

S B O R N Í K

1. MEZINÁRODNÍ MEMBRÁNOVÉ KONFERENCE

PŘÍKLADY POUŽITÍ MEMBRÁN A FÓLIÍ V ARCHITEKTUŘE



Příklady použití membrán a fólií v architektuře

KONFERENCE S MEZINÁRODNÍ ÚČASTÍ

pořádaná pod záštitou České komory architektů

ve spolupráci s
Fakultou stavební ČVUT v Praze
a Studiem Membránové Architektury (SMA)

23. listopadu 2012
Hala D Stavební fakulty ČVUT v Praze
Thákurova 7/2077
166029 Praha 6

ODBORNÝ GARANT KONFERENCE

doc.Ing.arch. Miloš Kopřiva

SEKRETÁŘ, EDITOR

Ing.arch. Aleš Vaněk

SPOLUPOŘADATELÉ – studenti SMA

Bc. Pavel Jurčík
Bc. Jan Gašpárek
Bc. Jakub Kopecký
Bc. Petr Vacek
Bc. Šárka Tomášová

ČVUT PRAHA

Katedra architektury Fsv ČVUT v Praze
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí Fsv ČVUT v Praze
SMA

ISBN: 978-80-01-052783

Program mezinárodní konference (23_11_2012)

doc.Ing.arch. Miloš Kopřiva , FSv ČVUT Praha – odborný garant konference Představení cílů konference a spolupořadatele SMA	5 - 10
doc.Ir.arch. Henri Hubertus Achten Teorie membránové tvorby v digitálním kontextu	11 - 22
Ing.arch. Zdeněk Hirnšal , Archtex – Principy navrhování, využití materiálů a příklady realizací jednovrstvých membrán	23 - 24
Arch. Univ . Lect. Dipl.-Ing. Dr. techn. Robert Wehdorn-Roithmayr Formfinder – software pro architektky	25 - 30
Ing. David Jermoljev, prof.Ing. Josef Macháček, Csc., FSv ČVUT Statické principy nosných konstrukcí pro membrány	31 - 36
Ing.arch. Luboš Knytl , FSv ČVUT Membránový program ve studentském konstrukčním ateliéru	37 - 40
Peter Werner , Serge Ferrari - Textilní struktury a druhy sítí Ferrari	41 - 46
Dirk Emmer, Ing. Jaroslav Hruška , Vector Foiltec – Vícevrstvé fólie ETFE a příklady jejich využití v architektuře, reference realizací Vector Foiltec	47 - 50
Dipl.-Ing. Jörg Tritthardt , Tensinet - Pohyblivé střechy z membrán	51 - 56
Ing.arch. Josef Pleskot , AP atelier (zastoupení Ing.arch. Zdeněk Hirnšal) Realizace vysoká pec Vítkovice, pojízdná střecha, mobilní zastřešení	57 - 60
Ing.arch. Martin Krupauer, Ing.arch. Jiří Střítecký , atelier A8000 Realizace autobusového nádraží České Budějovice, Voříškův dvůr, veliny Vltava a výstaviště v Českých Budějovicích	61 - 66
doc.Ing.arch. Patrik Kotas , FA ČVUT – Realizace zastřešení autobusového nádraží Hradec Králové a tramvajové zastávky Na Barrandově	67 - 68
Ing.arch. Vladimír Gleich , FSv ČVUT Příklady využití membrán v interieru a ve výstavnictví	69 - 76
Ing. Michal Netušil, Ph.D. , FSv ČVUT Ocelová konstrukce jako nedílná součást membránové architektury	77 - 82
Ing. David Jermoljev , Excon Statika konstrukcí s membránovými prvky	83 - 87

Cílem první membránové konference, pořádané v ČR je shromáždit a aktualizovat informace o používání membrán a fólií v architektuře s důrazem na realizované stavby v ČR. Jedním z nepřehlédnutelných fenoménů soudobé architektury jsou membrány a fólie. Ve specifickém oboru tvorby se stává jednotící vlastností budovy tektonické tvarování tenkého materiálu do architektonické formy. Průkopníci v oboru membránových konstrukcí ještě museli ověřovat své návrhy na prostorových modelech. Dnes má architekt pro své prostorové simulace návrhu řadu programů digitální podpory. I přesto je stále formování geometrie tvaru membrán a fólií tvůrčím procesem, který se neobejde bez kreativity svého tvůrce.

Tvorba v oboru membrán je charakteristická svojí tektonikou na rozdíl například od programového odmítnutí přizpůsobit formu konstrukci v dekonstruktivismu. Tektonika je výraz odvozený z řeckého slova tektón, které se používalo pro stavitele, tesaře a mistry v oboru těchto konstrukcí. V uměleckém jazyce je výrazem pro kreativní ztvárnění vnitřní struktury díla. V architektuře vyjadřuje viditelné umělecké ztvárnění hlavní nosné či pomocné konstrukce vně i uvnitř stavby.

V architektuře membrán a fólií se setkáváme s tektonikou jak ve formování stavby jako celku, tak i v jejím detailu. Pro ztvárnění konstrukčních detailů se nabízí vyjádření sil v pomocných konstrukcích membrán. Tah, tlak a z nich se generující lanové a sloupové prvky konstrukcí, vnímáme jako dominující prvky architektury, ale ve hře bývá i oblouk, kloub, nosníky, stěny a všechny další prvky architektury. Tektonika celku je obsažena v pravdivosti jeho detailů a v architektuře jednovrstvých membrán je obvykle jasně čitelná na první pohled.

Pořadatelé konference – Katedra architektury Fakulty stavební ČVUT spolu s členy studia membránové architektury, zkráceně SMA, se netají ambicí v případě úspěchu konference pravidelně pokračovat dalšími ročníky. Příkladem jsou obdobné aktivity v zahraničí, kde se konference a workshopy, věnované problematice membrán a fólií, pravidelně opakují. Program dnešní konference jsme sestavili tak, aby byli účastníci informováni rámcově o všech aspektech důležitých pro architekta, který chce ve svém projektu využít membránové materiály. Tedy o rozměrových limitech pro potřebu kotvení membrán, o typech pomocných konstrukcí, o materiálech membrán a jejich vlastnostech a v neposlední řadě o software, který se používá pro zjednodušení prostorového navrhování tvaru a stříhu membrány a stanovení sil v napjaté membráně, které je třeba přenést do dalších konstrukcí.

Aplikovat membránové nebo fóliové materiály do konkrétní architektonické zakázky se zdá být v současných podmínkách stavebnictví v ČR nelehkým úkolem. Naše dodavatelská sféra se v oblasti těchto materiálů opírá výhradně o zkušenosti zahraničních dodavatelů. Spektrum problematiky membrán je natolik široké, že jsme pro účast na konferenci vytipovali jen některé zahraniční účastníky, kteří reprezentují teorii, praxi s digitálními nástroji určenou tvarování jednovrstvých membrán, a odborníky na fólie a tenké sítě. Věříme, že převážná část českých účastníků konference nastíní kromě prezentace své práce v oboru i problémy, které se vyskytly během realizace jejich projektů v českém prostředí.

Studio membránové architektury na Fakultě stavební ČVUT, zkráceně SMA, má ambice zabývat se kromě výuky a poradenství i experimentální činností. Experimentální a výzkumná pracoviště v oboru membrán a fólií se provozují jen u několika firem v zahraničí. Zde se připravují inovace již zavedených a ověřených technologií a ověřují se. To ale nemusí nutně znamenat, že nelze mimo taková pracoviště experimentovat s membránami. V tomto slova smyslu experimentovat znamená kromě osvojení si vlastností membrán také nacházet netradiční architektonické kontexty jejich použití.

Specifické pozici Katedry architektury FSV ČVUT mezi jinými školami architektury v ČR konvenuje výuka architektonické tvorby, která jde hlouběji a do většího detailu stavebních konstrukcí. Využití membrán v architektuře je typickým příkladem specifického přístupu k tvorbě, který se neobejde bez kreativity, ale ani bez znalostí rozložení sil ve vazbě na zvolený tvar, druh materiálu membrány a využití fyzikálních vlastností zvoleného materiálu.

Zavedení výuky navrhování membránových, foliových a pneumatických konstrukcí nebude na Stavební fakultě organizačně jednoduché. Bude třeba koordinovat dosud oddělené činnosti na dvou různých katedrách, konkrétně na katedře stavitelství a architektury K 129 a K 134, katedře ocelových konstrukcí. Proces spolupráce je dosud na samém začátku a jde o běh na dlouhé trati. Jsem ale rád, že se první výsledky spolupráce mohou prezentovat už na naší konferenci.

Architektonická tvorba spojená s využitím membránových materiálů zaznamenala ve světě velký boom, zejména

v posledních dvaceti letech. Rád bych zjednodušeně v úvodní přednášce uvedl významné stavby, které, podle mého názoru, během cca 40 let vývoje architektury folií a membrán posouvaly obor krůček po krůčku až dodnes. Pro upřesnění pojmů, se kterými se na konferenci budeme opakovaně setkávat, je v úvodu nutné si je metodicky správně pojmenovat.

Lehká membrána

Název je používán pro textilní (tkanou) strukturu s vysokou odolností v tahu, která je zalita do ochranné vrstvy. Odolnost tenkého materiálu v tahu je využita pro architektonické účely. Materiál je označován jako textilní membrány, sítě, síťoviny nebo plachty. Obvykle se na stavbách napíná mechanicky nebo přetlakem vzduchu. Funkce tkané struktury, přenášející tahové síly uvnitř membrány, je materiálově zcela odlišuje od folií. Pro získání trvalého tvaru se jednovrstvé membrány vypínají ve dvojí křivosti plochy pomocí upevňovacích konstrukcí či vnitřním přetlakem vzduchu. Výhodou jejich použití v architektuře je nízká váha a odolnost materiálu proti vlhkosti a vnějším vlivům počasí. Nevýhodnou vlastností tenkých membrán je špatná izolační resistance jedné vrstvy proti prostupu tepla a hluku.

Fólie

Materiálově jsou fólie jiným materiálem než membrány. Jedná se o velmi tenký homogenní materiál různého chemického složení, který nemá žádnou vnitřní strukturu. Podle chemického vzorce materiálu jsou označovány v architektuře také druhy folií, nejčastěji ETFE. Materiály se vyznačují vysokou transparentností, jsou samosmršťující se při požáru a mají i samočisticí vlastnosti. Odolávají, obdobně jako membrány, dobře v tahu a jsou velmi odolné proti vlivům počasí. Fólie vypínané vnitřním přetlakem vzduchu mají při vícevrstvé aplikaci dobré tepelně izolační vlastnosti.

Používání textilu pro zastínění nebo ochranu před deštěm se datuje již od starověkých kultur. Architektonicky ale nikdy cílevědomě neformovalo, až do druhé poloviny dvacátého století, architekturu velké stavby. Textilní plachty se využívaly jen k ochraně před sluncem a deštěm. První velkou stavbou je Koloseum v Římě, které mělo plachtami zastíněné tribuny (obr. 1). Stan je dlouhodobě symbolem hlavních výhod membránových konstrukcí (lehkosti, ochrany a mobility) dodnes. Rozměry plachet stanů, vypínaných lany nad svislými sloupy se postupně zvětšily až na cirkusová šapitó. Mobilní systém cirkusové střechy je prvním architektonickým dílem membránové tvorby (obr. 2). Kromě fixování plachty proti vlivu větru a sněhu vyřešil systémově odvod dešťové vody ze střechy.

Prvními průkopníky membránových konstrukcí se stali v období konstruktivismu avantgardní ruští architekti, zejména Vladimír Grigorjevič Šuchov, jehož vědecké práce z oboru z počátku 20. století se zabývaly systematickou prací s nerovnými plochami, prutovými konstrukcemi a membránami (obr. 3). Na Expu 1967 v Montrealu architekt Frei Otto představil Německý výstavní pavilon (obr. 4). Později na Expu v Osace 1970 již Kenzo Tange experimentoval se zastřešením ústředního náměstí Expa menšími pneumaticky napínanými výplněmi membrán (obr. 5). Práce Buckminstera Fullera, tensegrity haly a zastřešení jeho kolegy Davida Geigera se staly v USA vzorem pro velmi vylehčené konstrukce překlenující extrémní rozpětí (obr. 6) Logicky se tak vzájemně obohatili s architekty skupiny Freie Otta, který po druhé světové válce a studiích v USA založil pracoviště lehkých konstrukcí na Universitě ve Stuttgartu.

