430,1	565,9	11,2%	8,5%
D10_3-10_16000_membrána	TR 159x7	2/5	22 132	121,0	4,25	6,73	0,95	514,3	814,3	2	2	0,56	0,45	232,1	184,5	1186,6	432,5	623,6	28,0%	19,4%
D10_3-10_18000_oblounk	TR 178x7	2/5	24 898	59,4	2,85	2,14		169,3	127,1	2	1	1,04	0,60	429,1	247,6	1335,0	156,9	119,2	37,8%	49,8%
D10_3-10_18000_předpětí	TR 178x7	2/5	24 898	50,4	10,24	16,45		516,1	829,1	2	2	0,60	0,47	245,8	193,9	1335,0	440,8	651,6	11,4%	7,7%
D10_3-10_18000_membrána	TR 178x7	2/5	24 898	128,7	4,23	7,60	0,88	544,4	978,1	2	2	0,58	0,43	239,3	178,5	1335,0	461,8	734,7	27,9%	17,5%
D10_3-10_20000_oblounk	TR 194x7	2/5	27 664	66,4	2,70	2,03		179,3	134,8	2	1	1,04	0,60	436,1	251,5	1459,9	166,4	126,5	39,9%	52,5%
D10_3-10_20000_předpětí	TR 194x7	2/5	27 664	52,5	10,24	17,98		537,6	944,0	2	2	0,60	0,45	251,8	190,0	1459,9	461,9	734,5	11,4%	7,1%
D10_3-10_20000_membrána	TR 194x7	2/5	27 664	134,5	4,35		0,80	585,1	0,0	2	X	0,58	X	241,4	X	1459,9	497,5	X	27,0%	X



TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
E04_1-2_06000_oblouk	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,4	2,46	1,86		45,3	34,2	2	1	1,10	0,64	455,5	261,9	402,2	42,2	32,2	43,6%	57,1%
E04_1-2_06000_předpětí	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,7	11,89	15,34		222,3	286,9	2	2	0,50	0,44	205,5	181,0	402,2	179,3	217,2	10,4%	8,6%
E04_1-2_06000_membrána	TR 70x5,6	1/2	9 425	24,6	8,16	11,36		200,7	279,5	2	2	0,52	0,44	216,3	183,3	402,2	165,1	213,2	14,9%	11,5%
E04_1-2_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/2	12 566	24,8	2,45	1,86		60,8	46,1	2	1	1,10	0,63	472,6	271,2	581,1	56,8	43,5	43,7%	57,0%
E04_1-2_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/2	12 566	20,0	12,75	16,12		255,0	322,4	2	1	0,54	0,24	230,7	102,6	581,1	214,1	259,8	9,3%	7,7%
E04_1-2_08000_membrána	TR 89x6,3	1/2	12 566	30,3	8,32	10,99		252,1	333,0	2	1	0,54	0,24	232,0	100,9	581,1	212,0	266,6	14,3%	11,4%
E04_1-2_10000_oblouk	TR 108x7	1/2	15 708	31,4	2,51	1,91		78,8	60,0	2	1	1,10	0,63	483,4	277,1	788,5	73,8	56,6	42,6%	55,4%
E04_1-2_10000_předpětí	TR 108x7	1/2	15 708	21,0	14,78	19,14		310,4	401,9	3	1	0,83	0,24	365,4	107,0	788,5	264,5	329,3	7,9%	6,4%
E04_1-2_10000_membrána	TR 108x7	1/2	15 708	37,7	9,20	12,32		346,8	464,5	3	1	0,79	0,23	345,6	99,6	788,5	291,1	369,6	13,0%	10,2%
E04_1-2_12000_oblouk	TR 127x7	1/2	18 850	38,0	2,42	1,85		92,0	70,3	2	1	1,10	0,63	487,8	278,9	936,8	86,1	66,4	44,1%	57,2%
E04_1-2_12000_předpětí	TR 127x7	1/2	18 850	21,8	16,16			352,3	0,0	3	X	0,84	X	373,8	X	936,8	301,9	X	7,2%	X
E04_1-2_12000_membrána	TR 127x7	1/2	18 850	44,8	9,39			420,7	0,0	3	X	0,77	X	342,1	X	936,8	352,0	X	12,7%	X
E04_1-2_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/2	21 991	44,5	2,44	1,86		108,6	82,8	2	1	1,10	0,63	469,2	268,7	1023,7	101,4	78,0	43,9%	57,0%
E04_1-2_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/2	21 991	22,5	18,49			416,0	0,0	3	X	0,84	X	359,6	X	1023,7	353,1	X	6,4%	X
E04_1-2_14000_membrána	TR 152x6,3	1/2	21 991	51,8	10,02			519,0	0,0	3	X	0,75	X	321,9	X	1023,7	425,6	X	12,2%	X
E04_1-2_16000_oblouk	TR 168x7	1/2	25 133	51,6	2,42	1,86		124,9	96,0	2	1	1,10	0,63	484,8	276,5	1256,9	116,9	90,6	44,1%	56,9%
E04_1-2_16000_předpětí	TR 168x7	1/2	25 133	23,7	20,67			489,9	0,0	3	X	0,83	X	367,2	X	1256,9	418,0	X	5,7%	X
E04_1-2_16000_membrána	TR 168x7	1/2	25 133	59,6	10,54			628,2	0,0	3	X	0,74	X	324,2	X	1256,9	516,4	X	11,5%	X
E04_1-2_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/2	28 174	58,2	2,42	1,86		140,8	108,3	2	1	1,10	0,63	467,6	266,7	1318,8	131,5	102,0	44,3%	57,1%
E04_1-2_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/2	28 274	24,4	23,10			563,6	0,0	3	X	0,82	X	350,6	X	1318,8	475,0	X	5,1%	X
E04_1-2_18000_membrána	TR 194x6,3	1/2	28 274	66,1	11,11			734,4	0,0	3	X	0,72	X	307,2	X	1318,8	591,4	X	11,2%	X
E04_1-2_20000_oblouk	TR 194x9	1/2	31 416	66,5	2,36	1,82		156,9	121,0	2	1	1,10	0,62	525,7	299,3	1856,9	147,7	114,8	45,0%	57,9%
E04_1-2_20000_předpětí	TR 194x9	1/2	31 416	26,8	24,48			656,1	0,0	3	X	0,80	X	385,6	X	1856,9	566,4	X	4,7%	X
E04_1-2_20000_membrána	TR 194x9	1/2	31 416	74,7	11,41			852,3	0,0	3	X	0,71	X	338,3	X	1856,9	710,7	X	10,5%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
E06_1-2_06000_oblouk	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,4	2,46	1,86		45,3	34,2	2	1	1,10	0,64	455,5	261,9	402,2	42,2	32,2	43,6%	57,1%
E06_1-2_06000_předpětí	TR 70x5,6	1/2	9 425	23,4	16,21	10,97		379,3	256,7	3	2	0,57	0,46	236,0	191,3	402,2	259,3	200,4	9,0%	11,7%
E06_1-2_06000_membrána	TR 70x5,6	1/2	9 425	34,4	10,32	7,14		355,0	245,6	3	2	0,59	0,47	244,0	195,6	402,2	249,6	193,8	13,8%	17,7%
E06_1-2_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/2	12 566	24,8	2,45	1,86		60,8	46,1	2	1	1,10	0,63	472,6	271,2	581,1	56,8	43,5	43,7%	57,0%
E06_1-2_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/2	12 566	27,4	12,09	12,62		331,3	345,8	2	2	0,47	0,46	202,4	198,1	581,1	265,5	274,5	10,3%	10,0%
E06_1-2_08000_membrána	TR 89x6,3	1/2	12 566	41,7	7,04	8,12		293,6	338,6	2	2	0,50	0,47	215,0	200,2	581,1	240,9	270,1	17,3%	15,4%
E06_1-2_10000_oblouk	TR 108x7	1/2	15 708	31,4	2,51	1,91		78,8	60,0	2	1	1,10	0,63	483,4	277,1	788,5	73,8	56,6	42,6%	55,4%
E06_1-2_10000_předpětí	TR 108x7	1/2	15 708	29,6	11,10	16,83		328,6	498,2	2	2	0,54	0,44	236,7	192,3	788,5	277,9	389,9	10,7%	7,6%
E06_1-2_10000_membrána	TR 108x7	1/2	15 708	49,3	6,21	10,60		306,2	522,6	2	2	0,56	0,43	245,2	187,7	788,5	261,4	404,0	18,9%	12,2%
E06_1-2_12000_oblouk	TR 127x7	1/2	18 850	38,0	2,42	1,85		92,0	70,3	2	1	1,10	0,63	487,8	278,9	936,8	86,1	66,4	44,1%	57,2%
E06_1-2_12000_předpětí	TR 127x7	1/2	18 850	31,0	12,21	19,24		378,5	596,4	2	2	0,54	0,43	240,4	191,5	936,8	321,5	465,9	9,6%	6,7%
E06_1-2_12000_membrána	TR 127x7	1/2	18 850	50,6	6,57	11,33		332,4	573,3	2	2	0,58	0,44	256,5	195,4	936,8	286,9	452,2	17,6%	11,2%
E06_1-2_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/2	21 991	44,5	2,44	1,87		108,6	83,2	2	1	1,10	0,63	469,2	268,0	1023,7	101,4	78,4	43,9%	56,7%
E06_1-2_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/2	21 991	32,1	13,78			442,3	0,0	3	X	0,82	X	348,7	X	1023,7	372,2	X	8,6%	X
E06_1-2_14000_membrána	TR 152x6,3	1/2	21 991	69,9	7,29			509,6	0,0	3	X	0,76	X	324,9	X	1023,7	419,2	X	16,7%	X
E06_1-2_16000_oblouk	TR 168x7	1/2	25 133	51,6	2,42	1,86		124,9	96,0	2	1	1,10	0,63	484,8	276,5	1256,9	116,9	90,6	44,1%	56,9%
E06_1-2_16000_předpětí	TR 168x7	1/2	25 133	33,4	14,62			488,3	0,0	3	X	0,83	X	367,8	X	1256,9	416,8	X	8,0%	X
E06_1-2_16000_membrána	TR 168x7	1/2	25 133	80,8	7,38			596,3	0,0	3	X	0,75	X	332,8	X	1256,9	494,6	X	16,3%	X
E06_1-2_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/2	28 174	58,2	2,42	1,86		140,8	108,3	2	1	1,10	0,63	467,6	266,7	1318,8	131,5	102,0	44,3%	57,1%
E06_1-2_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/2	28 274	34,2	15,84			541,7	0,0	3	X	0,84	X	357,7	X	1318,8	459,1	X	7,4%	X
E06_1-2_18000_membrána	TR 194x6,3	1/2	28 274	91,0	7,56			688,0	0,0	3	X	0,75	X	317,4	X	1318,8	561,2	X	16,2%	X
E06_1-2_20000_oblouk	TR 194x9	1/2	31 416	66,5	2,36	1,82		156,9	121,0	2	1	1,10	0,62	525,7	299,3	1856,9	147,7	114,8	45,0%	57,9%
E06_1-2_20000_předpětí	TR 194x9	1/2	31 416	36,7	16,69			612,5	0,0	3	X	0,83	X	399,1	X	1856,9	532,8	X	6,9%	X
E06_1-2_20000_membrána	TR 194x9	1/2	31 416	103,0	7,68			791,0	0,0	3	X	0,73	X	351,2	X	1856,9	667,0	X	15,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
E08_1-2_06000_oblouk	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,4	2,46	1,86		45,3	34,2	2	1	1,10	0,64	455,5	261,9	402,2	42,2	32,2	43,6%	57,1%
E08_1-2_06000_předpětí	TR 70x5,6	1/2	9 425	24,8	16,65	10,38		412,9	257,4	3	2	0,55	0,46	226,2	191,0	402,2	271,4	200,8	9,1%	12,3%
E08_1-2_06000_membrána	TR 70x5,6	1/2	9 425	42,9	9,40	6,32		403,3	271,1	3	2	0,56	0,45	228,9	186,1	402,2	268,1	208,6	16,0%	20,6%
E08_1-2_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/2	12 566	24,8	2,45	1,86		60,8	46,1	2	1	1,10	0,63	472,6	271,2	581,1	56,8	43,5	43,7%	57,0%
E08_1-2_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/2	12 566	31,4	16,14	10,97		506,8	344,5	3	2	0,57	0,46	245,4	198,5	581,1	358,0	273,7	8,8%	11,5%
E08_1-2_08000_membrána	TR 89x6,3	1/2	12 566	55,3	8,77	6,31		485,0	348,9	3	2	0,59	0,46	250,9	197,2	581,1	348,5	276,4	15,9%	20,0%
E08_1-2_10000_oblouk	TR 108x7	1/2	15 708	31,4	2,51	1,91		78,8	60,0	2	1	1,10	0,63	483,4	277,1	788,5	73,8	56,6	42,6%	55,4%
E08_1-2_10000_předpětí	TR 108x7	1/2	15 708	36,0	12,18	11,70		438,5	421,2	2	2	0,47	0,48	204,9	209,1	788,5	353,2	342,0	10,2%	10,5%
E08_1-2_10000_membrána	TR 108x7	1/2	15 708	65,1	6,03	6,53		392,6	425,1	2	2	0,49	0,47	216,6	208,1	788,5	322,9	344,6	20,2%	18,9%
E08_1-2_12000_oblouk	TR 127x7	1/2	18 850	38,0	2,42	1,85		92,0	70,3	2	1	1,10	0,63	487,8	278,9	936,8	86,1	66,4	44,1%	57,2%
E08_1-2_12000_předpětí	TR 127x7	1/2	18 850	38,9	10,81	13,82		420,5	537,6	2	2	0,51	0,45	228,1	201,7	936,8	351,9	430,2	11,1%	9,0%
E08_1-2_12000_membrána	TR 127x7	1/2	18 850	76,0	5,05	7,40		383,8	562,4	2	2	0,54	0,44	238,8	197,2	936,8	325,4	445,6	23,4%	17,1%
E08_1-2_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/2	21 991	44,5	2,44	1,87		108,6	83,2	2	1	1,10	0,63	469,2	268,0	1023,7	101,4	78,4	43,9%	56,7%
E08_1-2_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/2	21 991	40,7	10,86	17,21		442,0	700,4	2	2	0,55	0,43	232,6	184,7	1023,7	372,0	536,8	10,9%	7,6%
E08_1-2_14000_membrána	TR 152x6,3	1/2	21 991	87,5	5,00	8,92		437,5	780,5	2	2	0,55	0,41	233,8	175,0	1023,7	368,7	578,9	23,7%	15,1%
E08_1-2_16000_oblouk	TR 168x7	1/2	25 133	51,6	2,42	1,86		124,9	96,0	2	1	1,10	0,63	484,8	276,5	1256,9	116,9	90,6	44,1%	56,9%
E08_1-2_16000_předpětí	TR 168x7	1/2	25 133	42,5	11,90			505,8	0,0	2	X	0,55	X	240,9	X	1256,9	429,8	X	9,9%	X
E08_1-2_16000_membrána	TR 168x7	1/2	25 133	98,2	5,50		0,95	540,1	0,0	2	X	0,53	X	233,1	X	1256,9	454,8	X	21,6%	X
E08_1-2_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/2	28 174	58,2	2,42	1,86		140,8	108,3	2	1	1,10	0,63	467,6	266,7	1318,8	131,5	102,0	44,3%	57,1%
E08_1-2_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/2	28 274	43,6	13,66			595,6	0,0	2	X	0,53	X	227,4	X	1318,8	497,9	X	8,8%	X
E08_1-2_18000_membrána	TR 194x6,3	1/2	28 274	111,0	6,03		0,95	669,3	0,0	2	X	0,50	X	214,5	X	1318,8	548,8	X	20,2%	X
E08_1-2_20000_oblouk	TR 194x9	1/2	31 416	66,5	2,36	1,82		156,9	121,0	2	1	1,10	0,62	525,7	299,3	1856,9	147,7	114,8	45,0%	57,9%
E08_1-2_20000_předpětí	TR 194x9	1/2	31 416	46,3	15,43			714,4	0,0	2	X	0,51	X	246,4	X	1856,9	610,6	X	7,6%	X
E08_1-2_20000_membrána	TR 194x9	1/2	31 416	125,9	6,62		0,95	833,5	0,0	2	X	0,48	X	228,1	X	1856,9	697,4	X	18,1%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
E10_1-2_06000_oblouk	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,4	2,46	1,86		45,3	34,2	2	1	1,10	0,64	455,5	261,9	402,2	42,2	32,2	43,6%	57,1%
E10_1-2_06000_předpětí	TR 70x5,6	1/2	9 425	25,3	17,05	9,99		431,4	252,7	3	2	0,54	0,47	221,3	192,8	402,2	277,3	198,1	9,1%	12,8%
E10_1-2_06000_membrána	TR 70x5,6	1/2	9 425	49,9	8,78	5,74		438,1	286,4	3	2	0,53	0,44	219,6	181,1	402,2	279,4	217,0	17,9%	23,0%
E10_1-2_08000_oblouk	TR 89x6,3	1/2	12 566	24,8	2,45	1,86		60,8	46,1	2	1	1,10	0,63	472,6	271,2	581,1	56,8	43,5	43,7%	57,0%
E10_1-2_08000_předpětí	TR 89x6,3	1/2	12 566	33,0	16,46	10,63		543,2	350,8	3	2	0,55	0,46	237,1	196,7	581,1	372,8	277,6	8,9%	11,9%
E10_1-2_08000_membrána	TR 89x6,3	1/2	12 566	66,5	8,03	5,78		534,0	384,4	3	2	0,56	0,44	239,1	187,9	581,1	369,2	297,3	18,0%	22,4%
E10_1-2_10000_oblouk	TR 108x7	1/2	15 708	31,4	2,51	1,91		78,8	60,0	2	1	1,10	0,63	483,4	277,1	788,5	73,8	56,6	42,6%	55,4%
E10_1-2_10000_předpětí	TR 108x7	1/2	15 708	39,8	16,24	10,91		646,4	434,2	3	2	0,58	0,47	253,2	205,9	788,5	467,5	350,5	8,5%	11,4%
E10_1-2_10000_membrána	TR 108x7	1/2	15 708	82,1	7,76	5,59		637,1	458,9	3	2	0,58	0,46	255,0	200,3	788,5	463,2	366,1	17,7%	22,4%
E10_1-2_12000_oblouk	TR 127x7	1/2	18 850	38,0	2,42	1,85		92,0	70,3	2	1	1,10	0,63	487,8	278,9	936,8	86,1	66,4	44,1%	57,2%
E10_1-2_12000_předpětí	TR 127x7	1/2	18 850	44,7	11,95	11,11		534,2	496,6	2	2	0,46	0,47	202,4	209,9	936,8	428,1	403,9	10,4%	11,1%
E10_1-2_12000_membrána	TR 127x7	1/2	18 850	94,7	5,15	5,50		487,7	520,9	2	2	0,48	0,46	211,8	204,9	936,8	398,0	419,6	23,8%	22,6%
E10_1-2_14000_oblouk	TR 152x6,3	1/2	21 991	44,5	2,44	1,87		108,6	83,2	2	1	1,10	0,63	469,2	268,0	1023,7	101,4	78,4	43,9%	56,7%
E10_1-2_14000_předpětí	TR 152x6,3	1/2	21 991	47,9	11,03	12,61		528,3	604,0	2	2	0,50	0,47	212,7	198,9	1023,7	431,8	480,4	11,1%	10,0%
E10_1-2_14000_membrána	TR 152x6,3	1/2	21 991	107,3	4,25	6,04		456,0	648,1	2	2	0,54	0,45	229,0	192,1	1023,7	382,0	507,0	28,1%	21,2%
E10_1-2_16000_oblouk	TR 168x7	1/2	25 133	51,6	2,42	1,86		124,9	96,0	2	1	1,10	0,63	484,8	276,5	1256,9	116,9	90,6	44,1%	56,9%
E10_1-2_16000_předpětí	TR 168x7	1/2	25 133	50,5	10,45	14,95		527,7	755,0	2	2	0,53	0,45	235,8	197,2	1256,9	445,9	598,1	11,3%	8,4%
E10_1-2_16000_membrána	TR 168x7	1/2	25 133	110,9	4,65	7,66	0,85	515,7	849,5	2	2	0,54	0,42	238,6	185,9	1256,9	437,1	653,3	25,4%	17,0%
E10_1-2_18000_oblouk	TR 194x6,3	1/2	28 174	58,2	2,42	1,86		140,8	108,3	2	1	1,10	0,63	467,6	266,7	1318,8	131,5	102,0	44,3%	57,1%
E10_1-2_18000_předpětí	TR 194x6,3	1/2	28 274	52,3	10,79	17,42		564,3	911,1	2	2	0,55	0,43	233,6	183,9	1318,8	475,5	696,4	11,0%	7,5%
E10_1-2_18000_membrána	TR 194x6,3	1/2	28 274	119,1	4,95	9,08	0,80	589,5	1081,4	2	2	0,54	0,40	228,6	168,8	1318,8	493,6	782,1	24,1%	15,2%
E10_1-2_20000_oblouk	TR 194x9	1/2	31 416	66,5	2,36	1,82		156,9	121,0	2	1	1,10	0,62	525,7	299,3	1856,9	147,7	114,8	45,0%	57,9%
E10_1-2_20000_předpětí	TR 194x9	1/2	31 416	55,3	11,48	18,56		634,8	1026,4	2	2	0,54	0,43	261,4	205,6	1856,9	550,1	827,8	10,1%	6,7%
E10_1-2_20000_membrána	TR 194x9	1/2	31 416	131,9	5,27	9,61	0,75	695,1	1267,6	2	2	0,52	0,39	249,8	185,0	1856,9	596,1	972,1	22,1%	13,6%

