



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra architektury**

Simulace pohyblivých membránových konstrukcí

Light weight tensile structures simulation

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. arch. Pavel Jurčík

Doktorský studijní program: Architektura a stavitelství

Studijní obor: Architektura a stavitelství

Školitel: prof. Ing. arch. Miloš Kopřiva

Praha 2022

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: **Ing. arch. Pavel Jurčík**

Název disertační práce: **Simulace pohyblivých membránových konstrukcí**

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele: **prof. Ing. arch. Miloše Kopřivy.**

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

Parametrické modelování pohyblivých membránových konstrukcí jako podkladu pro projektovou dokumentaci

Limity pohyblivých jednovrstvých membránových zastřešení

Experimentální projekt netradičního využití fólií ETFE a jednovrstvých textilních membrán

V Praze dne _____

_____ podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce prof. Ing. arch. Miloši Kopřivovi, který mě provází studiem již od roku 2010. Podnítil můj zájem o problematiku lehkých membránových konstrukcí do té míry, že jsem se rozhodl studovat ji v doktorském studiu a realizovat je v praxi.

Chci poděkovat svým rodičům Janě a Pavlovi a sestře Haně za podporu během celého studia. Děkuji strýci Jakubovi a tetě Lence za poskytnuté zázemí v Praze. Poděkování patří i babičce Ivonně a dědovi Tomášovi za jazykovou korekturu, podporu během studia a podněcení zájmu o výpočetní techniku v dětství. Dále děkuji dědovi Wernerovi za praktické rady při práci s materiály všeho druhu a babičce Eddě za její podporu a lásku. Bez Vás by tato práce nikdy nevznikla.

Závěrem bych chtěl poděkovat všem přátelům a kolegům, kteří mě během doktorského studia podporovali a měli pochopení pro proždělé noci, které jsem trávil před monitorem počítače.

Ing. arch. Pavel Jurčík

ANOTACE

Disertační práce je zaměřena na pohyblivé membránové konstrukce. Díky lehkým pohyblivým membránovým konstrukcím můžeme v krátkém čase zcela změnit funkční využití daného prostoru. Tyto architektonicky dynamické stavby jsou tvarovány do formy hyperbolického paraboloidu, rotačního hyperboloidu, nebo synklastického polštáře v případě pneumatických membrán. Dvojího zakřivení membrány lze dosáhnout výškovým rozehráním okrajových kotevních bodů a vložením tuhých oblouků nebo vypínacích vzpínadel do středu pole. Pneumatické membrány jsou vypínány vnitřním přetlakem. Vždy se musí respektovat správné zakřivení výsledné plochy membrány a její předpětí v obou směrech.

Cílem disertační práce je analyzovat vybrané typy jednovrstvých a pneumatických pohyblivých membránových konstrukcí. Na základě analýzy vybraných pohyblivých membrán je v další fázi výzkumu vytvořen postup pro jejich digitální simulaci. Simulace pohyblivých membránových konstrukcí jsou provedeny za pomoci specializovaných softwarových nástrojů pro parametrické navrhování, fyzikální animaci a vykreslování akcelerované pomocí grafického jádra.

Simulovanými formami pohyblivých membránových konstrukcí jsou pohyblivé trychtýře, pohyblivé lomenice, membrány zavěšené na radiálních lanových konstrukcích a řetězové plochy.

Z výsledných simulací pohyblivých membrán jsou vytvořena prezentační videa. Dalším výstupem disertace jsou parametrické funkce základních typologických forem membránových zastřešení. Parametrické funkce budou zveřejněny a poskytnuty pro architektonické navrhování odborné veřejnosti. <https://cs.paveljurcik.com/research>

Klíčová slova: pohyblivé membránové konstrukce, pohyblivé zastřešení, architektonický návrh, simulace, animace, parametrizace.

ANNOTATION

Dissertation thesis is focused on convertible light weight tensile structures. With convertible light weight tensile structures is possible to change the function of disposition in a short time. Single layer membranes are formed to the shape of hyperbolic paraboloids or rotation hyperboloids. Pneumatic multilayer membranes are formed to the synclastic pneumatic cushions. Double curvature of the membrane is achieved by different height distribution of points, by insertion of shaped rigid steel elements, or by inner pressure. Correct pretension of the membrane in both directions and right curvature of the membrane surface are essential parts of the right design.

Main goal of the dissertation is to analyse the chosen types of convertible light weight tensile structures. Based on this analysis are created digital simulations of folding and movement of the convertible tensile structures. The simulations are made in specialised software tools for parametric design and physical animation.

Simulated forms of the light weight convertible tensile structures are convertible membranes caried by radial ropes, convertible umbrellas, convertible accordions and convertible membranes fixed on rigid elements.

The presentation videos are created from the convertible membrane simulations. The other result of the dissertation are the parametric functions of the basic membrane shapes. These functions are provided to public. <https://cs.paveljurcik.com/research>

Key words: Convertible tensile structures, retractable roofing, architectural design, simulation, animation, parametrization.

OBSAH

ANOTACE.....	6
ANNOTATION	7
1. ÚVOD	11
2. HISTORIE POHYBLIVÉ MEMBRÁNOVÉ ARCHITEKTURY	12
3. ZÁKLADNÍ FORMY LEHKÝCH MEMBRÁN	18
3.1. FORMY LEHKÝCH JEDNOVRSTVÝCH MEMBRÁN	18
3.2. FORMY PNEUMATICKÝCH MEMBRÁN	21
4. ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH LEHKÝCH POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ	22
4.1. FORM – FOLW – FORCE - 3F.....	24
5. TYPOLOGIE SKLÁDÁNÍ A ARCHITEKTONICKÁ VARIABILITA POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ	25
6. POHONNÉ SYSTÉMY LEHKÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	31
6.1. JEDNOVRSTVÉ POHYBLIVÉ MEMBRÁNOVÉ KONSTRUKCE.....	31
6.2. PNEUMATICKÉ POHYBLIVÉ MEMBRÁNOVÉ KONSTRUKCE	34
7. ANALYZOVANÉ FORMY JEDNOVRSTVÝCH MEMBRÁN. KONSTRUKCÍ.....	35
8. ANALYZOVANÉ FORMY PNEUMATICKÝCH MEMBRÁN. KONSTRUKCÍ	39
9. MATERIÁLY POUŽÍVANÉ NA POHYBLIVÁ MEMBRÁNOVÁ ZASTŘEŠENÍ.....	44
LEHKÁ ANIZOTROPNÍ MEMBRÁNA.....	44
IZOTROPNÍ FOLIE	50
SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ ZE STŘIHŮ.....	48
10. ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH A SIMULACE SKLÁDÁNÍ POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	49
NÁVRH ALGORITMU PRO ARCHITEKTONICKÉ NAVRHOVÁNÍ JEDNOVRSTVÝCH MEMBRÁN V PROGRAMU RHINO CEROS A PLUGINU GRASSHOPPER	49
<i>Jednoduchá bodově kotvená membrána (hypar)</i>	50
<i>Bodově kotvená membrána s vloženým obloukem</i>	51
<i>Čtvercový a kruhový trychtýř</i>	52
<i>Jednovrstvá membránová lomenice</i>	53

10.1. SIMULACE LEHKÝCH POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ V PROGRAMU BLENDER	54
10.2. DIGITÁLNÍ SIMULACE POHYBU VYBRANÝCH MEMBRÁNOVÝCH ZASTŘEŠENÍ	60
SIMULACE JEDNOVRSTVÉ POHYBLIVÉ MEMBRÁNY S RADIÁLNÍMI LANY – BAD HERSFELD	60
SIMULACE JEDNOVRSTVÉHO POHYBLIVÉHO TRYCHTÝŘE	61
SIMULACE POHYBLIVÉ LOMENICE.....	63
SIMULACE KINETICKÉ FASÁDY – ZASTIŇUJÍCÍ SEGMENTY	65
ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH A SIMULACE POHYBLIVÉ ŘETĚZOVÉ PLOCHY Z ETFE FOLIE	66
11. ZÁVĚR	68
SLOVNÍK ČASTO POUŽÍVANÝCH POJMŮ	71
ZDROJE.....	73
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	76

PŘÍLOHA Č.1

VÝBĚR REALIZOVANÝCH MEMBRÁNOVÝCH ZASTŘEŠENÍ	81-101
STŘECHA ARÉNY BÝČÍCH ZÁPASŮ – MADRID 2000	83
LANDSHAFT PARK – DUISBURG NORD	84
POHYBLIVÁ FASÁDA LEZECKÉ VĚŽE Z ETFE SEGMENTŮ PRAHA – ČESKÁ REPUBLIKA	85
POHYBLIVÉ ZASTŘEŠENÍ STADIONU TOYOTA MĚSTO TOYOTA	86
POHYBLIVÉ ZASTŘEŠENÍ STADIONU AL JANOUB.....	87
POHYBLIVÉ ZASTÍNĚNÍ NÁMĚSTÍ HEART OF DOHA	88
MOBILNÍ ZASTŘEŠENÍ VP. Č.1	89
OLYMPIJSKÝ STADION V MONTREALU.....	90
VENKOVNÍ DIVADLO – SCHLOSS PORCIA.....	91
ARTIFICIAL ICE RING – ŠVÝCARSKO.....	92
FELSENRELTSCHULE	93
VENKOVNÍ DIVADLO v CANES – PALM BEACH CASINO.....	94
VENKOVNÍ DIVADLO – BAD HERSFELD	95
BUGA CANOPIES	96
ZASTŘEŠENÍ LEDOVÉ PLOCHY – CONFAS HONORINE	97
VÝSTAVNÍ PAVILON – NEW YORK.....	98
PLAVECKÝ BAZÉN BOULEVARD CARNOT.....	99
SCHWIMBAD RUE DAVID ANGERS	100
HOECHST EXHIBITION PAVILON.....	101

PŘÍLOHA Č.2

LINIOVÉ KOTVENÍ OKRAJE MEMBRÁNOVÉHO ZASTŘEŠENÍ.....	107-116
-----------------------------------------------------	---------

1. ÚVOD

Pohyblivé membránové konstrukce jsou navrhovány v případech, kdy je kladen požadavek na variabilitu provozu s ohledem na počasí nebo proměnlivost vnitřní dispozice staveb. Stadiony, tenisové kurty, aquaparky, amfiteátry nebo náměstí, jsou místy, kde jsou tyto konstrukce s úspěchem realizovány. Tyto konstrukce umožňují při správném návrhu zakrývat prostory o velkých rozponech při síle materiálu mezi 0,25 - 1,5 mm. Lehkost, světelná propustnost nebo transparentnost, elegance a dynamičnost výsledné formy lehkých pohyblivých membránových zastřešení jsou vlastnostmi, které lákají architekty a investory po celém světě k realizování těchto atypických konstrukcí.

Základním kritériem pro návrh lehké pohyblivé membrány by měl být požadavek na zásadní změnu navrhované dispozice s ohledem na ochranu před vnějším prostředím. Požadavek na rozdělení prostoru s velkým objemem, přidání dalšího objemu a další přesně specifikovaná kritéria, která nelze naplnit běžným více konvenčním způsobem.

Stejně jako mýdlová bublina nebo pavoučí síť zatížená větrem, jsou membránové konstrukce povrchově aktivní struktury, jejichž tvar je definován vnitřním předpětím a je zásadně ovlivňován vnějším silovým působením. Základní tvary membrán vycházejí z přírody a teorie minimálních ploch, a proto mohou při správném návrhu velice efektivně překlenovat velká rozpětí s použitím malého množství materiálu oproti tradičním konvenčním konstrukcím.

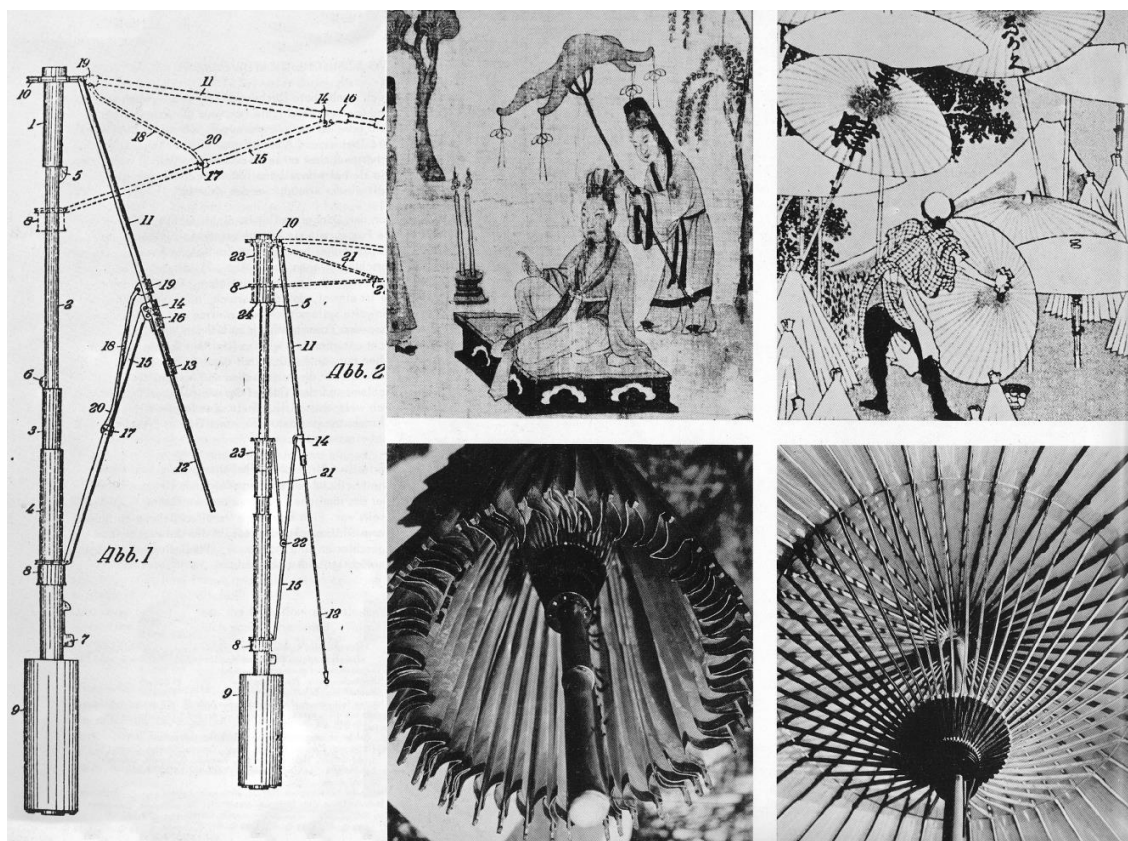
V souvislosti s lehkými pohyblivými membránovými zastřešeními bude disertační práce pojednávat o jednovrstvých pohyblivých membránách, které svou funkci a tvar dosahují díky předeptutí ve dvou směrech a pneumatických membránových konstrukcích, kde je tvaru membrány dosaženo díky vnitřnímu přetlaku.

Tato disertační práce je zaměřena na studium forem a architektonické navrhování lehkých pohyblivých membránových konstrukcí. První část výzkumu je zaměřena především na studium realizovaných konstrukcí a jejich popis. V další části je navržen postup pro digitální simulaci pohyblivého membránového zastřešení a jsou provedeny animace vybraných forem jednovrstvých i pneumatických pohyblivých membránových zastřešení. V závěru práce se autor zaměřuje na možnosti vhodného architektonického návrhu úložných prostor pro složené pohyblivé membrány.

2. HISTORIE POHYBLIVÉ MEMBRÁNOVÉ ARCHITEKTURY

Slunečníky a deštníky

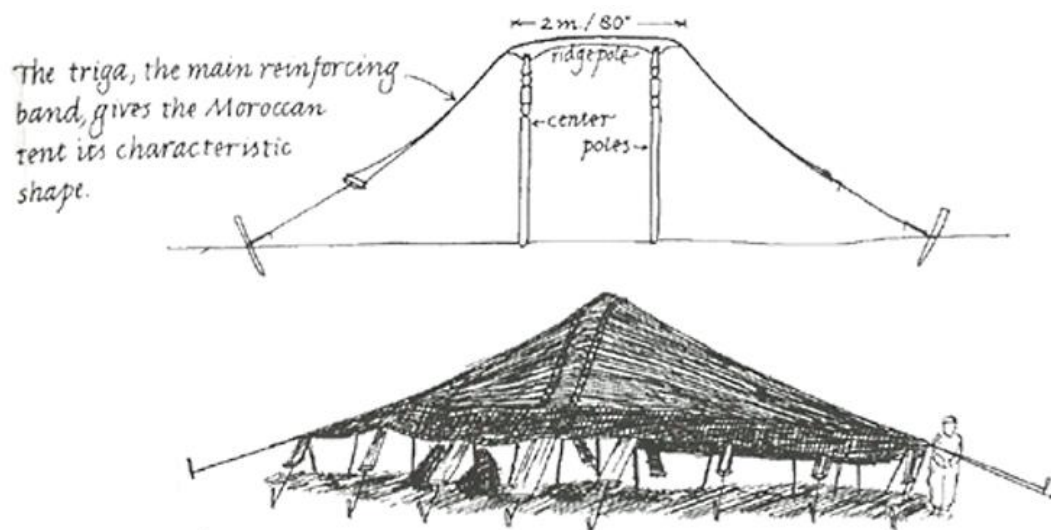
Jako jeden z prvních příkladů lehké konvertibilní membrány malého měřítka uvádí Institut lehkých konstrukcí ze Stuttgartu (dále jen IL) slunečník. [1] Nejstarší dochovaný záznam skládací varianty slunečníku uvádí IL ze 13. st. př. n. l. Jako materiál se používalo hedvábí a slunečník měl zdůrazňovat vysoké postavení jeho nositele. Příkladem dochovaného zobrazení slunečníku je obraz asyrského vládce Asurbanipala. Především skládací podoba slunečníku se prolíná ikonografií mnoha kultur napříč historií. Příklady různě velkých slunečníků a deštníků jsou známé především ze starověkého Japonska nebo Číny. Zde se na konstrukci slunečníků používal zejména bambus, který byl ideálním materiálem díky své nízké hmotnosti a obnovitelnosti. Bambus má zároveň malou nasákavost, je odolný proti dřevokazným škůdcům a má vysokou pružnost a pevnost. Jako materiál na potažení deštníků se v té době používala zejména přírodní stanová plátna ze lnu nebo bavlny o nižší gramáži do cca 250 g/m². V současnosti se na nosné konstrukce deštníků a slunečníků používají lehké kovy jako hliník, nebo kompozity v podobě uhlíkových vláken. Dodnes se jedná o nejrozšířenější typ drobné mobilní membrány na světě.



Obr. 1. Kopie historických spisů s vyobrazením slunečníků. Asyrský vládce Asurbanipal uprostřed; [1]

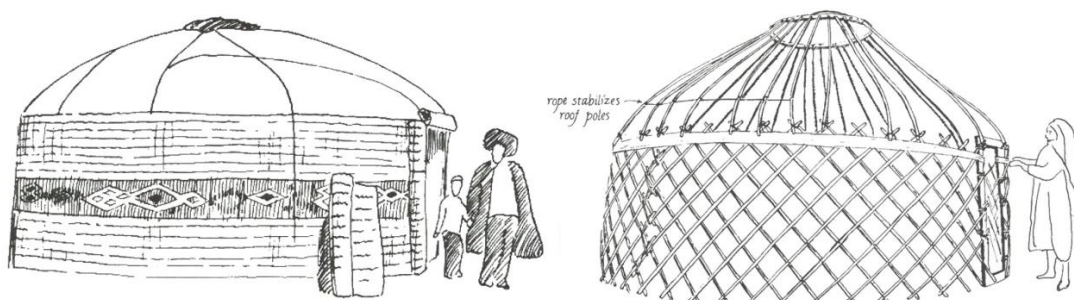
Stany a dočasné přístřešky

Dalším příkladem mobilní membrány menšího měřítka je stan. Faegre [2] uvádí velké množství různých typů stanů od indiánského typu, přes stany nomádských pouštních kočovníků, nebo jurty kočovníků z Mongolska. Různé typy stanů opět prolínají historií lidstva na všech kontinentech dodnes. Jejich hlavní výhodou je malá hmotnost a rychlá stavba s ohledem na zastřešený prostor. Nevýhodou jsou téměř nulové izolační schopnosti, které tyto konstrukce v našem podnebí limitují pouze k sezónnímu využití.



Obr. 2. Řez marockým stanem s polohou hřbetu [2]

Mongolské jurty však bývají zateplovány vlněnými cupaninami či netkanými textiliemi, které zčásti redukuje přístup tepla stěnou. Při dostatečném výkonu vnitřního tepelného zdroje lze jurtu využívat celoročně. Variace na jurty lze nyní zpozorovat i v Evropě a USA, kde jsou s výhodou navrhovány jako chaty, sezónní objekty určené pro rekreační ubytování, nebo jsou používány městskými nomády, kteří se nechtějí fyzicky vázat k nemovitosti. [3]



Obr. 3. Pohled na zakrytou jurtu a její nosnou konstrukci (vlevo) [2]

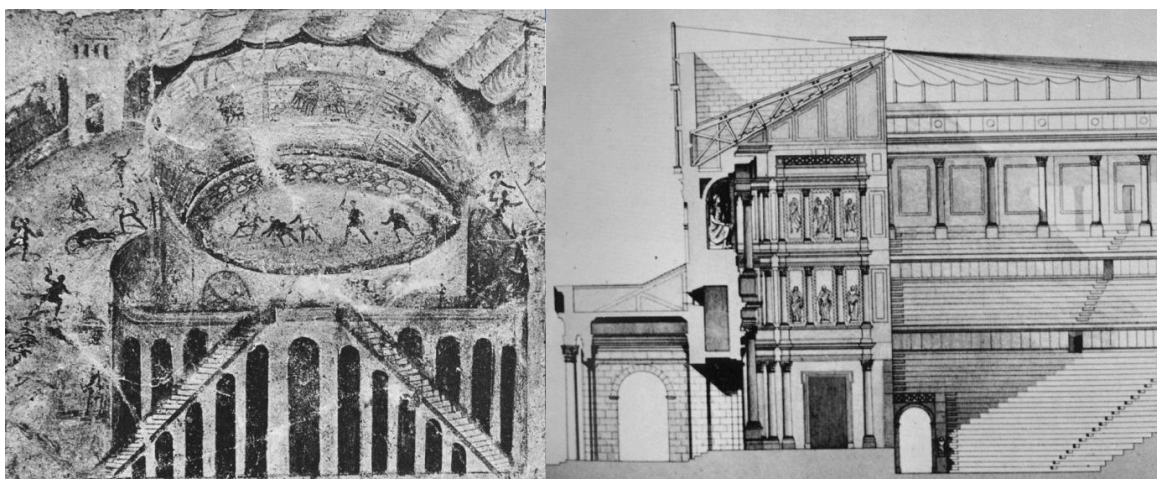
Římské velum

Příklady prvních pohyblivých membránových konstrukcí velkého měřítka jsou pohyblivé zastiňující plachty na římských divadlech, amfiteátrech a cirkusech. Římské velum bylo poprvé představeno Quintem Catulusem v roce 69 př. n. l. Studium římských spisů dospělo IL k závěru, že Římané používali velum nejen k zastínění divadel, ale hojně také k zastínění dvorů budov, zastínění ulic i náměstí. [1]

V souvislosti se zastřešujícím velem hovoří Vitruvius o rychle vztyčitelném napínacím zařízení, které však vyžaduje značnou pečlivost při návrhu. Zařízení navazovalo na systém radiálních lan, na kterých byly umístěny jezdce s kladkami. Tyto jezdce byly přikotveny k vlastní zastiňující látce. Celý pohyblivý mechanismus pak ovládali námořníci a zastřešení nesmělo být rozvinuto při silném větru. [4]

Střecha, která zakrývala Koloseum – největší amfiteátr antiky, je příkladem největšího lehkého pohyblivého zastřešení z minulosti. Střecha měla půdorysnou plochu přibližně 23 tis. m². Z toho střecha přes hlediště zakrývala 19 tis. m² a střecha přes horní galerii zakrývala 5,7 tis m².

Frei Otto porovnává zastřešení, které realizoval v Bad Hersfeldu, jež mělo 1313 m² a je tedy více než čtyřikrát menší než zastřešení horní galerie Kolosea. Podklady pro studium zastřešení Kolosea čerpá IL z archeologické disertace Rainera Graefeho z Univerzity Tübingen a důležité rekonstrukce provedené Alvinem, Borgnisem, Caninou a kol. [1]



Obr. 4. Původní freska + rekonstrukce řezu amfiteátru v Pompejích; [1]

Přímým dokladem římského vela je freska, která byla nalezena v roce 1869 v Pompejích nedaleko amfiteátru. Tato freska zachycuje Pompejské divadlo s rozvinutou zvlněnou střechou z látky. [1]

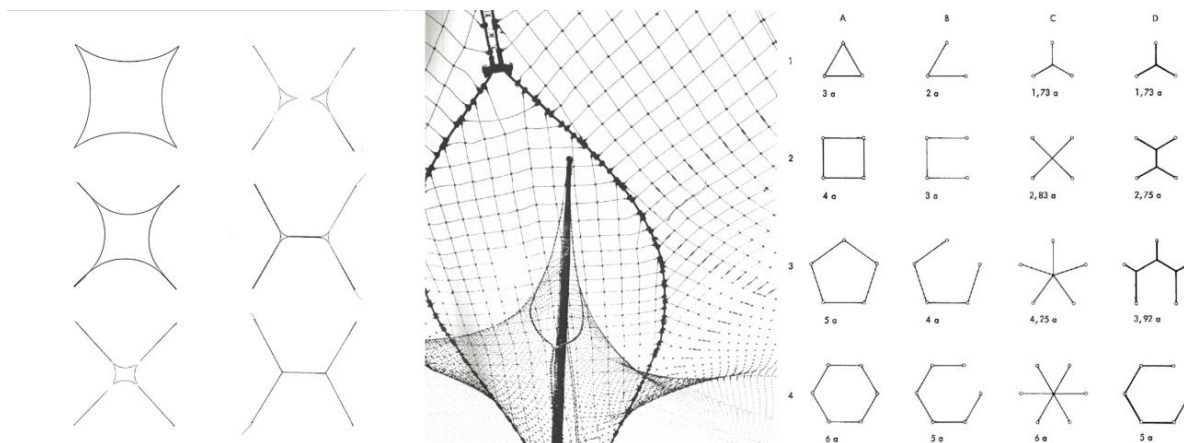
SOUČASNÝ STAV STUDOVANÉ PROBLEMATIKY

Institute of Light Weight Structures (IL)

Mezi průkopníky v oboru lehkých membránových konstrukcí lze bez pochyby označit vědce z Institutu lehkých konstrukcí na univerzitě ve Stuttgartu (dále jen IL), kde pod vedením Freie Otta vznikly jedny z prvních návrhů velkorozponových lanových konstrukcí. Snaha institutu vyvrcholila návrhem olympijského stadionu v Mnichově, jehož velkolepost byla bohužel zastíněna mezinárodní tragédií (tragickým únosem jedenácti izraelských sportovců). Frei Otto tuto událost zmiňuje na výroční konferenci u příležitosti 10. výročí založení IL. [5]

Institut patřil pod fakultu stavebních konstrukcí univerzity ve Stuttgartu. Práce IL směřovala jak k vývoji nových konstrukčních systémů velkorozponových konstrukcí, tak k výzkumu pohyblivých střech pro velkorozponové stavby. Na začátku vytvořil Institut podrobnou rešerši základního rozdělení konstrukcí s ohledem na jejich cenu, rozpon a materiál. Po jejím publikování se začal zabývat především konstrukcemi inspirovanými přírodou a biologií. Vzniklá data zpětně porovnával s prověřenými typy tradičních konstrukcí. [6]

Tým IL čerpal z teorie minimálních povrchů, na jejímž základě byla vytvořena nová modelová experimentální metoda. Princip metody spočíval ve výzkumu chování mýdlové pěny mezi dvěma deskami z plexiskla. IL zkoumalo tvorbu mýdlových bublin mezi deskami v závislosti na rychlosti oddálení desek od sebe. Výsledné tvary tým IL fotografoval a měřil rozměry a úhly mezi průměty stěn mýdlové pěny. Zkoumané obrazce se podobaly „včelím plástvím“ a nová metoda umožnila výzkumnému týmu IL získávání dalších dat o minimálních sítích v rychlejším čase. [31]



Obr. 5. Studie tvaru mýdlových bublin (vlevo) a její aplikace na zastřešení německého pavilonu EXPO1967 v Montrealu [6]

První větší realizací lehkého lanového zastřešení byl německý pavilon pro EXPO v Montrealu z roku 1967. Hlavním architektem byl Rolf Gutbrod a hlavním inženýrem

Fritz Leonhardt, oba spolupracovníci Freie Otto. Po úspěšné realizaci tohoto projektu a díky kladným ohlasům veřejnosti začalo IL pracovat na modelu Olympijského stadionu v Mnichově (1972). [6]

V roce 1967 měl institut IL pět trvalých členů – jednoho vedoucího, dva vědce, jednoho technika a jednu sekretářku. V roce 1969 zaměstnával IL už 30 pomocných výzkumných pracovníků zaměřených na specifickou oblast výzkumu lehkých konstrukcí. Rychlý rozvoj IL reflektoval tehdejší nadšení veřejnosti pro tyto architektonicky netradiční dynamické formy. [5]

Ředitelem IL se roku 1967 stal Frei Otto. V návaznosti na probíhající výzkum uspořádal IL v roce 1967 ve Stuttgartu první mezinárodní konferenci na téma velkorozponových pneumatických membrán.

V roce 1967 byla udělena Frei Ottovi a Rolfu Gutbrodovi Perretova cena. Následně byli vyzváni spolu s Institutem biologie Technické univerzity Berlín k prezentování svého výzkumu na německém industriálním veletrhu (1968). Prezentace spojovala poznatky z biologie a konstrukčního inženýrství. IL se během těchto let rozšířil do té míry, že byla založena jeho pobočka ve Washingtonu. [6]



Obr. 6. Náhled na dokončený stadion v Mnichově. [ONLINE] <http://www.ttg.cz/>

Centrum lehké membránové architektury v USA vedl Larry Medin. Dále byla navázána úzká spolupráce s národním institutem v Ahmedabadu v Indii a architektem Kenzo Tangem z Tokijské univerzity v Japonsku. [5]

S podporou nadace Volkswagen, díky národním grantům a soukromým investorům dokázal IL předělat původní testovací vzorek lanové konstrukce na stálé sídlo IL a tato původně experimentální stavba slouží svému účelu dodnes. [7]

Série publikací IL navazuje na předešlou práci původního týmu před založením IL s názvem Mitteilungen der Entwicklungsstätte für den Leichtbau (Reporty z vývojového centra lehkých konstrukcí). Publikace IL vycházely vždy v němčině a angličtině. Editace byla výhradně v rukou zaměstnanců IL. Jednalo se především o shrnutí výzkumu za uplynulé roky a jednotlivé knihy na sebe částečně navazují tak, jak se výzkum vrstvil a rozvětvoval na jednotlivé oblasti lehké architektury. [6] V roce 2015 dostal Frei Otto za mimořádný přínos světové architektuře in memoriam Pritzkerovu cenu.

Dle slov Freie Otta: „*Jsou publikace IL určeny k inspiraci a zamyšlení nad možnostmi dělat věci jinak a snad i lépe než dosud.*“ [6]

V současnosti, kdy je ekologie a udržitelnost důležitou součástí návrhu celoživotního cyklu stavby je promyšlený architektonický návrh lehké pohyblivé konstrukce jednou z efektivních možností, jak na tyto požadavky úspěšně reagovat.

Skupina Tensinet

Po roce 2000 se v Evropě začala formovat skupina Tensinet [33], která sdružuje firmy zabývající se návrhem a realizací lehkých membránových zastřešení a výrobce materiálů pro membránová zastřešení. Skupina Tensinet vydala odbornou publikaci Tensinet Design Guide s předmlouvou Freie Otta, která slouží jako základní průvodce problematikou lehkých zastřešení. Tensinet pořádá pravidelné konference a workshopy. Mezi členy skupiny Tensinet patří spolupracovníci a studenti Freie Otta a výzkumní pracovníci z Institutu lehkých konstrukcí ze Stuttgartu. Dále pak membránoví inženýři ze specializovaných společností jako je SBP, Taiyo nebo Seele.

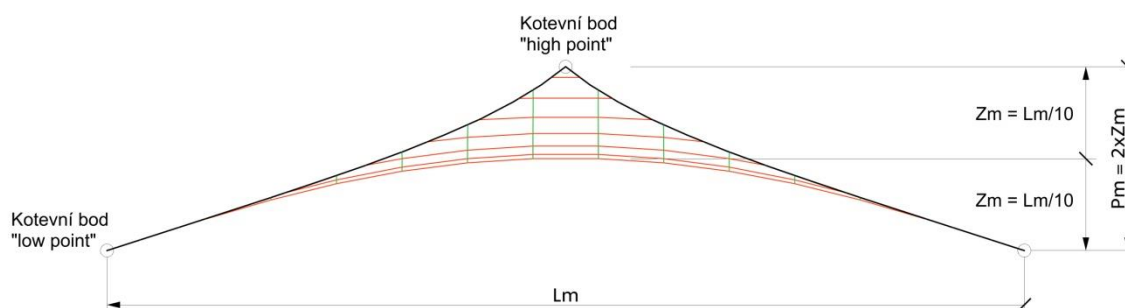
V současné době byla ustanovena skupina mezinárodního týmu výzkumníků, inženýrů, architektů a výrobců materiálů pro lehké membránové konstrukce. Cílem skupiny je vytvořit evropskou normu pro navrhování lehkých membránových konstrukcí. Odborná veřejnost se dosud musí spoléhat zejména na zkušenosti, které membránoví specialisté nabrali z předchozích realizací.

3. ZÁKLADNÍ FORMY LEHKÝCH MEMBRÁN

3.1. Formy jednovrstvých membrán

U jednovrstvých membránových konstrukcí je dosaženo tvaru a funkce pomocí předepnutí textile v osnově a v útku mezi několik předem definovaných kotevních bodů. Tyto kotevní body tvoří vstupní okrajové podmínky zastřešení a jejich správné definování je klíčové pro výslednou funkčnost zastřešení. [8]

Pro správné pochopení problematiky lehkých pohyblivých zastřešení je důležité si uvědomit, že jejich tvar vychází původně z forem, které jsou používané pro nepohyblivá membránová zastřešení. Membránový architekt pak ze zkušenosti vybírá vhodnou formu zakřivené plochy pro konkrétní situaci. Kotevní body membránového zastřešení určují jeho okrajové podmínky a jsou vůči sobě situovány v různých výškách tak, aby výsledné zakřivení membrány Z_m bylo vůči rozponu zastřešení L_m minimálně v poměru 1:10. Výše zmíněný poměr platí zejména u zastřešení, která mají celoročně vzdorovat zatížení sněhem a větrem.



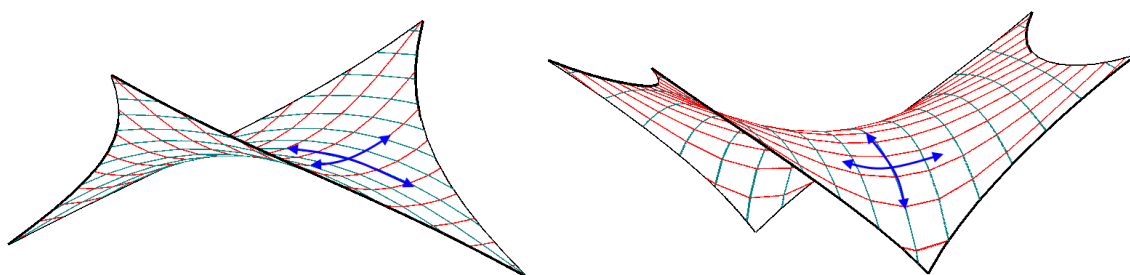
Obr. 7. Schéma minimálního zakřivení membránové plochy ve formě hyperbolického paraboloidu.

U pohyblivých membrán, které mají sloužit pouze jako ochrana před sluncem a deštěm a v zimních měsících budou zatažené ve skladovacím prostoru, je možné poměr snížit až na 1:15. Zakřivení membrány je důležité jak z hlediska odvodu vody nebo sjíždění sněhu ze střešní konstrukce, tak z hlediska výsledné tuhosti zastřešení a silového působení, které bude předepnutá membrána vyvozovat do nosných konstrukcí (např. při zatížení sáním větru). Limity lehkých jednovrstvých membrán se blíže zabývá kolega Jan Vecko ve své disertační práci, a proto se tu autor poměry zakřivení detailně nebude zabývat. [9]

Architektonické formy membránových zastřešení mohou nabývat složitých geometrických tvarů. Obecně lze formy dvojité zakřivených ploch rozdělit na čtyři základní typy: bodově kotvenou membránu, membránu na obloukových podporách, kónické plochy (pagody nebo trychtýře) a lomenice nebo soustředné lomenice. [32]

Bodově kotvená membrána

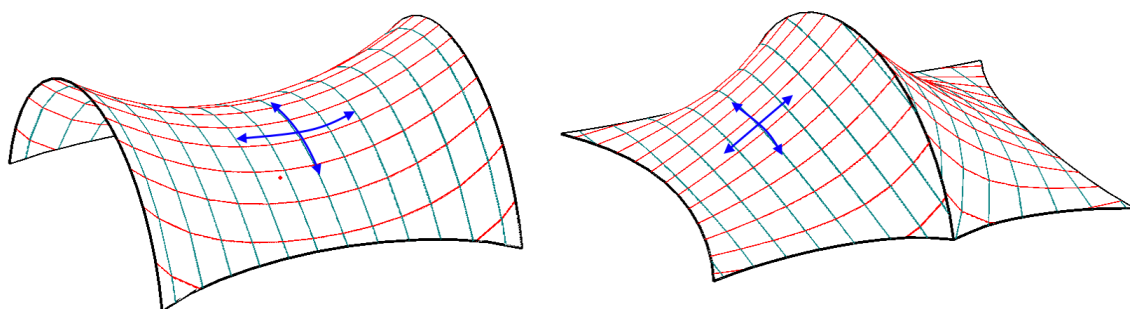
Membrána kotvená na minimálně čtyřech bodech nabývá tvar hyperbolického paraboloidu, pokud jsou okrajové podmínky kotvení definovány ve střídavém rytmu. V základním případě je vždy první kotevní bod situován alespoň o 1/10 rozpětí výš než bod následující. Body tak neleží v jedné rovině, ani netvoří šikmou plochu, ale jejich výšky jsou prostřídány a tvoří tak "high pointy" a "low pointy" zastřešení. High pointy přenáší především zatížení sněhem a low pointy přenáší především zatížení od sání větru. Hrany membrány jsou stabilizovány obvodovými lany, nebo přímo kotveny na ocelovou konstrukci přes kedrlišty nebo přítlačné lišty. [9]



Obr. 8. Příklady bodově kotvené membrány [9]

Membrány tvarované vloženými oblouky

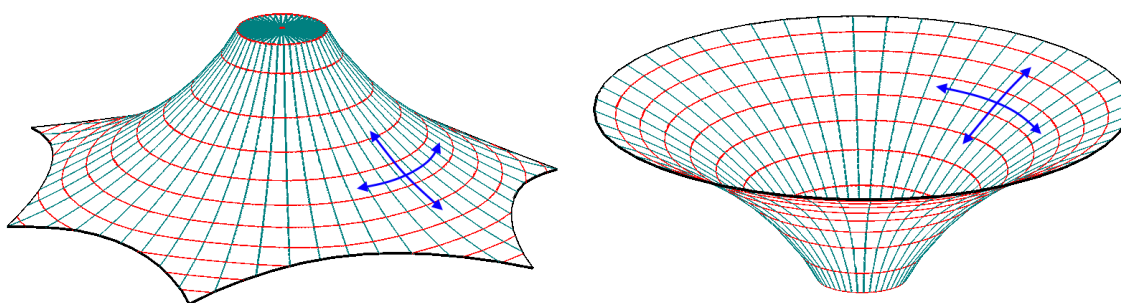
Dvojitého zakřivení membránové plochy lze také dosáhnout vložením správně zakřiveného obloukového nebo eliptického žebra. Tuhá žebra jsou v této variantě plochy často rytmicky opakována a tvoří rozsáhlé sedlové clustery. Tento typ zakřivené plochy je s oblibou používán na pevná zastřešení tribun stadionů. Volný okraj membrány může být stabilizován zesílením, nebo obvodovými lany. Přiléhající okraj membrány, který navazuje na objekt nebo ocelovou konstrukci, je běžně stabilizován kedrlištami nebo přítlačnými lištami. Více o liniových kotveních membránových konstrukcích lze nalézt v příloze č.2 této práce.



