



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra architektury**

Návrhové limity jednovrstvých membránových polí

Design limits of tensile membrane structures

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jan Vecko

Doktorský studijní program: Architektura a stavitelství

Studijní obor: Architektura a stavitelství

Školitel: Prof. Ing. arch. Miloš Kopřiva

Praha, 2018



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jan Vecko

Název disertační práce: Návrhové limity jednovrstvých membránových polí

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Prof. Ing. arch. Miloš Kopřiva.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

Aplikace digitálního modelování membránových a fóliových konstrukcí

Experimentální projekt netradičního využití fólií ETFE a jednovrstvých textilních membrán

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu disertační práce Prof. Ing. arch. Milošovi Kopřivovi za konzultace, odborné vedení a trpělivost, kterou mi poskytl při psaní této disertační práce. Dále bych rád poděkoval rodině za vytrvalou podporu a zázemí.

ANOTACE

Disertační práce je zaměřena na jednovrstvé membránové konstrukce tvarované na základě mechanického předpětí. Cílem disertační práce je sestavení základních návrhových limitů pro potřeby architektonického návrhu. Membránové konstrukce se tvarují do antiklastických ploch dvojí křivosti, vnější zatížení se přenáší deformací plochy a jedná se o tvarově aktivní konstrukce. Z hlediska únosnosti konstrukce je rozhodující míra zakřivení povrchu, proto je potřeba při návrhu spolupracovat se specialisty v oboru membránových konstrukcí. Současný stav návrhu membránových konstrukcí není kodifikován a návrh se opírá o zkušenosti z realizovaných staveb. Pro efektivní navrhování jednovrstvých membránových konstrukcí je třeba znát v prvních fázích prostorových limity volných membránových polí. Práce se zaměřuje na nalezení architektonických a technických rozměrových limitů volných membránových polí, pro jednotlivé typologické druhy (bodově podepřená membrána, membrána na obloukových podporách, kónické tvary membrány a lomenice).

Nalezení a zobecnění návrhových limitů je provedeno metodami digitálního modelování pomocí specializovaných softwarových programů pro tvarování a statickou analýzu membránových konstrukcí. Návrhové limity jednovrstvých membránových polí jsou provedeny pomocí parametrizace okrajových konstrukcí jednotlivých typologických druhů. Na základě provedených analýz jsou sestaveny empirické zásady pro koncepční architektonický návrh jednovrstvých membránových konstrukcí. Sestavené návrhové limity nejsou určeny pro posouzení konstrukce a nenahrazují statický výpočet jednotlivých konstrukcí. Návrhové limity jsou určeny pro potřeby architektonického návrhu v koncepční fázi tvarování.

Klíčová slova:

membránové konstrukce, textilní konstrukce, koncept, návrh, tvarování, návrhové limity, efektivní návrh

ANOTATION

The aim of the dissertation is to prepare basic design limits for the needs of architectural design. The dissertation is focused on tensile membrane structures shaped by mechanical prestress. Tensile membrane structures are formed into double-curvature anticlastic surfaces. External loads are transferred by the deformation of surface, that is, it is a form active structures. In terms of carrying capacity, the degree of curvature of the membrane surface is decisive. So it is necessary to cooperate with specialist in design membrane structures in form-finding process. The current state of the design of membrane structures is not codified and the design tensile membrane structures is based on the experience of the realized constructions. For efficient design of tensile membrane structures is necessary know a design boundaries of free membrane elements. The thesis focuses on finding architectural and technical dimensional limits of free membrane structures, for individual typological types (point supported membrane, membrane on arched supports, conical shapes and membrane on cable support).

The design limits is done by digital modeling methods using special software programs for form-finding and static analysis of membrane structures. The design limits of tensile membrane structures arrays are performed by parameterization of boundary structures for typological forms. On the basis of these analyzes are compiled a empirical principles for conceptual architectural design of tensile membrane structures. Assembled design limits are not intended to assess the structure and do not replace a static calculation of the individual structures. The design limits are determined for the purposes of conceptual architectural design of the conception shaping phase.

Keywords:

tensile membrane structure, fabric structure, concept design, form-finding, design limits, efficient design

OBSAH

ANOTACE.....	4
ANOTATION.....	5
1 ÚVOD.....	7
2 HISTORIE.....	8
3 NÁVRH.....	13
3.1 TVAROVÁNÍ (FORM-FINDING).....	14
BODOVĚ PODEPŘENÁ MEMBRÁNA - SEDLO.....	16
MEMBRÁNA NA OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH.....	16
KÓNICKÉ TVARY.....	16
LOMENICE.....	17
3.1.1 Mýdlový film.....	18
3.1.2 Síťované modely.....	18
3.1.3 Numerické metody pro tvarování.....	19
METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	19
METODA FORCE DENSITY.....	19
METODA DYNAMICKÉHO UVOLNĚNÍ + URS.....	20
3.2 STATICKÁ ANALÝZA.....	21
3.2.1 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCÍ.....	22
3.3 VSTUPNÍ PARAMETRY VÝPOČTU.....	23
3.3.1 KOTEVNÍ BODY.....	23
3.3.2 OBVODOVÉ, PODPŮRNÉ A KOTEVNÍ LANO.....	24
3.3.3 NOSNÍK.....	25
3.3.4 TKANINY A FOLIE.....	27
TKANINY.....	27
FOLIE.....	30
SPECIÁLNÍ MATERIÁLY.....	31
PŘEDPĚTÍ A ORIENTACE OSNOVY/ ÚTKU.....	32
3.4 NÁVRHOVÉ CHARAKTERISTIKY.....	33
4 NÁVRHOVÉ LIMITY.....	35
4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY.....	35
4.1.1 GEOMETRIE.....	35
4.1.2 PŘEDPĚTÍ.....	36
4.1.3 MATERIÁL.....	36
4.1.4 ZATÍŽENÍ.....	37
4.1.5 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ.....	37
4.2 POROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH MODELŮ.....	38
4.2.1 VSTUPNÍ PARAMETRY.....	39
4.2.2 VÝSLEDKY A POROVNÁNÍ.....	40
4.3 STATICKÁ ANALÝZA.....	45
4.3.1 BODOVĚ PODEPŘENÁ MEMBRÁNA.....	45
4.3.2 MEMBRÁNA NA OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH.....	52
4.3.3 KÓNICKÉ TVARY.....	58
4.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	62
5 ZÁVĚR.....	65
SEZNAM LITERATURY.....	67
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	71
PŘÍLOHY.....	74

1 ÚVOD

Membránové konstrukce ve světě často označované termínem light-weight structures případně tensile membrane structures označují konstrukce, které pro přenos sil a překonání rozpětí využívají výhradně tahových sil. Materiály používané pro membránové konstrukce se vyznačují nízkou vahou ($0,7 - 1,3 \text{ kg/m}^2$), pevností v tahu, nulovou tlakovou únosností a minimální ohybovou únosností. Pro správnou funkci konstrukce je důležité, aby plochy byly vždy napjaté, poté jsou schopny překonávat velká rozpětí bez nutnosti vnitřních podpor, a proto se často využívají pro zastřešení sportovních a kulturních staveb, jeviště, zakrytí veřejných prostranství apod. Základem schopnosti přenášet veškeré zatížení a být stále předpjatá, je správné natvarování plochy membrány. Pro přenos zatížení jak směrem dolů tak nahoru je nutné zajistit dvojí křivost plochy. Plochy jsou natvarovány na základě okrajových podmínek a vnitřního přepětí membrány. Podle zajištění rovnoměrného vnitřního předpětí se konstrukce rozdělují na jednovrstvé mechanicky předpínané konstrukce a vícevrstvé pneumatické konstrukce.

Membránové konstrukce mechanicky předpínané se ve stavebách používají po dobu více jak 60-ti let, nicméně do dnešní doby není jejich návrh kodifikován a spoléhá se na zkušenosti inženýrů a architektů zrealizovaných staveb. Forma předpínaných membránových konstrukcí je nejčastěji spojena s výrazně zakřivenými plochami. Jako předchůdce membránové architektury lze označit architekturu stanů, mobilních stanových přístřešků a cirkusových šapitó. Zakřivené tvary, inspirace v přírodě se staly předlohou architektovi Frei Otto, který na základě fyzických modelů navrhl první membránové konstrukce a dal základ novému konstrukčnímu směru [1]. Architekti díky rozvoji technologie výroby textilních materiálů a díky komplexním digitálnímu návrhu mohou v současné době navrhovat méně zakřivené plochy, při zachování požadovaných vlastností. Problematika správného návrhu jednovrstvých membránových konstrukcí spočívá v určení optimálního zakřivení ve vztahu k funkci, dispozičním řešení a reakci na klimatické vlivy.

Disertační práce se zabývá zkoumáním závislosti formy, materiálu a vnějších vlivů při návrhu membránových konstrukcí. Cílem práce je nalezení zobecňujících návrhových limitů membránových konstrukcí, které jsou tvarovány na základě přepětí vneseného do konstrukce mechanicky. Tyto návrhové limity bude poté možné použít při koncepčním návrhu jednovrstvých konstrukcí a efektivně navrhnout tvar plochy pro následné statické posouzení. Správným tvarovým návrhem lze dosáhnout jak úspory vlastního materiálu membrány tak zejména optimalisaci kotevních sil a s tím spojené nosné konstrukce.

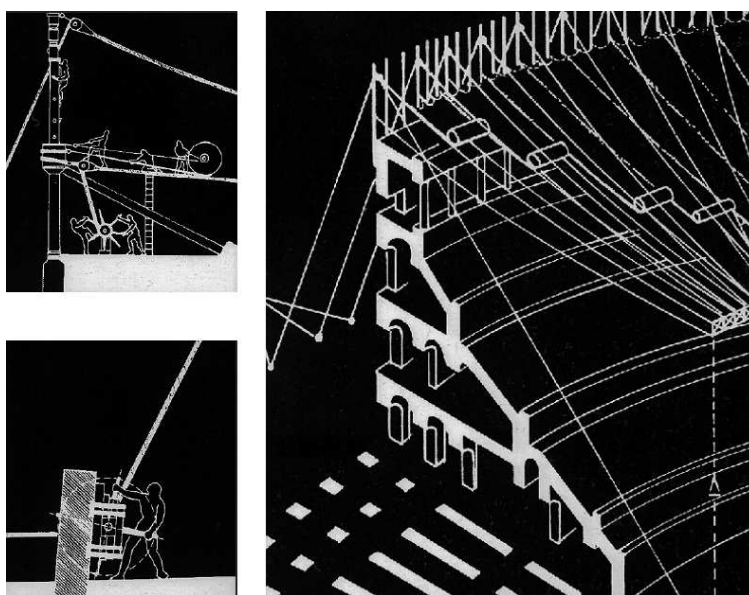
2 HISTORIE

Podíváme-li se na membránové konstrukce z pohledu historie a vývoje membránových konstrukcí, lze konstatovat, že membránové konstrukce a konstrukce využívající tkané textilie případně kožešiny jsou známy od počátků lidského osídlení. Nejčastěji v podobě stanových přístřešků nomádských kočovných kmenů [2], které pomocí jednoduchých sloupů a kůlů, lan a textilie vytvářeli mobilní příbytky. Tento jednoduchý způsob zastřešení se dochoval u některých kočovných kmenů do dnešních dob.



Obr. 1. Stanový přístřešek nomádských kmenů [2]

S rozvojem civilizace a poznání se rozvíjí i schopnost provádět složitější konstrukce. Zajímavým příkladem membránového zastřešení jsou stínící textilie použité pro zastínění hlediště nad římským koloseem. Zde byla kolem celého ochozu kolosea vykonzolidována dřevěná konstrukce, která byla potažena textilními rohožemi. Ty umožňovaly určitou formu mobility a byly tak schopny reagovat na požadavky zastínění [3].



Obr. 2. Mobilní zastřešení hlediště Kolosea [3]

Uvedené příklady ukazují na nejjednodušší příklady textilního zastřešení, které v 18. a 19. století dosáhly vyšší technické dokonalosti v podobě mobilních zastřešení cirkusových stanů (šapitó). Cirkusové stany jsou tvořeny zejména kónickými plochami se středovým kuželem. Tvarová forma a provedení se dochovala do dnešní doby. Zastřešení často využívalo také systém sloupů, které podpíraly zastřešení v ploše jeviště pro zakrytí většího rozpětí..

Membránovým konstrukcím tak jak je známe ze současné doby se začal systematicky věnovat ruský avantgardní architekt a vědec Vladimír Grigorjevič Šuchov, který na počátku 20. století experimentoval se zakřivenými plochami. Pro některé své realizované výškové stavby využil princip hyperboloidu, jako například u televizní věže v Moskvě či věžím nesoucím vedení vysokého napětí na řece Oce. Jeho další zajímavou realizací byl výstavní pavilon v Nižnijm Novgorodě kde pro zastřešení 25 000 m² využil zavěšené ocelové lanové konstrukce pokryté ocelovými pláty [4].



Obr. 3. Výstavní pavilon v Nižnijm Novgorodě [4]

Za předchůdce principu membránových konstrukcí lze považovat visuté lanové konstrukce, které využívají systém lanové sítě, která je překryta dřevěnými, kovovými, plastovými či textilními materiály. Vzestupu lanových konstrukcí v 50. a 60.

letech minulého století zaznamenal rychlý rozvoj těchto staveb, zejména se jednalo o sportovní, kulturní stavby a stavby pro výstavnictví. Prvními realizovanými lanovými konstrukcemi byly haly od polského architekta Macieja Nowického či E. Scellinga. Za jednu z neznámějších lanových staveb lze považovat plavecký bazén pro Olympijské hry v Japonsku roku 1964 od architekta Kenza Tange, který využil dvou na sebe kolmých osnov lan pro vytvoření velmi dynamické a ikonické stavby té doby, která si bere za předobraz tradiční japonské stavby.

V 50. letech 20. století se začalo dvojitě zakřiveným plochám a konstrukcím využívající přepínaných materiálů věnovat několik architektů a konstruktérů. Zároveň rozvoj chemického průmyslu v 60. a 70. letech umožnil využít nové poznatky v oblasti polymerních materiálů a jejich uplatnění pro stavby. Zde se poprvé setkáváme s materiály, která využívají vnitřní tkanou strukturu z bavlny, skelných či polyesterových vláken, které propůjčují materiálu pevnost a tvarovou stálost. Tato tkaná struktura je potažena ochrannou vrstvou z PVC, PTFE a dalších materiálů,



Obr. 4. Olympijský stadion, Tokyo, 1964 [36]

kteřá propůjčují tkanině odolnost vůči povětrnosti či požáru. Nejvýraznějším inovátorem se stal architekt a konstruktér Frei Otto. Architektova intenzivní práce na poli přepínaných lanových a membránových konstrukcí je založena na teorii minimálních ploch. První typicky membránovou konstrukcí bylo zastřešení pavilonu v Kasselu v roce 1955, které se stalo prototypem sedlové formy, která byla podepřena dvojicí sloupů a lan. Následovaly další experimentální projekty menšího rozsahu. Prvním velkým projektem se stalo zastřešení výstavního pavilonu v roce 1967 na světové výstavě Expo v Montrealu. Zde společně s Ralfem Gutbrodem vytvořili dvojitě zakřivenou lanovou síť, která byla pokryta dvojitou textilní membránou. Celá konstrukce byla nesena systémem sloupů a kotevních lan.



Obr. 5. Olympijský stadion Mnichov 1972 [37]

Nejnámějším projektem a ikonickou stavbou se stal až projekt zastřešení olympijského stadionu v Mnichově konaném v roce 1972. Na projektu spolupracoval Frei Otto a architekt Günter Behnisch s jeho týmem. Zastřešení bylo tvořeno dvojitě zakřivenou lanovou sítí, která byla zakryta průhlednými plexi deskami. Při návrhu využili zmenšený fyzický model tvořený řetězovou sítí, kterou pomocí fotogrammetrie přenášeli do výrobní dokumentace.

Na Stuttgartské univerzitě vzniklo Experimentální centrum membránových konstrukcí, založené Friem Ottem a jeho kolegy. Zde se věnovali experimentům s využitím novými materiály, hledali nové formy využití a nabyté poznatky předávali do praxe [1]. Intenzivní vědecká práce Freie Otta dala základ celému konstrukčnímu systému dvojitě zakřivených ploch, které dnes vyústily ve vynikající architektonické projekty jako jsou zastřešení sportovišť, letišť, obchodních a kulturních staveb apod.. Typickým znakem těchto staveb je výrazné dvojitě zakřivení ploch, které umožňuje překlenout velká rozpětí. Zajímavým příkladem je zakrytí atria z roku 2012 v Dadong Art Centru, Kaohsiungu na Taiwanu, které je zastřešeno pomocí jedenácti kónických trychtýřů o rozpětí více jak dvacet metrů a celkové ploše 4200 m². Dalším zajímavým příkladem je hudební pavilon v Arkansasu, který zastřešuje jeviště s přilehlým

hledištěm pomocí membránového zastřešení tvořeného spojenými sedlovými plochami o celkové ploše 3500 m².

V nedávné době byl učiněn posun směrem k plošším formám se zachováním požadovaných vlastností. Vynikajícím příkladem těchto tendencí je stavba Millennium Dome v Londýně od architekta Richarda Rogerse z roku 1999. Stavba je zastřešena synklasitickou plochou, která je tvořena lanovou sítí a je potažena tkaninou v téměř plochém tvaru [5].



Obr. 6. Millenium Dome, Londýn [38]

Pro národní stadion v Pekingu tzv. „Ptačí hnízdo“ bylo v roce 2008 navrženo architekty Herzogem & de Meuronem zastřešení pomocí jednovrstvé folie ETFE doplněné o podpory v podobě nosníků a lan.



Obr. 7. Detail zastřešení Národní stadion Peking 2008 [39]

Dalším příkladem plošší formy je zastřešení Olympijského stadionu v Londýně v roce 2012, kdy celé zastřešení stadionu bylo navrženo jako dočasné. Bylo zde využito plochého tvaru membránového zastřešení v podobě lomenice podpírané lanovou konstrukcí. Výše uvedené příklady spojuje, že pro překonání rozpětí a

schopnosti odolávat zatížení, bylo použito nosných konstrukčních prvků (lana a nosníky) a membrána zde tvořila výplň bez konstrukčního využití.



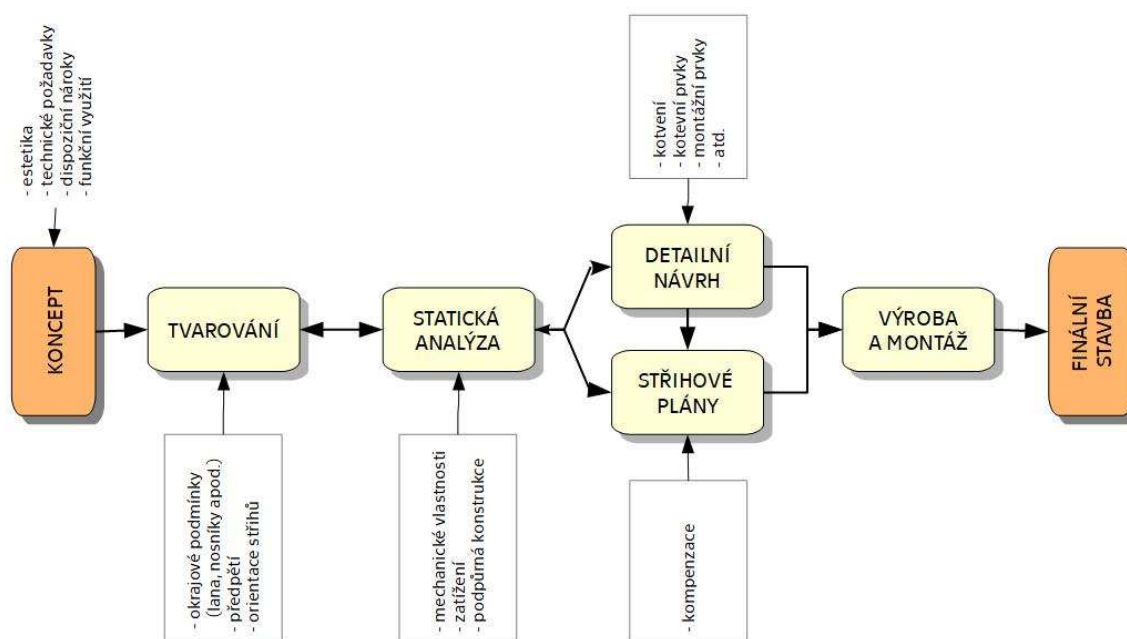
Obr. 8. Zastřešení Olympijský stadion Londýn 2012 [40]

Uvedené příklady dokazují, že při návrhu membránových konstrukcí je důležité hledat správnou formu a zakřivení konstrukce. Důležitou roli při návrhu membránových konstrukcí hraje také volba použitého materiálu. Vzhledem k pozitivním vlastnostem materiálů užívaných v membránové architektuře se dnes jednovrstvé textilie i jednovrstvé folie používají jako efektivní náhrada za konvenční střešní a fasádní materiály, jako je zasklení nebo polykarbonát.

3 NÁVRH

Architektonická tvorba je tvůrčí činností jejíž výsledkem je pak architektonický návrh. Prací architekta při architektonickém návrhu je splnění všech požadavků kladených na stavbu. Jedná se o nalezení řešení splňujícího technické, estetické, uživatelské a společenské požadavky. Jednotlivé požadavky jsou často ve vzájemném rozporu a architekt nalézá řešení a kompromisy splňující konkrétní zadání klienta.

Architektonický návrh jednovrstvých membránových konstrukcí začíná studií stavby a končí realizací stavby. Studie stavby definuje základní tvarové, dispoziční, konstrukční a materiálové provedení. Prvním krokem je skicování a sestavení konceptu stavby, které se vizualizuje a převádí do prostorového modelu. V dalším stupni dokumentace je nutné podrobně posoudit studii stavby. Zde dochází ke spolupráci se specialisty, kteří upřesňují jednotlivé požadavky a nároky stavby. Základními požadavky je ověření konstrukčního a materiálového řešení. Konstrukční působení dvojitě zakřivených membrán se od působení tuhé nosné konstrukce výrazně liší, proto je důležitá odborná konstrukční analýza, která je předpokladem úspěšné realizace. Pro efektivní architektonický návrh je důležité při sestavování prvních prostorových představ znát základní limity membránových konstrukcí, které ve výsledku zásadním způsobem ovlivňují statické působení konstrukce.



Obr. 9. Schéma návrhu membránových konstrukcí

Většina návrhových metod pro výpočet a návrh membránových konstrukcí vznikl z posouzení již postavených konstrukcí nebo konceptů staveb založených na fyzikálních modelech. Především se jedná o práce Freie Otta a jeho výzkumného týmu v Ústavu pro lehké konstrukce „Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren“ (ILEK) na Stuttgartské univerzitě. Jejich studie využívají minimální plochy mýdlových bublin, napínané síťované materiály a přesné drátové modely. Hlavní zásady a koncepty se publikovaly v odborných textech IL [6][7].

Modelování a analýza membránových konstrukcí je dvoustupňový proces – hledání tvaru a následná statická analýza, které nelze vzájemně oddělit. Základní tvar definovaný na základě okrajových podmínek při procesu hledání tvaru, má zásadní vliv na statickou a konstrukční analýzu. Při procesu statické analýzy dochází k definování materiálových vlastností a zatížení pro jednotlivé elementy, vždy se v tomto případě jedná o nelineární výpočty vyžadující specializovaný software. Při návrhu vždy architekt spolupracuje se specialistou na návrh membránových konstrukcí, který je schopen posoudit navržený tvar. Proto při návrhu dochází k iteračnímu procesu, ten vede k nalezení výsledné formy, která splňuje jak dispoziční a funkční požadavky, tak vyhovuje i statické analýze.

Diagram na obr. 9 znázorňuje proces návrhu membránové konstrukce od počátečního konceptu po finální realizovanou stavbu. Nejdůležitějším procesem jak bylo uvedeno, je tvarování. Při tvarování nejčastěji architekt, vychází z vlastních zkušeností a pomocí jednoduchých nástrojů a metod definuje prostorový tvar konstrukce. Pro architekta je důležité, aby při návrhu nebyl limitován přílišnými složitostmi, které v prvotní fázi návrhu nejsou podstatné. Při tvarování se vždy jedná o jednoduché nástroje a metody, které umožňují variantní řešení. V další fázi vstupuje do procesu statické analýzy specialista, který na základě definovaného prostorového modelu sestaví podrobný statický model, který následně posoudí. Výsledky poté konzultuje s architektem a společně hledají finální tvarové řešení. Konečný tvar membránové konstrukce je poté podroben detailnímu návrhu a tvorbě stříhových plánů, které se stanou podkladem pro výrobu jednotlivých komponentů membrány a jejich montáži na stavbě.

Disertační práce se zabývá zejména procesem tvarování a statické analýzy, která je pro konečný návrh klíčová. Dialog mezi architektem a statikem prochází iteračním procesem, který může z hlediska projekčního procesu v důsledku znamenat zvýšené náklady. V případě membránových konstrukcí je důležité, aby architekt znal návrhové limity a podmínky statické analýzy a mohl již v počátku své práce navrhnout tvar membránové konstrukce, který je realizovatelný.

3.1 TVAROVÁNÍ (FORM-FINDING)

Problém nalezení vhodných tvarových forem pro jednovrstvé membránové konstrukce může být řešen různými způsoby. Pro všechny způsoby tvarování je potřeba splnit základní předpoklady, aby výsledný tvar byl schopen odolávat vnějšímu zatížení a zároveň splňoval architektonické požadavky. V každém případě je potřeba zajistit, aby celá konstrukce byla rovnoměrně předepnutá v celé ploše. Membránové konstrukce jsou tvarově aktivní konstrukční systém, který přenáší zatížení výhradně tahovými silami a deformací plochy. Jako hlavní nosný prvek se používají tkané materiály a folie, které mají relativně vysokou tahovou pevnost, ale téměř nulovou ohybovou tuhost a nulovou únosnost v tlaku. Vnější zatížení se přenáší na základě deformace plochy. Z tohoto důvodu je důležité dosáhnout v celé ploše tahového předpětí, které je v kombinaci se zakřivením povrchu schopné přenášet zatížení. Tuhost membránových konstrukcí je ovlivněna geometrií zejména zakřivením povrchu, vneseným předpětím a tuhostí materiálu. Hovořím zde o geometrické

tuhosti. Nejdůležitější proměnou geometrické tuhosti membránových konstrukcí je zakřivení povrchu. Pouze s dostatečným dvojitým zakřivením plochy je membrána schopna přenášet vnější zatížení. Křivost plochy může být popsána dvěma parametry, hlavní křivostí a Gaussovou křivostí.

Hlavní křivost

Hlavní křivost popisuje velikost a směr minimální a maximální křivosti v jednom bodě na povrchu. Informace o hlavní křivosti jsou výsledkem průsečíků rovin v uvažovaném bodě, jedná se o tečnou rovinu k uvažovanému bodu na ploše a rovině kolmé na tečnou rovinu. Přímkou vzniklé průnikem jednotlivých uvažovaných rovin se sledovanou plochou určují minimální nebo maximální poloměr křivosti (r_1, r_2). Hlavní křivost (k_1, k_2) odpovídá obrácené hodnotě poloměru křivosti ($k_i=1/r_i$). Směr zakřivení je označen znaménkem +/-; kladná hodnota zakřivení směřuje k pozorovateli, jedná se o konvexní křivku, záporná hodnota je odvrácena pozorovateli a jedná se o konkávní křivku [8 s.136].

Gaussova křivost

Gaussova křivost K popisuje míru zakřivení ploch. Znaménka +/- označují charakter zakřivení, který závisí na hlavní křivosti k_1 a k_2 .

$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2} \quad (1)$$

Pro plochy s jednou křivostí, má jeden z poloměrů hlavní křivosti tendenci k nekonečnu; proto je Gaussova křivost rovna nule. Takové plochy jsou rozvinutelné, což znamená, že mohou být rozbaleny do roviny, například povrch válců nebo kuželů.

Dále rozlišujeme kladnou a zápornou křivost pro plochy s dvojitou křivostí. Kladné zakřivení ($K > 0$) je, když středy poloměrů hlavních křivosti jsou umístěny na stejné straně plochy, takové plochy jsou označovány za synklastické plochy nebo také eliptické. Tento typ zakřivení se vyskytuje například u pneumaticky předpínaných ploch.

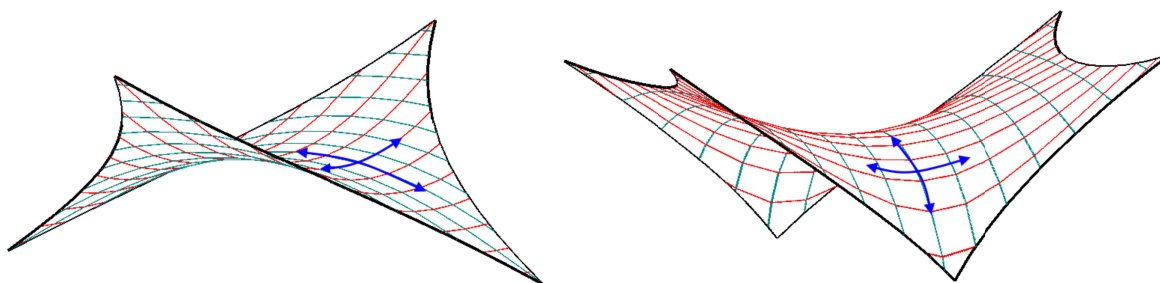
Negativní Gaussovo zakřivení ($K < 0$) je zakřivení dvou hlavních poloměrů křivosti, jejíž středy jsou umístěny na opačných stranách plochy, jedna z hlavních křivosti je negativní. Tyto plochy s negativním Gaussovým zakřivením jsou označovány za antiklastické plochy nebo také parabolické. Tento typ ploch se týká právě mechanicky předpínaných membránových ploch. Plochy s nenulovou Gaussovou křivostí jsou nerozvinutelné a pro jejich převedení do roviny je nutné provedení aproximace [8 s.136].

Jednovrstvé membránové konstrukce se svým chováním nejvíce podobají tvarováním minimálních ploch. Minimální plochy jsou definovány jako plochy s nejmenší plochou mezi uzavřeným okrajem, zároveň pro ně platí, že napětí v ploše je ve všech směrech shodné. Výsledný tvar je tedy dán definováním okrajových hranic a vnitřního předpětí plochy. Chceme-li provést změnu výsledné geometrie, je nutné změnit jeden ze vstupních parametrů.

Definováním a variováním okrajových hraničních podmínek lze jednoduše dosáhnout složitých tvarových forem. Proto jakékoliv zobecnění je obtížné, aby popsalo výsledné chování všech ploch. Širokou geometrickou rozmanitost membránových konstrukcí lze zredukovat na čtyři základní typologické druhy – bodově podepřená membrána, membrána na obloukových podporách, kónické plochy a lomenice.

BODOVĚ PODEPŘENÁ MEMBRÁNA - SEDLO

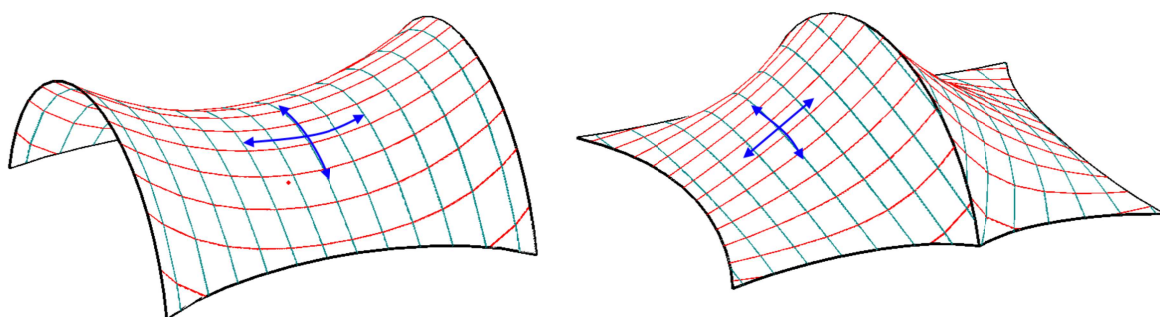
Membrána tvarována do tvaru sedlové plochy je dána vzájemným převýšením kotevních bodů. Musí se jednat minimálně o čtyři body, které neleží v jedné rovině, jedině tak lze dosáhnout ploch dvojí křivosti. Okraj plochy je nejčastěji tvořen zakřiveným lanem, případně rovnými nosníky. Orientace osnovy/ útku odpovídá dominantnímu působení sil, nejčastěji mezi protilehlými vrcholy.