### 11.2.2 - Zdrojové tabulky k rozšířené parametrické studii

Oblouky jsou uloženy kloubově. Rozteč mezi oblouky  $B = 6,000$  m. V membráně je rovnoměrné předpětí  $5 \text{ kN/m}$

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	$L_{\text{teor}}$	$N_{\text{EK}}$	$\alpha_{\text{cr,y}}$	$\alpha_{\text{cr,z}}$	fact	$N_{\text{cr,y,ED}}$	$N_{\text{cr,z,ED}}$	$\eta_y$	$\eta_z$	$\beta_{\text{cr,y}}$	$\beta_{\text{cr,z}}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{\text{Rd}}$	$N_{\text{b,RD,y}}$	$N_{\text{b,RD,z}}$	$N_{\text{EK}}/$ $N_{\text{b,RD,y}}$	$N_{\text{EK}}/$ $N_{\text{b,RD,z}}$
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
A06_1-10_06000_obl-kl	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	47,8	5,02	1,31		240,0	62,6	2	1	1,00	0,98	228,3	223,4	535	201	58	23,8%	82,1%
A06_1-10_06000_předp-kl	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	19,1	15,10			288,4	0,0	2	X	0,91	X	208,2	X	535,4	233,8	X	8,2%	X
A06_1-10_06000_memb-kl	TR 82,5x6,3	1/10	6 159	61,3	5,38			329,8	0,0	2	X	0,85	X	194,7	X	535,4	259,7	X	23,6%	X
A06_1-10_08000_obl-kl	TR 108x6,3	1/10	8 212	64,2	4,99	1,31		320,4	84,1	2	1	1,00	0,98	228,2	222,7	715	268	78	23,9%	82,1%
A06_1-10_08000_předp-kl	TR 108x6,3	1/10	8 212	23,5	15,87			372,9	0,0	2	X	0,93	X	211,5	X	714,6	304,2	X	7,7%	X
A06_1-10_08000_memb-kl	TR 108x6,3	1/10	8 212	83,0	5,13			425,8	0,0	2	X	0,87	X	198,0	X	714,6	337,9	X	24,6%	X
A06_1-10_10000_obl-kl	TR 133x6,3	1/10	10 265	80,7	4,90	1,28		395,4	103,3	2	1	1,00	0,98	229,3	224,3	890	331	96	24,4%	84,0%
A06_1-10_10000_předp-kl	TR 133x6,3	1/10	10 265	26,9	16,65			447,9	0,0	2	X	0,94	X	215,4	X	890,2	367,8	X	7,3%	X
A06_1-10_10000_memb-kl	TR 133x6,3	1/10	10 265	103,9	4,92			511,2	0,0	2	X	0,88	X	201,7	X	890,2	409,0	X	25,4%	X
A06_1-10_12000_obl-kl	TR 159x6,3	1/10	12 317	97,5	4,93	1,29		480,7	125,8	2	1	1,00	0,98	228,3	223,2	1073	402	117	24,2%	83,3%
A06_1-10_12000_předp-kl	TR 159x6,3	1/10	12 317	29,8	17,87			532,5	0,0	2	X	0,95	X	216,9	X	1072,9	438,3	X	6,8%	X
A06_1-10_12000_memb-kl	TR 159x6,3	1/10	12 317	124,5	4,85			603,8	0,0	2	X	0,89	X	203,7	X	1072,9	485,2	X	25,7%	X
A06_1-10_14000_obl-kl	TR 194x5,6	1/10	14 370	114,2	5,16	1,35		589,3	154,2	2	1	1,00	0,98	215,9	211,1	1177	484	143	23,6%	80,0%
A06_1-10_14000_předp-kl	TR 194x5,6	1/10	14 370	32,1	20,00			642,0	0,0	2	X	0,96	X	206,9	X	1176,6	519,2	X	6,2%	X
A06_1-10_14000_memb-kl	TR 194x5,6	1/10	14 370	144,4	5,00			722,0	0,0	2	X	0,90	X	195,1	X	1176,6	569,1	X	25,4%	X
A06_1-10_16000_obl-kl	TR 194x9	1/10	16 423	133,8	5,15	1,35		689,1	180,6	2	1	1,00	0,98	250,9	245,0	1857	592	169	22,6%	79,1%
A06_1-10_16000_předp-kl	TR 194x9	1/10	16 423	37,0	20,12			744,4	0,0	2	X	0,96	X	241,4	X	1856,9	632,9	X	5,8%	X
A06_1-10_16000_memb-kl	TR 194x9	1/10	16 423	167,9	4,97			834,5	0,0	2	X	0,91	X	228,0	X	1856,9	698,1	X	24,1%	X
A06_1-10_18000_obl-kl	TR 219x9	1/10	18 476	151,9	5,24	1,37		796,0	208,1	2	1	1,00	0,98	248,7	243,2	2108	682	195	22,3%	78,0%
A06_1-10_18000_předp-kl	TR 219x9	1/10	18 476	40,2	21,31			856,7	0,0	2	X	0,96	X	239,7	X	2107,9	727,0	X	5,5%	X
A06_1-10_18000_memb-kl	TR 219x9	1/10	18 476	189,3	5,05			956,0	0,0	2	X	0,91	X	226,9	X	2107,9	798,6	X	23,7%	X
A06_1-10_20000_obl-kl	TR 245x8	1/10	20 529	168,8	4,88	1,28		823,7	216,1	2	1	1,00	0,98	244,8	239,0	2115	703	202	24,0%	83,6%
A06_1-10_20000_předp-kl	TR 245x8	1/10	20 529	42,0	21,10			886,2	0,0	2	X	0,96	X	236,1	X	2114,5	749,0	X	5,6%	X
A06_1-10_20000_memb-kl	TR 245x8	1/10	20 529	208,9	4,73			988,1	0,0	2	X	0,91	X	223,6	X	2114,5	821,6	X	25,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
B06_1-5_06000_obl-kl	TR 76x4,5	1/5	6 621	26,5	4,58	1,36		121,4	36,0	2	1	1,01	0,92	262,8	241,1	359	105	34	25,2%	78,6%
B06_1-5_06000_předp-kl	TR 76x4,5	1/5	6 621	19,2	13,58			260,7	0,0	2	X	0,69	X	179,3	X	358,8	196,3	X	9,8%	X
B06_1-5_06000_memb-kl	TR 76x4,5	1/5	6 621	40,1	6,97			279,5	0,0	2	X	0,66	X	173,2	X	358,8	205,8	X	19,5%	X
B06_1-5_08000_obl-kl	TR 89x6,3	1/5	8 828	35,7	4,16	1,24		148,5	44,3	2	1	1,00	0,92	302,3	276,8	581	132	42	27,0%	85,4%
B06_1-5_08000_předp-kl	TR 89x6,3	1/5	8 828	23,3	12,01			279,8	0,0	2	X	0,73	X	220,2	X	581,1	231,5	X	10,1%	X
B06_1-5_08000_memb-kl	TR 89x6,3	1/5	8 828	53,0	5,75			304,8	0,0	2	X	0,70	X	211,0	X	581,1	248,3	X	21,3%	X
B06_1-5_10000_obl-kl	TR 108x7	1/5	11 035	45,0	4,28	1,27		192,6	57,2	2	1	1,00	0,92	309,2	283,8	788	172	54	26,2%	83,3%
B06_1-5_10000_předp-kl	TR 108x7	1/5	11 035	26,3	11,67			306,9	0,0	2	X	0,79	X	244,9	X	788,5	261,9	X	10,0%	X
B06_1-5_10000_memb-kl	TR 108x7	1/5	11 035	65,6	5,18			339,8	0,0	2	X	0,76	X	232,8	X	788,5	286,0	X	22,9%	X
B06_1-5_12000_obl-kl	TR 127x7	1/5	13 242	54,4	4,13	1,23		224,7	66,9	2	1	1,00	0,92	312,1	285,9	937	201	63	27,1%	85,9%
B06_1-5_12000_předp-kl	TR 127x7	1/5	13 242	28,5	11,50			327,8	0,0	2	X	0,83	X	258,4	X	936,8	283,3	X	10,1%	X
B06_1-5_12000_memb-kl	TR 127x7	1/5	13 242	77,7	4,72			366,7	0,0	2	X	0,78	X	244,2	X	936,8	312,8	X	24,8%	X
B06_1-5_14000_obl-kl	TR 152x6,3	1/5	15 449	63,7	4,17	1,24		265,6	79,0	2	1	1,00	0,92	300,0	275,1	1024	236	75	27,0%	85,4%
B06_1-5_14000_předp-kl	TR 152x6,3	1/5	15 449	30,1	12,14			365,4	0,0	2	X	0,85	X	255,8	X	1023,7	315,1	X	9,6%	X
B06_1-5_14000_memb-kl	TR 152x6,3	1/5	15 449	89,8	4,61			414,0	0,0	2	X	0,80	X	240,3	X	1023,7	351,6	X	25,5%	X
B06_1-5_16000_obl-kl	TR 168x7	1/5	17 655	73,4	4,15	1,23		304,6	90,3	2	1	1,00	0,92	310,4	285,1	1257	272	85	27,0%	85,9%
B06_1-5_16000_předp-kl	TR 168x7	1/5	17 655	32,0	12,80			409,6	0,0	2	X	0,86	X	267,7	X	1256,9	356,7	X	9,0%	X
B06_1-5_16000_memb-kl	TR 168x7	1/5	17 655	102,5	4,57			468,4	0,0	2	X	0,81	X	250,3	X	1256,9	401,9	X	25,5%	X
B06_1-5_18000_obl-kl	TR 194x6,3	1/5	19 862	82,9	4,14	1,23		343,2	102,0	2	1	1,00	0,92	299,6	274,8	1319	305	96	27,2%	86,1%
B06_1-5_18000_předp-kl	TR 194x6,3	1/5	19 862	33,2	13,73			455,8	0,0	2	X	0,87	X	259,9	X	1318,8	394,5	X	8,4%	X
B06_1-5_18000_memb-kl	TR 194x6,3	1/5	19 862	114,6	4,59			526,0	0,0	2	X	0,81	X	242,0	X	1318,8	447,5	X	25,6%	X
B06_1-5_20000_obl-kl	TR 219x6,3	1/5	22 069	92,7	4,37	1,30		405,1	120,5	2	1	1,00	0,92	293,5	269,1	1494	359	114	25,8%	81,6%
B06_1-5_20000_předp-kl	TR 219x6,3	1/5	22 069	34,8	15,24			530,4	0,0	2	X	0,87	X	256,5	X	1494,5	457,7	X	7,6%	X