Zde se systémově věnoval více typům membránových konstrukcí, tedy i pneumatickému vypínání. Ze spolupráce těchto dvou osobností s Davidem Brodym vzniká v roce 1971 Arktické město. Obrovská membrána zesílená lany překlenující celé město byla nesena přetlakem vnitřního vzduchu (obr. 7). Půdorysně měla mít konstrukce průměr 2 km a výšku 240 m. K realizaci nedošlo. Frei Otto také hledal inspirace v přírodě, zejména v rostlinném větvení. Inspirace pro architekturu se našly i v designu průmyslových výrobků. Lanové konstrukce plachetních lodí, výplet jízdního kola nebo skládací deštníky inspirovaly architekty svou tektonikou. Americký kosmický výzkum dodával architektům a konstruktérům velmi odolné a kvalitní materiály pro textilní membrány a fólie. Nejčastěji se používal teflon. Nejznámější folií se pro své vlastnosti v architektuře stala fólie ETFE.

Dalším z významných konstruktérů, zejména výzkumem v oboru pneumatických konstrukcí, se stal ing. Walter Bird. Spolu s Davidem Geigrem je spoluautorem pavilonu USA na Expo v Osace, kde překlenují půdorys pavilonu, kterému tehdy dominovala expozice kosmického výzkumu (obr. 8). Transparentní membránu nesl vnitřní přetlak vzduchu a byla vyztužena lanovou sítí. Membrána amerického výstavního pavilonu, částečně zapuštěného v terénu, ve tvaru elipsy měla rozměry 140 x 83 m. Autoři David Geiger a Walter Bird vyšli ze schématu křížení dvou osnov lanové střechy zavěšených na oválný věnec nad obvodovým pláštěm. Jeho tuhost kompenzovala dostředné tahové síly v lanech. Průkopníkem využití membránových materiálů v architektuře je bezpochyby Frei Otto. Jeho teorie o membránách navazovaly na předchozí práce Šuchova a daly základy všem pozdějším následovníkům v oboru těchto staveb. Detaily kotvení a vytváření tvaru membrány, ověřené v mnoha realizovaných dílech Freie Otta, se jako systémové základy oboru používají dodnes.

Realizace střech Mnichovské olympiády se v roce 1972 stala ikonickou sportovní stavbou (obr. 9). Membrány Rogera Tailliberta v jeho ranné tvorbě vznikaly ve spolupráci s Freiem Ottou. Ve společném týmu se Roger Taillibert více věnoval systémům pohyblivosti velkých ploch, které se posouvaly na vypínacích lanech. Jeho největší realizace mobilní membránové střechy je na ústředním ceremonielním stadionu LOH 1976 v Montrealu (obr.10). Po věži nad stadionem se pohybuje složitý systém vypínacích lan rozvinujících a vypínajících membránu uzavírající otvor střechy (obr. 11). Sám architekt říká: „u firmy Du Pont našel syntetická vlákna, která NASA používala na ochranné části kosmických raket. Z těchto vláken pak byla vyrobena tkanina se stejnými mechanickými vlastnostmi jako má ocel. Experimentální plochu membránové konstrukce o ploše cca 18 000 m² však tenkrát nikdo nechtěl pojistit.“

Kenzo Tange poprvé využil membránové výplně uvnitř modulů ocelové konstrukce pro zakrytí ústředního shromažďovacího náměstí. Po Expu 1970 v Osace se průmyslová výroba hal nesených přetlakem vnitřního vzduchu rozjela ve světě na plné obrátky. Stavby zakryté membránovou střechou stále zvětšovaly rozkročení svých nosných konstrukcí. Autor stavby na Grand Arch v La Defense architekt Speckelsen chtěl uvnitř okna budovy umístit skleněný mrak. Ale váha skla a robustnost oceli popírala vzdušnost i lehkost. Membránová konstrukce vše vyřešila (obr 12).

Jestliže se první membránové konstrukce realizované Freiem Otto se vyznačují spíše snahou o výtvarné uchopení tektoniky a poetiky lanových konstrukcí a nelineárních ploch mezi nimi, pak bylo Expo 1970 v Osace okouzleno pneumatickými konstrukcemi. Realizovalo se zde pár staveb nesených přetlakem vnitřního vzduchu v interieru, přetlakem vzduchu uvnitř elementů nesoucích stavbu a s nimi také první realizace membránových výplní z přetlakových polštářů. Výstavní pavilon firmy Fuji japonského architekta Yukata Muraty neslo 16 pneumatických válců z vinylu, které měly kruhový průřez a byly vzájemně spojeny. V pavilonu tvořily válce nosnou konstrukci (obr 13).

Firma Du Pont vyvinula jako náhradu skla transparentní fólii ETFE. Od roku 1980 se aplikace vzduchem vypínaných polštářů doslova přes noc stává oblíbenou konstrukcí architektů první dekády nového milénia. Membrány jako výplně polí přenášejí vnější zatížení přes své kotevní profily do hlavních nosných konstrukcí stavby. Pole jednotlivých polštářů se navíc mohly přizpůsobit zvolenému tvaru (obr. 14.). Obalování budov vícevrstevnými polštáři fólie ETFE bylo na světě (obr. 15). Současní světoví architekti, které bychom jistě rádi viděli na některé z příštích konferencí v Praze, se významně podílejí na membránových realizacích, které se stávají ikonickou propagací membrán a fólií. Jsou to například:

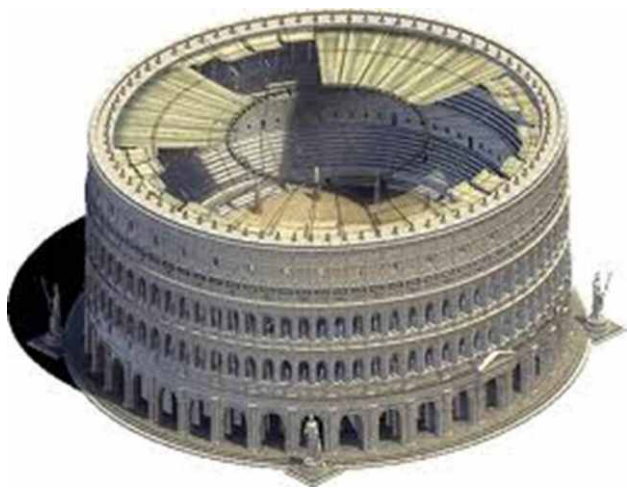
Renzo Piano (16 a 17) Bari a přístav

Gunther Behnisch (18) Inzell

Nicolas Grimshaw (19) National space centre Leicester

Herzog a de Meuron (20) Basel

Kisho Kurokawa (21) Toyota arena



Obr. 01



Obr. 02



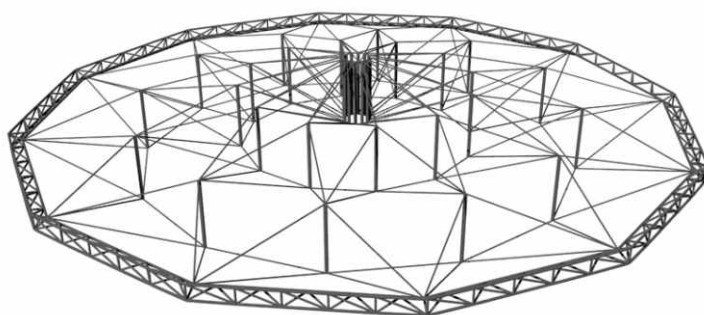
Obr. 03



Obr. 04



Obr. 05



Obr. 06



Obr. 07



Obr. 08



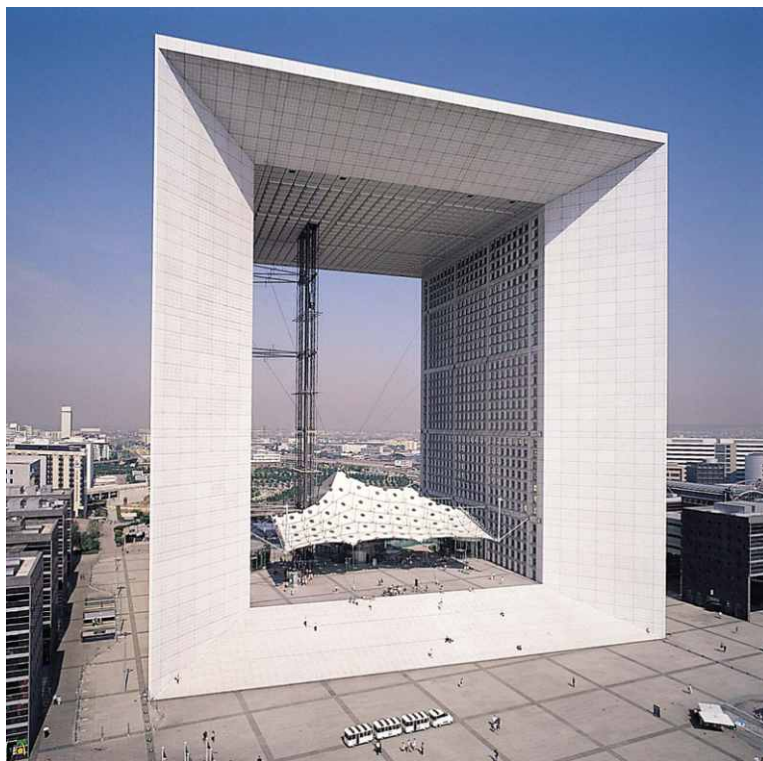
Obr. 09



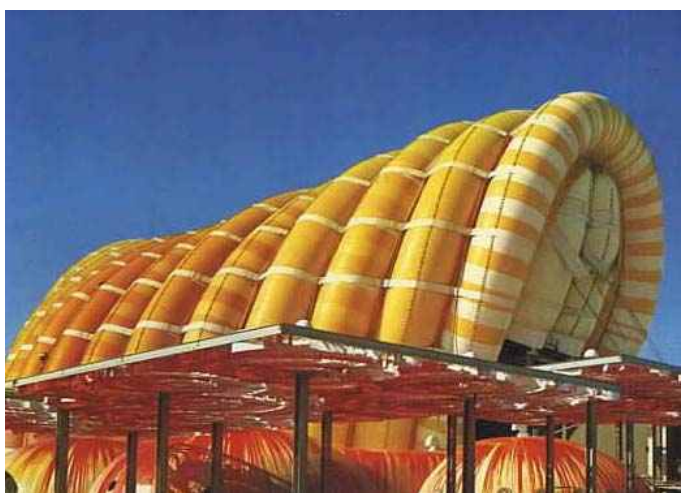
Obr. 10



Obr. 11



Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15



Obr. 16



Obr. 17



Obr. 18



Obr. 19



Obr. 20



Obr. 21

The current essay is the result following the invitation to act as speaker at the First International Membrane Conference (1. Mezinárodní Membránová Konference), which took place at the Faculty of Civil Engineering of Czech Technical University in Prague, 23.11.2012. My background is in Computer Aided Architectural Design, Design Methodology, and Design Theory – so I am by no means an expert in membrane constructions. The work presented in this essay is basically my first attempt at understanding membrane constructions without any substantial knowledge about rules, materials, and processes. As my technological knowledge of membranes is very low, it may occur more than once that there will be mistakes in this text about membranes. My perspective is informed from my interest how membranes can be used in a creative and imaginative way while ignoring (through ignorance) the actual technical basics of membrane structures. This essay therefore comes with a disclaimer, much in the spirit of the liar's paradox: „this essay is not true.“ The text should be taken as my lay-persons impression of a complex, multi-faceted, and inspiring material and technology. All of the sources that I have used for this essay are taken from the Internet.

Drawing sources exclusively from the Internet is not a legitimate way of doing research: it introduces a severe, non-representative, uncontrollable bias towards material that is available on Internet only. Therefore the overview presented here in no way should be considered comprehensive or complete. Nevertheless, I have done my utmost to obtain a wide perspective on membranes. Hopefully the following text will provide some new ideas or information about membranes. I have to thank the conference organisers that they considered to include the presentation in the conference schedule and this essay in the proceedings of the conference. The exploration about membranes will cover the following subjects:

- Single layer membranes.
- Cushion membranes.
- Pneumatic constructions.
- Material potential.
- Speculations.

Each subject will be dealt in more detail, with material drawn from the Internet. Proper links to materials are provided at the end of the text.