Obr. 10. Bodově podepřená membrána

MEMBRÁNA NA OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH

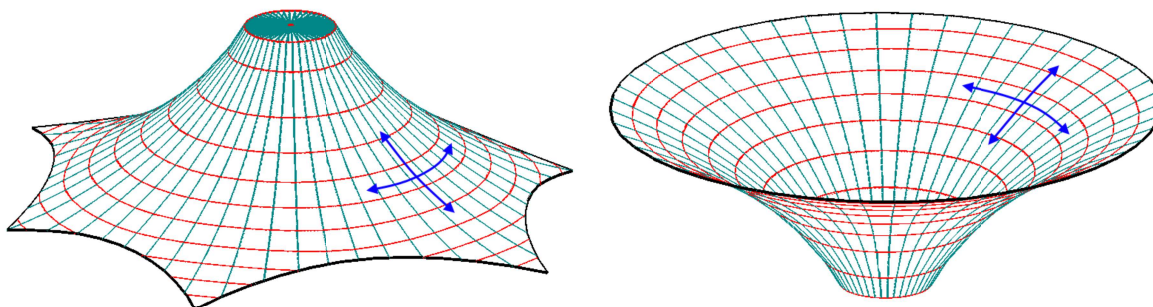
Dvojí zakřivení membrány na obloukových podporách je dáno zakřivením obvodových konstrukcí, které jsou tvořeny pevným kotvením okraje membrány. Obloukové podpory mohou být vloženy do plochy membrány. Okraj membrány je pak nejčastěji tvořen zakřivenými nosníky a zakřiveným lanem. Orientace osnovy a útku je nejčastěji mezi protilehlými zakřivenými nosníky.



Obr. 11. Membrána na obloukových podporách

KÓNICKÉ TVARY

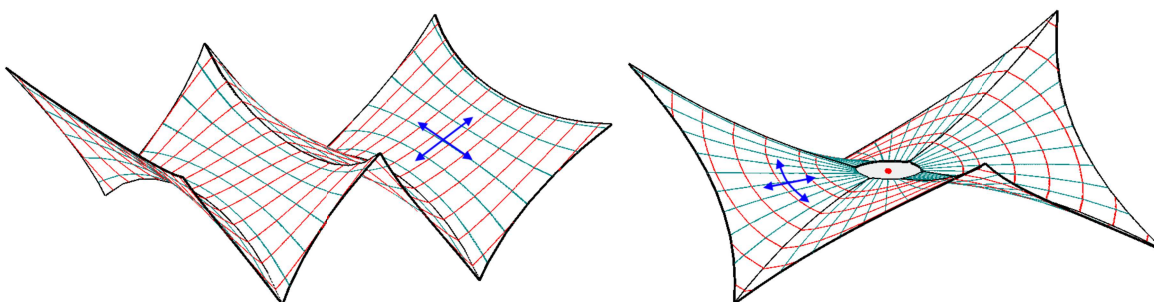
Kónické tvary jsou tvořeny vnějším okrajem, který se nachází téměř v rovině a dvojího zakřivení je dosaženo převýšením či snížením vnitřních kotevních prvků. Jedná se o tvary připomínající pagody a trychtýře. Orientace osnovy a útku je nejčastěji orientována tangenciálně směrem ke středovým konstrukcím.



Obr. 12. Kónické tvary - pagoda a trychtýř

LOMENICE

Jedná se o tvary, u kterých se střídají úžlabí a hřebeny. Hřeben je tvořen zakřiveným lanem v plachtě a vypíná ji směrem nahoru. Oproti tomuto lanu působí lano v úžlabím, které vypíná plachtu směrem dolů. Tvar lomenice je tedy rozdělen na menší plochy, které jsou v místě lana spojeny. U velkých membránových ploch se používají lana v úžlabí a hřebenu pro zvýšení tuhosti konstrukci a tím schopnost přenášet zatížení. Velmi často se membrána tvaru lomenice používá pro pohyblivé konstrukce. Orientace osnovy a útku je nejčastěji orientována v kolmém směru na vypínací lana.



Obr. 13. Membrána tvaru lomenice

Úkolem architekta je určení takových okrajových podmínek, které vedou k rovnovážnému stavu plochy, a výsledný tvar bude splňovat nejen statické parametry tak i estetické hledisko. Při návrhu je nutné respektovat základní geometrické požadavky, kdy celá plocha musí být schopna odvádět dešťovou vodu, pokud je vystavena vnějším klimatickým vlivům. Je nutné minimalizovat ploché části, ve kterých by hromaděním sněhu a dešťové vody mohlo docházet k negativnímu prohnutí membrány a vzniku neodvodněných ploch. Dále je nutné zamezení rozkmitání konstrukce vlivem působení větru. Výsledný tvar konstrukce a jeho schopnost přenášet vnější zatížení jsou ovlivněny zejména zakřivením povrchu, vnitřním předpětím a tuhostí materiálu. Mluvíme zde o geometrické tuhosti [9 s.209].

Pro tvarování a modelování jednovrstvých membránových konstrukcí lze využít několik metod. Pro fyzické modelování lze využít mýdlového filmu nebo síťovaných materiálů, v případě digitálního modelování lze využít numerické prostorové modely.

3.1.1 Mýdlový film

Nejjednodušším způsobem modelování jednovrstvých membránové konstrukce je tvarování pomocí mýdlového filmu. Mýdlový film se vytvoří mezi uzavřeným okrajem a vytvořená plocha je tvarována do minimálních ploch. K natvarování okrajových konstrukcí se nejčastěji využívá drátu a lanka, který se poté ponoří do mýdlového roztoku. Po vytažení z mýdlové lázně se mezi okrajové konstrukce napne mýdlový film.



Obr. 14. Mýdlový model bodově podepřené membrány [41]

Plochy tvořené pomocí mýdlového filmu jsou velmi elegantní, velmi lehce se upravuje okraj modelu a jsou tím pádem velmi názorné. Nevýhodou této metody je nemožnost ovlivnit vnitřní předpětí v ploše, vždy se jedná o izotropní předpětí v celé ploše. Další nevýhodou je časová omezenost, po kterou je možné výsledný model zkoumat [10].

3.1.2 Síťované modely

Další možností modelování membránových konstrukcí je využití modelů z pružných síťovaných materiálů jako je například nylon či silon. Touto metodou lze velmi názorně a rychle modelovat membránové konstrukce včetně podpůrné konstrukce. Modely ze síťovaných materiálů umožňují dobře simulovat rozdílné předpětí v ploše a její vliv na výslednou geometrii konstrukce.



Obr. 15. Síťovaný model membránové konstrukce [9]

Při návrhování Mnichovského Olympijského stadionu z roku 1972 byl využit drátěný a řetízkový model. Model byl sestaven v měřítku 1:25 a jednotlivé prvky představovaly skutečné prvky na stavbě. Z modelu byla pomocí fotogrammetrie odečítána geometrie jednotlivých prvků. Dále bylo pomocí modelu určeno předpětí pro jednotlivé tažené prvky a na základě modelu byly sestaveny stříhové plány.

Jednotlivé prvky použité při modelování pomocí síťovaných materiálů reprezentují skutečné konstrukční elementy a lze modelovat nejen samotnou plochu membrány, ale celou konstrukci včetně podpůrné nosné konstrukce. Modely ze síťovaných materiálů jsou velmi názorné a lze jednoduše měnit výslednou geometrii při jejich zachování [10].

3.1.3 Numerické metody pro tvarování

Výše uvedené fyzické modelování se v současné době využívá pouze v počáteční koncepční práci, kdy není potřeba znát detailní parametry konstrukce. S rozvojem prostorového digitálního modelování je spojen rozvoj numerických metod pro modelování a simulaci membránových konstrukcí. Numerické modelování je z pohledu komplexního návrhu konstrukce efektivní. Model sestavený ve fázi studie, lze poté použít pro statickou analýzu a tvorbu stříhových plánů. V počátku je digitální modelování nevýhodné z pohledu času stráveného na sestavení komplexního modelu, nicméně další editace a práce s modelem se pak stává jednodušší.

V současné době se pro tvarování a návrh používá několik metod, které umožňují simulovat chování membránových konstrukcí. Vždy se jedná o nelineární výpočetní metody, které v první fázi umožní definovat základní geometrii plochy a v dalším doplnit konstrukci o mechanické vlastnosti a celou konstrukci včetně podpůrné nosné konstrukce. Architektura membránových konstrukcí se vyznačuje především lehkostí a tektonickou čistotou, při návrhu je tedy nutné počítat i s chováním podpůrné konstrukce. Membránová konstrukce musí být aktivní součástí nosného systému, jedině tak lze dosáhnout efektivního a ekonomického výsledku. Oddělením návrhu membránové konstrukce od podpůrné nosné konstrukce může docházet k předimenzování konstrukčních prvků, a poté se z vytrácí z jednovrstvých membránových konstrukcí lehkost a tektonika celé konstrukce [9 s. 211].

METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Uvedená metoda se příliš neuplatňuje pro tvarování membránových konstrukcí. Metoda konečných prvků se používá zejména pro statickou analýzu, která poskytuje široké možnosti definování vstupních parametrů a simulace složitých forem.

Celá konstrukce je rozdělena na jednotlivé prvky, které jsou spojeny uzly. Vlastnosti přímkových a plošných elementů jsou nahrazeny pružinovým modelem. Pro každý uzlový bod je určena soustava nelineárních rovnic (deformace, posun a napětí). Pro každý bod pak platí, že posunutí sousedního prvku musí být shodné na společných uzlových bodech. Z ohledem na komplexní model a složitost řešení nelineárních rovnic je tato metoda náročná na čas a výpočetní hardware.

METODA FORCE DENSITY

Metoda force density resp. hustoty sil byla vyvinuta speciálně pro výpočet předepnutých lanových sítí. Jedná se o nejrozšířenější metodu pro tvarování a analýzu membránových konstrukcí. Při použití této metody pro nalezení tvaru membránových konstrukcí je plocha nahrazena lanovou sítí, kdy se plocha převádí na lanový prvek se shodnými mechanickými vlastnostmi jako původní úsek plochy. Pro každý uzlový bod

sítě musí platit rovnováha sil. Do výpočtu je zaveden koeficient „force density“, který se rovná podílu síly prutu a délky prutu, který zjednoduší předešlou nelineární rovnici na lineární a umožní jednoduchý a rychlý výpočet [3]. Aproximovaná síť je zpětně potažena triangulovanou sítí, která poté umožňuje analýzu povrchu a v dalším kroku i statickou analýzu. Předností této metody je výpočtová nenáročnost a rychlost nalezení výsledného rovnovážného stavu. Nevýhodou je citlivost výpočtu na tvar generované výpočetní sítě. Síť musí být generována s ohledem na výslednou orientaci stříhových plátů a síť musí být generována v pravidelném tvaru v celé ploše. V případě velmi zakřivených ploch je nutné opatrně generovat výpočetní síť.

Hlavním zástupcem programů využívající metody hustoty sil je software EASY [11] společnosti Technet gmbh. Program nabízí všestranný nástroj pro digitální modelování od počáteční studie, přes statickou analýzu až po vytvoření stříhových plátů pro membránu. Software původně vyvinutý na stuttgartské univerzitě pro potřeby geodézie byl postupem času uzpůsoben pro návrh a analýzu membránových konstrukcí a převeden do komerčního produktu. Výhodou tohoto programu je právě jeho úzká specializace na návrh a analýzu membránových konstrukcí včetně její nosné podpůrné konstrukce. Výhodou a zároveň nevýhodou tohoto programu je jeho komplexnost a relativní složitost modelování. Silnou stránkou programu je možnost detailní analýzy a posouzení konstrukce. Zjednodušenou verzí programu EASY je program PreDesigner od stejné společnosti. Program má omezenou funkčnost, nicméně pro základní tvarový návrh ho lze využít.

Dalším programem je Formfinder [12], který napomáhá koncepčnímu návrhu a tvarování pomocí intuitivního rozhraní. Základní filozofií je obejít převážně složitý inženýrský výpočet membránových konstrukcí a umožňuje se architektům soustředit na návrh a koncept. Data z programu Formfinder je možné propojit s EASY a využít je pro podrobnou konstrukční a statickou analýzu a v neposlední řadě data využít pro tvorbu stříhových plátů.

Metoda force-density je využita také v programu Membrane NDN [13]. Jedná se o komplexní model vyvinutý speciálně pro návrh a analýzu membránových konstrukcí. Program se skládá z jednotlivých modulů, sloužících pro určitou část návrhového a realizačního procesu membránových konstrukcí.

METODA DYNAMICKÉHO UVOLNĚNÍ + URS

Jedná se o další rozšířenou metodu pro tvarování a analýzu membránových konstrukcí. Metoda uvažuje s převedením plošných prvků na síť pružin, na kterou je vyvoláno kmitání. Na základě uměle vyvolaného tlumení je poté nalezen výsledný rovnovážný stav. Původně statický problém je převeden na dynamický problém. Velkou nevýhodou této metody je časová a výpočetní náročnost na nalezení rovnovážného stavu, proto byla optimalizována Prof. Bletzingerem na TUM a publikována pod názvem URS updated reference strategy [14]. Díky optimalizaci došlo k zjednodušení a zrychlení výpočtu. Výhodou této metody je, že není náchylná na způsob generování sítě, proto lze jednodušeji tvarovat složité tvarové formy.

Hlavním zástupcem této výpočtové metody je program ixCube 4-10 [15]. Jedná se o komplexní inženýrskou platformu pro návrh membránových konstrukcí. Obsahuje

nástroje pro návrh tvaru, statickou analýzu metodou konečných prvků a tvorbu stříhových plánů. Program podporuje návrh ocelových konstrukcí dle Eurokódu. Navíc obsahuje možnost simulace CFD pro řešení vlivu zatížení účinky větru na konstrukci. Tento program je určen především pro inženýry než pro architekty. Pro architekty byl vytvořen program Rhino Membrane [16], jedná se o plugin do Nurbs modeláře Rhinoceros. Program umožňuje parametrizaci v Grasshoperu, čímž se stává silným nástrojem pro architekty. Program umožňuje export dat do ixCube 4-10 pro podrobnou statickou analýzu.

Dalším komplexním programem, který lze využít pro návrh a posouzení membránových konstrukcí, je Dlubal RFEM [17]. Jedná se o komplexní program pro statickou analýzu konstrukcí, který umožňuje modelovat také membránové konstrukce. Jedná se spíše o inženýrský program, který se pro použití architekty příliš neuplatní. Program pro tvarování a analýzu využívá optimalizované metody URS.

Další možností pro tvarování a analýzu membránových konstrukcí je plug-in Kiwi-3D [18] do programu Rhinoceros. Program umožňuje parametrizaci a optimalizaci navrženého tvaru. Program je určen spíše pro architekty nicméně ho lze využít i pro základní statickou a konstrukční analýzu, vše v jednom projektu integrovaném v CAD prostředí. Podobným způsobem lze využít plug-in Kangaroo physics. Program není určen přímo pro návrh a analýzu membránových konstrukcí, nicméně zástupným způsobem umožňuje simulovat tvarování membránových konstrukcí. Opět se jedná program určený pro architekty pro parametrickou studii zastřešení. Omezeným způsobem lze využít pro základní statickou a konstrukční analýzu.

3.2 STATICKÁ ANALÝZA

Druhým krokem v procesu návrhu membránových konstrukcí je statická a konstrukční analýza. Jedná se o proces, který podrobně analyzuje navrženou konstrukci ve fázi tvarování. Podrobnou analýzu provádí inženýr specialista, který spolupracuje s architektem a uzpůsobuje navržený tvar statickým a konstrukčním požadavkům. V tuto chvíli je rozhodující znalost architekta a geometrie konstrukce navržené na začátku, a lze dosáhnout efektivního návrhu.

Většina národních norem a Eurokódu pro statické posouzení je založena na přístupu mezních stavů tzn. pro různé kombinace zatížení konstrukce a jejich součástí by měly vyhovovat stanoveným kritériím únosnosti, limitní deformace a porušení. Pro konstrukce, které jsou nebo se blíží svými vlastnostmi lineárně elastickému chování, je tento přístup vhodný. U předpínaných konstrukcí jako jsou membránové konstrukce, které vykazují silnou geometrickou nelinearitu, nemusí být tento přístup vhodný. Jedná se zejména o vzájemnou závislost geometrie na zatížení. Membránové konstrukce přenášejí vnější zatížení deformací plochy. Dalším odlišností membránových konstrukcí od běžných konstrukcí je nelineární chování použitých materiálů.

Návrh a posouzení podpůrné nosné konstrukce z tradičních materiálů (beton, ocel, dřevo apod.) je založen na dodržení mezních stavů, definovaných Eurokódou a

národními normy, které definují bezpečnostní koeficienty a limitní deformace a porušení. Návrh a posouzení membránových konstrukcí není v tuto chvíli kodifikován, existují pouze národní doporučení pro návrh a posouzení (německé, japonské, francouzské, italské apod.). Nicméně v nedávné době byla ustanovena pracovní skupina CEN TC2505, aby sestavila standard pro membránové konstrukce a zahrnula je do Eurokódu 10 [19]. Z tohoto důvodu je návrh membránových konstrukcí v tuto chvíli založen na zkušenostech z realizovaných staveb, inženýrském úsudku a pragmatismu. Pro návrh a posouzení membránových konstrukcí se sledují dva základní parametry stejně jako u tradičních konstrukcí, jedná se o napětí a deformaci.

Napětí v používaných materiálech pro membránové konstrukce je definováno jako síla na jednotkovou šířku, protože tkaniny nemají konzistentní tloušťku. Materiály se vyznačují nízkou stříhovou únosností, téměř nulovou ohybovou únosností a nulovou únosností v tlaku. Proto se obvykle posuzuje napětí ve směru osnovy a útku (tkané materiály). Napětí v osnově a útku pro každý zatěžovací stav se poté porovnává s únosností materiálu, posuzovanou na základě tahové zkoušky. Únosnost materiálu je dělena vhodným bezpečnostním součinitelem, typicky mezi 3-8, což odpovídá oslabení únosnosti materiálu vlivem přítomnosti malé trhlinky [9]. Zároveň je nutné zajistit trvalé tahové předpětí v ploše membrány při zatížení.

Membránové konstrukce nemají přesně stanovené meze deformací resp. průhybu. Limitní deformace u membránových konstrukcí je dána požadavkem na odvodnění plochy a omezení kontaktu membrány s podpůrnou konstrukcí pokud to není vyžadováno. Odvodnění plochy musí být splněno za jakéhokoliv zatěžovacího stavu. Jedná se zejména o stav zatížení sněhem, kdy vlivem hromaděním sněhu mohou vznikat lokální extrémní deformace mající za následek tvoření kaluží, z kterých poté nedochází k odtoku vody. Tento předpoklad musí být splněn při jakémkoliv zatížení. Dále by měli být omezeny inverzní deformace plochy, které mají za následek třepotání a pomačkání materiálu s následným oslabení pevnosti v tahu [9].

3.2.1 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCÍ

Každé konstrukce vystavené vnějšímu i vnitřnímu prostředí jsou vystaveny účinkům zatížení. Hodnoty jednotlivých zatížení jsou definovány Eurokódem 1 resp. ČSN EN 1991. Zatížení se dělí do jednotlivých podskupin dle odezvy na konstrukce, dle délky působení a dle intenzity zatížení. Dle délky působení je zatížení rozděleno na zatížení stálá, proměnná a mimořádná [20].

Stálá zatížení představuje vlastní tíhu konstrukce, tlaky na konstrukci (zemina, spodní voda) a předpětí. Z pohledu membránových konstrukcí se stálé zatížení uplatňuje pouze zatížení vlastní tíhou a předpětím. Vlastní tíha díky nízké vlastní tíze materiálu membrány se příliš neprojevuje. Naopak zatížení předpětím je v případě membránových konstrukcí pro stálé zatížení dominantní.

Proměnná zatížení se dále dělí na podle doby trvání na dlouhodobé, střednědobé, krátkodobé, okamžité a mimořádné. Dlouhodobé (např. skladování) a střednědobé (užitné zatížení) se u membránových konstrukcí příliš často neuplatňuje, membránové konstrukce neslouží pro skladování materiálu a nepředpokládá se užití pro pohyb osob apod. Mezi krátkodobá zatížení patří zatížení sněhem, větrem,

námrazou nebo teplotními změnami. Hlavním krátkodobým zatížením membránových konstrukcí je zatížení sněhem [21], větrem [22] a námrazou, jde o nejčastější a rozhodující zatížení pro statické posouzení konstrukce. Zatížení teplotními změnami se nejvíce uplatňuje v membránových konstrukcích, které jsou tvořeny uzavřenou rámovou konstrukcí, kdy teplotní délková roztažnost může způsobovat nárůst vnitřního napětí a posléze poškození/ přetržení materiálu. Mezi okamžitá zatížení se řadí zejména montážní zatížení. Pro montáž membránových konstrukcí se nejčastěji využívá postupné vnášení mechanického předpětí, kde dochází k lokálnímu navýšení předpětí. Při návrhu je nutné tyto skutečnosti zohlednit, aby nedošlo k poškození nebo přílišnému protažení materiálu a následné tvorbě vrásek v ploše. Dále při montáži často dochází k pohybu osob po ploše membrány a je nutné započítat lokální účinky od pohybu osob v nejnevýhodnější poloze membrány. Mezi mimořádná zatížení se řadí seizmické a havarijní zatížení. Seizmické zatížení v případě membránových konstrukcí neznamenaají přílišné riziko, díky své elastičnosti poměrně dobře snášejí dynamické účinky. Havarijní zatížení je důležité zohlednit zejména od účinků požáru. Vlivem požáru ztrácí materiál membrány únosnost a je nutné provést opatření k ochraně obyvatel a majetku. Jde zejména o nebezpečí pádu jednotlivých konstrukčních prvků, proto se prvky, které by mohly způsobit poškození, zajišťují například pojistným lanem.

Výše uvedený souhrn zatížení je pouze informativní a započtení zatížení se řídí normovými hodnotami. Uvažované zatížení konstrukce musí být zohledněno ve statickém výpočtu, který provádí zodpovědná osoba. Je nutné prověřit jak účinky jednotlivých zatížení, tak vzájemnou kombinaci zatížení.

3.3 VSTUPNÍ PARAMETRY VÝPOČTU

Jak již bylo uvedeno, jednovrstvé membránové konstrukce jsou tvarově aktivní konstrukční systém, který přenáší vnější zatížení výhradně tahovými silami. Membránové konstrukce se tvarují na základě definování okrajových prvků a míře vneseného tahového předpětí do plochy. Membránové konstrukce využívají základní konstrukční prvky jako jsou lano, nosník, tlačný prut a materiál membrány. Vzájemným prostorovým uspořádáním těchto prvků je dosaženo dvojího zakřivení plochy, která je schopna přenášet vnější zatížení. Tahové předpětí v ploše se vnáší mechanicky nejčastěji do tkaných materiálů a fólií.

3.3.1 KOTEVNÍ BODY

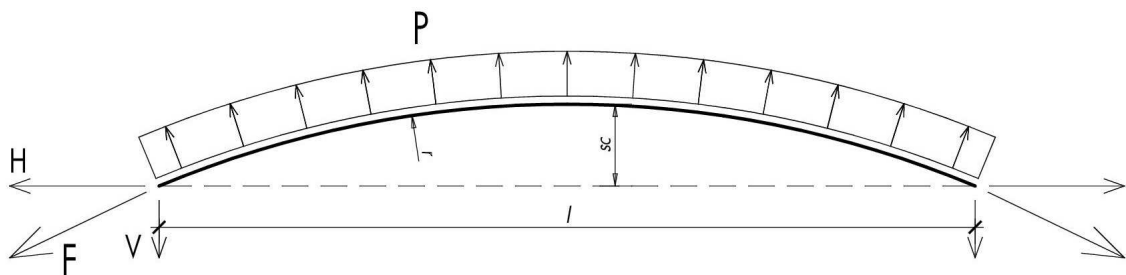
Bodové podpory membrány jsou nejběžnější způsobem kotvení konstrukce. V místě kotevního bodu dochází k přenosu tahového předpětí do nosné podpůrné konstrukce. Podpůrná konstrukce může být tvořena systémem sloupů a lan, nosníkem s řadou kotevních bodů membrány, kotevním táhlem nebo se může jednat o kotevní bod např. na fasádě objektu. Vždy platí, že podpůrná konstrukce musí být schopna přenést tahové síly od předpětí a zároveň tahové síly vzniklé od účinků zatížení. Kotevní tahové síly se liší jak velikostí, tak zejména rozdílným směrem účinku, proto je nutné, aby podpůrná nosná konstrukce na tyto specifika byla schopna reagovat. Geometrická poloha kotevních bodů je dána potřebou zakřivení plochy, je potřeba

navrhnout takové prostorové uspořádání, aby bylo dosaženo dvojí křivosti výsledné plochy. V případě bodově podepřené membrány se výsledný tvar dvojité zakřivené plochy potká v polovině mezi spodními a horními kotevními body, za předpokladu izotropního předpětí.

3.3.2 OBVODOVÉ, PODPŮRNÉ A KOTEVNÍ LANO

Pro dosažení lehkosti a tektoniky membránových konstrukcí se nejčastěji využívají lanové prvky v podobě obvodových lan, podpůrných lan v ploše membrány nebo jako kotevní lana. Lanové prvky jsou nejefektivnějším prvkem pro přenos tahové síly do nosné konstrukce.

Nejjednodušším způsobem definování okraje membrány je obvodové lano. Obvodová lana jsou spojitě uchycena v okraji membrány a přenášejí tahové síly z membrány do kotevních bodů. Tahové působení membrány je v kolmém směru na obvodové lano. Podpůrná lana membrány jsou umístěna v ploše membrány a mohou pomáhat v tvarování membrány do dvojí křivosti, typicky v případě lomenice. Nebo mohou sloužit jako pojistný prvek proti omezení proti nadlimitní deformaci plochy. V případě, že podpůrné lano je určeno k tvarování membrány, poté je do lana vneseno tahové předpětí, které je vždy větší než předpětí v ploše membrány ve směru lana. Podpůrná lana mohou nebo nemusí být pevně spojena s plochou membrány, vždy je však nutné zamezit prodření materiálu membrány vlivem vibrací od dynamických účinků zatížení. Schopnost obvodového a podpůrného lana přenášet tahové síly z membrány do kotevních bodů je pouze za předpokladu, že lano bude zakřivené. Míra zakřivení má zásadní vliv na výslednou tahovou sílu v laně a jeho dimenzi.

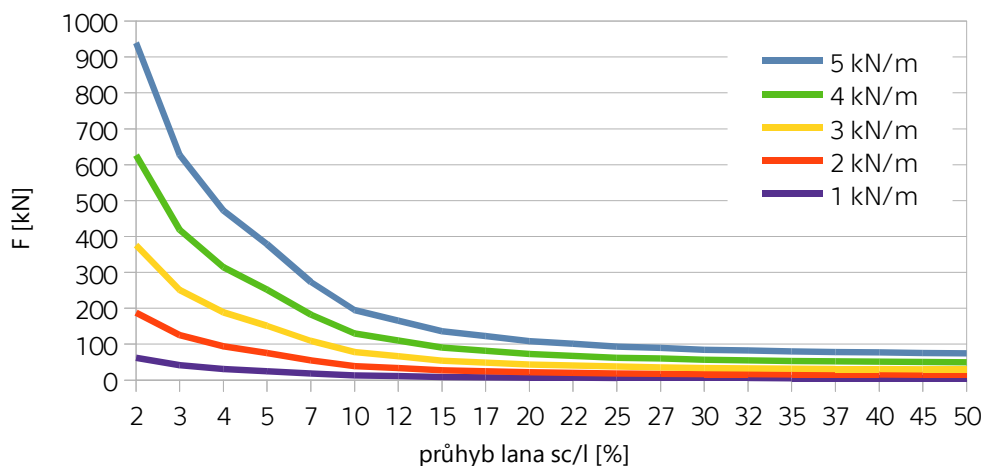


Obr. 16. Schéma průběhu sil na obvodovém laně

Předpětí z membrány působí převážně kolmo na okrajové lano. Vztah mezi předpětím z membrány P [kN/m], silou v laně F [kN] a poloměrem zakřivení r [m] je vyjádřen vztahem $F = P \times r$. Ze vztahu je zřejmé, že výsledná síla v laně je závislá pouze na poloměru zakřivení a síle předpětí z plochy, nikoliv na rozpětí. Rozpětí je závislé nepřímo, jelikož poloměr zakřivení okrajového lana se zvyšuje s rozpětím při zachování stejného průhybu. Závislost poloměru zakřivení na rozpětí lana, horizontální a vertikální kotevní síly a závislost kotevních sil na tahové síle v laně popisují vzorce (2).

$$r = \frac{l^2}{8 \cdot s_c} + \frac{s_c}{2} \quad H = \frac{P \cdot l^2}{8 \cdot s_c} \quad V = \frac{P \cdot l}{2} \quad F = \sqrt{H^2 + V^2} \quad (2)$$

Závislost procentuálního vzepětí obvodového lana na výsledné tahové síle v obvodovém laně je uvedena na obr. 17. Sledována je závislost při rozdílné míře předpětí v ploše membrány. Z grafu je zřejmé, že při průhybu menším jak 10% dochází k výraznému nárůstu tahové síly v laně, při průhybu lana 5% je tahová síla v laně dvojnásobná oproti 10% průhybu. Naopak při průhybu více jak 20% již nedochází k dalšímu snížení normálové síly v obvodovém laně. Z pohledu tahové normálové síly v laně se jeví jako optimální průhyb v oblasti kolem 10% z rozpětí.



Obr. 17. Graf průběh normálové síly v laně

Kotevní lana jsou vlastně prvky podpůrné konstrukce. Kotvení lan zejména jejich kotvení k nosné konstrukci má vliv na tvarování membrány. Kotevní lana přenášejí tahové síly z kotevních bodů membrány do nosných konstrukcí (základy apod.) Jejich směr je dán výslednicí sil v kotevních bodech membrány. Při použití jednoho kotevního lana musí, musí lano vždy směřovat ve směru výslednice sil. V případě použití dvou kotevních lan opět platí, že musí směřovat ve směru výslednice sil, nicméně v rovině kotevních lan mohou být lana umístěna v rozdílném směru od výslednice. Odchylení lan od výslednice kotevních sil membrány má poté vliv na normálové síly v kotevních lanech (čím větší odchylka od výslednice sil kotevního lana tím větší síla v kotevním laně). Kotevní lana jsou vždy přímého směru bez zakřivení.

Hlavním parametrem při tvarování je zakřivení lana, nejčastěji je uváděno procentuálně vzhledem k rozpětí. V případě statické analýzy je potřeba znát a definovat mechanické vlastnosti jako je materiál a použitý průřez a s tím spojená tuhost obvodového a kotevního lana.

3.3.3 NOSNÍK

V případě membránových konstrukcí lze nosníky chápat jako nosné konstrukce, ke kterým je membrána spojitě kotvena, nebo se může jednat o pojistné prvky pro omezení nadlimitních deformací. Nosníky jsou schopny přenášet jak tahové/ tlakové síly tak i přenášet účinky ohybu, proto lze jejich tvar volně definovat před procesem tvarování. Nosníky lze definovat tvar okraje vyhovující dispozičním nárokům membránové konstrukce.

Výsledná plocha dvojí křivosti membrány na obloukových podporách je nejvíce ovlivněna zakřivením obvodových nebo vnitřních nosníků. Membrána kotvená k nosníkům pomáhá omezit vybočení nosníku ve směru membrány a díky tomu lze snížit dimenze profilů.

Z pohledu tvarování je dalším způsobem využití nosníků systém ohybově aktivních prvků [23]. Jedná se o systém využívající ohybové prvky vložené do plochy a okraje membrány, které díky své poddajnosti a definované ohybové tuhosti tvarují mechanicky předpínané konstrukce.



Obr. 18. Experimentální model ohybově aktivní konstrukce Hybrid M1[42]

Další možností využití nosníku je využití tlačných prvků, vložených do plochy membrány, tímto způsobem lze tvarovat membránové konstrukce využitím systému tensegrity. Tensegrity systém je princip, kde tvar výsledné struktury je zajištěn uzavřeným statickým působením, tzn., že veškeré tahové a tlakové síly jsou přenášeny uvnitř struktury.