B06_1-5_20000_memb-kl	TR 219x6,3	1/5	22 069	127,5	4,83			615,8	0,0	2	X	0,81	X	238,1	X	1494,5	521,7	X	24,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C06_3-10_06000_obl-kl	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,8	3,57	1,27		74,3	26,4	2	1	1,02	0,85	321,5	269,5	329	67	25	31,2%	83,5%
C06_3-10_06000_předp-kl	TR 70x4,5	3/10	7 350	20,2	14,85	17,22		300,0	347,8	3	2	0,76	0,47	240,0	148,6	328,7	208,0	225,2	9,7%	9,0%
C06_3-10_06000_memb-kl	TR 70x4,5	3/10	7 350	34,9	8,83	9,92		308,2	346,2	3	2	0,75	0,47	236,7	148,9	328,7	211,2	224,7	16,5%	15,5%
C06_3-10_08000_obl-kl	TR 82,5x7	3/10	9 800	28,0	3,57	1,27		100,0	35,6	2	1	1,02	0,85	371,1	311,1	589	91	34	30,6%	82,8%
C06_3-10_08000_předp-kl	TR 82,5x7	3/10	9 800	24,4	12,97	15,07		316,5	367,7	2	2	0,57	0,53	208,6	193,5	589,4	256,7	288,7	9,5%	8,5%
C06_3-10_08000_memb-kl	TR 82,5x7	3/10	9 800	45,0	7,00	8,21		315,0	369,5	2	2	0,57	0,53	209,0	193,0	589,4	255,8	289,7	17,6%	15,5%
C06_3-10_10000_obl-kl	TR 108x5,6	3/10	12 250	35,1	3,61	1,29		126,7	45,3	2	1	1,02	0,85	343,3	287,2	640	115	43	30,6%	81,9%
C06_3-10_10000_předp-kl	TR 108x5,6	3/10	12 250	26,9	11,13	14,92		299,4	401,3	2	2	0,66	0,57	223,3	192,9	639,5	248,9	314,6	10,8%	8,5%
C06_3-10_10000_memb-kl	TR 108x5,6	3/10	12 250	54,8	5,61	7,72		307,4	423,1	2	2	0,65	0,56	220,4	187,9	639,5	254,4	327,2	21,5%	16,7%
C06_3-10_12000_obl-kl	TR 133x5	3/10	14 699	42,3	3,63	1,29		153,5	54,6	2	1	1,02	0,85	329,5	276,3	714	138	52	30,6%	82,1%
C06_3-10_12000_předp-kl	TR 133x5	3/10	14 699	28,7	10,82	16,45		310,5	472,1	2	2	0,71	0,58	231,7	187,9	713,8	261,0	365,2	11,0%	7,9%
C06_3-10_12000_memb-kl	TR 133x5	3/10	14 699	64,2	5,09	8,06		326,8	517,5	2	2	0,70	0,55	225,9	179,5	713,8	272,6	389,9	23,6%	16,5%
C06_3-10_14000_obl-kl	TR 133x8	3/10	17 149	50,2	3,37	1,20		169,2	60,2	2	1	1,01	0,85	392,4	328,8	1115	156	57	32,3%	87,4%
C06_3-10_14000_předp-kl	TR 133x8	3/10	17 149	30,7	10,78	18,16		330,9	557,5	2	2	0,72	0,56	280,5	216,1	1115,3	290,8	458,3	10,6%	6,7%
C06_3-10_14000_memb-kl	TR 133x8	3/10	17 149	74,5	4,80	8,52		357,6	634,7	2	2	0,70	0,52	269,9	202,6	1115,3	311,9	508,8	23,9%	14,6%
C06_3-10_16000_obl-kl	TR 152x8	3/10	19 599	57,9	3,42	1,22		198,0	70,6	2	1	1,01	0,85	389,3	325,9	1285	182	67	31,8%	86,0%
C06_3-10_16000_předp-kl	TR 152x8	3/10	19 599	32,2	11,77	21,00		379,0	676,2	2	2	0,73	0,55	281,4	210,6	1284,8	333,2	550,7	9,7%	5,8%
C06_3-10_16000_memb-kl	TR 152x8	3/10	19 599	85,0	4,94	9,64		419,9	819,4	2	2	0,70	0,50	267,3	191,4	1284,8	365,6	639,8	23,3%	13,3%
C06_3-10_18000_obl-kl	TR 168x9	3/10	22 049	66,0	3,60	1,28		237,6	84,5	2	1	1,01	0,85	396,1	332,1	1596	219	81	30,2%	81,9%
C06_3-10_18000_předp-kl	TR 168x9	3/10	22 049	33,9	13,15	24,56		445,8	832,6	2	2	0,74	0,54	289,1	211,6	1595,9	393,9	679,2	8,6%	5,0%
C06_3-10_18000_memb-kl	TR 168x9	3/10	22 049	96,3	5,27	10,47		507,5	1008,3	2	2	0,69	0,49	271,0	192,3	1595,9	443,1	789,1	21,7%	12,2%
C06_3-10_20000_obl-kl	TR 194x7	3/10	24 499	72,9	3,33	1,19		242,8	86,8	2	1	1,01	0,85	374,8	313,4	1460	222	82	32,8%	88,4%
C06_3-10_20000_předp-kl	TR 194x7	3/10	24 499	34,4	14,10	27,10		485,0	932,2	2	2	0,72	0,52	265,1	191,2	1459,9	421,6	727,7	8,2%	4,7%
C06_3-10_20000_memb-kl	TR 194x7	3/10	24 499	105,5	5,32			561,3	0,0	2	X	0,67	X	246,5	X	1459,9	479,8	X	22,0%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
D06_3-10_06000_obl-kl	TR 70x4,5	2/5	8 299	18,8	2,91	1,25		54,7	23,5	2	1	1,05	0,80	374,6	285,8	329	50	22	37,6%	84,6%
D06_3-10_06000_předp-kl	TR 70x4,5	2/5	8 299	21,7	14,94	14,07		324,2	305,3	3	2	0,65	0,44	230,8	158,6	328,7	217,2	210,1	10,0%	10,3%
D06_3-10_06000_memb-kl	TR 70x4,5	2/5	8 299	33,7	9,36	8,87		315,4	298,9	3	2	0,65	0,45	234,0	160,3	328,7	214,0	207,6	15,7%	16,2%
D06_3-10_08000_obl-kl	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,4	2,90	1,25		73,7	31,8	2	1	1,05	0,80	432,3	329,2	589	68	30	37,2%	83,9%
D06_3-10_08000_předp-kl	TR 82,5x7	2/5	11 066	25,8	13,07	14,04		337,2	362,2	2	2	0,49	0,47	202,0	194,9	589,4	270,0	285,4	9,6%	9,0%
D06_3-10_08000_memb-kl	TR 82,5x7	2/5	11 066	42,7	7,39	8,36		315,6	357,0	2	2	0,51	0,48	208,9	196,4	589,4	256,1	282,2	16,7%	15,1%
D06_3-10_10000_obl-kl	TR 114x4,5	2/5	13 832	31,7	2,90	1,25		91,9	39,6	2	1	1,05	0,80	373,6	284,6	550	84	37	37,7%	84,6%
D06_3-10_10000_předp-kl	TR 114x4,5	2/5	13 832	28,0	10,95	15,92		306,6	445,8	2	2	0,57	0,48	204,6	169,7	549,5	246,8	323,7	11,3%	8,7%
D06_3-10_10000_memb-kl	TR 114x4,5	2/5	13 832	50,6	5,83	9,24		295,0	467,5	2	2	0,58	0,46	208,6	165,7	549,5	239,3	333,5	21,1%	15,2%
D06_3-10_12000_obl-kl	TR 133x5	2/5	16 599	38,4	2,95	1,28		113,3	49,2	2	1	1,05	0,79	383,6	291,2	714	104	47	37,0%	82,5%
D06_3-10_12000_předp-kl	TR 133x5	2/5	16 599	29,6	11,03	19,26		326,5	570,1	2	2	0,62	0,47	226,0	171,0	713,8	272,4	416,2	10,9%	7,1%
D06_3-10_12000_memb-kl	TR 133x5	2/5	16 599	59,7	5,57	15,66		332,5	934,9	2	2	0,61	0,36	223,9	133,5	713,8	276,6	536,0	21,6%	11,1%
D06_3-10_14000_obl-kl	TR 152x5	2/5	19 365	45,0	2,80	1,21		126,0	54,5	2	1	1,05	0,80	389,8	296,5	820	116	52	38,9%	87,2%
D06_3-10_14000_předp-kl	TR 152x5	2/5	19 365	30,8	12,00	21,43		369,6	660,0	2	2	0,61	0,46	227,6	170,3	819,7	309,0	480,5	10,0%	6,4%
D06_3-10_14000_memb-kl	TR 152x5	2/5	19 365	68,8	5,74			394,9	0,0	2	X	0,59	X	220,2	X	819,7	326,7	X	21,1%	X
D06_3-10_16000_obl-kl	TR 159x7	2/5	22 132	52,4	2,87	1,24		150,4	65,0	2	1	1,04	0,79	429,3	326,5	1187	139	62	37,6%	84,6%
D06_3-10_16000_předp-kl	TR 159x7	2/5	22 132	32,5	13,71			445,6	0,0	2	X	0,61	X	249,4	X	1186,6	382,0	X	8,5%	X
D06_3-10_16000_memb-kl	TR 159x7	2/5	22 132	80,2	6,23			499,6	0,0	2	X	0,57	X	235,5	X	1186,6	422,0	X	19,0%	X
D06_3-10_18000_obl-kl	TR 178x7	2/5	24 898	59,4	2,85	1,24		169,3	73,7	2	1	1,04	0,79	429,1	325,3	1335	157	70	37,8%	84,6%
D06_3-10_18000_předp-kl	TR 178x7	2/5	24 898	33,7	15,76			531,1	0,0	2	X	0,59	X	242,3	X	1335,0	452,0	X	7,5%	X
D06_3-10_18000_memb-kl	TR 178x7	2/5	24 898	90,2	6,77			610,7	0,0	2	X	0,55	X	226,0	X	1335,0	509,5	X	17,7%	X
D06_3-10_20000_obl-kl	TR 194x7	2/5	27 664	66,4	2,70	1,17		179,3	77,7	2	1	1,04	0,79	436,1	331,2	1460	166	74	39,9%	89,6%
D06_3-10_20000_předp-kl	TR 194x7	2/5	27 664	34,8	17,77			618,4	0,0	2	X	0,56	X	234,8	X	1459,9	521,8	X	6,7%	X
D06_3-10_20000_memb-kl	TR 194x7	2/5	27 664	100,0	7,31			731,0	0,0	2	X	0,52	X	216,0	X	1459,9	600,8	X	16,6%	X



TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
E06_1-2_06000_obl-kl	TR 70x5,6	1/2	9 425	18,4	2,46	1,28		45,3	23,6	2	1	1,10	0,77	455,5	315,8	402	42	22	43,6%	82,1%
E06_1-2_06000_předp-kl	TR 70x5,6	1/2	9 425	23,4	16,21	10,97		379,3	256,7	3	2	0,57	0,46	236,0	191,3	402,2	259,3	200,4	9,0%	11,7%
E06_1-2_06000_memb-kl	TR 70x5,6	1/2	9 425	34,4	10,32	7,12		355,0	244,9	3	2	0,59	0,47	244,0	195,8	402,2	249,6	193,4	13,8%	17,8%
E06_1-2_08000_obl-kl	TR 89x6,3	1/2	12 566	24,8	2,45	1,28		60,8	31,7	2	1	1,10	0,76	472,6	326,9	581	57	30	43,7%	82,0%
E06_1-2_08000_předp-kl	TR 89x6,3	1/2	12 566	27,4	12,05	12,55		330,2	343,9	2	2	0,47	0,46	202,7	198,7	581,1	264,8	273,3	10,3%	10,0%
E06_1-2_08000_memb-kl	TR 89x6,3	1/2	12 566	41,7	7,03	8,07		293,2	336,5	2	2	0,50	0,47	215,2	200,8	581,1	240,6	268,8	17,3%	15,5%
E06_1-2_10000_obl-kl	TR 108x7	1/2	15 708	31,4	2,51	1,32		78,8	41,4	2	1	1,10	0,76	483,4	333,3	788	74	40	42,6%	79,4%
E06_1-2_10000_předp-kl	TR 108x7	1/2	15 708	29,6	11,09	16,78		328,3	496,7	2	2	0,54	0,44	236,8	192,5	788,5	277,7	389,0	10,7%	7,6%
E06_1-2_10000_memb-kl	TR 108x7	1/2	15 708	49,3	6,20	10,56		305,7	520,6	2	2	0,56	0,43	245,4	188,1	788,5	261,0	402,9	18,9%	12,2%
E06_1-2_12000_obl-kl	TR 127x7	1/2	18 850	38,0	2,42	1,27		92,0	48,3	2	1	1,10	0,76	487,8	336,7	937	86	46	44,1%	82,5%
E06_1-2_12000_předp-kl	TR 127x7	1/2	18 850	31,0	12,20	19,23		378,2	596,1	2	2	0,54	0,43	240,5	191,6	936,8	321,3	465,7	9,6%	6,7%
E06_1-2_12000_memb-kl	TR 127x7	1/2	18 850	50,6	6,56	11,31		331,9	572,3	2	2	0,58	0,44	256,7	195,5	936,8	286,5	451,6	17,7%	11,2%
E06_1-2_14000_obl-kl	TR 152x6,3	1/2	21 991	44,5	2,44	1,28		108,6	57,0	2	1	1,10	0,76	469,2	323,9	1024	101	54	43,9%	82,0%
E06_1-2_14000_předp-kl	TR 152x6,3	1/2	21 991	32,1	13,78			442,3	0,0	3	X	0,82	X	348,7	X	1023,7	372,2	X	8,6%	X
E06_1-2_14000_memb-kl	TR 152x6,3	1/2	21 991	69,9	7,29			509,6	0,0	3	X	0,76	X	324,9	X	1023,7	419,2	X	16,7%	X
E06_1-2_16000_obl-kl	TR 168x7	1/2	25 133	51,6	2,42	1,28		124,9	66,0	2	1	1,10	0,76	484,8	333,3	1257	117	63	44,1%	81,9%
E06_1-2_16000_předp-kl	TR 168x7	1/2	25 133	33,4	14,62			488,3	0,0	3	X	0,83	X	367,8	X	1256,9	416,8	X	8,0%	X
E06_1-2_16000_memb-kl	TR 168x7	1/2	25 133	80,8	7,37			595,5	0,0	3	X	0,75	X	333,0	X	1256,9	494,0	X	16,4%	X
E06_1-2_18000_obl-kl	TR 194x6,3	1/2	28 174	58,2	2,42	1,28		140,8	74,5	2	1	1,10	0,76	467,6	321,5	1319	131	71	44,3%	82,1%
E06_1-2_18000_předp-kl	TR 194x6,3	1/2	28 274	34,2	15,84			541,7	0,0	3	X	0,84	X	357,7	X	1318,8	459,1	X	7,4%	X
E06_1-2_18000_memb-kl	TR 194x6,3	1/2	28 274	91,0	7,56			688,0	0,0	3	X	0,75	X	317,4	X	1318,8	561,2	X	16,2%	X
E06_1-2_20000_obl-kl	TR 194x9	1/2	31 416	66,5	2,36	1,25		156,9	83,1	2	1	1,10	0,75	525,7	361,1	1857	148	80	45,0%	83,6%
E06_1-2_20000_předp-kl	TR 194x9	1/2	31 416	36,7	16,69			612,5	0,0	3	X	0,83	X	399,1	X	1856,9	532,8	X	6,9%	X
E06_1-2_20000_memb-kl	TR 194x9	1/2	31 416	103,0	7,68			791,0	0,0	3	X	0,73	X	351,2	X	1856,9	667,0	X	15,4%	X