Obr. 9. Příklady membrány tvarované vloženými oblouky [9]

Kónické membrány: Pagody a trychtýře

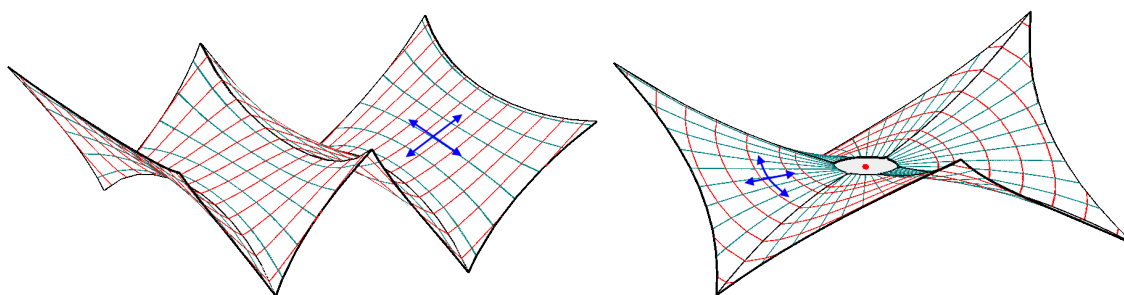
Specifickou skupinou membránových zastřešení jsou membrány tvarované do formy pagody nebo trychtýře. V obou případech je kónického hyperbolického tvaru výsledné plochy dosaženo vytažením, nebo zapuštěním jednoho, nebo více bodů v ploše zastřešení, kdy body po obvodě plochy mohou zůstat v jedné rovině. Obvod zastřešení může být stabilizována jak obvodovými lany, tak ocelovým prstencem. Body v poli jsou buď vzpínány ocelovými prvky, nebo stahovány směrem dolů ocelovými lany. Forma trychtýře je často používána v mobilní membránové architektuře pro solitérní nebo clusterové zakrytí náměstí a veřejných prostranství.



Obr. 10. Příklady kónicky tvarované membrány (Pagody a trychtýře) [9]

Lomenice a dostředné lomenice

Lehké membránové konstrukce nabývající tvar lomenice jsou svým principem střídání hřebenu a úžlabí podobné harmonice. Membránoví inženýři tento tvar s oblibou používají pro pohyblivé zastřešení pravidelných obdélníkových půdorysů. Stabilizace úžlabí a hřebene je u těchto ploch dosaženo vložím průběžného lana, které spojuje oba protilehlé konce, které jsou ve stejné výšce. Jednou z variant lomenic je dostředná lomenice, kdy je výsledný tvar membrány orientován do kruhu nebo elipsy a úžlabní a vrcholová lana jsou orientována kolmo na střed zastřešení.



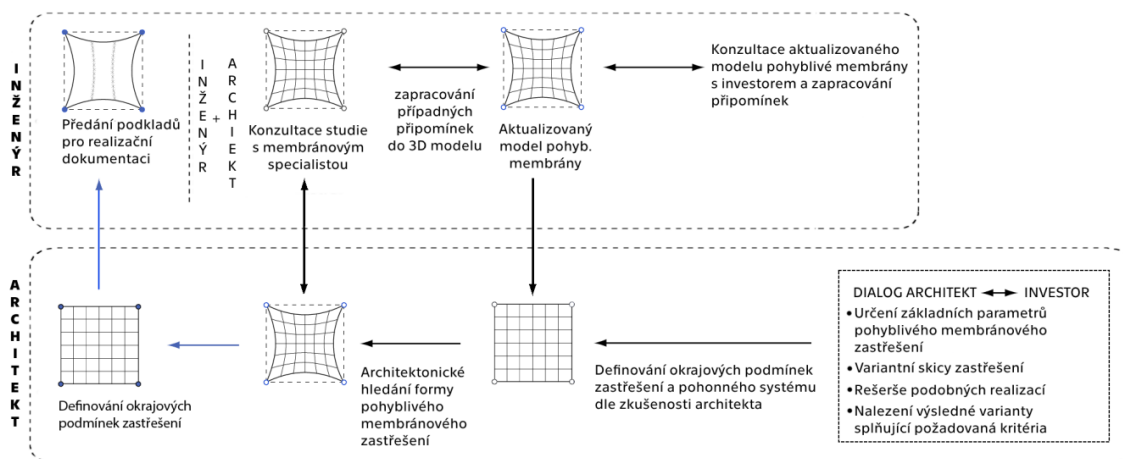
Obr. 11. Příklady lomenice a soustředné lomenice [9]

4. ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH LEHKÝCH POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ

Lehké pohyblivé membránové konstrukce jsou velmi úzkým segmentem na stavebním trhu. Jejich architektonickému návrhu by proto měla být věnována patřičná péče a měly by se navrhovat s rozmyslem na místech, kde budou vhodně využity. Ve veřejných shromažďovacích prostorech, náměstích, amfiteátrech, plochách pro rekreační i výkonnostní sport, k zastřešení hracích ploch a dalších místech, kde je vhodné předpokládat víceúčelové využití zastřešovaného prostoru.

Základním kritériem pro návrh lehké pohyblivé membrány by měl být požadavek na zásadní změnu dispozice s ohledem na ochranu před vnějším prostředím. Požadavek na rozdělení prostoru s velkým objemem a další přesně specifikovaná kritéria, která nelze naplnit běžným více konvenčním způsobem.

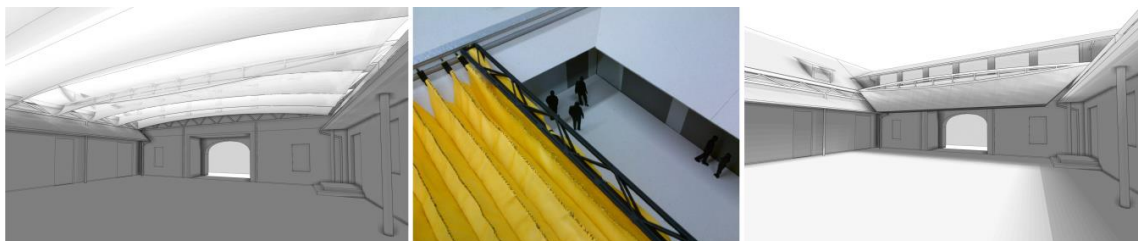
Samotný návrh pohyblivé konstrukce by měl již od architektonické studie zahrnovat průběžnou konzultaci s inženýrem, který se specializuje na membránové konstrukce. Membránový specialista by architektonický koncept ověřil a upozornil na případné kolizní body návrhu. Spolu s architektem by navrhnul vhodné řešení tak, aby bylo výsledné pohyblivé zastřešení maximálně efektivní. Schéma dialogu mezi investorem – architektem – inženýrem je zobrazeno na obr. 15.



Obr. 15. Schéma architektonického návrhu pohyblivého membránového zastřešení

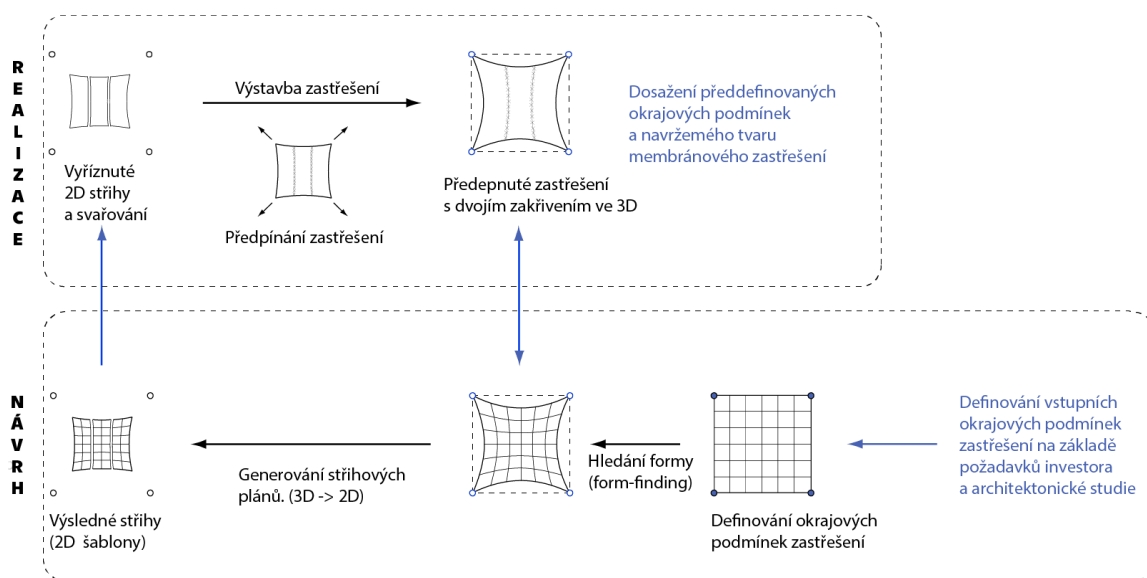
V další fázi návrhu se vyhotovuje předběžný 3D model v programech, které simulují lehké membránové konstrukce (Formfinder, Rhino Ceros s pluginem Grasshopper). Předběžný 3D model je podkladem pro vizualizace a fyzický model pohyblivé membrány, který je vhodné zhotovit ve správně zvoleném měřítku podle konkrétní velikosti skládaných segmentů.

Na fyzickém modelu si architekt spolu s investorem odsouhlasí systém posuvu v závislosti na upřesněných požadavcích a výsledné agregované ceně, která zahrnuje i každoroční servis. Tvorba fyzického modelu je časově a prostorově náročná, protože membránové konstrukce mohou mít rozměry, až několik tisíc metrů čtverečních. Zachovat správnou podrobnost fyzického modelu s ohledem na vlastnosti membránového materiálu není jednoduché. Je vhodné volit materiál se stejnou nebo menší tuhostí, než bude použit na výsledné pohyblivé zastřešení.



Obr. 16. Architektonická studie a fyzický model pohyblivého membránového zastřešení atria Telč. Vizualizace autor, fyzický model: Aleš Vaněk. (archiv SMA)

Další fází architektonického návrhu by mělo být vytvoření dynamického modelu, který bude simulovat skládání výsledné plochy membránového zastřešení. Návrhem postupu simulace pohyblivých membrán se autor podrobně zabývá v oddílu 10. na straně 49. (Architektonický návrh a simulace skládání pohyblivých membránových konstrukcí)



Obr. 17. Schéma návrhu a realizace pohyblivého membránového zastřešení [10]

Informace získané z fyzického i digitálního modelu by byly v závěrečné fázi návrhu využity při tvorbě výrobní dokumentace v inženýrských programech jako je EASY, Dlubal, ixCUBE. Následně při návrhu pohyblivého systému zastřešení a při tvorbě stavebního harmonogramu prací.

4.1. FORM – FLOW – FORCE - 3F

FORMA NÁSLEDUJE SILOVÉ PŮSOBENÍ

Stejně jako mýdlová bublina nebo pavoučí síť zatížená větrem, jsou membránové konstrukce povrchově aktivní struktury, jejichž tvar je definován vnitřním předpětím a je zásadně ovlivňován vnějším silovým působením. Základní tvary membrán vycházejí z přírody a teorie minimálních ploch, a proto mohou při správném návrhu velice efektivně překlenovat velká rozpětí s použitím malého množství materiálu oproti tradičním konvenčním konstrukcím.

Při navrhování pohyblivých membránových konstrukcí je proto důležité pečlivě definovat okrajové podmínky membrány a její formu v závislosti na statickém působení. Již od začátku návrhu je nutné respektovat minimální doporučené zakřivení zborcené plochy v obou směrech, které je rovno 1/10 rozpětí membránového pole. Toto zakřivení je limitní hodnotou pro zakřivení antiklastické, nebo synklastické plochy.

Již od začátku architektonického návrhu lehké pohyblivé membránové konstrukce je důležité spolupracovat s membránovým inženýrem. Membránový inženýr by v ideálním případě architektonický návrh průběžně prověřil s ohledem na silové působení a korigoval případné problémy, které by bylo možné rovnou vyřešit úpravou architektonického konceptu.

Mezioborová týmová spolupráce a správné pochopení problematiky by měla zajistit, aby se nestalo, že navrhovaná subtilní nosná konstrukce bude nakonec disproporčně realizována jako pohyblivé zatížení ledové plochy v Confas Honore. U tohoto návrhu se ze subtilních oblouků vlivem statického působení stala masivní příhradová konstrukce, která má daleko k původnímu architektonickému návrhu i ideji lehkých konstrukcí.

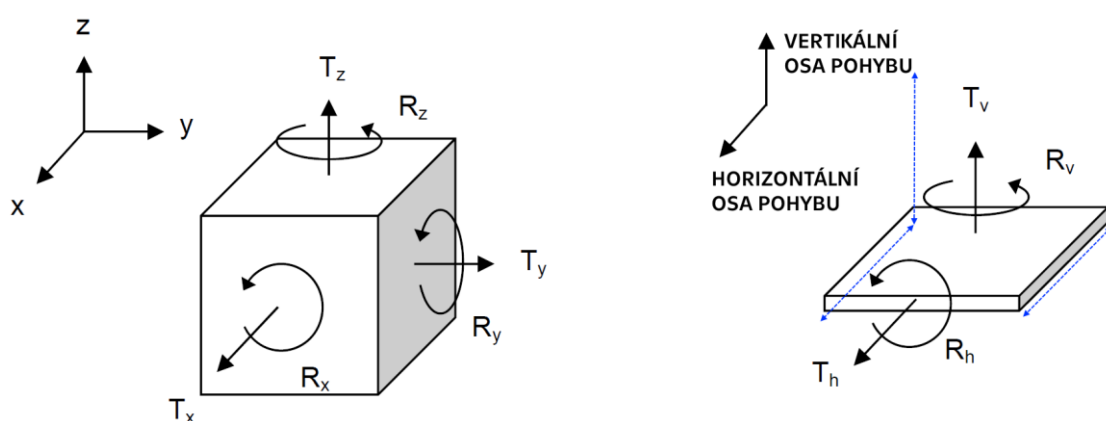
Obecně platí, že je lepší navrhovat v konstrukci většinu podpůrných prvků pouze tažených, nebo dostředně tlačných. Jakmile musí některý z konstrukčních prvků odolávat kombinaci zatížení, jeho dimenze se zvětší v násobcích profilů. Je dobré připomenout, že jako materiál pro podpůrné konstrukce lehkých zastřešení se výhradně používá ocel třídy S355 nebo ocel vyšší kvality.

Dimenze podpůrných ocelových konstrukcí má přímý dopad na celkový dojem ze stavby. Proto většina návrhů pohyblivých zastřešení od IL je konstrukčně pojata jako excentricky umístěný pylon, z kterého se rozbíhají radiální lana. Pylon je umístěn a nakloněn tak, aby byly všechny síly přenášeny v jeho ose do základů. Předepnutá radiální lana spolehlivě přenesou všechna tahová zatížení z membrány do okrajových sloupů nebo přímo do základů.

5. TYPOLOGIE SKLÁDÁNÍ A ARCHITEKTONICKÁ VARIABILITA POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ

Způsoby skládání pohyblivých membránových konstrukcí

Způsobů skládání pohyblivých membránových konstrukcí je celá řada a vhodná volba konkrétní varianty už v prvním architektonickém návrhu je klíčová pro správné fungování celého konceptu. Obecně má trojrozměrné tuhé těleso šest bodů volnosti. Tři stupně volnosti pro pohyb ve osách x, y a z a tři stupně volnosti pro pootočení v totožných osách. [10]



Obr. 18. Stupně volnosti tuhého tělesa a tuhé desky (aproximované membrány) [10]

Pohyblivá membránová zastřešení nebo dělicí stěny lze při jejich pohybu zobecnit jako kombinaci soustav desek s nejvýše čtyřmi stupni volnosti. Dvěma stupni pro pohyb ve vertikální, nebo horizontální ose a dvěma stupni pro rotaci kolem vertikální osy, nebo kolem horizontální osy. Ostatní dva stupně volnosti má deska trvale odebrána díky pohyblivému uložení na nosných konstrukcích, po kterých se membránové zastřešení pohybuje. Při fixaci a předepnutí membránového zastřešení dochází pomocí speciálních přepínacích prvků k odebrání dalších stupňů volnosti, až se celé zastřešení předepne a stabilizuje. [10]

Unikátním stupněm volnosti membránových zastřešení je změna jejich tuhosti po odstranění předpětí. Po odstranění předpětí se dá materiál, z kterého jsou tato zastřešení vyrobena, složit. Potom je možné velmi významně redukovat velikost skladovacích prostorů. Dále je potřeba počítat s vhodným poloměrem skladu a ohybu v závislosti na zvoleném materiálu. S vhodnými parametry skládání je potřeba počítat zejména při zatahování pohyblivé konstrukce a při jejím následném skladování ve složeném stavu. [11]

Typologie skládání pohyblivých zastřešení

Systém souřadnic 	Žádná uspora prostoru	Úspora místa pro skladování zastřešení			
		překrytím	složením	rolováním	vyfouknutím

Pohyb v jedné ose

DRUH POHYBU OSA POHYBU

Přemístění	Horizontální						
	Vertikální						
Rotace	Horizontální						
	Vertikální						

Pohyb ve více osách

DRUH POHYBU OSA POHYBU SKLADOVACÍ PROSTOR

Přemístění	Horizontální	Po obvodě					
		Ve středu					
Rotace	Horizontální	Po obvodě					
		Ve středu					
	Vertikální	Po obvodě					
		Ve středu					

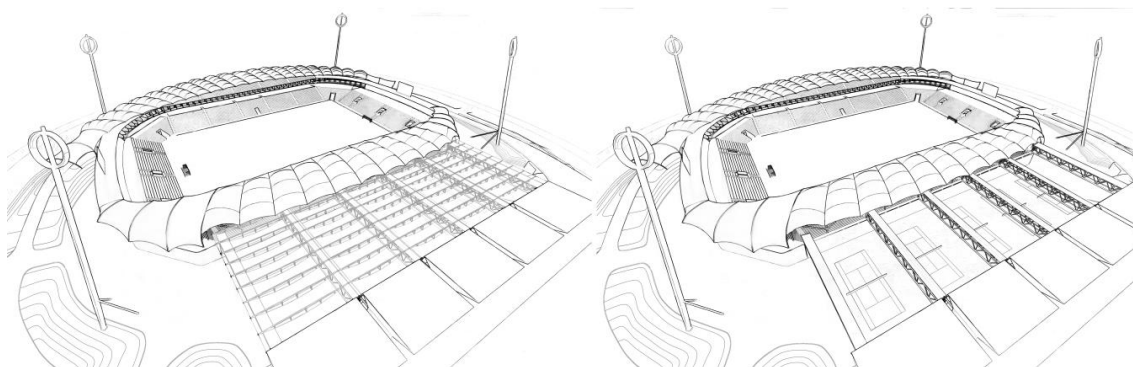
Obr. 19. Typologie skládání pohyblivých membránových zastřešení [10]

Možnosti pohyblivosti membránových konstrukcí v závislosti na architektonickém konceptu

Architektonická pohyblivost, variabilita (konvertibilita), nebo mobilita jsou tři důležité vlastnosti, které určují možnosti proměn objektů a jejich částí. Pohyblivost konstrukcí úzce souvisí s variabilitou dispozice a je důležité rozlišovat mezi vnitřní variabilitou dispozice a vnější variabilitou objektu. U lehkých membránových konstrukcí se lze nejčastěji setkat s mobilními posuvnými příčkami, nebo pohyblivým zastřešením určitého prostoru. [1]

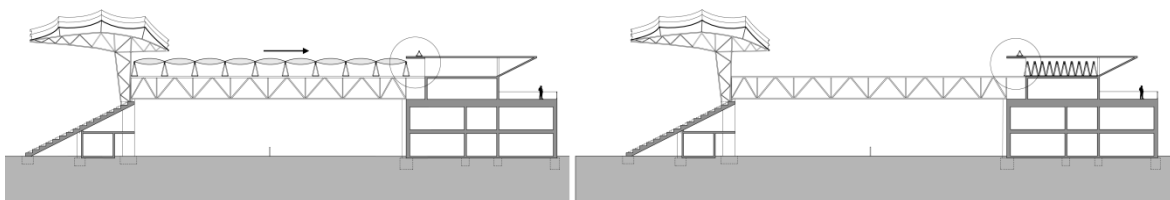
Exteriérová variabilita (konvertibilita)

O exteriérové variabilitě lze hovořit v souvislosti s variabilitou vnější obálky budovy. Do exteriérové variability jsou zahrnuty střechy, které mohou být zataženy, složeny, nebo posunuty. Výška střech může být měněna a spolu s ní je měněna i výška navazujících stěn. V závislosti na počasí, či potřebách provozovatele, mohou být lehké mobilní stěny zcela složeny a vznikne tak volný zastřešený půdorys navazující na exteriér. [1]



Obr. 20. Architektonická studie zastřešení víceúčelových kurtů navazujících na stadion v Hradci Králové. Vizualizace autor [11]

Příkladem exteriérového variabilního membránového zastřešení je architektonická studie pohyblivého zastřešení víceúčelových kurtů, které studio SMA navrhlo jako rozšiřující součást stadionu v Hradci Králové. SMA zde navrhuje zastřešit kurty sloužící pro hraní tenisu nebo volejbalu pneumatickou membránou z ETFE. Navrhovaným druhem zastřešení je zde řetězová plocha, která je ve složeném stavu skladována v navrženém prostoru střechy nad šatnami a zázemím. Prostorové příhradové nosníky, které slouží pro pojezd zastřešení, jsou zároveň únikovými cestami z hlavní tribuny stadionu. Variantně by bylo možné toto pohyblivé zastřešení navrhnout jako řetězové lomenice z jednovrstvé PVC membrány nebo z jednovrstvé PTFE membrány. Formou by se pak pohyblivá membrána blížila zastřešení, které bylo realizováno v Ostravě Vítkovicích.

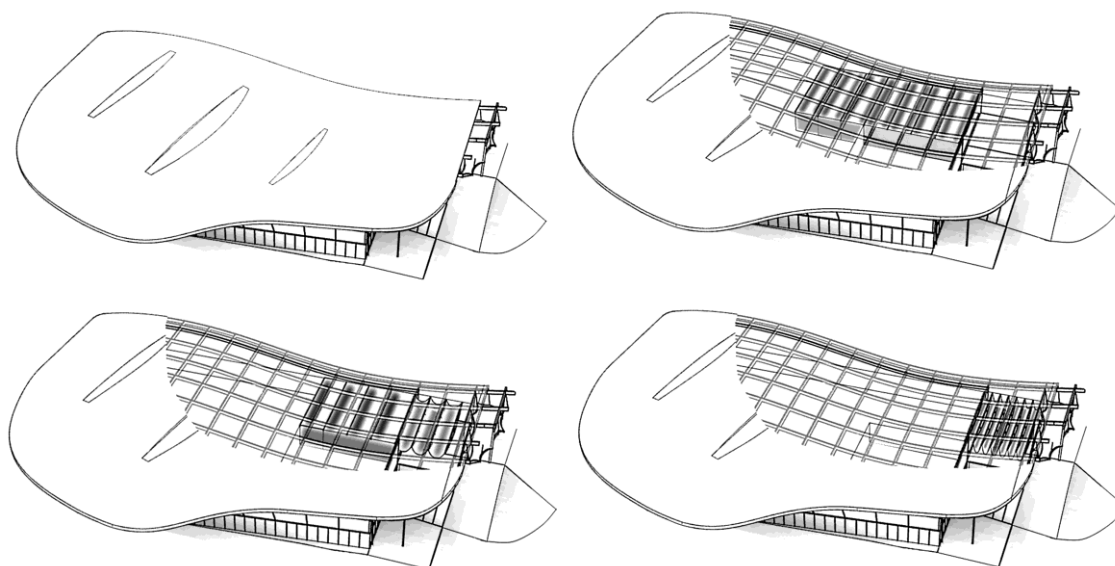


Obr. 21. Architektonická studie zastřešení víceúčelových kurtů navazujících na stadion v Hradci Králové. Řezy: Otevřeno – Zavřeno [11]

Interiérová variabilita (konvertibilita)

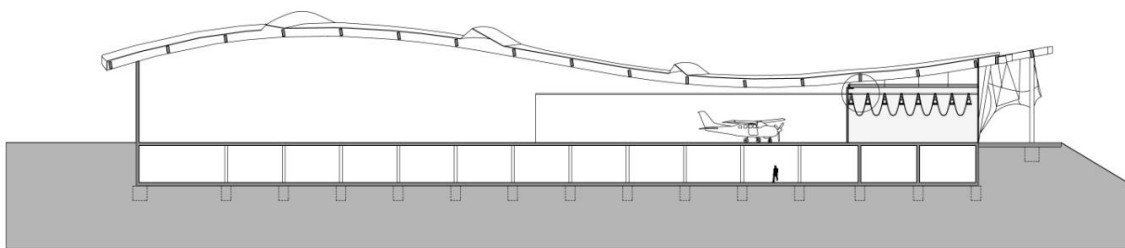
Interiérová variabilita souvisí s proměnou vnitřních dispozic objektu. Jedná se zde o pohyblivost nebo změnu velikosti stěn a přiček, tedy změnu výškové úrovně pater, anebo změnu volného půdorysu s proměnnými schématy uspořádání zařizovacích předmětů

Všechny tyto procesy by měly být prováděny relativně rychle v závislosti na předem stanovených podmínkách použití daného provozu. Změny jsou realizovatelné v rádech minut až hodin, u některých velkých aplikací, kde se upravuje celý objem a forma, maximálně v rádech dnů.

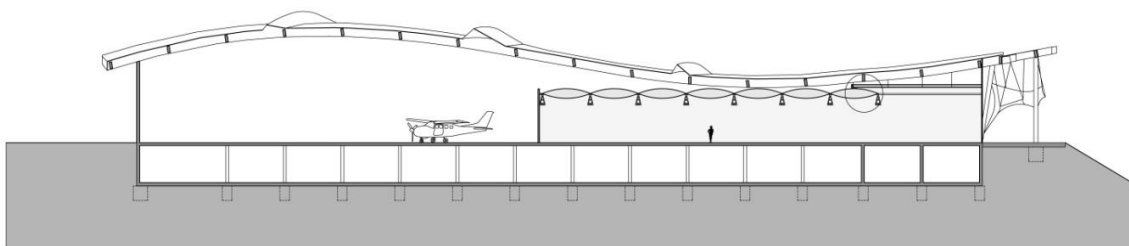


Obr. 22. Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Vizualizace autor. [11]

Příkladem interiérové variability je architektonická studie variabilní dispozice 2.NP muzea veteránů letiště Lánov. Zde je v interiéru navržena transparentní skládací pneumatická dělicí konstrukce z ETFE, která po její extenzi umožňuje využívat část půdorysu jako vytápěný prostor pro recepcí a setkávání veřejnosti.



Obr. 23. Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Podélný řez – zataženo. [11]



Obr. 24. Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Podélný řez – roztaženo. [11]

Poziční a situační mobilita a objemová variabilita

Poziční mobilita souvisí s lokalitou, kde budova stojí, situací objektu vůči světovým stranám a prostorově-dispozičně-konstrukčnímu uspořádání jednotlivých úrovní stavby.

Poziční mobilita

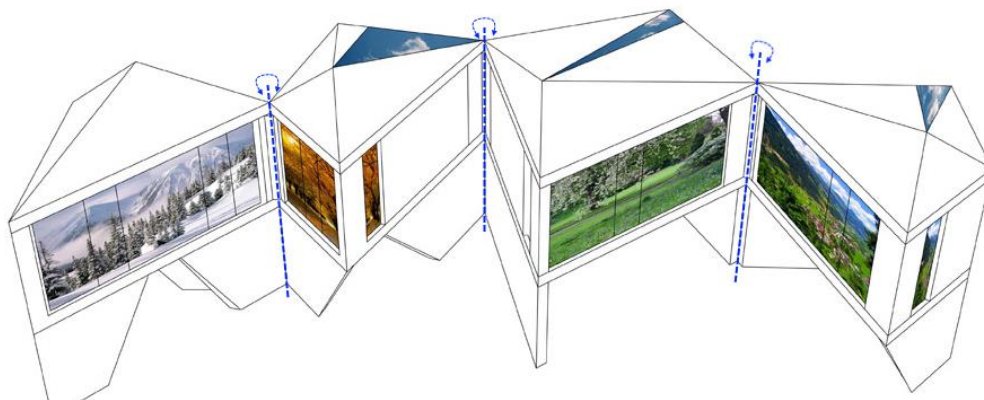
Jedná se o pohyb celého objektu, nebo jeho částí, přičemž celková forma zůstává nezměněna. Celý objekt může být přemístěn na zcela jiné místo (kamionem, lodí, nebo letecky).



Obr. 25. Proces napínání mobilní stínící membrány v zámeckém parku Hranice na Moravě – foto autor

Situační mobilita

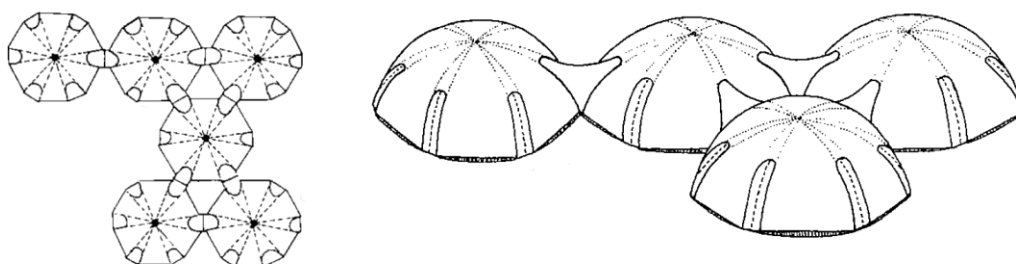
Orientace a situace celého objektu může být změněna rotací celého objektu, či jeho částí kolem svislé osy, jako například u konceptu D-Haus, kdy tak mohou obytné místnosti stále sledovat dráhu slunce. Celý objekt, nebo jeho část může být posouván, nebo měnit svoji výšku v závislosti na konkrétní potřebě.



Obr. 26. Pohyblivý koncept D-Haus [12]

Objemová variabilita

Objemová variabilita zahrnuje změnu objemu objektu. Jedná se především o přidávání či ubírání samostatných jednotek objemu v závislosti na aktuálních potřebách provozovatele objektu. (Rostoucí domy, výměnné kontejnery, či uzavřené segmenty atd.) [5]



Obr. 27. Příklad variabilních pneumatických dómů s možností modulární extenze [1]

Myšlenka variabilních objektů, které se dokážou přizpůsobit aktuálním vnějším podmínkám a aktuálním potřebám provozovatele, je patrná již v antice. V minulých stoletích byly postaveny různé typy lehkých konstrukcí, které sloužily ke stínění nebo k dočasnému zastřešení venkovních prostor. Konstrukce byly často ovládány jednoduchou soustavou kladek a řídicích lan, které umožňovaly relativně snadno měnit jejich formu. [1]

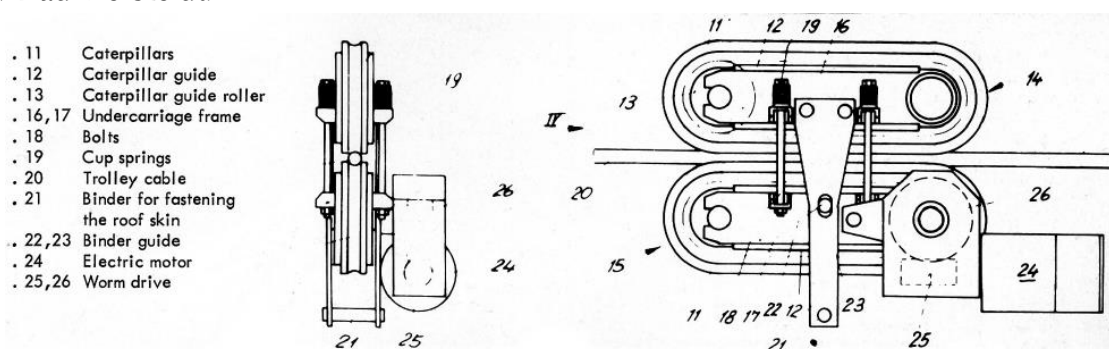
6. POHONNÉ SYSTÉMY LEHKÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ

6.1. Pohonné systémy pohyblivých jednovrstvých membrán

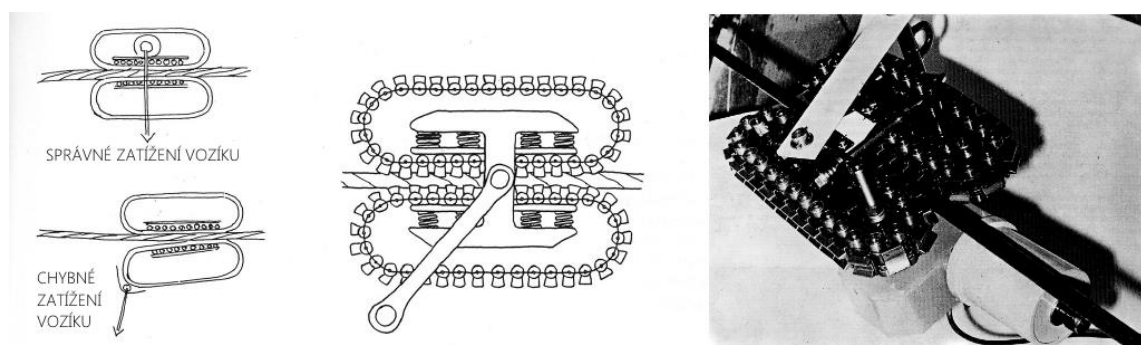
Pohonné systémy jednovrstvých membránových zastřešení můžeme rozdělit na čtyři skupiny. Systémy rozdělujeme na kladkový pohonný systém, vozíkový pohonný systém, řetězový, či zubačkový pohonný systém a kombinovaný pohonný systém, popřípadě systém hydraulický. [29] V příloze č. 1 lze nalézt příklady pohyblivých jednovrstvých i pneumatických membránových zastřešení, která byla při výzkumu studována. Jedná se především o pohyblivé jednovrstvé membránové konstrukce a pneumatické pohyblivé membránové konstrukce. V uvedených příkladech membránových zastřešení jsou v různých situacích použity všechny typy výše uvedených pohonných a napínacích systémů.

Vozíkový pohonný systém

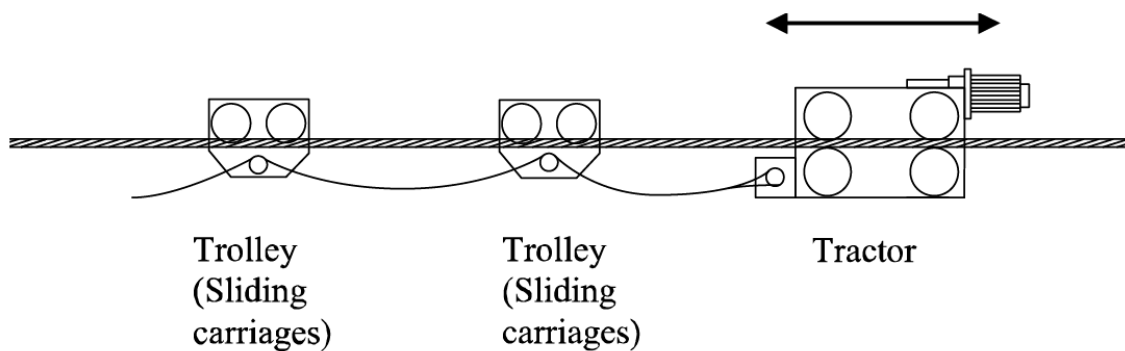
Vozíkový pohonný systém funguje na principu pojezdu kotevních bodů po vodícím lanu. Jednotlivé vozíky lanového systému mohou být opatřeny každý svým vlastním pohonem (tractor), jako membránové zastřešení nad tribunou venkovního divadla v Bad Hersfeldu.



Obr. 28. Popsaný detail lanového vozíku s elektrickým pohonem [1]



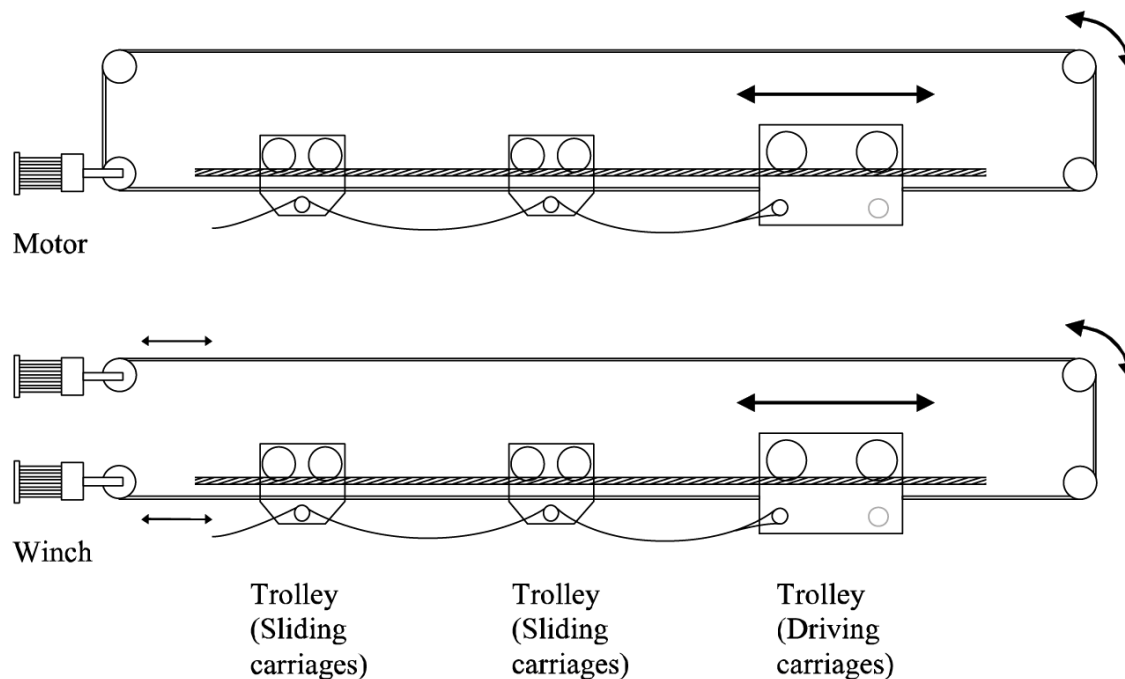
Obr. 29. Detaily a axonometrie vozíku z realizace – Bad Hersfeld [1]



Obr. 30. Schema vozíkového pohonného systému s motorem na vozíku [10]

Další variantou vozíkového pohonného systému je stacionární vozíkový systém, kdy je motor umístěn na kraji zastřešení a vozíky je pohybováno přes systém kladek pomocí nekonečného lana. Vozíky jsou v tomto případě propojeny vodičím lanem, které musí být dostatečně předepnuto a pohon po jednom radiálním laně zajišťuje pouze jeden motor. Tato varianta pohonu je použita na membránovém zastřešení víceúčelového nádoří na hradě Kufstein.