Obr. 19, Experimentální prostor MOOM [43]

Z pohledu tvarování je definování tvaru nosníku volné, je nutné respektovat empirické zásady návrhu nosníků. Nosník se v případě modelování membránových konstrukcí často modeluje pomocí fixních podpor bez zohlednění tuhosti a deformací

nosníku. V případě statické analýzy jsou nosníky modelovány včetně průřezů a mechanických parametrů materiálu. Nosníky v tomto případě již přenášejí síly z membrány a dochází k deformacím dle zatížení. Při statické analýze se naplno projevuje vliv membrány na stabilitu nosníku.

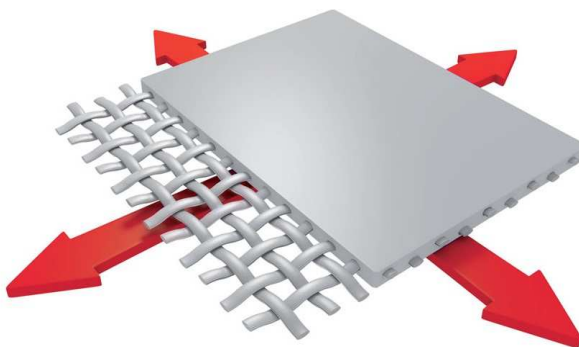
3.3.4 TKANINY A FOLIE

Hlavním konstrukčním prvkem membránových konstrukcí je materiál použitý pro vnesení mechanického předpětí do plochy. Nejběžnějším materiálem pro jednovrstvé membránové konstrukce jsou vysokopevnostní tkaniny, která jsou potažena ochrannou vrstvou. Jedná se tedy o kompozitní materiál. Jako základ se využívají tkaniny ze skelných, vlněných, polyesterových či PTFE vláken, které dodávají materiálu pevnost, ohebnost či pružnost. Tato vnitřní struktura je poté potažena ochrannou vrstvou.

Hlavní funkcí povlaku je chránit nosnou tkaninu proti vlhkosti, UV záření, ohni a útoku mikrobů a plísní. Právě vlastnosti ochranné vrstvy nejvíce ovlivňuje životnost a trvanlivost materiálu, ale také ovlivňuje mechanické vlastnosti, zejména zvyšuje jeho smykovou tuhost a také zlepšuje v některých případech odolnost proti šíření roztržení. Termoplastické povlaky umožňují svařování jednotlivých dílů dohromady. Dále mohou být do povlaku přidány barevné pigmenty, případně může být povlak potištěn. Ochranné povlaky jsou běžně aplikovány z obou stran a často jsou doplněny z exteriérové strany zalakováním. Povlaky používané pro všechny běžné tkaniny vyrobené ze syntetických organických (vlna, len) a anorganických vláken (polyester, PTFE, sklo) jsou vyrobeny z termoplastů (PVC, PTFE a fluoropolymerů), výjimkou je silikonová pryž, která patří do skupiny elastomerů a silikonové pryskyřice, která jsou termosetická [8].

TKANINY

Vnitřní nosná konstrukce tkanin je nejčastěji provedena běžnou tkanou technologií, a má nejčastěji ortogonální strukturu odpovídající směru osnovy a útku tkaniny. Z technologických důvodů má tato tkanina nejčastěji rozdílné mechanické vlastnosti ve směru osnovy a útku. Některé výrobní procesy tuto nevýhodu eliminují a dosahují u svých materiálů shodných nebo podobných vlastností v obou směrech tkaniny, jedná se například o patentovou technologii Preconstraint firmy Serge Ferrari, kdy při výrobním procesu dochází k předepínání nosné tkaniny ve směru útku.



Obr. 20. Schéma potažené textilie [44]

Tkaniny se rozdělují dle pevnosti v tahu a hmotnosti na pět typů (Typ I – V) s pevnostmi od 80 – 160 kN/m. Hmotnost tkaniny se pohybuje mezi 900 – 1500 g/m².

Polyesterová tkanina potažena PVC (PES/ PVC)

PES tkaniny potažené PVC jsou nejrozšířenějším materiálem ve stavebnictví, zejména z důvodu velmi příznivého poměru mezi cenou a užitnou hodnotou. PES/PVC tkaniny vykazují vysokou mechanickou pevnost a odolnost proti praskání při ohybu, proto jsou vhodné jak pro trvalé konstrukce tak i pro pohyblivé struktury.

Pro nízkou cenu surovin a nákladů na výrobu se tyto tkaniny využívají i pro aplikace mimo stavebnictví, např. pro plachtové zakrytí nákladních automobilů, opláštění bazénů apod. Pro použití ve stavebnictví jsou tkaniny optimalizovány pro zajištění dlouhé životnosti, jde zejména o povrchovou úpravu doplněnou o lakování zabraňující pronikání vlhkosti do tkaniny a absorbování nečistot na povrchu. V minulosti docházelo k rychlému stárnutí materiálu v důsledku zkrěhnutí povlaku, který měl negativní vliv na obraz membránových konstrukcí. V dnešní době jsou používány změkčovadla a teplotní stabilizátory, které zvyšují UV odolnost a tepelnou stabilitu. Zpomalení stárnutí materiálu může být dosaženo použitím těsnících materiálů jako jsou akrylové a PVDF laky. Tyto špičkové povrchové laky pomáhají vytvořit hladký, proti přílnavý povrch, který pomáhá zabránit ulpívání nečistot na povrchu a vytváří samočisticí efekt.

Tyto materiály lze jednoduše svařovat, nejčastěji se pro svařování používá kombinace tlaku a tepla, provedeného ručně případně vysokofrekvenčním svařováním pomocí elektromagnetických vln. Méně časté je spojování pomocí lepidla. Použité povrchové akrylové a PVDF laky mají vyšší bod tavení než PVC, proto je někdy nutné povrch zdrsňit před vlastním svařováním. Zpracování PES/PVC materiálů nevyžaduje speciální požadavky na jejich zpracování a řešení detailů.

Výhodou těchto tkanin je snadná recyklovatelnost, čímž lze snížit dopad na environmentální aspekty životního cyklu. Nevýhodou je nižší propustnost světla, nižší odolnost proti znečištění a nižší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči povětrnostním vlivům v porovnání s jinými tkaninami užívanými pro membránové konstrukce. Z výše uvedených důvodů se nejvíce tento typ materiálu hodí pro středně-dobé projekty případně pro dočasné stavby.

Polyesterová tkanina potažena THV(PES/ THV)

Jedná se o nový materiál, pro který nejsou známa přesná dlouhodobá data. Podle dosavadních zkušeností lze konstatovat, že tento materiál může být do budoucna náhradou tkanin PES/PVC se shodnými výhodami, avšak s lepší propustností světla, větší odolností proti zašpinění a výrazně vyšší stabilitou materiálu a odolností proti povětrnostním vlivům, zejména UV záření. Mechanické vlastnosti jsou srovnatelné s PES/PVC typ I a II. Nevýhodou PES/THV tkaniny je jeho relativně vyšší hmotnost v porovnání s jeho pevností. Na spojování a řešení detailů nejsou kladeny speciální požadavky a provádí se stejným způsobem jako u PES/PVC tkanin.

Skelná tkanina potažena PTFE

Skelná tkanina potažená polytetrafluorethylen (PTFE známý také jako teflon) je v současné době považován za jeden z nejtrvanlivějších membránových materiálů na trhu. Tkanina se využívá pro trvalé projekty s očekávanou odolností delší jak 25 let.

PTFE povlak se vyznačuje výbornou samočisticí schopností, velmi dobrou odolností proti povětrnosti a chemickým látkám a tvorbě plísní. Lehčí verze (typ I a II) s relativně tenkým povlakem PTFE, jsou nehořlavé (třída A2), těžší typy jsou zařazeny do třídy reakce na oheň B1.

Nově instalovaná skelná tkanina s PTFE povlakem je z počátku béžová, v důsledku rozkladu smáčedla v povlaku, který působením UV záření vymizí se přebarví na bílou barvu. Tento proces přebarvení trvá cca 2-3 měsíce v severní Evropě, v regionech s vyšší mírou slunečního záření je tento proces kratší. Bělení v továrně je možné, ale je velmi nákladné a snižuje pevnost materiálu.

Materiál se vyznačuje vyšší propustností světla, velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, odolností proti znečištění a vysokou odolností proti povětrnostním vlivům. Tyto výhody jsou vykoupeny vysokou cenou. Další nevýhodou je nízká odolnost skelné tkaniny na praskání vlivem ohýbání, proto se tento materiál nehodí na pohyblivé struktury. Tkanina se nehodí pro nízko-nákladové projekty, dočasné stavby a pro konstrukce s velkým zakřivením. Technologie výroby a řešení detailů je složitá s ohledem na nízkou odolnost materiálu vůči praskání nosné skelné tkaniny. PTFE povlak se vyznačuje horší svařitelností, proto se na spoje aplikuje termoplastická folie (vyrobena z materiálů PFA, FEP nebo MFA). Ukončení plachty musí být řešeno pomocí okování okraje membrány s vloženou pružnou dilatační vrstvou a její následné napojení na obvodové kotvení (lana, průběžné kotvení, rohové detaily), zesílení okraje je proto náchylné na tvorbu vrásek.

Skelná tkanina potažena silikonem

Tento materiál využívá mechanických vlastností skelné tkaniny a namísto potažení PTFE je potažena vrstvou průhledného silikonu. Silikonový potah se vyznačuje vysokou propustností světla, dobrými mechanickými vlastnostmi a lepší odolností proti praskání vlivem ohybu v porovnání s PTFE/skelnou tkaninou. Skelná tkanina potažená silikonem představuje alternativu k běžným membránovým materiálům. Ohebnost silikonové povlaku činí materiál snadněji manipulovatelným než PTFE/skelná tkanina. Jeho propustnost je třikrát vyšší než u PES/PVC tkaniny. Chemická odolnost silikonu pomáhá jeho odolnosti proti stárnutí. Samotný silikon je nehořlavý a vlivem přísad v povlaku s povrchovými nátěry je klasifikován jako materiál těžce zapalitelný B1.

Nevýhodou silikonového potahu je jeho lepkavý povrch, který se vlivem statické energie nabíjí a přitahuje nečistoty. Nově vyvinuté vrchní nátěry toto chování zlepšují. Další nevýhodou jsou nároky na suroviny a s tím spojená vysoká cena. Proto se tato tkanina hodí pouze pro trvalé a velké projekty. Technologie výroby a spojování je složitá podobně jako u skelných tkanin s PTFE. Silikon je nesvařitelný, před spojováním je nutná vulkanizace nebo lepení.

PTFE tkanina s potažením nebo bez potažení

Materiál se vyznačuje mimořádně vysokou odolností proti prasknutí vlivem ohýbání, nízkou hmotností, vysokou světelnou propustností a odolností povrchu proti zašpinění. Proto se PTFE tkaniny bez potahu využívají pro pohyblivé membránové konstrukce s nižším požadavkem na vodotěsnost. U lehké PTFE tkaniny s velmi hustou

vazbou s potaženými vlákny lze dosáhnout vodotěsnost rovnající se max. 20 cm vodního sloupce. Hrubější tkaniny však těchto hodnot nedosahují, dopadající kapky vody na vrchní stranu mohou způsobit mlhu velmi jemných kapiček na druhé straně textilie. Hodnota vodotěsnosti může být zvýšena, až na 300 cm vodního sloupce, tenkou vrstvou fluoropolymerového povlaku. Nepotažené PTFE tkaniny nemohou být svařovány, spojování lze pouze šitím. Aplikací speciálního lepidla do švu se zvyšuje vodotěsnost. Barevnost tkaniny je možná probarvením samotných vláken PTFE.

Termoplastické fluoropolymerové povlaky, jsou na tkaninu aplikovány speciální metodou vtláčování. Tyto materiály byly vyvinuty za účelem dosažení svařitelných a zcela vodotěsných PTFE tkanin. Takto potažené tkaniny pak rozptylují dopadající světlo podobným způsobem jako ETFE folie. Potažená PTFE tkanina poté umožňuje použití vysoce kvalitního materiálu, který lze spojovat dostupnými technologiemi, bez nutnosti řešení složitých detailů. Technologie vtláčování potažení má za následek vysokou cenu této tkaniny, proto se hodí pro trvalé dlouhodobě stavby a pro mobilní konstrukce.

Nevýhodou PTFE tkanin je výrazné dotvarování vlivem trvalého zatížení, proto by předpětí v tkanině mělo být co nejnižší. Pokud se předpokládá dlouhodobé zatížení sněhem, je nutné omezit rozpětí jednotlivých polí pro snížení maximálního napětí v tkanině.

FOLIE

Folie jsou tvořeny homogenním materiálem, který neobsahuje žádnou nosnou tkaninu a vyznačují se nízkou mechanickou odolností. Folie se proto využívají pro menší objekty. Pokud se folie doplní o sekundární nosnou konstrukci lze je poté využít pro větší projekty, v tomto případě pak folie tvoří pouze obkladový materiál.

ETFE folie

Chemická sloučenina ETFE je jednou z nejstabilnějších chemických sloučenin. Folie z nich vyrobené se nejčastěji využívají ve stavebnictví z důvodu dlouhodobé stability, odolnosti proti zašpinění a vysoké propustnosti světla. ETFE folie mohou také propouštět UV záření.

Mechanická pevnost materiálu je i přes absenci vnitřní nosné tkané struktury, poměrně vysoká (asi 10% únosnosti běžně používané tkaniny). Nejčastěji se tento materiál využívá pro vícevrstvé nafukovací polštáře. Pro jednovrstvé mechanicky předpínané konstrukce lze tento materiál využít za předpokladu doplnění o podpůrnou nosnou konstrukci z lanové sítě případně systémem obloukových podpor. Z pohledu spojování se materiál spojuje tepelnou technologií v kombinaci s tlakem.

PVC folie

PVC folie je vyrobena z polyvinyl chloridu s obsahem změkčovadla (PVC-P), který má nízkou odolnost proti UV záření a nízkou tepelnou odolnost. Tyto folie se vyznačují extrémně špatnou mechanickou odolností, špatnou dlouhodobou stabilitou a nízkou odolností proti znečištění. Materiál je z počátku průhledný, avšak rychle ztrácí své optické vlastnosti ve srovnání s ETFE. Materiál se vyznačuje vysokou pružností a

velmi nízkou cenou. Použití PVC folií lze pouze u dočasných staveb s malým rozpětím, případně u aplikací v interiéru. Folie se spojuje svařováním nebo lepením.

PE folie

Polyethylenové folie jsou velmi levné a dostupné v různých tloušťkách, které jsou používány pro mnoho rozličných aplikací na stavbě. Díky vysoké propustnosti světla a nízké ceně se často uplatňuje pro stavbu skleníků. PE folie nemá odolnost proti UV záření, proto jsou použity přísady, které zvýší odolnost pro venkovní užití na několik málo let. PE folie se proto hodí pro nízko rozpočtové dočasné stavby [8].

THV folie

Vlastnosti THV folií jsou obdobné jako u ETFE folií. Folie vyrobené z tohoto materiálu jsou vysoce transparentní, velmi trvanlivé a jsou těžce zapalitelné. Ve srovnání s ETFE jsou pružnější, lépe se zpracovávají a mohou být spojovány vysokofrekvenčním svařováním. Nevýhodou jsou slabší optické vlastnosti a nižší odolnost proti znečištění oproti foliím z ETFE. Její použití v architektuře je sporadické, kvůli nižší mechanické únosnosti v tahu. Proto se používá v konstrukcích s malým rozpětím a jsou doplněny o podpůrnou sekundární konstrukci [25].

Vlastnosti běžně používaných tkanin jsou uvedeny v příloze č.1. Vlastnosti běžně využívaných folií jsou uvedeny v příloze č.2.

SPECIÁLNÍ MATERIÁLY

Pro mechanicky předpínané membránové konstrukce lze využít i jiné materiály než tkaniny nebo folie. Jedná se o materiály se specifickými vlastnostmi pro specifické použití.

Tensotherm

Jedná se o vícevrstvý materiál. Skládá se z aerogelu Lumira umístěného mezi dvě vrstvy tkaniny, vnější materiál je PTFE tkanina potažená TiO₂ a vnitřní materiál je PTFE tkanina s vylepšenými akustickými vlastnostmi. Výsledný materiál Tensotherm je tenký, vysoce průsvitný s vynikajícími tepelně-izolačními vlastnostmi. Díky fotokatalytické reakci je netoxický a ohnivzdorný, povlak TiO₂ aktivně neutralizuje znečišťující látky ze vzduchu a tím pomáhá udržet střechu čistou. Díky jádru z aerogelu Lumira propůjčuje konstrukci výborné akustické a tepelně izolační vlastnosti.

Aerogel je extrémně lehký a vysoce průsvitný materiál, obsahuje více jak 95% vzduchu. Vzhledem k vnitřní složité nano-struktuře materiál významně snižuje rychlost zvuku až 100m/s, čímž se jedná o jeden z nejlepších zvukově izolačních materiálů dostupných v současnosti. Materiál je hydrofobní a odpuzuje vodu, tím zabraňuje vzniku nežádoucích plísní. Dalším klíčovým aspektem je jeho stlačitelnost, kdy pod zatížení sněhem a větrem dojde ke stlačení izolantu a vytlačení přebytečného vzduchu a zvýšení jeho tepelně izolační vlastnosti. Materiál je vyráběn ekologicky z dostupných surovin.

Hlavní nevýhodou tohoto high-tech materiálu je jeho cena, která brání jeho širšímu využití. Při výrobě a instalaci jsou kladeny zvýšené nároky na řešení detailů a

spojování jednotlivých vrstev a složitější řešení napojení na okrajové kotevní prvky [26].

Nerezové sítě

Dalším speciálním materiálem, který lze použít pro mechanicky předpínané konstrukce jsou nerezové splétané sítě. Nejčastěji se využívají pro zastřešení terárií a obecně výběhů pro zvířata v zoologických zahradách. Jedná se o jednotlivá lana, která jsou spojena kompresními svorkami v pevnou a flexibilní konstrukci. Díky této vlastnosti se jedná o síť, která snese velké zatížení a umožňuje vytvoření zastřešení nad velkým rozpětím bez nutnosti vložených podpor. Spojování se provádí zaplétáním lanka a jeho mechanickým zajištěním kompresní svorkou. Nerezové sítě se nejčastěji vyrábějí ve formě diagonální sítě na rozdíl od klasických membránových materiálů s ortogonální tkaninou, proto je při návrhu nutné tuto vlastnost zohlednit [27].

PŘEDPĚTÍ A ORIENTACE OSNOVY/ ÚTKU

Volba použitého materiálu pro membránu má vliv na volbu vnitřního předpětí plochy a také na orientaci osnovy a útku. Hodnota předpětí ovlivňuje tuhost membrány a geometrii plochy. Dále míra předpětí má vliv na velikost podporových sil. Méně zakřivené plochy musí být více mechanicky předepnuty, aby splnily základní statické požadavky na přenos vnějšího zatížení a omezily nadlimitní deformace. Je nutné zajistit trvalé tahové předpětí v celé ploše a toto předpětí membrány nebylo vyrušeno účinky vnějších zatížení. V případě svislém zatížení shora dolů (nejčastěji účinku zatížení sněhem) je volit předpětí takové, aby nedošlo k výrazným deformacím a tvorbě kaluží v ploše, kde by mohlo docházet k hromadění vody. Zatížení sněhem je přenášeno zakřivením plochy mezi horními vrcholy. V případě zatížení směrem zespoda nahoru (typicky sání větrem) je zatížení přenášeno zakřivením plochy mezi spodními vrcholy. Deformace od větru způsobují rozkmitání plochy a postupné oslabení materiálu vlivem únavy.

Při volbě foliového materiálu je předpětí v celé ploše izotropní, jelikož folie nemají žádnou nosnou tkaninu a nelze ovlivnit předpětí ve směru dominantního zatížení. V případě textilních materiálů, které obsahují nosnou tkaninu tvořenou osnovou a útkem, má orientace osnovy útku vliv na tvarování plochy a zejména na statické chování membrány. Orientace osnovy a útku textilie se volí s ohledem na předpokládané maximální silové účinky od zatížení. Např. při zatížení sněhem se orientuje osnova a útek mezi vrcholovými kotevními body. V případě zatížení sání větrem se volí orientace osnovy a útku mezi spodními kotevními body. V počátku se volí předpětí izotropní pro oba směry osnovy a útku. Pokud izotropní předpětí nevyhoví, volí se rozdílné předpětí v osnově a útku, které může zlepšit tvar a statické chování membránové konstrukce. Míra anizotropního předpětí se musí volit s ohledem na dotvarování materiálu. Výrazně anizotropní předpětí membrány může vést k velkému dotvarování při vyšším zatížení a tím i původně anizotropním předpětí se může blížit izotropnímu - vlivem redistribuce napětí v ploše membrány. Při dotvarování plochy může dojít k tvorbě vrásek vlivem přebytečného materiálu. Z tohoto důvodu je izotropní předpětí membrány vždy výhodnější pro trvalé

membránové konstrukce. Než volit výrazně anizotropní předpětí je efektivnější změnit definici okraje membrány a dosáhnout lepšího a únosnějšího tvaru membrány.

Pro změnu zakřivení plochy a omezení deformací lze použít úžlabní a hřebenová lan. Lana v ploše membrány se nejčastěji volí u izotropně předpínaných ploch, kde zvyšují tuhost membrány a omezení deformací plochy. Lana zároveň plochu rozdělují na menší celky, čímž jsou omezeny deformace u rozsáhlých membránových konstrukcí, zároveň napomáhají při montáži, kdy je plocha rozdělena na menší díly.

Typické hodnoty pro předpětí leží mezi 1 až 5 kN/m. Poměr předpětí ve směru útku a osnovy by neměl přesáhnout poměr 1:4 nebo 4:1. Předpětí u kuželových ploch se volí rozdílné s ohledem na omezení tvorby zúžení ve vnitřním nosném bodu [9].

3.4 NÁVRHOVÉ CHARAKTERISTIKY

Většina výpočetních modelů a metod posouzení a analýzy membránových konstrukcí je založena na zkoumání stávajících staveb a výsledků výzkumů. Byly sestaveny hlavní charakteristiky membránových konstrukcí, kterými se lze při návrhu řídit. Hlavní charakteristiky jednovrstvých mechanicky předpínaných membránových konstrukcí pro návrhu a analýzy jsou zejména:

Membránové konstrukce mají velmi nízkou povrchovou tuhost. Hlavní směry únosnosti jsou dány nejčastěji ortogonální sítí nosné tkaniny.

Plochy membránových konstrukcí musí být dvojitě zakřiveny. Dvojitě zakřivení mechanicky předpínaných konstrukcí je antiklastické (středů hlavních křivostí jsou umístěny na opačných stranách plochy), jeho Gaussova křivost je negativní. Orientace textilie na ploše bude odpovídat přenosu sil dominantního zatížení, typicky zatížení sněhem a větrem.

Předpětí plochy výrazně přispívá k jeho tuhosti. Zatížení způsobují deformace, které lze omezit navýšením předpětí plochy jak v jednom směru nebo celkově v celé ploše. Pro zvýšení tuhosti konstrukce je efektivnější navýšit zakřivení plochy. Navýšení předpětí plochy může znamenat problémy při montáži, kdy bude náročné běžnými mechanickými prostředky dosáhnout požadovaného předpětí. Pro PES/PVC tkaniny pravidlo, že vnesené předpětí membrány nemá být nižší jak 1,3% z průměrné únosnosti membrány ve směru osnovy a útku. Pro skelné tkaniny s PTFE potahem má materiál větší tuhost a předpětí proto musí být minimálně 2 kN/m. Pro potřeby pevnější konstrukce lze uvažovat s předpětím kolem 5 kN/m (pro velice ploché tvary až 10 kN/m). Běžnými mechanickými prostředky lze dosáhnout předpětí cca 5 kN/m, přičemž je nutné myslet na to, že v montážním stavu je nutné vyvinout podstatně většího předpětí než je návrhem požadované. Poměr předpětí ve směru útku a osnovy by neměl přesáhnout poměr 1:4 nebo 4:1.

Hlavním určujícím prvkem celé membránové konstrukce je volba okrajových podpůrných prvků, jako jsou lana, nosníky, úžlabní a hřebenová lana. Dále jsou tvary závislé na vneseném předpětí v ploše dle osnovy a útku nosné tkaniny. Při digitálním způsobu tvarování je vhodné zanedbat vlastní tíhu konstrukce a zahrnout ji až do

statické analýzy. Výhodné je to zejména z důvodu, že proces tvarování je závislý pouze na sestavě okrajových konstrukcí a vzájemném poměru předpětí v jednotlivých prvcích. Vlastní úroveň předpětí se poté nastaví až během statické analýzy. Dále je to vhodné při návrhu mírně zakřivených ploch, kde by při započítání vlastní hmotnosti, při tvarování způsobovaly nadměrné deformace plochy.

Půdorysný poměr stran jednotlivých membránových částí by měl být maximálně 1:2. Pokud půdorysný poměr přesáhne tento poměr, je nutné plochu rozdělit na menší díly, případně vložit úžlabní nebo hřebenová lana.

Důležitým aspektem pro přesnost numerického modelování je proces generování výpočetní sítě. Některé numerické modely jsou více náchylné na chybu při nerovnoměrném generování sítě nebo nastavené špatné hustoty sítě (typicky metoda force-density).

V každé dvojitě zakřiveném povrchu s Gaussovou křivostí jinou než 0 je plocha membrány tvořena z jednotlivých plochých panelů tkaniny nebo folie. Rozdíl mezi dvojitým zakřivením plochy a plochými panely tkaniny je dán pružností materiálu membrány. Tkaniny PES/PVC jsou obecně pružnější než tkaniny ze skelných vláken, a proto se spíše hodí pro více zakřivené plochy. Díky tomu membránové konstrukce z tkanin PES/PVC nevyžadují větší míru předpětí, tuhost konstrukce je dána jejím zakřivením [9].

Mechanicky předpínané konstrukce tedy na základě prostorového uspořádání obvodových prvků vytváří plochy dvojí křivosti. Taková membrána je stabilizována výsledkem rovnovážného stavu mezi navzájem protilehlým zakřivením. Geometrie membrány se přizpůsobuje novému zatížení (sníh, vítr apod.), které působí na plochu. Vnější zatížení se přenáší pouze prostřednictvím deformace plochy membrány. Úkolem architekta je určení takových okrajových podmínek, které vedou k rovnovážnému stavu konstrukce, a výsledný tvar bude splňovat jak estetické požadavky, tak statické hledisko.

4 NÁVRHOVÉ LIMITY

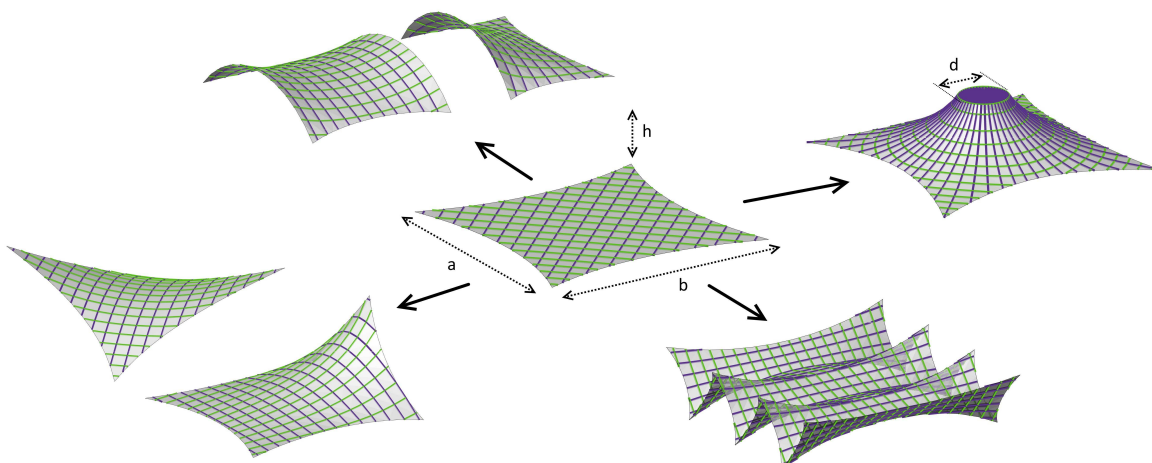
Zobecnění požadavků na návrh membránových konstrukcí je obtížné, je to dáno zejména způsobem tvarování a s jakou jednoduchostí lze docílit složitých tvarových forem. Mechanicky předpínané membránové konstrukce lze využít v širokém měřítku staveb, od konstrukcí v řádech metrů až po stovky metrů. Konstrukční působení mechanicky předpínaných jednovrstvých membránových konstrukcí závisí spíše na zakřivení než na rozpětí. Geometrická rozmanitost konstrukcí je zjednodušena na základní typologické formy v několika tvarových variantách. Výsledné návrhové limity jsou určeny pro potřeby koncepčního návrhu jednovrstvých membránových konstrukcí. Zobecňující návrhové limity neslouží pro statické posouzení konstrukcí a jsou limitovány výběrem typologické formy membránové konstrukce.

4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Tvarová rozmanitost jednovrstvých membránových konstrukcí je pro účely disertační práce omezena na základní typologické formy. Parametrickou studii vstupních okrajových podmínek je sledován vliv změny okrajových podmínek na výsledný tvar membránové konstrukce. Uvažované vstupní parametry statické analýzy jsou uvažovány jako běžně používané.

4.1.1 GEOMETRIE

Výchozím tvarem pro všechny typologické formy je čtvercová plocha. Postupným navyšováním podpor je sledována změna zakřivení plochy a jejího vlivu na vnitřní síly membrány. Dále je sledován vliv orientace osy/ útku a půdorysná poměr stran jednotlivých tvarových variant na zakřivení plochy.



Obr. 21. Analyzovaná geometrie pro sestavení návrhových limitů

Pro bodově podepřenou membránu a membránu na obloukových podporách je uvažován jako výchozí tvar čtvercová plocha o straně 10x10 m. Postupným navyšováním podpor v kroku 0,5 m je sledována změna zakřivení plochy. Dále byla

sledována změna geometrie plochy vlivem změny orientace osnova a útku na ploše a změna půdorysného poměru. Pro kónické plochy ve tvarové variantě pagody byla výchozí geometrií čtvercová plocha 8x8 m s průměrem středového prstence 2m, prsteneček byl navyšován v kroku 0,5 m. Dále je sledována změna velikosti průměru středového prstence jeho vliv na zakřivení plochy. Na obr. 21 jsou uvedeny základní postup analýzy zakřivení jednovrstvých membránových konstrukcí a analyzovaných tvarových variant. V příloze č. 3-12 jsou uvedeny jednotlivé uvažované parametry výpočtu.

4.1.2 PŘEDPĚTÍ

Míra předpětí, orientace osnova/ útku v ploše a použitý materiál, mají zásadní vliv na míru deformace plochy pod zatížením. Ideálním výchozím předpětím je izotropní předpětí ve směru osnova a útku. Navýšením předpětí dochází k omezení deformací plochy pod zatížením. Rozdílná míra předpětí ve směru osnova a útku vede k nerovnoměrnému předpětí v ploše membrány, vlivem vnějšího zatížení dochází k dotvarování a může dojít ke zkreslení výsledků. Pro relevantní analýzu výsledků je zvoleno izotropní předpětí v osnově a útku, hodnota izotropního předpětí je zvolena 1,0 kN/m. Orientace osnova/ útku v ploše je volena s ohledem na analyzovanou typologickou formu, případně je posuzována rozdílná orientace a je sledován vliv na výslednou geometrii.

4.1.3 MATERIÁL

Pro jednovrstvé mechanicky předpínané membránové konstrukce se nejčastěji využívají tkaniny s vnitřní ortogonální orientací osnova a útku. Mechanické vlastnosti těchto materiálů se vyznačují ortotropním elastickým chováním, dosahují rozdílných hodnot napětí a protažení ve směru osnova a útku [31] a zároveň dosahují rozdílných hodnot smykového napětí při rozdílných úhlech [32]. Z důvodu omezení možností použitého softwaru a zjednodušení výpočtu, je materiál popsán základními elastickými konstantami (modul pružnosti, smykový modul pružnosti a Poissonův součinitel), které odpovídají běžně používaným hodnotám v membránových konstrukcích [9]. Hodnoty jsou uvažovány shodné ve směru osnova a útku. Hodnoty uvedeny v tabulce na obr.22. Zvolené hodnoty neposkytují přesné výsledky chování běžně používaných tkanin, ale pro potřeby analýzy konstrukcí jsou dostatečné.