### 11.2.3 - Zdrojové tabulky k rozšířené parametrické studii

Oblouky jsou uloženy kloubově ve své rovině a vetknutě z roviny. Vyšetřované geometrie jsou C06\_3-10\_XX XXX. V membráně je rovnoměrné předpětí 10 kN/m', respektive rovnoměrné předpětí 10 kN/m' se zvětšenou tloušťkou  $t_{memb} = 1,4$  mm

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	$L_{teor}$	$N_{EK}$	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	$N_{cr,y,ED}$	$N_{cr,z,ED}$	$n_y$	$n_z$	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$N_{Rd}$	$N_{b,RD,y}$	$N_{b,RD,z}$	$N_{EK}/N_{b,RD,y}$	$N_{EK}/N_{b,RD,z}$
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C06_3-10_06000_předp-PRE10	TR 70x4,5	3/10	7 350	39,9	8,26	11,72		329,6	467,6	3	2	0,72	0,40	228,9	128,1	328,7	219,1	254,1	18,2%	15,7%
C06_3-10_06000_memb-PRE10	TR 70x4,5	3/10	7 350	54,2	6,32	8,90		342,5	482,4	3	2	0,71	0,40	224,6	126,2	328,7	223,5	256,7	24,3%	21,1%
C06_3-10_08000_předp-PRE10	TR 82,5x7	3/10	9 800	47,8	7,54	13,08		360,4	625,2	2	2	0,53	0,41	195,4	148,4	589,4	284,3	404,2	16,8%	11,8%
C06_3-10_08000_memb-PRE10	TR 82,5x7	3/10	9 800	68,2	5,42	9,52		369,6	649,3	2	2	0,53	0,40	193,0	145,6	589,4	289,8	411,6	23,5%	16,6%
C06_3-10_10000_předp-PRE10	TR 108x5,6	3/10	12 250	52,6	6,63	8,89		348,7	467,6	2	2	0,61	0,53	206,9	178,7	639,5	282,0	351,5	18,6%	15,0%
C06_3-10_10000_memb-PRE10	TR 108x5,6	3/10	12 250	79,9	4,51	6,18		360,3	493,8	2	2	0,60	0,51	203,6	173,9	639,5	289,5	364,7	27,6%	21,9%
C06_3-10_12000_předp-PRE10	TR 133x5	3/10	14 699	55,6	6,46	9,69		359,2	538,8	2	2	0,66	0,54	215,4	175,9	713,8	294,9	400,9	18,9%	13,9%
C06_3-10_12000_memb-PRE10	TR 133x5	3/10	14 699	90,6	4,16	6,45		376,9	584,4	2	2	0,65	0,52	210,3	168,9	713,8	306,7	422,9	29,5%	21,4%
C06_3-10_14000_předp-PRE10	TR 133x8	3/10	17 149	58,5	6,47	10,67		378,5	624,2	2	2	0,68	0,53	262,3	204,3	1115,3	328,2	502,2	17,8%	11,6%
C06_3-10_14000_memb-PRE10	TR 133x8	3/10	17 149	101,7	3,97	6,85		403,7	696,6	2	2	0,66	0,50	254,0	193,4	1115,3	347,6	546,8	29,3%	18,6%
C06_3-10_16000_předp-PRE10	TR 152x8	3/10	19 599	60,5	7,00			423,5	0,0	2	X	0,69	X	266,2	X	1284,8	368,4	X	16,4%	X
C06_3-10_16000_memb-PRE10	TR 152x8	3/10	19 599	112,9	4,10			462,9	0,0	2	X	0,66	X	254,6	X	1284,8	398,8	X	28,3%	X
C06_3-10_18000_předp-PRE10	TR 168x9	3/10	22 049	62,6	7,84			490,8	0,0	2	X	0,70	X	275,6	X	1595,9	429,9	X	14,6%	X
C06_3-10_18000_memb-PRE10	TR 168x9	3/10	22 049	124,3	4,39			545,7	0,0	2	X	0,67	X	261,3	X	1595,9	472,8	X	26,3%	X
C06_3-10_20000_předp-PRE10	TR 194x7	3/10	24 499	63,3	8,34			527,9	0,0	2	X	0,69	X	254,1	X	1459,9	454,6	X	13,9%	X
C06_3-10_20000_memb-PRE10	TR 194x7	3/10	24 499	133,8	4,46			596,7	0,0	2	X	0,65	X	239,0	X	1459,9	506,1	X	26,4%	X