Single layer membranes

Single layer membrane constructions are the oldest type of membrane constructions. Arguably, membrane constructions by means of textiles (tents) are in existence for thousands of years. However, the first „modern“ building that uses tensile members combined with membranes is reportedly [1] the so-called „Rotunda“ by Vladimir Shukhov in Nizhny Novgorod, built in 1896 (Figure 1). The „Rotunda“ formed part of a group of eight structures at the 1896 Nizhny Novgorod Fair in which Shukhov pioneered tensile-plus-membrane structures and thin-shell structures. The Fair buildings were conceived and constructed at the end of the 19-th century, but it seems that there is a big gap until the next „wave“ of such buildings occurs. The next significant example we can find is the Sydney Myer Music Bowl in Melbourne, Australia by Barry Patten, Yuncken Freeman, Griffiths and Simpson in 1959 [2] – see Figure 2. In terms of technical solution the surface is not a membrane construction in the sense of a „textile“-like material: it consists of plywood aluminium-sandwiched panels which are attached to a grid of cables. The Sydney Myer Music Bowl features most major characteristics of tensile structures with membranes. It is widely acknowledged that the foremost pioneer in the application of membrane structures is Frei Otto (1925, Siegmars, Germany). Already in 1955 he realised a music pavilion in Kassel, Germany using a membrane structure [3] (Figure 3), following his 1954 PhD-thesis „Das hängende Dach – Gestalt und Struktur“ (later published in [Otto 1954]). Frei Otto founded the Institute for Lightweight Structures in 1964 at the University of Stuttgart, in which he and his team investigated and developed membrane structures. The building in which the institute is housed is also a membrane structure (Figure 4). I actually visited this building as a student in 1991, which for me was the first time I saw Frei Otto's work.

The building for the Institute of Lightweight Structures formed a prototype for the German pavilion at the World Expo 1967 in Montreal, Canada (realised together with Rolf Gutbrod) [3] (Figure 5). The most iconic work of Frei Otto is the roof for the Olympic area of the 1972 Olympic Games in Munich, Germany (together with Günther Behnisch) [4] (Figure 6). Single layer membranes, as very briefly outlined above, form the majority of contemporary membrane structures. They are used for four main functions:

- Shading.
- Roofs.
- Shelters.
- Space subdividers.

Single layer shading structures

Shading is a function which mainly provides an arbitrary area protection against sunlight. There usually is no requirement for any kind of isolation (thermal, acoustic, wind, etc.), so single layer membrane structures are a very economical solution (they can span large areas with relatively light structures). Shading can be applied for many kinds of activities and buildings: pools, outdoor eating, parking, recreation areas, playgrounds, and so on.

The shading for the employee dining area above (Figure 7) is a membrane structure, but it works mostly on high tension (the surface is almost completely flat) and does not take advantage of the stiffness provided by double curvature of membranes. The entrance shading structure at the Melbourne Girls Grammar School (Figure 8) takes advantage of the stiffness obtained through double curvature and creates at the same time an interesting shape which covers and provides shading for the school entrance. Also in Melbourne, the membranes at the Monash University building (Figure 9) are designed to optimally shade the facade so that the building requires less cooling capacity.

Single layer roof structures

Membrane structures are well-suited for roof structures (see the Munich Olympic area roof above) because of their low weight combined with wide span. As stated for shading, when thermal or acoustic isolation is not an issue, then single layer membranes are a good choice. Roof structures are used for atriums, courtyards, stadiums, cultural centres, and so forth.

The KC Live! Complex in Kansas City is a complete building block with shops, restaurants, and so on. The whole structure is covered by a single layer ETFE roof (2787 sq.m). ETFE is normally highly transparent, but in this case the roof also had to provide minor shading. This is achieved by a silver frit on the underside of the membrane. A LED lighting system provides different lighting of the roof surface in the night [5]. For the First Street Transit Gallery in Long Beach California, eight canopies for bus stops (Figure 13) were designed that feature 75m² PTFE fiberglass membrane roofs [6].

Single layer shelter structures

Shelters usually are temporary structures that often function as emergency buildings. In some cases, they are also moveable as a whole, or can be easily disassembled and transported to a different location. In all cases, weight is a major factor in such structures – again an important reason why membrane structures are an interesting option for shelters.

Many industrial buildings and temporary buildings have relatively low requirements concerning aesthetics, and are more focused towards low-cost solutions. Several companies offer mass-produced temporary shelters for this purpose (see Figure 12). The Waka Maori is a temporary structure for receiving and entertaining guests during the 2011 World Rugby Games that took place in New Zealand. The shape of the structure is that of a Maori canoe (so-called „waka“). After the games the structure should be easily transportable to other locations so that after the games it could still be used. The 1500 m² envelope is made of PVC, Ferrari 702, and Ferrari 701 [7].

Single layer space subdividing structures

Although not very common, membrane structures are also used as space subdividing structures. The disadvantage of membrane structures for this function is that they need double-curvature to gain stiffness, which requires more space than regular flat panels (Figure 16).

In case where fixtures can be added to the existing building structure (Figure 17) space subdividers can be much lighter and easier to store than regular panel-solutions (only the membrane needs to be removed, folded, and stored). It also allows easy flexibility of the user to use or remove the membranes.

Single layer membrane structures design considerations

Single layer membrane structures are quite unlike „classical“ architectural materials (concrete, steel, wood, glass, and so on). These classical materials can more or less take any shape the architect wants (within boundaries obviously), but the ultimate shape of a membrane structure is mainly dictated by three factors:

- Boundary conditions.
- Stresses.
- Material.

The boundary conditions for membranes are the points of attachment of the membrane surface. These points of attachments are fixed and can be points, open lines, or closed lines. The overall shape of the membrane is almost completely dictated by these points of attachment.

The location of the points of attachments and material of the membrane dictate the resulting stresses in the surface. When stresses become too high, there is the risk for tearing the membrane, which either has to be solved by redesigning the points of attachment or considering special solutions for the membrane material. The type of material is the final factor which influences the ultimate shape (and appearance) of a single layer membrane structure.

The Cutty Sark pavilion (Figure 25) is a good example of parametric design of a membrane construction. Youmeheshe Architects and Designers employed the program Generative Components [8] which allows flexible and changeable definition of components of the building structure (in this case hexagonal bases with outward pointing support on which the membrane is constructed – see Figure 20).

From left to right the image shows the control points (top left) that define the surface (top right). By manipulating the control points the shape of the surface can be changed. This surface is subdivided parametrically (bottom left) – meaning that the subdivision can still be changed. Finally, the hexagonal base plus support is superimposed (populated) on the surface following the subdivision points. It is important to note that the parametric definition of the membrane shape of the hexagonal unit which was applied in the Cutty Sark Pavilion does not exactly follow the behaviour of real membranes. The shape is a mathematical approximation, but no simulation or tension force computation is applied here. Most programs that are used for engineering membrane structures are highly specialised and not easily accessible for non-experts. For early design and conceptual design of membrane structures such programs are too advanced. The so-called „Formfinder“ program [9] is a conceptual design tool for membrane structures which assists non-experts to create conceptual designs which can then later be refined and calculated by experts. To get a feeling for the nature of membrane structures, it is also highly advisable to create physical scale models. Such scale models are very helpful to understand the double-curved complex surfaces that are created with membrane structures.

Cushion membranes

Cushion membranes are a more recent development in membrane constructions that basically combine two already existing technologies: double (or multi-) layer inflated membranes, and space frame structures. The inflated membranes (cushions) offer higher isolation values than single layer membranes, and thus can also be used for housing, offices, cultural buildings, and so on. The space frame provides the structural stability of the construction, in which the pillows are attached. The cushion membranes require steady pressure, so an additional system of air intake and control is also necessary for this type of construction.

The Symbol Zone at the 1970 Expo in Osaka (Figure 21) was the central axis of the Expo master plan by Kenzo Tange uniting various areas and pavilions at the expo grounds. It was a very long space frame structure which covered the main theme objects of the expo. The Symbol Zone did not incorporate membrane structures as cladding, but it is an iconic space frame structure which is one of the essential elements for cushion membrane structures.

The Eden project in Cornwall, UK (Figure 22) is one of the first major buildings in which cushion membranes are employed. The complex consists of two domes in which a tropical and mediterranean climate is maintained, complete with plants and animals. The domes are created with cushion membranes in a space frame structure [10]. The cushion membranes are made of ETFE foil, which not only is very light but also highly transparent. Therefore lighting conditions inside the dome are quite good. Because ETFE has a very low surface tension, dirt does not easily hold on the surface which means that cleaning costs are very low. The cushion structure provides a static volume of air between the membrane surfaces which ensures high thermal isolation. The panels are up to 80 sq.m in area. The domes are made up of 625 hexagons, 16 pentagons, and 190 triangles [11].

The most iconic and influential building that uses cushion membranes without question is the Allianz Arena in Munich (Figure 23), completed in 2005. Originally, the architects considered the use of polycarbonate panels, but the design and engineering team settled later on ETFE cushion panels [12]. The stadium's envelope consists of 2760 cushion membranes. The design concept included that the facade could change colour (for which the transparent ETFE

material is well suited). The colour change is achieved through 25344 fluorescent tubes mounted at the cushion membranes.

Because of the light weight, ETFE cushion membranes are chosen when large spans have to be realised, and when safety against breaking is an issue (in particular when glass is an option). The Olympic Aquatic Centre (nick-named „Water Cube“) (Figure 24) uses these qualities to create a perfect cube filled in with large cushion membranes in a Voronoi-like pattern. The stadium utilises over 100.000 m² ETFE foil [13].

The Khan Shatyr Entertainment Centre is the highest tent-like tension structure in the world (150 m high roof, 276.5 m high mast, over 100.000 m² ground area, 21850 m² membrane surface area). The building envelope is realised with 3-layered ETFE cushions [14].

Cushion membranes design considerations

Whereas single layer membrane structures are more or less dictated by boundary conditions, stresses, and materials, cushion membranes allow the realisation of any kind of shape. The shape of the building is closely connected to the load bearing structure, and the cushion membranes provide the functional and isolation infill of the envelope.

In many cases, parametric design programs (as discussed earlier for the Cutty Sark pavilion) allow for a lot of design freedom in the development of cushion membrane structures. The typical parametric design flow would be: (1) massing and volumetric design; (2) envelope surface design; (3) parametric population of envelope surface with cushion membranes; and (4) variation studies and optimisation of volume, envelope, and cushion membranes.

Pneumatic constructions

Pneumatic constructions are membrane structures which derive their stiffness from pressurised closed volumes. The most typical examples of this kind of construction are inflatable sports halls. Such structures can also be used for many different purposes, such as temporary exhibition spaces (see Figure 26).

An interesting example of a more artistic approach to inflatable membrane structures is the work of the artist Anish Kapoor who in collaboration with membrane producer Serge Ferrari created a number of inflatable art pieces (see Figure 27). The Leviathan installation in the Grand Palais in Paris (2011) was an inflatable structure (72000 m³ volume) that could be entered. The sheer size of the structure emphasised the scale of the monumental roof of the Grand Palais and on the inside offered a red filtered view of the cast-iron roof. The collaboration with Serge Ferrari was critical to obtain the precise interior impression and to get the proper seam detailing of the vast shape on both inside and outside [15].

The majority of inflatable structures are the temporary spaces shown at the beginning of this section. In particular when the shape of the structure has to be maintained through interior air pressure, the design freedom is rather limited. The structure needs to be permanently kept under pressure, which usually requires a number of (noisy) generators on the outside. Additionally, the entry points need special attention to minimize the loss of air pressure when people get in and out.

The Tubaloon temporary concert hall is a hybrid approach which combines two inflatable ring membrane structures between which a single layer membrane is connected (Figure 28). In this way the structure performs as open air concert hall for the annual international Kongsberg Jazz Festival [16].

To avoid the problem that pneumatic structures need airtight access points, a different approach applies pressured rib- or grid structures between which membranes can be attached (Figure 29). The ribs or the grids provide stiffness whereas the membrane between the structural elements can provide more freedom of type of material, and allow ease of opening and closing.

Pneumatic constructions design considerations

The introduction of pressurised rib- and grid structured basically saved pneumatic structures from the more or less „balloon“-shaped vocabulary of complete pressurised closed volumes. Therefore the design challenge lies mainly in coming up with a maintainable grid structure that will provide the desired shape for the object.

Material potential

The currently most used materials for membrane structures are:

- PTFE (Polytetrafluoroethylene) coated fiberglass (also known as Teflon, invented in 1938 by Roy Plunkett).
- PVC (Polyvinyl chloride) coated polyester (invented in 1835 by Henri Victor Regnault and in 1872 by Eugen Baumann).
- ETFE (Ethylene Tetrafluoroethylene) developed in the 1970'ies by DuPont, developed as building membrane material in 1982 by Stefan Lehnert (founder of Vector Foiltec).

The majority of membranes used in architecture are monochromatic, using only a single colour. In those instances where colour plays a role in the design, it is mostly achieved in combination with lighting systems. Lighting systems offer flexibility as they can be switched on and off, and offer various changing colour schemes over a time period. These systems are mostly realised by fluorescent tubes or LED-systems.

When dynamic lighting schemes are not an option for a building, then printed membrane surfaces may be a possibility to introduce multi-coloured membrane surfaces in buildings. In architecture this is almost never done, but for example in the field of sailing ships it is already common practice for a relatively long time (see Figure 30).

Membranes can be used to wrap the envelope of the building. In this case we are not speaking anymore about the classical tension structures for which membranes are used. They function more or less as „wall paper“ (Figure 31). In the Danish Radio Concert Hall, the envelope membrane provides the level of transparency that the architect wanted to achieve with the building. In the „Le Temps Machine“ (Figure 32) the envelope membrane is a fairly low-cost alternative to traditional building envelope materials, and it also allows the feature on the front facade to incorporate a clock which shows up in the evening.