Mechanické vlastnosti - membrána			orientace	
			osnova	útek
Modul pružnosti	E	MPa	1000	1000
Smykový modul	G	MPa	50	50
Poissonův součinitel	ν	-	0,4	0,4
Měrná tíha	γ	kN/m ³	0,01	
Tloušťka	tt	mm	1	

Obr. 22. Mechanické vlastnosti uvažované tkaniny

Ve výpočtu jsou uvažovány okrajové podmínky tvořené kotevními body, lany a fixními obloukovými podporami. Pro kotevní body je uvažována fixace ve směru os XYZ. Fixní obloukové podpory jsou uvažovány pouze pro membránu tvarovanou na základě obloukových podpor. Oblouková podpora je modelována jako spojitá linie s fixací ve směru os XYZ. Volné okraje membrány je modelovány pomocí obvodového lana, které svými mechanickými vlastnostmi odpovídá ocelovému splétanému lanu. Hodnoty jsou uvedeny na obr. 23. Výchozí průhyb obvodového lana je uvažován 10% z rozpětí lana, jedná se o doporučenou a běžně používanou hodnotu [9].

Mechanické vlastnosti – obvodové lano			
Modul pružnosti	E	MPa	160 000
Smykový modul	G	MPa	61 538
Poissonův součinitel	ν	-	0,3
Objemová tíha	γ	kN/m ³	80
Průměr	d_s	mm	11,2
Plocha průřezu	A	mm ²	58,6

Obr. 23. Mechanické vlastnosti uvažovaného obvodového lana

4.1.4 ZATÍŽENÍ

Ve výpočtu jsou jednotlivé konstrukce zatíženy běžně uvažovaným zatížením větrem a sněhem. Stanovení zobecňujícího zatížení sněhem [21] nebo větrem [22] je obtížné vzhledem k nutnosti definování jednotlivých vstupních parametrů jako je geografické určení, vliv okolního území, tvar konstrukce apod. V případě zatížení větrem je situace komplikovanější vzhledem k tvarové složitosti membránových konstrukcí, zejména určení koeficientu c_p . Přes současný výzkum [33-35] je běžné pro velké projekty využít testování ve větrném tunelu, pro běžné konstrukce lze vycházet z doporučujících hodnot [22].

Pro účelu analýzy tvarových variant membránových konstrukcí bylo stanoveno zjednodušení. Pro jednotlivé konstrukce je uvažováno zatížení spojitým zatížením sněhem 1,0 kN/m² ve vertikálním směru na průmět plochy. Zatížení sněhem je jednotné na celou plochu konstrukce, bez uvažování sklonu membrány a snížení zatížení dle normy [21]. Zatížení větrem bylo uvažováno sáním 1,0 kN/m² ve směru normály plochy. Hodnoty zatížení sání větrem neuvažují proměnné hodnoty součinitele c_p . Uvedené hodnoty lze brát za typické hodnoty uvažované v ČR.

4.1.5 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Modelování a analýza mechanicky předpínaných jednovrstvých membránových konstrukcí je dvoustupňový proces. Jedná se o proces tvarování a statickou analýzu, v obou případech je nutné použít specializovaný software. V prvním kroku tvarování je na základě definovaných okrajových podmínek (okrajová lana, fixace, předpětí apod.) nalezen výsledný tvar, který je nezávislý na mechanických vlastnostech použitých prvků (lano, membrána apod.). Nalezená geometrie z procesu tvarování je použita

pro statickou analýzu. Geometrie je doplněna o mechanické vlastnosti jednotlivých prvků a konstrukce je zatížena (vítr, sníh, předpětí, vlastní tíha apod.).

Z pohledu zatížení a nelineárnímu chování membránových konstrukcí nemohou být výsledky jednotlivých zatěžovacích vztahů kombinovány. Pro jednotlivé kombinace zatížení musí být provedena nová statická analýza (např. předpětí + vlastní tíha + sníh). V tabulce na obr. 24 jsou uvedeny uvažované kombinace zatížení pro analýzu konstrukce [9], pro které jsou sledovány kritické hodnoty pro sestavení návrhových limitů.

Kombinace zatížení	
ZS 1	předpětí + vlastní tíha
ZS 2	předpětí + vlastní tíha + sníh
ZS 3	předpětí + sání větrem

Obr. 24. Analyzované kombinace zatížení

Pro účely této práce byl použit program Dlubal RFEM[17], který umožňuje podrobné nastavení jednotlivých vstupních parametrů a umožňuje pomocí rozšíření RF-FORM-FINDING tvarování membránových konstrukcí. Pomocí výpočetního jádra RFEM na základě metody konečných prvků i podrobnou statickou analýzu včetně komplexního materiálového modelu.

4.2 POROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH MODELŮ

Návrhové limity jednovrstvých membránových konstrukcí jsou sestaveny pro potřeby koncepčního návrhu membránových konstrukcí. Předpokládá se použití bez ohledu na použitý výpočetní program. Předpokladem je využití základních programů pro proces tvarování. Široká škála softwaru pro modelování membránových konstrukcí se odlišuje jak použitou metodou numerického výpočtu tak rozsahem možného použití. Jednotlivé numerické metody se vzájemně odlišují a dosahují rozdílných výsledků. Pro použití návrhových limitů jednovrstvých membránových konstrukcí je důležité vzájemné porovnání výpočetních modelů pro určení vzájemné odchylky mezi jednotlivými programy.

Pro porovnání jednotlivých výpočetních metod jsou použity následující softwarové nástroje, které zastupují jednotlivé numerické metody pro tvarování a statickou analýzu. Reprezentantem metody force-density je program EASY[11] a Formfinder[12], metoda dynamického uvolnění a URS je zastoupena nástroji Rhinomembrane[16] a programem Dlubal RFEM[17].

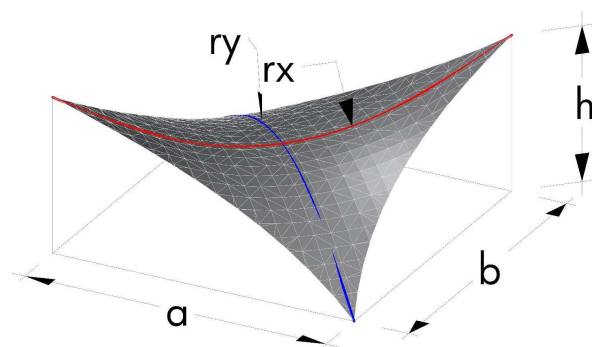
Srovnání jednotlivých metod je provedeno ve dvou krocích. V prvním kroku jsou sledovány výsledky procesu tvarování a v druhém kroku jsou porovnány výsledky statické analýzy. Předpokladem jsou mírné odchylky ve výsledné geometrii z procesu tvarování při zadání shodných okrajových podmínek, proto jsou sledovány následující parametry: hlavní křivost ve dvou na sebe kolmých směrech r_x / r_y a plocha membrány.

4.2.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Porovnání výpočetních modelů je provedeno na třech základních tvarech membránových konstrukcí (bodově podepřená membrána, kónické tvary a membrána na obloukových podporách). Pro každý model jsou zvoleny shodné vstupní parametry obvodových prvků a předpětí membrány umožňující sledovat jednotlivé parametry a výsledky navzájem porovnat. Vstupní parametry pro proces tvarování jsou shodné pro jednotlivé výpočetní programy, odlišnosti jsou dány pouze způsobem zadávání vstupních parametrů a způsobem generování výpočetní sítě.

BODOVĚ PODEPŘENÁ MEMBRÁNA – SEDLO

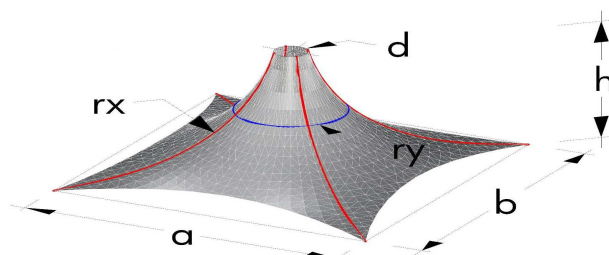
Půdorysné rozměry $a=b=10\text{m}$, převýšení $h=5\text{m}$. Průhyb obvodových lan 10% z rozpětí. Předpětí uvažováno 1 kN/m ve směru osnovy a útku, orientace osnovy/ útku mezi kotevními body.



Obr. 25. Bodově podepřená membrána - sedlo

KÓNICKÝ TVAR - PAGODA

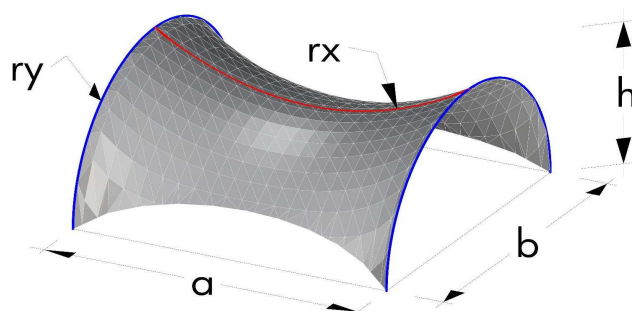
Půdorysné rozměry $a=b=10\text{m}$, převýšení $h=5\text{m}$, průměr vrcholu $d=1\text{m}$. Průhyb obvodových lan 10% z rozpětí. Předpětí uvažováno 1 kN/m ve směru osnovy a útku, orientace osnovy/ útku tangenciálně vzhledem ke středu vrcholu.



Obr. 26. Kónický tvar membrány

MEMBRÁNA NA OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH

Půdorysné rozměry $a=b=10\text{m}$, převýšení $h=5\text{m}$, poloměr obloukové podpory $r_y=2,5\text{m}$. Průhyb obvodových lan 10% z rozpětí. Předpětí uvažováno 1 kN/m ve směru osnovy a útku, orientace osnovy/ útku kolmo k obloukovým podporám.

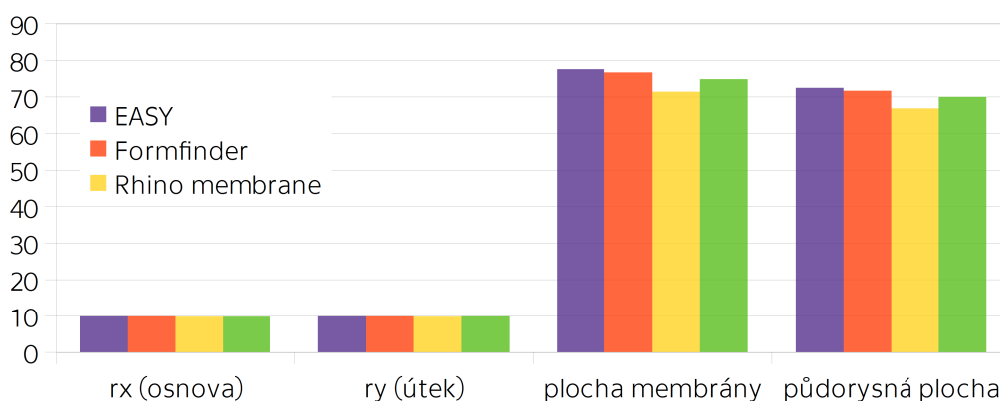


Obr. 27. Membrána na obloukových podporách

Statická analýza je provedena v programu EASY a Dlubal RFEM, které umožňují jak tvarování membránových konstrukcí, tak statickou analýzu. Vstupní geometrie pro potřebu statické analýzy jsou použity výsledné geometrie z procesu tvarování. Mechanické vlastnosti materiálů byly zadány v obou programech shodné, pro materiál membrány je uvažován materiál se shodnými vlastnostmi ve směru osnova a útku dle tabulky na obr. 22.. Pro obvodová lana je uvažováno ocelové lano průměru 12 mm dle tabulky na obr. 23. Ve výpočtu jsou uvažovány tři kombinace zatížení dle tabulky na obr. 24. Zatížení sněhem je uvažováno hodnotou 1,0 kN/m² ve vertikální směru na půdorysný průmět plochy, dále je uvažováno zatížení sání větrem 1kN/m² ve směru normály plochy.

4.2.2 VÝSLEDKY A POROVNÁNÍ

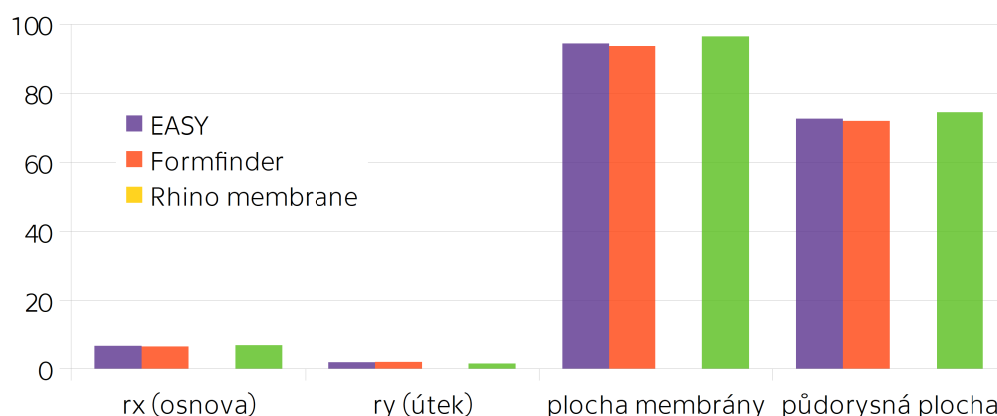
Výsledky z procesu tvarování jsou uvedeny pro všechny uvažované výpočetní programy a uvažované typologické tvary. Výsledná geometrie bodově podepřené membrány - sedla jsou uvedeny na obr. 27. Geometrie membrány ve sledovaných parametrech dosahuje téměř identických hodnot. Hlavní křivost ve směru osnova r_x a útku r_y se téměř neliší a dosahují shodných hodnot. Z pohledu výsledné plochy membrány a jejího půdorysného průmětu se výsledky odlišují max. o 8%. Odlišnost je dána způsobem generování sítě pro výpočet. Generování výpočetní sítě u metody force-density (EASY a Formfinder) se provádí pomocí srovnávací roviny proloženou mezi kotevními body. Naopak v případě metody URS nebo dynamického uvolnění (Dlubal RFEM a Rhinomembrane) je výpočetní síť generována na prostorové plochy proložené kotevními body a okrajovými prvky.



Obr. 28. Bodově podepřená membrána – výsledky porovnání procesu tvarování

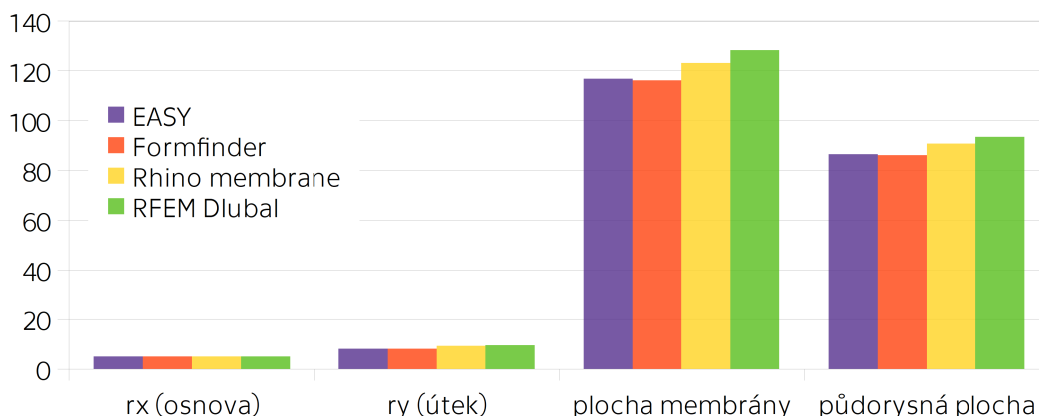
Geometrie membrány kónického tvaru – pagody a výsledky z procesu tvarování jsou

uvedeny v tabulce na obr. 28. Tvarování membrány nebylo možné dosáhnout použitím metody dynamického uvolnění (RhinoMembrane), výsledný model neodpovídal membránové ploše, metoda generování sítě membrány neumožňuje v programu RhinoMembrane zadat radiální síť, která by dosáhla porovnatelného výsledku. Tvarování membrány pomocí metody force-density a URS se ve sledovaných parametrech neliší o více jak 5%. Významnější odchylka mezi metodou force-density a URS vykazuje parametr hlavní křivosti ve směru útku (radiální směr). Tvarování metodou URS je v tomto místě mírně štíhlejší oproti metodě force-density. Odchytky jsou dány způsobem rozložení předpětí v radiálním směru, kdy metoda force-density umožňuje zadat plynulejší rozložení předpětí s ohledem na zužující se tvar plochy.



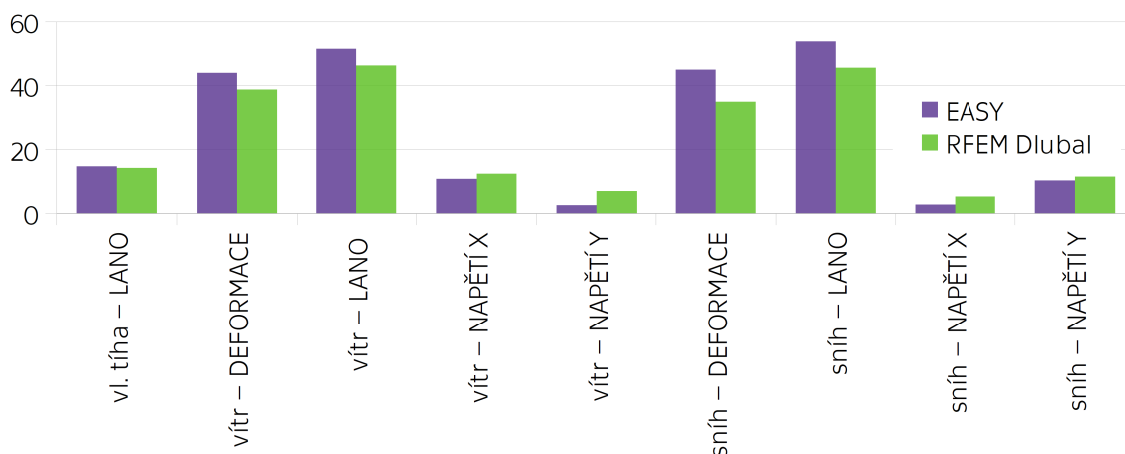
Obr. 29. Membrána kónického tvaru - výsledky porovnání procesu tvarování

Výsledky tvarování membrány na obloukových podporách vede k rozdílným výsledkům, které jsou dány možnostmi a omezeními výpočetních metod. Metoda force-density použitá u programu EASY a Formfinder vede ve sledovaných parametrech ke shodným výsledkům. Metoda dynamického uvolnění se od metody force-density liší v parametru hlavní křivosti ve směru útku r_y o cca 10%. Metoda URS se od metody force-density se liší o 18% ve směru útku r_y . Hodnoty hlavní křivosti ve směru osnova r_x dosahovala shodných výsledků. Vzájemná odchylka v hlavní křivosti ve směru útku r_y vede k odchylkám ve výsledné ploše membrány. Výsledné rozdíly jsou dány způsobem a metodou generování sítě metody force-density, kde výsledný tvar membrány závisí na kvalitě a tvaru generování výpočetní sítě. Zde se projevuje hlavní nevýhoda metody force-density, která generuje síť na základě kolmého pohledu na plochu proloženou kotevními body a okrajovými prvky. Se zvyšujícím se zakřivením obloukových odpor se nevýhoda metody force-density projevuje, řešením je pečlivé generování výpočetní sítě.



Obr. 30. Membrána na obloukových podporách - výsledky porovnání procesu tvarování

Výsledky porovnání statické analýzy je závislé na vstupní geometrii z procesu tvarování, jakákoliv vzájemná odchylka v jednotlivých parametrech vede ke zkreslení výsledků statické analýzy. Odchytky se vyskytují ve všech tvarových typech, největší odchytky jsou patrné u výsledků při vnějším zatížení sněhem a sání větrem. Výpočet statické analýzy předpětí a vlastní tíhy dosahuje shodných výsledků. Obecně lze konstatovat, že výpočet metodou URS resp. metodou konečných prvků dosahuje optimističtějších výsledků oproti metodě force-density téměř ve všech sledovaných parametrech. Rozdíl je dán zejména podrobnějším materiálovým modelem použitý při metodě URS a metodě konečných prvků. Hlavními sledovanými parametry pro statické posouzení membránových konstrukcí jsou max. deformace plochy, normálová tahová síla v obvodových lanech a napětí membrány ve směru osnov a útku.

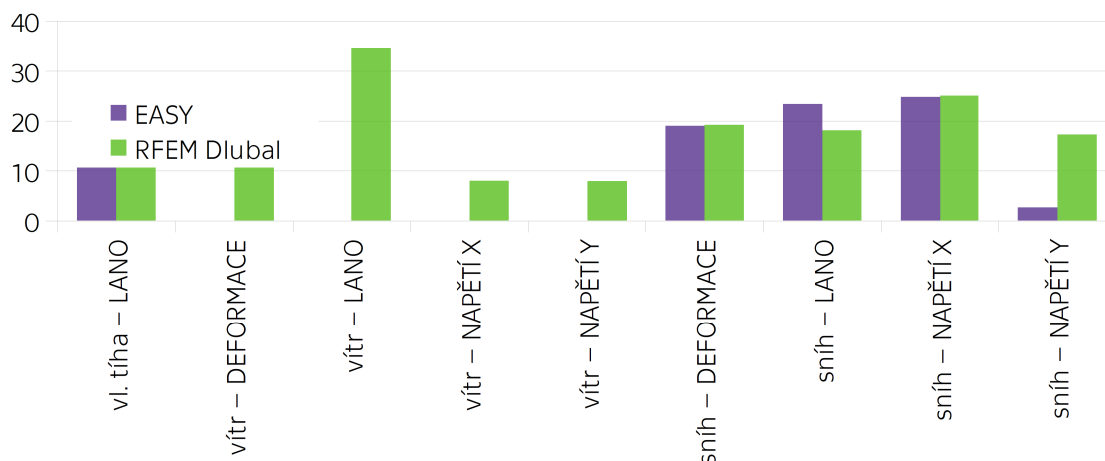


Obr. 31. Bodově podepřená membrána - výsledky porovnání statické analýzy

Na obr. 30 jsou uvedeny výsledky statické analýzy bodově podepřené membrány - sedla. Z výsledku je patrný rozdíl ve výsledcích, který je nejvíce patrný u deformacích při zatížení sněhem a sání větrem. V případě deformace od sání větrem rozdíl činí 13% u deformace při zatížení sněhem činí již 28%. Z pohledu napětí v membráně a tahové normálové síly v laně se výsledky odlišují max. o 18%, ale zároveň je zde patrný rozdíl v rozložení napětí v membráně a obvodových lanech. V

případě metody dynamického uvolnění se uplatňuje komplexní materiálový model, který vede k přesnějším výsledkům.

Výsledky statické analýzy pro kónický tvar – pagody nedospěl v případě zatížení sání větrem model v programu EASY stability. Výsledky porovnání jsou uvedeny v tabulce na obr. 31. Sledované deformace jak při vlastní tíze a zatížení sněhem dosáhly v obou případech shodných výsledků odchylka se pohybuje kolem 6%. V případě napětí v membráně a napětí v laně vykazuje výrazné rozdíly až 30%. Vliv na výše uvedené odchylky je z části dán mírně odlišnou vstupní geometrií z procesu tvarování, dále na výsledky má vliv materiálový model jednotlivých programů.



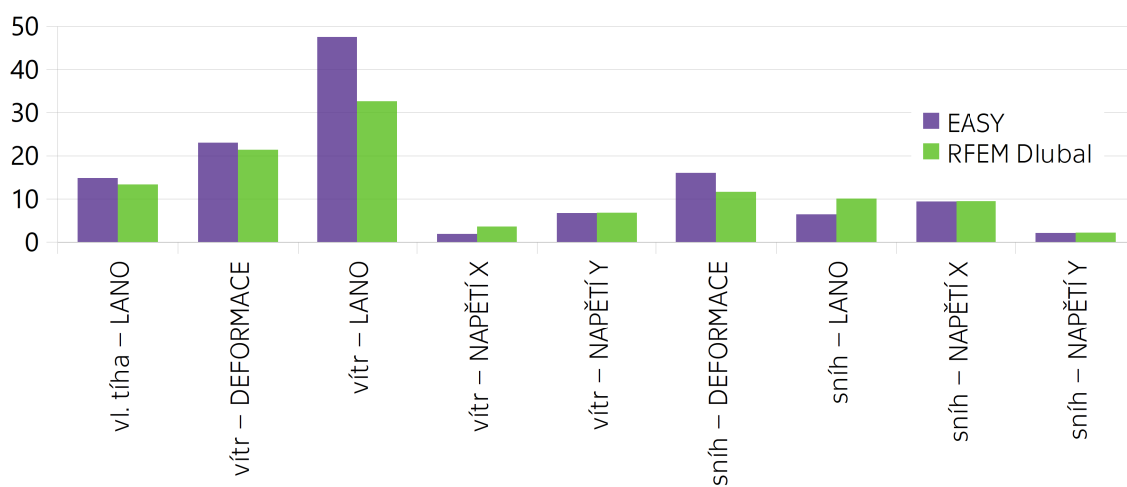
Obr. 32. Membrána kónického tvaru - výsledky porovnání statické analýzy

Výsledky statické analýzy membrány na obloukových podporách je uveden v grafu na obr. 32. V tomto případě se zde projevuje odlišná vstupní geometrie z tvarování. Zde se nejvíce projevuje na normálové tahové síle v laně, kdy odchylka v případě zatížení větrem dosahuje 45%, v případě normálové síly v laně odchylka činí 37%. Deformace membrány pod zatížení větrem dosahuje odchylka 7% v případě deformace pod zatížení sněhem 18%. Sledované napětí membrány pod zatížením vykazuje téměř shodných hodnot, odchylka dosahuje max. 6%.

Rozdíl ve výsledku statické analýzy je do jisté míry dán vlivem materiálové modelu, používajícího jednotlivé statické programy. Materiálový model uvažovaný v programu EASY počítá zejména s modulem pružnosti membrány ve směru osnova a útku (ve výpočtu uvažováno $E=1000$ MPa), vliv smykového modulu G nebyl ve výpočtu uvažován (program EASY tento parametr v dostupné verzi neumožňoval). Naopak materiálový model v programu RFEM Dlubal je mnohem komplexnější a metoda konečných prvků použitá pro statickou analýzu uvažuje jak s modulem pružnosti tak smykovým modulem.

Z porovnání výpočetních modelů je zřejmé, že programy resp. výpočetní modely, mají zásadní vliv na tvarování a následnou statickou analýzu. Obecně lze konstatovat, že v některých sledovaných parametrech dosahují odchylky hodnot kolem 40% (převážně lokální extrémy), nicméně v průměru se výpočetní modely odlišují o cca 18%. Odchylky jsou dány jak výpočetní metodou, tak způsobem zadání vstupních parametrů a generováním výpočetní sítě. Z pohledu koncepčního návrhu a

tvarování membránových konstrukcí vzájemné odchylky nejsou tak významné, proto nezáleží na použité výpočetní metodě. Každopádně při modelování membránových konstrukcí je nutné zohlednit vstupní parametry a možnosti jednotlivých programů.



Obr. 33. Membrána na obloukových podporách - výsledky porovnání statické analýzy

4.3 STATICKÁ ANALÝZA

Výsledky porovnání statické analýzy jsou uvedeny pro jednotlivé typologické tvary. Pro každý typologický tvar jsou voleny tvarové varianty. Sledovaným parametrem je závislost zakřivení povrchu resp. průhyb plochy v jednom a druhém směru na výslednou únosnost plochy pod zatížením. Hlavními sledovanými parametry jsou deformace plochy, max. napětí membrány v osnově/ útku a max. normálová tahová síla v obvodovém laně. Sledované parametry statické analýzy pro nalezení návrhových limitů jsou uvedeny v tabulce na obr. 33.

OZN	PARAMETR	JEDNOTKY
k_x	hlavní křivost ve směru osnovy	-
k_y	hlavní křivost ve směru útku	-
K	Gaussova křivost	-
c_x	zakřivení plochy ve směru osnovy d_x/l_s	%
c_y	zakřivení plochy ve směru osnovy d_y/l_s	%
w_z	deformace plochy	mm
n_x	napětí membrány ve směru osnovy	kN/m
n_y	napětí membrány ve směru útku	kN/m
N_{max}	maximální normálová síla lana	kN

Obr. 34. Sledované parametry statické analýzy

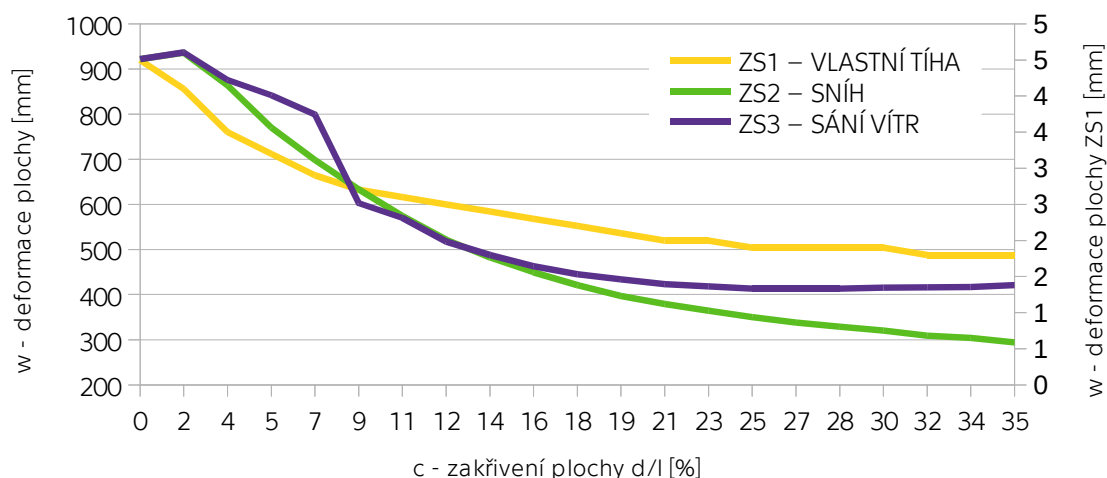
4.3.1 BODOVĚ PODEPŘENÁ MEMBRÁNA

Bodově podepřené membrány se tvarují na základě převýšení jednotlivých kotevních bodů. Zakřivení plochy je tedy dáno vzájemným prostorovým uspořádáním kotevních prvků. Výsledky porovnání jsou uvedeny pro jednotlivé zkoumané tvarové varianty bodově podepřené membrány.

Základní tvar bodově podepřené membrány je hyperbolický paraboloid zvaný „hypar“, který je tvořen čtyřmi kotevními body střídajícími se vysokými a nízkými kotevními body, okraje jsou nejčastěji tvořeny obvodovými lany. Orientace osnovy a útku na ploše je dán směrem dominantního zatížení. Typicky se orientuje osnova/útek mezi vrcholy – diagonální orientace osnovy/ útku. Další možností je orientace souběžně s okrajem membrány – ortogonální orientace osnovy/ útku. Orientace má vliv na únosnost, v modelované situaci je použit materiál o shodných vlastnostech jak ve směru osnovy a útku, běžně používané materiály dosahují odlišných vlastností ve směru osnovy/ útku a vliv orientace osnovy a útku je výraznější. Dále je analyzován „hypar“ s diagonální orientací osnovy a útku o shodné výšce s proměnným půdorysným tvarem o poměru 1:1 do 1:2. Výsledky pro jednotlivé tvarové varianty uvedeny v příloze č.3-6.