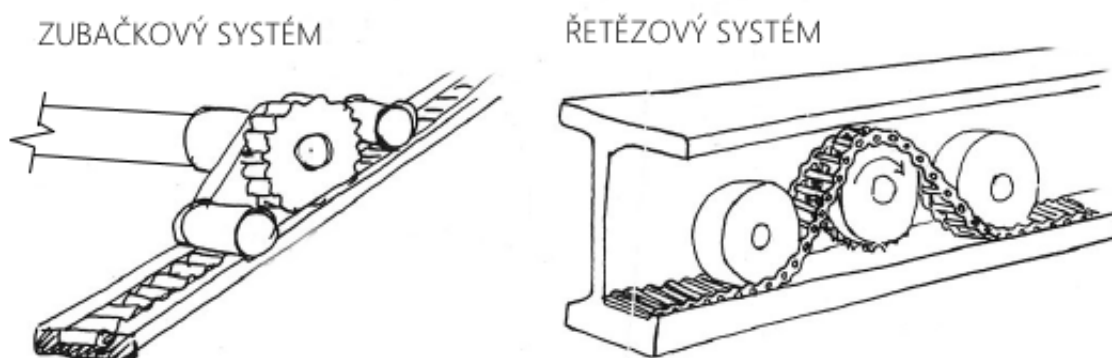
Druhou variantou stacionárního pohonného systému je pohon řídicího vozíku pomocí dvojice navijáků umístěných na okraji, nebo ve středu zastřešení. Motory jsou přímo, nebo přes převodovku napojené na navijáky a pohybu je dosaženo současným navíjením a odvíjením lana, kdy musí být oba motory elektronicky synchronizovány.



Obr. 31. Schéma vozíkového pohonného systému se stacionárně umístěnými motory. [10]

Řetězový pohonný systém nebo zubačka

Řetězový pohonný systém je použit u pohyblivého zastřešení v Ostravě Vítkovicích. Dvojice elektrických motorů pohybuje přes převodovky řetězovými smyčkami. Na každém z prostorových příhradových vazníků je na konci osazen vozík s ozubeným kolem a dvojicí pomocných válců. Vozíky se pohybují současně a je kontrolován předeběh a synchronizace. Řetězové vozíky se souběžně pohybují po jeřábové dráze z HEB profilu.



Obr. 32 Axonometrie zubačkového a řetězového pohonného systému. [1]

U řetězových, nebo zubačkových systémů je důležitá obousměrná synchronizace, aby se okraje pohybujících se konstrukcí nezkřížily, nebo nevypadly z dráhy. Synchronizaci lze zajistit pomocí synchronizačních tyčí, optickým měřením vzdálenosti, nebo elektronickým sledováním polohy manipulačního vozíku.

Ostatní pohonné systémy a jejich kombinace

Mezi ostatní pohonné systémy patří ruční pohon přes převodový systém, který umožňuje manipulaci se zastřešením pouze pomocí lidské síly, nebo pohon kombinací předešlých dvou variant s hydraulikou, která slouží k předpínání rozvinuté membrány.

6.2. Pohonné systémy pohyblivých pneumatických membránových konstrukcí

Pohonné systémy pneumatických membránových konstrukcí jsou v mnoha případech shodné jako pohonné systémy využívané u jednovrstvých membránových konstrukcí, zejména membrán, které jsou vypnuté v pevném rámu.



Nejčastěji jsou realizované systémy, kdy celá natlakovaná konstrukce pojíždí po horizontální jeřábové dráze. Jako pohonné jednotky jsou použity elektromotory s logaritmickým náběhem a poloha zastřešení je elektronicky, opticky, nebo laserově kontrolována, aby nedošlo k předběhnutí jednotlivých motorů a celý systém byl synchronizován.

*Obr. 33a Detail jeřábové dráhy
Pneumatické řetězové lomenice
Landshaft park [13]*

U mobilních příček realizovaných na výstavišti v Českých Budějovicích jsou v horní části jednotlivých segmentů ukotveny na průběžný tenkostěnný profil přes soustavu kladkových jezdců. Silonové jezdce lze po vodícím profilu ručně posouvat a roztahovat, či zatahovat tak celou mobilní příčku. Pneumatická příčka je sešita ze dvou vrstev šedé polyesterové textilie s PVC zátěrem. [14]

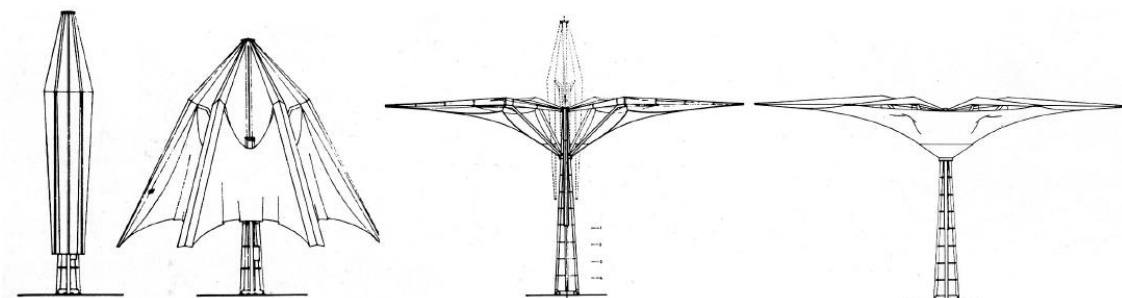


*Obr. 33 b. Detail kladkového systému pohyblivé pneumatické příčky –
výstaviště ČB. [14]*

7. Analyzované formy jednovrstvých pohyblivých membránových konstrukcí

Pohyblivé trychtýře

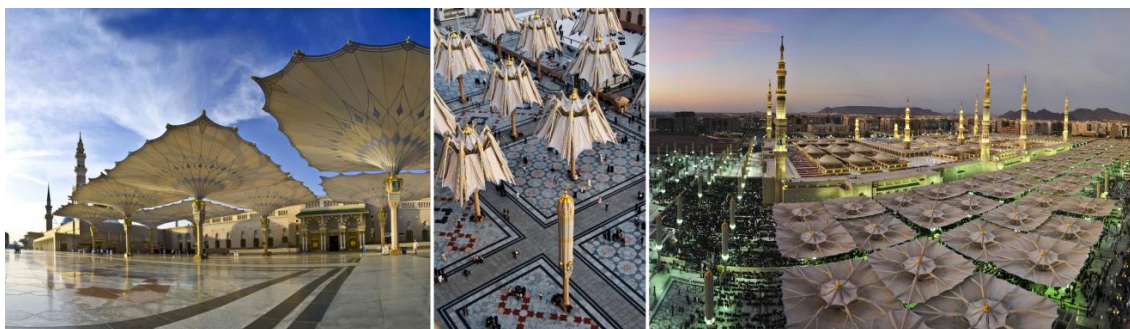
Jednou z forem, jež mohou pohyblivá membránová zastřešení nabývat, jsou dostředně stahované trychtýře. U této varianty o výsledném zakřivení plochy rozhoduje jeden střední bod, který membránu v jejím středu stahuje směrem dolů. [15] Realizovanými zastřešeními ve tvaru trychtýře jsou pohyblivá zastřešení Buga Canopie, stínící skládací trychtýře realizované na náměstí v Medině, nebo čtveřice trychtýřů realizovaných v centru města Dublin.



Obr. 34. Pohled a řez pohyblivým trychtýřem s jednovrstvou membránou [1]

Výhodou dostředně tvarované skládací membrány je její statická jednoduchost, kdy jsou všechna pohyblivá ramena napojená na středový centrální sloup, který tvoří hlavní dřík celé konstrukce. Vnější obvod skládacího trychtýře je možné tvarovat kruhový, obdélníkový nebo mírně lichoběžníkový v závislosti na zastřešovaném prostoru.

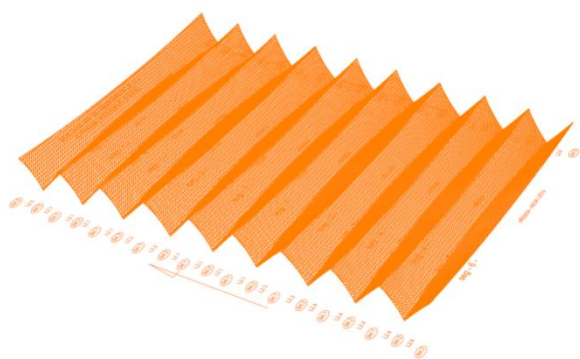
Nevýhodou pohyblivého trychtýře je fakt, že ve složeném stavu zůstane v parteru mohutný dřík sloupu se složenou membránou na jeho povrchu. Další nevýhodou pohyblivých trychtýřů jsou jejich rozměrové limity. Největší realizované trychtýře mají v průměru 16-18 metrů, a tak je nutné je navazovat do clusterů, pokud je nutné zastřešit nebo zastínit půdorys o větší ploše.



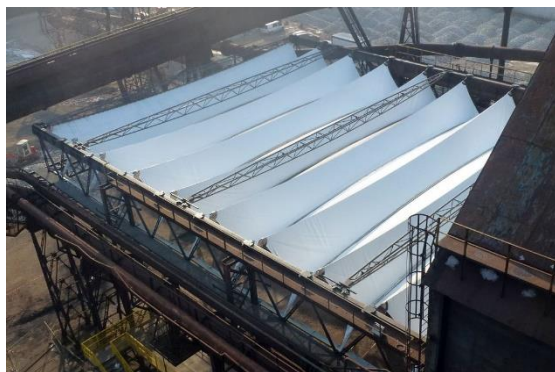
Obr. 35. Stínící trychtýře na náměstí v Medině. Celková plocha 143000 m² [16]

Pohyblivé lomenice

Další formou, kterou mohou pohyblivá zastřešení nabývat je lomenice. V této variantě jsou rohy membránového zastřešení střídavě vytahovány do horní, nebo spodní polohy, přičemž obě řady bodů většinou tvoří v půdorysném průmětu přímku. Zjednodušeně řečeno je formou pohyblivé lomenice harmonika, která se dá složit vždy k jedné předem definované straně zastřešení. Zatažením membrány se při jejím skladování dá ušetřit značná plocha, která je rovna minimálně $2/3$ roztažené plochy zastřešení.



Obr. 36. 3D model pohyblivé lomenice Ostrava Vítkovice. [17]



Obr. 37. Realizované zastřešení Colours of Ostrava [17]

Délka ve směru kolmém na hlavní rozpon je omezena pouze vhodným návrhem pohonného systému. Při větších vzdálenostech je důležité vhodným způsobem synchronizovat motory, které pohybují hlavními vozíky zatahujícími, nebo roztahujícími celé zastřešení.

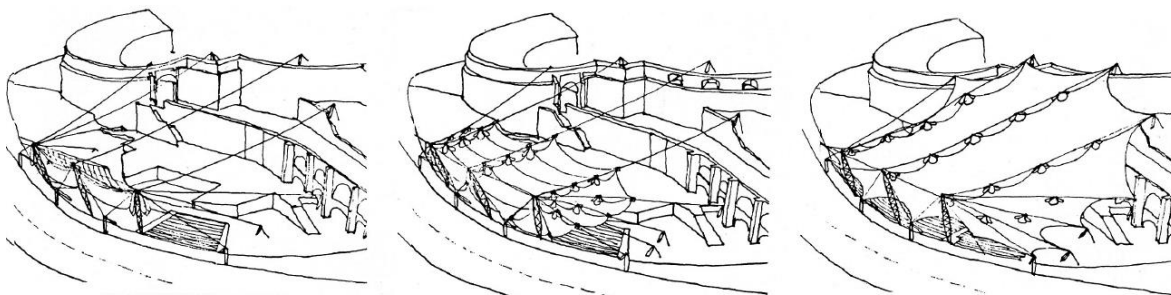
Pohyblivé membránové zastřešení ve formě lomenice se dají s výhodou použít na zastřešení obdélníkových půdorysů středních měřítek. Běžně se takto tvarované konstrukce používají na zastřešení o rozponu L_m mezi 25 až 30 metry. Ve směru kolmém na hlavní rozpon mohou být konstrukce i dvakrát delší mezi 50-60 metry.

Výhodou pohyblivého zastřešení ve tvaru lomenice je jeho dobrá integrace do stávajících půdorysných situací, a to díky jeho ortogonálnímu tvaru a možnosti zvolit si vhodnou výšku jednoho segmentu.

Při realizaci tohoto typu pohyblivého zastřešení je však potřeba počítat s prostorem pro uskladnění zastřešení ve složeném stavu. Tento prostor musí mít větší šířku než je rozpon L_m tak, aby do navrženého prostoru mohlo celé zastřešení zajet. Hloubku skladovacího prostoru lze zjednodušeně empiricky navrhovat jako $1/3$ z celkové délky zastřešení. Správná hloubka zastřešení se určuje dle výsledného rozměru membrány ve složeném stavu. Se skladovacím prostorem je potřeba počítat již při architektonické studii a vhodně vše vzájemně zakomponovat.

Libovolné formy pohybující se po radiální lanové konstrukci

Jednovrstvé pohyblivé membrány mohou být vypínány pomocí soustavy bodů, které jsou kotveny k radiální lanové konstrukci. Tento způsob návrhu pohyblivého zastřešení má výhodu v možnosti vypínat membránu přes větší množství kotevních bodů, které mohou být voleny podél trasy radiálního lana.

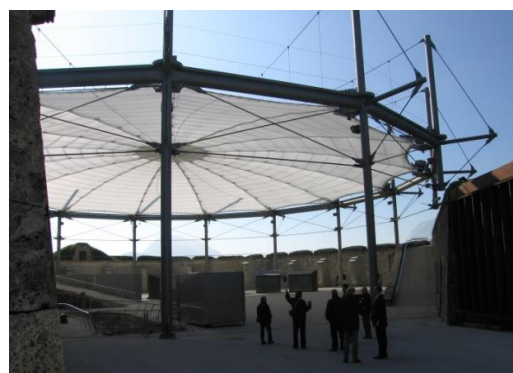


Obr. 38. Fáze pohybu membránového zastřešení s radiálními lany a excentricky zatahovanou membránou [1]

Výsledné tvary pohyblivého zastřešení tak lépe odolávají větru a okrajové podpůrné konstrukce mohou mít menší dimenze, protože jsou síly lépe rozneseny vodicími lany a nezatěžují okrajové podpory pouze v rovině membrány. Tento systém také nabízí velkou variabilitu, co se týče architektonického návrhu pohyblivé membránové konstrukce.[8]

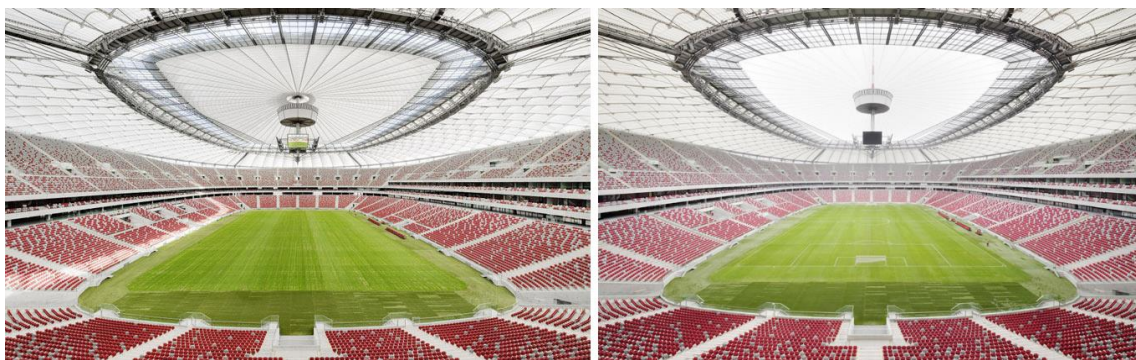


Obr. 39. Složené membránové zastřešení Kufstein [11]



Obr. 403. Roztažené membránové zastřešení Kufstein [11]

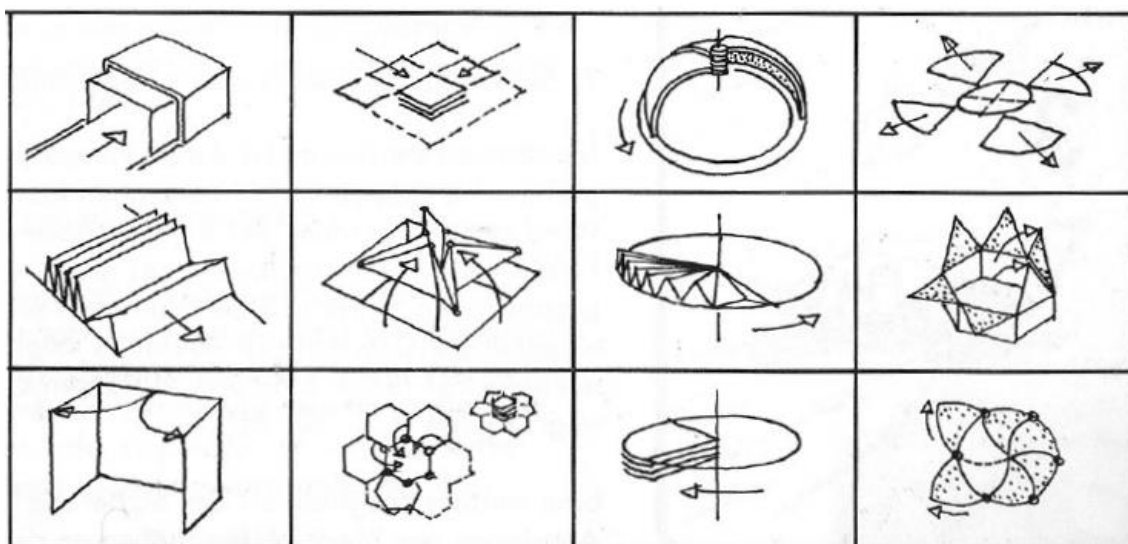
Kruhové nebo eliptické radiální lanové konstrukce jsou často používány jako nosné konstrukce pro lehká, dostředně stahovaná pohyblivá membránová zastřešení. Dostředně stahované membrány jsou s výhodou používány pro rozsáhlá zastřešení fotbalových stadionů, kdy zakrývají plochy o více než desetitisících metrech čtverečních. Tato pohyblivá zastřešení jsou především určena pro ochranu proti dešti. Zastřešení jsou nesena soustavou radiálních nerezových lan, která jsou vynášena tuhým obvodovým prstencem, a proto je není potřeba významně zakřivovat, aby se z nich v zimě správně sesouval sníh. V zimním období tyto konstrukce zůstávají zataženy.



Obr. 41. Lehké pohyblivé membránové zastřešení národního fotbalového stadionu ve Varšavě. Radiální lanová konstrukce zatahovaná do středu. [11]

Mobilní rámové konstrukce

Další možností je napnout membrány na pevné rámy a zakřivit je pomocí vložených oblouků, nebo vzpěradel. Velkou nevýhodou tohoto způsobu vypínání je nemožnost membrány složit, když nejsou potřeba, protože se v tomto případě pohybuje celá střecha, nebo její segment. Architekt pak musí v návrhu počítat s rozsáhlými skladovacími prostory, kam celé zastřešení odjede. Díky vypnutí mezi pevné rámy lze takovéto membrány navrhovat téměř stejně jako membrány pevné. Výrazný rozdíl je však v návrhu ocelové konstrukce, kdy bude při jejich návrhu potřeba brát v potaz jak statické zatížení od větru a sněhu, tak dynamické zatížení od posuvu celé konstrukce. Dimenze mobilních rámových konstrukcí jsou tak už na první pohled daleko masivnější, protože jsou ocelové konstrukce často zatěžovány kombinací všech zatížení (tahem, tlakem i ohybem) zároveň. Výhodou této varianty pohyblivých zastřešení je jednodušší řešení těsného napojení na navazující ortogonální systémy staveb.



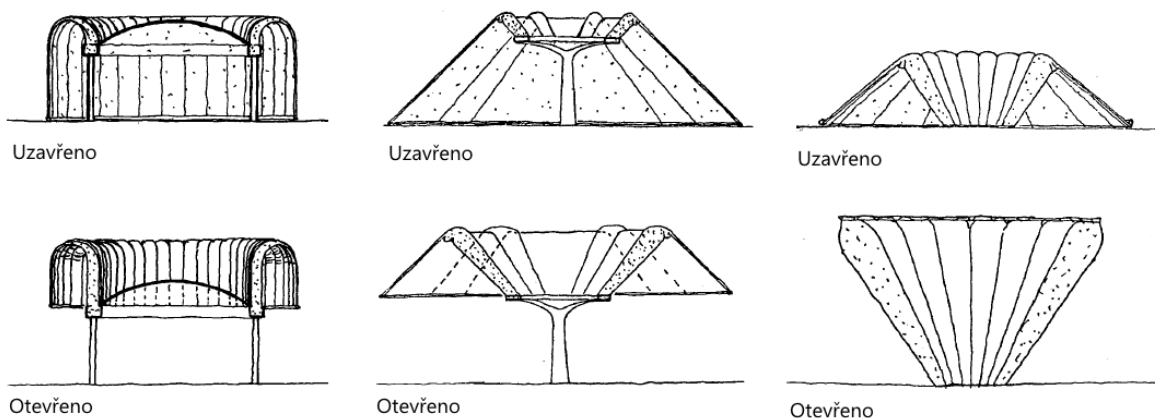
Obr. 42. Možnosti uspořádání mobilní membránové konstrukce s pevnými rámy OTTO [1]

8. Analyzované formy pneumatických pohyblivých membránových konstrukcí

Tvarové řešení pohyblivých pneumatických membránových konstrukcí může být velice různorodé v závislosti na použitém konstrukčním řešení a dispozičním řešení. Základem každé formy pneumatického pohyblivého systému je členění na menší pneumatické systémy (trubky, polštáře), díky kterým může natlakovaná konstrukce vzdorovat nahodilým zatížením. [18]

Pohyblivé válcové a kuželové formy pohyblivých zastřešení

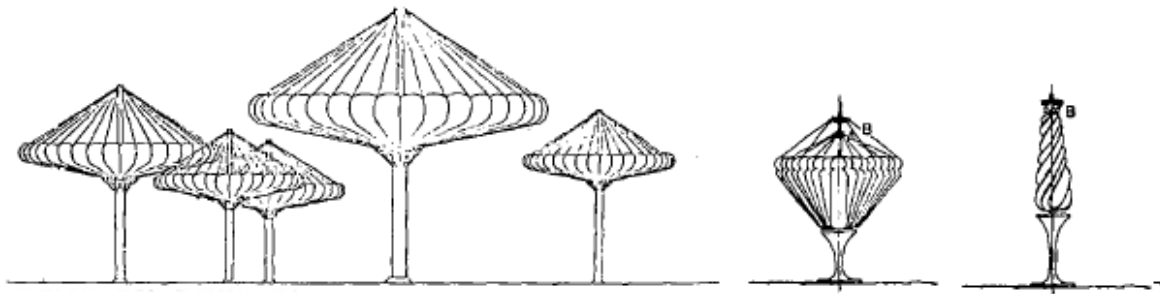
Pohyblivá pneumatická válcová zastřešení jsou skládána z paralelních polštářů, které absorbují tlaková zatížení ve směru své podélné osy. Válcové pohyblivé zastřešení je konstrukčně tvořeno dvojicí kruhových trubek o různém poloměru, mezi které jsou polštáře kotveny. Vnitřní kruh je kotven na nosnou konstrukci a zároveň slouží jako místo k vhánění vzduchu do polštářů. Podle tlaku v polštářích se membrána nafukuje a zvedá vnější oblouk, který slouží jako stabilizátor i závaží. [19]



Obr. 43. Řezy pohyblivými válcovými a kuželovými formami pohyblivých pneumatických zastřešení. [19]

Pneumatické rotační elipsoidy

Nafukovací rotační elipsoidy byly poprvé realizovány na EXPO v Osace (1970), kde sloužily pro zastřešení venkovní terasy restaurace. Struktura deštníků je rozdělena na 45 samostatných komor s příčným zakřivením 1:10. Trychtýř je skládán nahoru pomocí 45 plastových lan. [19]



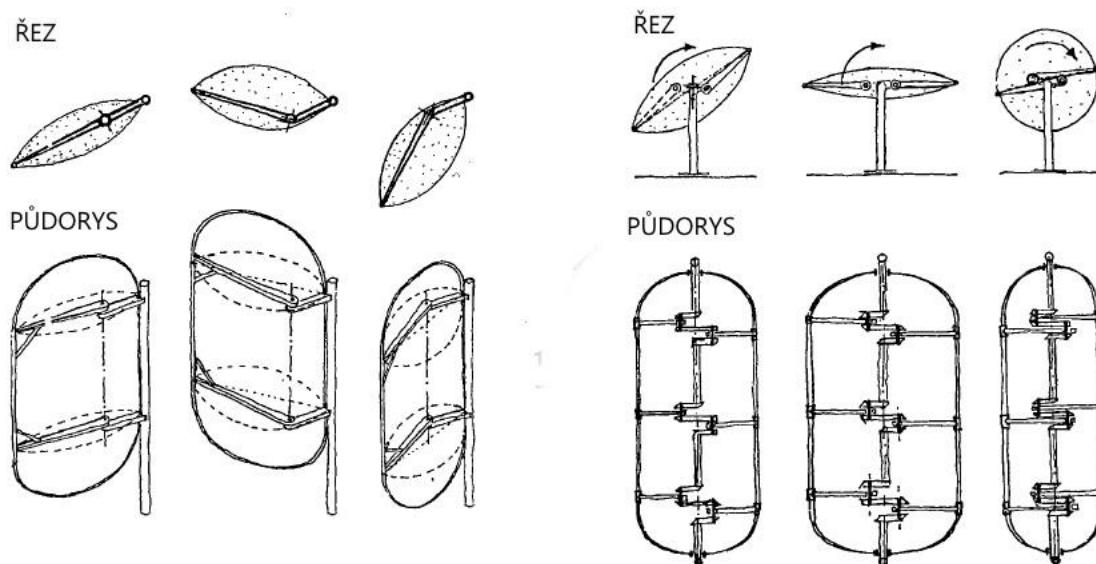
Obr. 42. Pohled na Pneumatické skládací zastřešení s fázemi skládání. [19]



Obr. 43. Rozevřené a složené pneumatické zastřešení – EXPO Osaka. [19]

Pohyblivé pneumatické konstrukce s vnitřními rameny

Další možností, jak skládat a rozkládat pneumatické konstrukce, je použití vnitřních ocelových ramen sloužících jako nosná konstrukce i rozkládací systém. [19]



Obr. 44. Schémata pohyblivých ramen uvnitř pneumaticky natlakované konstrukce. [19]

Řetězové plochy

Nejčastěji realizovanou formou pohyblivého pneumatického zastřešení je řetězová plocha. se skládá z jednotlivých polí o šířce cca 4 m. Oblíbenost tohoto typu konstrukce je zřejmá – jedná se o jednoduše uchopitelný prvek, kterým se dají vodotěsně zastřešovat pravouhlé prostory stávajících objektů, atria, ulice a další.

Pohyblivá pneumatická zastřešení ve formě řetězových ploch jsou tvořena systémem extrudovaných hliníkových profilů, které jsou součástí nosné konstrukce. Do tohoto rastru je po obvodě vzduchotěsně uchycena zdvojená folie nebo textilie. Do vzniklé dutiny je vháněn vysušený vzduch, který vytváří přetlak cca 220 Pa. Přetlakem stabilizovaný polštář odolá zatížení větrem i sněhem.

Jednotlivá pole pohyblivého zastřešení jsou na sebe kloubově napojena a celé zastřešení pojíždí po jeřábové dráze, jako je tomu např. v Landshaftparku – Duisburg Nord. [20]



Velkou výhodou vícevrstvých ETFE systémů je jejich tepelná izolace, která je závislá na počtu použitých vrstev fólie.

Jednotlivé fólie se navíc dají potisknout vzory, které díky přefukování jednotlivých potištěných vrstev mezi sebou fungují jako žaluzie.

Natlakované polštáře mají čočkovitý tvar, jehož ideální zakřivení je 1/10 rozponu polštáře (při rozponu do 5 metrů 1/8–1/6 při větších rozponech. [11]

Obr. 45. Pohyblivé řetězová plocha z pneumatických ETFE polštářů. Landshaftparku – Duisburg Nord [21]

Celkový dojem z atria zastřešeného pomocí ETFE fólií působí lehce díky řádově subtilnější podkonstrukci. Pocitově působí atrium jako otevřené a když se do parteru vhodně zakomponuje vzrostlá zeleň s parkovou úpravou, je idea lehkého zastřešení dokonalá. Z tohoto důvodu se při použití transparentní ETFE fólie často upouští od původně zamýšlené pohyblivé varianty. Transparentnost fólií je tak vysoká, že je pozorovatel zastřešení téměř nevnímá a lehce opalizující nádech ETFE fólií je naproti modré obloze zanedbatelný.

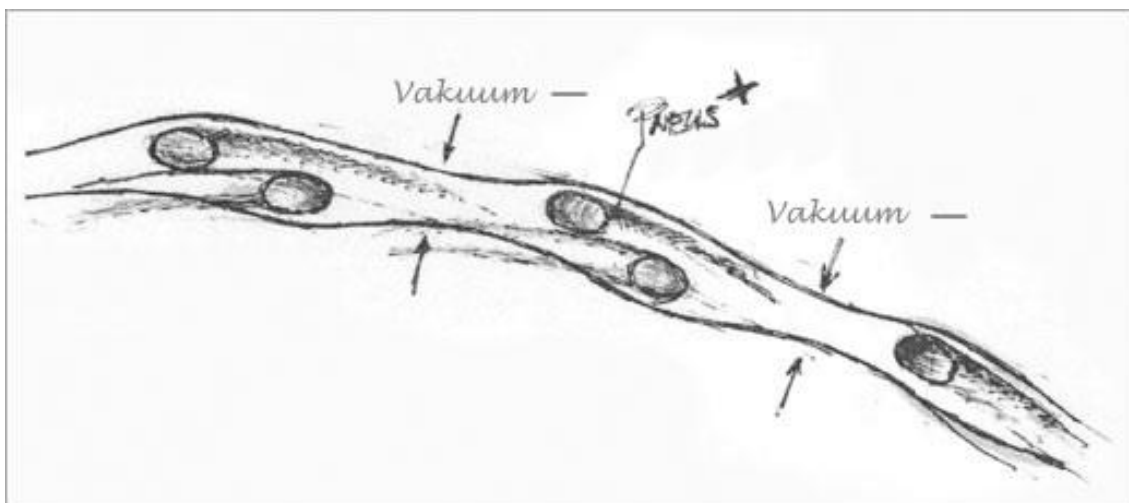
Mobilní pneumatické konstrukce typu gridshell

Architektonický tým Plusminus z university Stuttgart, jehož vedoucím je Dipl.-Ing. Jürgen W. Hennieke ve spolupráci s firmou Planex-Gmbh, vytvořil prototyp pneumatického gridshellu, který může být díky své váze a konstrukci snadno postaven a složen kdekoliv na světě. Jde o unikátní prototyp mobilní dočasné konstrukce, která může sloužit k mnoha účelům.

Dřevěné tlačné pruty tradičního gridshellu zde byly nahrazeny trubicemi svařenými z fólie. Trubice jsou z obou stran po celé ploše zakryty průhlednou fólií a ve chvíli, kdy se trubice nafouknou, vytvoří se mezi fóliemi vakuum, které stabilizuje zkřížené trubice proti sobě a celá konstrukce se tak stane odolná proti zatížení větrem. [22]



Obr. 46. Pohled na natlakovaný pneumatický gridshell + detail zakončení pneumatické trubice. [22]



Obr. 47. Skica principu přetlaku a podtlaku v systému. [22]

5.1.6 Pneumatické pohyblivé příčky

Pneumatické pohyblivé příčky

Pneumatické membrány se také dají využít k členění vnitřních prostor. Pneumatické pohyblivé příčky jsou realizovány na výstavišti v Českých Budějovicích, kde je mobilní pohyblivou nafukovací stěnou rozčleněn hlavní výstavní prostor na dvě části, nebo kongresové centrum BVV v Brně, kde jsou pomocí mobilních pneumatických stěn členěny přednáškové sály.



Obr. 48. 4 Pneumatické příčky výstaviště
ČB; VENTUS [14]



Obr. 5. Pneumatické příčky konferenční sál BVV; VENTUS [14]

Aby byly velké plochy mobilních stěn opticky i funkčně rozčleněny, jsou prošity tak, aby tvořily čtvercový rastr. Výsledný vzhled mobilní pneumatické dělicí konstrukce souzní s trapézovým plechem použitým na podhledu střechy i s litou betonovou podlahou.

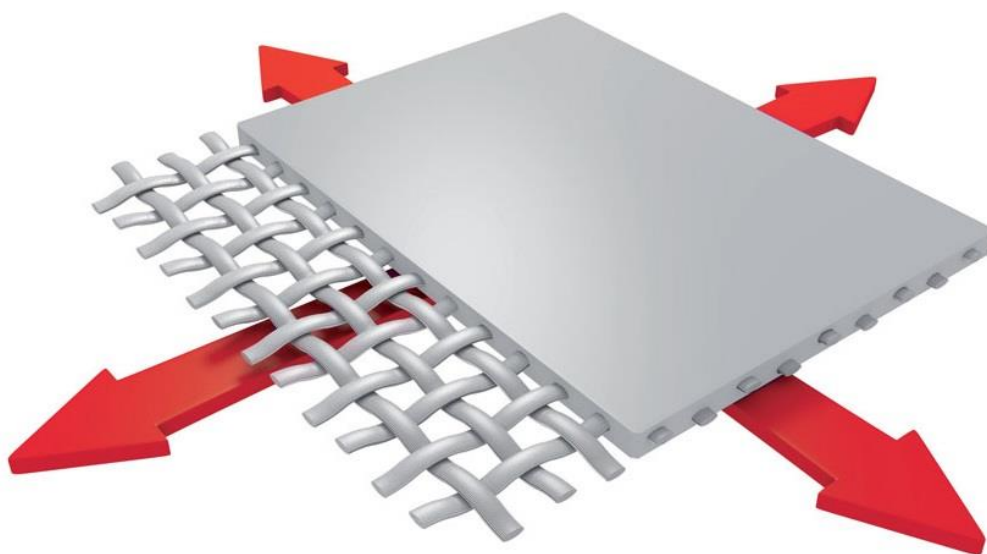
9. Materiály používané na pohyblivá membránová zastřešení

Lehká anizotropní membrána

Tkaná textilní struktura s velkou odolností v tahu (od cca 700 do 10 000 N/5 cm ve směru vláken). Aby byla zajištěna dlouhodobá stálost materiálu, je matrice zalita do souvrství PTFE nebo PVC materiálu. V případě PVC zátěru je ze strany, která přichází do kontaktu se slunečním zářením, ošetřena ochrannou vrstvou proti UV záření. Využívá se pro předepnutá velkorozponová zastřešení.

Vysoké odolnosti membrán v tahu je využíváno ve stavebnictví a architektuře pro zastřešování, stínění i k dalším účelům. Materiály jsou označovány jako textilní membrány, textilní síťoviny nebo plachty. Při montáži se napínají mechanicky, nebo přetlakem vzduchu. Pokud jsou membrány vypínány mechanicky, je způsob jejich zakřivení obvykle protisměrný, zatímco membrány vypínané vnitřním přetlakem vzduchu mají způsob zakřivení stejnosměrný. Nosná textilní matrice zalitá uvnitř vrstvy odlišuje materiál textilních membrán od izotropních fólií. [9]

Výhodné vlastnosti membrán jsou jejich nízká hmotnost (od 450 do 1500 g/m²), extrémní odolnost v tahu a dobrá odolnost materiálu proti vlhkosti a vnějším vlivům. Nevýhodou jednovrstvých textilních membrán je nízká izolační schopnost tenké vrstvy materiálu. [11]



Obr. 50. Detail polyesterové textilní membrány s PVC zátěrem [9]

Polyesterové textilie nebo síťoviny s PVC/PVDF zátěrem

Polyesterová tkanina se zátěrem z PVC a zalakováním z PVDF je nejrozšířenějším materiálem, který se používá po celém světě pro membránová zastřešení. Průsvitnost materiálu se pohybuje kolem 15 % a materiál lze probarvovat širokým spektrem odstínů dle vzorníků PANTONE. Výhodou tohoto materiálu je jeho nízká cena a přiměřená odolnost vůči tvorbě skladů a únavových lomů, které by mohly vzniknout při skladování složeného zastřešení. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho horší samočisticí schopnost a křehnutí při dlouhodobém vystavení UV záření (nad 20 let).

Materiál je nesnadno hořlavý (B-s2, d0/EN 1350-1) a neodkapávají z něj hořící částice. Průměrná pevnost v tahu v osnově a útku je u materiálu Precontrain od 300/300 do 900/1000 daN/5 cm. Smyková pevnost pak od 30/30 po 180/180 daN. Tloušťky materiálu se pohybují od 0,5-1,5 mm. [23]

PVC – Polyvinyl chlorid; PVDF – Polyvinylidene fluorid

Polyesterové textilie nebo síťoviny s PVC/TiO₂ zátěrem

Pokročilé zalakování pomocí TiO₂ na polyesterové membrány s PVC zátěrem zušlechťuje povrch materiálu tak, že má lepší samočisticí účinky. Díky chemické reakci, kterou spouští sluneční záření, déšť a zalakování TiO₂ má zastřešení shodné samočisticí schopnosti jako zastřešení z PTFE + skelné matrice, a to při zachování výhod, parametrů a únosnosti materiálu polyester-PVC. Jedná se o novou technologii, která zaplňuje mezeru mezi PVC/PVDF a PTFE membránami.

TiO₂ – Oxid titaničitý

Skelné tkaniny s PTFE zátěrem

Skelná matrice potažená vrstvou PTFE (Teflon). Protože je vnitřní matrice i vnější potah zcela nehořlavý, je tento materiál používán k zastřešování veřejných prostor, stadionů a náměstí, kde vyhoví na striktní požadavky z hlediska požární odolnosti. Materiál má vynikající samočisticí schopnost díky teflonovému potahu a s tím související dlouhou životnost. Materiál se nesmí sešívát a lámat, protože pokud do skelné matrice vnikne vlhkost, skelná vlákna začnou degradovat a snižuje se tím únosnost materiálu. Tunely s obvodovými lany jsou zde proto nahrazeny přítlačnými lištami se sponami a odsazeným lanem. Tento materiál není pro realizaci pohyblivých membránových zastřešení vhodný.

PTFE – Poly-tetra-fluor-etylen

PTFE tkaniny se zátěrem a bez zátěru

Matrice z PTFE vláknem potažená vrstvou PTEF můžeme považovat za nejkvalitnější a nejdražší variantu materiálu, který lze pro realizaci pohyblivých membránových zastřešení použít. Vnitřní nosná matrice i vnější potah jsou z teflonu a zcela nehořlavé. Tento materiál je používán k mobilnímu zastřešování veřejných prostor, stadionů a náměstí, kde vyhoví na striktní požadavky z hlediska požární odolnosti. Materiál má vynikající samočistící schopnost díky tomu, že je jeho hlavní složkou teflon a s tím související dlouhou životnost. Materiál má také ideální vlastnosti pro skládání.

Flexibilní syntetické polyamidové textilie s PVC zátěrem.