Speculations

Membrane structures are a type of construction that can be applied in a wide variety of ways. It is possible to extend the use of membrane structures in new ways that have not yet been explored much (or at all).

The MOOM Tensegritic membrane structure, developed by Kazuhiro Kojima [17] is a membrane structure that derives its stiffness from the combination of membrane and aluminium tubes. The tubes fit in the membrane in specially prepared „sockets“ so their position is fixed. The tubes however do not touch. The combination of membrane and tubes creates a tensegrity structure (the membrane fulfils the role of cable which is the usual component of a tensegrity structure [18]).

Membranes are used as light and acoustics screen objects (Figure 36). They function in the same way as their „larger counterparts“ in facades in that the lighting effect comes from an additional light source next to the membrane. Something which has not yet been done yet is to integrate the lighting in the membrane textile itself. For this LED technology is a clear option, or the more recent OLED technology (Organic Light-Emitting Diode). This would enable a whole new application of membranes as lighting fixtures in interiors and exteriors.

The shape of membrane structures follow strict natural laws, and is determined (as stated earlier) by boundary conditions, stresses, and material. A membrane surface usually acts as a „minimal surface,“ which is a surface that given a boundary condition tries to fill the boundary with the surface using the minimum amount of surface [19] (thus optimally using the material). Minimal surfaces provide a rich catalogue of shapes that can be used to create membrane structures in architecture. The Australian Wildlife Health Centre (Figure 38 roof view) show an example how such minimal surfaces may lead to complex architectural spaces. In the same way, the installation „Green Void“ (Figure 37) shows a more artistic approach to the use of membrane structures by means of a minimal surface spanned between five circle boundaries.

A simple application of the same principle – but executed on a very large scale – is the art installation Dismemberment, Site I, by Anish Kapoor (Figure 39). It is a membrane structure that is 85 m long and spanned between two steel ellipses (one standing and one lying) that measure 25 m at the longest axis. Each steel ellipses weighs almost 43 tons, whereas the total membrane surface weighs 7.2 tons [20].

Finally, innovative extension of membrane structures may be accomplished by new materials for the membranes. Currently, single layer membranes do not provide high isolation values which limit their application in particular to

housing where offering thermal isolation is critically important. A recent material development in this respect which may offer much potential if extended to membrane structures are so-called aerogels. Aerogels are gel-materials from which the water component has been substituted with gas (air mostly). Thus only the gel-skeleton remains of the gel creating a material that is typically just 15 times heavier than air. Thus, aerogels are extremely light-weight and have very high isolation capacity. Aerogels were originally discovered by Samuel Kistler in 1931, but the original aerogel is quite fragile. Investigations, for example by NASA, led to so-called „x-aerogels“ which are very much stronger (and heavier) [21]. Such aerogels would allow the application of single layer membrane structures that have high strength and isolation

Conclusion

Membrane structures are a versatile structure type that usually finds application in large span structures due to their low weight. Single layer membrane structures are the oldest type. The design of single layer membrane structures requires insight in the physical laws that govern the shape of membrane structures. Design tools such as Formfinder assist in the preliminary design stages to find accurate approximations of membranes which later can be more refined by experts in the field. Cushion membranes have opened the design range for membrane structure shapes in an almost unlimited way. Parametric design tools are helpful to create sustainable and realistic solutions. Pneumatic membrane structures are mostly limited to utilitarian objects, but with the introduction of rib- and grid structures more flexibility becomes available as well. New developments in printing techniques, tensegrity structures, material integrated lighting, mathematical understanding in minimal surfaces, and material innovation such as aerogels can introduce new possibilities for membrane structures.



Fig. 1 | "The Rotunda" (1896 Nizhny Novgorod)
(centre of the image), Vladimir Shukhov

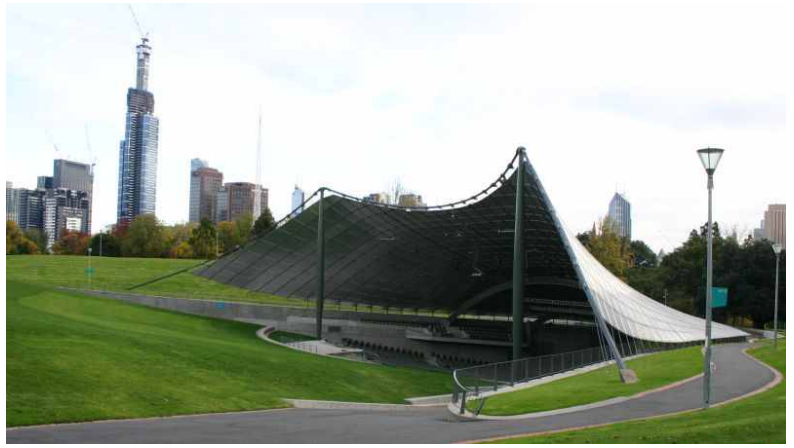


Fig. 2 | Sydney Myer Music Bowl (1959 Melbourne)
B. Pattern, Y. Freeman, Griffiths and Simpson



Fig. 3 | Music pavilion (1955 Kassel)
Frei Otto



Fig. 4 | The building housing the Institute of Lightweight structures
University of Stuttgart



Fig. 5 | The German Pavilion (1967 Expo Montreal)
Frei Otto and Rolf Gutbrod



Fig. 6 | The Olympic area roof (1972 Munich)
Frei Otto and Günther Behnisch



Fig. 7 | Shading structure (Melbourne, Australia)
Oasis Tension Structures



Fig. 8 | Entrance shading structure (2011 Melbourne, Australia)
Sally Draper Architects, SEMF, Oasis Tension Structures



Fig. 9 | Shading for facade (Monash University)
Melbourne, Australia



Fig. 10 | KC Live! Complex (2007 Kansas City, USA)
360 Arch. / Cordish Group, Structurflex



Fig. 11 | Bus stop shelter (2011 Long Beach, California, USA)
MIG Arch., Birdair



Fig. 12 | Temporary shelter
ClearSpan



Fig. 13 | Waka Maori (2012 Auckland, New Zealand)
Compusoft, TOA Arch., Structurflex



Fig. 14 | COMT Screens, Tensilefabric, HTC Polyester



Fig. 15 | Fabric screen (Glenlivet, Scotland)
Tensilefabric

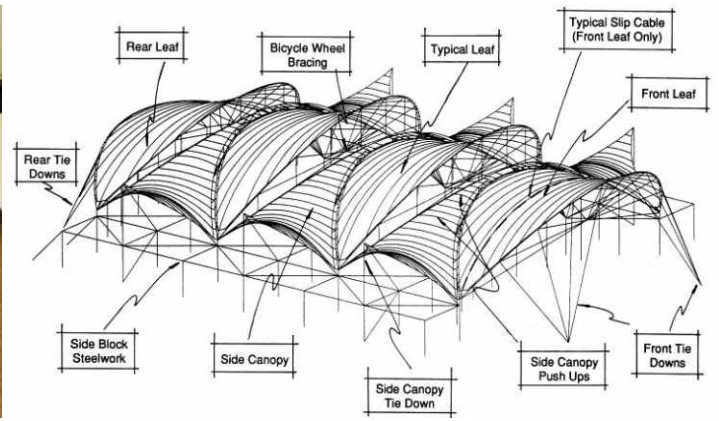


Fig. 16 | Tension structure analysis model (1999 Wakefield)

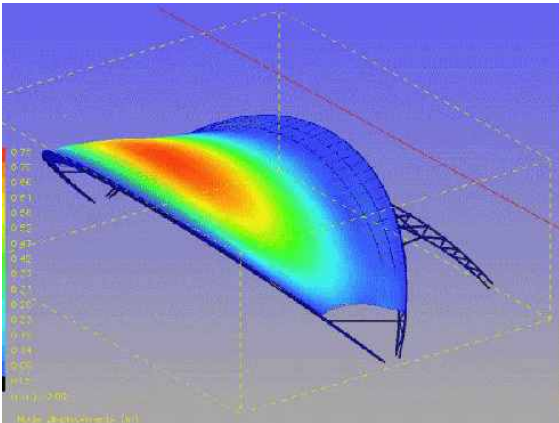


Fig. 17 | Membrane displacement (2012 Synscape)
calculated by ixForten 4000

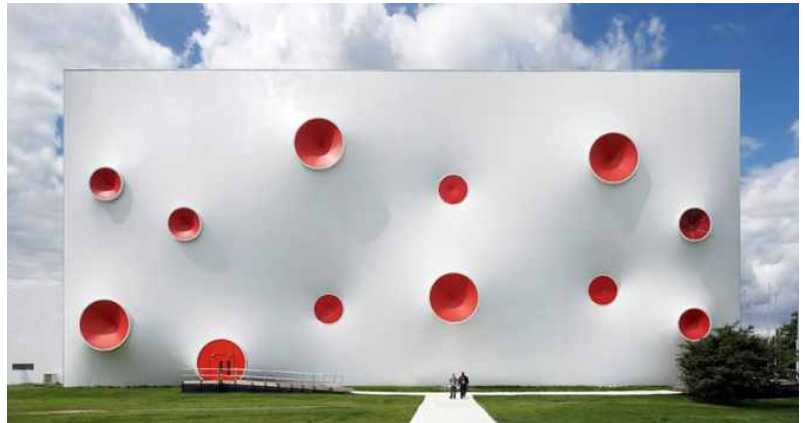


Fig. 18 | Olympic shooting venue (2012 London, UK)
Magma Architecture



Fig. 19 | Cutty Sark pavilion (2007 London, UK)
Youmeheshe Arch. and Designers

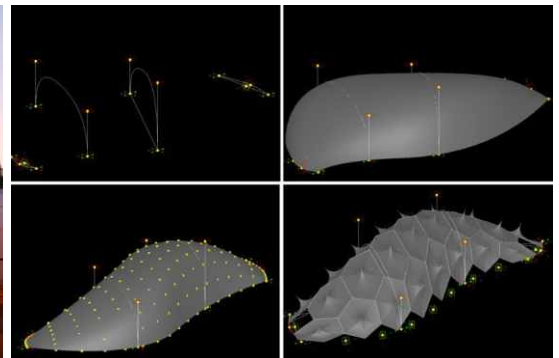


Fig. 20 | Use of Generative components for design
of the Cutty Sark pavilion



Fig. 21 | The Symbol Zone (Expo 1970 Osaka, Japan)
Kenzo Tange



Fig. 22 | The Eden project (2000 Cornwall, UK)
Grimshaw Arch., Vector Foiltec



Fig. 23 | Allianz arena (2005 Munich, Germany)
Herzog & de Meuron



Fig. 24 | Olympic Aquatic Centre "Water Cube" (2008 Beijing)
PTW, CSCEC, Arup, Vector Foiltec



Fig. 25 | Khan Shatyr Entertainment Centre
(2010 Astana, Kazakhstan)
Foster + Partners, Vector Foiltec



Fig. 26 | Air dome (Duol)



Fig. 27 | Leviathan installation, Grand Palais (2011 Paris, France)
Anish Kapoor, Serge Ferrari



Fig. 28 | Tubaloon temporary concert hall (2006 Kongsberg, Norway)
Snøhetta AS, Šorm TL



Fig. 29 | Pneumatic gridshell (2011 Institute for Lightweight structures and Conceptual design) Planex Technik in Textil

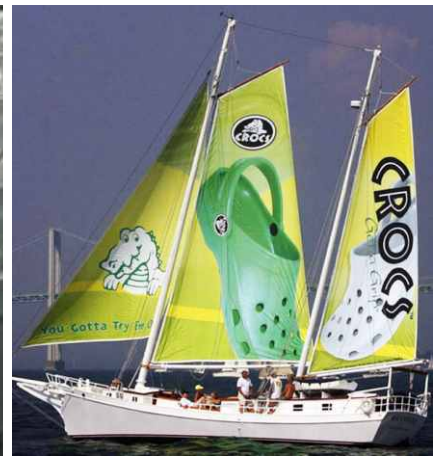


Fig. 30 | Printing and etching techniques for membranes (1997 Photo Sails)



Fig. 31 | DR Concert Hall (2009 Copenhagen, Denmark) Jean Nouvel, Serge Ferrari



Fig. 32 | Le Temps Machine (2012 Tours, France) Moussafir Arch., Sika Sarnafil



Fig. 33 | MOOM Tensegritic Membrane Structure (2012 Tokyo, Japan) Kazuhiro Kojima, University of Science



Fig. 34 | Light and accoustic screen (2012 Germany) Koch Membranen



Fig. 35 | Australian Wildlife Health Centre (2005 Healesville, Australia) Minifie Nixon Architects



Fig. 36 | Australian Wildlife Health Centre (2005 Healesville, Australia) Minifie Nixon Architects



Fig. 37 | Green Void (2008 Sydney, Australia)



Fig. 38 | Dismemberment, Site I (2003-2009 Kaipara Bay, New Zealand)
Anish Kapoor



Fig. 39 | Aerogel (photo by Nasa)

Membránové konstrukce – principy navrhování

Membránovými konstrukcemi z pohledu architektů myslíme lehké konstrukce, kde je statickou součástí systémů textilní, fóliová nebo lanková prostorově zakřivená plocha – membrána. Čili textilie netvoří jen obal nosné konstrukce jako např. u skladových hal nebo stanů, ale přenáší vnější zatížení jako sníh a vítr do podpor.