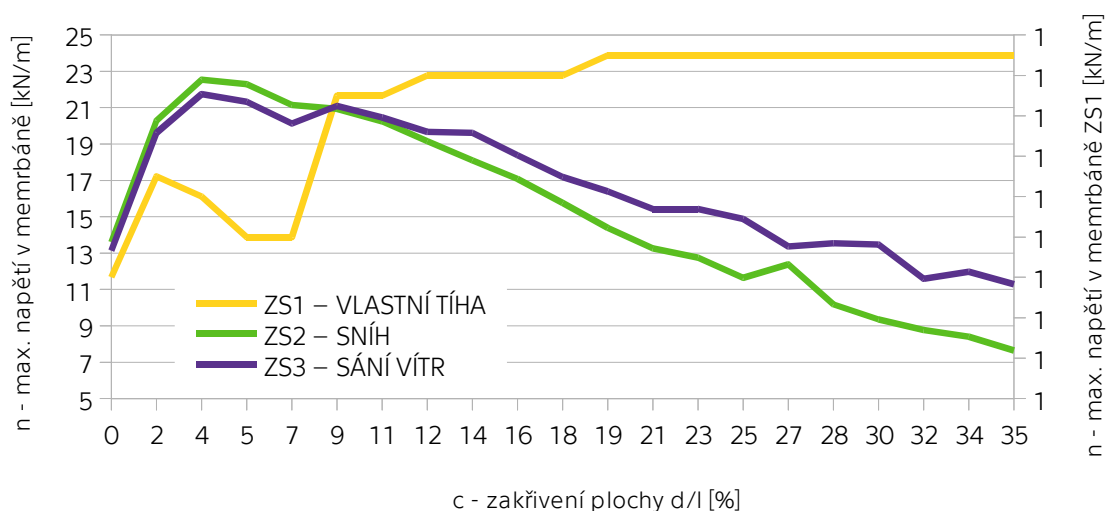
„HYPAR“ SYMETRICKÝ, DIAGONÁLNÍ ORIENTACE OSNOVY A ÚTKU

Výsledky statické analýzy symetrické bodově podepřené membrány s diagonální orientací osnovy a útku jsou uvedeny v grafech na obr. 33-35.



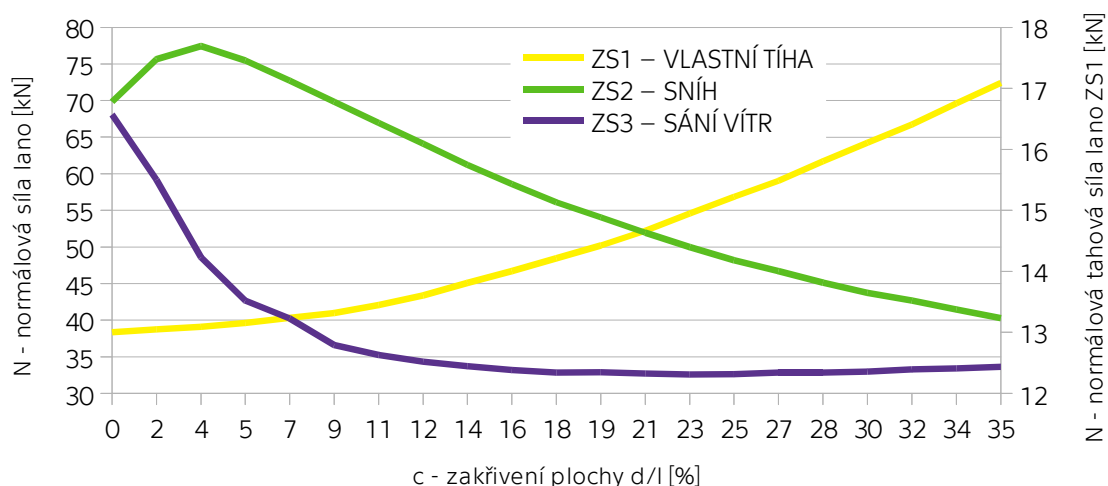
Obr. 35. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku - deformace plochy

Při zatížení sněhem dochází při průhybu plochy větší jak 14% již k mírnému poklesu deformace. Z pohledu max. napětí v ploše membrány je patrné, že od průhybu membrány 9% je závislost na max. napětí v ploše membrány lineární bez výrazné změny. Závislost průhybu membrány na max. normálovou sílu v obvodovém laně je od hodnoty 5% spíše lineární.



Obr. 36. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku - max. napětí membrány

Z pohledu zatížení sání větrem a závislosti zakřivení povrchu membrány na deformaci plochy, dochází k výraznějšímu úbytku deformace při průhybu větším jak 12%. Z pohledu maximálního napětí v ploše membrány je závislost na zakřivení povrchu shodná jako při zatížení sněhem, od hodnoty 11% je chování membrány více lineární. Vliv zakřivení plochy na max. normálovou sílu v laně je patrný do hodnoty 9% patrný výraznější úbytek síly, při vyšším míře zakřivení plochy je úbytek síly méně výrazný.

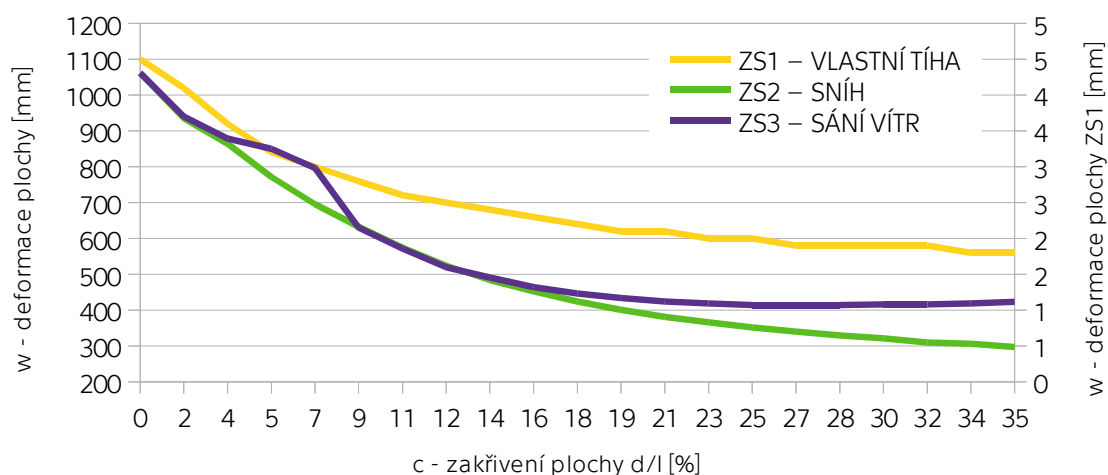


Obr. 37. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku – max. normálová síla lano

Bodově podepřená membrána tvaru symetrického hyperu s diagonální orientací osnovy a útku vykazuje nejefektivnější prohnutí plochy membrány v rozmezí 9 -14%. Výrazný vliv na výsledky statické analýzy má uvažované zatížení plochy membrány. Dle výsledků statické analýzy lze obecně definovat hodnotu efektivního prohnutí membrány bez zohlednění zatížení od průhybu plochy na 11% z rozpětí.

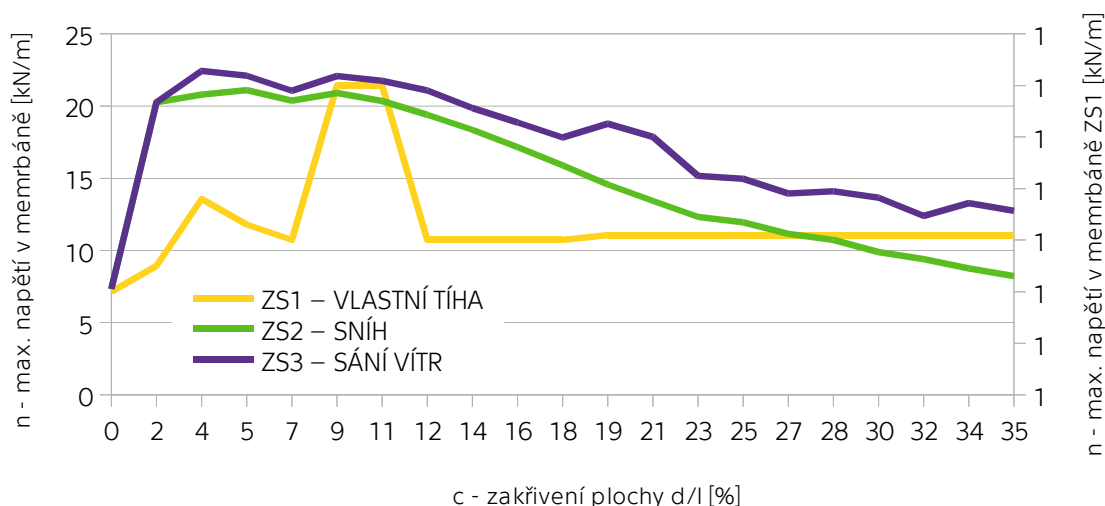
„HYPAR“ SYMETRICKÝ, ORTOGONÁLNÍ ORIENTACE OSNOVY A ÚTKU

Výsledky statické analýzy pro uvažovanou tvarovou variantu jsou uvedeny v grafech na obr. 36-38. Výsledky statické analýzy při uvažovaném zatížení sněhem a sáním větrem dosahují podobných výsledků. Tento fakt je dán právě orientací osnovy a útku paralelně s obvodovým lanem, kdy není osnova a útek orientovány dle dominantního zatížení.



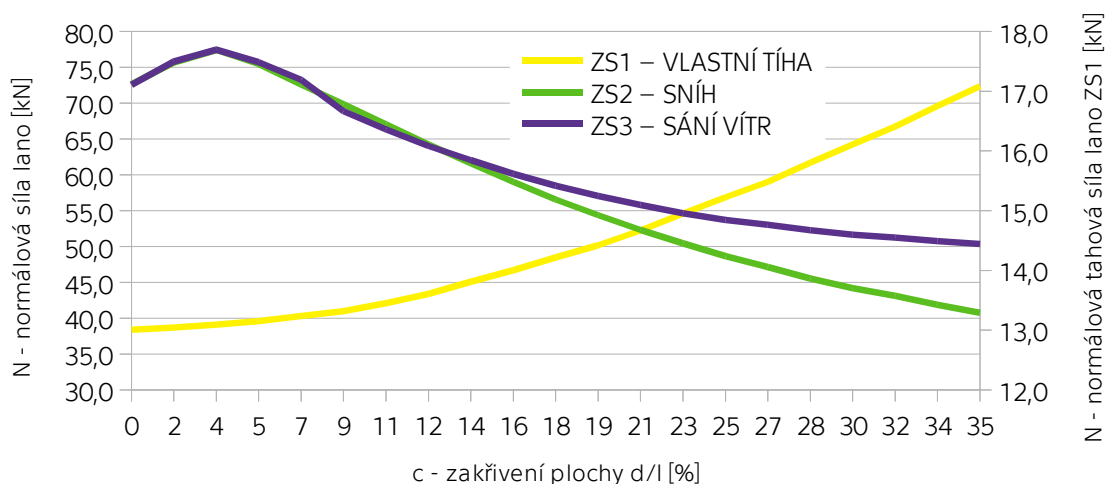
Obr. 38. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - deformace plochy

Z pohledu deformace plochy membrány je zřejmé, že při průhybu membrány vyšším jak 12% již nedochází k výraznějšímu úbytku deformace plochy pod uvažovaným vnějším zatížením sněhem a sáním větrem.



Obr. 39. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - max. napětí membrány

Od hodnoty průhybu membrány 11% je patrné lineární chování závislosti zakřivení membrány na max. napětí v ploše membrány. Právě při průhybu větším jak 11% dochází ke snižování max. napětí v membráně od extrémních hodnot.



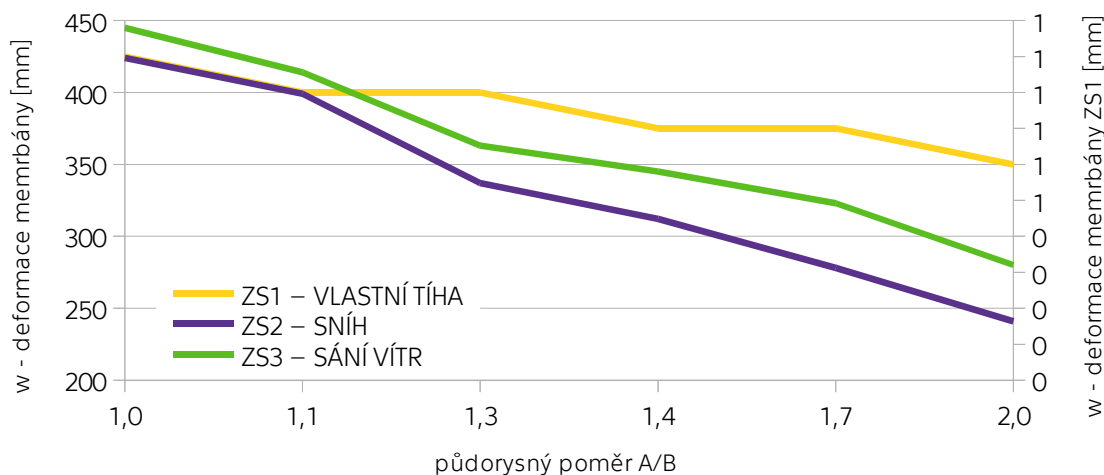
Obr. 40. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano

Při sledované závislosti zakřivení plochy membrány na max. normálovou sílu je při zatížení sání větrem patrný úbytek normálové síly v laně při průhybu plochy membrány vyšším jak 12%. Při zatížení sněhem je závislost zakřivení povrchu na max. normálovou sílu více lineární.

Obecně lze určit pro tvarovou variantu bodově podepřené membrány tvaru symetrického „hyparu“ s ortogonální orientací osnovy a útku v ploše, že efektivní prohnutí plochy membrány je v rozmezí hodnot 11-12%.

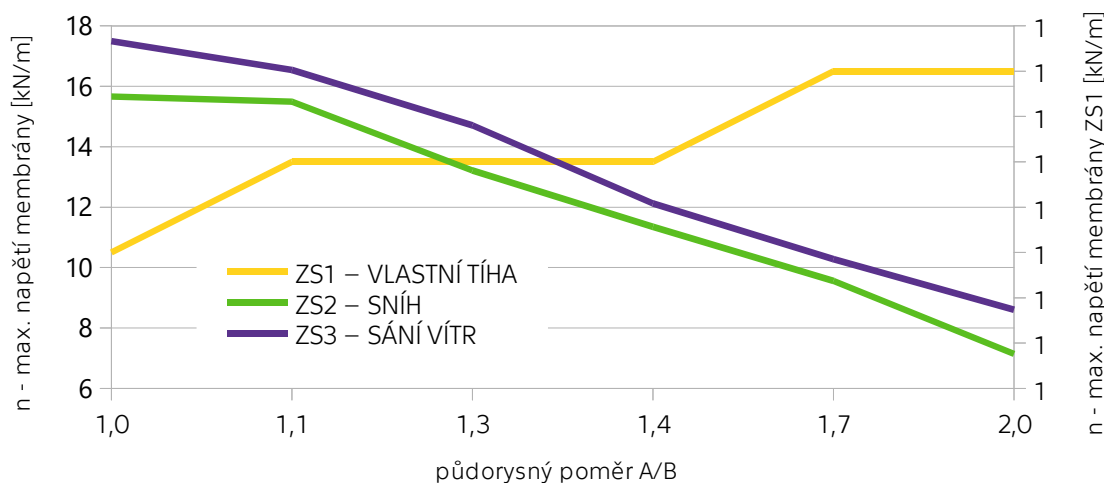
„HYPAR“ ASYMETRICKÝ, DIAGONÁLNÍ ORIENTACE OSNOVY A ÚTKU

Změna půdorysného poměru mezi jednotlivými stranami, je uvedena v grafech na obr. 39-41. Při změně půdorysných rozměrů dochází ke zmenšení zatěžované plochy a zkrácení výsledků statické analýzy.



Obr. 41. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku - deformace

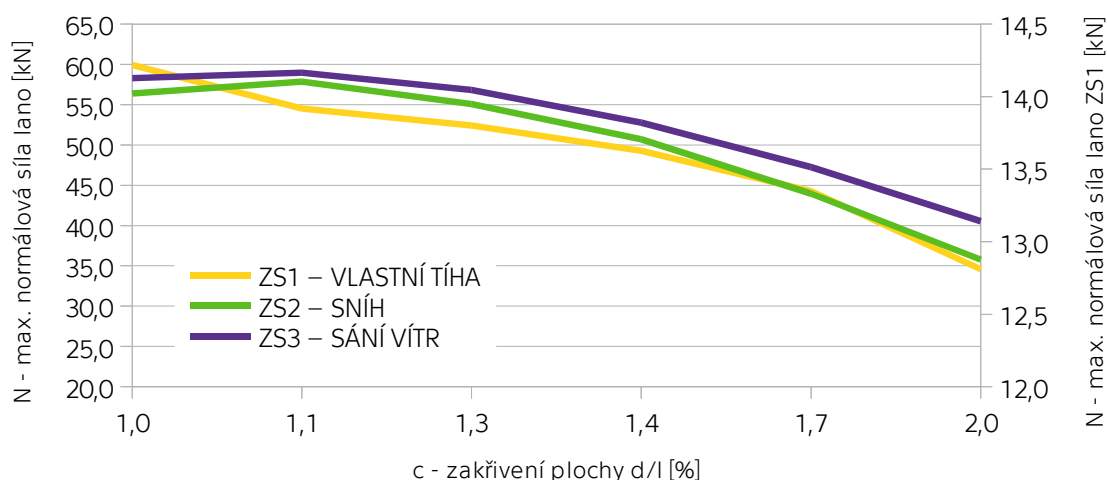
Vlivem zmenšení zatěžované plochy se úměrně snižují hodnoty sledovaných parametrů. V případě sledované závislosti deformaci plochy na půdorysný poměr stran lze sledovat při půdorysným poměru 1:1,3 mírnou změnu úbytku deformace.



Obr. 42. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku - max. napětí membrány

Z pohledu závislosti půdorysného poměru na maximální napětí v ploše membrány je patrné lineární chování. Se snižujícím se půdorysným poměrem a plochou membrány dochází k odpovídajícímu snížení max. napětí v ploše membrány.

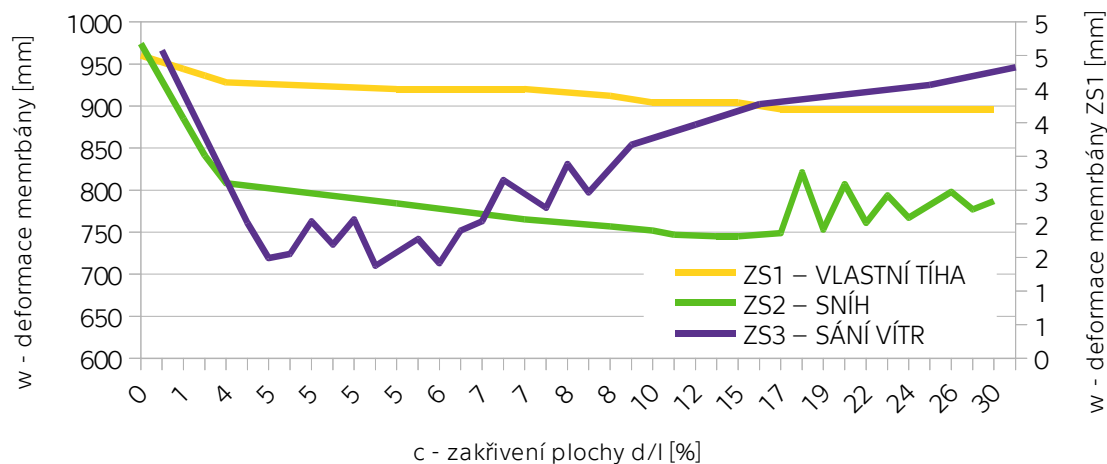
Do půdorysného poměru 1:1,3 nedochází k výrazné změně maximální normálové síly v obvodovém laně. Se zvyšujícím se půdorysným poměrem dochází k výraznějšímu úbytku normálové síly v laně.



Obr. 43. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano

5-TI BODOVÁ MEMBRÁNA S ORTOGONÁLNÍ ORIENTACÍ OSNOVY A ÚTKU

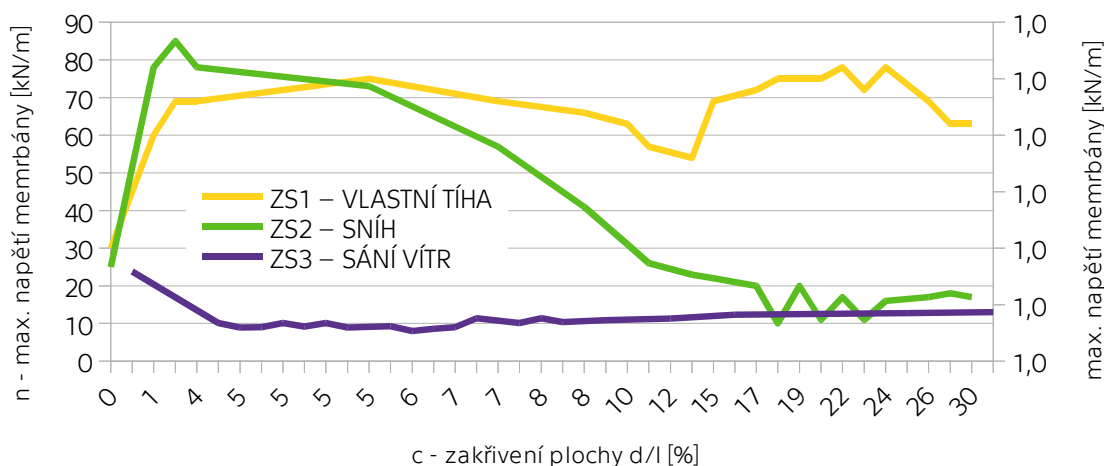
Výsledky statické analýzy jsou uvedeny v grafech na obr. 42-44. Tvarování 5-ti bodové membrány je oproti symetrické bodově podepřené membrány mírně odlišné. Nejvíce je to patrné z hlediska průhybu ve směru útku a osnovy, který se oproti symetrické bodově podepřené membrány liší. S odlišným průběhem zakřivení membrány souvisí také vliv na zatížení. Při zatížení větrem je tento vliv patrný, Při narůstajícím zakřivením dochází k navýšení sledovaných parametrů.



Obr. 44. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy/ útku - deformace

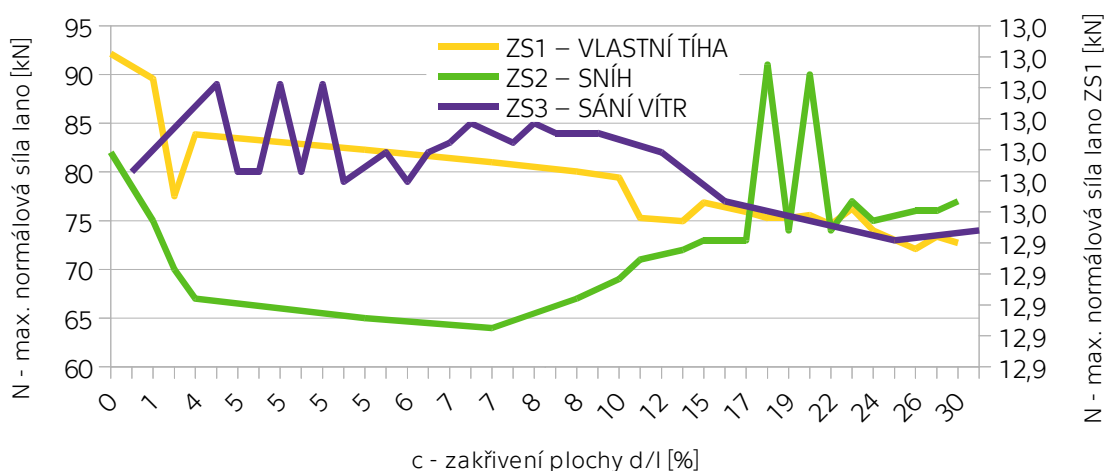
Z pohledu deformace plochy je patrné, že při zatížení sněhem od hodnoty zakřivení plochy kolem 5% již nedochází k nárůstu deformace. Naopak při zatížení sání větrem dochází k úbytku deformace v rozmezí průhybu membrány 5-10%.

Vliv zakřivení plochy membrány na max. napětí v membráně je pod zatížení výrazně odlišný pro uvažované zatížení. Při zatížení sání větrem nedochází k výraznější změně napětí v membráně. Při zatížení sněhem je patrný úbytek napětí v membráně při průhybu membrány 13%.



Obr. 45. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy a útku - max. napětí membrány

Výsledky závislost zakřivení povrchu membrány na max. normálové síle v laně jsou značně rozdílné a je zde patrný rozptyl hodnot daný nelineárním chováním membránových konstrukcí. Při zatížení sněhem je patrný úbytek normálové síly v laně při průhybu membrány v rozmezí 5-10% při navýšení zakřivení poté dochází k navýšení normálové síly v laně. Při zatížení sání větrem je patrné snížení maximální síly v laně při průhybu plochy více jak 15%.



Obr. 46. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano

Ze statické analýzy 5-ti body podepřené membrány je nejvíce patrný vliv geometrie membrány a orientace osnovy a útku na únosnost plochy membrány. V modelované tvarové variantě je patrný vyšší počet čtyř spodních kotevních bodů oproti jednomu hornímu kotevnímu body, který přenáší většinu zatížení sněhem. Obecně lze konstatovat, že při průhybu plochy kolem 13% z rozpětí je plocha schopna přenést zatížení sněhem. Vyšší počet spodních kotevních bodů snižuje statické parametry membrány.

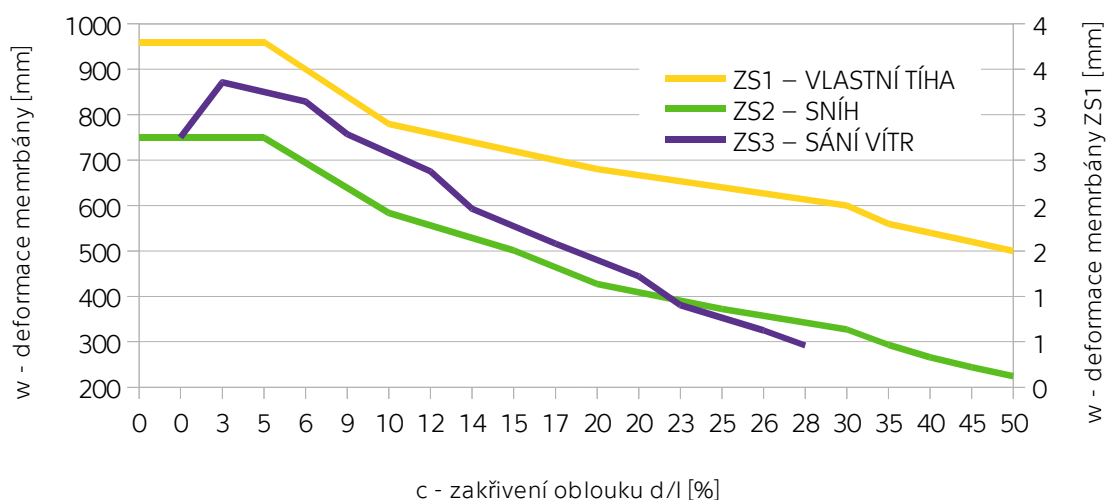
4.3.2 MEMBRÁNA NA OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH

Membránové konstrukce na obloukových podporách se tvarují do ploch dvojí křivosti pomocí zakřivení pevných podpor, typicky se jedná o nosníky případně fixní kotvení do nosné konstrukce. Dvojitého zakřivení je dosaženo právě zakřivením pevných podpor (nosníku), které mají rozhodující vliv na výslednou geometrii plochy.

Základní tvarovou variantou membrány na obloukových podporách je membrána napnutá mezi dvěma rovnoběžnými oblouky. Další variantou je membrána tvarována pomocí jedné obloukové podpory. Membrána na obloukových podporách se často využívá v případě podlouhlých půdorysných tvarů, kdy se plocha rozdělí řadou obloukových podpor. Osnova a útek se v případě membránových konstrukcí typicky orientuje mezi obloukovými podporami. V práci byly uvažovány varianty s dvěma obloukovými podporami a s jednou obloukovou podporou. Dále byl analyzován vliv půdorysného poměru stran na únosnost konstrukce. Výsledky pro jednotlivé tvarové varianty jsou uvedeny v tabulkách uvedených v příloze č. 7-10.

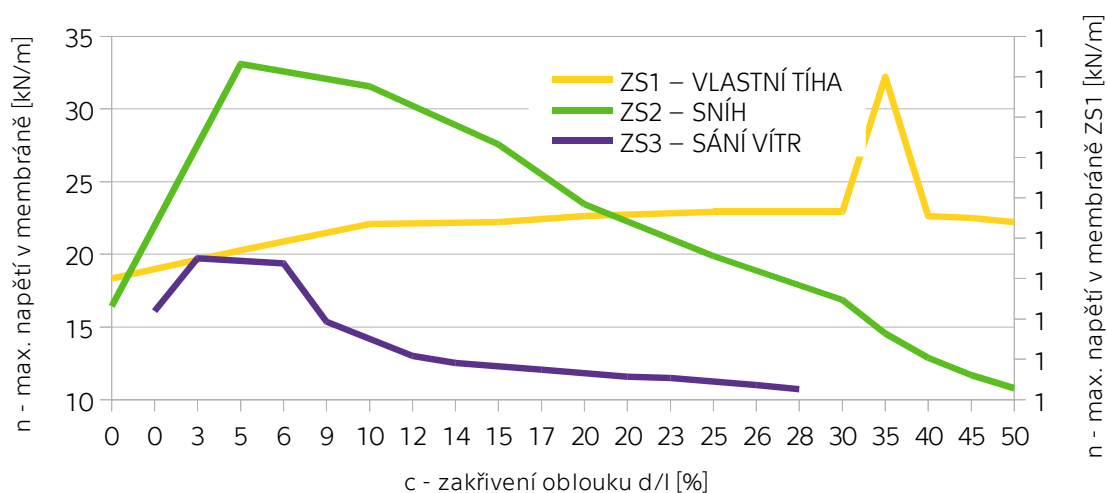
MEMBRÁNA NA DVOU OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH

Membrána tvarována na základě dvou rovnoběžných obloukových podpor se oproti bodově podepřené membráně se shodným zakřivením liší v rozdílném přenosu vnějšího zatížení. Vnitřní síly u membrány na obloukových podporách se přenáší více mezi hranami ortogonálně než mezi bodovými podporami.



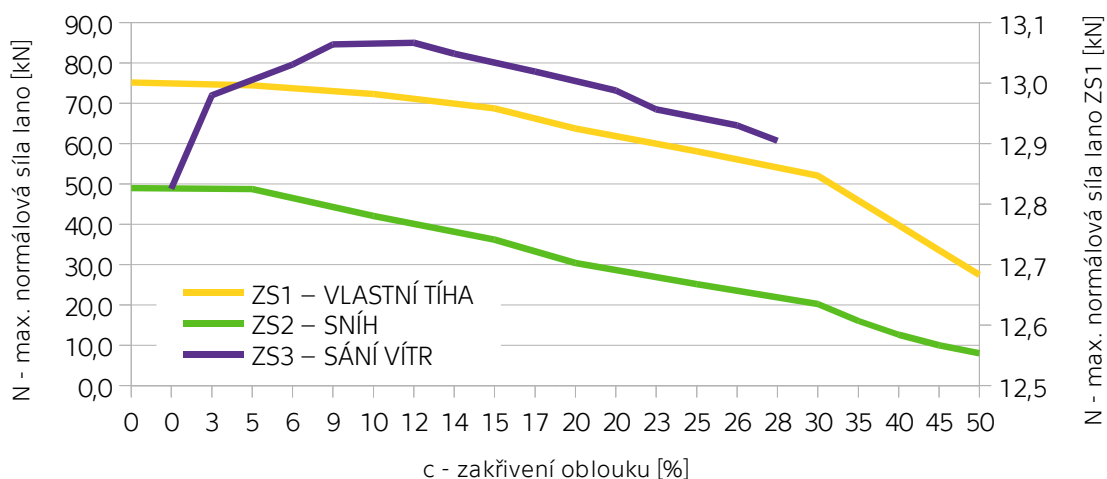
Obr. 47. Membrána na dvou obloukových podporách - deformace plochy

Z pohledu závislosti zakřivení obloukových podpor na výslednou deformaci plochy je patrné, že míra zakřivení oblouku má téměř lineární charakter. Při průhybu oblouku od 20-23% z rozpětí lze pozorovat mírné omezení deformace při navyšování oblouku.