Paralelně s relativně tuhými materiály pro permanentní celoroční použití ve stavebnictví se vyvinul flexibilní polyesterový materiál, který má vysokou tažnost v osnově i útku při zachování téměř nulového paměťového efektu při opětovném složení konstrukce. Materiál Flex se vyrábí v gramážích od 450 g/m² (Q1) po 750 g/m² (Q3). Výrobce u materiálu Q3 deklaruje permanentní využití u menších realizací do 200 m². Výhodou materiálu je jeho příznivá cena a snížená náročnost při návrhu a realizaci zastřešení. Nevýhodou materiálu je jeho limitující pevnost, která omezuje možnosti využití pouze u zastřešení s rozponem $L_{m_{max}}=10$ m.

Mechanické vlastnosti materiálů pro jednovrstvé variabilní membránové konstrukce

Tkanina / Zátěr		Hmotnost [g/m ²]	Třída reakce na oheň *	Pevnost v tahu (osnova / útek) [N/50mm]	Odolnost proti přetržení ve smyku [N] (osnova / útek)	Životnost	Cena materiálu**
Polyamid /PVC	Typ I	450	M2	700/700	nezjištěno	5-15 let	10-25%
	Typ II	560	B1	1000/1000	nezjištěno	5-15 let	10-25%
	Typ III	750	B1	1250/1250	nezjištěno	5-15 let	10-25%
Polyester /PVC	Typ I	750	B1	3000/3000	300/300	15-20 let	15-45%
	Typ II	900		4200/4000	500/500		
	Typ III	1100		5800/5400	850/800		
	Typ IV	1300		7500/6500	1200/1200		
	Typ V	1450		10000/9000	1800/1800		
Polyester /THV	Typ I	1150	B1	3500/3000	700/700	nedostatek	60-140%
	Typ II	1200		5000/4500	600/600	validních dat	
PTFE tkanina Se zátěrem		1080	B1	4000/4000	798/752	>30 let	100-140%
PTFE tkanina Bez zátěru		320	B1	2000/2050	365/330	>40 let	120-170%
		530		S1-d0 (EN 13501)	4000/3700		

* Materiály zatříděny dle DIN 4102

** Srovnáváno s průměrnou cenou PTFE/sklenná vlákna (100%)

Obr. 51. Tabulka vlastností jednovrstvých membrán doplněná o materiál Flex. [10]

Izotropní fólie

Izotropní fólie jsou zcela jiným materiálem než membrány. Fólie je tenká extrudovaná homogenní vrstva bez vložené vnitřní nosné matrice. V pohyblivé membránové architektuře jsou nejčastěji používány fólie z ETFE – Ethyl-tetra-fluor-ethylenu.

ETFE fólie

Tento materiál byl poprvé použit v kosmickém programu. ETFE fólie poskytuje vynikající samočisticí vlastnosti a vysokou propustnost celého světelného spektra včetně UV záření, které se pohybuje mezi 83-97 %.

Protože je výsledkem chemické struktury obsahující uhlík a fluorid materiál s komerčním označením teflon, nevykazují první realizace staré více než 40 let téměř žádné známky opotřebení.

Materiál je nesnadno hořlavý a neodkapávají z něj hořící částice – třída reakce na oheň B – s1, d0 / EN13823. Pevnost fólie v tahu je 40 N/mm². Materiál je houževnatý, jeho průtažnost před přetržením je 300-400 %, proto je ideální pro použití při realizaci pneumatických membránových zastřešení ve veřejných objektech. [21]

Jako materiál pro pneumatická zastřešení ve formě řetězových ploch se většinou používají ETFE fólie. Díky unikátní fyzikální vlastnosti, která umožňuje propouštět až 94-97 % viditelné světelné složky (380 - 780nm) a 83-88 % UV záření mohou pod zastřešením růst stromy a lze se pod ním opalovat.



Obr. 52. Probarvené ETFE folie na fasádě – Strahovský zeměděp. Vizo. autor

Fólie je čirá, s lehkým opalizujícím nádechem a s výhodou se používá pro velkorozponová zastřešení atrií. Realizovaný polštář z vícevrstvé ETFE folie je velice lehký – jeho hmotnost se pohybuje mezi 13gk/m². ETFE folie je možné realizovat v pestré škále barev a mohou být potištěny libovolným vzorem. Standartní třívrstvý polštář z EFTE má hodnotu prostupu tepla U=1,96w/m²°K

	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 [um]	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	vyšoká	vyšoká
prostupnost světla [%]	> 90	80 – 93	80 – 90	> 90
dostupné varianty	průhledná, bílá, různé barvy, možnost potisku	průhledná	průhledná, bílá	standartně bílá, možnost ostatních barev

Obr. 53. Tabulka vlastností nejpoužívanějších fólií. [9]

Svařování materiálů ze stříhů

Všechny výše uvedené materiály se svařují vysokou frekvencí (HF-technology). Při vysokofrekvenčním svařování dochází ke spojení materiálu pomocí vysokého tepla a tlaku. Tímto způsobem lze spojovat pouze termoplasty s polárním uspořádáním molekul. Při umístění materiálu do přístroje se začnou pohybovat a tím se materiál zahřívá. Ohřátý materiál se následně prudce stlačí a zchladí, čímž se vytvoří pevná chemická vazba. Dalším způsobem, který dosahuje cca 80% pevnosti, je ohřát materiál topným tělesem na 340° a oba povrchy k sobě přitisknout pod tlakem 50 N/cm².



Obr. 54. Ukázka průmyslového stroje určeného pro svařování vysokou frekvencí [11]

10. ARCHITEKTONICKÝ NÁVRH A SIMULACE SKLÁDÁNÍ POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ

Pro správnou analýzu pohybu pohyblivých membránových konstrukcí je důležité mít možnost si ověřovat jejich pohyb ve více fázích, a to ideálně v reálném čase. Takovou možnost nám poskytuje buď správně navržený podrobný fyzický model, nebo model digitální. Výhodou fyzického modelu je jeho názornost. Nevýhodou fyzického modelu je vysoká pracnost a snížení možnosti iterace výsledného návrhu. Proto je fyzický model vhodné zhotovovat až v pozdějších fázích architektonického návrhu, kdy už jsou základní otázky tvaru, segmentace a pohonného systému membránového zastřešení vyřešeny

Jako vhodný nástroj pro ověřování prvních konceptů je výhodné používat dostupné programy pro parametrické 3D modelování. Výstupy z programů je možné použít jak pro simulace pohybu pohyblivých membránových zastřešení, tak pro jejich následné vizualizace a video-prezentace ve vysoké kvalitě.

V další části disertační práce se autor zaměří na popis provázání jednotlivých programů a pracovního work-flow pro návrh, simulaci, analýzu a prezentaci lehkých pohyblivých membránových konstrukcí.

Návrh algoritmu pro architektonické navrhování jednovrstvých membrán v programu Rhino Ceros a pluginu Grasshopper

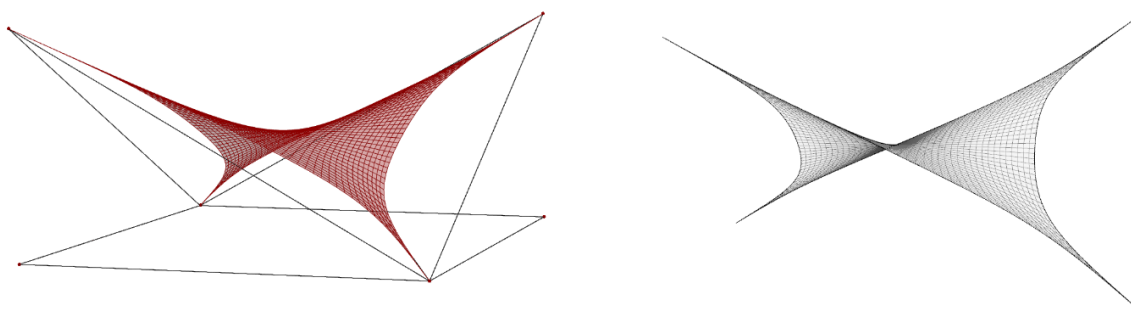
V první části návrhu lehkého pohyblivého membránového zastřešení je nutné si podle požadavků investora a výsledných okrajových podmínek, které vychází z konkrétního zadání, vhodně definovat výsledný tvar membrány. Pro architektonický návrh je možné použít program Formfinder, který vyvíjí rakouský architekt Robert Roithmayr. [24] V programu Formfinder si po importování okrajových bodů v *.dxf formátu architekt může velice rychle a intuitivně zadat požadovaný tvar membránového zastřešení včetně předpětí a tvaru obvodových lan nebo pevných rámu. Tento program je však specializován výhradně pro architekty, kteří se zabývají membránovými zastřešeními na plný úvazek, a kde je nutné použít další DCC software pro následné části architektonického návrhu. (Autocad a podobně). Pro účely disertační práce a zejména pro studenty a odbornou veřejnost autor vytvořil parametrické algoritmy v pluginu pro program Rhino Ceros 7. [25] Parametrický objektový modelovací plugin Grasshopper přináší architektům a inženýrům již řadu let možnost parametrického 3D modelování a simulace nepřeborného množství problémů, které se ve standartním ve 3D prostředí vytváří velice složitě a zdlouhavě.

Díky široké komunitě uživatelů a open-source povaze většiny přídavných modulů lze program Grasshopper rozšířit do takové míry, že může částečně nahrazovat robustní softwarová řešení. Zásadním problémem tohoto programu je skutečnost, že tvorba komplexních algoritmů je náročná na čas, a především na následné testování a ověření korektnosti získaných výsledků. Po vytvoření a důkladném otestování algoritmu se však projeví jeho veliká síla v podobě rychlé iterace různých variant návrhu pouze změnou základních vstupních parametrů.

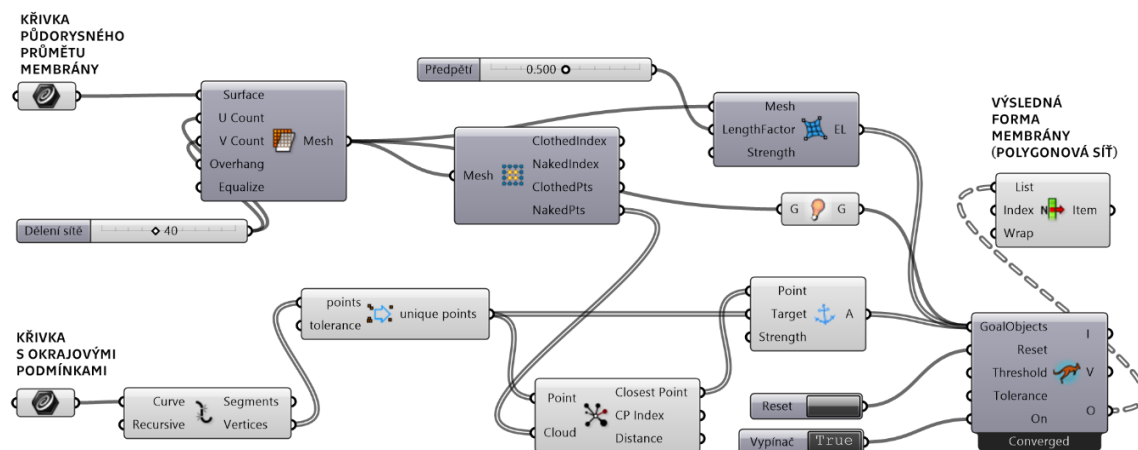
Na základě zkušeností s parametrickým modelováním autor vytvořil čtyři algoritmy, které pouze zadáním vstupních okrajových podmínek vygenerují předběžný tvar membránového zastřešení. Výsledná vygenerovaná síť se dá dále použít pro účely vizualizace nebo simulace v dalších programech. Naprogramované algoritmy se dají stáhnout na webových stránkách autora a jsou přílohou této disertační práce. Pro správnou funkci algoritmů je zapotřebí nainstalovat program Rhino Ceros 7, jehož součástí je již zmíněný plugin Grasshopper. Dále z webové stránky www.food4rhino.com stáhnout fyzikální plugin Kangaroo 2 [26] a dle pokynů v readme jej nainstalovat do Grasshopperu.

Jednoduchá bodově kotvená membrána (hypar)

Základním tvarem membránových zastřešení je bezesporu hyperbolický paraboloid, kde je výsledná membrána kotvená v minimálně čtyřech bodech. Jako úvodní algoritmus byl právě proto vyhotoven parametrický návrh membrány této formy.

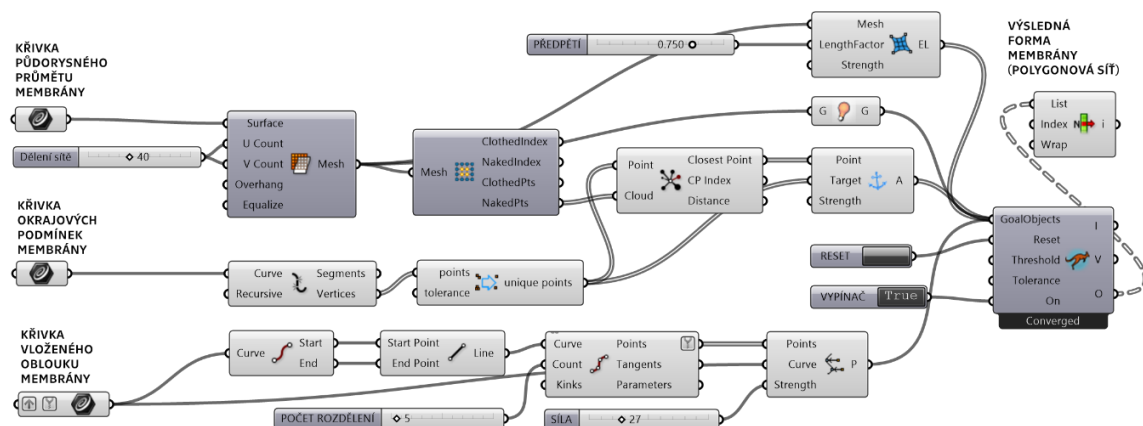


Obr. 55 a 56 Parametrická funkce a vizualizace bodově kotvené membrány

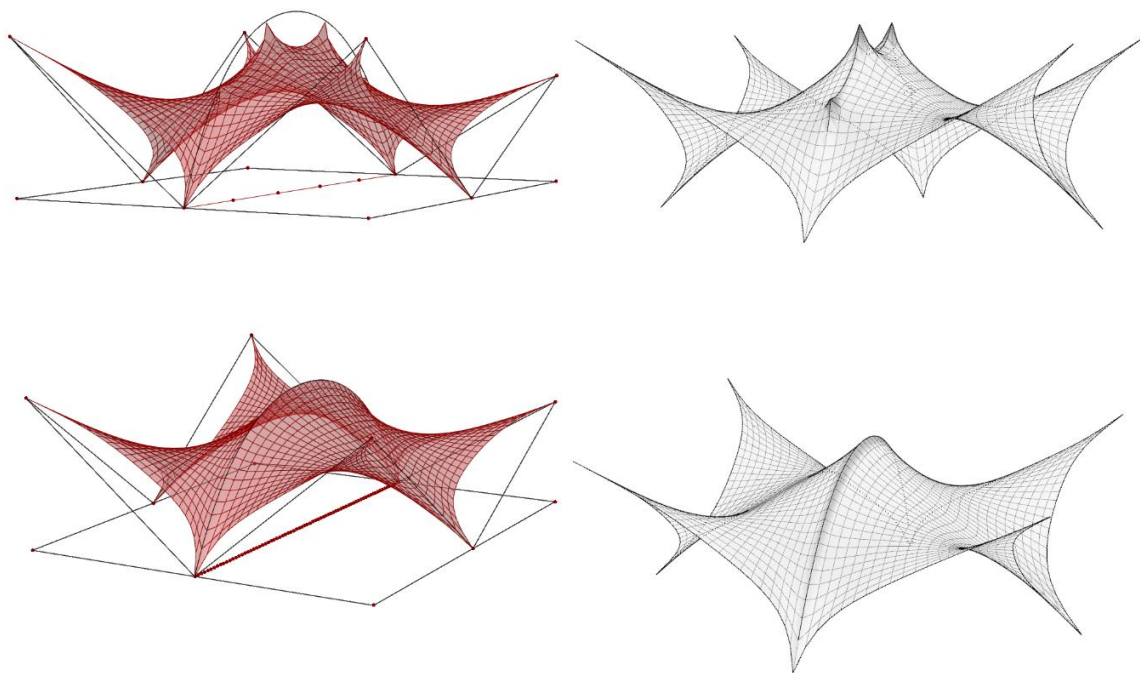


Bodově kotvená membrána s vloženým obloukem

Složitějším tvarem, který byl parametricky definován, byla bodově kotvená membrána s vloženým vnitřním obloukem. Na této variantě jsou simulovány jak samostatná bodová kotvení, tak liniová kotvení konstrukce. Pozice kotevních bodů, počet kotevních bodů na oblouku a tvar vloženého oblouku lze navíc měnit a generovaná plocha membrány se novým vstupním parametrem ihned přizpůsobí. Parametrickou definici lze stáhnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>



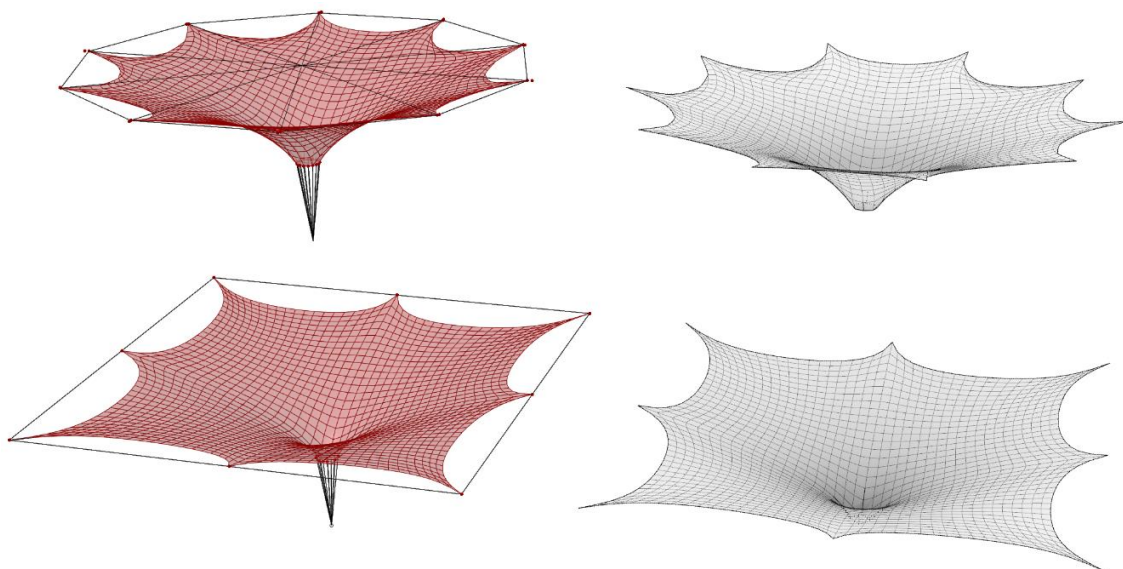
Obr. 57. Parametrická funkce bodově kotvené membrány s vloženým obloukem



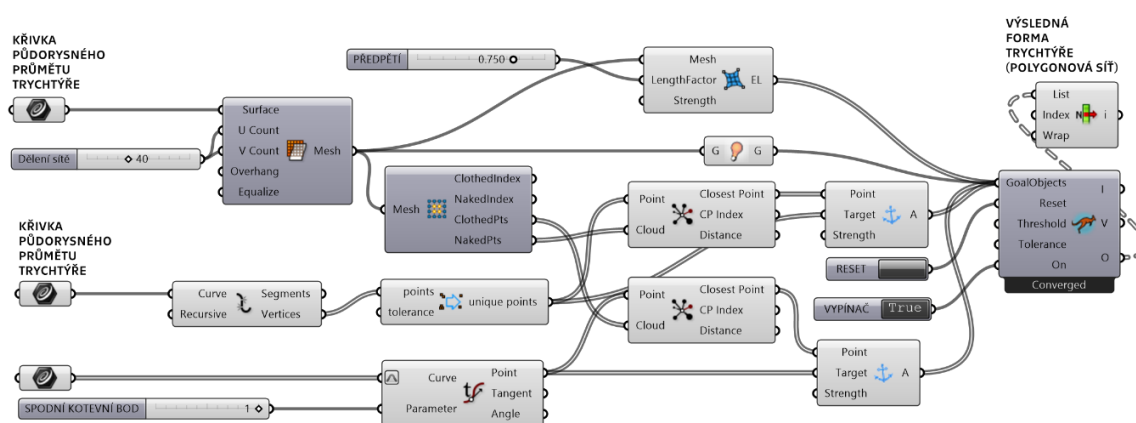
Obr. 58. Vizualizace bodově kotvené membrány s vloženým obloukem

Čtvercový a kruhový trychtýř

Další variantou lehkého membránového zastřešení zvolenou pro parametrizaci byl středově souměrný trychtýř v kruhové i čtvercové variantě. Tato forma membrány se často používá pro lehká pohyblivá membránová zastřešení a algoritmus níže byl podkladem pro následující fázi simulace skládání jednovrstvé pohyblivé membrány v programu Blender. Definici lze stáhnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>



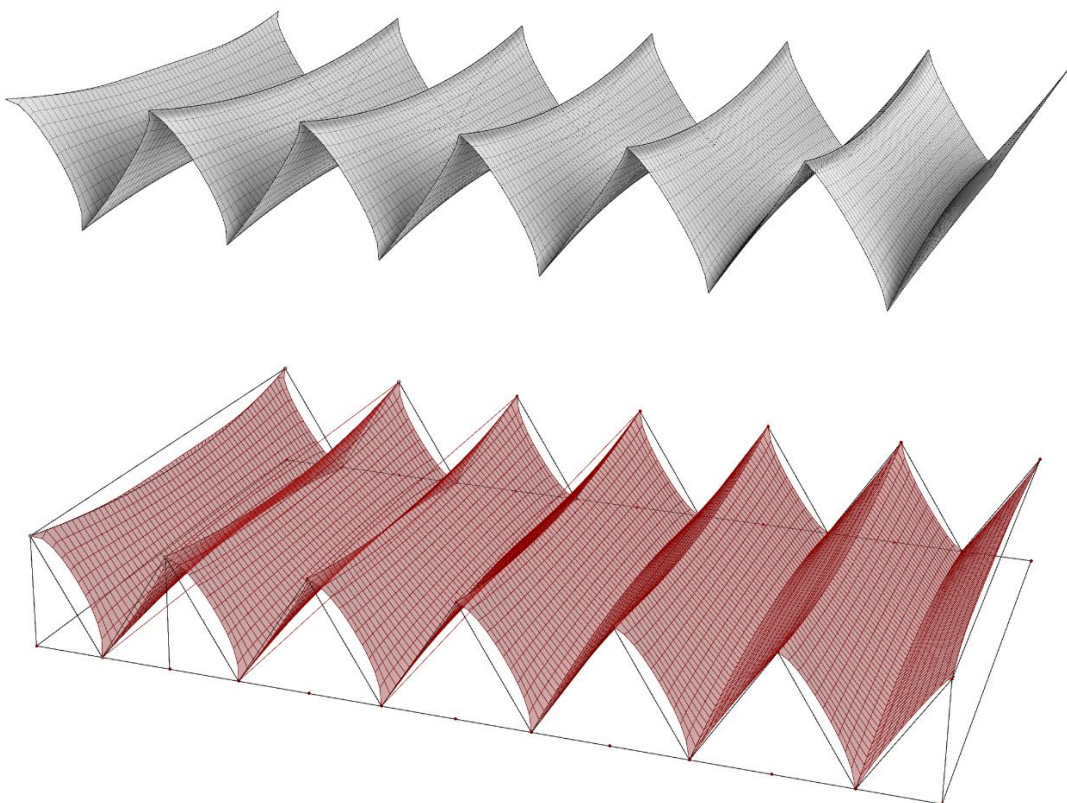
Obr. 59. Vizualizace čtvercového a kruhového trychtýře



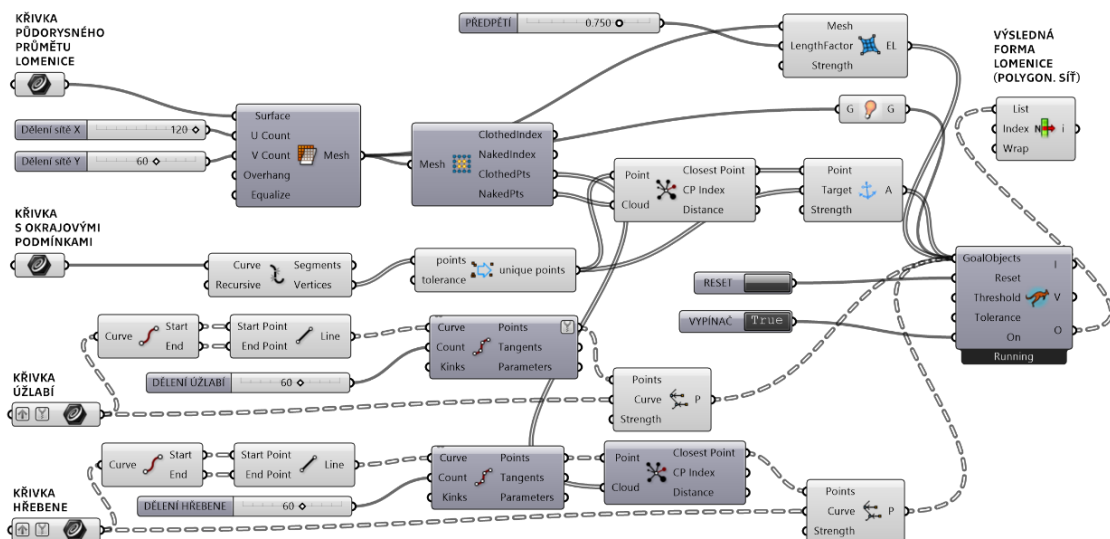
Obr. 60. Parametrická funkce čtvercového a kruhového trychtýře (výsledný tvar závisí na vstupních křivkách)

Jednovrstvá membránová lomenice

Závěrečnou variantou pro parametrizaci jednovrstvé membrány byla lomenice. Tento typ membránového zastřešení je často používán v jeho pohyblivé variantě, ačkoliv se jeho forma na první pohled jeví jednoduše, byla parametrizace této plochy složitější než předcházející příklady. Okrajové podmínky jsou definovány zubatou obvodovou křivkou, která definuje výšku všech vln výsledné lomenice a zároveň její kotevní body. Dále bylo potřeba zvlášť nadefinovat hřebenová a úžlabní lana, která tvarují zastřešení v poli. Tato definice dále sloužila jako podklad pro simulaci skládání pohyblivé jednovrstvé lomenice v programu Blender. Parametrickou definici lze stáhnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>



Obr. 61. a 62. Parametrická funkce membránové lomenice a její vizualizace



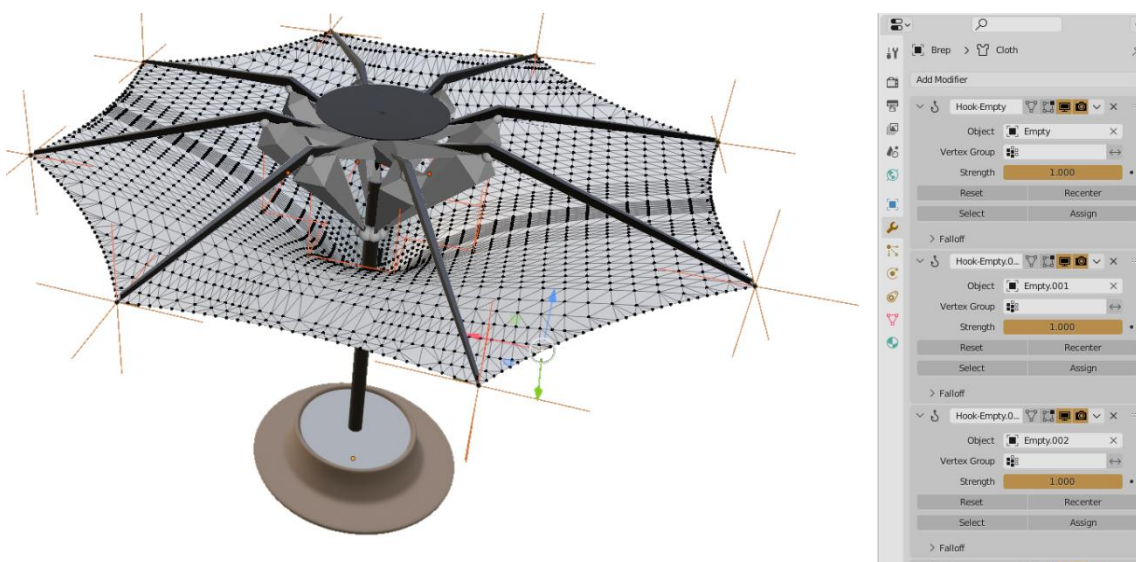
10.1. SIMULACE LEHKÝCH POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ V PROGRAMU BLENDER

Následujícím krokem v návrhu pohyblivých membránových konstrukcí byly prvotní vizualizace a simulace pohybu a skládání membrány. Při výzkumu, který byl součástí grantu SGS: Parametrické modelování pohyblivých membránových konstrukcí, byl pro simulace skládání pohyblivých membránových zvolen program Blender.

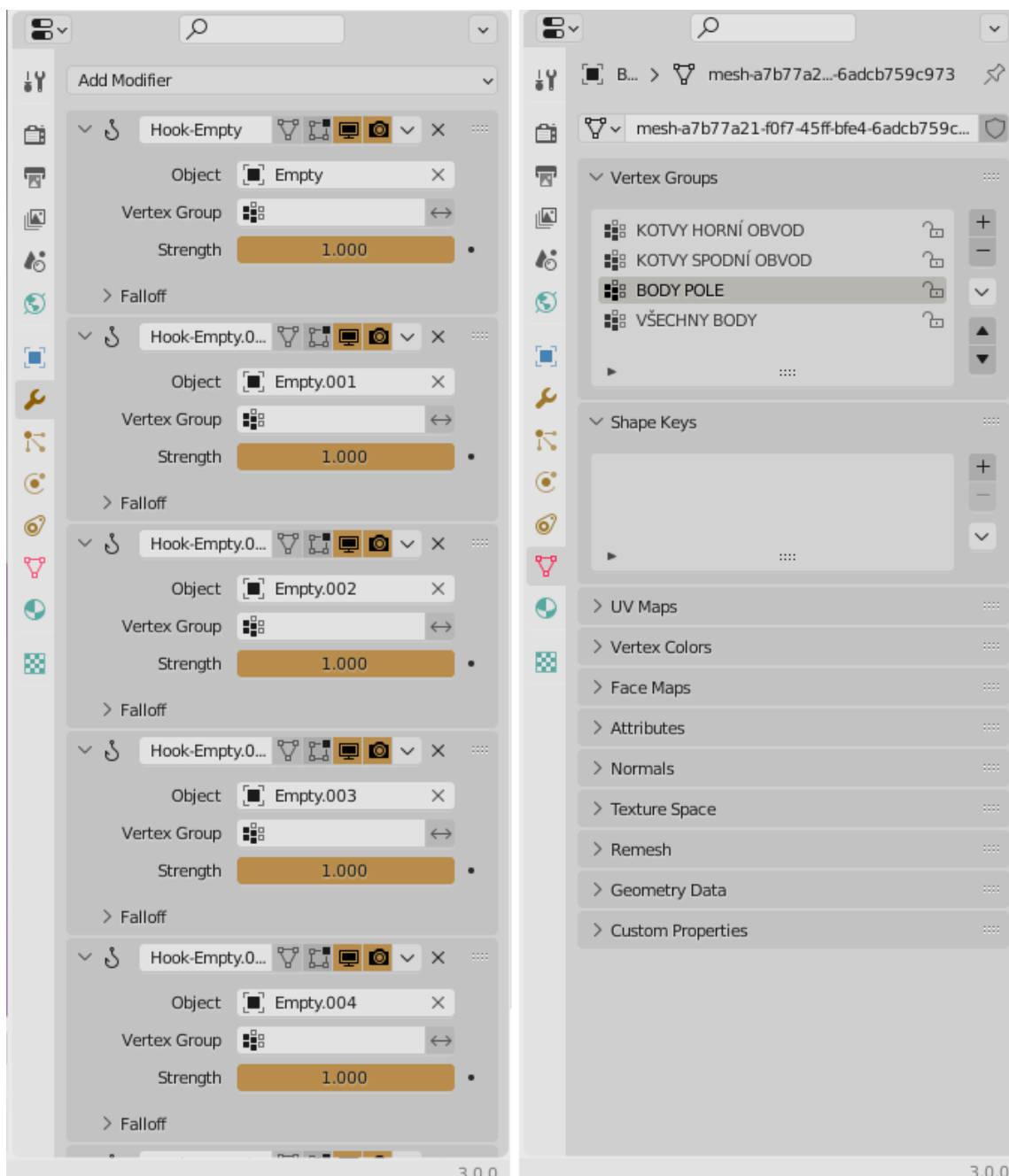
Ve chvíli, kdy parametrický tvar vygenerovaným Grasshopperem korespondoval s původní ideou, bylo nutné vygenerovaný virtuální tvar převést příkazem „bake“ na polygonovou síť. Tato polygonová síť sloužila jako podklad pro první statické vizualizace a výkresy, zároveň jako podklad pro pohyblivou simulaci skládání membrány.

Pro simulaci pohyblivé membrány byla výsledná polygonová síť exportována ve vhodném datovém formátu. Po prověření více různých formátů došel autor práce k závěru, že nejlépe funguje export polygonové sítě ve formátu *.obj nebo *.stl. Import je pro usnadnění další práce vhodné provádět s počátkem souřadnicového systému v jednom z rohů polygonové plochy.

Program Blender [27] je svým rozhraním nejvíce podobný programu 3ds Max. Slouží primárně pro tvorbu vizualizací, her, filmů a všeobecně CGI. Výhodou tohoto programu je jeho dostupnost. Program je distribuován jako freeware, a tak je dostupný každému. Nevýhodou tohoto programu je jeho veliká komplexnost. Program je velice rozsáhlý a je téměř nereálné pojmout a využít všechny nástroje, které jsou do něj zaimplementovány.

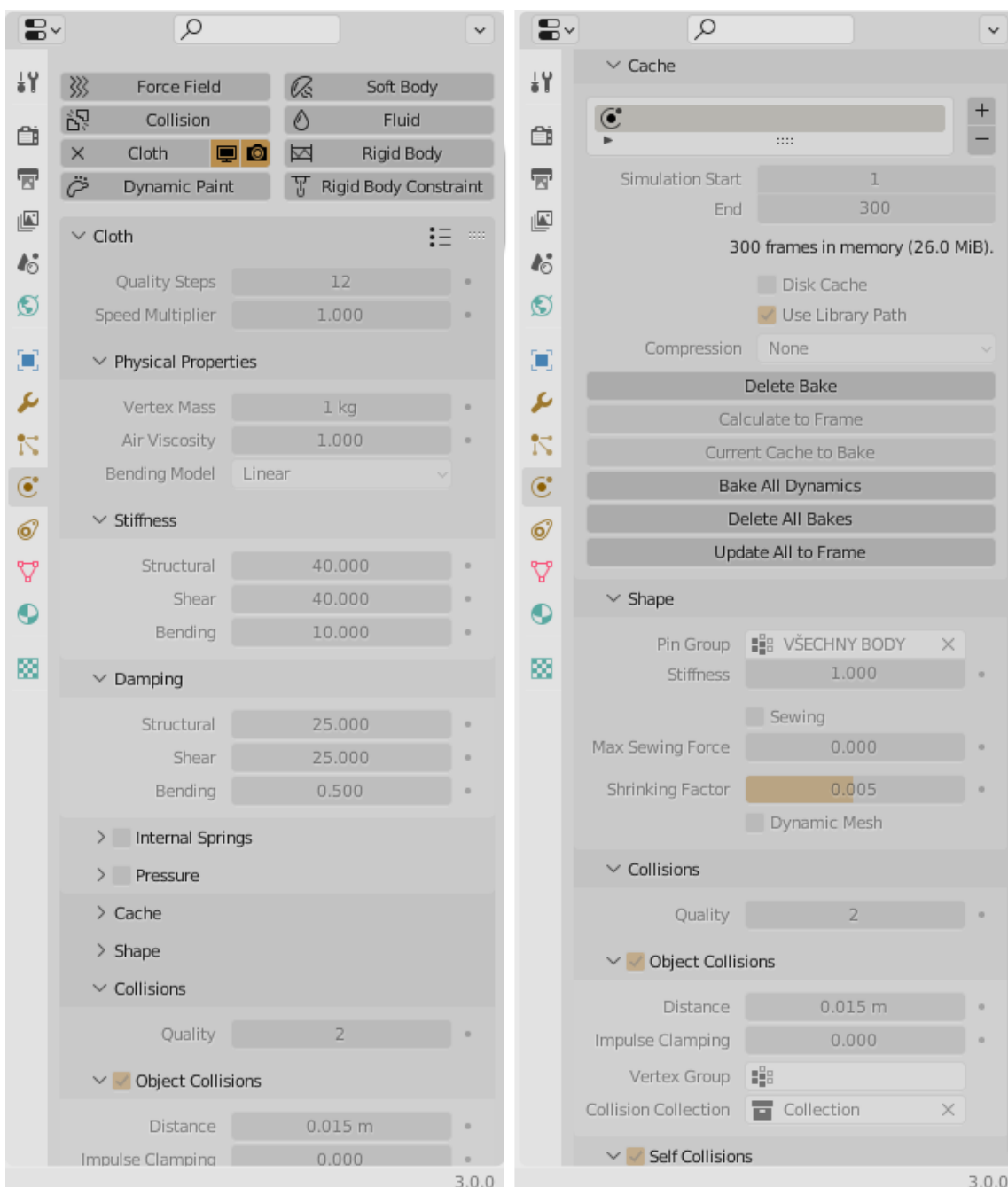


Obr. 63. Pohyblivý trychtýř v programu Blender s kotevními body. (oranžově)



Obr. 64. Nastavení kotevních bodů membrány v programu Blender

Pro základní animaci skládání pohyblivé membrány byla do programu naimportována výše připravená polygonová síť. Pomocí několika modifikátorů pro úpravu sítě a fyzikálního modifikátoru pro simulaci tkaniny byla ze statické plochy vytvořena plocha fyzikálně dynamická. Dále byly výběrem soustavy rohových bodů v režimu editace polygonové plochy vloženy kotevní body, které budou ovládat skládání celé membrány. Tyto body byly totožné s reálným kotvením na navržené pohyblivé membráně. Z kotevních bodů bylo dále nutné vytvořit vertexovou skupinu, která byla přiřazena k modifikované polygonové síti. Tuto skupinu bylo dále nutné zaktivovat ve fyzikálním modifikátoru tkaniny jako kotevní. V tuto chvíli byla původní polygonová síť upravena na fyzikálně dynamickou a autor s ní mohl dále pracovat a simulovat její vlastnosti včetně skládání.