Základním tvarovým principem těchto membrán je prostorové zakřivení ve 2 směrech, které lze dosáhnout napnutím na zakřivenou (např. obloukovou) podkonstrukci, vytvořením hyperbolického paraboloidu např. střídáním nižších a vyšších cípů a nebo vložením vrcholu do plochy membrány (pagoda, trychtýř). Spojováním a kombinací těchto základních tvarů lze dosáhnout nevšedních a dynamických tvarů. Tvar prostorově zakřivené membrány ovšem není dán její elasticitou, nýbrž svařením z jednotlivých dílů – stříhů. Druhou důležitou podmínkou je předepnutí membránové plochy – pomocí rektifikovatelných vrchol nebo okrajových lan, či podkonstrukcí.

Samostatnou kapitolou jsou pneumatické konstrukce, které pomocí vnitřního přetlaku ve vícevrstevném polštáři vytváří kulovou plochu a současně požadované předepnutí.

Aby bylo dosaženo dostatečné pevnosti, kdy je textilní membrána skutečně nosnou součástí systému, byly vyvinuty materiály určené speciálně pro textilní architekturu. Jsou to kompozitní textilie, kde základní nosnou strukturu tvoří PES nebo PTFE či skelná vlákna. Nosnou kostru chrání nános PVC, PTFE nebo jiného elastického materiálu a tuto skladbu chrání zalakování PVDF nebo akrylovým lakem. Různí výrobci se liší materiály a tloušťkami jednotlivých vrstev, ale princip je podobný.

Prostorově zakřivené membrány se dají vytvářet rovněž z lanových sítí, ať už diagonálních nebo pravoúhlých. Stejně jako se postupně vyvíjely (a stále vyvíjejí) materiály pro tento typ architektury, byly vyvinuty také počítačové programy pro jejich návrh.

Jedná se o specializované sofistikované softwary, které pracují na principu rovnováhy sil v síti a mohou sloužit pro návrh tvaru, ale i statický výpočet silového působení membrány nebo pro tvorbu stříhových plánů a detailů. Většina statických programů s těmito nelineárními výpočty nepracuje, případně modeluje zborcenou plochu pouze geometricky, nikoli statickým modelem.

Postup návrhu membránové konstrukce na příkladu Výstaviště České Budějovice

Zadání Atelieru 8000 bylo celoroční zastřešení vstupního prostoru na výstaviště. Tato plocha je omezena novou bránou z monolitického betonu a novým pavilonem T s průchodem do stávajícího areálu. Plochu o výměře cca 300 m² jsme zastřešili sedlovou membránou s obloukovým kotvením na bráně i na protějším pavilonu.

Kromě silových reakcí do okolních konstrukcí je důležitým prvkem posouzení funkčnosti v zimním období – deformace pod zatížením sněhem, i bezproblémové odtékání vody v letním období. Pokud by se tvořily kapsy sněhu (nebo vody), mohlo by dojít k trvalé deformaci textilie a tím k lokální ztrátě předpětí. V horším případě pak k přetížení a destrukci celého systému.

V této úvodní fázi tvarování je důležité sladit zadávací podmínky a optimální statické a tvarové schéma membrány. Tato optimalizace je časově náročná, ale vede také k ekonomické optimalizaci – díky příznivému tvaru vznikají menší síly a ty znamenají úspornější konstrukci.

Tvarování samotné membrány je vytvořeno svařením jednotlivých pásů – stříhů. Ty se pak svařují nebo sešívají do prostorového tvaru.

Další etapou návrhu je návrh detailů kování a kotvení a poté dimenzování podpůrné konstrukce (sloupů kotevních lan), případně posouzení stávajících konstrukcí na které se napojujeme. Tato fáze má samozřejmě také podstatný vliv na ekonomiku díla – volba materiálů i složitosti detailů ovlivní však nejen cenu, ale i úspěšný průběh montáže.

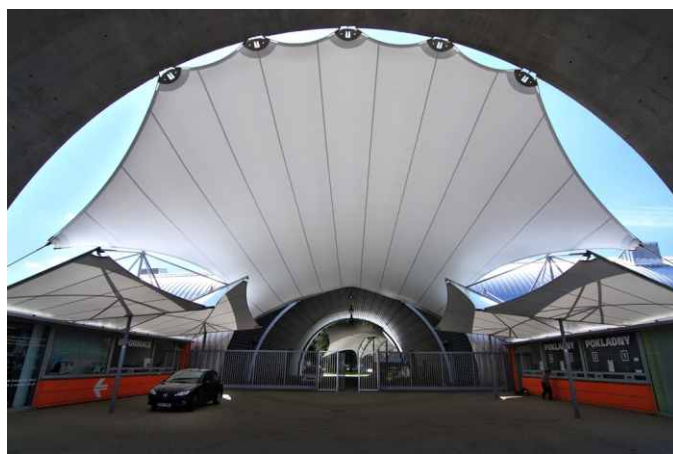
Ta je završením celého procesu návrhu a výroby. U složitějších konstrukcí je nedílnou součástí dokumentace také postup montáže. Kvalitní údržbou je možné prodloužit trvanlivost membránových struktur na dobu srovnatelnou s tradičním zastřešením.



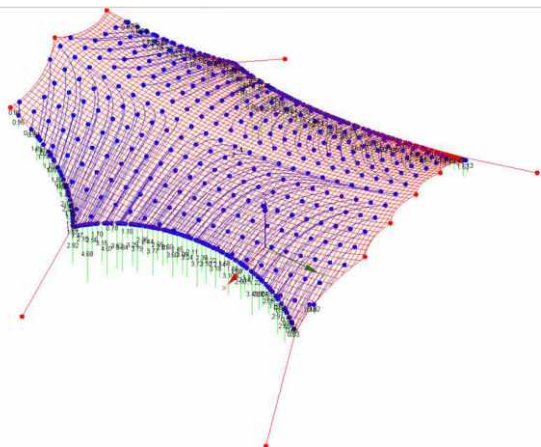
Obr. 1 | Hotel Clarion (2012 České Budějovice)
Jaromír Kročák



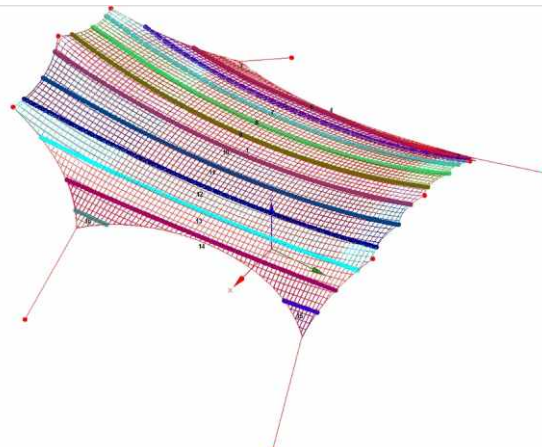
Obr. 2 | ZOO Dvůr Králové nad Labem, pavilon orangutanů



Obr. 3 | Výstaviště České Budějovice



Obr. 4 | Počítačové tvarování membrán
Předpětí - odtok vody



Obr. 5 | Stříhy - tvarování samotné membrány je vytvořeno svařením jednotlivých pásů stříhů.



Obr. 6 | Pneumatická konstrukce - fólie ETFE

FORMFINDER SOFTWARE

FORMFINDING IN GENERAL

INTRODUCTION

It is hard to experiment with any new building material, especially when that material is outside the standard choices. Structural fabric is one of those materials. Structural fabrics (or membranes as they are called in Europe) have been around for decades, but due to their unique qualities that demand nonstandard construction methods, they remain relatively obscure. Add to this already intimidating situation the dependence of today's architects, designers and students on CAD systems, and the task is daunting.

Traditionally, CAD systems or formfinding software have been overwhelmingly complex and have needed technical staff of their own. The trend in software design has been user friendliness, and as a result more designers and architects that formerly shied away from complex CAD systems are embracing programs such as Google SketchUp. These user-friendly programs are taking the mystery and the fear out of these computer tools and are allowing exploration in fields normally closed to novices.

HISTORY

Educated as a computer scientist, an architect and a structural engineer, Robert Wehdorn decided to take on this fear factor as it relates to membrane structures. "I feel that the most beautiful fabric structures are the result of a long design process. I also know that these structures are very hard to sketch by hand. One needs physical models as well as 3-D computer models to explore the design correctly." Given that, in 2001 Wehdorn traveled to the Technische Universität of Berlin, Department for Geodesy and Geo-information Science, to discuss his ideas with professor Lothar Gründig of Technet fame who had authored the EASY formfinding software. His interaction with Gründig was the start of his Ph.D. studies which culminated in what later came to be known as Formfinder v1.0.

Wehdorn started with a simple goal for this software. "As a tool, this software must be as easy to use as a sheet of paper and a pencil in hand."

In 2003, after finishing his Ph.D., he set to test his program in real situations on real projects. He traveled to England and worked on a number of projects for various firms while debugging his software system. He streamlined the software for architects and designers and honed the ease of use by employing a user-friendly interface and screen graphics. Finally in 2006, after three years of field testing and development, with the support of Technet GmbH and Lenzing Plastics GmbH, Wehdorn released the first version of the software under the brand name [Formfinder](#).

FORMFINDER TODAY

Although Formfinder uses an identical algorithm for calculation and form generation as the preceding formfinding and engineering software EASY, Formfinder is not as burdened and as complex of a program. It is a lean and to-the-point program tailored for use by architects, designers and students. It is a tool with capabilities and characteristics that make it useful to handle expressions of force equilibriums without entering in the force-density-algorithms. In other words, you do not need to be a structural engineer to use the software. Architects, designers and students barely use static analysis concerning forces and loads to generate their work; therefore Formfinder employs a form-based interface and intuitive means for manipulation. To alter the shape of the original form one simply moves selected points to desired locations. This is a visible interaction with the model on the screen, in real time.

What makes Formfinder more useful and user-friendly is the inclusion of various databases through an integrated Internet browser. An extensive index of built membrane projects allows the user to browse for inspiration or precedent study. The project presentations in the software database include high-res pictures as well as construction details and all essential project information.

This project directory is constantly updated with the wealth of material from Formfinder users all over the world.

Formfinder Light is available for free download through its Web site, but if you want to upgrade to Formfinder Professional you need to pay the price. The major difference between the two versions is the file transferability. In other words, Formfinder has the ability to import and export to other CAD programs including EASY. Formfinder uses dxf file format for imports and exports. Formfinder's files are compatible and could be open directly in EASY, which allows for a seamless interaction between designers and engineers.

USING FORMFINDER

After a file setup and only a few clicks, the user defines the boundaries of the basic form as a closed polygon on a viewport. The form can be modified by altering the edges, tweaking the sag, the elevation of the related nodes or the number of the intermediate points. Modification of the form is done by means of moving the points or entering numeric values in related property dialogue boxes. The program generates a 3-D mesh within the defined boundaries. This mesh is also very flexible. One can manipulate the spacing and the refinement of the mesh as well as the weave direction and the stress level. Split Curve command allows you to introduce a new anchoring point in a highlighted curve without having to start a whole new mesh. A helpful resource accessible from the screen is the list of many anticlastic advanced membrane forms that can be used directly by dragging and dropping or after manipulation.