Obr. 48. Membrána na dvou obloukových podporách - max. napětí membrána

Při sledování vlivu zakřivení obloukové podpory na max. vnitřní napětí je nejvíce patrné rozdílné chování oproti bodově podepřené membráně. Při uvažovaném zatížení sání větrem je patrné, že díky většímu počtu spodních okrajových prvků, dochází k omezení max. napětí v membráně oproti zatížení sněhem. Při uvažování pouze zatížení sání větrem nedochází od průhybu 12% z rozpětí k dalšímu úbytku napětí. Při zatížení sněhem je patrné, že napětí od zatížení sněhem se přenáší mezi pevnými obloukovými podporami, které svou nepoddajností nedovolují větší deformaci plochy a snížení max. napětí v membráně.



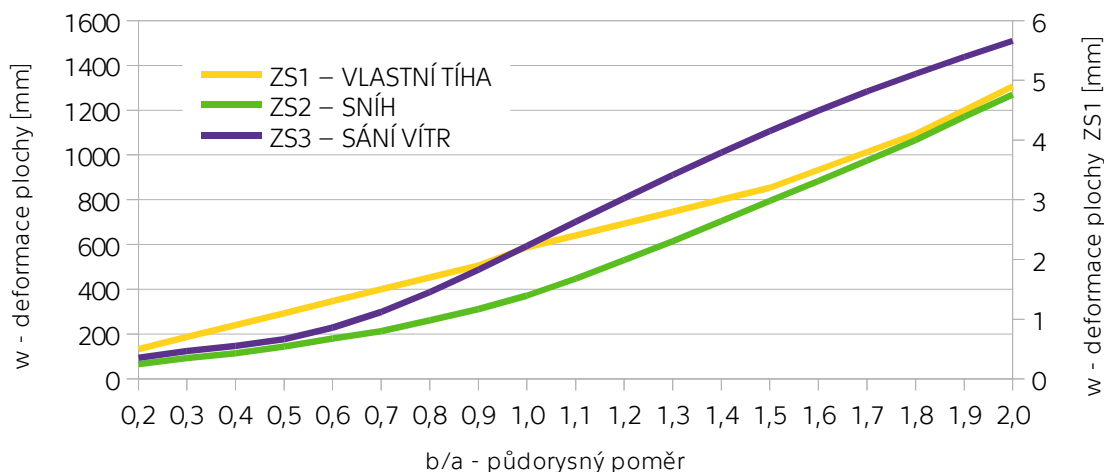
Obr. 49. Membrána na dvou obloukových podporách - max. normálová síla lano

Při sledování vlivu zakřivení obloukových podpor na max. normálovou sílu v laně je patrná lineární závislost. Se vzrůstajícím zakřivením podpory se úměrně snižuje normálová síla v laně. Dále je z průběhu patrný vliv způsobu přenosu vnějšího zatížení. Při uvažovaném zatížení sněhem, které je přenášeno mezi obloukovými podporami je výrazné snížení max. síly v laně. Naopak sání větrem se přenáší převážně mezi obvodovými lany a je patrný nárůst normálové síly.

Při uvažované tvarové variantě s dvojicí obloukových podpor nelze obecně definovat min. průhyb oblouku, který by vedl efektivnímu zakřivení obloukových podpor. Výrazně se zde projevuje vliv pevných podpor, které hrají významnou roli při přenosu vnějšího zatížení. Při průhybu obloukových podpor v rozmezí 20-25% z rozpětí nedochází k výraznějšímu snížení deformace, zároveň při uvažovaném průhybu dochází ke snížení max. napětí v laně na polovinu při zatížení sněhem. Dále při uvažovaném průhybu dochází ke snížení normálové síly v laně na polovinu při zatížení sání větrem.

MEMBRÁNA NA DVOU OBLOUKOVÝCH PODPORÁCH S PROMĚNNÝM PŮDORYSEM

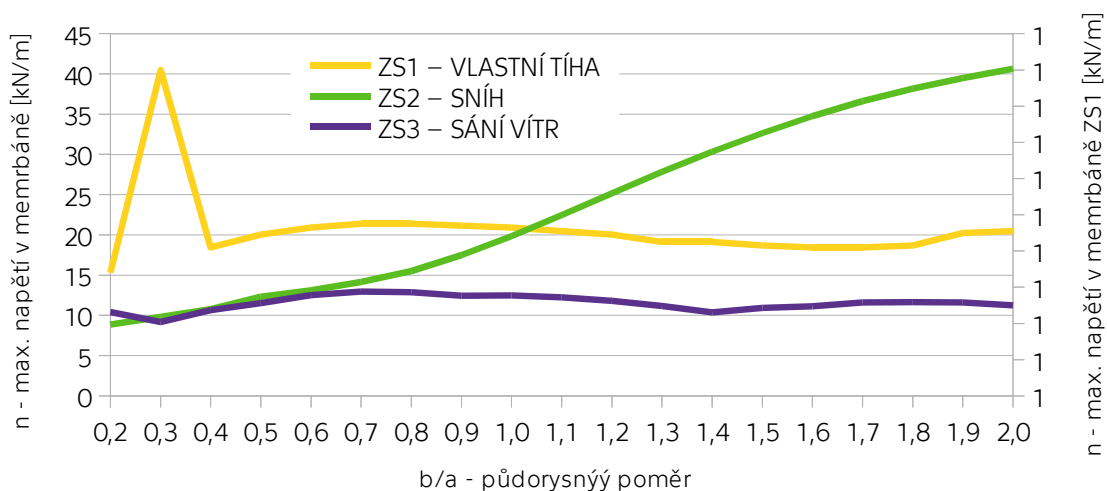
Při zachování průhybu obloukových podpor 25% z rozpětí je sledován vliv půdorysného tvaru na únosnost konstrukce. Při změně půdorysné plochy se adekvátně k tomu mění i zatížení plochy membrány. Při přiblížení obloukových podpor dochází k ploššímu tvarování membrány, při oddálení dochází k výraznějšímu zakřivení plochy. Od půdorysného poměru 1:1,3 dochází k přílišnému zakřivení membrány mezi oblouky a vytvoření rovné plochy ve střední části konstrukce.



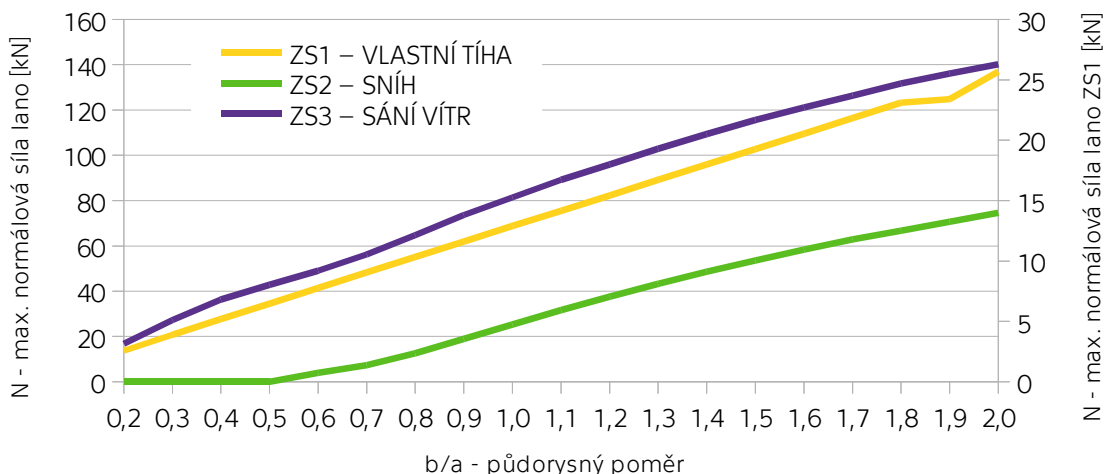
Obr. 50. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem - deformace

Vliv půdorysného poměru na deformaci plochy je uveden v grafu na obr. 48. Z grafu je patrný vliv nárůstu zatěžované plochy na výsledky statické analýzy. Dále se při změně půdorysného poměru projevuje způsob přenášení vnějšího zatížení. Při zatížení sněhem, které se přenáší mezi oblouky, dochází od půdorysného poměru 1:0,9 k nárůstu deformace. Naopak při uvažovaném zatížení sání větrem je patrný výraznější nárůst deformace od poměru 1:0,6.

Výsledky vlivu půdorysného poměru na maximální napětí v membráně je uveden v grafu na obr. 49. Z grafu je patrný vliv pevných podpor na přenos zatížení sněhem, kdy pevná podpora neumožňuje svou deformací snížení výsledného napětí. K nárůstu napětí dochází od půdorysném poměru 1:0,8, podobné chování jako při průběhu deformace. Při uvažovaném zatížení sání větrem je patrný téměř konstantní průběh max. napětí v membráně.



Obr. 51. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem - max. napětí membrány



Obr. 52. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem - max. normálová síla lano

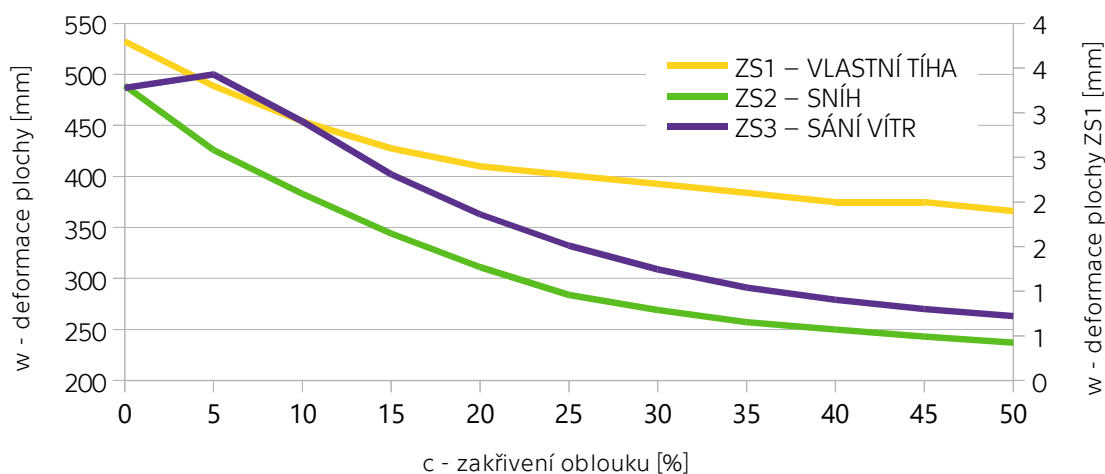
Z grafu na obr. 50 je patrný lineární průběh závislosti půdorysného poměru na normálovou sílu v laně. Rozdíl normálové síly v laně při zatížení sněhem a větrem je dán způsobem přenosu vnějšího zatížení.

Z pohledu půdorysného poměru lze konstatovat, že definovat optimální půdorysný poměr max. 1:0,8. Při vyšším poměru dochází k výraznějšímu nárůstu vnitřních sil.

MEMBRÁNA NA JEDNÉ CENTRICKÉ OBLOUKOVÉ PODPOŘE

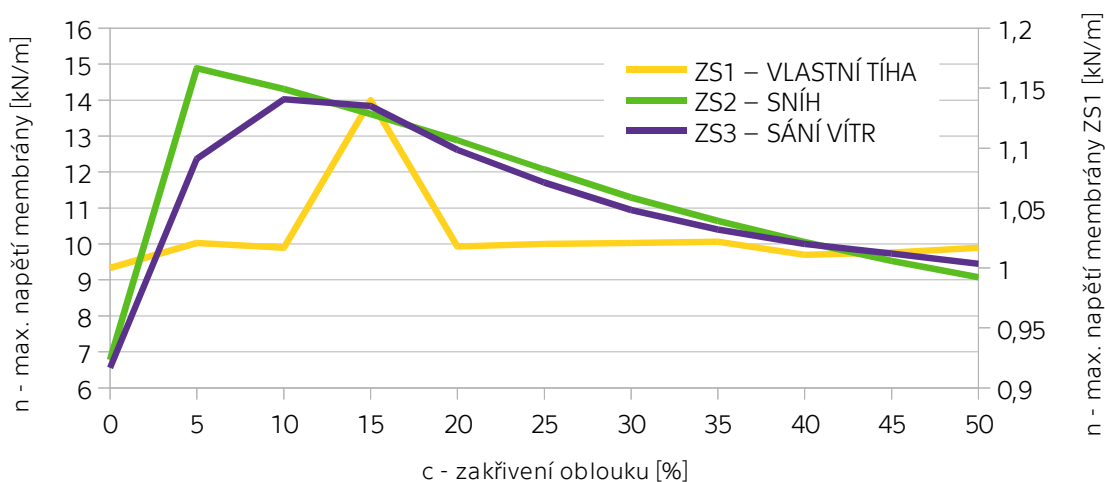
Tvarová varianta s jedním centrickým obloukem je variantou s jednostrannou obloukovou podporou s půdorysným poměrem 1:0,5, ostatní hranice jsou tvořeny obvodovými lany. V uvažované tvarové variantě se projevuje podepření pouze jednou obloukovou podporou. Z grafu na obr. 51 je patrná závislost zakřivení oblouku na deformaci plochy. Při zatížení sněhem od průhybu 25% z rozpětí oblouku již

nedochází k výraznějšímu nárůstu deformace. Při zatížení sání větrem je patrné snížení nárůstu deformace při průhybu větším jak 30%.



Obr. 53. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - deformace plochy

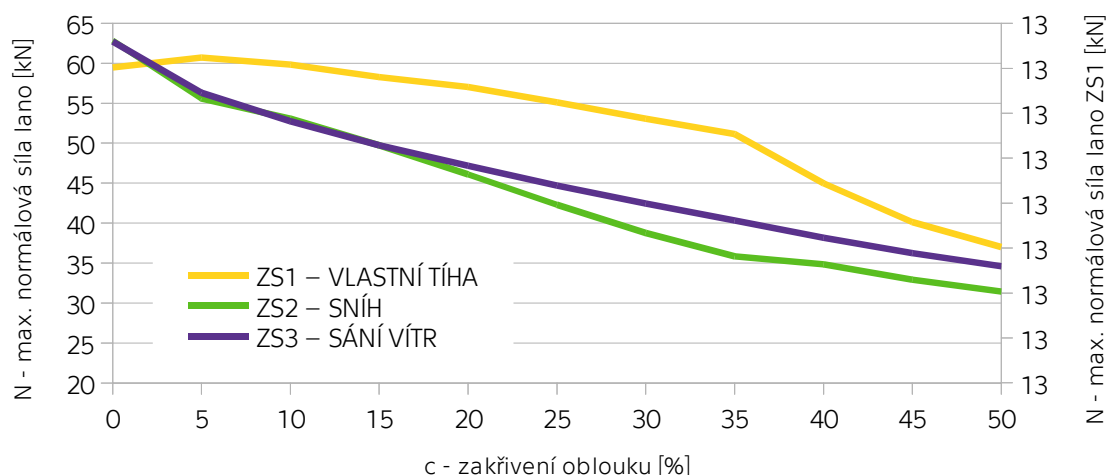
Vliv zakřivení obloukové podpory na max. napětí v membráně je zobrazeno v grafu na obr. 52. Z průběhu závislosti zakřivení oblouku na max. napětí v membráně je patrné postupné snižování napětí při navýšení oblouku nad 15%. Při průhybu oblouku 25-30% dosahuje max. napětí v membráně polovičních hodnot.



Obr. 54. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - max. napětí membrána

Vliv zakřivení oblouku na max. normálovou sílu v obvodovém laně je patrný z grafu na obr. 53. Se vzrůstajícím průhybem lana dochází k úměrnému úbytku normálové síly v laně, průběh závislosti je více lineární. Při průhybu v rozmezí 25-30% dochází ke snížení normálové síly v laně na polovinu.

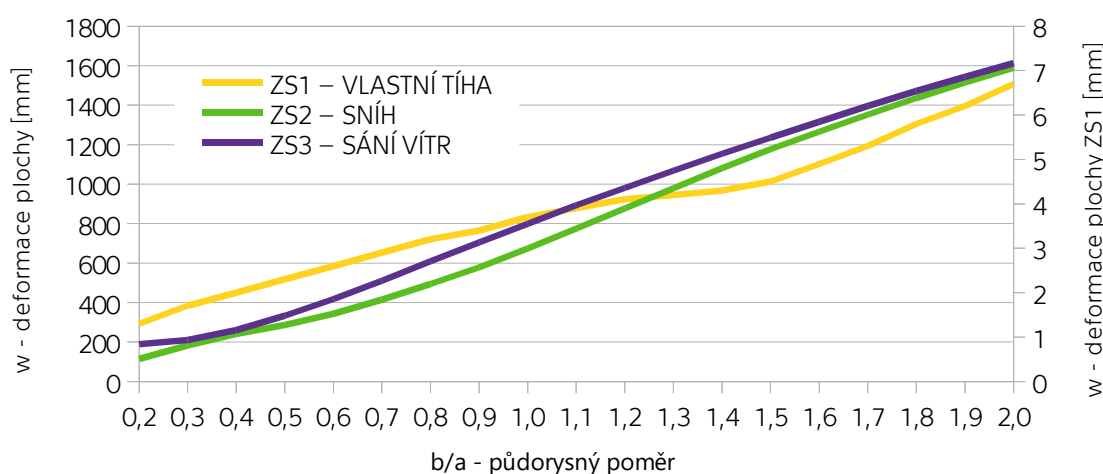
V případě membrány jednostranně podepřené obloukovou podporou je pro dosažení potřebného zakřivení povrchu a únosnosti konstrukce třeba provést obloukovou podporu s větším průhybem. V modelovém případě lze určit jako minimální průhyb obloukové podpory 25-30% z rozpětí.



Obr. 55. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - max. normálová síla lano

MEMBRÁNA S JEDNOU OBLOUKOVOU PODPOROU A PROMĚNNÝM PŮDORYSEM

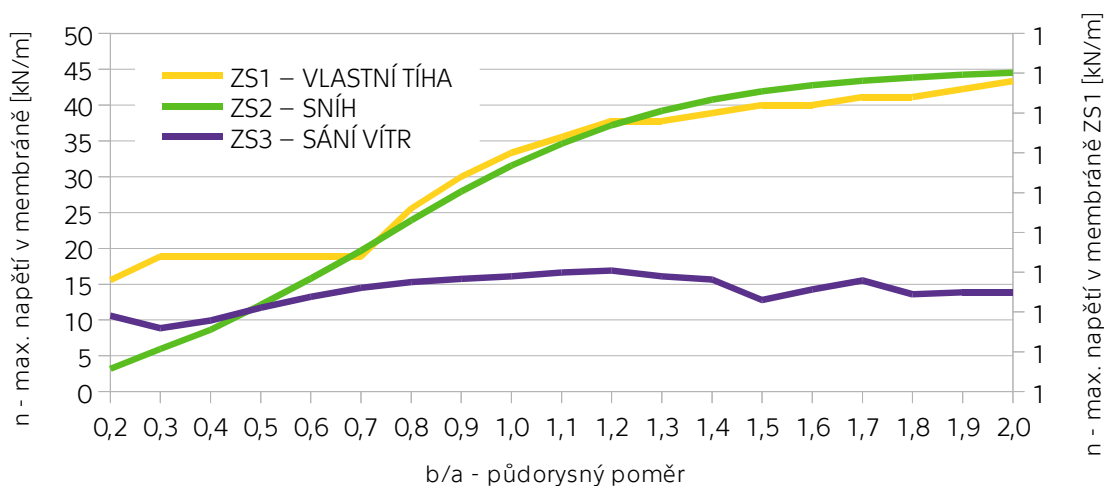
Uvažovaná tvarová varianta membrány s jednou obloukovou podporou a proměnným půdorysem se používá u membránových konstrukcí v krajních polohách podlouhlé dispozice. S proměnným půdorysem je spojená změna zatěžované plochy a výsledky jsou mírně zkresleny. Při půdorysném poměru větší jak 1:1,1 dochází ke vzniku výrazně ploché oblasti. Průběh závislosti půdorysného poměru na deformaci plochy je lineární, z průběhu nejsou patrné žádné výraznější odchylky.



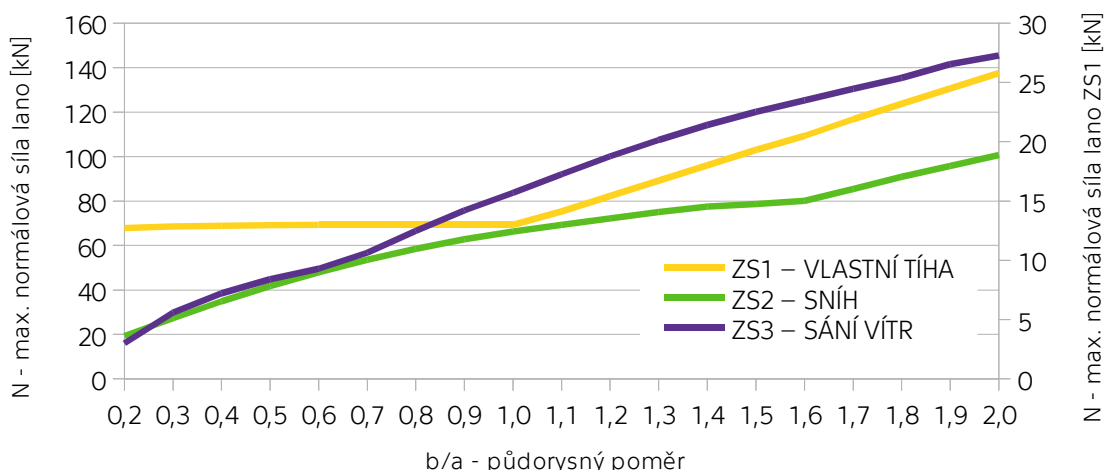
Obr. 56. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - deformace plochy

Z grafu na obr. 55 je patrná závislost půdorysného poměru na max. napětí v membráně, při zatížení sání větrem je patrný minimální vliv. Při zatížení sněhem je patrný průběh nárůstu napětí do půdorysného poměru 1:1,1.

Vliv půdorysného poměru na maximální normálovou sílu v laně je zobrazen v grafu na obr. 56, ze kterého je patrný výrazný nárůst síly při zatížení sání větrem od poměru větším jak 1:0,6. Při daném půdorysném poměru dosahuje síla v laně při zatížení sněhem 30% hodnot z maxima.



Obr. 57. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - max. napětí membrány



Obr. 58. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - max. normálová síla lano

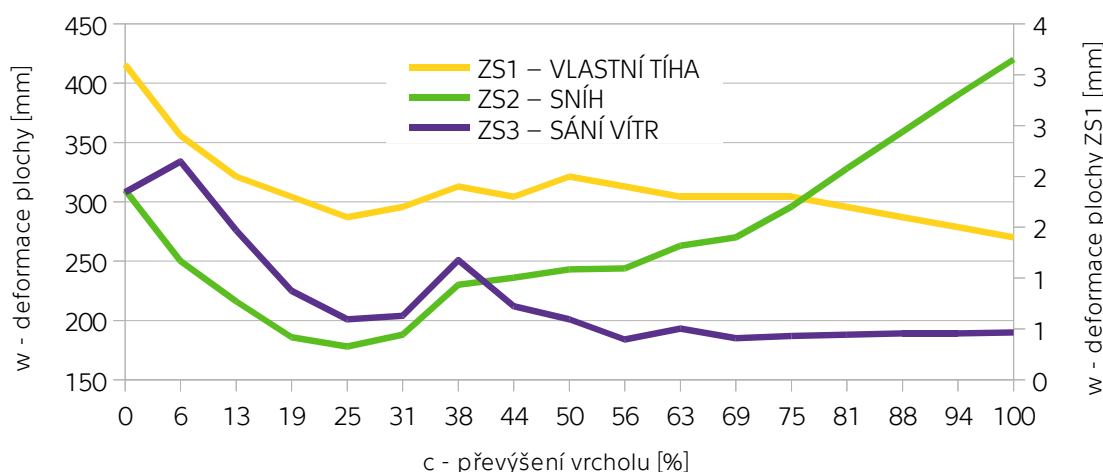
Pro membránu s jednostranně umístěnou obloukovou podporou se jeví jako optimální půdorysný poměr stran do hodnoty 1:0,6. Při půdorysném poměru více jak 1:1,1 dochází k tvorbě plochých oblastí v ploše membrány, které jsou náchylné na tvorbu prohlubní při vnějším zatížení.

4.3.3 KÓNICKÉ TVARY

Tvarování membrány kónického tvaru do dvojité zakřivených ploch je dosaženo převýšením nebo snížením okrajových prvků umístěných uvnitř uzavřeného obvodu tvořené obvodovými konstrukcemi. V praxi se jedná nejčastěji o tvary pagody a trychtýře. Nejčastějším vnitřním kotevním prvkem je kruhový prsteneček. Orientování osy a útku v ploše je tangenciálním směrem ke středovému podpůrnému prstenci. V příloze č. 11 a 12 jsou uvedeny výsledky statické analýzy pro jednotlivé uvažované tvarové varianty.

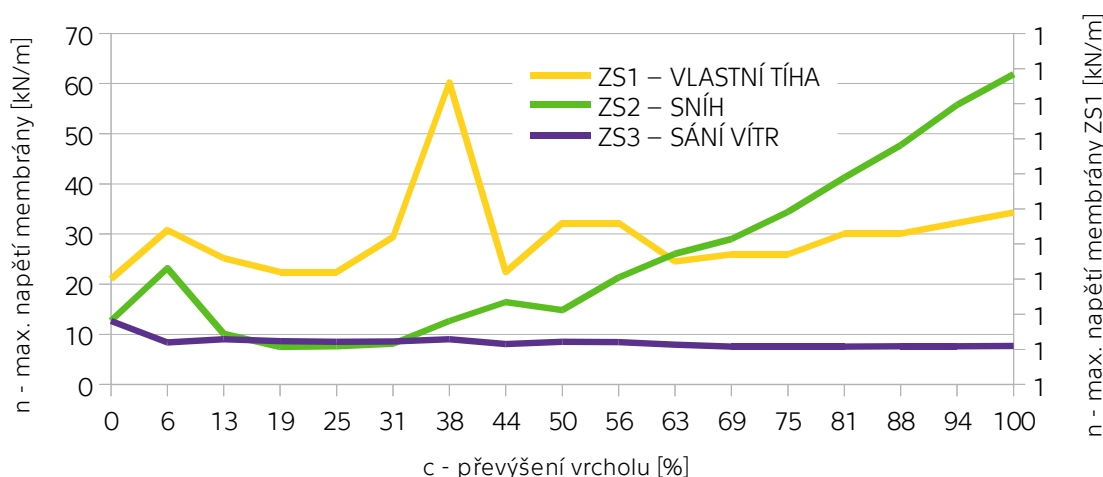
PAGODA SYMETRICKÁ S PROMĚNNOU VÝŠKOU STŘEDOVÉHO PRSTENCE

V uvažované tvarové variantě je patrná tvorba zúžení v místě středového prstence od převýšení vyšším jak 31%. Z pohledu sledované deformace plochy pod zatížením sněhem je patrné snížení deformace při převýšení středového prstence 16-19%. Při zatížení sání větrem je patrné snížení deformace při převýšení prstence v rozmezí 19-31%. Při větším převýšení vrcholu jak 31% z rozpětí dochází k nárůstu deformace



Obr. 59. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - deformace plochy

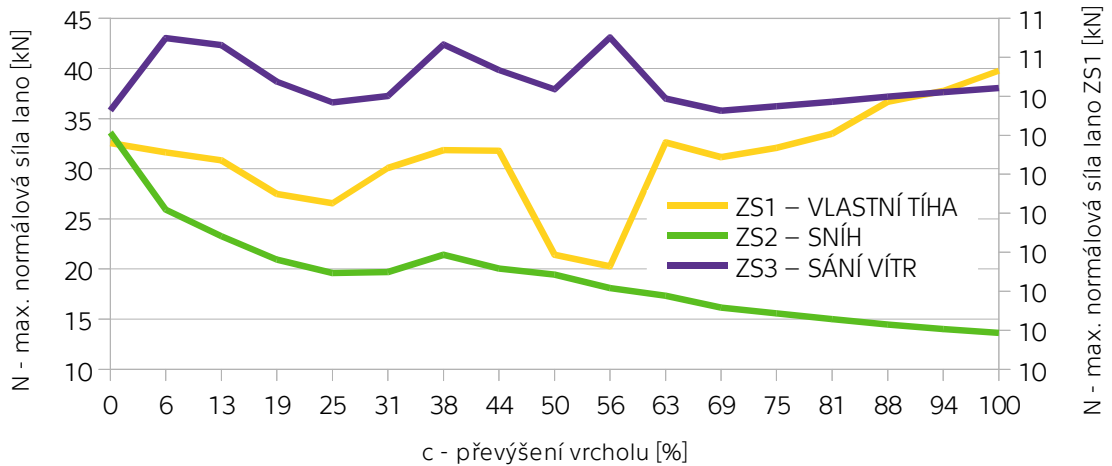
Při sledovaném max. napětí v membráně lze sledovat při zatížení sněhem úbytek napětí při převýšení vrcholu 13-31%. Pro případ zatížení sání větrem není patrný významný pokles napětí v membráně, důvodem je přenos zatížení v radiálním směru, která se pod zatížením deformuje a rovnoměrněji distribuuje napětí v ploše.



Obr. 60. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - max. napětí membrány

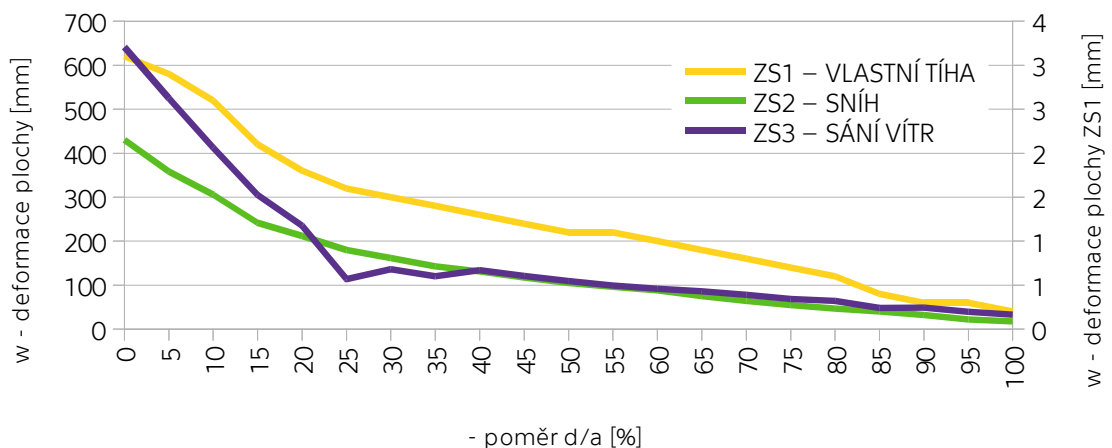
Z pohledu sledované max. normálové síly v laně je při zatížení sněhem patrné snižování normálové síly při převýšení vrcholu větším jak 19%. Při zatížení sání větrem normálová síla v laně nevykazuje výraznější nárůst nebo snížení síly v laně.

Pro uvažovanou tvarovou variantu symetrické pagody lze definovat optimální převýšení v rozmezí 19-31%, kdy dochází k omezení deformace a napětí v membráně bez ohledu na uvažované zatížení. Při větším převýšení vrcholu jak 31% z rozpětí dochází k tvorbě nežádoucího zúžení v oblasti středového prstence.



Obr. 61. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - max. normálová síla lano

PAGODA SYMETRICKÁ S PROMĚNNÝM PRŮMĚREM STŘEDOVÉHO PRSTENCE



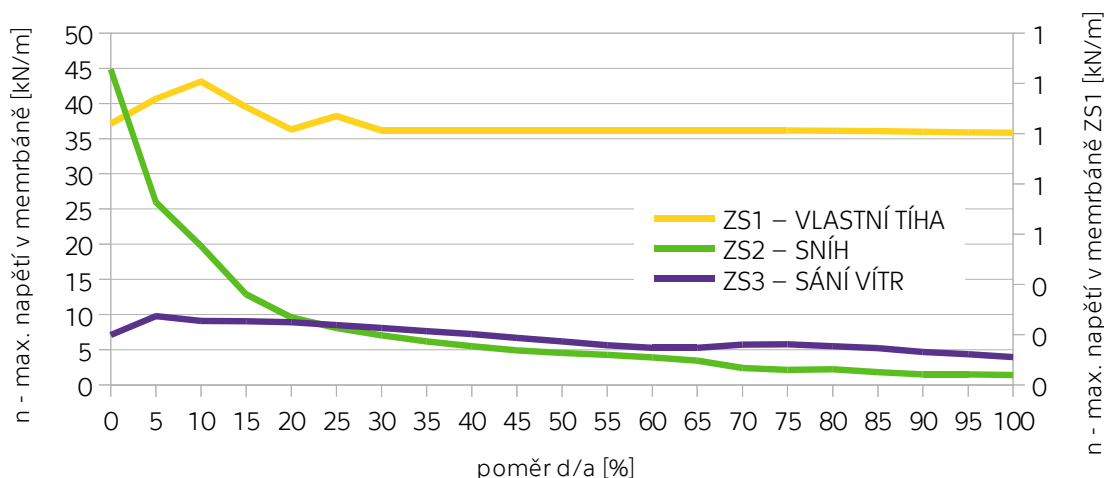
Obr. 62. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - deformace plochy

Analýza symetrické pagody s proměnným průměrem středového prstence sleduje změnu vnitřních sil membránové konstrukce při zachování stejné výšky středového prstence. Při změně průměru středového prstence dochází ke změně zatěžované plochy. Při poměru průměru prstence vůči rozpětí konstrukce nižším jak 15% dochází k tvorbě zúžení plochy membrány v místě středového prstence.