Obr. 65. Nastavení simulace membrány včetně kolizí v programu Blender

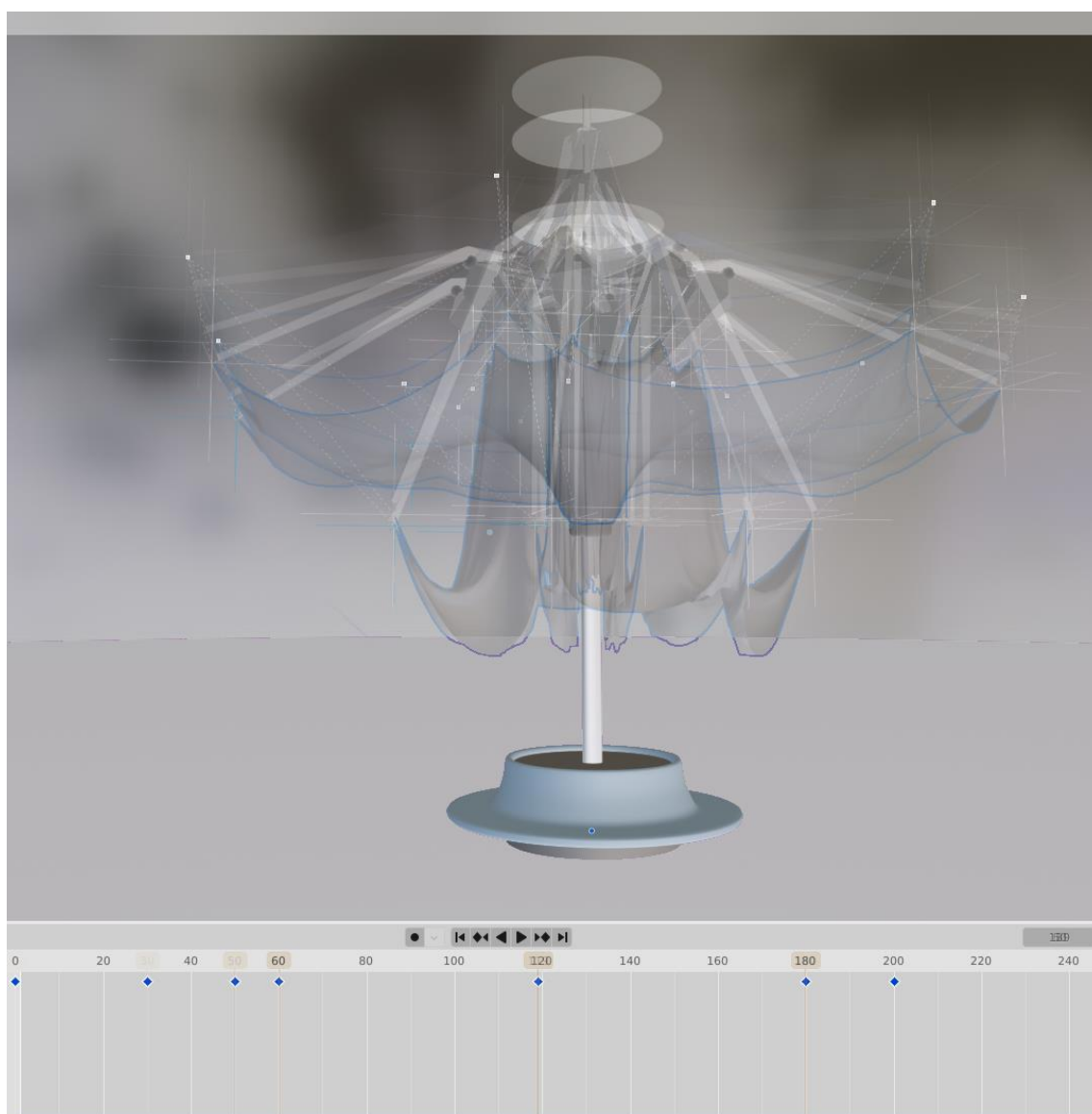
Na obrázku výše je zobrazené výsledné nastavení pro fyzikální simulaci dostředně stahovaného trychtýře. V nastavení si lze vybrat z několika předem přednastavených variant materiálů.

Jako výchozí varianta byla vybrána bavlna o hmotnosti 500 g/m^2 . S tímto materiálem bylo dále pracováno, aby se co nejvíce přiblížil vlastnostem materiálu, který byl navrhován pro konkrétní variantu pohyblivé membrány. V případě dostředně stahovaného trychtýře byla navržena PES/PVC membrána 700 g/m^2 .

Výsledný pohyb membrány byl simulován pomocí klíčových snímků. Simulace pohybu pomocí klíčových snímků v programu Blender poskytuje intuitivní způsob,

jak animovat objekty v 3D prostoru. Základním předpokladem výsledné úspěšné animace je po celou dobu zadávání klíčových snímků pracovat se stejnou skupinou předem definovaných kotevnic bodů membrány a v každé části animace zadat nový klíčový snímek pro všechny kotevní body, i když s nimi není pohybováno.

Pohyb membrány byl simulován tak, že byly klíčové snímky vkládány v pravidelných časových rozestupech na předem známé pozice, po kterých se bude membrána při skládání pohybovat. Simulace byla vždy prováděna od předepnuté roztažené plochy po plochu zataženou, neboť jediný stav známý před simulací je předdefinovaný tvar polygonové sítě, která byla vložena z programu Grasshopper.



Obr. 66. Prolnuté pozice klíčových snímků simulované membránové kece.

Další částí simulace pohyblivých membrán je zadání pohybu nosné konstrukce. Jednosměrný posun příhradových nosníků je možné simulovat posunutím vybrané konstrukce v požadovaném směru a zadáním klíčového snímku stejně jako u membrány.

Situace se ale značně změní, pokud jsou na sobě konstrukce navzájem závislé a jednotlivé části nosníků jsou do sebe začepované, jako tomu bylo například u výše uvedeného pohyblivého trychtýře.

U pohyblivého trychtýře se nosná konstrukce skládá z hlavních ramen, které jsou u nosného dřívku začepované, a v jedné třetině rozpětí jsou podepřena kyvným prutem. Ke složení konstrukce dochází vysunutím středového dřívku, který ovládá pouze jeden lineární aktuátor. Tento elektrický motor osově vysune vnitřní středový dřívek sloupu a tímto vertikálním pohybem se všechny kyvné pruty začnou skládat. Jedná se o podobný princip, jako u obyčejného skládacího deštníku, pouze invertovaný.

Pro vzájemnou interakci jednotlivých segmentů nosné konstrukce byla v programu Blender vybrána metoda simulace závislosti jednotlivých prvků pomocí armatur. Objekty armatur jsou v programu Blender primárně určeny k simulaci pohybu kostry obratlovců.

Zásadní výhodou tohoto systému je možnost vzájemného kloubového provázání jednotlivých částí systému armatur a definice stupňů volnosti na kloubech. Další výhodou armatur je jejich jednoduché propojení s původně statickou konstrukcí. Jedinou nevýhodou je relativně složité klíčování pozic bodů na konkrétní místo, kde je potřeba složitě odhadovat přesnou pozici kloubu.



Obr. 67. Pozice pohyblivé nosné konstrukce pohyblivého trychtýře v programu Blender se zvýrazněnými armaturami. (oranžově)

Animace výsledků z programu Blender v Unreal Engine

V průběhu let byl program Unreal Engine [28] (dále jen UE5) vyvinut a vylepšen do té míry, že jej používají hollywoodské produkce, jako je Walt Disney, pro produkci filmů Star Wars. Dnes je tento program s výhodou používán předními architektonickými studiemi v čele s Zaha Hadid architects pro produkci kvalitních vizualizací videí a VR.

Kvalitní prezentace architektonického návrhu je jedním z klíčových předpokladů pro správné pochopení návrhu a jeho představení jak investorovi, tak široké veřejnosti.

Proto byl pro závěrečnou fázi animace zvolen právě tento software. Hlavní výhodou programu UE5 je jeho akcelerované vykreslovací jádro, které používá pro náhled vizualizací v reálném čase grafický procesor, a proto není potřeba čekat na výsledky dlouhé hodiny, jako při vykreslování procesorem.

Simulace membránové konstrukce včetně polygonové sítě a všech částí modelu byla v první fázi nejprve exportována ve vhodném formátu. Pro export statických prvků, jako je statická nosná konstrukce, okolní zástavba a další, byl zvolen formát *.fbx. Při exportu do *.fbx byly jednotlivé části modelu rozděleny dle materiálu a stejná možnost byla zvolena i při importu do programu UE. V programu UE je dále možnost použít unikátní knihovnu materiálů a modelů Quixel Megascans, ve které tým profesionálů z Islandu digitálně scanuje objekty z celého světa a převádí je do virtuálního prostoru.

Výsledný pohyb membrány v programu Blender byl uložen do interní cache programu v ribbonu simulace tkaniny a dále exportován do UE 5. Pro export pohyblivé membrány včetně klíčových snímků byl použit formát souboru alembic- *.abc.

Při importu do UE 5 byla zaškrtnuta volba importovat včetně animací. Pro video animaci pohyblivé membrány v UE5 je nutné v pluginu pro tvorbu video výstupů Sequencer přiřadit polygonové síti importovanou animaci ve správném rozsahu klíčových snímků. Výsledkem je animace pohyblivého membránového zastřešení s fyzikálně simulovanou plochou membrány. Vytvořené simulace pohyblivých membránových zastřešení jsou ke shlédnutí na: <https://cs.paveljurcik.com/research> Pro větší poutavost byly animace pohybu membrán násobně zrychleny. Reálný pohyb zastřešení by byl v řádech desítek minut podle konkrétní varianty.

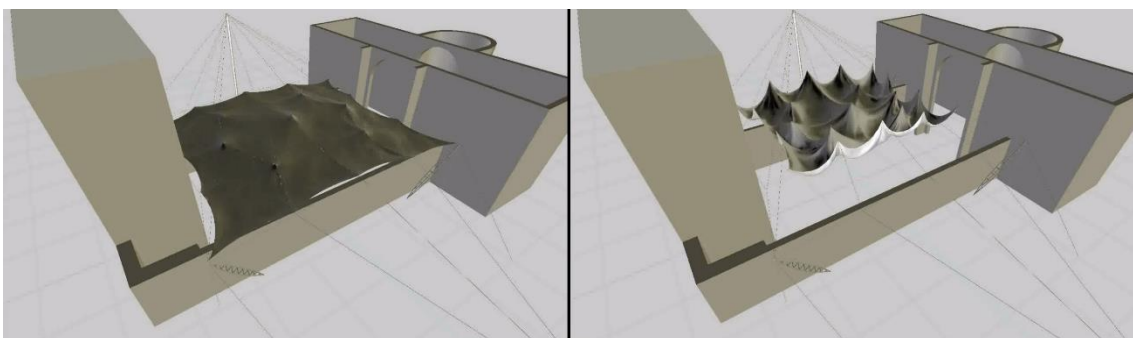


Obr. 68. Příklad vizualizace z UE5. Soutěž: Náměstí před Masarykovým nádražím. Zastřešení vstupů do metra membránou z ETFE. Vizualizace autor

10.2. DIGITÁLNÍ SIMULACE POHYBU POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH ZASTŘEŠENÍ

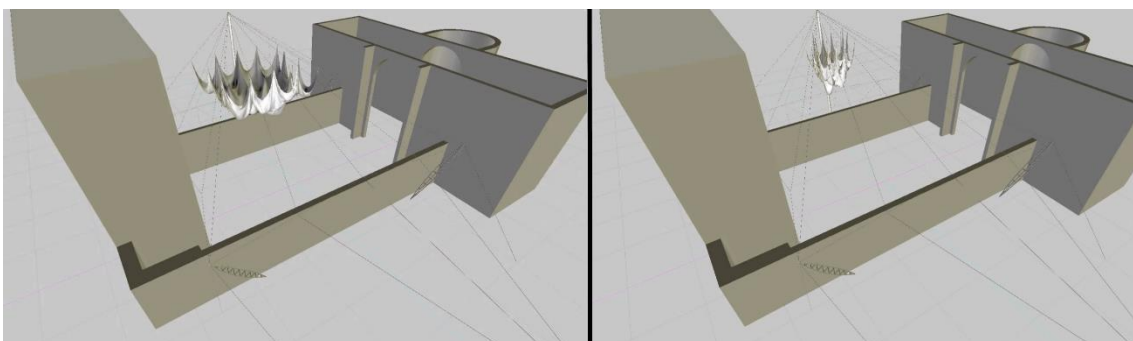
Podle výše navrženého postupu byly vytvořeny simulace skládání základních typů jednovrstvých i pneumatických membránových konstrukcí. První simulací byla analýza realizovaného pohyblivého zastřešení venkovní scény v Bad Hersfeldu. Další simulací byla simulace skládání jednovrstvého trychtýře. Simulace skládání pohyblivé lomenice byla dotažena až do finálního videa včetně PBR materiálů v programu Unreal Engine. Simulace kinetické fasády byla pro svou složitost pouze nasimulována v Grasshopperu. Poslední vytvořenou simulací byla simulace pohyblivé řetězové plochy z tuhých segmentů vyplněných třívrstevnými pneumatickými polštáři z ETFE.

Simulace jednovrstvé pohyblivé membrány s radiálními lany – Bad Hersfeld



Obr. 69. Simulace skládání jednovrstvé membrány Bad Hersfeld

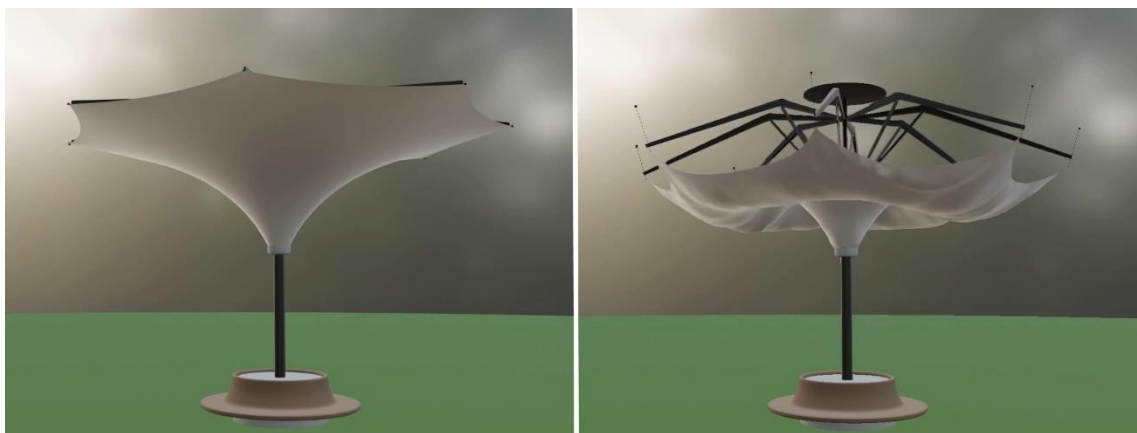
Jako první pohyblivá membrána pro simulaci byla vybrána dostředně stahovaná jednovrstvá membránová konstrukce zastřešení venkovní scény v Bad Hersfeldu. Tuto konstrukci se svým týmem realizoval Frei Otto v 70. letech minulého století. V tomto případě je celá membrána stahována pomocí nezávislých vozíků s tractory k jednomu excentrickému pylonu. Simulace byla provedena pomocí fyzikální simulace membrány a klíčových snímků v programu Blender. Původní předepnutá plocha byla vytvořena v programu Formfinder. V této simulaci nemá membrána zapnuté vlastní kolize, protože byla tato možnost objevena až v dalších fázích výzkumu.



Obr. 70. Simulace skládání jednovrstvé membrány Bad Hersfeld

Simulace jednovrstvého pohyblivého trychtýře

Další variantou vybranou pro simulaci byla jednovrstvá membránová konstrukce ve formě pohyblivého trychtýře. Postup tvorby této simulace byl zobrazen a popsán výše, protože tato simulace obsahuje jak pohyblivou jednovrstvou membránu, tak složitou pohyblivou nosnou konstrukci, která se skládá celkem z osmnácti prvků.



Obr. 71. Simulace skládání pohyblivého trychtýře

Simulace membrány pohyblivého trychtýře vychází z nastavení pro simulaci bavlněného stanového plátna o gramáži 500 g/m². Plocha membrány byla kotvena na osm bodů po obvodě membrány a osm bodů v poli, které navazují na ocelovou konstrukci v 1/3 rozpětí. Simulaci skládání membrány bylo nutné provázat se simulací sklápění nosné konstrukce. Pro tento účel bylo využito nástroje armatura, který je součástí programu Blender a je primárně určen pro simulaci kostry živočichů. Výhodou tohoto nástroje je možnost vzájemného navázání jednotlivých armatur na statickou geometrii a možnost tvorby komplexních kinematických systémů. Nevýhodou systému armatur je jeho horší přesnost v závislosti na orientaci řídicích rovin.



Obr. 72. Simulace skládání pohyblivého trychtýře

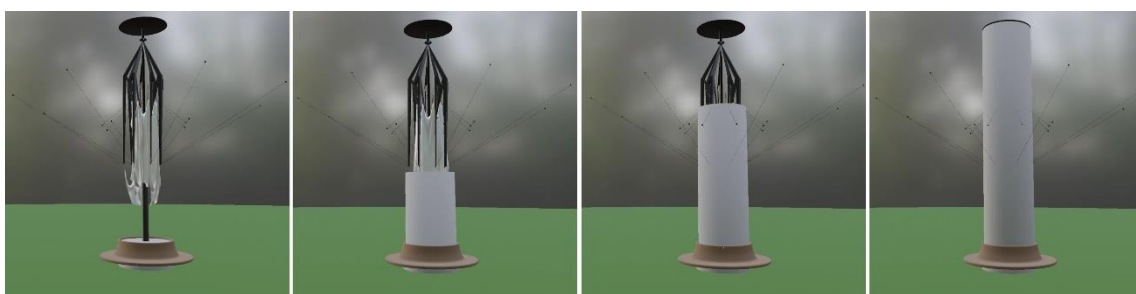
Architektonický návrh skladovacího prostoru složeného jednovrstvého pohyblivého trychtýře

Jednovrstvé pohyblivé membrány ve formě trychtýře se vyrábí v průměru mezi 8-16 metry. Tato solitérní pohyblivá zastřešení jsou často navrhována ve větších souborech, kdy na sebe jednotlivé hrany trychtýřů přímo navazují, aby tak zastínily, nebo zastřešily co největší půdorys. Složené trychtýře se standardně nechávají v stát zatažené poloze a často tvoří vizuální překážku.



Obr. 73. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené membrány var. 1

Pro případ, kdyby byl kladen požadavek na úplné zmizení zataženého trychtýře, autor vytvořil architektonický koncept skrytí membrány do studny, která by byla součástí základů zastřešení. Zatažený trychtýř by byl trvale umístěn na hydraulickém výtahovém systému. Po zatažení by tak v parteru zůstala jen kruhová dřevěná lavice. Výhodou této varianty je ochrana zastřešení proti vandalům, UV záření a nepříznivým podmínkám v zimním období. Další výhodou je výše zmíněné uvolnění průhledů, kdy celá konstrukce zmizí do země. Nevýhodou této varianty jsou zvýšené náklady na zemní práce a cena za realizaci hydraulického systému.



Obr. 74. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené membrány var. 2

Jako další varianta byl vytvořen návrh zakrytí zataženého trychtýře segmentovým tubusovým pláštěm. Plášť by mohl při pokrytí E-paper display sloužit jako interaktivní multimediální plocha a kolemjdoucí pozorovatelé by na něj mohli kreslit. Výhodou této varianty je její jednodušší realizovatelnost. Zásadní nevýhodou je fakt, že v parteru zůstává tubus, který musí být vhodně architektonicky, případně rytmicky zakomponován, jinak brání ve výhledu. Obě varianty animace pohyblivého trychtýře lze shlédnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>

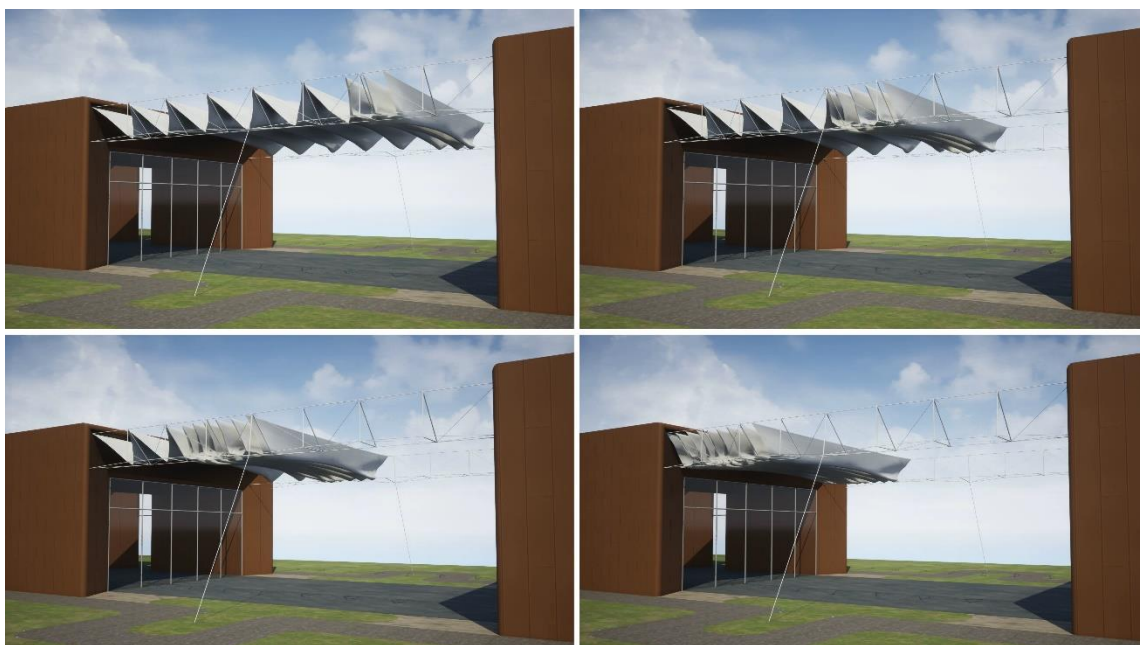
Simulace pohyblivé lomenice

Pro návrh simulace pohyblivé lomenice byla vytvořena architektonická studie galerie fotografie, jejíž součástí je i exteriérová expozice, kterou je možné zakrýt pohyblivou membránou vynášenou na subtilním lanovém vazníku.



Obr. 75. Vizualizace membránové lomenice v kontextu architekt. návrhu

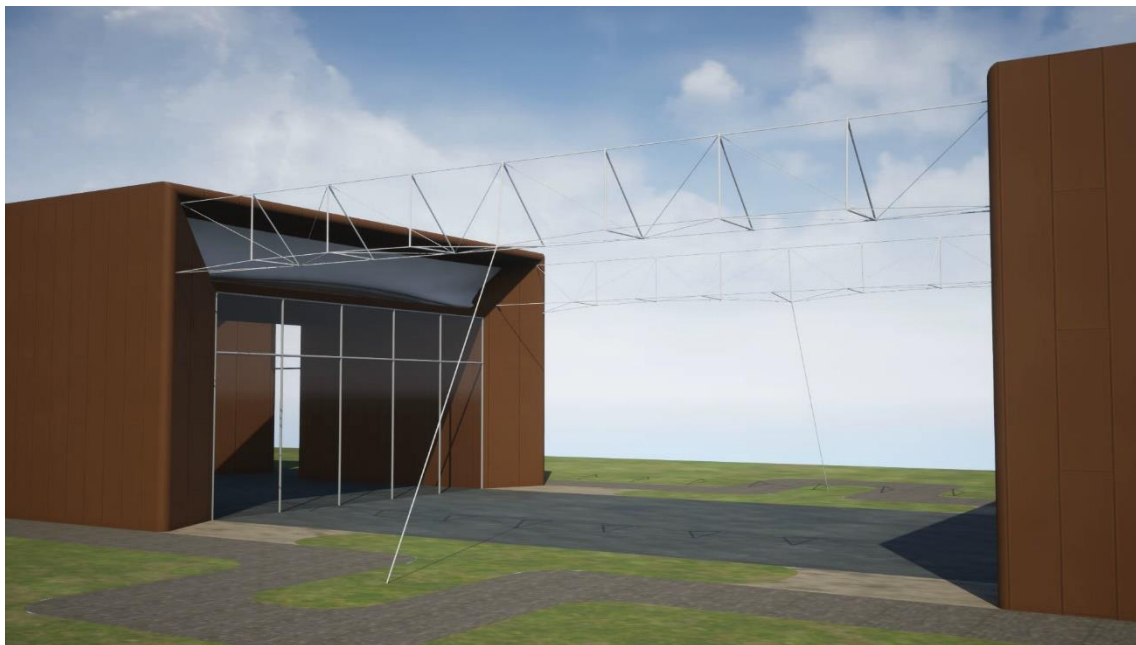
Rozpětí membrány bylo navrženo 8 metrů a délka zastřešení byla navržena 10 metrů. Jako materiál pro skládanou membránu byl zvolen PES/PVC – 1000 g/m². Vyšší gramáž membrány byla zvolena především pro účely simulace skládání materiálu o větší tuhosti. Při realizaci zastřešení by určitě postačil i materiál 700 g/m². Výsledná animace byla převedena do programu Unreal Engine 5 a animována včetně materiálů.



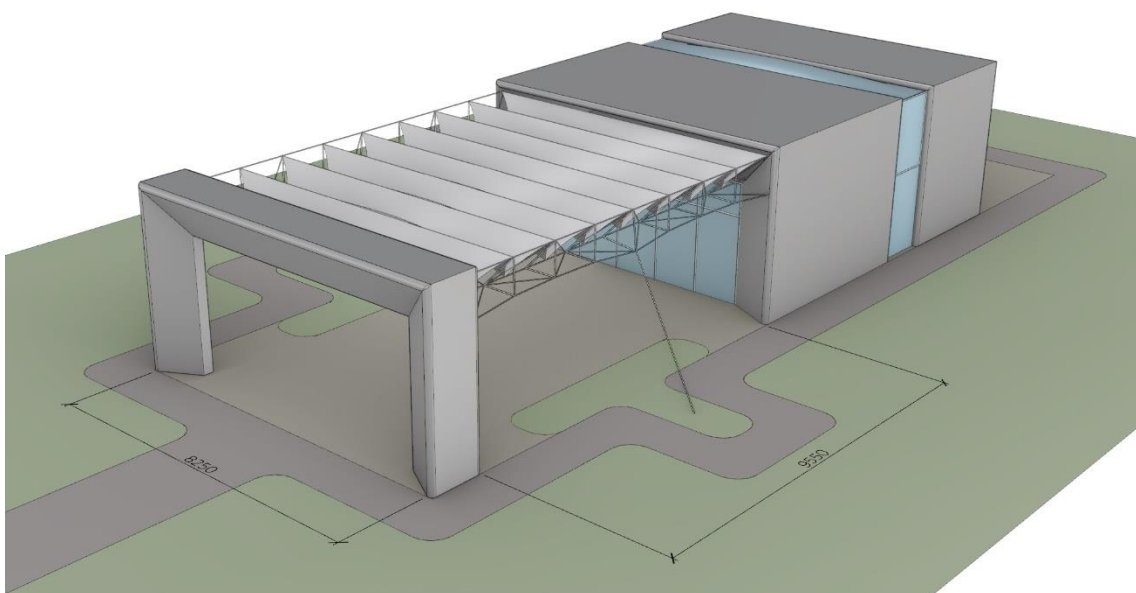
Obr. 76. Vizualizace skládání pohyblivé membránové lomenice

Architektonický návrh skladovací polohy jednovrstvé lomenice

Celá forma pavilonu fotografie byla vytvořena jako souměrný portál, který má dostatečnou dimenzi stropu, do které se dá zavést celá zatažená pohyblivá lomenice. Tento příklad ukazuje, že když se s návrhem pohyblivého membránového zastřešení počítá již v úvodní architektonické studii, je možné úložiště membrány zakomponovat tak, že se stane integrální součástí stavby. Otevřené úložiště by bylo v konečné fázi překryto pohyblivými lamelami v odstínu fasády. Animaci pohyblivé lomenice lze shlédnout na <https://cs.paveljurcik.com/research>

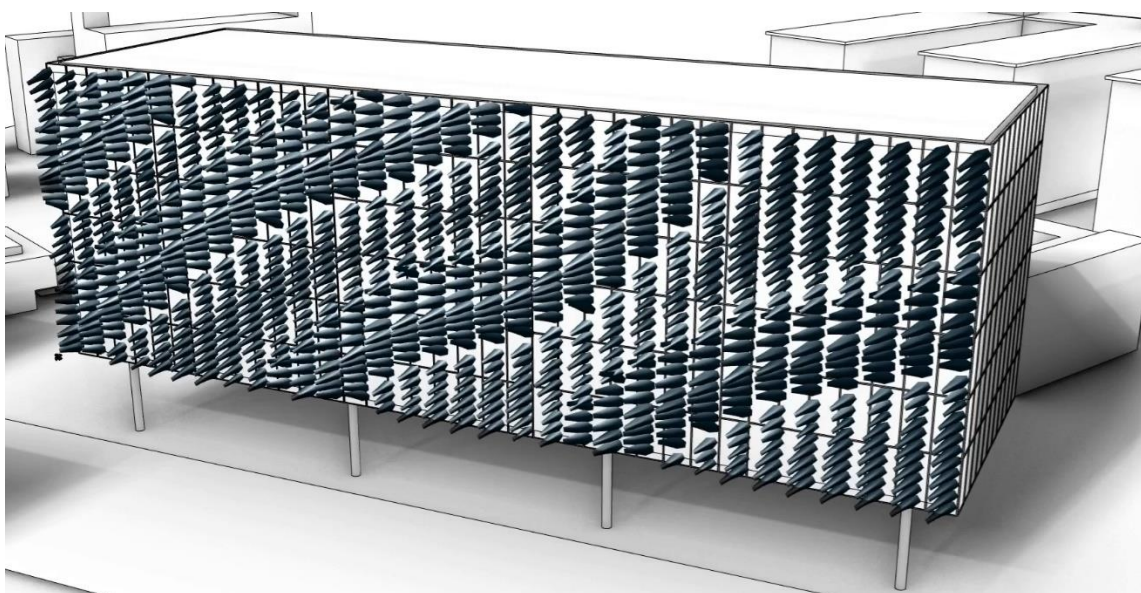


Obr. 77. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené lomenice



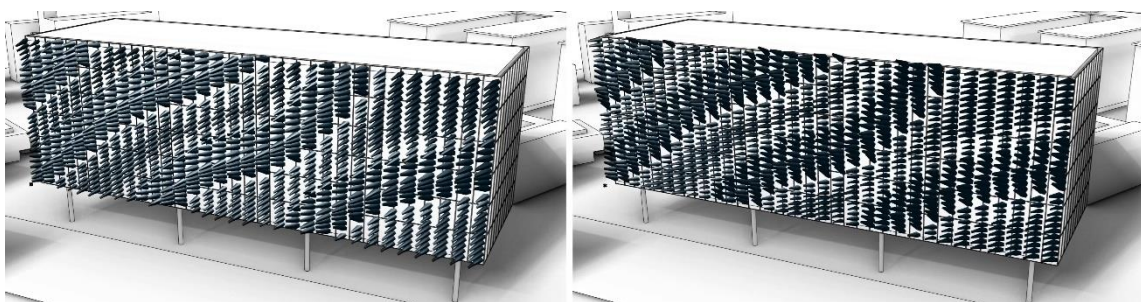
Obr. 77 b. Nadhledová perspektiva pavilonu fotografie s roztaženou membránou

Simulace kinetické fasády – zastiňující segmenty

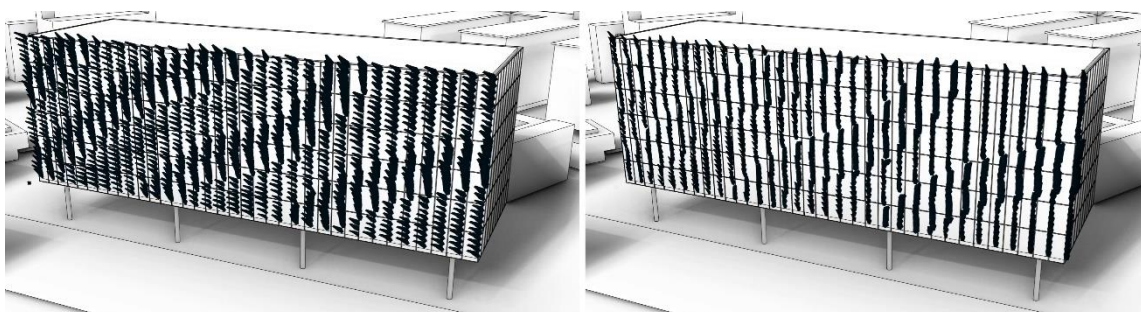


Obr. 78. Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády

Zajímavým způsobem, jak architektonicky pojednat fasádu, je použití pohyblivých zastiňujících segmentů. V následující simulaci je navrženo 896 segmentů sprážených do 32 sloupců po 28 segmentech. Každý ze sloupců je samostatně řízen jedním motorem s navijákem a stacionárním systémem řídicích lan. Celá fasáda je parametricky poseta pomocí funkce „linear attractor“ podle čtyř ručně nadefinovaných křivek. Nosným prvkem každého segmentu je tuhá trubka svařená do tvaru šupiny, která je potažena polyesterovou sít'ovinou. Na celé ploše fasády je kvůli snazší realizaci pouze 8 předem předdefinovaných velikostí šupin v délce od 0.6 do 1.4 metru.



Obr. 79. Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády (Grasshopper)



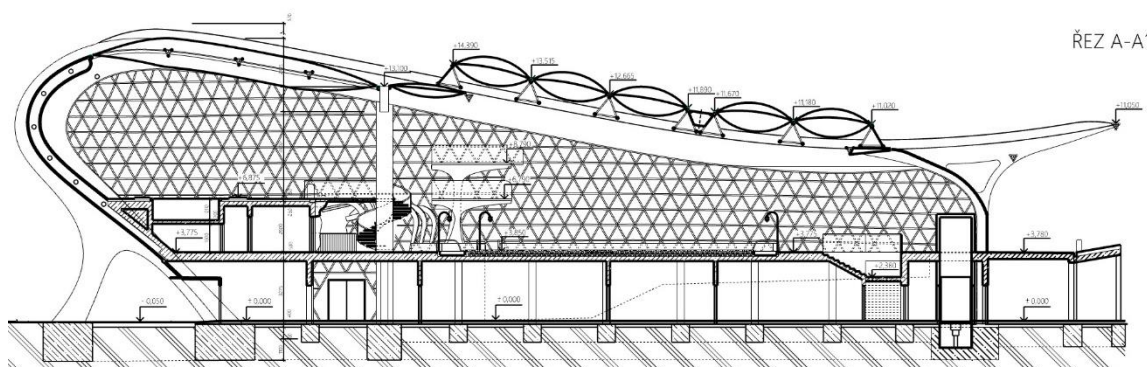
Obr. 80. Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády (Grasshopper)

Architektonický návrh a simulace pohyblivé řetězové plochy z ETFE folie



Obr. 81. Nadhledová perspektiva aquaparku Wave

V následující architektonické studii je navrhovaný aquapark zastřešen pneumatickými polštáři z třívrstvé ETFE folie, proto se pod zastřešením lze opalovat a mohou se zde pěstovat rostliny a stromy. Střední část střešní konstrukce je navržena jako pohyblivá a za příznivého počasí umožňuje téměř celé 2.NP v úrovni střechy otevřít. Simulace řetězových ploch z je výrazně jednodušší, neboť při jejich pohybu jednotlivá pole membrány nemění svoji geometrii a zůstávají trvale natlakována. Proto není nutné simulovat skládání membrán. ETFE fólie jsou náchylné na ostré zlomení. Proto je při případném návrhu jejich skládání potřeba přemýšlet nad řešením, které ostré sklady eliminuje. V převážné většině světových realizací jsou ETFE polštáře pohyblivých zastřešení přikotveny na pevný rám, který je odsunut horizontálním směrem po jeřábové dráze mimo zastřešovaný půdrys. V tomto případě polovina pohyblivého zastřešení odjede na krakorce nad koridor mezi aquapark a stávající sportovní halu a tvoří zastřešení i v druhé otevřené poloze.

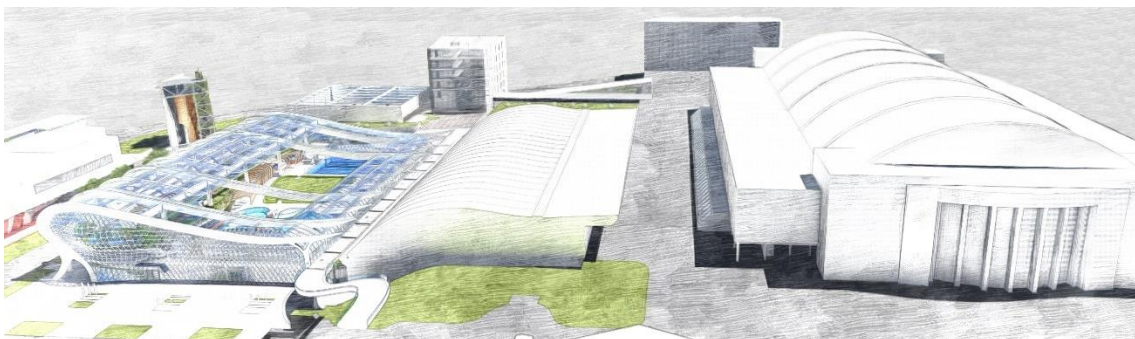


Obr. 82. Příčný řez aquaparkem s pohyblivou střechou v zavřené poloze



Obr. 83. Simulace pohybu řetězových ploch z vícevrstvé ETFE Folie

Celé pohyblivé zastřešení je vhodně situováno na jih, aby dopadající sluneční paprsky od května do září lépe osvitily opalovací loučku a oba bazény. Celková plocha pohyblivého zastřešení je $2 \times 252 \text{m}^2 + 1 \times 525 \text{m}^2 = 1029 \text{m}^2$. Pohyblivé zastřešení se skládá ze tří nezávislých střešních konstrukcí, které proti sobě jezdí po kolejnicích, jež jsou kotveny na hlavních předepnutých betonových nosnících. Předpokládaná doba otevření/zavření je 15-20 minut. Animaci pohyblivé řetězové plochy z pneumatických ETFE rukávů lze shlédnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>



Obr. 84. Architektonická koncepce hmoty aquaparku



Obr. 85. Pohled na zaparkované pohyblivé membránové zastřešení z ETFE nad spojovacím koridorem.

11. ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo analyzovat vybrané typy jednovrstvých a pneumatických pohyblivých membránových konstrukcí a vytvořit postup pro jejich digitální simulaci, který bude možné používat pro architektonické navrhování. Dalším cílem bylo poukázat na možnosti inovativního skladování pohyblivých membrán v jejich druhé poloze. V druhé poloze jsou membrány umístěny mimo zastřešovaný půdorys a mohou tak opticky překážet

Při výběru analyzovaných zastřešení byl kladen důraz na materiálovou a tvarovou rozmanitost vybraných variant tak, aby bylo pokryto celé typologické spektrum pohyblivých membránových konstrukcí. Byly analyzovány pohyblivé trychtýře, pohyblivé lomenice, membrány zavěšené na radiálních lanových konstrukcích a řetězové plochy. Zvláštní důraz byl kladen na studium jednovrstvých pohyblivých membránových konstrukcí, které jsou zavěšeny na radiálních lanech.

Výrazným zdrojem pro první část výzkumu byly publikace z Institutu pro výzkum lehkých konstrukcí (IL), který v 70. letech minulého století založil Frei Otto. Dalším významným zdrojem byly realizace studia Slaich, Bergermann und partner, které se specializuje na návrh a realizaci pohyblivých membránových konstrukcí.

Na základě prvotních studií byly vytvořeny parametrické modely základních tvarů pohyblivých membrán v programu Grasshopper. Tyto modely tvořily vstupní podklad pro digitální simulaci pohyblivých membránových konstrukcí v navazující části výzkumu. Parametrické definice základních typologických tvarů membránových zastřešení jsou k dispozici ke stažení na autorových webových stránkách a mohou sloužit jako podklad pro architektonický návrh jak studentům oboru, tak široké odborné veřejnosti. Parametrické definice jednovrstvých i pneumatických membrán je možné stáhnout na: <https://cs.paveljurcik.com/research>

Další fáze výzkumu byla soustředěna na fyzikální simulaci pohyblivých membrán včetně pohyblivých částí nosné konstrukce v programu Blender. V této fázi byl k vygenerované statické polygonové síti přidán fyzikální modifikátor tkaniny. Pomocí vstupních parametrů byly hodnoty nastaveny tak, aby se svým chováním co nejvíce přiblížily požadovanému materiálu. Následně byla předdefinovaná polygonová síť rozpohybována pomocí klíčových snímků. Pohyblivá nosná konstrukce trychtýře byla rozpohybována za pomoci armatur.