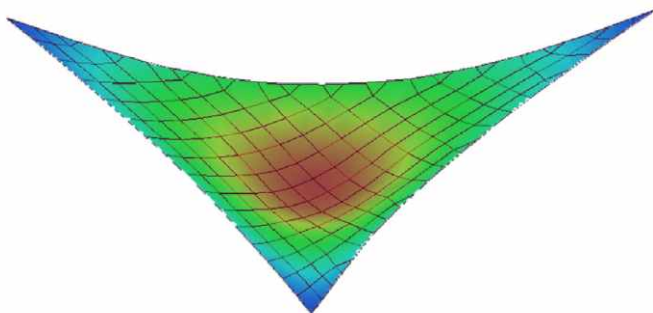
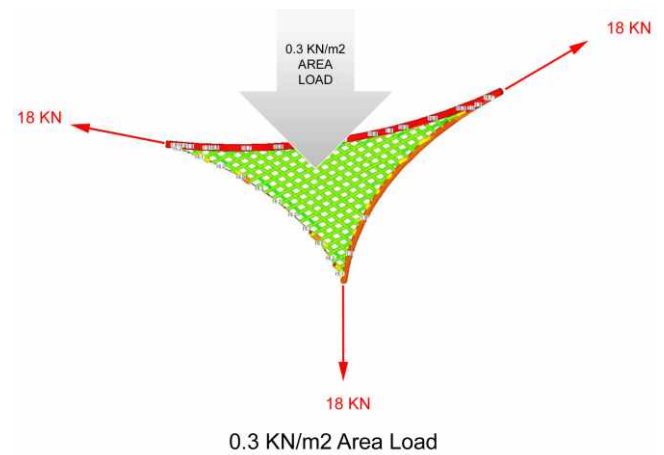
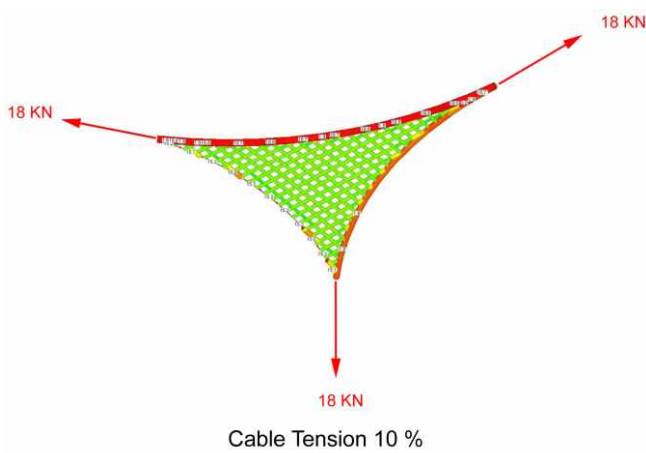
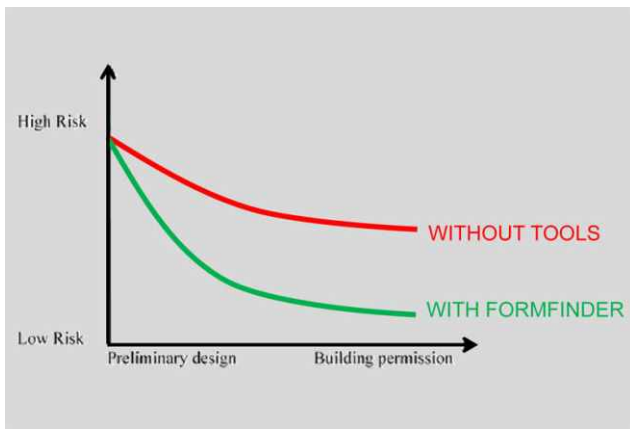
The navigation through different tools and dialogue boxes is done with ease and the graphics are transparent. Toggling between floor plan and perspective view is intuitive.

The program is very stable so long as one is not trying to work with more than one horizontal layer on top of another or using too many meshes that are connected to each other in a complex way or are penetrating each other.

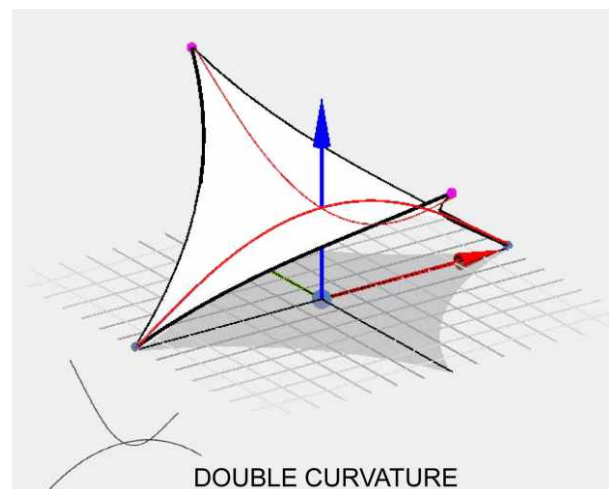
Formfinder is an appropriate tool for architects, designers and students, novice or advanced, looking to explore or gain experience in the design of membrane structures. Here one can see firsthand how modification of various parameters influences the formfinding process and the ultimate shape.

FORMFINDER TOMORROW

Scheduled for release in mid-2009, Formfinder v2.0 will include synclastic forms like air-supported structures for exploration and manipulation. There is a new powerful and simple sun study component which would help with greatly needed solar studies of the models. A helpful improvement is that the system will recommend adequately dimensioned profiles for masts and cables. In addition to the inclusion of historic membrane projects from around the world, an international network of universities, engineers, architects, designers and students promises to make Formfinder one of the most widely used formfinding programs for the design and development of membrane structures around the world.



Waterponding



DOUBLE CURVATURE

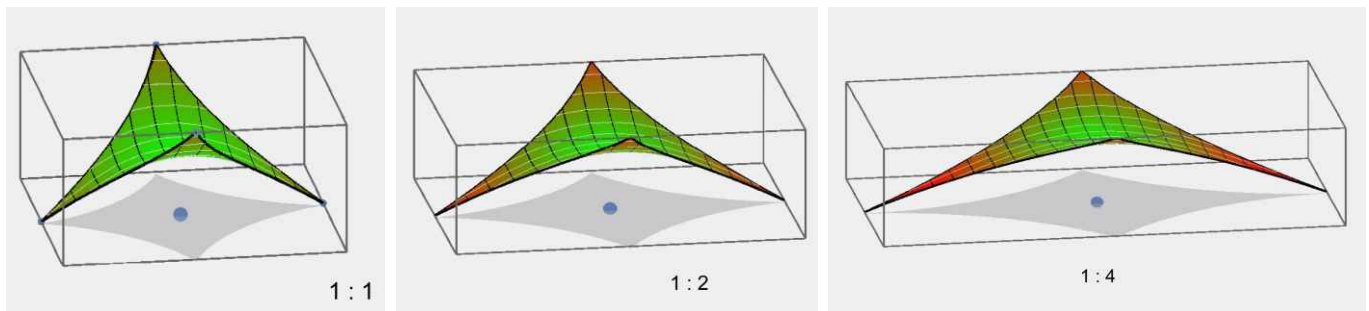
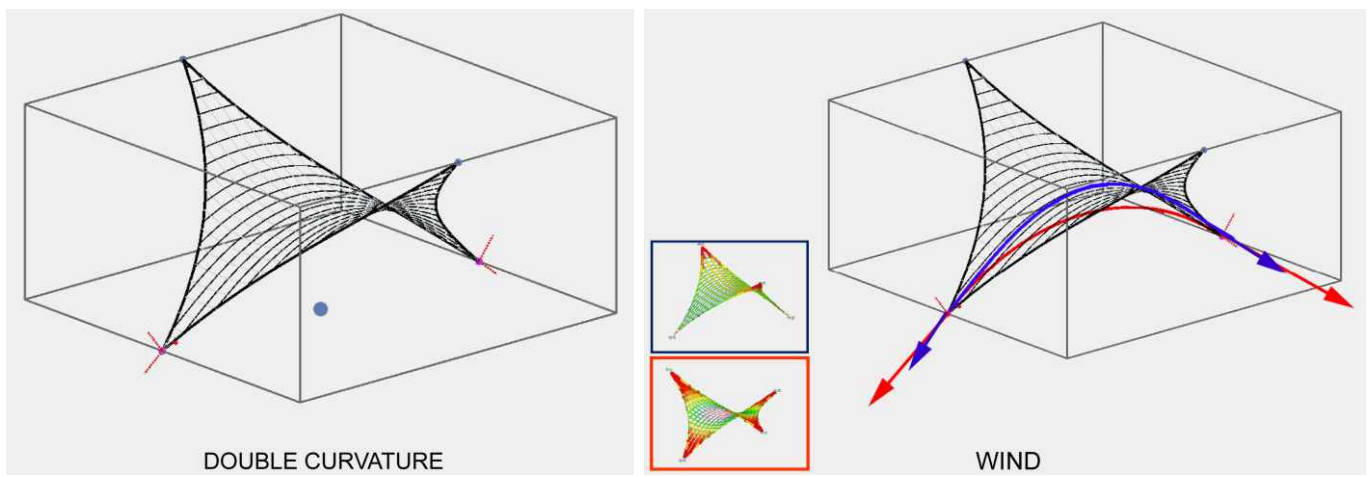


Fig. 1 | Force and geometry - proportion

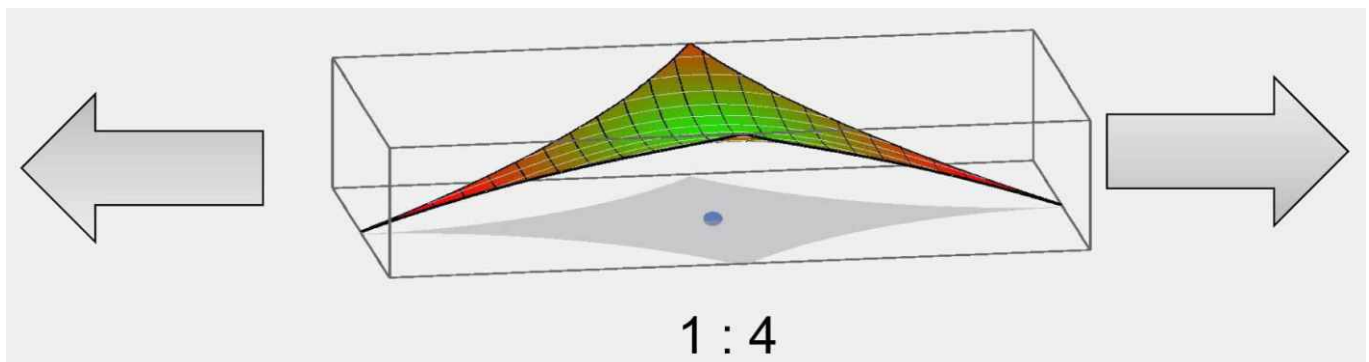


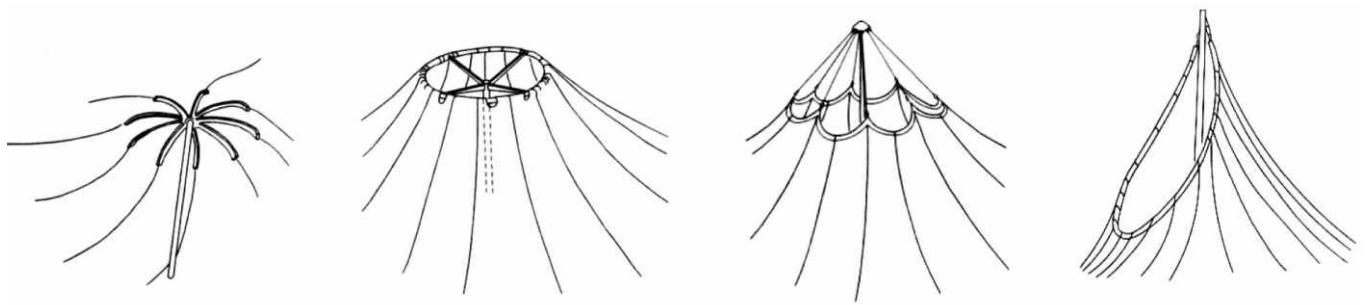
Fig. 2 | 1:4 = change of the system



Fig. 3 | Patterns - transparent membrane



Fig. 4 | Year long umbrellas in Vienna



“HIGH POINT”