Z grafu na obr. 61 je patrný vliv změny průměru středového prstence na deformaci plochy. Pro zatížení sání větrem je patrné snížení deformace od hodnoty 25%. Při zatížení sněhem je úbytek deformace patrný od hodnot kolem 25-30%,

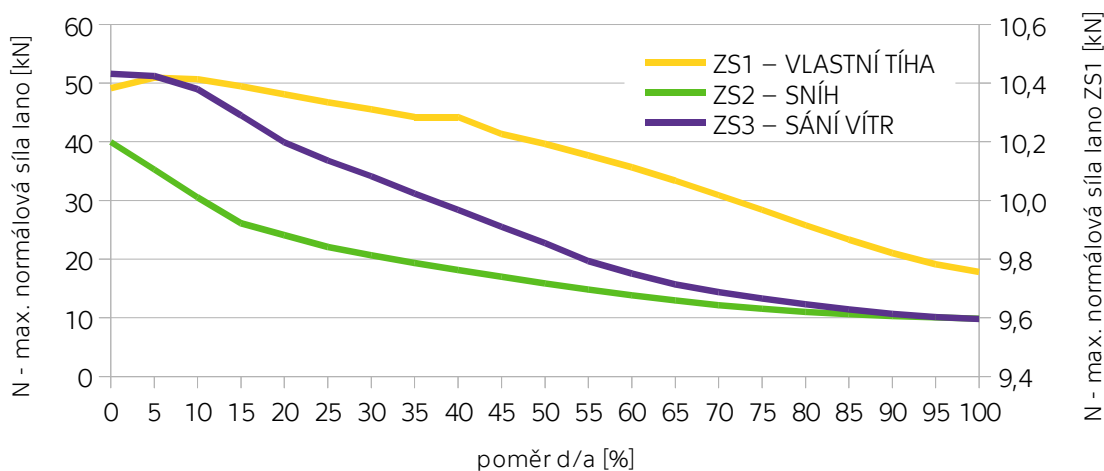
Při sledování vlivu průměru prstence na max. napětí v membráně je patrné snížení napětí v membráně vlivem zatížení sněhem od hodnot nad 20%. Vliv průměru

prstence na napětí v membráně při zatížení sání větrem je minimální, do jisté míry je to dáno způsobem přenosu zatížení, které se přenáší v radiálním směru.



Obr. 63. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - max. napětí membrány

Z pohledu max. normálové síly v laně se vliv průměru prstence projevuje minimálně. Při vzrůstajícím průměru prstence se snižuje zatěžovaná plocha pro zatížení sněhem. Při 15% hodnotě poměru průměru prstence z rozpětí je patrný mírný pokles průběhu normálové síly v laně. Vliv zatížení sání větrem na velikost prstence se projevuje minimálně, který je dán způsobem přenosu zatížení sání větrem v radiálním směru.



Obr. 64. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - max. normálová síla lano

Pro membránové konstrukce kónického tvaru ve variantě pagody lze z pohledu velikosti středového prstence konstatovat, že vstupním parametrem majícím hlavní vliv je zatížení sněhem. Vnější zatížení sněhem je přenášeno v tangenciálním směru od okrajového lana ke středovému prstenci. Ve tvarové variantě trychtýře je zatížení sněhem přenášeno v radiálním směru, zatížení sání větrem je poté přenášeno v tangenciálním směru. Při průměru středového prstence menším jak 25% dochází v případě izotropního předpětí ke tvorbě zúžení membrány v místě středového

prstence. Omezení tvorby zúžení lze dosáhnout použitím většího předpětí v tangenciálním směru. Optimální poměr průměru prstence z rozpětí vykazují analyzované tvarové varianty v hodnotách kolem 25-30%. Při větším průměru prstence je nutné počítat z potřebou vykrytí velké plochy středového prstence.

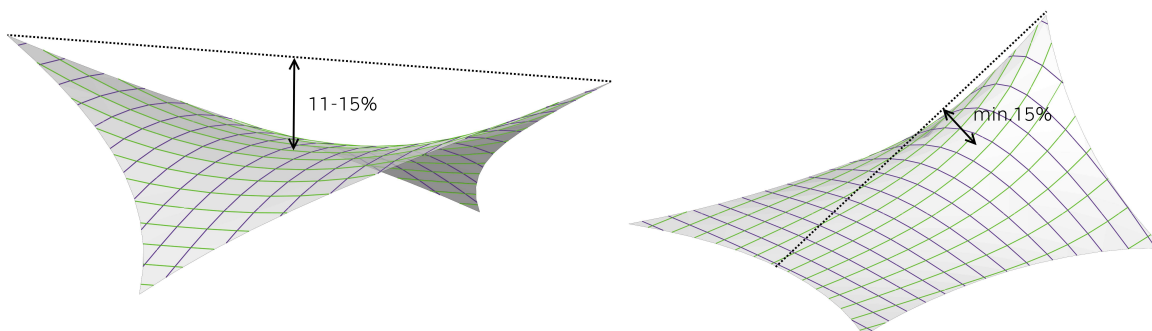
4.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Parametrickou studií základních typologických tvarů byly sledovány vnitřní síly membránových konstrukcí. Konstrukce byly zatíženy vnějším typickým zatížením sněhem a sání větrem. Pro jednotlivé tvarové varianty byly uvažovány shodné vstupní parametry. Na základě získaných dat z parametrické studie byla sestavena základní návrhová kritéria umožňující efektivní návrh membránových konstrukcí. Parametrická studie nemá za cíl sestavení statických kritérií, které by byly použity jako kritérium použitelnosti a únosnosti. Vždy je nutné při návrhu a zejména při posouzení membránových konstrukcí spolupracovat se specialisty. Výsledky návrhových limitů slouží pro potřeby architektů v koncepční fázi návrhu pomáhající nalezení základní geometrie membránové konstrukce vedoucí k efektivnímu a hospodárnému výsledku omezující v prvním návrhu potřebu spolupráce se specialisty.

Pro tvarování membránových konstrukcí ve fázi architektonického konceptu se využívají běžně dostupné modelovací metody, které nemají za cíl podrobnou statickou analýzu konstrukce. Slouží pro efektivní a rychlý návrh bez nutnosti znalosti detailů návrhu a posouzení jednovrstvých membránových konstrukcí. Tvarování a únosnost membránových konstrukcí je dána zakřivením povrchu. Jednotlivé použité metody pro tvarování ať jde o mýdlový film, fyzické modelování pomocí síťovaným materiálů nebo pro počítačové modelování, by měl architekt znát možnosti jednotlivých metod. V dnešní době se nejčastěji používají numerické výpočetní metody, které umožňují efektivní návrh s možností jednoduchého variování. Z porovnání výpočetních modelů je zřejmé, že programy resp. výpočetní modely, mají zásadní vliv na tvarování a následnou statickou analýzu, každý program se vyznačuje specifickými požadavky na zadávání vstupních parametrů. V případě výpočetních modelů sloužících pro potřeby statické analýzy mohou odchylky dosahovat 40%, převážně jde o lokální extrémy. Vliv použité výpočetní metody pro potřeby tvarování jednovrstvých membránových konstrukcí dosahují odchylky jednotlivých numerických hodnot cca 18%. Odchylky jsou dány zejména způsobem zadání vstupních parametrů a generování výpočetní sítě, která má pro některé výpočetní metody zásadní vliv na tvar výsledné geometrie. Z pohledu koncepčního návrhu a tvarování membránových konstrukcí vzájemné odchylky nejsou tak významné, proto nezáleží na použité výpočetní metodě. Při tvarování je nutné respektovat obecné návrhové charakteristiky a obecné návrhové limity jednotlivých typologických tvarů jednovrstvých membránových konstrukcí.

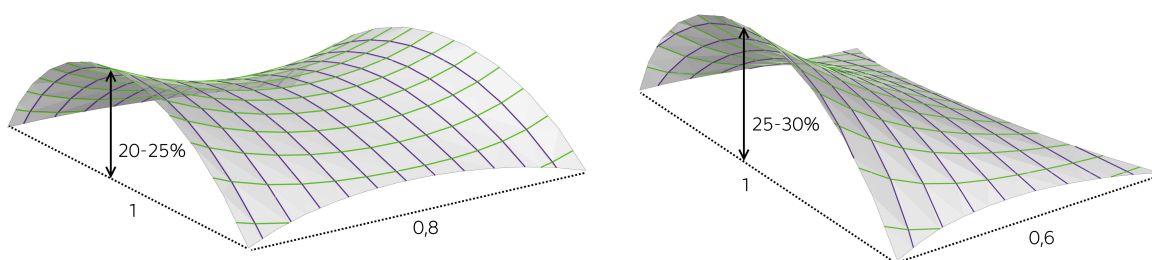
Bodově podepřená membrána a její schopnost přenášet vnější zatížení je dána vzájemným prostorovým uspořádáním kotevních bodů. Při návrhu je nutné brát zřetel na směr dominantního zatížení, podle kterého poté orientovat osnovu a útek, nejčastěji v našich klimatických podmínkách mezi horními vrcholy. Ze sledovaných tvarových variant bodově podepřené membrány lze vyjádřit minimální obecné

návrhové limity v rozmezí 11-15% průhybu plochy membrány z rozpětí. Geometrie bodově podepřené membrány vedoucí k efektivnímu návrhu je uvedena na obr. 64.



Obr. 65. Bodově podepřená membrána - optimální zakřivení plochy membrány

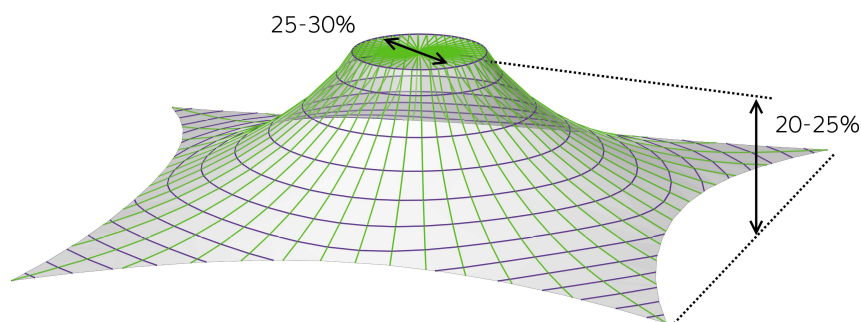
Membrána na obloukových podporách se tvaruje na základě zakřivení obloukových podpor, které jsou zásadní pro schopnost přenášet vnější zatížení. Při návrhu membránové konstrukce na obloukových podporách se dá obecně definovat pro případ více oblouků v řadě optimální průhyb podpory v rozmezí 20-25% z rozpětí. Optimálním půdorysným poměrem pro více oblouků v řadě je 1:0,8 pro jednotlivá membránová pole. Pro případ jednostranně obloukově podepřené membrány lze určit optimální průhyb podpory v rozmezí 25-30%. V tomto případě je vhodné volit půdorysný poměr maximálně 1:0,6. V případě potřeby navýšení půdorysného poměru je poté nutné navýšit průhyb obloukových podpor. Orientace osy a útku v případě membrány na obloukových podporách se nejčastěji směřuje v kolmém směru k obloukovým podporám. Tvarování pomocí obloukových podpor umožňuje zahrnout membránu jako stabilizační prvek nosné obloukové konstrukce a díky tomu dosáhnout hospodárnějšího návrhu podpůrné konstrukce.



Obr. 66. Membrána na obloukových podporách - optimální zakřivení plochy membrány

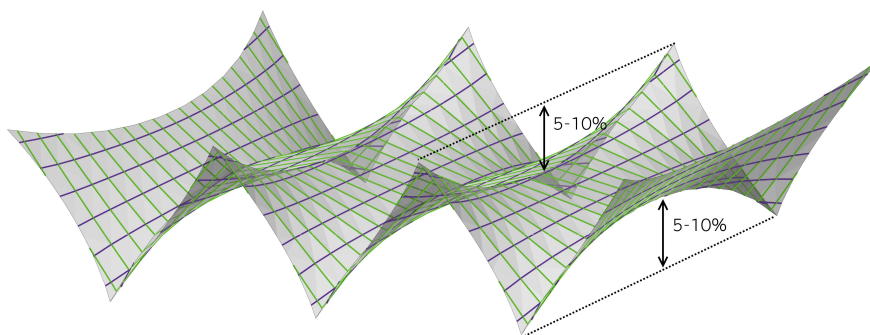
Při návrhu kónických membránových tvarů je důležité sledovat tvorbu zúžení v místě středového prstence. Zamezení tomu lze předejít navýšením předpětí membrány v tangenciálním směru, případně zvětšením průměru středového prstence. Při návrhu je nutné uvažovat s dominantním vnějším zatížením. Pro tvarovou variantu trychtýře je nutné uvažovat s hromaděním sněhu v konstrukci. Optimální převýšení středového prstence vedoucí k efektivnímu návrhu lze dosáhnout v rozmezí hodnot 20-30% z rozpětí. Při hodnotách větších jak 30% je nutné počítat s tvorbou zúžení a navyšovat průměr prstence nebo zvýšit předpětí membrány v tangenciálním směru. Velikost středového prstence z pohledu optimálního poměru průměru prstence k rozpětí konstrukce se projevuje od hodnot 25-30%. Při menším

průměru jak 25% dochází k tvorbě zúžení v místě středového prstence. Poté je nutné volit větší předpětí membrány v tangenciálním směru.



Obr. 67. Membrána kónického tvaru - optimální zakřivení plochy membrány

Membrány tvaru lomenice jsou tvarovány na základě prohnutí souběžně umístěné řady lan. Membrána v tomto případě tvoří spíše výplňovou funkci než statickou. Proto hlavním návrhovým kritériem je prohnutí nosných lan. Normálová síla v laně je závislá na průhybu lana. Z pohledu tvarování lze doporučit volit průhyby lana v rozmezí 5-20%, optimálně však 10%. Při průhybu lana větším jak 20% již nedochází k dalšímu snížení normálové síly lana. Naopak při průhybu lana menším 5% z rozpětí dochází k exponenciálnímu nárůstu normálové síly v laně. Orientace osnovy a útku se v tomto případě volí kolmo k nosným lanům. Tvar lomenice se nejvíce uplatňuje u pohyblivých konstrukcí, kde lana umožňují vytvořit lehkou a poddajnou nosnou konstrukci.



Obr. 68. Membrána tvaru lomenice - optimální zakřivení plochy membrány

5 ZÁVĚR

Jednovrstvé membránové konstrukce se dnes užívají po celém světě v široké škále aplikací od zastřešení sportovních stadiónů až po drobná zastřešení teras obytných domů. Tvarově aktivní jednovrstvé membránové konstrukce se vyznačují větší mírou dynamiky tvarů od konvenčních konstrukčních systémů. Dvojitě zakřivení membránových konstrukcí umožňuje stavbě dosáhnout hospodárného řešení. Současný trend v jednovrstvých membránových konstrukcích vede někdy k návrhu méně zakřivených forem, které v důsledku mohou vést k neefektivnímu a neekonomickému konstrukčnímu řešení. Méně zakřivené jednovrstvé membránové konstrukce jsou citlivé i na drobné odchylky v konstrukčním řešení a použitém materiálu.

Problematika tvarování a návrhu jednovrstvých membránových konstrukcí je spojena s nedostatkem návrhových kódů a předpisů. Metodika návrhu a posouzení jednovrstvých membránových konstrukcí se opírá o zkušenosti z realizovaných staveb, výsledků výzkumu a intuice specialistů/ projektantů/ architektů. Při návrhu membránových konstrukcí je nutné kromě architekta také spolupracovat se specialistou, který je schopen na základě předběžného statického posouzení definovat optimální parametry konstrukce. Tento přístup je na první pohled značně neefektivní a může u některých architektů vést ke skeptickému pohledu na membránové konstrukce a jejímu častějšímu využití.

Široká škála návrhových nástrojů umožňující tvarování jednovrstvých membránových konstrukcí, které jsou přímo určeny pro architekty, umožňuje jednoduché a intuitivní generování geometrie plochy. Právě lehkost a svoboda při tvarovém návrhu membránových konstrukcí je důležitá z pohledu kreativity architekta. Znalost obecných návrhových předpokladů a návrhových limitů mu umožňuje architektovi tvarování bez nutnosti spolupráce se specialisty, a takto navržené konstrukce ve výsledku vedou k hospodárnému a efektivnímu konstrukčnímu řešení. Hledisko efektivity membránových konstrukcí není spojeno jen s použitím lehčího materiálu, ale zejména s omezením podporových sil a s tím spojené řešení detailů napojení na podpůrnou konstrukci, které jsou v souladu s tektonickou lehkostí membránových konstrukcí.

Cílem disertační práce byla analýza základních typologických forem jednovrstvých membránových konstrukcí s rozdílnými vstupními parametry a ambice definovat základní pravidla pro tvarování hospodárných a efektivních konstrukcí. Všeobecně lze konstatovat, že výrazně zakřivené tvary jsou únosnější a vykazují nižší deformace a vnitřní síly v membránové konstrukci. Méně zakřivené tvary vykazují větší míru deformace plochy a vnitřních sil, které podobně jako u průhybu obvodových lan nelineárně rostou s menším zakřivením plochy.

Výsledky bodově podepřených membránových konstrukcí nelze s ohledem na tvarovou variabilitu jasně definovat. Bodově podepřené membrány jsou náchylné na vzájemné prostorové uspořádání podpor a na orientaci osnovy/ útku. Při tvarování je

nutné brát i ohled na tvorbu plochých částí, které by mohly vést k tvorbě prohlubní a hromadění vody.

Pro membrány na obloukových podporách je patrný vliv tuhých podpor v okraji membrány, které omezují deformace ve směru mezi podporami. Z pohledu efektivního návrhu membrány na obloukových podporách je důležité sledovat vzepětí oblouku a vzájemný půdorysný poměr jednotlivých membránových polí.

Pro membrány kónického tvaru je charakteristické, že přenos vnějšího zatížení je orientován mezi středový prstenec a obvodovou konstrukcí. Kónické tvary jsou náchylné na tvorbu zúžení ve středové části při výrazném převýšení středového prstence. Kónické formy jsou náchylné na tvorbu plochých částí v rohových partiích konstrukce.

Membrány tvaru lomenice a jejich geometrie je dána průhybem nosných lan. Efektivita celé konstrukce je poté dána právě průhybem nosných lan, membránový materiál se v tomto případě uplatňuje jako výplňový materiál bez výraznějšího statického působení.

V práci byl použit zjednodušený materiálový model. V současné době jsou již známy podrobnější materiálové charakteristiky, zejména stříhový modul, díky kterému lze dosáhnout méně zakřivených forem bez omezení únosnosti konstrukce. Dále byly v práci uvažovány základní typologické formy v několika tvarových variantách pro sestavení a ověření návrhových limitů. Tyto návrhové limity nelze brát jako všeobecně platné a je vždy nutné brát ohled na jednotlivá tvarová řešení. Uvedené návrhové limity nenahrazují statickou analýzu konstrukce, dávají však obecný obraz o chování membránových konstrukcí.

Další výzkum by se proto měl zaměřit na prohloubení znalostí o navrhování jednovrstvých membránových konstrukcí, zejména na vztah membránovými materiály a únosností pomocné konstrukce. Měl by také prověřit návrhové limity složitých tvarových forem membránových ploch a porovnat je s uvedenými návrhovými limity této disertační práce.

SEZNAM LITERATURY

1. OTTO, Frei a Ludwig GLAESER. *The work of Frei Otto*. New York: Museum of Modern Art, 1972. ISBN 0-87070-333-1.
2. MACK, John a Torvald FAEGRE. Tents: Architecture of the Nomads. *The Geographical Journal* [online]. 1980, 146(3) [cit. 2018-11-12]. ISSN 00167398. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/634957?origin=crossref>
3. KOPŘIVA, Miloš a České vysoké učení technické v Praze. *Mobilita, víceúčelovost, proměnnost ve sportovních stavbách*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001047811;8001047814;.
4. ENGLISH, Elizabeth Cooper. "Arkitektura i mnimosti": *The origins of Soviet avant-garde rationalist architecture in the Russian mystical -philosophical and mathematical intellectual tradition*. Pennsylvania: University of Pennsylvania, 2000. Dizertační práce. ProQuest.AAI9989589. Dostupné z: <https://repository.upenn.edu/dissertations/AAI9989589>
5. *Millennium Dome*. [online]. Artifice, Inc.. Dostupné z: http://www.greatbuildings.com/buildings/Millennium_Dome.html
6. OTTO, Frei. *IL 6 Information of the Institute for Lightweight Structures*. Germany: Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1973. ISBN 3-7828-2006-1.
7. KLENK, Frieder. *IL 24 Information of the Institute for Lightweight Structures*. Germany: Institut für leichte Flächentragwerke, 1997. ISBN 3-7828-2024-X.
8. KNIPPERS, J., CREMERS, J., GABLER, M., LIENHARD, J.. *Construction Manual for Polymers + Membranes: Materials and Semi-finisher Products, Form Finding and Construction*. Basel: Birkhauser Architecture, 2012. ISBN 978-3-0346-0726-1
9. FORSTER, B., MOLLAERT, M.. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Brussel: Tensinet, 2004. ISBN 90 8086 871 X
10. DREW, Philip. *New tent architecture*. London: Thames & Hudson, 2008. ISBN 978-0-500-34243-5
11. technet GmbH. EASY – THE COMPLETE SYSTEM. *technet-gmbh.com* [online]. 2008. [cit. 2018-09-20]. Dostupné z: <https://www.technet-gmbh.com/en/products/easy/>
12. Formfinder Software GmbH. *Formfinder* [software]. [přístup 15. ledna 2018]. Dostupné z: <http://www.formfinder.at>
13. NDN software Ltd. *Membrane NDN Software* [software]. [přístup 10. ledna 2018]. Dostupné z: <http://www.ndnsoftware.com>
14. BLETZINGER, K.-U., RAMM, E.. A General Finite Element Approach to the form Finding of Tensile Structures by the Updated Reference Strategy. *International*

- Journal of Space Structures* 1999, 14(2), 131-145. Dostupné z: <https://doi.org/10.1260/0266351991494759>
15. X-RAY Ltd..*ixCube 4-10* [software]. [přístup 18. ledna 2018]. Dostupné z: <http://www.ixray-ltd.com/index.php>
 16. X-RAY Ltd..*RhinoMembrane* [software]. [přístup 18. ledna 2018]. Dostupné z: <http://www.ixray-ltd.com/index.php>
 17. Dlubal Software s.r.o..*RFEM 5.13* [software]. [přístup 10. ledna 2018]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs>
 18. structure GmbH. *Kiwi3D* [software]. [přístup 30. května 2018]. Dostupné z: <https://www.kiwi3d.com/>
 19. STRANGHÖNER, N., UHLEMANN, J., a spol.. *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Office of the European Union, 2016. ISBN 978-92-79-54702-7
 20. ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Český normalizační institut, 2004. 40 s. Třídící znak 730035
 21. ČSN EN 1991-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 48 s. Třídící znak 730035
 22. ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 119 s. Třídící znak 730035
 23. LIENHARD, Julian a AHLQUIST, Sean a KNIPPERS, Jan a MENGES, Achim. Extending the functional and formal vocabulary of tensile membrane structures through the interaction with bending-active elements. In: *[RE]THINKING Lightweight Structures, Proceedings of Tensinet Symposium 2013*. Istanbul: Tensinet Symposium, 2013, s. 109-118. ISBN 978-9-072325068
 24. SIEDEL, Michael. *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. Berlin: Ernst & Sohn, 2009. ISBN 978-3-433-02922-0
 25. RELI, Paolo a John CHILTON. Advantages of lightweight tensioned coated fabrics and foils facades for the building sector. In *Structural Membranes 2013- VI. International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*. K. - U BLETZINGER; B. KRÖPLIN and E. OÑATE. Munich. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2013, s. 200-211. ISBN 978-84-941686-0-4.
 26. AUGUSTYNIAK, M. J.. *Tensotherm Insulated tension membrane* [online]. Birdair, Inc., 2011 [cit. 8.6.2018]. Dostupné z: <http://www.birdair.com/resources/tensotherm.aspx>

27. CARL STAHL ARC GmbH. *X-TEND STAINLESS STEEL CABLE MESH* [online]. Carl Stahl ARC GmbH, 2016 [cit. 3.2.2018]. Dostupné z: http://www.carlstahl-architektura.cz/downloads/X-TEND_09_2016.pdf
28. RIVERA, Romualdo. *Membrane Structures, First Steps towards Form Finding*. San Juan: Tensile Structures Education, 2014. ISBN 978-0-9863247-1-0
29. LLORENS, J. I. *Fabric structures in Architecture*. 1st Edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. ISBN 9781782422334
30. BRIDGENS, B., BIRCHALL, M.. Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures, In: *Engineering Structures, Volume 44*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2012, s. 1-12. ISSN 0141-0296. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.044>.
31. GOSLING, P. D., BRIDGENS, B. N.. Material Testing & Computational Mechanics — A New Philosophy for Architectural Fabrics. In: *International Journal of Space Structures 2008*, 23(4), 215–232. Dostupné z: <https://doi.org/10.1260/026635108786959870>
32. JACKSON, A.L., BRIDGENS, B.N., GOSLING P.D.. A new biaxial and shear protocol for architectural fabrics. In: *Domingo A, Lazaro C, editors. IASS symposium 2009: evolution and trends in design, analysis and construction of shell and spatial structures*. Valencia: 2009. s. 2167–79.
33. MICHALSKI, A., KERMEI, P.D., HAUG E., LOEHNER R., WUECHNER R., BLETZINGER, KU.. Validation of the computational fluid-structure interaction simulation at realscale tests of a flexible 29 m umbrella in natural wind flow. In: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. Volume 99, Issue 4, 2011. s. 400-413. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.010>
34. MICHALSKI, A., HAUG, E., WUECHNER, R., BLETZINGER, K.U.. Validation of a virtual design methodology for the structural analysis of membrane structures subjected to wind. In: *Bauingenieur*. 2011. s. 129–41.
35. LAZZARI, M., MAJOWIECKI, M., VITALIANI, R.V., SAETTA, A.V.. Nonlinear FE analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions. In: *Engineering Structures*. Volume 31, Issue 1, 2009. s. 16–31. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.07.010>
36. <http://www.oldtokyo.com/1964-summer-olympic-venues/>
37. <https://www.architectmagazine.com/project-gallery/1972-munich-olympic-stadium-6716>
38. http://www.greatbuildings.com/buildings/Millennium_Dome.html
39. <https://seele.com/references/birds-nest-olympic-stadium/>
40. <https://seele.com/references/olympic-stadium/>

41. https://www.researchgate.net/publication/265646877_Adoption_of_a_reliability_approach_for_membrane_structure_analysis
42. <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=7799>
43. <http://c-and-a.co.jp/projects/other/moom.html>
44. http://www.tensoshade.com/images/material_serge.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1. Stanový přístřešek nomádských kmenů [2].....	8
Obr. 2. Mobilní zastřešení hlediště Kolosea [3]	8
Obr. 3. Výstavní pavilon v Nižnijm Novgorodě [4]	9
Obr. 4. Olympijský stadion, Tokyo, 1964 [36]	9
Obr. 5. Olympijský stadion Mnichov 1972 [37]	10
Obr. 6. Millenium Dome, Londýn [38]	11
Obr. 7. Detail zastřešení Národní stadion Peking 2008 [39]	11
Obr. 8. Zastřešení Olympijský stadion Londýn 2012 [40]	12
Obr. 9. Schéma návrhu membránových konstrukcí	13
Obr. 10. Bodově podepřená membrána	16
Obr. 11. Membrána na obloukových podporách	16
Obr. 12. Kónické tvary - pagoda a trychtýř	17
Obr. 13. Membrána tvaru lomenice	17
Obr. 14. Mýdlový model bodově podepřené membrány [41]	18
Obr. 15. Síťovaný model membránové konstrukce [9]	18
Obr. 16. Schéma průběhu sil na obvodovém laně	24
Obr. 17. Graf průběh normálové síly v laně	25
Obr. 18. Experimentální model ohybově aktivní konstrukce Hybrid M1[42]	26
Obr. 19, Experimentální prostor MOOM [43]	26
Obr. 20. Schéma potažené textilie [44]	27
Obr. 21. Analyzovaná geometrie pro sestavení návrhových limitů	35
Obr. 22. Mechanické vlastnosti uvažované tkaniny	36
Obr. 23. Mechanické vlastnosti uvažovaného obvodového lana	37
Obr. 24. Analyzované kombinace zatížení	38
Obr. 25. Bodově podepřená membrána – sedlo	39
Obr. 26. Kónický tvar membrány	39
Obr. 27. Membrána na obloukových podporách	40
Obr. 28. Bodově podepřená membrána – výsledky porovnání procesu tvarování	40
Obr. 29. Membrána kónického tvaru - výsledky porovnání procesu tvarování	41
Obr. 30. Membrána na obloukových podporách - výsledky porovnání procesu tvarování	42
Obr. 31. Bodově podepřená membrána - výsledky porovnání statické analýzy	42
Obr. 32. Membrána kónického tvaru - výsledky porovnání statické analýzy	43
Obr. 33. Membrána na obloukových podporách - výsledky porovnání statické analýzy	44
Obr. 34. Sledované parametry statické analýzy	45

Obr. 35. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku - deformace plochy	46
Obr. 36. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku - max. napětí membrány	46
Obr. 37. Hypar symetrický diagonální orientace osnovy/ útku – max. normálová síla lano	47
Obr. 38. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - deformace plochy	47
Obr. 39. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - max. napětí membrány	48
Obr. 40. Hypar symetrický ortogonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano	48
Obr. 41. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku – deformace	49
Obr. 42. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku – max. napětí membrány	49
Obr. 43. Hypar asymetrický diagonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano.....	50
Obr. 44. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy/ útku – deformace	50
Obr. 45. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy a útku - max. napětí membrány	51
Obr. 46. 5-ti bodová membrána, ortogonální orientace osnovy/ útku - max. normálová síla lano.....	51
Obr. 47. Membrána na dvou obloukových podporách - deformace plochy	52
Obr. 48. Membrána na dvou obloukových podporách - max. napětí membrána	53
Obr. 49. Membrána na dvou obloukových podporách - max. normálová síla lano	53
Obr. 50. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem – deformace	54
Obr. 51. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem - max. napětí membrány	55
Obr. 52. Membrána na dvou obloukových podporách s proměnným půdorysem - max. normálová síla lano	55
Obr. 53. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - deformace plochy	56
Obr. 54. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - max. napětí membrána	56
Obr. 55. Membrána na jedné centrické obloukové podpoře - max. normálová síla lano	57
Obr. 56. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - deformace plochy	57
Obr. 57. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - max. napětí membrány	58
Obr. 58. Membrána na jedné obloukové podpoře s proměnným půdorysem - max. normálová síla lano	58
Obr. 59. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - deformace plochy	59
Obr. 60. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - max. napětí membrány	59
Obr. 61. Pagoda symetrická s proměnou výškou středového prstence - max. normálová síla lano	60
Obr. 62. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - deformace plochy	60

Obr. 63. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - max. napětí membrány	61
Obr. 64. Pagoda symetrická s proměnným průměrem středového prstence - max. normálová síla lano	61
Obr. 65. Bodově podepřená membrána - optimální zakřivení plochy membrány	63
Obr. 66. Membrána na obloukových podporách - optimální zakřivení plochy membrány	63
Obr. 67. Membrána kónického tvaru - optimální zakřivení plochy membrány	64
Obr. 68. Membrána tvaru lomenice - optimální zakřivení plochy membrány	64