V poslední fázi výzkumu byla hledána cesta, jak simulaci pohyblivé membrány vložit se všemi parametry do programu pro tvorbu vizualizací a videí Unreal Engine 5. Ukázalo se, že nejlepším způsobem je import dat membrány včetně vypočítaných klíčových snímků ve formátu alembic *.abc. Statický model lze importovat ve formátu filmbox *.fbx. V Unreal Engine je dále nutné v pluginu Sequencer propojit data

simulované sítě s klíčovými snímky, abychom dosáhli výsledného efektu simulace pohyblivé membránové plochy.

Následně byly k simulované membráně a modelu stavby přiřazeny fyzikálně založené materiály. Dále bylo možné do výsledné architektonické studie libovolně doplnit stafáž a okolní zástavbu. Byla tak vytvořena uvěřitelná simulace pohyblivé membránové konstrukce zasazená do kontextu celé architektonické studie. Výstupem celého procesu mohou být renderované vizualizace ve vysoké kvalitě, videa v rozlišení 4K, nebo VR simulace. Velkou výhodou zpracování výstupu v Unreal Engine 5 je podpora akcelerovaného renderování pomocí procesoru GPU. Výrazně se tak šetří čas nutný pro finální vykreslení výsledné animace.

Výstupy celého vytvořeného procesu jsou video animace pohyblivých membránových zastřešení. Jako první byla vytvořena animace pohyblivého zastřešení v Bad Hersfeldu. Dále byla provedena animace pohyblivé řetězové plochy z ETFE fólie, která byla součástí architektonického návrhu Aquaparku Wave. Jako další byla simulována pohyblivá kinetická fasáda ze zastiňujících segmentů. Následně byly vytvořeny dvě varianty pohyblivého trychtýře včetně pohyblivé nosné konstrukce. Nakonec byla vymodelována architektonická studie pohyblivé jednovrstvé lomenice. V této architektonické studii byl ověřen celý navržený proces simulace pohyblivé membrány. Vytvořené simulace pohyblivých membránových zastřešení jsou ke shlédnutí na: <https://cs.paveljurcik.com/research>

Důležitou částí výše uvedených architektonických simulací pohyblivých membrán byl důraz na inovativní návrh uskladnění membrány v její druhé poloze, kdy se nachází mimo zastřešovaný půdorys. U pevných mobilních rámců z ETFE fólie aquaparku Wave je navrženo uskladnění poloviny zastřešení nad propojovacím koridorem. V návrhu pohyblivé lomenice pavilonu fotografie je navrženo skladovací prostor integrální součástí architektury objektu a zásadně se podílí na výsledné formě samotného objektu. V první variantě architektonického návrhu pohyblivého trychtýře je celá konstrukce zastřešení umístěna na hydraulickém výtahu a po složení zastřešení zajede pod zem. Trychtýř je ve složené poloze jednak chráněn proti poškození a především v parteru neruší.

Vytvořené animace mají poukázat na důležitost komplexního architektonického návrhu pohyblivých membránových zastřešení ve všech polohách včetně vhodně zakomponovaných skladovacích prostor. Efektivní architektonický návrh pohyblivého membránového zastřešení v závislosti na konkrétním zadání je klíčem pro jejich dlouholetou funkčnost a spokojenost investora.

Námětem pro další výzkum by mělo být ověřování konkrétních materiálových parametrů a jejich implementace do modifikátoru tkaniny v programu Blender. Dále pak výzkum efektivního animování armatur nosné konstrukce v závislosti na referenčních osách animace a jejich lepší propojení s animovanou membránou.

Slovník často používaných pojmů

Slovník často používaných pojmů byl převzat z odborné knihy Membránová Architektura [11]. Na vydání této knihy se autor této disertační práce intenzivně podílel. Slovník byl nadále upraven a doplněn dle dalších poznatků

Minimální plochy – minimal surface

Minimální plochy jsou definovány jako prostorové plochy, které mají v každém svém bodě nulovou střední křivost. Minimální plochy vytvářejí nejmenší plochy mezi zadaným okrajem. Typickým příkladem je mýdlový film, který vznikne po ponoření spojeného drátového rámu do mýdlového roztoku.

Membrána – membrane

V kontextu lehkých membránových konstrukcí se jedná o termín používaný pro tenký izotropní / anizotropní materiál, který vytvářený do dvojité zakřivené plochy přenáší vnější zatížení. Charakteristickým rysem lehké membrány je schopnost přenosu pouze tahových sil bez únosnosti v ohybu a tlaku. Nejčastěji se jedná o tenké tkaniny a fólie.

Rohové kování – corner plate

Pojem rohové kování označuje ocelový nerezový prvek, který spojuje membránu s primární nosnou konstrukcí. Ve většině případů se do rohového kování kotví obvodová lana, která vypínají okraj membrány.

Obvodové lano – boundary rope

Obvodové lano je umístěno v tunelu na obvodě membránového zastřešení. Jeho úkolem je předpínat a stabilizovat okraj membrány

Kedr – keder

Hrana membrány tvořena obaleným elastickým kabelem z PVC. Ve spojení s drážkovaným profilem nebo přitlačnými lištami se využívá pro pevné napojení membrány na podpůrnou konstrukci. Dále se uplatňuje v rohových detailech pro napojení membrán na rohová kování.

Tuhost – stiffness

Tuhost představuje Youngův modul pružnosti E , jenž je definován jako poměr mezi napětím a přetvořením z elasticky lineárního modelu. V kontextu lehkých membránových konstrukcí se tuhost pro textilní materiály či ocelová lana uvádí většinou společně s průřezovou plochou, konstanta je označována EA . V případě textilního materiálu jsou hodnoty EA uváděny pro jednotnou šířku jeden metr.

Osnova - warp

Tkaný textilní materiál je vyráběn v rolích. Osnova popisuje vlákna běžící podélně s delší hranou textilie.

Útek - weft

Vlákna vyplňující osnovu tkaniny, běžící kolmo na vlákna osnovy. Vlastnosti textilního materiálu jsou rozdílné ve směru osnovy a útku. Osnova má větší tuhost než útek. Technologie Preconstraint minimalizuje rozdílné vlastnosti osnovy/útku předepnutím útku v procesu výroby textilního materiálu.

Tvorba stříhových plánů- Cutting pattern generation

Jde o proces tvorby výrobních plánů, které dvojité zakřivené plochy převádějí do jednotlivých 2D plošných dílů – stříhů. Při dělení dvojité zakřivených ploch se využívá geodetických linií, jež spojují dva body na okraji plochy nejkratší spojnici. Samotný převod do 2D je iterační proces.

Kompenzace - compensation

Proces zmenšení stříhů tak, aby bylo dosaženo požadované úrovně předpětí. Hodnota kompenzace je závislá na použitém materiálu a výsledcích biaxiálního testu. Opačným procesem od kompenzace je dekompenzace, která se používá u okraje zastřešení v místě obvodových lan.

Kotevní táhlo - tension rod

Prvek primární konstrukce přenášející výhradně tahové síly. Táhlo je tvořeno tyčovým prutem, který lze použít pro vnesení předpětí do konstrukce za použití napínáku.

Kotevní lano - rope, cable

Jedná se o konstrukční prvek, který přenáší výhradně tahové síly. Konstrukce lana je tvořena spletením několika vláken do jednoho průřezu. Mezi základní konstrukce lan patří např. splétané konstrukce 1x19, 7x7, 7x19 atd.

Napínák - turnbuckle

Konstrukční prvek umožňující rektifikaci kotevních prvků a jejich mechanické předpínání. Nejčastěji bývá využit v sestavách lan a táhel. Při montáži dále redukuje výrobní tolerance konstrukce.

Dvojitě zakřivení membrány - Double curvature of the membrane

Díky dvojitěmu zakřivení membránová konstrukce získává své vlastnosti a může vzdorovat vnějším vlivům, jako je zatížení větrem, nebo sněhem. V závislosti na maximální vodorovné silové složce je udáváno minimální hospodárné zakřivení, které je rovno 1/10 rozpětí volného pole.

Zdroje

- [1] OTTO, Frei. *IL 5 Convertible roofs*, Information of the Institute for Lightweight Structures, 1972. Stuttgart: Karl Kramer Verlag,
- [2] FAEGRE, Torlvald. *Tents - Architecture of the Nomads*. LONDON: 50 Albemarle Street, 1979. ISBN (DOI) 0 7195 3656 1.
- [3] HATTON, E. M., *The Tent Book*. USA: 1979. ISBN 0-395-27613-9.
- [4] ROLAND, I., a HOWE, T., *Vitruvius. Ten Books on Architecture*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0-521-00292-3
- [5] OTTO, Frei, BERND, B., MEYER, S., *IL 14 Adaptable architecture*, Stuttgart: Druckerei Heinrich Fink GmbH + Co, 1975. ISBN 3-1828-2014-2.
- [6] OTTO, Frei. *IL1- Minimal Net*. Stuttgart: Stuttgart University, 1969.
- [7] BAHAMON, Alejandro, *The magic of tents transforming space*, New York: Harper and Collins, 2004. ISBN 0-06-056756-2
- [8] SEIDEL, Michael. *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. Berlin: Ernst & Sohn, 2009. ISBN 978-3-433-02922-0.1
- [9] VECKO, Jan, *Návrhové limity jednovrstvých membránových polí*, Praha 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, K129. Vedoucí práce prof. Ing. arch. Miloš Kopřiva
- [10] MASUBUCHI, Motoi, *CONCEPTUAL AND STRUCTURAL DESIGN OF ADAPTIVE MEMBRANE STRUCTURES WITH SPOKED WHEEL PRINCIPLE FOLDING TO THE PERIMETER*. Berlin, 2013, Disertační práce, Fakultät VI Planen Bauen Umwelt. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Klaus Rückert
- [11] KOPŘIVA M., NETUŠIL M., ACHTEN H., HIRNŠAL Z., *Membránová Architektura*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-05693-6.
- [12] D-HAUS, 2012. [online]. 28. 1. 2022 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://newatlas.com/d-dynamic-transforming-house/25079/>
- [13] SCHLAICH, BERGERMANN (2008): SCHLAICH Jorn, Rudolf Bergermann. *Leicht Weit – Light Structures*. Berlin-London-New York: Prestel, 2008. ISBN 3-7913-2918-9.
- [14] VENTUS (2016) [online]. 28. 2. 2016 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: www.ventus.cz
- [15] OTTO, Frei, Berthold Burkhardt, Ilse Schmall. *IL 16 Tent*, Stuttgart: Druckerei Heinrich Fink KG, 1976. ISBN 3-7828-2016-9.

- [16] MEDINA PIAZZA. 2016. [online]. 14. 2. 2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://senatus.net/article/giant-umbrellas-protect-pilgrims-medina>
- [17] HIRNŠAL Zdeněk a kol. *ARCHTEX*. [online]. 28. 2. 2016 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: www.archtex.cz; *detailly zapůjčené firmou*
- [18] OTTO, Frei. *IL 9 Pneus in Nature and Technics*. Stuttgart: Druckerei Heinrich Fink GmbH+Co, 1977. ISBN 3-7828-2009-6.
- [19] OTTO, Frei. *IL 12 Convertible Pneus*. Stuttgart: Druckerei Heinrich Fink GmbH+Co, 1977. ISBN Nr. 3-7828-2012-6; No. 0-8150-0663-2.
- [20] DREW, Philip. *New Tent Architecture*. London: Thames & Hudson, 2008. ISBN 978-0-500-34243-5.
- [21] VECTOR FOILTEC. [online]. 10. 2. 2022 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.vector-foiltec.com/projects/open-air-stage-gieshalle-casting-bay-duisburg/>
- [22] PLANEX. 2016. [online]. 18.3.2016 [cit. 2016-03-18] Dostupné z: <http://www.planex-gmbh.de/>
- [23] SERGE FERRARI. 2022; [online]. 18. 3. 2016 [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://en.sergeferrari.com>
- [24] FORMFINDER Software GmbH. *Formfinder* [software]. [přístup 18. Ledna 2022]. Dostupné z: <http://www.formfinder.at>, *Požadavky na systém: PC Windows 10; 8 GB RAM; 1GB místa na disku.*
- [25] RHINO CEROS. *Rhino7* [software]. [přístup 12. Ledna 2022]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/download/>, *Požadavky na systém: PC Windows 10; 8 GB RAM; 3 GB místa na disku.*
- [26] KANGAROO PHYSICS. *Kangaroo 2* [software]. [přístup 14. Února 2022]. Dostupné z: <https://www.food4rhino.com/en/app/kangaroo-physics>, *Požadavky na systém: PC Windows 10; 8 GB RAM; 0,25 GB místa na disku.*
- [27] BLENDER. *Blender 3* [software]. [přístup 10. Ledna 2022]. Dostupné z: <https://www.blender.org/download/>, *Požadavky na systém: PC Windows 10; 8 GB RAM; 2 GB místa na disku.*
- [28] UNREAL ENGINE. *Unreal Engine 5* [software]. [přístup 7. Ledna 2022]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US/download>, *Požadavky na systém: PC Windows 10; 8 GB RAM; 24 GB místa na disku.*
- [29] FORSTER Brian, Marijke Mollaert. *European design guide for Tensile Surface Structures*. EU, 2003. ISBN 90-8086-871-X.

- [30] MOLLAERT Marijke a kol. *Designing tensile architecture*. Wien: Druckerei heinrich Fink GmbH&Co, 2003. ISBN 90-9017-3447.
- [31] OTTO Frei. *IL3- Biology and building*. Stuttgart: Stuttgart University, 1971.
- [32] OTTO (1998-IL27) : OTTO Frei. *IL 24 Lightweigh principle*. Stuttgart: Karl Kramer Verlag, 1998. ISBN3-7828-2024-X.
- [33] TensiNet. [online]. 28. 2016 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.tensinet.com/>
- [33] SCHLAICH, BERGERMANN UND PARTNER (sbp). [online]. 10. 2. 2022 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.sbp.de/>
- [34] Architekti: ADR, 2016, Projekce ARCHTEX s.r.o; *FUSHI – Šapito 2016*; Vizualizace autor, Dokumentace pro realizaci stavby
- [35] CARL-STAHl GmbH; 2015, *TENSION AND CONNECTING SYSTEM*; VERSION 01/2015; CARL STAHL ARCHITEKTUR, Siemensstrasse 2, 73079 Sussen
- [36] VECTOR FOILTEC, 2015, Detail kotevního profilu Texlon; zapůjčeno firmou Vector-Foiltec; České zastoupení – Firmconsult s.r.o.; Praha 10. 12. 2015
- [37] MUNICH OLYMPIC STADIUM. [online]. 10. 6. 2016 [cit. 2016-06-10]. Dostupné z: <http://www.ttg.cz/>

Seznam obrázků

- Obr. 6. Kopie historických spisů s vyobrazením slunečníků.
Asyrský vládce Asurbanipal uprostřed; [1]
- Obr. 7. Řez marockým stanem s polohou hřbetu. [2]
- Obr. 3. Pohled na zakrytou jurtu a její nosnou konstrukci (vlevo) [2]
- Obr. 4. Původní freska + rekonstrukce řezu amfiteátru v Pompejích [1]
- Obr. 5. Studie tvaru mýdlových bublin (vlevo) a její aplikace na zastřešení německého pavilonu EXPO1967 v Montrealu [6]
- Obr. 6. Náhled na dokončený stadion v Mnichově [37]
- Obr. 7. Schéma minimálního zakřivení membránové plochy ve formě hyperbolického paraboloidu.
- Obr. 8. Příklady bodově kotvené membrány [9]
- Obr. 9. Příklady membrány tvarované vloženými oblouky [9]
- Obr. 10. Příklady kónicky tvarované membrány (Pagody a trychtýře) [9]
- Obr. 11. Příklady lomenice a soustředné lomenice [9]
- Obr. 12. Parametrický model ETFE rukávu o délce 20metrů a rozpětí 4 metry;
model autor 02-2022
- Obr. 13. Parametrický model ETFE polštářů pomocí voronoiovy teselace použité na Watercube v Pekingu; model autor 02-2022
- Obr. 14. Parametrická fce. pneumatického polštáře v programu Grasshopper;
funkce autor 2022
- Obr. 15. Schéma architektonického návrhu pohyblivého membránového zastřešení; schéma autor 2022
- Obr. 16. Architektonická studie a fyzický model pohyblivého membránového zastřešení atria Telč. Vizualizace autor 05-2017
, fyzický model: Ing. arch. Aleš Vaněk
- Obr. 17. Schéma návrhu a realizace pohyblivého membránového zastřešení [10]
- Obr. 18. Stupně volnosti tuhého tělesa a tuhé desky
(aproximované membrány) [10]
- Obr. 19. Typologie skládání pohyblivých membránových zastřešení [10]
- Obr. 20. Architektonická studie zastřešení víceúčelových kurtů navazujících na stadion v Hradci Králové. Vizualizace autor [11]
- Obr. 21. Architektonická studie zastřešení víceúčelových kurtů navazujících na stadion v Hradci Králové. Řezy: Otevřeno – Zavřeno [11]
- Obr. 22. Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Vizualizace autor. [11]
- Obr. 23. Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Podélný řez – zataženo. [11]

- Obr. 24. *Architektonická studie variabilního interiéru Muzea veteránů letiště Lánov. Podélný řez – roztaženo. [11]*
- Obr. 25. *Proces napínání mobilní stínící membrány v zámeckém parku Hranice na Moravě – foto autor; 2016*
- Obr. 26. *Pohyblivý koncept D-Haus [12]*
- Obr. 27. *Příklad variabilních pneumatických dómů s možností modulární extenze [19]*
- Obr. 28. *Popsaný detail lanového vozíku s elektrickým pohonem [1]*
- Obr. 29. *Detaily a axonometrie vozíku z realizace – Bad Hersfeld [1]*
- Obr. 30. *Schema vozíkového pohonného systému s motorem na vozíku [10]*
- Obr. 31. *Schema vozíkového pohonného systému se stacionárně umístěnými motory. [10]*
- Obr. 32. *Axonometrie zubačkového a řetězového pohonného systému [1]*
- Obr. 33. *Detail kladkového systému pohyblivé pneumatické příčky. Výstaviště ČB; [14]*
- Obr. 34. *Pohled a řez pohyblivým trychtýřem s jednovrst. membránou [1]*
- Obr. 35. *Stínící trychtýře na náměstí v Medině. Celková plocha 143000 m² [16]*
- Obr. 36. *3D model pohyblivé lomenice Ostrava Vítkovice [17]*
- Obr. 37. *Realizované zastřešení Colours of Ostrava [17]*
- Obr. 38. *Fáze pohybu membránového zastřešení s radiálními lany a excentricky zatahovanou membránou*
- Obr. 39. *Složené membránové zastřešení Kufstein [11]*
- Obr. 408. *Roztažené membránové zastřešení Kufstein [11]*
- Obr. 41. *Lehké pohyblivé membránové zastřešení národ. Fotbal, stadionu ve Varšavě. Radiální lanová konstrukce zatahovaná do středu. [11]*
- Obr. 42. *Možnosti uspořádání mobilní membránové konstrukce s pevnými rámy [1]*
- Obr. 43. *Rozevřené a složené pneumatické zastřešení EXPO Osaka [19]*
- Obr. 44. *Schémata pohyblivých ramen uvnitř pneumaticky natlakované konstrukce. [19]*
- Obr. 45. *Pohled na pohyblivé zastřešení a detail hlavního nosníku [20]*
- Obr. 46. *Pohled na natlakovaný pneumatický gridshell + detail zakončení pneumatické trubice; [22]*
- Obr. 47. *Skica principu přetlaku a podtlaku v systému; [22]*
- Obr. 48. *9 Pneumatické příčky výstaviště ČB; [14]*
- Obr. 10. *Pneumatické příčky konferenč. sál BVV; [14]*
- Obr. 50. *Detail polyesterové tkaniny s PVC zátěrem [9]*

- Obr. 51. Tabulka vlastností jednovrstvých membrán doplněná o materiál Polyamid-PVC (Flex) [10]
- Obr. 52. Probarvené EFTE folie na fasádě – Strahovský zemědrap. Vizualizace. autor 06-2015
- Obr. 53. Tabulka vlastností nejpoužívanějších fólií [9]
- Obr. 54. Ukázka průmyslového stroje určeného pro svařování vysokou frekvencí [11]
- Obr. 55 a 56 Parametrická funkce a vizualizace bodově kotvené membrány; funkce autor; 01- 2022;
- Obr. 57. Parametrická funkce bodově kotvené membrány s vloženým obloukem funkce autor; 01- 2022;
- Obr. 58. Vizualizace bodově kotvené membrány s vloženým obloukem; vizualizace autor; 01- 2022;
- Obr. 59. Vizualizace čtvercového a kruhového trychtýře; vizualizace autor; 01- 2022;
- Obr. 60. Parametrická funkce čtvercového a kruhového trychtýře (výsledný tvar záleží na vstupních křivkách); vizualizace autor; 01- 2022;
- Obr. 61. a 62. Parametrická funkce membránové lomenice a její vizualizace; vizualizace autor; 01- 2022;
- Obr. 63. Pohyblivý trychtýř v programu Blender s kotevními body. (oranžově); vizualizace autor; 01- 2022;
- Obr. 64. Nastavení kotevních bodů membrány v programu Blender autor; 12- 2021;
- Obr. 65. Nastavení simulace membrány včetně kolizí v programu Blender autor; 12- 2021;
- Obr. 66. Prolnuté pozice klíčových snímků simulované membránové kce. autor; 12- 2021;
- Obr. 67. Pozice pohyblivé nosné konstrukce pohyblivého trychtýře v programu Blender se zvýrazněnými armaturami. (oranžově); autor; 12- 2021;
- Obr. 68. Příklad vizualizace z UE5. Soutěž: Náměstí před Masarykovým nádražím. Zastřešení vstupů do metra membránou z ETFE. Vizualizace autor; 01-2021
- Obr. 69. Simulace skládání jednovrstvé membrány Bad Hersfeld; simulace autor 05-2016;
- Obr. 70. Simulace skládání jednovrstvé membrány Bad Hersfeld; simulace autor 05-2016;
- Obr. 71. Simulace skládání pohyblivého trychtýře; simulace autor 01-2022;
- Obr. 72. Simulace skládání pohyblivého trychtýře; simulace autor 01-2022;
- Obr. 73. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené membrány V1 autor 01-2022;

- Obr. 74. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené membrány V2;
simulace autor 01-2022;
- Obr. 75. Vizualizace membránové lomenice v kontextu architektonického
návrhu; vizualizace autor 12-2021;
- Obr. 76. Vizualizace skládání pohyblivé membránové lomenice;
vizualizace autor 12-2021
- Obr. 77. Architektonický návrh skladovacího prostoru složené lomenice
vizualizace autor 12-2021
- Obr. 77 b. Nadhled. perspektiva pavilonu fotografie s roztaženou membránou
vizualizace autor 12-2021
- Obr. 78. *Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády;*
simulace autor 11-2021
- Obr. 79. *Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády (Grasshopper)*
simulace autor 11-2021
- Obr. 80. *Simulace pohybu zastiňujících segmentů fasády (Grasshopper)*
simulace autor 11-2021
- Obr. 81. *Nadhledová perspektiva aquaparku Wave*
Vizualizace autor 04-2018
- Obr. 82. *Příčný řez aquaparkem s pohyblivou střechou v zavřené poloze*
Vizualizace autor 04-2018
- Obr. 83. *Simulace pohybu řetězových ploch z vícevrstvé ETFE Folie*
simulace autor 08-2018
- Obr. 84. *Architektonická koncepce hmoty aquaparku*
koncepce autor 02-2018
- Obr. 85. *Pohled na zaparkované pohyblivé membránové zastřešení z ETFE*
nad spojovacím koridorem. Vizualizace autor 03-2018
- Obr. 86. *Spodní pohled na otevřenou čočku [33]*
- Obr. 87. *Boční pohled na otevřenou ETFE čočku s detailem soustavy*
vrcholových kladek na každém vertikálním pylonu. [33]
- Obr. 88. *ETFE mobilní zastřešení Landshaft park:*
pohled z úrovně diváka zastřešení [20]
- Obr. 89. *Pohled shora na pohyblivé zastřešení; [20]*
- Obr. 90. *Detail hlavního nosníku zastřešení; [20]*
- Obr. 91 a 92. *Vizualizace lezecké věže v letním a zimním období (autor)*
- Obr. 93. *Výkresy systému pohybu a skladování jednotlivých segmentů fasády*
projekt pro DSP: EST Stage technology
- Obr. 94. *Pohled na shrnuté zastřešení v dolní části stadionu [11]*
- Obr. 95. *Foto: Pohledy na zatažené a roztahované zastřešení. [33]*
- Obr. 96.11 *Foto: Pohledy na roztahované a roztažené segmentové zastínění.*

[33]

- Obr. 97.12 Detail pohyblivého systému. Schéma vytvořil autor
- Obr. 98.13 Foto: Pohled do prostoru pro skladování zastřešení [11]
- Obr. 9149. Nadhledová perspektiva olympijského stadionu v Montrealu [11]
- Obr. 100.15 Fáze zatahování membránového zastřešení. [33]
- Obr. 101. Fotografie a schéma zastřešení atria. Jedna z prvních realizací IL. [1]
- Obr. 102. Fotografie nadhledové perspektivy a interiéru. [1]
- Obr. 103. Fotografie a řez pohyblivým zastřešením skalního divadla. [1]
- Obr. 104. 16 Podélný řez rozvinutým zastřešením. [1]
- Obr. 105. Pohled z horizontu chodce a detail uchycení jednoho kotev. bodu [1]
- Obr. 106.17 Zastřešení v rozvinutém stavu nad místy pro sezení [1]
- Obr. 107. Fáze posuvu membrány v architektonickém modelu [1]
- Obr. 108. fotografie realizovaného zastřešení [1]
- Obr. 109. Schémata pohybu membrány [1]
- Obr. 110. Fotografie realizovaného membránového zastřešení [1]
- Obr. 111. Pohled, řez a půdorys pohyblivým zastřešením [1]
- Obr. 112. Fotografie interiéru zastřešeného bazénu [11]
- Obr. 113. Řez a půdorys pohyblivým zastřešením koupaliště [1]
- Obr. 114. Pohled na rozvinuté a svinuté pohyblivé zastřešení + detail šnekového motoru [1]
- Obr. 115. Řez Velou zastřešeným římským amfiteátrém [1]
- Obr. 116. Řez marockým stanem s polohou hřbetu [2]
- Obr. 117.. Zastřešení FUSHI 2016; Rozpon vazníku cca. 75 m. Plocha zastřešení 1050 m²; Architekti: ADR, Projekce ARCHTEX, vizualizace: autor.
- Obr. 118. Možné varianty detailů flexibilního liniového kotvení [30]
- Obr. 119. Varianty detailů pevného liniového kotvení [30]
- Obr. 120. Detail dvoukanálové Klausovy kedrlišty – foto autor - 22.2.2016
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]; foto autor
- Obr. 121. 18 Detail dvoukanálové Vysoko pevnostní kedrlišty 22.2.2016
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17] Foto autor
- Obr. 122. Detail dvoukanálové kedr-lišty kruhového průřezu; 22.2.2016
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]
- Obr. 123. Možnosti napojení jedno-kanálové kedrlišty – IKS PF 3000 [35]
- Obr. 124. Detail jednonálové kotevní lišty ISK – PL 3000 [35]
- Obr. 125. Detail speciální kedrlišty pro uchycení síťoviny; 22.2.2016
Foto autor; Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]
- Obr. 126. Detail uložení folie EFTE do izolačního kotevního profilu
TEXLON-Vector Foiltec [36]; foto autor
- Obr. 127. a 128. Detaily nerezové přítlačné lišty-povrch. balotina; 22.2.2016
Foto autor; Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]

Příloha č. 1

VÝBĚR REALIZOVANÝCH POHYBLIVÝCH MEMBRÁNOVÝCH ZASTŘEŠENÍ

STŘECHA ARÉNY BÝČÍCH ZÁPASŮ – Madrid 2000

Návrh: Jaime Pérez

HIP: SBP

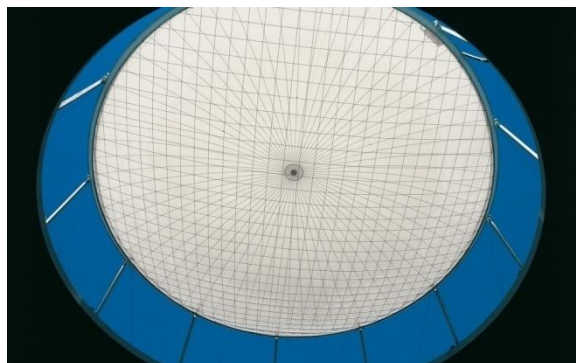
Systém: Pneumatická pohyblivá čočka

Konstrukce: Zavěšený pohyblivý rám

Materiál: ETFE

Plocha: 5890 m²

Doba otevření/zavření: 10 minut



Obr. 86. Spodní pohled na otevřenou čočku [33]

Centrum býčích zápasů bylo otevřeno v roce 2000 a zrealizováno firmou Schlaich und Bergermann und partner (dále jen SBP). Centrální prostor nad arénou býčích zápasů je zastřešen pneumatickou pohyblivou střechou s průměrem 100 m. Pohyb střechy spočívá ve vertikálním pohybu celé čočky nahoru a dolů. Střecha tak umožňuje regulovat přirozený tok vzduchu směrem vzhůru. Pro zachování prostorové tuhosti je čočka z ETFE ze spodní strany křížem stabilizována sítí z nerezových lan. [13]



Obr. 87. Boční pohled na otevřenou ETFE čočku s detailem soustavy vrcholových kladek na každém vertikálním pylonu. [33]

POHYBLIVÉ PNEUMATICKÉ ZASTŘEŠENÍ LANDSHAFT PARK – DUISBURG NORD

Návrh: Planinghaus architekten BDA

HIP: („SBP“)

Systém: Pneumatická řetězová plocha

Konstrukce: 9 segmentů 3x20m

Materiál: ETFE

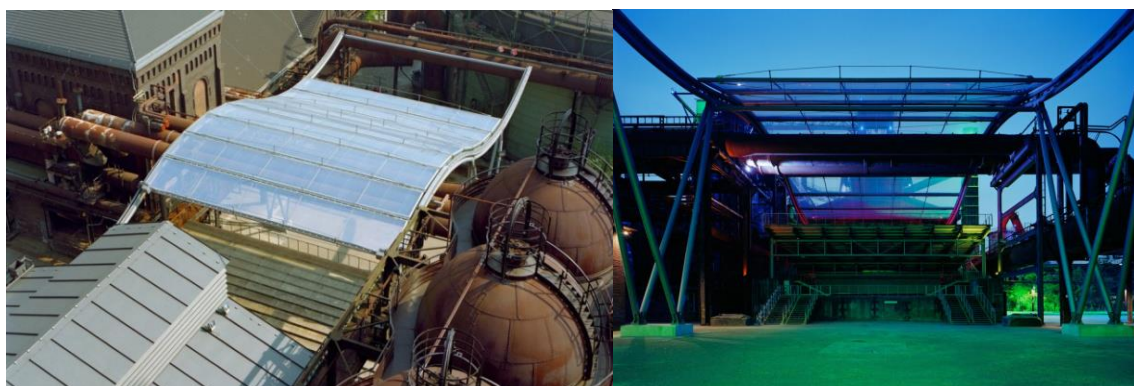
Plocha: 540 m²

Doba otevření/zavření: 5-10 minut



Obr. 88. ETFE mobilní zastřešení [13]
Landshaft park: pohled z úrovně diváka

Nevyužívaný duisburský industriální areál je přetvářen do parku s volnočasovými aktivitami. V roce 2003 zde byla realizována pohyblivá dvouvrstvá pneumatická konstrukce z čirých ETFE folií. Konstrukce se skládá z 8 obdélníkových polí podporovaných lanovými nosníky. Celé zastřešení pojíždí po jednosměrně zakřivené kolejnici, která svým tvarem připomíná vlnu a kompozičně rozbíjí vertikálu stávajících staveb. Díky subtilnosti konstrukce a čiré folii se pozorovatel pod zastřešením necítí stísněně, protože nad hlavou nevnímá změnu světelného toku. Lanové nosníky jsou díky jejich subtilním dimenzím málo rušivé a vhodně doplňují celou kompozici. [20]

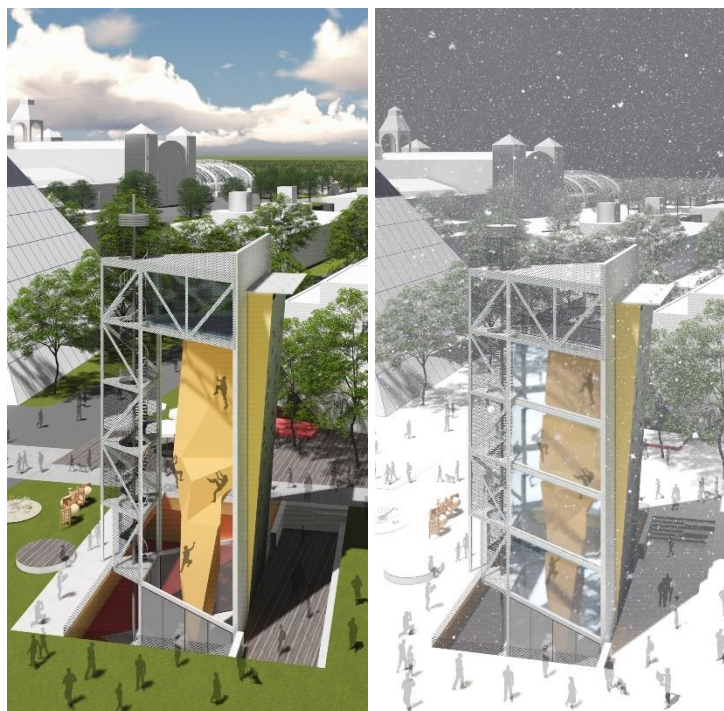


Obr. 89. Pohled shora na pohyblivé zastřešení; [33]

Obr. 90. Noční pohled na zastřešení; [33]

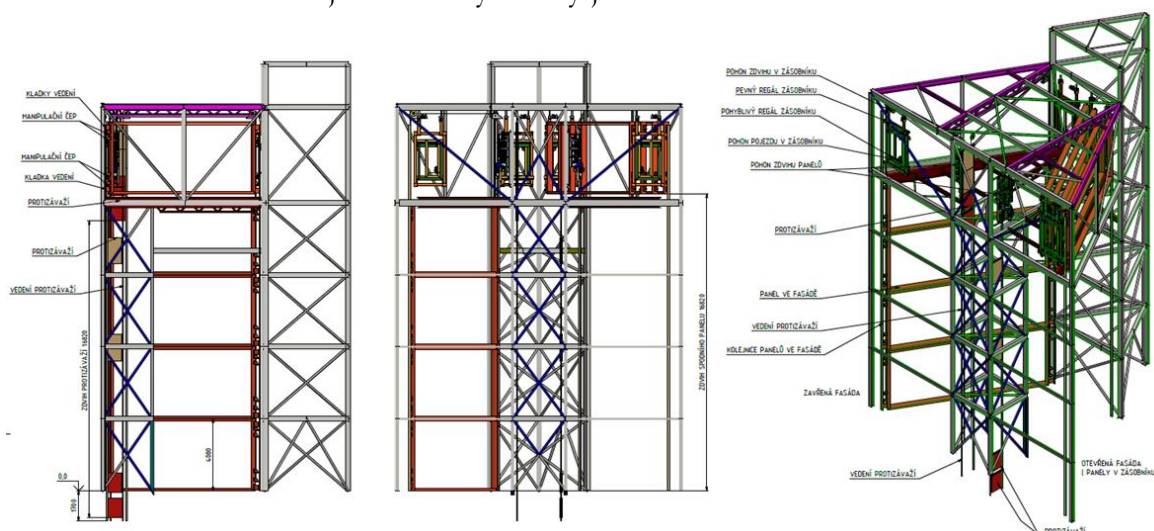
POHYBLIVÁ FASÁDA LEZECKÉ VĚŽE Z ETFE SEGMENTŮ PRAHA – ČESKÁ REPUBLIKA

Návrh: Kopřiva a kol.
(Jurčík, Vecko, Němeček)
Stupeň: DSP
Systém: pohyblivé rámy
z ETFE polštářů
Plocha: 304 m²
Doba otevření: 7 minut



Obr. 91 a 92. Vizualizace lezecké věže v letním a zimním období. Vizualizace autor.

Architektonická studie lezecké věže s pohyblivou fasádou z pevných pneumatických ETFE segmentů. Mobilní fasáda umožňuje v příznivém počasí otevření věže do exteriéru a v zimě při zatažení izoluje a prodlužuje tak využitelnost lezecké věže na celý rok. Pohyblivý systém se skladováním jednotlivých segmentů v horním úložišti navrhla firma EST Stage technology, která se specializuje na jevištní pohyblivou techniku. Doba otevření jedné strany fasády je 7 minut.



Obr. 93. Výkresy systému pohybu a skladování jednotlivých segmentů fasády

POHYBLIVÉ ZASTŘEŠENÍ STADIONU TOYOTA MĚSTO TOYOTA

Návrh: Kisho Korokawa

HIP Střechy: OveArup & Partners

Systém: Pneumatická pohyblivá membrána

Konstrukce: Do strany stahovaná řetězová plocha na příhradových vaznicích

Materiál: PTFE

Doba otevření / zavření: Méně než hodina

Rozměr: cca 160x60m

Toyota aréna je charakteristická svými čtyřmi vysokými pylony, které nesou hlavní zvlněnou střechu nad západní a jižní tribunou. Prostor nad hřištěm je v případě potřeby zastřešen pohyblivou střechou, která je složena ze soustavy pneumatických rukávů z PTFE. Tato střecha umožňuje stadion v případě nepřízně počasí kompletně uzavřít za méně než hodinu. Kvůli možnosti, že bude v kritické fázi montáže celá pohyblivá část střechy odfouknuta, byla střecha namontována za méně než 6 dní! Těto rychlosti bylo dosaženo především díky předem prefabrikovaným segmentům membrány i nosným konstrukcím celého zastřešení. Jednotlivé části zastřešení se pak pomocí jeřábů umístily na předem provedenou jeřábovou dráhu, po které se membránová lomenice pohybuje. [11]



Obr. 94. Pohled na shrnuté zastřešení v dolní části stadionu [11]

POHYBLIVÉ ZASTŘEŠENÍ STADIONU AL JANOUB AL WAKRAH – KATAR

Návrh: Zaha Hadid Architects, Londýn

HIP: („SBP“)

Systém: Pohyblivá lomenice stahovaná rovnoběžně s úžlabím

Konstrukce: Soustava nosných radiálních lan kotvená na středový příhradový vazník

Materiál: Polyesterová membrána s PVC zátěrem

Plocha: 10 800 m²

Doba otevření/zavření: 30 minut

Pro ochranu před extrémními klimatickými výkyvy byla navržena na fotbalový stadion Al Janoub v Kataru lehká pohyblivá membránová konstrukce. Lehká jednovrstvá membrána se dokáže otevřít nebo zavřít za 30 minut. Celá forma stadionu, včetně pohyblivého zastřešení, vychází z tradičních plachet na plachetnicích lokálních rybářů. Stejně jako vnější obálka stadionu je pohyblivé membránové zastřešení osově symetrické podle hlavního středového vazníku, na který jsou kotvena radiální lana o průměru 55 mm. Po předepnutých lanech jednotlivé poloviny zastřešení pojíždí proti sobě. Pohyblivé zastřešení je tvořeno jednovrstvou lomenicí z PES/PVC membrány a je netradičně stahováno do stran zastřešované plochy. [33]



Obr. 95. Foto: Pohledy na zatažené a roztahované zastřešení [33]

POHYBLIVÉ ZASTÍNĚNÍ NÁMĚSTÍ HEART OF DOHA

DOHA – KATAR

Návrh: Mossessian Architecture; Burns & McDonnell

HIP: („SBP“)

Systém: Lomenice tvořené tuhými rámy s nataženou PVC/PES membránou

Konstrukce: Lanová konstrukce se stacionárním navijákovým systémem

Materiál: Polyesterová membrána s PVC zátěrem

Plocha: 4500 m²

Doba otevření/zavření: 5 minut

Hlavním účelem segmentového zastínění nad náměstím Barahat Al-Nouq je snížit teplotu na náměstí z 50 °C na 32 °C. Toho je dosaženo pomocí třiceti samostatně ovladatelných segmentových polí. Každé pole se skládá z osmnácti skládacích ráků do tvaru V, které jsou potaženy polyesterovou membránou s PVC zátěrem. Při silném větru přes 21 m/s je zastřešení během pěti minut složeno do skladovacích prostor nad střechou objektu a zcela tak zmizí z pohledu pozorovatele. [33]



Obr. 96. Foto: Pohledy na roztahované a roztažené segmentové zastínění. [33]

MOBILNÍ ZASTŘEŠENÍ VP. Č.1

OSTRAVA VÍTKOVICE

Návrh: AP Atelier Pleskot

HIP: Archtex s.r.o.