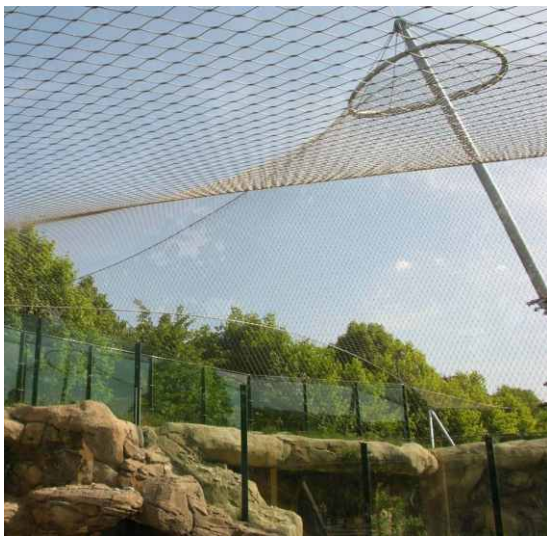
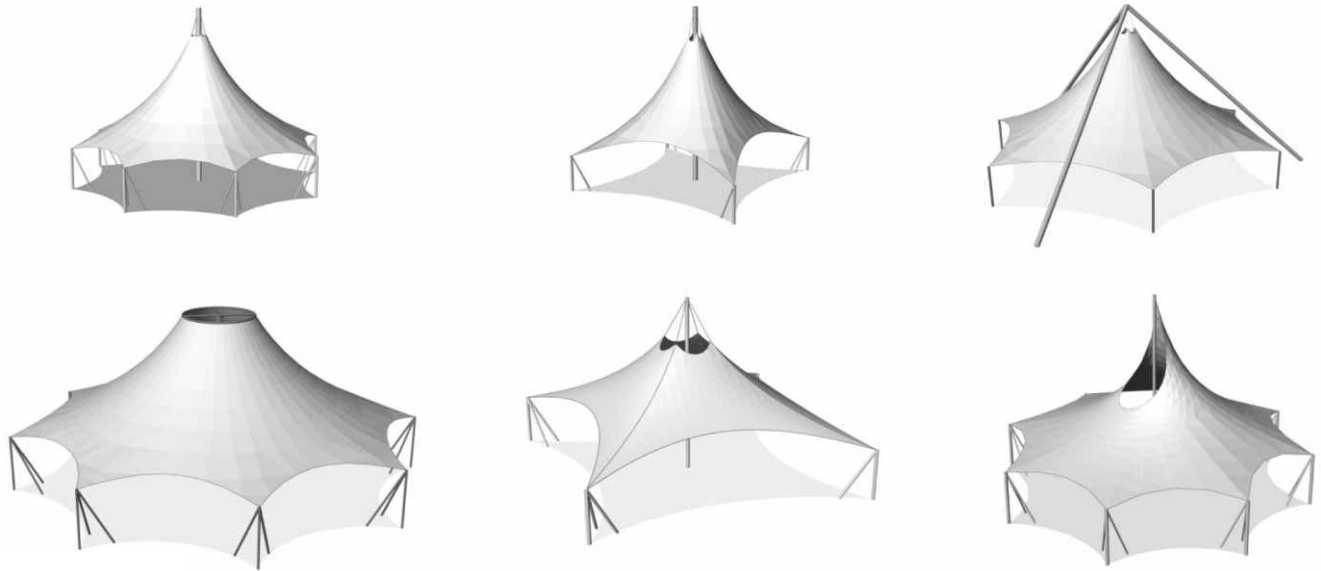


Fig. 5 | Cable-net structure



Fig. 6 | Olympic park Munich (swimmingpool), Frei Otto



Fig. 7 | Tanzbrunnen - Frei Otto



Fig. 8 | Palais thermal - KTP arch.+form TL



Fig. 9 | Chemical Research Centre, Venafrò

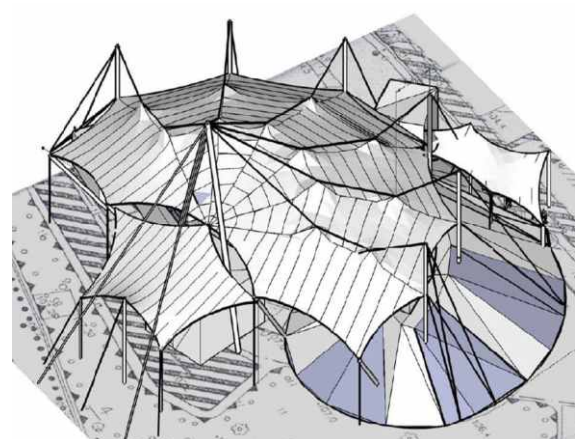
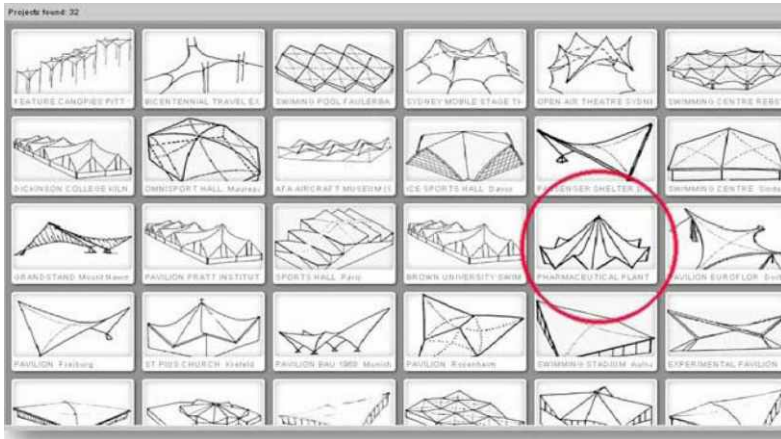
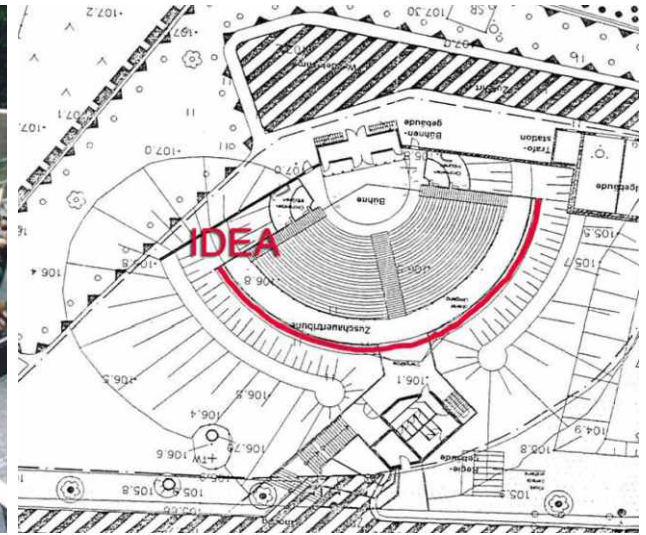


Fig. 10 | Project Senftenberg in team with Horst Dürr (IF Group)

Supporting steelwork for non-metallic membranes

Abstract

Integration of textile/foil membranes used for roofing of various canopies/shelters/awnings into supporting steel structure is described. First the approaches concerning global analysis of the membrane vs. supporting steelwork are discussed with regard to their correctness and influence of important parameters, such as prestressing and rigidity of the membrane perimeter. Requirements concerning possibility of separate modelling of membranes and supporting steel structure are studied on practical examples. The difficulties and shortages of such analyses are clarified, encouraging the integrated approach. An attempt to avoid the use of specialized software resulted into acceptable solution using standard geometrically nonlinear analysis (GNA) with shell and linear elements. Prestressing of the membranes and connecting linear elements are essential prerequisite of proper behaviour of these structures. Therefore, the paper also describes various measurement methods of internal forces in prestressed elements, both linear ones (rods, ropes) and membranes. Finally, some recommendations for the analysis of prestressed non-metallic membranes in interaction with supporting steelwork and ways of suitable measurements of prestressing are suggested.

Introduction

Aesthetics, simplicity and lightness are becoming predominant properties of membrane structures based on availability of novel structural elements. Notable tensile surface structures are required by architects, designers and developers and corresponding new forms are being developed with help of formfinding software based on force-density method (Linkwitz, 1999) as permanent, tensegrity and tensairity structures (see e.g. Berger, 1999; Lewis, 2003; Pauletti and Brasil, 2003, 2005; Wakefield, 1999). Nowadays the world-famous companies (e.g. Base Structures Ltd., Tension structures.com, Mehler Ltd., Archtex s.r.o., Herzog & de Meuron etc.) are producing countless number of both common and unique tensile structures using fabric/foil membranes.

With increasing knowledge about new materials, as glass fabric coated by PTFE, polyester fabric coated by PVC + PVDF, polyester + titanium dioxide, or foils from ethylen-tetrafluoretylen (ETFE), tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene-vinylidene-fluoride terpo-lymer (THV) and respective technology (Seidel, 2009), such structures are becoming frequently used in standard permanent situations (e.g. Foster and Mollaert, 2004; Burrows *et al.*, 2006; Majorana *et al.*, 2010). However, complex analysis of membrane structures in interaction with steel structure (carbon/stainless steel perimeter elements) is rather demanding.

Steel elements are used either as anchor, perimeter, valley and ridge ropes or stiff load-bearing structure and form an integral part of the membrane structure. In design, with the exception of commercial purpose-made software packages (e.g. EASYBEAM, SOFISTIC) a software analyzing separated membranes alone is commonly used, providing the resulting forces and deflections for analysis of a supporting steel framework by another software. Such procedure, however, may lead to considerably misrepresented results.

In this paper the common software SCIA ENGINEER used for elastic design of membranes integrated into steel structure is briefly described. The study assumes a routine prestressing of membranes and deals with realistic methods of assembly and prestressing, level of which is a fundamental prerequisite of required structural behavior. The following study deals with mechanically prestressed membranes of double curved shapes only, in the form of a membrane spanning between arch edges, Figure 1. For study concerning erection methods of hypar membranes see Jermoljev and Machacek (2012). The paper also describes experience obtained from extensive in-situ and laboratory measurements concerning prestressing of rope or rod elements.

Interaction of Membranes with Steel framework

There is a question, whether results of a separate membrane analysis may be introduced into steel frame analysis and

vice versa without considering an interaction. Separate modeling may only be successful provided the design of the membrane considers geometry and rigidity of the supporting framework (arches, frames, pylons, perimeter elements, etc.). In case the support is not fully rigid and behaves flexibly, the introduction of real rigidities is necessary, otherwise resultant membrane stresses and deflections are distorted and data provided to the designer of steel structure as well. The following study deals with mechanically prestressed membranes between arch beams only as shown in *Figure 1*.

Within the study all the membranes have modulus of elasticity $E = 1000 \text{ MPa}$, Poisson's ratio $\nu = 0.25$ and thickness $t = 1 \text{ mm}$. The membrane shapes were found using FORMFINDER software based on force-density method and transferred via AUTOCAD to SCIA ENGINEER software. FE GNA (geometrically nonlinear analysis) of the membranes used triangular and quadrilateral shell elements instead of membrane ones that proved to provide better results when calibrated against another software, COMSOL MULTIPHYSICS, which analyses physical tasks expressed through partial differential equations by FEM (Jermoljev and Machacek, 2012). Two cases were always investigated: first "membrane with arches" having the steel tube arches built-in at supports both in and out of plane (the tubes were designed using GNA for factored loading), second "membrane alone" with fully rigid support along all arch length. Fixed edges were considered in curved transverse boundaries.

The prestressing in numerical analysis was introduced by areal deformation. In the "membrane alone" $\delta = 0.004$, for the "membrane with arches" the value results from condition of identical horizontal reaction along arch edges to ensure the same prestressing, e.g. for case in Fig. 1 the deformation $\delta = 0.0046$ was necessary due to horizontal deflection of arches (nevertheless, the unit prestressing forces in this case were nearly identical). Vertical loading 1 kN/m^2 only was considered in the study, representing snow loading.

For geometry shown in Figure 1 the maximal transverse unit force for the "membrane with arches" is 10 % lower in comparison with the "membrane alone" and maximal membrane deflection is 29 % higher. As obvious, separate analysis of membranes with rigid supports is misleading, see Figure 2. On the other side, simulation of arch tube flexibility via membrane relevant elastic support is difficult, because the value of rigidity along the arches is changing (e.g. in arch supports approaching infinity), see Jermoljev and Machacek, 2012.

(Figure 2)

Parametrical Study

An extensive study was performed to find necessity of joint analysis of membrane and supporting arch or membrane alone only. The principal results are presented in Table 1 below. The analysis for case No 9 was explained in the above paragraph.

From the results is obvious, that for arch span up to 9 m the interaction of arches with membrane may be neglected (analysis of the membranes with rigid supports and arches with resulting reactions gives reasonable results). Separated analysis for span above 10 m however, markedly underestimates both vertical membrane and horizontal arch deflections, which negatively influence cutting and prestressing process of membranes.

Table 1: Comparison of “membrane with arches” and “membrane alone” behavior

No	Span [m]	Width [m]	Rise [m]	Tube [mm]	Ratio: with arches/alone [%]	
					Prestressing	Deflections
1	4	2	1	273x16	102.8	105.0
2	6	2	1	273x25	100.5	103.0
3	6	2	2	273x25	100.4	101.4
4	8	2	1	324x20	105.9	137.2
5	8	2	2	324x20	112.2	112.0
6	8	4	1	324x20	102.8	111.0
7	8	4	2	324x20	101.3	104.5
8	10	4	2	324x25	103.2	140.7
9	10	4	3	324x25	99.6	128.8
10	12	4	2	356x22	103.8	158.2
11	12	4	3	356x22	108.9	179.3
12	12	4	4	356x22	109.9	175.4
13	12	6	2	356x22	99.3	144.1
14	12	6	3	356x22	101.3	152.6
15	12	6	4	356x22	100.1	145.4
16	14	4	2	377x20	121.8	194.2
17	14	4	3	377x20	113.6	195.6
18	14	4	4	377x20	120.6	224.4
19	14	6	2	377x20	111.4	147.2
20	14	6	3	377x20	101.8	165.6
21	14	6	4	377x20	111.1	200.6
22	16	6	2	377x25	122.0	164.4
23	16	6	3	377x25	112.3	180.1
24	16	6	4	377x25	111.8	202.2
25	18	6	3	377x28	126.4	199.0
26	18	6	4	377x28	128.1	231.0
27	18	6	5	377x28	134.1	271.0

Faulty results give separate analyses for majority of spans above 16 m, where the necessary prestressing for “membrane with arches” in comparison with “membrane alone” should be much higher and in spite of it enormous increase of membrane deflection must be expected.