PŘÍLOHY

Příloha č.1 Vlastnosti tkanin [8]

	PES tkanina/PVC povlak	PES tkanina/THV povlak	SKLO tkanina/PTEF potáh	SKLO tkanina/SILIKON	potážená PTFE tkanina	nepotážená PTFE tkanina
typické použití, zvláštní vlastnosti	rozdílné použití, velmi levný standardní materiál	vysoká kvalita povrchu, velká propustnost světla	určeno pro itvalé stavby, vysoce kvalitní standardní materiál	pro itvalé konstrukce, velmi vysoká propustnost světla	pro itvalé a pohyblivé konstrukce, velmi vysoká světelná propustnost	pro itvalé a pohyblivé konstrukce, velmi vysoká světelná propustnost, nízká voděodolnost
metody spojování	vysokofrekvenční svařování, impulzní svařování	vysokofrekvenční svařování, impulzní svařování	impulzní svařování s vloženou fólií	vulkanizace povrchu a lepení, sešitá s podlepením	impulzní svařování s vloženou fólií	sešití
délkohodobá stabilita	dobrá UV stabilita při použití dostatečně silném povlaku, dobrá chemická odolnost	data nejsou k dispozici	velmi dobrá UV stabilita, velmi dobrá chemická stabilita	dobrá UV stabilita, dobrá chemická odolnost	velmi dobrá UV stabilita, velmi dobrá chemická stabilita	velmi dobrá UV stabilita, velmi dobrá chemická stabilita
citlivost proti ohybovému popraskání	vysoká odolnost, možné využít pro rozkládací konstrukce	odolný proti popraskání, možné využít pro rozkládací konstrukce	vysoce citlivý na tvorbu tlhlin ohybáním, nepoužitelný pro rozkládací konstrukce	nízká citlivost proti ohybovému popraskání	vysoce citlivý na tvorbu tlhlin ohybáním, nepoužitelný pro rozkládací konstrukce	vysoce citlivý na tvorbu tlhlin ohybáním, nepoužitelný pro rozkládací konstrukce
citlivost na zašpinění	citlivý na zašpinění, lepší vlastnosti při použití krycího náletu	dobrá odolnost proti zašpinění	velmi dobrá odolnost proti zašpinění, samočistící efekt	citlivý na zašpinění	dobrá odolnost proti zašpinění	dobrá odolnost proti zašpinění
propustnost světla reakce na oheň dle DIN 4102	5 – 15% B1	1,5 – 2,3% B1	8 – 20% A (typ I a II) B1 (typ III a IV)	2,5 – 30% B1	20 – 40% B1	35,00% B1
standardní barvy	bílá, ostatní možné	bílá	bílá, omezený výběr ostatních barev	bílá a stříbrná, ostatní možné	bílá	možnost výběru z několika probavených vláken
plošná hmotnost [g/m²]	Typ I: 750 II: 900 III: 1100 IV: 1300 V: 1450	Typ I: 1150 II: 1200	Typ I: 800 II: 900 III: 1200 IV: 1500	Typ I: 200 II: 340 III: 685 IV: 1100	Typ I: 1080	320 530
pevnost v tahu esnova/únek [N/50mm]	Typ I: 3000/3000 II: 4200/4000 III: 5800/5400 IV: 7500/6500 V: 10000/9000	Typ I: 3500/3000 II: 5000/4500	Typ I: 3500/3500 II: 5000/4500 III: 7000/6000 IV: 8000/7000	Typ I: 2500/1750 II: 3000/3000 III: 5000/5000 IV: 8000/8000	Typ I: 4000/4000	2000/2050 4000/3700
životnost	15 – 20	data nejsou k dispozici	> 25	> 20	> 20	> 30
náklady v porovnání se skelnou tkaninou/PTFE povlak	15 – 45 %	60 – 140%	50 – 150 %	110 – 180 %	100 – 140 %	120 – 170 %
propustnost světla [%]	> 90	80 – 93	80 – 90	> 90	> 90	> 90
dostupné varianty	průhledá, bílá, různé barvy, možnost potisku	průhledná	průhledná, bílá	standardně bílá, možnost ostatních barev	standardně bílá, možnost ostatních barev	standardně bílá, možnost ostatních barev

PŘÍLOHA č.2 Vlastnosti fólií [8]

	ETFE folie	THV folie	PE folie	PVC-P folie
polymer	kopolymer ethylen-tetrafluor ethylenu	terpolymer tetrafluoroethylenu hexafluoropropylenu vinyliden fluoridu	polyethylen	polyvinyl chlorid
typické použití	architektura	architektura	skleníky	interiér
hustota [g/cm³]	1,75	1,98	0,95	1,16-1,35
tloušťka [μm]	12 – 300	150 – 500	180 – 200	70 – 220
pevnost v tahu [N/mm²]	40	> 24	cca 24	10 – 25
prodlouže při přetžení [%]	> 300	> 500	> 400	170 – 400
odolnost proti přetžení [N/mm]	> 300	> 100	data nejsou k dispozici	data nejsou k dispozici
modul pružnosti [N/mm²]	800 – 1000 N	> 50	data nejsou k dispozici	data nejsou k dispozici
dlouhodobá stabilita	velmi dobrá UV odolnost	velmi dobrá UV odolnost	špatná UV odolnost, cca 4-5 let po modifikaci	špatná UV odolnost
bod tání [°C]	260 – 270	115 – 125	data nejsou k dispozici	data nejsou k dispozici
reakce na oheň	nesnadno hořlavý	nesnadno hořlavý	vysoce hořlavý	nesnadno hořlavý
citlivost k znečištění	velmi nízká	nízká	vyšší	vyšší
prostupnost světla [%]	> 90	80 – 93	80 – 90	> 90
dostupné varianty	průhledá, bílá, různé barvy, možnost potisku	průhledná	průhledná, bílá	standardně bílá, možnost ostatních barev

PŘÍLOHA č.3 Hypar symetrický, diagonální orientace osnovy a útku - výsledek

DISPOZICE			ZAKŘIVĚNÍ POVRCHU					ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	k _x	k _y	K	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	10	0	0	0	0,00	0,00	0,00	5	1,0	1,0	13,0	922	12,8	13,6	69,8	922	12,3	13,1	68,1
10	10	0,5	2	2	0,01	-0,01	-0,01	4	1,0	1,0	13,0	936	12,2	20,3	75,6	937	12,7	19,6	59,2
10	10	1	4	4	0,02	-0,02	-0,05	4	1,0	1,0	13,1	864	14,1	22,5	77,4	876	14,6	21,8	48,6
10	10	1,5	5	5	0,03	-0,03	-0,11	3	1,0	1,0	13,2	770	13,4	22,3	75,5	842	13,9	21,3	42,7
10	10	2	7	7	0,04	-0,04	-0,20	3	1,0	1,0	13,2	698	12,2	21,1	72,7	799	13,6	20,1	40,2
10	10	2,5	9	9	0,06	-0,06	-0,31	3	1,0	1,0	13,3	633	10,5	20,9	69,8	603	11,0	21,1	36,6
10	10	3	11	11	0,07	-0,07	-0,45	3	1,0	1,0	13,5	574	9,9	20,3	67,0	570	10,5	20,5	35,3
10	10	3,5	12	12	0,08	-0,08	-0,61	3	1,0	1,0	13,6	522	9,4	19,2	64,1	517	10,2	19,7	34,3
10	10	4	14	14	0,09	-0,09	-0,79	2	1,0	1,0	13,8	482	9,3	18,1	61,2	488	10,0	19,6	33,7
10	10	4,5	16	16	0,10	-0,10	-1,01	2	1,0	1,0	14,0	449	8,8	17,1	58,6	463	9,7	18,4	33,2
10	10	5	18	18	0,11	-0,11	-1,25	2	1,0	1,0	14,2	421	8,3	15,8	56,1	445	9,4	17,2	32,8
10	10	5,5	19	19	0,12	-0,12	-1,52	2	1,0	1,0	14,4	397	7,6	14,4	54,0	434	8,9	16,4	32,9
10	10	6	21	21	0,13	-0,14	-1,82	2	1,0	1,0	14,7	379	7,3	13,3	52,0	423	8,6	15,4	32,7
10	10	6,5	23	23	0,15	-0,15	-2,15	2	1,0	1,0	15,0	364	7,3	12,8	50,0	418	8,7	15,4	32,6
10	10	7	25	25	0,16	-0,16	-2,51	2	1,0	1,0	15,2	350	6,9	11,6	48,2	413	8,5	14,9	32,6
10	10	7,5	27	27	0,17	-0,17	-2,90	2	1,0	1,0	15,5	338	6,2	12,4	46,7	413	7,9	13,4	32,8
10	10	8	28	28	0,18	-0,18	-3,32	2	1,0	1,0	15,8	329	6,3	10,2	45,1	413	8,1	13,5	32,8
10	10	8,5	30	30	0,19	-0,19	-3,79	2	1,0	1,0	16,1	320	5,9	9,4	43,7	415	7,9	13,5	33,0
10	10	9	32	32	0,21	-0,21	-4,31	2	1,0	1,0	16,4	309	5,5	8,8	42,7	416	7,5	11,6	33,3
10	10	9,5	34	34	0,22	-0,22	-4,86	2	1,0	1,0	16,8	304	5,4	8,4	41,4	417	7,7	12,0	33,4
10	10	10	35	35	0,23	-0,23	-5,46	2	1,0	1,0	17,1	294	5,0	7,7	40,3	421	7,5	11,3	33,6

PŘÍLOHA č.4 Hypar symetrický, ortogonální orientace osnovy a útku

DISPOZICE			ZAKŘIVĚNÍ POVRCHU					ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	k _x	k _y	K	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	10	0	0	0	0,00	0,00	0,00	5	1,0	1,0	13,0	1062	7,3	7,3	72,6	1062	7,3	7,3	72,6
10	10	0,5	2	2	0,01	0,00	-0,01	4	1,0	1,0	13,0	936	12,2	20,3	75,6	940	12,2	20,3	75,8
10	10	1	4	4	0,02	0,00	-0,05	4	1,0	1,0	13,1	864	14,2	20,8	77,4	878	13,9	22,4	77,4
10	10	1,5	5	5	0,03	0,00	-0,11	3	1,0	1,0	13,2	772	13,1	21,1	75,5	850	13,3	22,1	75,7
10	10	2	7	7	0,04	0,00	-0,19	3	1,0	1,0	13,2	696	12,5	20,4	72,6	796	12,9	21,1	73,2
10	10	2,5	9	9	0,05	0,00	-0,30	3	1,1	1,0	13,3	633	10,5	20,9	69,9	630	10,9	22,1	68,9
10	10	3	11	11	0,07	0,00	-0,43	3	1,1	1,0	13,5	574	9,9	20,3	67,0	571	10,5	21,8	66,3
10	10	3,5	12	12	0,08	-0,01	-0,58	3	1,0	1,0	13,6	524	9,4	19,4	64,2	519	10,1	21,1	64,0
10	10	4	14	14	0,09	-0,01	-0,77	2	1,0	1,0	13,8	484	9,3	18,3	61,6	491	10,0	19,9	62,1
10	10	4,5	16	16	0,10	-0,01	-0,95	2	1,0	1,0	14,0	452	8,9	17,1	59,0	464	9,7	18,9	60,1
10	10	5	18	18	0,11	-0,01	-1,17	2	1,0	1,0	14,2	424	8,4	15,9	56,5	446	9,5	17,8	58,5
10	10	5,5	19	19	0,12	-0,01	-1,38	2	1,0	1,0	14,4	401	7,7	14,6	54,4	434	8,7	18,8	57,0
10	10	6	21	21	0,13	-0,02	-1,67	2	1,0	1,0	14,7	381	7,3	13,4	52,3	424	8,2	17,9	55,8
10	10	6,5	23	23	0,14	-0,02	-1,94	2	1,0	1,0	15,0	366	7,5	12,3	50,4	418	8,7	15,2	54,6
10	10	7	25	25	0,15	-0,02	-2,17	2	1,0	1,0	15,2	352	7,0	11,9	48,6	414	8,4	15,0	53,7
10	10	7,5	27	27	0,16	-0,03	-2,54	2	1,0	1,0	15,5	340	6,3	11,1	47,1	414	7,8	13,9	53,0
10	10	8	28	28	0,17	-0,03	-2,88	2	1,0	1,0	15,8	329	6,3	10,7	45,5	414	8,2	14,1	52,3
10	10	8,5	30	30	0,18	-0,03	-3,20	2	1,0	1,0	16,1	321	6,0	9,9	44,2	416	7,8	13,7	51,6
10	10	9	32	32	0,19	-0,04	-3,55	2	1,0	1,0	16,4	310	5,5	9,4	43,1	416	7,3	12,4	51,2
10	10	9,5	34	34	0,20	-0,04	-3,98	2	1,0	1,1	16,8	306	4,5	8,8	41,9	419	7,7	13,3	50,8
10	10	10	35	35	0,21	-0,04	-4,38	2	1,0	1,1	17,1	297	5,0	8,2	40,7	423	7,4	12,8	50,4

PŘÍLOHA č.5 Hypar asymetrický, diagonální orientace osnovy a útku

DISPOZICE			ZAKŘIVĚNÍ POVRCHU					ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	k _x	k _y	K	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	10	4,5	16	16	0,10	-0,10	-0,95	1	1,0	1,0	14,2	424	8,7	15,7	56,4	445	9,4	17,5	58,3
10	10	4,5	17	17	0,11	-0,11	-1,15	1	1,0	1,0	13,9	399	8,2	15,5	57,8	414	9,2	16,5	59,0
10	10	4,5	18	18	0,12	-0,11	-1,30	1	1,0	1,0	13,8	337	7,7	13,2	55,1	363	8,6	14,7	56,8
10	10	4,5	18	18	0,14	-0,13	-1,81	1	1,0	1,0	13,6	312	7,1	11,4	50,7	345	8,0	12,1	52,8
10	10	4,5	19	19	0,16	-0,11	-1,76	1	1,0	1,0	13,3	278	6,5	9,6	43,9	323	7,2	10,3	47,3
10	10	4,5	20	20	0,19	-0,19	-3,69	1	1,0	1,0	12,8	241	5,7	7,1	35,8	280	7,9	8,6	40,5

PŘÍLOHA č.6 Bodově podepřená membrána 5-ti cípá, ortogonální orientace osy a útku

DISPOZICE			ZAKŘIVENÍ POVRCHU					ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	k _x	k _y	K	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	10	0	0	0	0,00	0,00	0,00	5	1,0	1,0	13,0	974	25,0	7,0	82,0	966	23,8	7,1	80,0
10	10	0,5	1	49	0,02	0,00	0,00	4	1,0	1,1	13,0	885	78,0	6,3	75,0	946	13,0	15,3	74,0
10	10	1	3	24	0,04	0,00	-0,01	4	1,0	1,0	13,0	841	85,0	7,3	70,0	925	12,8	14,9	73,0
10	10	1,5	4	16	0,06	0,00	-0,02	4	1,0	1,0	13,0	808	78,0	7,9	67,0	902	12,4	14,2	77,0
10	10	2	5	12	0,08	-0,01	-0,05	4	1,0	1,0	13,0	784	73,0	8,1	65,0	878	11,3	11,3	82,0
10	10	2,5	7	10	0,09	-0,01	-0,09	4	1,0	1,0	13,0	765	57,0	8,4	64,0	854	10,9	11,5	84,0
10	10	3	8	8	0,11	-0,01	-0,15	4	1,0	1,0	13,0	757	41,0	8,5	67,0	831	11,4	11,2	85,0
10	10	3,5	10	7	0,12	-0,02	-0,20	4	1,0	1,0	13,0	752	31,0	8,5	69,0	812	11,4	11,7	85,0
10	10	4	12	8	0,14	-0,02	-0,25	4	1,0	1,0	12,9	747	26,0	8,2	71,0	797	10,4	12,3	84,0
10	10	4,5	13	7	0,16	-0,02	-0,34	4	1,0	1,0	12,9	745	23,0	8,0	72,0	779	10,2	12,5	83,0
10	10	5	15	7	0,17	-0,03	-0,43	4	1,0	1,0	13,0	745	22,0	9,0	73,0	763	9,0	13,2	83,0
10	10	5,5	17	6	0,17	-0,03	-0,49	4	1,0	1,0	13,0	749	20,0	8,2	73,0	752	8,6	13,5	82,0
10	10	6	19	6	0,18	-0,03	-0,56	4	1,0	1,0	12,9	753	20,0	8,5	74,0	742	9,3	13,5	82,0
10	10	6,5	22	5	0,19	-0,04	-0,69	4	1,0	1,0	12,9	761	17,0	8,5	74,0	735	9,2	14,2	80,0
10	10	7	24	5	0,19	-0,04	-0,76	4	1,0	1,0	12,9	767	16,0	8,4	75,0	724	9,0	13,6	80,0
10	10	7,5	27	5	0,19	-0,04	-0,79	4	1,0	1,0	12,9	777	18,0	8,4	76,0	719	8,9	14,1	80,0
10	10	8	30	6	0,20	-0,04	-0,72	4	1,0	1,0	12,9	787	17,0	8,4	77,0	713	8,0	13,9	79,0
10	10	8,5	26	5	0,21	-0,04	-0,79	4	1,0	1,0	12,9	798	17,0	8,3	76,0	710	8,9	14,1	79,0
10	10	9	23	5	0,20	-0,04	-0,76	4	1,0	1,0	13,0	794	11,0	8,5	77,0	765	10,1	6,8	89,0
10	10	9,5	21	5	0,20	-0,04	-0,82	4	1,0	1,0	12,9	807	11,0	8,8	90,0	763	10,1	9,8	89,0
10	10	10	19	5	0,20	-0,04	-0,86	4	1,0	1,0	12,9	821	10,0	8,8	91,0	761	10,2	10,1	89,0

PŘÍLOHA č.7 Membrána na dvou obloukových podporách

DISPOZICE			KŘIVENÍ POVRCHU		ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	10	0	0	0	4	1,0	1,0	13,0	749	16,4	4,2	48,9	750	16,1	4,5	48,8
10	10	0,5	5	3	4	1,0	1,0	13,0	749	14,3	33,1	48,7	871	19,7	10,5	71,9
10	10	1	10	6	3	1,0	1,0	13,0	584	12,4	31,6	42,1	829	19,4	10,4	79,6
10	10	1,5	15	9	3	1,0	1,0	13,0	501	11,9	27,6	36,2	757	15,4	11,3	84,6
10	10	2	20	12	2	1,0	1,0	12,9	427	10,9	23,4	30,4	675	13,0	11,7	85,0
10	10	2,5	25	14	2	1,0	1,0	12,9	372	10,6	19,9	25,2	593	12,5	11,6	82,3
10	10	3	30	17	2	1,0	1,0	12,8	327	9,9	16,9	20,2	516	12,1	11,7	77,9
10	10	3,5	35	20	2	1,0	1,1	12,8	293	9,4	14,5	16,0	444	11,1	11,6	73,2
10	10	4	40	23	2	1,0	1,0	12,8	266	7,8	12,9	12,6	381	11,5	11,2	68,5
10	10	4,5	45	26	2	1,0	1,0	12,7	244	7,1	11,7	10,0	325	11,0	10,6	64,6
10	10	5	50	28	2	1,0	1,0	12,7	224	6,3	10,8	8,0	292	10,7	10,2	60,7

PŘÍLOHA č.8 Membrána na jedné centrické obloukové podpoře

a	b	h	c _x	c _y	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	5	0	0	0	4	1,0	1,0	13,0	489	6,8	6,5	62,8	487	6,6	5,7	62,7
10	5	0,5	5	2	3	1,0	1,0	13,0	426	5,2	14,9	55,6	500	12,4	7,8	56,3
10	5	1	10	3	3	1,0	1,0	13,0	383	5,0	14,3	53,1	454	14,0	6,0	52,8
10	5	1,5	15	5	3	1,0	1,1	13,0	344	4,7	13,6	49,7	402	13,8	5,2	49,7
10	5	2	20	7	2	1,0	1,0	13,0	311	4,5	12,9	46,1	363	12,6	5,1	47,2
10	5	2,5	25	8	2	1,0	1,0	13,0	284	4,1	12,1	42,3	332	11,7	4,9	44,7
10	5	3	30	9	2	1,0	1,0	12,9	269	3,8	11,3	38,8	309	10,9	4,8	42,4
10	5	3,5	35	9	2	1,0	1,0	12,9	257	3,4	10,6	35,8	291	10,4	4,7	40,4
10	5	4	40	12	2	1,0	1,0	12,9	250	3,2	10,1	34,8	279	10,0	4,8	38,2
10	5	4,5	45	13	2	1,0	1,0	12,8	243	3,1	9,5	32,9	270	9,7	4,9	36,2
10	5	5	50	14	2	1,0	1,0	12,8	237	2,9	9,1	31,4	263	9,4	4,9	34,6

PŘÍLOHA č.9 Membrána na jedné obloukové podpoře proměnný půdorys

DISPOZICE			KŘIVENÍ POVRCHŮ		ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	c _x	c _y	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
10	2	2,5	25	1	1	1,0	1,0	12,7	114	1,6	3,2	19,4	190	10,6	3,8	16,0
10	3	2,5	25	2	2	1,0	1,0	12,8	183	3,0	6,0	27,2	210	8,9	4,6	29,8
10	4	2,5	25	3	2	1,0	1,0	12,9	241	4,0	8,6	34,9	261	9,9	5,4	38,4
10	5	2,5	25	4	2	1,0	1,0	13,0	286	5,0	12,1	41,8	333	11,7	5,9	44,8
10	6	2,5	25	5	3	1,0	1,0	13,0	344	5,6	15,8	48,0	418	13,2	6,4	49,6
10	7	2,5	25	6	3	1,0	1,0	13,0	414	7,1	19,7	53,6	511	14,5	6,8	56,8
10	8	2,5	25	6	3	1,0	1,0	13,0	493	7,2	23,9	58,5	609	15,3	7,6	66,5
10	9	2,5	25	7	3	1,0	1,0	13,0	579	7,8	27,9	62,8	704	15,8	8,6	75,8
10	10	2,5	25	7	4	1,0	1,0	13,0	673	8,4	31,5	66,3	799	16,1	9,2	83,6
10	11	2,5	25	7	4	1,0	1,0	14,1	774	8,4	34,6	69,3	892	16,6	10,1	92,1
10	12	2,5	25	7	4	1,0	1,0	15,4	877	9,3	37,2	72,2	981	16,9	11,0	100,1
10	13	2,5	25	7	4	1,0	1,0	16,7	979	9,5	39,2	75,0	1068	16,1	10,9	107,5
10	14	2,5	25	7	4	1,0	1,0	18,0	1080	10,3	40,8	77,4	1153	15,6	11,8	114,2
10	15	2,5	25	7	5	1,0	1,0	19,3	1177	11,1	41,9	78,7	1235	12,8	11,7	120,1
10	16	2,5	25	7	5	1,0	1,0	20,5	1266	11,6	42,8	80,1	1316	14,3	11,4	125,2
10	17	2,5	25	7	5	1,0	1,0	21,9	1352	12,7	43,4	85,4	1395	15,5	10,8	130,4
10	18	2,5	25	7	6	1,0	1,0	23,2	1436	13,6	43,9	90,9	1471	13,6	11,6	135,3
10	19	2,5	25	7	6	1,0	1,0	24,5	1515	14,0	44,2	95,8	1542	13,9	12,1	141,6
10	20	2,5	25	7	7	1,0	1,0	25,8	1590	14,2	44,5	100,6	1613	13,9	12,8	145,5

PŘÍLOHA č.10 Membrána na dvou obloukových podporách proměnný půdorys

DISPOZICE			PŮD. PŮMĚR	KŘIVENÍ POVRCHŮ		ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h		c _x	c _y	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	
10	2	2,5	0,2	25	1	0,5	1,0	1,0	2,6	65	4,8	8,9	0,0	94	10,4	7,4	16,9
10	3	2,5	0,3	25	2	0,7	1,1	1,0	3,9	93	5,9	9,8	0,0	124	9,2	8,2	27,3
10	4	2,5	0,4	25	3	0,9	1,0	1,0	5,2	115	6,6	10,8	0,0	147	10,6	9,0	36,3
10	5	2,5	0,5	25	5	1,1	1,0	1,0	6,5	144	6,9	12,3	0,0	177	11,5	10,0	42,8
10	6	2,5	0,6	25	7	1,3	1,0	1,0	7,8	179	7,5	13,1	4,0	229	12,5	11,2	49,0
10	7	2,5	0,7	25	9	1,5	1,0	1,0	9,0	213	7,8	14,1	7,4	299	13,0	11,9	56,2
10	8	2,5	0,8	25	11	1,7	1,0	1,0	10,3	261	8,7	15,5	12,6	388	12,9	12,2	64,7
10	9	2,5	0,9	25	13	1,9	1,0	1,0	11,6	311	9,5	17,5	18,8	488	12,5	12,0	73,6
10	10	2,5	1	25	14	2,2	1,0	1,0	12,9	371	10,2	19,8	25,3	593	12,5	11,6	81,4
10	11	2,5	1,1	25	16	2,4	1,0	1,0	14,2	447	10,9	22,4	31,7	702	12,2	11,2	89,1
10	12	2,5	1,2	25	17	2,6	1,0	1,0	15,4	530	11,3	25,1	37,5	806	11,8	10,7	96,0
10	13	2,5	1,3	25	18	2,8	1,0	1,0	16,7	615	11,6	27,8	43,2	911	11,2	10,0	102,9
10	14	2,5	1,4	25	19	3,0	1,0	1,0	18,0	704	11,6	30,3	48,5	1011	10,4	9,3	109,5
10	15	2,5	1,5	25	20	3,2	1,0	1,0	19,3	794	11,5	32,6	53,6	1107	10,9	8,6	115,6
10	16	2,5	1,6	25	20	3,5	1,0	1,0	20,5	884	11,5	34,7	58,3	1198	11,1	7,9	121,1
10	17	2,5	1,7	25	21	3,8	1,0	1,0	21,8	975	11,7	36,6	62,9	1283	11,6	7,3	126,3
10	18	2,5	1,8	25	21	4,1	1,0	1,0	23,1	1067	12,2	38,2	66,6	1363	11,6	7,6	131,6
10	19	2,5	1,9	25	22	4,5	1,0	1,0	23,4	1171	12,6	39,5	70,7	1438	11,6	8,1	136,1
10	20	2,5	2	25	22	4,9	1,0	1,0	25,7	1269	13,1	40,6	74,6	1509	11,3	8,9	140,1

PŘÍLOHA č. 11 Pagoda symetrická, průměr středového prstence 2 m

DISPOZICE				ZAKŘIVENÍ POVRCHU			ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	d	c _x	c _y	d/a	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
8	8	0	2	0	0	0,3	3	1,0	1,0	10,4	310	12,8	8,0	33,6	308	12,7	7,8	35,8
8	8	0,5	2	6	3	0,3	2	1,0	1,0	10,4	250	23,2	11,0	25,9	334	8,0	8,4	43,0
8	8	1	2	13	7	0,3	2	1,0	1,0	10,4	216	10,1	8,8	23,3	276	9,0	7,4	42,3
8	8	1,5	2	19	10	0,3	2	1,0	1,0	10,3	186	7,4	7,5	20,9	225	8,7	6,9	38,7
8	8	2	2	25	14	0,3	2	1,0	1,0	10,3	178	6,9	7,6	19,6	201	8,5	6,6	36,6
8	8	2,5	2	31	20	0,3	2	1,0	1,0	10,4	188	7,3	8,1	19,7	204	8,6	6,7	37,3
8	8	3	2	38	28	0,3	2	1,1	1,0	10,4	230	12,6	11,9	21,4	251	9,1	7,3	42,4
8	8	3,5	2	44	29	0,3	2	1,0	1,0	10,4	236	14,4	16,4	20,1	212	8,1	7,0	39,8
8	8	4	2	50	31	0,3	2	1,0	1,0	10,2	243	14,9	14,0	19,4	201	8,5	7,9	37,9
8	8	4,5	2	56	31	0,3	2	1,0	1,0	10,2	244	13,6	21,3	18,1	184	8,4	7,8	43,1
8	8	5	2	63	33	0,3	2	1,0	1,0	10,4	263	5,9	26,0	17,3	193	7,9	6,9	37,0
8	8	5,5	2	69	32	0,3	2	1,0	1,0	10,4	270	5,0	29,0	16,1	185	7,5	6,8	35,8
8	8	6	2	75	33	0,3	2	1,0	1,0	10,4	296	4,8	34,4	15,6	187	7,5	6,8	36,2
8	8	6,5	2	81	34	0,3	2	1,0	1,0	10,4	328	4,9	41,2	15,0	188	7,6	6,9	36,7
8	8	7	2	88	35	0,3	2	1,0	1,0	10,4	359	4,6	47,7	14,5	189	7,6	7,0	37,2
8	8	7,5	2	94	35	0,3	2	1,0	1,0	10,5	390	4,6	55,7	14,0	189	7,6	7,0	37,6
8	8	8	2	100	35	0,3	1	1,0	1,0	10,5	420	4,4	61,8	13,6	190	7,7	7,1	38,1

PŘÍLOHA č. 12 Pagoda symetrická, proměnný průměr prstence

DISPOZICE				ZAKŘIVENÍ POVRCHU			ZS1 – VLASTNÍ TÍHA				ZS2 – SNÍH				ZS3 – SÁNÍ VÍTR			
a	b	h	d	c _x	c _y	d/a	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}	w _z	n _x	n _y	N _{max}
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]
8	8	2	0	25	30	0	3	1,0	1,0	10,4	430	44,8	15,3	40,0	641	6,6	7,1	51,6
8	8	2	0,4	25	26	5	3	1,1	1,1	10,4	358	26,0	20,7	35,3	525	9,8	8,9	51,2
8	8	2	0,8	25	22	10	3	1,2	1,1	10,4	306	19,7	17,6	30,5	413	7,8	9,1	49,0
8	8	2	1,2	25	22	15	2	1,1	1,0	10,4	242	12,9	9,5	26,1	305	7,6	9,1	44,5
8	8	2	1,6	25	15	20	2	1,0	1,0	10,4	212	9,6	8,3	24,1	235	7,2	8,9	39,9
8	8	2	2	25	14	25	2	1,0	1,1	10,3	180	8,1	6,9	22,1	114	6,6	8,5	36,8
8	8	2	2,4	25	14	30	2	1,0	1,0	10,3	162	7,1	5,8	20,7	136	6,2	8,1	34,1
8	8	2	2,8	25	13	35	1	1,0	1,0	10,3	143	6,2	5,2	19,3	120	5,7	7,7	31,2
8	8	2	3,2	25	13	40	1	1,0	1,0	10,3	131	5,5	5,0	18,1	134	5,3	7,2	28,4
8	8	2	3,6	25	13	45	1	1,0	1,0	10,2	117	4,9	4,8	17,0	121	4,8	6,7	25,5
8	8	2	4	25	13	50	1	1,0	1,0	10,2	105	4,3	4,6	15,9	109	4,4	6,2	22,7
8	8	2	4,4	25	13	55	1	1,0	1,0	10,2	96	3,8	4,3	14,8	99	4,1	5,6	19,7
8	8	2	4,8	25	13	60	1	1,0	1,0	10,1	88	3,2	3,9	13,8	92	3,8	5,3	17,5
8	8	2	5,2	25	14	65	1	1,0	1,0	10,1	75	2,9	3,5	12,9	86	3,5	5,3	15,7
8	8	2	5,6	25	14	70	1	1,0	1,0	10,0	64	2,4	2,4	12,2	78	3,2	5,7	14,4
8	8	2	6	25	14	75	1	1,0	1,0	10,0	55	2,1	2,1	11,5	68	3,0	5,8	13,3
8	8	2	6,4	25	14	80	1	1,0	1,0	9,9	47	1,7	2,2	11,0	64	2,9	5,5	12,3
8	8	2	6,8	25	14	85	0	1,0	1,0	9,9	40	1,4	1,9	10,6	48	2,6	5,3	11,4
8	8	2	7,2	25	14	90	0	1,0	1,0	9,8	32	1,2	1,5	10,3	49	2,6	4,7	10,7
8	8	2	7,6	25	15	95	0	1,0	1,0	9,8	22	1,0	1,5	10,1	39	2,2	4,4	10,1
8	8	2	8	25	15	100	0	1,0	1,0	9,8	18	1,0	1,4	9,8	33	1,8	4,0	9,8