Systém: jednovrstvá do strany stahovaná lomenice

Konstrukce: Ocelové příhradové vazníky pojíždějící po jeřábové dráze

Materiál: Polyesterová membrána s PVC zátěrem

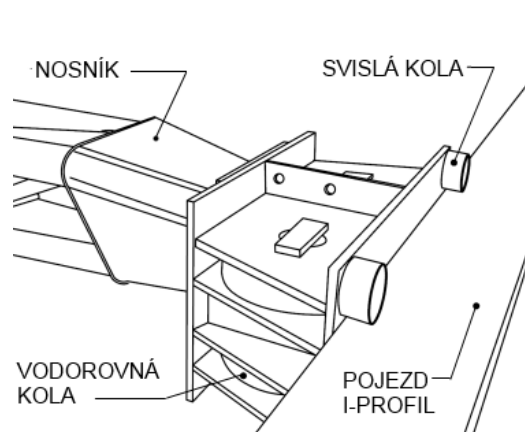
Plocha 800 m²

Doba rozvinu: 6 minut

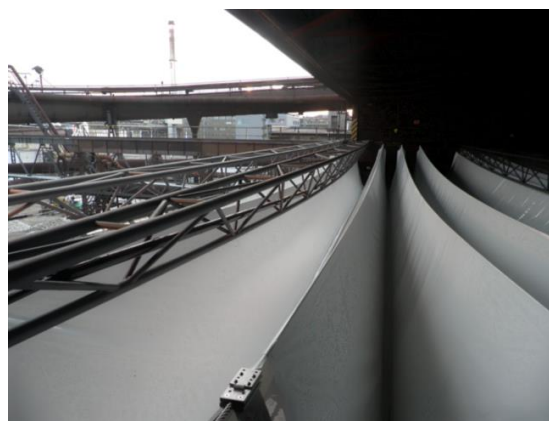
V roce 2012 byla do střední výšky traktu vysoké pece č. 1 pod předsunutou střechu nainstalována zatahovací textilní membránová konstrukce. Toto mobilní zastřešení slouží během kulturních akcí a festivalu Colours of Ostrava jako zastřešení Hlediště před Stage, kde vystupují známé hudební skupiny z domova i ze světa.

Zastřešení je zhotoveno z jednovrstvé polyesterové membrány s PVC zátěrem. Zastřešení má rozměry 25x33m a doba rozvinu je 6 minut. Zastřešení pohání dvojice elektrických motorů, které jsou spojeny synchronizační tyčí. Jako forma pro zastřešení byla zvolena horizontálně zatahovaná lomenice.

Konstrukční systém pohyblivého zastřešení je soustava trojbokých příhradových vazníků, které pojíždí po jeřábové dráze. Výsledný tvar hřebene je zajištěn vložením nerezového lana. Předepnutí membrány a vytvarování úžlabí je provedeno vložením ocelového trubkového profilu do každého úžlabí pohyblivého zastřešení. Tyto trubky jsou pak při dokončení rozvinu střechy stabilizovány pomocí řetězových napínacích soustav. Napínací soustavy jsou umístěny uvnitř úžlabních svodů, které odvádí vodu ze zastřešení. [11]



Obr. 97. Detail pohyblivého systému. Schéma vytvořil autor



Obr. 98. Foto: Pohled do prostoru pro skladování zastřešení [11]

OLYMPIJSKÝ STADION V MONTREALU

Návrh, realizace: Roger Taillibert, IL, SBP, 1976

Zastřešená plocha: 20 000 m²

Rozměry: elipsa o rozměrech 200 x 140 m

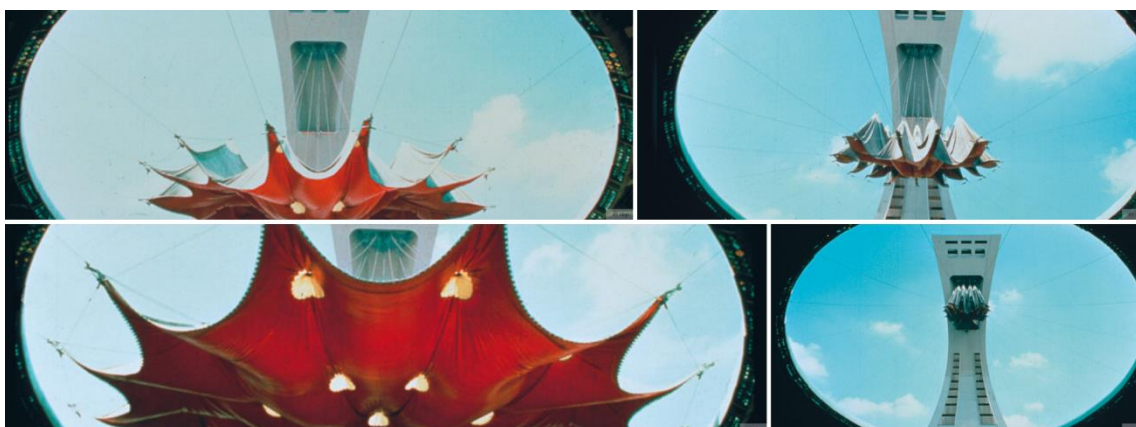
Systém: Radiální lanová konstrukce s excentricky umístěným pylonem

Doba rozvinu střechy: 30 minut

Futuristický olympijský stadion s největší dostředně stahovanou střechou zavěšenou na radiálních lanech. Vrcholná spolupráce architekta Tailliberta s Frei Ottem. Pro svou velikost a problémy s lokálními dodavateli byla realizace tohoto ambiciózního projektu komplikovaná. Pohyblivé zastřešení z kevlaru bylo tak nákladné, že výslednou konstrukci nebyl schopný nikdo pojistit. Pohyblivé zastřešení však mnoho let fungovalo a v zimě přečkalo nejedno nadlimitní zatížení sněhem.



Obr. 99. Náhled perspektiva olympijského stadionu v Montrealu [11]

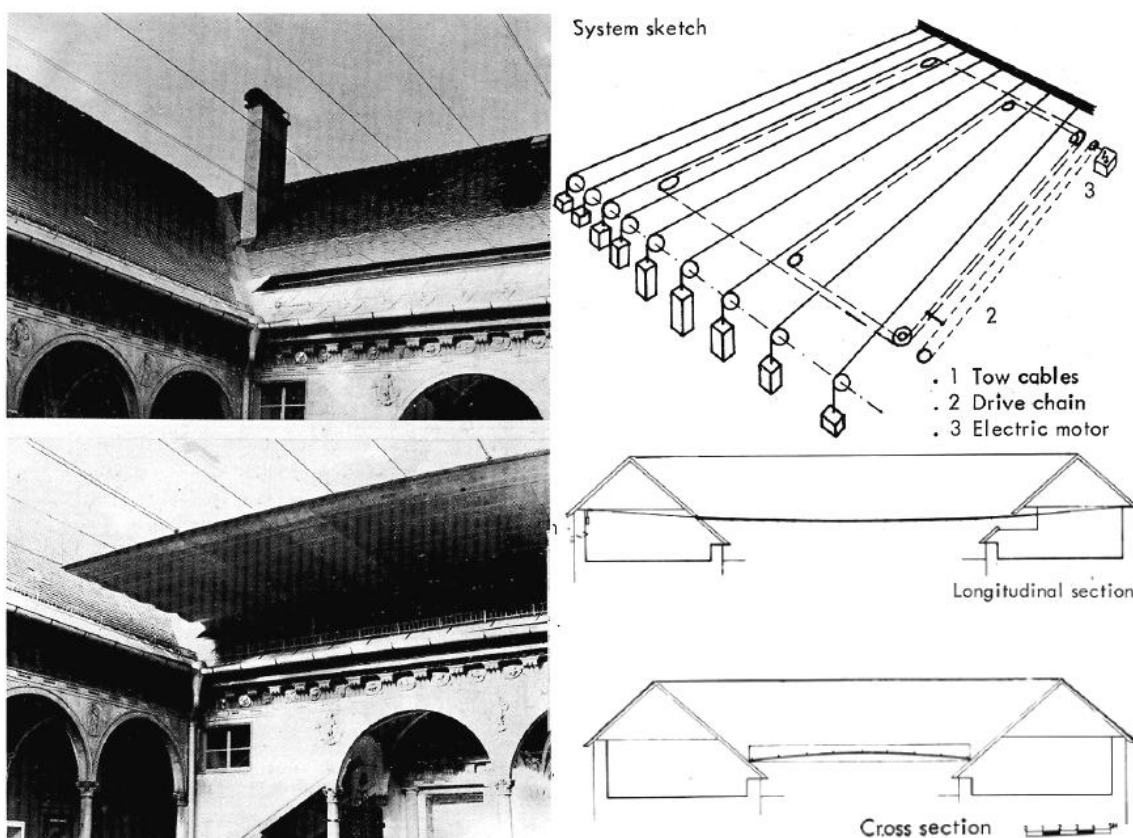


Obr. 100. Fáze zatahování membránového zastřešení [33]

VEKNOVNÍ DIVADLO – SCHLOSS PORCIA RAKOUSKO

Návrh, realizace: 1961 - IL
zastřešená plocha: 273 m²
rozměry: 13 x 22,5m
doba rozvinu střechy: 2 minuty

Obdélníkové zastřešení atria pomocí membrány, která je nesena skupinou lan. Membrána je skládána k jednomu z užších okrajů obdélníkového půdorysu. Podpůrná konstrukce se skládá z devíti kabelů o průměru 9 mm. Lana jsou rovnoměrně rozmístěna po 169 cm. Lana jsou předepnuta systémem závaží a jezdí po nich kladky rozmístěné 1 m od sebe, na kterých je uchycena membrána. Střední kabely jsou předepnuty na 510kPa a předepnutí dalších kabelů se průběžně snižuje až na 210kPa což je hodnota u krajních kabelů. V příčném směru jsou mezi jednotlivými kladkami průběžně umístěny trubky z lehkých slitin, které zamezují tvorbě kapes při dešti. Na přední straně pohyblivého zastřešení je ocelový nosník, který vytahuje membránu po celé její šíři. Ocelovým nosníkem pohybuje soustava nekonečných lan. Řídící mechanismus celého zastřešení se skládá z dvojice elektrických motorů o výkonu 2x2HP, které jsou umístěné v půdním prostoru pod vrcholem střechy. [1]



Obr. 101. Fotografie a schéma zastřešení atria. Jedna z prvních realizací IL. [1]

ARTIFICIAL ICE RING – ŠVÝCARSKO

Návrh a konstrukce: F. Tschumi

Realizováno: 1963, návrh střechy: L. Stromeier, Konstratz

zastřešená plocha: 1800 m²

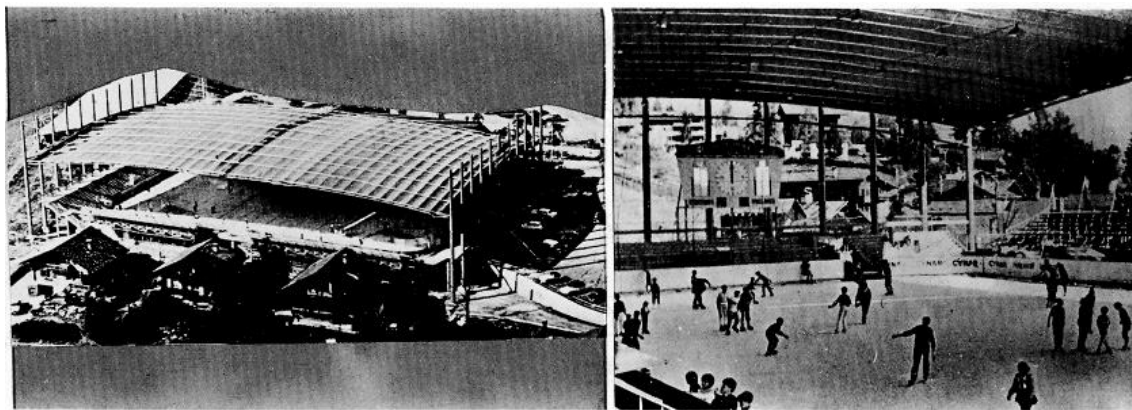
Rozměry: Délka 60 m, šířka 30 m

Rychlost rozvinu: 0,2m/sec.

Toto zastřešení nesloužilo pouze jako ochrana před deštěm, ale také jako stínění během letního využívání ledové plochy. Když začal padat sníh, musela být střecha zatažena. Automatický zatahovací mechanismus byl napojen na meteorologický systém měřící rychlost větru. Tento systém vydal automaticky pokyn k zatažení střechy, pokud se začala blížit bouře. [1]

Na delších stranách kluziště bylo vždy jedenáct sloupů. Mezi sloupy byl přes ledovou plochu napnut systém prostorových lanových nosníků. Po lanových nosnících pojížděla na kladkách pohyblivá střecha. Zatahovací střecha byla rozdělena na dvě části, které se jako harmonika skládaly vždy od středu pole ke kraji na nosné sloupy.

Materiál použitý na zastřešení bylo bavlněné stanové plátno.



Obr. 102. Fotografie nadhledové perspektivy a interiéru; [1]

FELSENREITSCHULE

Rakousko-Salzburk

Design: Holzmeister – Vídeň

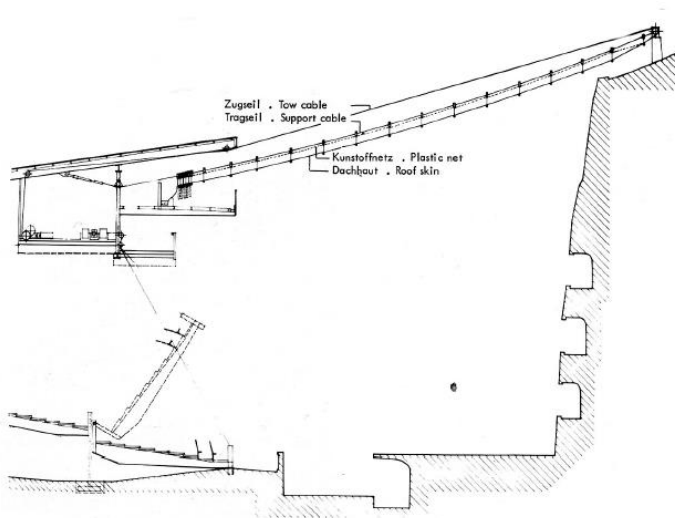
Stavba-1968-1970

Zastřešená plocha: 1200 m²

Doba pohybu: 2 minuty

Ve Felsenreitschule probíhá Salzburský festival a jako ochrana před nepřízní počasí zde byla provedena pohyblivá membrána zastřešující historické atrium, jenž je určeno pro divadelní vystoupení. Pohyblivé zastřešení je po stranách zapuštěno do stávající stavby, překrývá patrové hlediště a těsně doléhá ke skále hory Monchsberg. Jako materiál je zde použita vysokopevnostní polyesterová tkanina z obou stran ošetřená PVC zátěrem. [1]

Aby bylo zamezeno hluku, který vytváří déšť, je 45 cm nad zastřešením instalovaná jemná polyesterová síť. Tato síť se pohybuje souběžně se zastřešením a tříští kapky vody před dopadem na zastřešení na vodní mlhu. Žádná kapka tak na zastřešení nezabubnuje. Odvodnění střechy je řešeno odtokovým žlabem umístěným po celé délce přední hrany zastřešení jeviště.



Obr. 103. Fotografie a řez pohyblivým zastřešením skalního divadla [1]

VENKOVNÍ DIVADLO – BAD HERSFELD

Návrh: 1966, realizace: 1968 - IL

Investor: bad Hersfeld Municipal council, Konstanz

Rozměry: 45/37 m

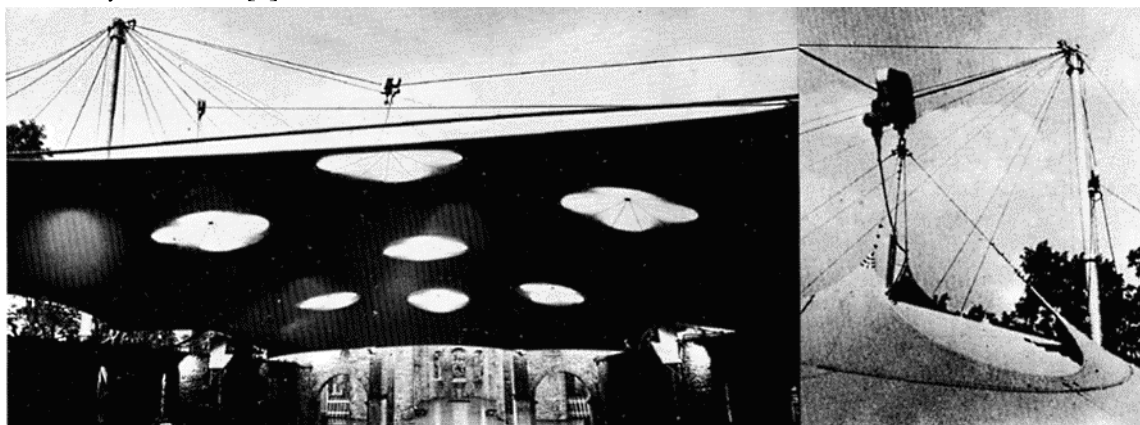
Zastřešená plocha: 1315 m²

Doba rozvinu: 4 minuty

Pohyblivé zastřešení bylo postaveno u příležitosti letního open-air festivalu v Bad Hersfeldu. Organizátoři chtěli mít jeden prostor nezávislý na počasí a v roce 1959 uspořádaly soutěž o zastřešení stejnojmenných ruin. Zadáním investora bylo neporušit celistvý dojem z románských ruin a zastřešit požadovaný prostor pouze pokud bude pršet. Navíc byl přidán požadavek, že bude celá konstrukce demontována a odvezena po skončení festivalové sezóny.

Hlavní nosný pylon je umístěn excentricky za stěnou na příčné ose A chrámové lodi. Jedná se o 32 m vysoký sloup o průměru 360 mm a síle stěny 20 mm. Nosník je stabilizován systémem kotevnicích lan, z nichž lana přecházející přes chrámovou loď zároveň slouží jako vodící lana pro mobilní zastřešení. (KOPŘIVA 2015)

Zadní kotevní kabely mají průřez 40 mm a přední kotevní kabely, kterých je 14 mají průměr 23 mm. Každý ze 14 kotevnicích bodu membrány má svůj vlastní lanový vozík. Každý lanový vozík má svůj vlastní elektrický motor a je osazen čtveřicí kladek, po kterých se pohybuje profilovaný řetěz. Soustava kladek je proti sobě předeprnutá, aby vozík nepotřeboval žádné jiné jištění. Okrajové vozíky mají jistící sílu 7000 kPa a vozíky v poli mají stabilizační sílu 3500 kPa. Všechny vozíky jsou schopny rychlosti pohybu v rozmezí od 6. do 13. m/s. Pro vyladění detailů byl zhotoven funkční pohyblivý fyzický model v měřítku 1:50. Na modelu bylo zkoumáno statické působení lanového systému a také na něm byl upřesněn finální tvar membrány. Na zakrytí vrchlíků je použita transparentní fólie. Vrchlíky mají 5 m v průměru a folie je k nim ve svárech přišita a šev je ovařen, aby byl nepropustný. Světlíky vytváří tak efekt rozetových oken. [1]



Obr. 105. Pohled z horizontu chodce a detail uchycení jednoho kotevního bodu [1]

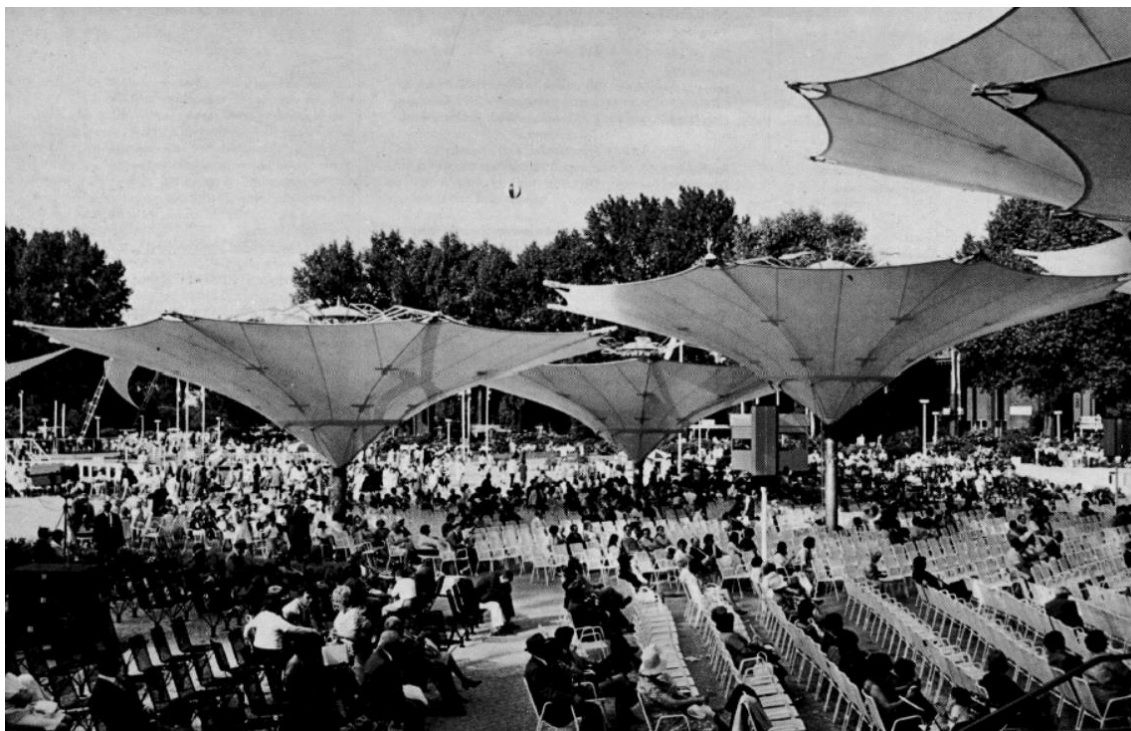
BUGA CANOPIES

Mezinárodní zahradní slavnost 1970 - Colonge – západní Německo
zastřešená plocha: 220 m²; Rozměry: poloměr: max. 17,4m; min. 15,5m

Na zahradním festivalu v Rhine parku bylo 2000 míst na sezení a několik tanečních parketů. Pro zahradní slavnost zde bylo zastřešeno 800 míst na sezení a jeden taneční parket o ploše 200 m². Tento prostor byl zastřešen navazujícími pohyblivými střešními konstrukcemi, které tak tvoří jednolitou střechu.

Kruhové membrány mají formu květu. Byly vyráběny v malých sériích a po skončení akce byly, díky tomu že je lze transportovat, použity pro zastřešení jiných prostor. Zastřešení se skládají z žárově pozinkované konstrukce a membrány z polyesterových vláken, která jsou ošetřena PVC zátěrem.

Pohyblivá část zastřešení je tvořena čtyřmi skládacími rameny. Tato ramena jsou kloubově přikotvena k hlavnímu sloupu, který je vetknut do základů. Součástí hlavního sloupu je pohyblivá část poháněná motorem o výkonu 4 HP. Tato část pohybuje skládacími rameny a otevírá, či zavírá celou membránovou konstrukci. Ve složené pozici chrání zataženou membránu sloupová hlavice, která brání větru, aby s membránou třepotal a dešti, aby zatékal mezi záhyby textilie. Zároveň jsou na hlavici kotevní body pro reproduktory a osvětlení. [1]



Obr. 106.20 Zastřešení v rozvinutém stavu nad místy pro sezení [1]

ZASTŘEŠENÍ LEDOVÉ PLOCHY – CONFAS HONORINE

Architekt: I Blasco.

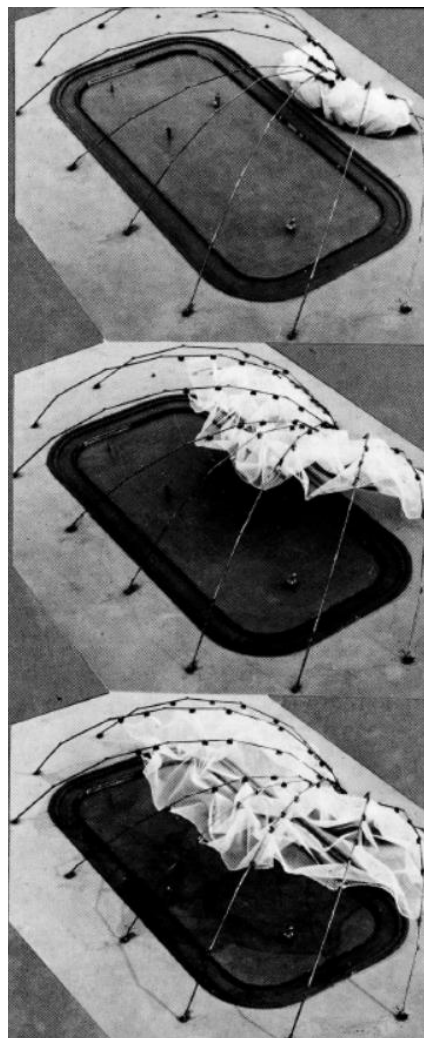
zastřešená plocha 3300 m²

Rozměry: 90 m / 50 m

Ledová plocha je překlenuta soustavou příhradových vazníků, které jsou rozkročeny jako pavoučí nohy. Oblouky dosahují v nejvyšším místě 16,6m a maximální světlá výška zastřešení je 10,7m [1]

Spodní pasy příhradového vazníku jsou uzpůsobeny k pojezdu samohybných vozíků, které jsou centrálně řízeny a společně umožňují otevírání a zavírání střechy. Geometrie zastřešení byla vytvořena za pomoci řetízkového negativního modelu.

Na fotografiích modelu a realizace je dobře patrný rozdíl v dimenzích nosné konstrukce, kde se pod prostorovými příhradovými vazníky membránové zastřešení zcela ztrácí a celkový dojem oproti např. Bad Hersfeldu je horší.



Obr. 107. Fáze posuvu membrány v architektonickém modelu [1]



Obr. 108. fotografie realizovaného zastřešení [1]

VÝSTAVNÍ PAVILON – NEW YORK

Lokace: Muzeum moderního umění New York

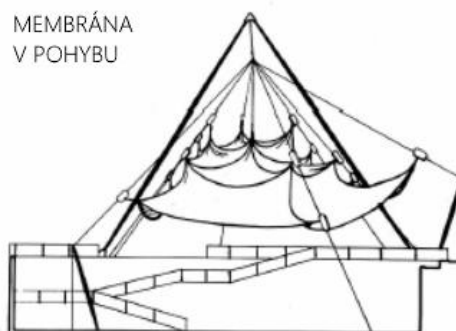
Návrh: R. L. Medlin

Dynamický příklad pohyblivé membrány. Zastřešení je zavěšeno na systém osmi radiálních vodících lan. Vodící lana jsou přikotvena na rozkročený centrální příhradový vazník a systém po obvodě půdorysu rozmístěných dostředně tlačných sloupů.

Rozehraný tvar membrány je způsoben vytažením několika bodů v poli membrány, které zároveň slouží jako kotvení body a zakřívují celou plochu tak, aby při dešti lépe odtékala voda. Formou může toto zastřešení připomínat pavučinu v trávě po dešti.

Z finančních důvodů byl projekt nakonec realizován jako nepohyblivá konstrukce.

[1]



Obr. 109. Schémata pohybu membrány [1]



Obr. 110. Fotografie realizovaného membránového zastřešení [1]

PLAVECKÝ BAZÉN BOULEVARD CARNOT

lokality. Paříž: Francie

architekt: R Taillibert

design. IL

zastřešená plocha: 1800 m²

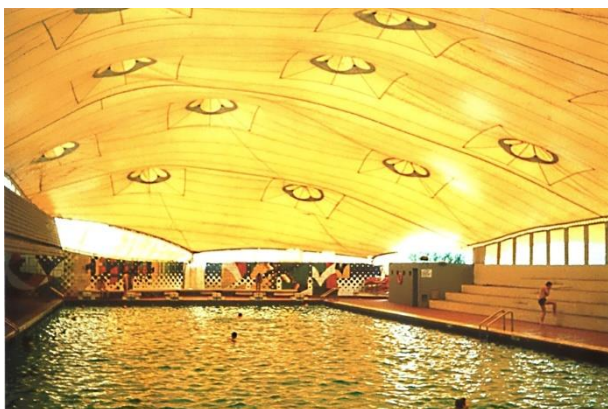
rozměry: 62 m/32 m

Doba rozvinu: 12 minut

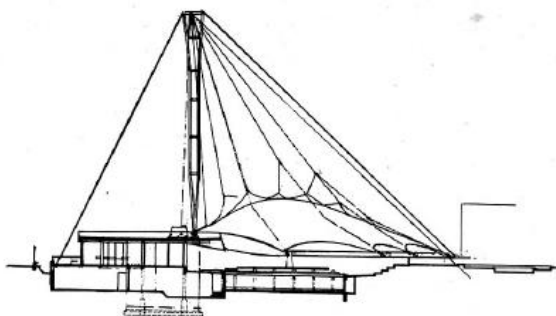
Bazén byl vybudovaný na relativně malém pozemku v rezidenční oblasti Paříže s jednovrstvým mobilním zastřešením. Díky mobilnímu zastřešení bylo možné používat bazén po celý rok bez ohledu na počasí, a zvětšila se tím jeho užitná hodnota. Konstrukční systém, který je zde použitý, je stejný jako v Canes, Hersfeldu, a Davosu, protože s nimi byly dobré experimentální zkušenosti.

Nosný pylon je zde vysoký 18 m a je zakotven do stávající konstrukce. Z pylonu vybíhá 10 vodících kabelů přes bazén a dva kabely pylon stabilizují v opačném směru.

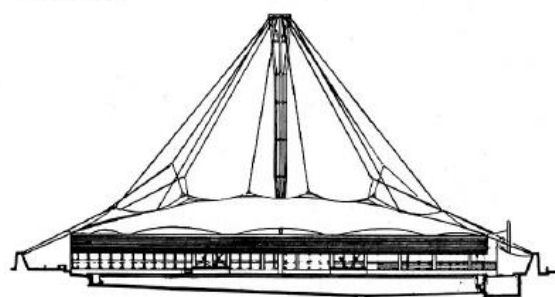
Ve složeném stavu je membrána chráněna u vrcholu pylonu dvojicí pohyblivých půlkruhových příhradových prvků, které slouží jako ochrana před větrem a brání membráně v rozhoupání. [1]



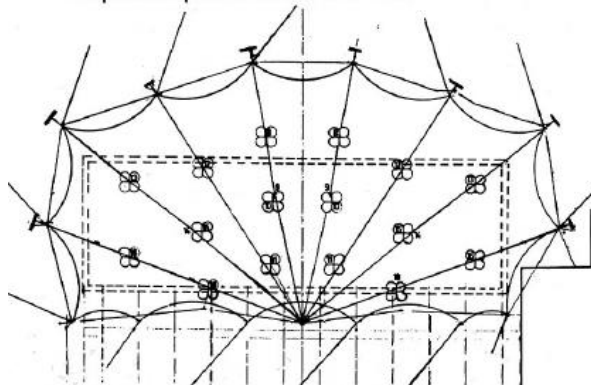
Cross section



Front view



Suspension points for the roof skin



Obr. 111. Pohled, řez a půdorys pohyblivým zastřešením OTTO [1]

Obr. 112. Fotografie interiéru zastřešeného bazénu [kopřiva]

SCHWIMBAD RUE DAVID ANGERS

Paříž Francie

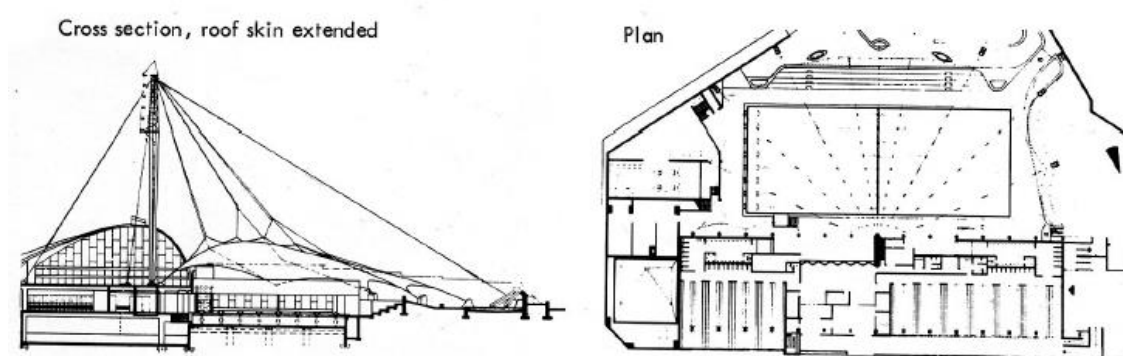
Design 1968 - R. Taillibert

Zastřešená plocha: 1800 m²

Rozměry: 63 m / 37 m

Doba rozvinu: 12 minut

Standardizovaná pohyblivá střešní konstrukce, která byla použita pro Boulevard Carnot. Návrh prošel drobnými úpravami, které nejsou na první pohled vidět. Výška hlavního pylonu je 27 m a maximální čistá výška je 9 m. [1]



Obr. 113. Řez a půdorys pohyblivým zastřešením koupaliště [1]

HOECHST EXHIBITION PAVILON

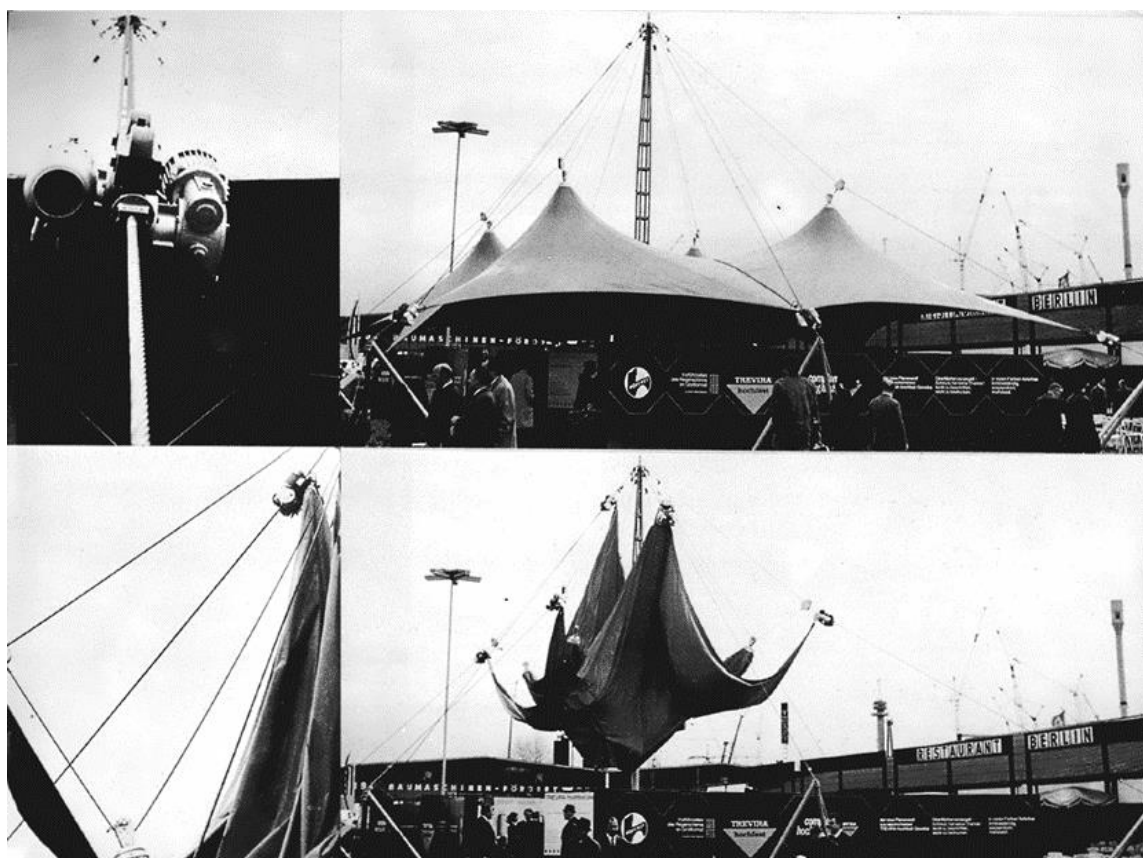
Hannover 1970, západní Německo

Rozměry: 17 / 12 m; zastřešený půdorys: 250 m²

Doba rozvinu: 2,5 minuty

Centrální ocelový pylon je zakotven do čtyř rohů a do středu pole osmi vodícími kabely. Kabelové vozíky pro roztahování a zatahování membrány jsou vyrobeny ze dvojice proti lanu předepnutých kladkových systémů. Všechny čtyři kladky jsou poháněny samostatným šnekovým motorem. Šnekový motor v každém vozíku slouží současně k aretaci pohonu, když je membrána na své pozici a nepohybuje se. Kabelové vozíky mají maximální rychlost pohybu 10,5m za minutu a maximální zdvih 450KPa. Celý systém je elektricky řízen. [1]

Světlá výška zastřešení je 2,3m a maximální výška podpůrných bodů pagody je 5,5m. Všechny potřebné kabely elektroinstalace jsou umístěny v hlavním pylonu. Materiál membrány je Translucentní textilie Trevia-Hochfest s PVC zátěrem. [1]



Obr. 114. Pohled na rozvinuté a svinuté pohyblivé zastřešení + detail šnekového motoru [1]

Příloha č. 2

Liniové kotevní okraje membránového zastřešení

Úvod

O problematice liniového kotvení lehkých membránových konstrukcí všeobecně pojednává Urugvajský architekt Roberto Santomauro.