TYP KONSTRUKCE	TR	H/L	L <sub>teor</sub>	N <sub>EK</sub>	$\alpha_{cr,y}$	$\alpha_{cr,z}$	fact	N <sub>cr,y,ED</sub>	N <sub>cr,z,ED</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>z</sub>	$\beta_{cr,y}$	$\beta_{cr,z}$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	N <sub>Rd</sub>	N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>b,RD,z</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,y</sub>	N <sub>EK</sub> / N <sub>b,RD,z</sub>
	[-]	[-]	[mm]	[kN]	[-]	[-]	[%]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
C06_3-10_06000_předp-T1400	TR 70x4,5	3/10	7 350	40,0	10,51	16,87		420,4	674,8	3	2	0,64	0,34	202,7	106,7	328,7	244,6	279,0	16,4%	14,3%
C06_3-10_06000_memb-T1400	TR 70x4,5	3/10	7 350	54,6	7,82	12,78		427,0	697,8	3	2	0,64	0,33	201,1	104,9	328,7	246,1	280,7	22,2%	19,4%
C06_3-10_08000_předp-T1400	TR 82,5x7	3/10	9 800	48,0	10,74	16,85		515,5	808,8	2	2	0,45	0,36	163,4	130,5	589,4	363,8	450,1	13,2%	10,7%
C06_3-10_08000_memb-T1400	TR 82,5x7	3/10	9 800	68,5	7,54	13,05		516,5	893,9	2	2	0,45	0,34	163,3	124,1	589,4	364,2	464,9	18,8%	14,7%
C06_3-10_10000_předp-T1400	TR 108x5,6	3/10	12 250	52,8	8,81	12,49		465,2	659,5	2	2	0,53	0,45	179,2	150,5	639,5	350,2	432,5	15,1%	12,2%
C06_3-10_10000_memb-T1400	TR 108x5,6	3/10	12 250	80,2	5,94	8,76		476,4	702,6	2	2	0,52	0,43	177,1	145,8	639,5	356,0	446,1	22,5%	18,0%
C06_3-10_12000_předp-T1400	TR 133x5	3/10	14 699	55,9	8,27	13,46		462,3	752,4	2	2	0,59	0,46	189,9	148,8	713,8	359,6	488,0	15,5%	11,5%
C06_3-10_12000_memb-T1400	TR 133x5	3/10	14 699	90,9	5,33	9,91		484,5	900,8	2	2	0,57	0,42	185,5	136,0	713,8	372,1	528,5	24,4%	17,2%
C06_3-10_14000_předp-T1400	TR 133x8	3/10	17 149	58,9	8,27	14,31		487,1	842,9	2	2	0,60	0,45	231,2	175,8	1115,3	409,2	626,9	14,4%	9,4%
C06_3-10_14000_memb-T1400	TR 133x8	3/10	17 149	101,8	5,13	9,58		522,2	975,2	2	2	0,58	0,42	223,3	163,4	1115,3	434,1	688,3	23,5%	14,8%
C06_3-10_16000_předp-T1400	TR 152x8	3/10	19 599	60,9	9,02			549,3	0,0	2	X	0,61	X	233,7	X	1284,8	462,9	X	13,2%	X
C06_3-10_16000_memb-T1400	TR 152x8	3/10	19 599	112,4	5,37			603,6	0,0	2	X	0,58	X	223,0	X	1284,8	501,4	X	22,4%	X
C06_3-10_18000_předp-T1400	TR 168x9	3/10	22 049	63,1	10,16			641,1	0,0	2	X	0,62	X	241,1	X	1595,9	544,9	X	11,6%	X
C06_3-10_18000_memb-T1400	TR 168x9	3/10	22 049	123,7	5,82			719,9	0,0	2	X	0,58	X	227,5	X	1595,9	601,9	X	20,6%	X
C06_3-10_20000_předp-T1400	TR 194x7	3/10	24 499	64,0	11,08			709,1	0,0	2	X	0,59	X	219,3	X	1459,9	585,9	X	10,9%	X
C06_3-10_20000_memb-T1400	TR 194x7	3/10	24 499	133,0	6,10			811,3	0,0	2	X	0,55	X	205,0	X	1459,9	653,6	X	20,3%	X

### 11.3.1 - Objasnění systému vkládání vstupních hodnot do programu SOFiSTiK + Barevné rozlišení

<b>ČERVENÉ:</b>	Dílčí výpočetní modul ASE = Advanced Solution Engine
<b>TMAVĚ MODRÁ:</b>	Dílčí skupina funkcionalit
<b>SVĚTLE MODRÁ:</b>	Konkrétní výpočetní funkce
<b>ČERNÉ:</b>	Vkládaná hodnota pro výpočet
<b>ZELENÉ:</b>	Poznámky. Nutné oddělit paragrafem \$

**11.3.2 -** Vstupní hodnoty 1.fáze výpočtu – Předpínání bez započítání tuhosti lanových a membránových prvků.  
Výpočet proveden na základě vyrovnání sil = Force density

**+PROG ASE** urs:15.1

**HEAD** Formfinding\_1a     \$ Nadpis

**CTRL CABL 0**     \$ když "0",nezhledňuje se počáteční zakřivení kabelu (u Formfinding zbytečné)

**CTRL ITER 3 V2 1**     \$ ITER-volba iterační metody

\$ V2 1 = pro každý další iterační krok je aktualizována tuhost (pro Formfinding zbytečné)

**SYST PROB TH3 ITER 50** \$ PROB TH3 - návrh dle teorie 3 řádu; 50 iterací

**NSTR KMOD S0**     \$ Zavedení materiálových nelinearit do výpočtu

\$ KMOD S0 = Když "S0", tak materiálová nelinearita pro liniové prvky není zohledněna

\$ KMOD S1,K1,KN,... obsaženo v manuálu AQB (sekce NSTR)

**GRP 1 FACS 1 PREX 0**     \$ GRP 1 = Vnitřní oblouk (střední; primárně vyšetřovaný)

\$ FACS 1 = Plná tuhost oblouku (musí být -> podpůrný prvek primárně v tlaku)

\$ PREX 0 = Oblouk není nijak předepnut

**GRP 2 FACS 1 PREX 0**     \$ GRP 2 = Vnější oblouky

\$ FACS 1 = Plná tuhost oblouku (musí být -> podpůrný prvek primárně v tlaku)

\$ PREX 0 = Oblouk není nijak předepnut

**GRP 100 FACS 1 PREX 0**     \$ GRP 100= Vnější oblouky příhrady

\$ FACS 1 = Plná tuhost oblouku (musí být -> podpůrný prvek primárně v tlaku)  
\$ PREX 0 = Oblouk není nijak předepnut

GRP 101 FACS 1 PREX 0 \$ GRP 101= Diagonály a svislice příhrady  
\$ FACS 1 = Plná tuhost oblouku (musí být -> podpůrný prvek primárně v tlaku)  
\$ PREX 0 = Prvky nejsou nijak předepnuty

GRP 3 FACS 1E-10 PREX 20.00 \$ GRP 3 = Obvodová lana u "volných" okrajů membrány  
\$ FACS 1E-10 = Zanedbatelná tuhost lana  
\$ Pro prvotní fázi Formfinding je tuhost zbytečná  
\$ Využije se princip vyrovnání sil = FORCE DENSITY