Okrajová kotvení membránových zastřešení jsou různá v závislosti na tvaru a velikosti prostoru, který je zastřešován. Stabilizace okraje membrány se dále rozděluje na pevnou stabilizaci okraje a flexibilní stabilizaci okraje. Okraj zastřešení je v závislosti na předem stanovených okrajových podmínkách horizontální, nebo nepravidelný. Membránové zastřešení se vždy stabilizuje po celém okraji, aby se správně roznesly tangenciální síly a membrána se u okraje sváru nezvlnila. [2]

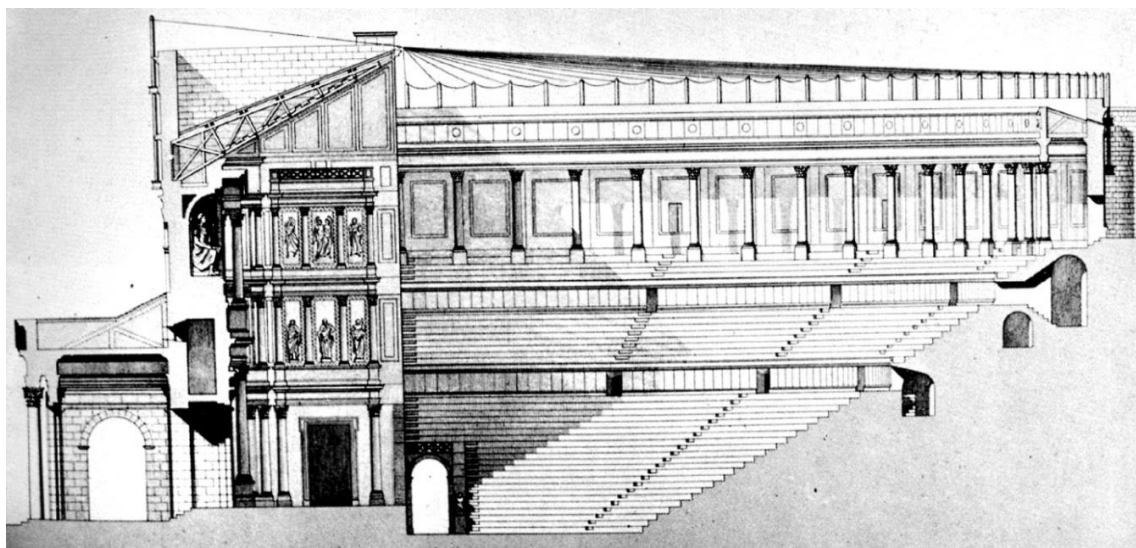
Stabilizace okraje membrány je jedna z důležitých a limitujících vstupních podmínek při tvorbě lehkého zastřešení. Musí být řešeny konkrétní detaily a návaznosti na stávající konstrukce. Pokud zastřešení přiléhá k budově, měl by být řešen směr odvodnění a další souvislosti. [2]

Předchůdci liniového kotvení

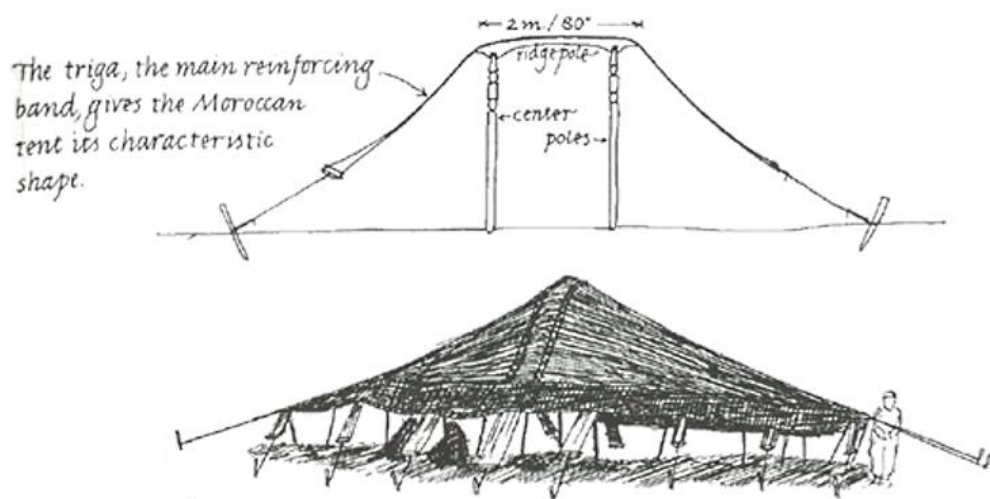
Původním předchůdcem mobilních lehkých membránových zastřešení je Ottem označováno římské velum, viz obr. 115. Velum bylo používáno jako mobilní zastřešení a zastínění římských amfiteátrů. Současná moderní membránová zastřešení se liší možnostmi zastřešit velké rozpory. Velkorozponové lehké membránové konstrukce začal realizovat v 60. letech minulého století tým z university ve Stuttgartu pod vedením Freie Otta a stal se průkopníkem v používání moderních materiálů. [1]

Nosný prvek, který se svým principem blíží současnému typu pevné stabilizace membrány v poli, byl používán marockými kočovníky po staletí. Jednalo se o výztužný pás "Trigu", který byl vplétán do středu stanového pole. Pás byl na hřbetu stabilizován proti posunutí nosnou dřevěnou konstrukcí a tvořil tak hřeben stanu viz obr.1b. [2]

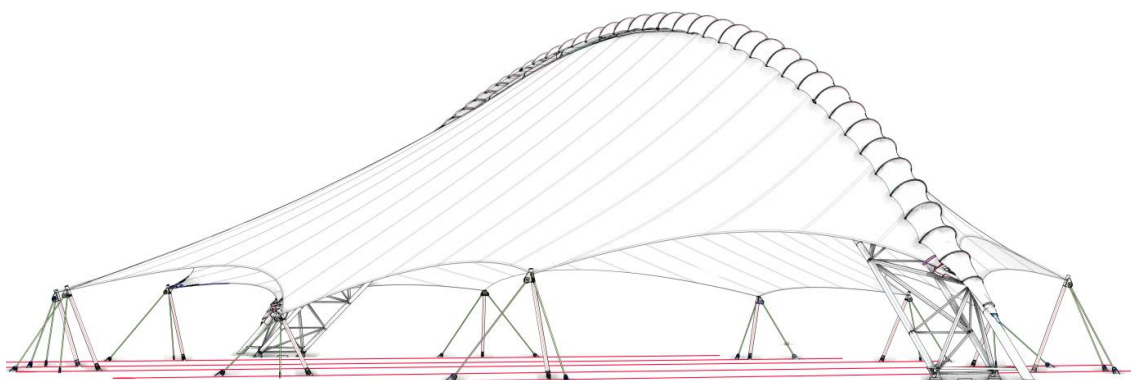
Ve dva metry dlouhé hřbetní poloze na "ridge pole" byly prvky stabilizovány stejně jako kotevní lišty používané dnes. Díky osově souměrnosti byly nosné sloupy dostředně namáhané a celé zastřešení bylo stabilizováno lany po obvodě viz.obr. 116. [2] Pro porovnání se současností je uveden příklad navrhovaného membránového zastřešení Fushi Šapito z roku 2016 viz. obr. 117. Tvarově jsou si tyto dva příklady až překvapivě podobné. Rozdíl je v podstatě v měřítku a na měřítku závislé rozdílné dimenzi nosných konstrukcí. U Fushi Šapito je membrána kotvena na masivní prostorový příhradový vazník, kdežto u marockého stanu jsou konce pouze stahovány zesíleným pásem. Srovnávaný marocký stan je roven 1/10 rozpětí membránového zastřešení Fushi Šapito. [34]



Obr. 115. Řez Velou zastřešeným římským amfiteátre [1]



Obr. 116. Řez marockým stanem s polohou hřbetu [2]



Obr. 117.. Zastřešení FUSHI 2016; Rozpon vazníku ze cca 75m. Plocha zastřešení 1050m²; Architekti: ADR, Projekce ARCHTEX, vizualizace: autor.

Liniové kotvení okraje membránového zastřešení

Dle Houtmana a Werkmana se liniové okraje membrány dělí dle uchycení na dva typy. Pružné liniové uchycení a pevné liniové uchycení. Oba způsoby stabilizace se používají jak v poli, tak po obvodě membrány. [30]

Kotevní lišta, nebo přítlačná lišta, je liniový kotevní prvek systému membránového zastřešení. Hlavní funkcí liniového kotvení membrány je stabilizace okraje membrány po celé její délce. Liniové kotevní membrány lze navrhovat i v poli, a to v případě navázání jednotlivých polí membrány za sebou. Spoje membrány v poli lze také navrhovat rozebíratelné.

Stabilizace okraje membrány je tedy možná buď pevným liniovým kotvením (Kotevní lištou - "kedrlištou", přítlačnou lištou), nebo obvodovým lanem. U dočasných zastřešení lze okraj stabilizovat také pouze zesílením. [11] Dalším druhem kotvení membrány je bodové kotvení. Bodové kotvení je tvořeno většinou ocelovými plotnami, do kterých ústí obvodová lana membrány.

Princip flexibilního liniového uchycení

Flexibilní zakřivené liniové uchycení umožňuje předepnutí materiálu pomocí dvojice terminálů v rohovém napojení na podpurnou konstrukci. Flexibilní uchycení se dělí na tři druhy. [30]

a) Přivařený tunel s probíhajícím obvodovým lanem

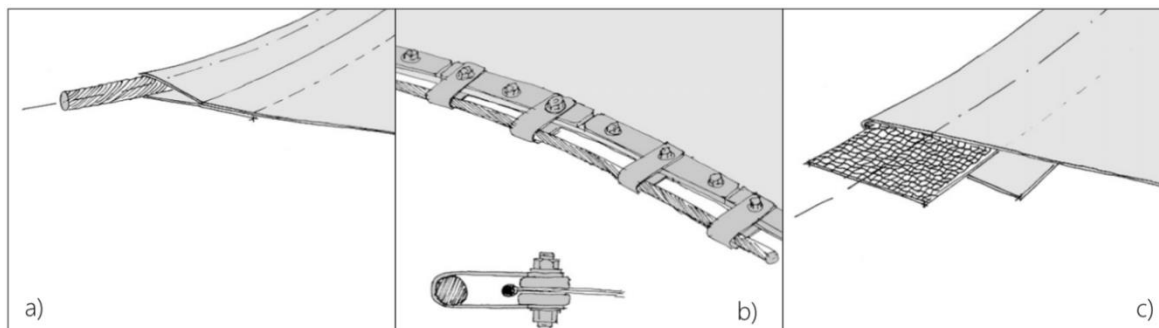
Tento způsob uchycení se používá u PVC materiálů. Obvodové lano je zakotveno do rohových kování. Tento způsob kotvení je používán i u PTFE materiálů, ale pouze dokud se výsledné tangenciální síly blíží návrhové mezi použitelnosti materiálu v tahu. Jinak by se poškodila skelná vlákna, která jsou při ohybu nevhodně namáhána. Všeobecně se pro PTFE materiál používá stabilizace pomocí přítlačných lišt a odsazeného obvodového lana. [30]

b) Stabilizace pomocí přítlačných lišt a odsazeného obvod. lana

Jak už bylo předesláno, obvodové lano je umístěno odsazené od materiálu a tangenciální síly jsou vynášeny pomocí soustavy přítlačných lišt s příponkami a průběžným obvodovým lanem. Membrána je sevřena mezi dvě lišty a je opatřena kedrem, který je o lišty opřen a při předpínání se aktivuje. Sešroubování zde hraje stabilizační, nikoliv nosnou roli. Tento detail je velmi běžně používán u PTFE materiálů a PVC materiálů u kterých délka okraje membrány překročí 20 m. [30]

c) Zesílení pomocí zašitých pásů

Zesílení pomocí zašitých pásů se používá u dočasných staveb, pohyblivých zastřešení, nebo malých deštníků, kde je silové působení menší. Při správné aplikaci také přebírá funkci nositele tangenciálních sil. Tento detail se používá u přírodních a PVC materiálů. U PTFE materiálů se tento způsob stabilizace okraje nepoužívá. Skelná matrice je při šití poškozena a vnikající vlhkost způsobuje degradaci materiálu a pokles pevnosti v okraji. [29]



Obr. 118. Možné varianty detailů flexibilního liniového kotvení [30]

Princip pevného liniového kotvení lehké membrány

Základní princip liniového kotvení spočívá v průběžné a rovnoměrné stabilizaci okraje membrány. Membrána je sevřena mezi dvojicí přitlačných lišt a zakončena pružným kabelem z PVC materiálu - "kedrem", který se po předepnutí membrány aktivuje tahovými silami a opře se o okraj přitlačné lišty. Jako materiál přitlačných lišt je obvykle použita nerezová ocel v jakosti dle prostředí. Běžně se používá ocel 1.4301. Do kyselějších prostředí se využívá ocel 1.4401 a lepší. [30]

Další variantou pevného liniového kotvení je stabilizace okraje pomocí kotevní "kedr" lišty. Jako materiál na kotevní lišty se používá hliník. Kotevní lišty jsou vyráběny protlačováním hliníkového materiálu přes trn-"extrudováním". Lišty jsou na nosnou konstrukci kotveny přes nerezové nebo hliníkové nýty, či samořezné šrouby.[11]

Pevné zakončení membrány - "kedr" je vytvořeno z houževnatého flexibilního polymeru (PVC), který je tvořen kabelem o průměru 8 mm. Okraj membrány je kolem kabelu obalen a následně svařen. Minimální šířka vzniklého sváru je 40 mm.

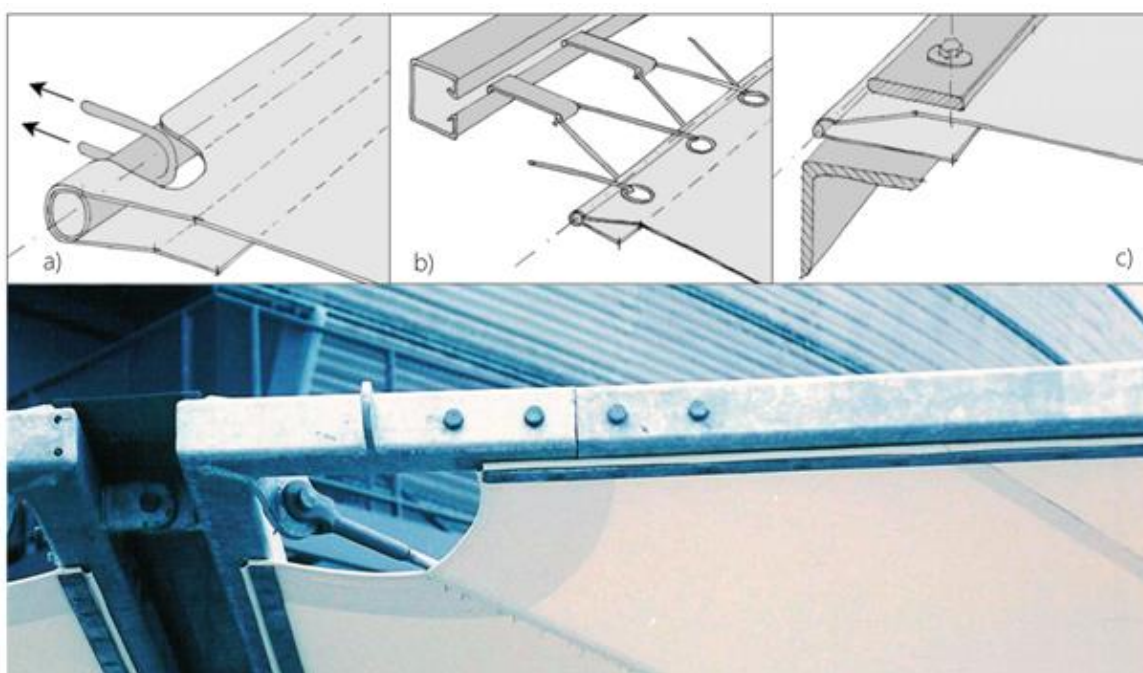
Houtman a Werkman uvádí pouze některé možnosti řešení pevného liniového uchycení. Při pevném liniovém uchycení je membrána kotvena průběžně na podpůrnou konstrukci, která má daleko větší tuhost v porovnání s používaným textilním materiálem v poli.

**a) Trubka v tunelu membrány kotvená přes rektifikovatelné třmeny
(Použití – PVC/polyester.)**

Síly z membrány jsou přenášeny přes třmeny přímo do kotevní trubky. Kotevní trubku je nutné zajistit proti posunutí a úhel, který svírá okraj membrány s osou hlavního pole, musí být co nejmenší. Zabrání se tak případnému zvlnění okraje a nerovnoměrnému namáhání sváru membrány. [30]

b) Kanálek - (PVC/polyester)

Okraj membrány je opatřen oky v určité vzdálenosti. Osová vzdálenost otvorů je nadimenzována dle zatížení. Kotevními oky je provlečeno pružné lano, které je zachyceno za nerezové pásky. Pásky jsou kotveny do kanálku v nosném profilu a tahové síly jsou tak přenášeny přímo do nosného profilu. Tento detail je rektifikovatelný, rozebíratelný a určený pro menší aplikace (především sít'oviny). [20]



Obr. 119. Varianty detailů pevného liniového kotvení [4]

c) Pevné liniové kotvení pomocí přitlačných lišt

Kotvení přes přitlačné lišty je určeno jak pro PVC/polyesterové materiály, tak pro PTFE/skelné materiály. Přitlačné lišty jsou šroubovány na hlavní nosnou konstrukci. Okraj membrány opatřený PVC kabelem je po předepnutí a aktivaci zastřešení rovnoměrně opřen o vnější okraj nerezové lišty. [11]

Základní příklady a rozdělení kotevních lišt

Kotevní lišty můžeme dělit dle tvaru, způsobu výroby, materiálu a dle použití.

Dělení dle materiálu

Nejvíce rozšířené jsou kedrlišty z hliníkových slitin vyráběné metodou protlačování ("extrudované" profily). Dále jsou využívány nerezové dělené kotevní lišty a lišty ze skelných nebo uhlíkových kompozitů.

Dle tvaru průřezu

Rozlišujeme kotevní lišty jednokanálové, dvoukanálové a speciální. Nejčastěji je používána dvoukanálová kotevní lišta.

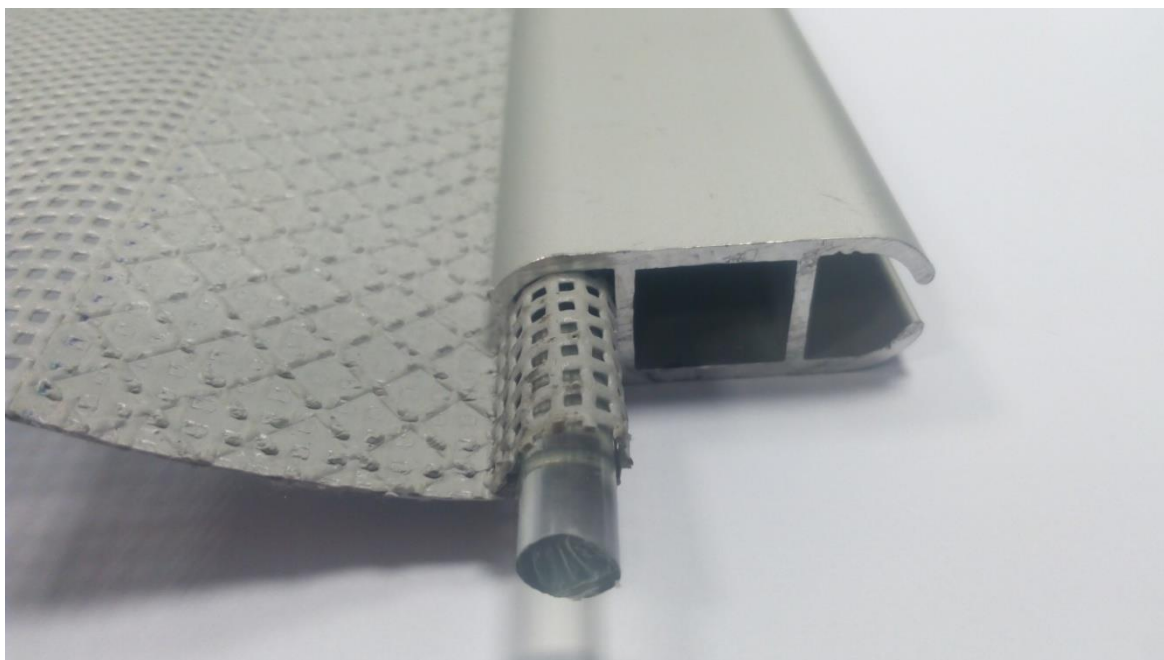
Dle použití

Dle použití se kotevní lišty dělí na lišty krajní a lišty použité v poli. Krajní kotevní lišty mohou být jednokanálové, lišty v poli jsou dvoukanálové.

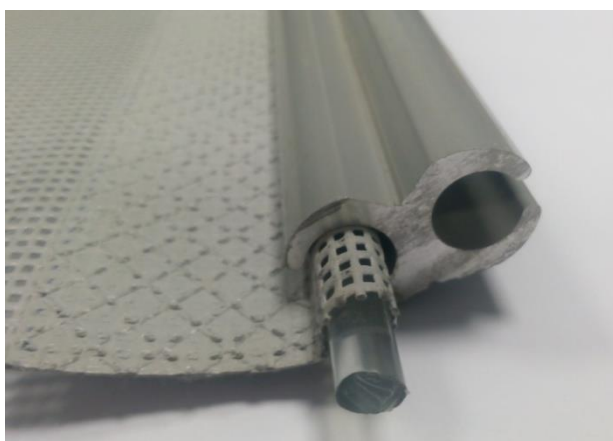
Dvoukanálové kotevní lišty

Dvoukanálová Klausova kotevní lišta je univerzálním prvkem liniového kotvení na hlavní nosník. Pro svůj čistý a jednoduchý tvar je používána jak v poli, kde jsou na lištu kotveny membrány z obou polí, tak i na okraj, nebo poslední pole zastřešení. Díky dostatečné šířce střední dutiny se dá lišta dobře kotvit pomocí nýtů nebo samořezných šroubů do maximálního průměru 12 mm. Lišty jsou průběžně kotveny po 250–500 mm dle zatížení. [8]

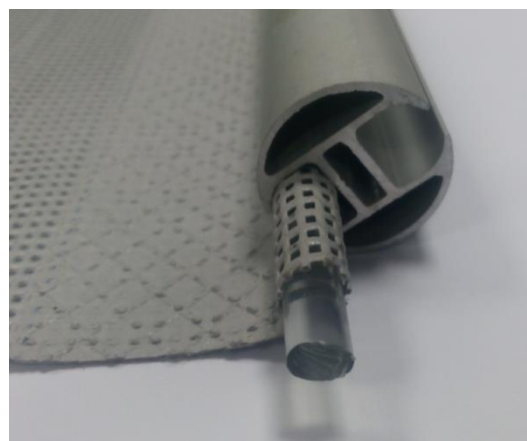
Klausovy kotevní lišty viz. obr. 120 jsou běžně používány na zastřešení do 150 m². Výhodou tohoto průřezu je dostatečná šířka prostřední komory, která slouží pro kotvení profilu přes nýty nebo samořezné šrouby. Hlavní nevýhodou tohoto průřezu je slabá síla stěny, která ji limituje při excentrickém namáhání. Při větším zatížení, především při dynamickém zatížení větrem a dynamických rázech, se může profil zdeformovat a otevřít.



Obr. 120. Detail dvoukanálové Klausovy kedrlišty – foto autor - 22.2.2016
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]; foto autor



Obr. 121. 21 Detail dvoukanálové Vysoko
pevnostní kedrlišty 22. 2. 2016 [17]
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [5]
Foto autor



Obr. 122. Detail dvoukanálové kedr-
lišty kruhového průřezu; 22. 2. 2016
Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o.
[17]

Vysokopevnostní dvoukanálový profil viz. obr. 121, má větší sílu stěny a může být namáhán i mimo osu. Nevýhodou vysokopevnostní lišty je oproti Klausově kotevní liště malá šířka střední části, a proto se tento profil používá hlavně jako ukončovací a ke kotvení je použit druhý kanál.

Kruhový profil na obr. 122 je ukázkou designového provedení kotevní lišty. Většinou se používá jako profil na obr. 121 na kraji pole a druhý kanál se používá ke kotvení – nasunutím na podpůrnou konstrukci.

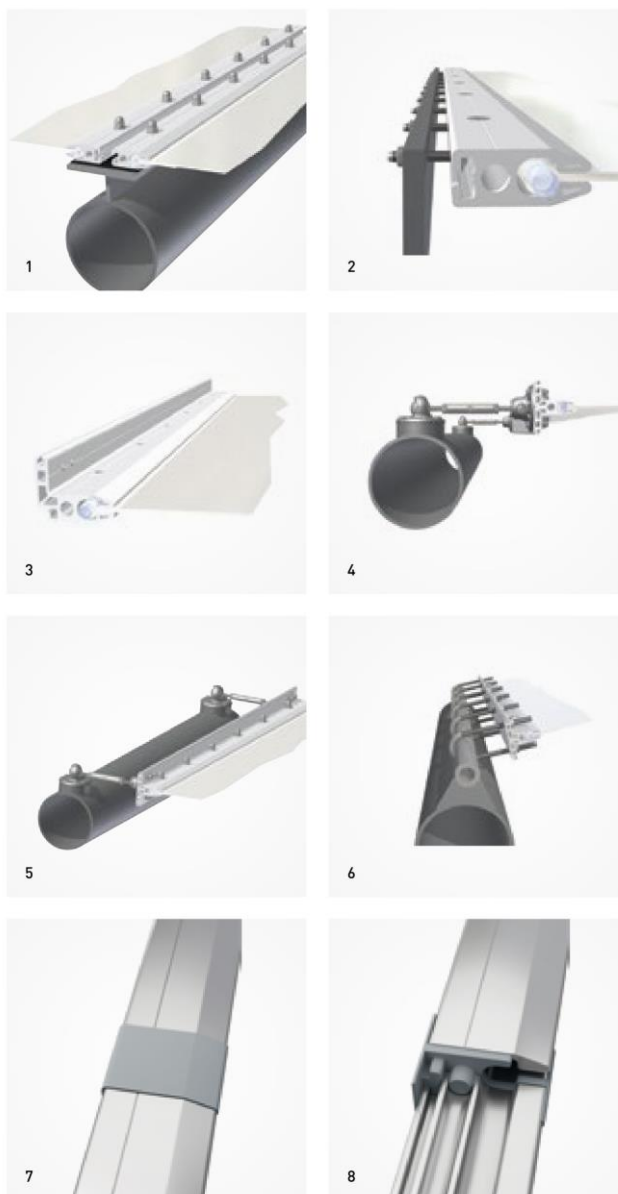
Jednokanálové kedrlišty

V náročnějších aplikacích je využívána jednokanálová kotevní lišta Carl-Stahl. Kódové označení ISK – PF3000 (1), nebo ISK – PL3000 (3). CS-Y-SIS Tato lišta je určena pro náročné aplikace, kde předešlá kotevní kedrlišty nemají dostatečnou únosnost. Díky masivnímu extrudovanému průřezu z hliníkových slitin dokáže přenést vysoká zatížení, ale protože se skládá ze dvou kusů (2), které jsou k sobě šroubovány, nedochází k jejímu rozevírání tak jako u Klausovy kotevní lišty. CS-Y-SIS

Pokud je lišta uložena na nosník pomocí systémového prvku Tenect (4+5), díky kterému je zajištěno dokonalé kloubové uložení. Celý systém se stane rektifikovatelným a odolným vůči dynamickému zatížení větrem. Za nevýhodu tohoto profilu lze považovat absenci dvoukanálové varianty, která by značně usnadnila montáž v poli.



Obr. 124. Detail jednokanálové kotevní lišty ISK – PL 3000 [35]



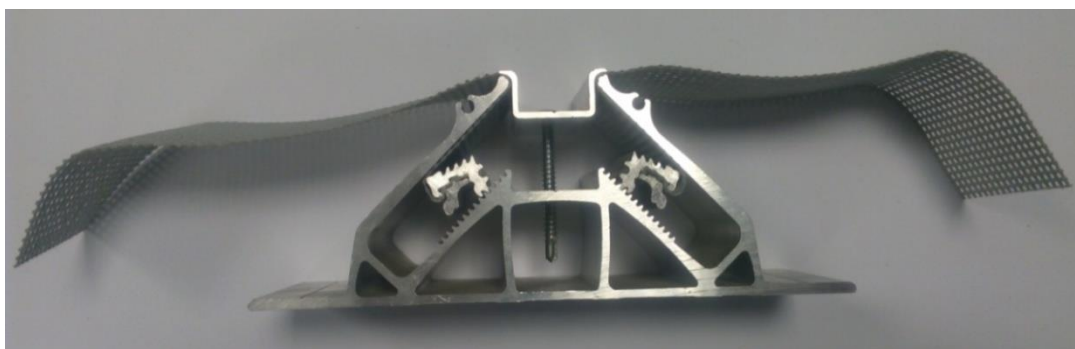
Obr. 123. Možnosti napojení jednokanálové kedrlišty – IKS PF 3000 [35]

Speciální kotevní lišty

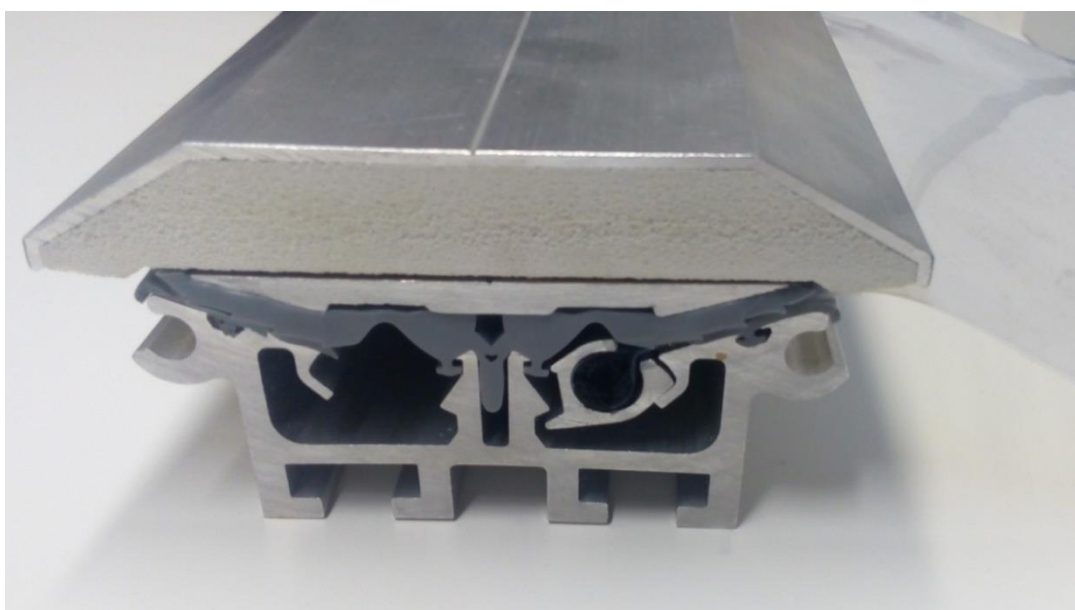
Speciální kotevní lišta na obr. 125 slouží k uchycení okrajů jednotlivých polí textilní síťoviny. Pružné zakončení okraje je zde nahrazeno svorkovým hliníkovým profilem, který je zachycen a zpříčěn v hlavním profilu. Po utahení střední přítlačné lišty je síťovina zaaretována. Tento profil byl vyvinut pro montáž přes hmoždinky, přímo na fasádu bez nutnosti další podpůrné konstrukce. Existuje i jednokanálová varianta.

Dalším příkladem speciální kotevní lišty je profil vyvinutý společností Vector Foiltec (obr. 126). Tento profil slouží pro liniové uchycení vícevrstevných ETFE fólií, které staticky fungují na principu vnitřního přetlaku vzduchu. Tyto konstrukce jsou známé jako pneumatické membrány. Díky vícevrstvé konstrukci polštářů je skladba natlakovaných fólií tepelně izolační a u zastřešení velkých atrií je s výhodou využívána místo tradičního zasklení. Proto je upraven i profil, který má na exteriérové straně speciální krycí lištu vyplněnou tuhým izolačním materiálem.

Speciální kotevní lišty jsou vždy na míru navrženy pro danou aplikaci. Mají tak ideální parametry. Tyto profily jsou navrhovány pouze u velkých aplikací přes několik tis. m² zastřešené plochy (např. stadiony, fasády, velká atria) jelikož jsou jejich vývoj a výroba nákladné. Existují však i systémová řešení, která jsou optimalizovaná výrobcem do výrobních sérií dle použití a zatížení.



Obr. 125. Detail speciální kotevní lišty pro uchycení síťoviny; 22. 2. 2016
Foto autor; Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]

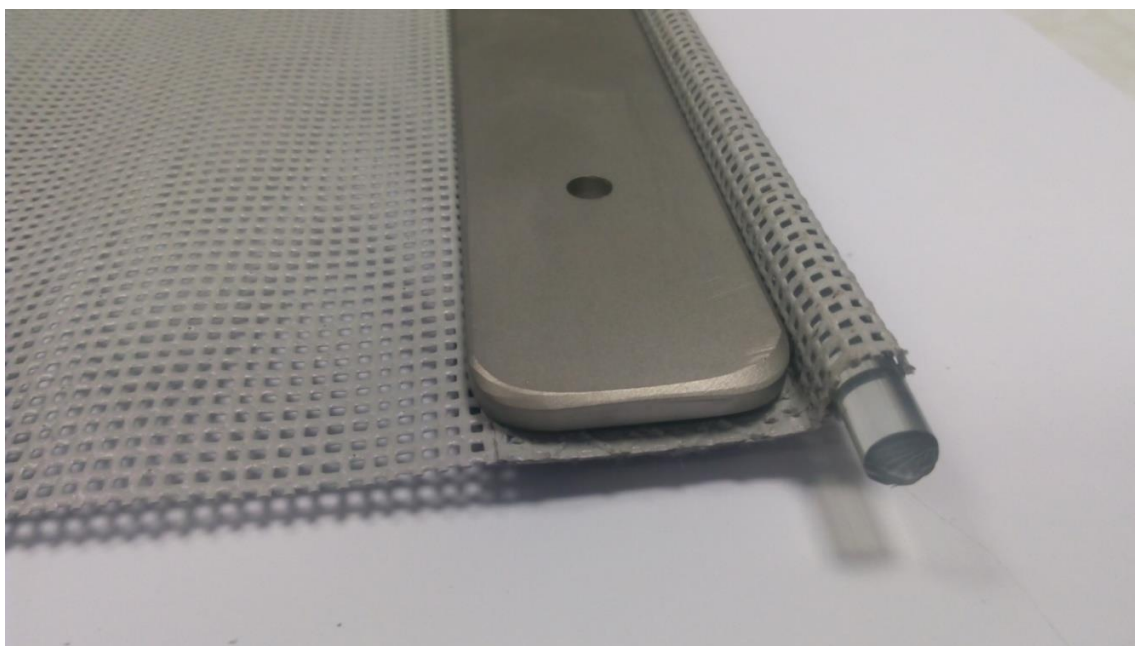


Obr. 126. Detail uložení folie ETFE do izolačního kotevního profilu
TEXLON-Vector Foiltec. [36]; foto autor

Přítlačné lišty

Přítlačné lišty jsou použity v případech, kdy je tvar okraje složitý a zároveň je požadována dilatace mezi hlavní konstrukcí a okrajem membrány. Profil se také používá, pokud návrhová síla v okraji membrány překročí návrhovou únosnost hliníkových kotevních lišt. K výrobě přítlačných lišt se používá nerezová ocel v jakosti dle kyselostí prostředí (1.403 nebo lepší). V principu se jedná o na míru navržené sešroubované pláty, které jsou kotveny k nosné konstrukci pomocí příponek. Výsledný okraj funguje jako řetěz a díky vůli mezi jednotlivými segmenty může být okraj nepravidelný a zakřivený v obou směrech. [8]

Hlavní výhodou přítlačných lišt je jejich vysoká únosnost a houževnatost. Jsou navrhovány na míru danému projektu a mají tak ideální parametry. Proto jsou však projekčně a časově náročné na návrh a realizaci.



Obr. 127. a 128. Detaily nerezové přítlačné lišty-povrch. balotina; 22.2.2016
Foto autor; Detail zapůjčený firmou ARCHTEX s.r.o. [17]



Závěr

Stabilizace okraje membrány je jedna z důležitých a limitujících vstupních podmínek při tvorbě lehkého zastřešení. Je na architektovi, inženýrovi a statikovi, aby společně našli nejvýhodnější řešení, které bude nejlépe pasovat na konkrétní situaci, co se do zatížení, vzhledu a funkčnosti týče.

V závěru je uvedena rekapitulace a shrnutí vlastností jednotlivých variant výše uvedených detailů. Jedná se o rozšířený průřez nejčastěji používanými profily v Evropě.

a) Dvoukanálové kotevní lišty

Klausova kotevní lišta (obr. 120)

Klausova kotevní lišta se běžně používá na pole, která mají velikost do 150 m². Výhodou tohoto průřezu je dostatečná šířka prostřední komory, která slouží pro kotvení profilu přes nýty nebo samořezné šrouby. Hlavní nevýhodou tohoto průřezu je limitující síla stěny profilu, který se při excentrickém namáhání začne deformovat.

Vysokopevnostní dvoukanálový profil (obr. 121)

Vysokopevnostní profil má větší sílu stěny, a tak může být namáhán i mimo osu. Jeho nevýhodou je oproti Klausově kotevní liště malá šířka střední části profilu. Proto se vysokopevnostní lišta používá hlavně jako ukončovací profil a ke kotvení je vždy použit druhý kanál.

Kruhový profil (obr. 122)

Kruhová kotevní lišta je ukázkou designového provedení kedrlišty. Většinou se používá jako profil na obr. 2 na kraji pole a druhý kanál se používá ke kotvení – nasunutím na podpůrnou konstrukci.

b) Jednakanálové kotevní lišty (obr.123)

Příklad: ISK – PF3000 (1), nebo ISK – PL3000 (3).

Tato kedrlišta je určena pro náročné aplikace, kde únosnosti předešlé kedrlišty končí. Díky masivnímu extrudovanému průřezu z hliníkových slitin dokáže přenést vysoká zatížení, a protože se skládá ze dvou kusů (2), které se k sobě sešroubují, nemůže dojít k jejímu rozevření. Za nevýhodu považuji absenci profilu s dvěma kanály, který by značně usnadnil montáž v poli, kde by se mohla použít pouze polovina spojovacího materiálu (obr. 123) a vysokou cenu profilu.

c) Speciální kedrlišty (obr. 125 a 126)

Speciální kedrlišty jsou vždy na míru navrhnuté pro danou aplikaci a mají tak ideální parametry. Vyplatí se je však navrhovat pouze u velkých aplikacích přes několik tis. m² zastřešené plochy (např. stadionů, fasád, velkých atrií), jelikož jsou jejich vývoj a výroba drahé. Existují však i systémová řešení, která jsou optimalizovaná výrobcem do výrobních řad dle zatížení.

d) Přítlačné lišty (obr. 127 s 128)

Hlavní výhodou přítlačných lišt je jejich vysoká únosnost a houževnatost. Jsou navrhované na míru danému projektu, a tak se vždy dají nadimenzovat ideální požadované parametry. Díky tomu jsou však projekčně a časově nákladné jak na projektování, tak na realizaci.

„Flexibilita adaptibilních konstrukcí umožňuje měnit architektonický prostor, který tak může být vnímán ve více rovinách. Elegantní pohyb správně navržené pohyblivé membrány vytváří dokonalou harmonii mezi člověkem a přírodou.“

„Je to jako akt stvoření. Lehkost a mobilita pohyblivých membrán utváří koncept střechy bez konstrukce, která je kdykoliv k dispozici.“