\$ VÝPOČET PŘEDPĚTÍ V LANĚ PRO RYCHLEJŠÍ POČÁTEČNÍ ITERACI  
\$  $PREX = SM \times R$  (SM = PREX -> Předpětí v membráně ve směru lokální osy "X")  
\$ PREX = 20.00kN

GRP 5 FACS 1E-10 PREX 4.00 PREY 4.00 \$ GRP 5 = Membrána (vnější)  
GRP 7 FACS 1E-10 PREX 4.00 PREY 4.00 \$ GRP 7 = Membrána (vnější)  
GRP 6 FACS 1E-10 PREX 4.00 PREY 4.00 \$ GRP 6 = Membrána (vnitřní)  
GRP 8 FACS 1E-10 PREX 4.00 PREY 4.00 \$ GRP 8 = Membrána (vnitřní)

\$ FACS 1E-10 = Zanedbatelná tuhost membrány  
\$ Pro fázi Formfinding je tuhost zbytečná  
\$ Využije se princip vyrovnání sil = FORCE DENSITY

\$ PREX 4.00 = Předpětí v membráně ve směru lokální osy "X" o velikosti 4.00 kN/m'

\$ PREY 4.00 = Předpětí v membráně ve směru lokální osy "Y" o velikosti 4.00 kN/m'

LC 5001 DLZ 1 TITL 'Formfinding\_1a' \$ LC 5001 = Výsledný tvar bude uložen pod označením zatěžovacího stavu LC 5001  
\$ LC 5001 poté slouží jako výchozí tvar konstrukce pro výpočet počátečního tvaru se zavedenými tuhostmi

\$ DLZ - vlastní tíha komponent (1 = plnou hodnotou)

### 11.3.3 - Vstupní hodnoty 2.&3.fáze výpočtu – Tvar předepnuté konstrukce včetně materiálových vlivů + aktualizace systému

+PROG ASE urs:15.2

HEAD Formfinding\_1 \$ Nadpis

CTRL CABL 1 \$ "CABL 1"zohledňuje počáteční zakřivení lanových prvků

CTRL WARN 480 \$ Eliminuje programovou chybu, když je předchozí fázi počítáno bez zohlednění počáteční křivosti lanových prvků

CTRL ITER 3 V2 1 \$ ITER-volba iterační metody

\$ V2 1 = pro každý další iterační krok je aktualizována tuhost (pro Formfinding zbytečné)

SYST PROB TH3 ITER 50 \$ PROB TH3 - návrh dle teorie 3 řádu; 50 iterací

SYST NMAT YES \$ „YES“ Zavedeny materiálové nelinearity do výpočtu

SYST PLC 5001 \$ PLC = Primary Load Case = Jako počáteční tvar je vzat výsledek z předchozí fáze -> LC 5001

NSTR KMOD \$ Potvrzení zavedení materiálových nelinearit do výpočtu

GRP - FACS 1 \$ GRP - = Všechny skupiny prvků

\$ FACS 1 = Všechny skupiny uvažovány s maximální možnou tuhostí

LC 5101 DLZ 1 TITL 'Formfinding\_1' \$ LC 5101 = Výsledný tvar bude uložen pod označením zatěžovacího stavu LC 5101

\$ LC 5101 poté slouží jako výchozí tvar konstrukce pro výpočet počátečního tvaru se zavedenými tuhostmi



\$ DLZ - vlastní tíha komponent (1 = plnou hodnotou)

END

+PROG ASE urs:6

HEAD Update system

\$ Nadpis

SYST PLC 5101 STOR YES

\$ Uloží vypočítaný zatěžovací stav 5101 jako výchozí pro všechny následující operace

END

#### 11.3.4 - Vstupní hodnoty – Lineární výpočet

+PROG SOFILOAD urs:4

HEAD Update Load direction \$ Nadpis

LC 100 \$ Aktualizuje směr zatížení v závislosti na lokální souřadný systém

END

+PROG ASE urs:3

HEAD Lineární analýza LC 100 \$ Nadpis

SYST PLC 5101 \$ PLC = Primary Load Case = Jako počáteční tvar je vzat výsledek z předchozí fáze ->  
LC 5101

GRP 1 VAL YES \$ Skupina objektů 1 je do výpočtu zahrnuta; Když „NO“, tak se s takovými prvky  
nepočítá

GRP 2-XX VAL YES

LC 10 FACD 1 \$ Vypočítané hodnoty se budou ukládat od označení LC 10

\$ „Factor Dead Load“ = Všechna stálá zatížení započítána plnou hodnotou

LCC 100 \$ Zkopírovaný a již aktualizovaný základní zatěžovací stav, ze kterého se berou hodnoty  
pro výpočet

END

**11.3.5 -** Vstupní hodnoty – Nelineární výpočet – Příklad se zatížením LC 200. Zatížení 1,0kN/m‘ působící v lokálním souřadném systému, je primárně vnášeno na konstrukci v nadstavbě programu AutoCad na model s minimální plochou => musí být aktualizováno na model po předpětí

**+PROG SOFILOAD** urs:4

**HEAD** Update Load direction     \$ Nadpis  
LC 200                             \$ Aktualizuje směr zatížení v závislosti na lokální souřadný systém  
**END**

**+PROG ASE** urs:16.10

**HEAD** Loading Steps Analysis LC 200     \$ Nadpis

**CTRL** CABL 1                     \$ "CABL 1"zohledňuje počáteční zakřivení lanových prvků  
**CTRL** WARN 480                 \$ Eliminuje programovou chybu, když je předchozí fázi počítáno bez zohlednění počáteční křivosti lanových prvků  
**CTRL** ITER 3 **V2** 1             \$ ITER-volba iterační metody  
                                   \$ V2 1 = pro každý další iterační krok je aktualizována tuhost (pro Formfinding zbytečné)  
**SYST** **PLC** 5101                 \$ PLC = Primary Load Case = Jako počáteční tvar je vzat výsledek z předchozí fáze -> LC 5101  
**SYST** **PROB** TH3 **ITER** 50     \$ **PROB** TH3 - návrh dle teorie 3 řádu; 50 iterací  
**SYST** **NMAT** YES                 \$ „YES“ Zavedeny materiálové nelinearity do výpočtu  
**NSTR** **KMOD**                     \$ Potvrzení zavedení materiálových nelinearit do výpočtu

GRP 1 VAL YES \$ Skupina objektů 1 je do výpočtu zahrnuta; Když „NO“, tak se s takovými prvky nepočítá

GRP 2-XX VAL YES

ULTI STEP 22 \$ Počet iterací

ULTI FAK1 0.001 \$ Počáteční násobitel 1. iterace

ULTI FAKE -0.001 \$ Přesnost, při jejímž dosažení je ukončen dílčí iterační krok. 0.001 = 0.1%

ULTI DFAK 0.05 \$ Násobitel přírůstku zatížení pro dílčí iterace

ULTI PRO 1 \$ Faktor zvětšení následujícího iteračního kroku. Když „1“, tak se stále přičítá stejná počáteční hodnota „DFAK“

ULTI DL NO \$ Zohledňuje započítání přírůstků i pro stálé zatížení. Když „NO“, tak se stálé zatížení bere pro všechny iterace plnou hodnotou a nedělí se

LC 10 FACD 1 \$ Vypočítané hodnoty se budou ukládat od označení LC 10

\$ „Factor Dead Load“ = Všechna stálá zatížení započítána plnou hodnotou

LCC 100 \$ Zkopírovaný a již aktualizovaný základní zatěžovací stav, ze kterého se berou hodnoty pro výpočet

END

### 11.3.6 - Vstupní hodnoty – Výpočet vlastních tvarů a faktorů zatížení pro ztrátu stability

+PROG ASE urs:19.4

HEAD Buckling Eigenvalues LC 2020 \$ Nadpis

SYST PLC 2020 \$ PLC = Primary Load Case = Jako počáteční tvar je vzat výsledek z předchozí fáze -> LC 2020

GRP 1 VAL YES \$ Skupina objektů 1 je do výpočtu zahrnuta; Když „NO“, tak se s takovými prvky nepočítá

GRP 2-XX VAL YES

EIGE 20 \$ Počet počítaných vlastních frekvencí = 20

EIGE ETYP BUCK \$ Typ počítaných vlastních frekvencí = „BUCKLING“ = ztráta stability

EIGE LMIN AUTO \$ Zobrazované vlastní tvary; Když „AUTO“ tak se jako první zobrazí vlastní tvary s pozitivním faktorem zatížení = k vybočení dojde po určitém přírůstku zatížení, ne při odlehčení

EIGE LC 2050 \$ Ukládat vypočítané tvary od označení „LC 2050“

END