Measurement of Prestressing

The correct level of prestressing in all structural parts (guys, ties, perimeter ropes, membranes) is fundamental. During erection **strain gauges** are frequently used. Some difficulties arise in placement of gauges at ropes. The only suitable position is at circular section just at or behind anchor or turnbuckle. However, stresses are not uniformly distributed due to change from sleeve to full cross section but concentrated on surface. Either calibration of the measurement or insertion of load cells is necessary (provided aesthetics or detailing enable such solution). **Transducers** of various types (mechanical, inductive etc.) are option to the above. **Inserted load cells** (or calibrated manometers of hydraulic devices) are useful in case of final activation of elements as long as no other straining is induced by introduced prestressing.

On already prestressed structure the frequency measurement may be used, consisting in determination of natural frequency of the element transverse vibration. The axial force may be derived from theory of string with respect to bending stiffness, axial force, sag, boundary conditions (e.g. boundary elasticity may complicate the results),

placement of turnbuckles or other prestressing elements (violating uniform mass along the element). In case of two hinged element the simple formula for axial force N [kgm/s²] at j - frequency reads:

$$N_{(j)} = \mu \left(\frac{2L f_{(j)}}{j} \right)^2 - \left(\frac{j\pi}{L} \right)^2 EI \quad (1)$$

where E [kg/(ms²)] is modulus of elasticity, L [m] length of element, μ [kg/m] mass, I [m⁴] second moment of area and $f(j)$ [s⁻¹] denotes j natural frequency. In case of rigid end fixings the relation transforms to:

$$N_{(j)} = \frac{\left(\sqrt{t^2 - 4yz} \pm t \right)^2}{4y^2} \quad \text{where} \quad (2)$$

$$t = f_{(j)} - \frac{j}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad \left\{ \quad y = \frac{j}{2L} \frac{1}{\sqrt{\rho A}} \quad z = \frac{j}{2L} \frac{1}{\sqrt{\rho A}} \left(4 + \frac{j^2 \pi^2}{2} \right) E I L^2 \right. \quad (3)$$

and density (for steel 7850 kg/m³). Practical measurements on a steel tie show that Eq. (2) gives better results than Eq. (1). Frequency measurement also pointed out to need of using second and higher frequencies in the evaluation, as the first one is usually not legible.

The special testing device may also be used to determine the axial force in an element from calibrated deflection-axial force relation. The instrument having saddles accommodating the measured element is shown in Figure 3. The force induced by the jack to produce required deflection is measured through calibrated sensor. The PIAB device (PIAB RTM 20C: Rope Tension Meter, PIAB Force Measurement, Sweden) is designed and calibrated for certain range of rope diameters. Practical measurements proved to give results with deviation $\approx 3\%$.

(Figure 3)

Electromagnetic permeability measurements provide another method for determination of axial force in an investigated element, applicable to rods. However, the material of the specimen needs laboratory investigation.

Membrane state of stresses may also be established by measurement. Producers of membranes developed various instrumentation for this reason. Basic method represents biaxial measurement via transducers on a membrane sample, often used to determine respective modulus of elasticity. Second method works on the principle of frequency response of acoustic spectrum excitation in given boundary conditions. From the response, the natural frequencies are determined and in accordance with investigated material also the internal stresses. Another method is based on similar principle as the instrument for measurement of axial force in ropes described above. Measured is the deflection induced by a piston force of given value acting on a circle base.

Conclusion

The joint modelling of membranes with steel framework using specialized or common software (e.g. SCIA ENGINEER) has priority. Any membrane analysis has to consider geometric nonlinearity and sag of ropes from their own weight. Use of a separate modelling requires taking into account mutual interaction of the membrane and steelwork, unless the geometry of the structure is substantially limited (e.g. for membranes supported by arches up to span of 9 m). Method of activation of prestressing is fundamental and requires careful introduction and verification.

Methods for determination of prestressing/internal forces described in the paper may be used during erection and already prestressed structures according to presented drawbacks. Results of majority of special rigs are in good agreement with reality.

Support of the Czech Grant Agency GACR No. 105/13/25781S is gratefully acknowledged.

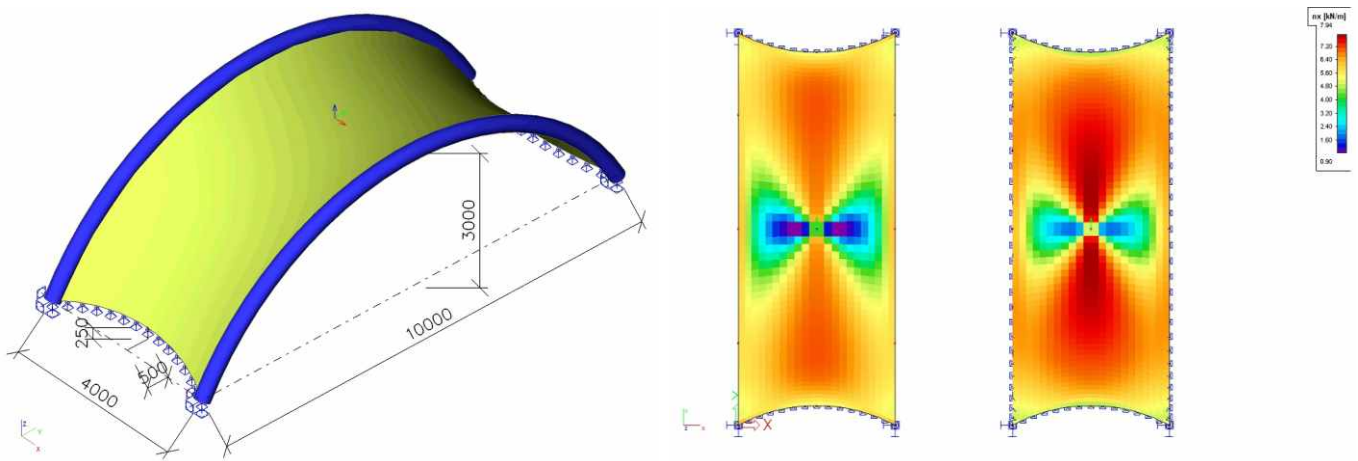


Fig. 1 | Membrane between arch beams. Unit membrane forces n_x [N/mm] due to pre-stressing and vertical loading: "membrane on arches" (left), "membrane alone" (right).

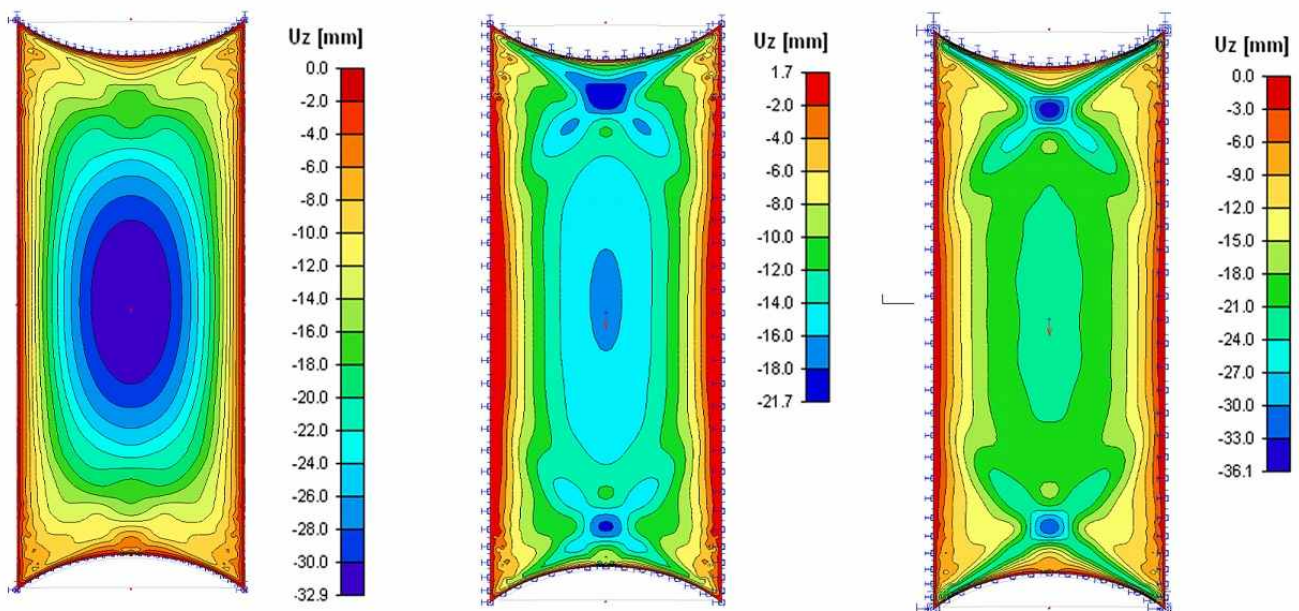


Fig. 2 | Membrane vertical deflections: "membrane with arches" (left); "membrane alone" (middle); membrane with elastic support corresponding to top tube arch horizontal rigidity 1950 N/mm (right).

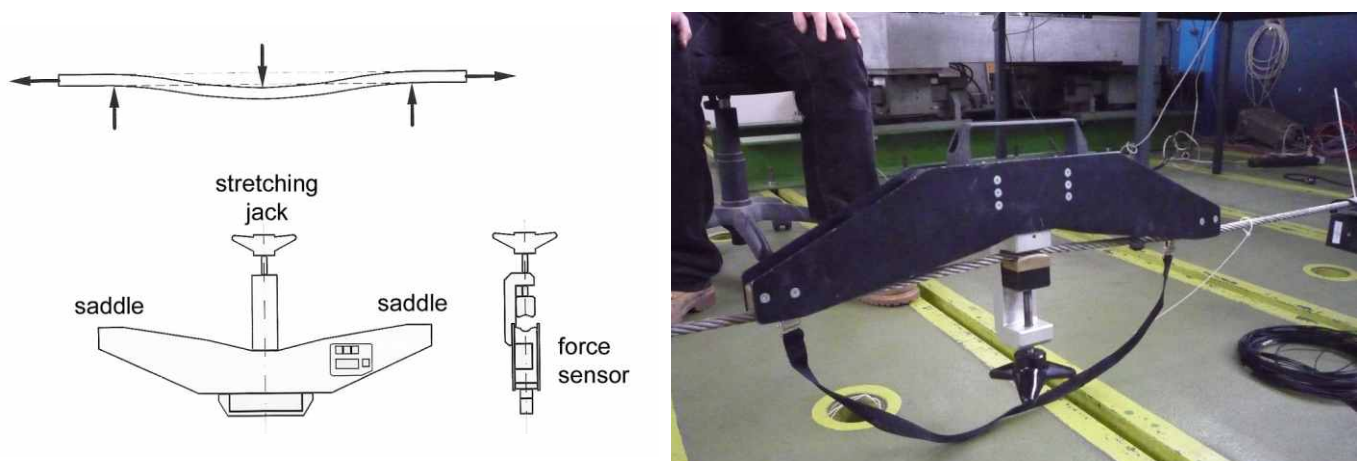


Fig. 2 | Scheme and photo of instrument PIAB RTM 20C for measurement of axial force in a loaded rope

Membránový program ve studentském konstrukčním atelieru

Studijní program Architektura a stavitelství na Fakultě stavební ČVUT v Praze je samozřejmě strukturován obdobně jako ostatní obdobné programy v České republice či v Evropě. Rozdělení na bakalářské a magisterské studium zde přitom není jen formálním naplněním povinnosti rozdělit vysokoškolské studium na nižší „základní“ a vyšší „specializovanou“ část, ale celý program umožňuje každému studentovi neustále porovnávat své osobní profesní preference s postupně získávanými vědomostmi o úloze a obsahu práce všech odborníků, kteří se účastní na složitém procesu přípravy a realizace architektonického díla. Bakalářský stupeň není tedy pro všechny studenty jen obdobím získávání vědomostí a nabývání znalostí o architektuře a stavitelství, ale je i procesem poznání, v jaké úloze by nejlépe naplnili své individuální schopnosti v této sféře lidské činnosti.

Hlavní ambicí bakalářského stupně je objasnit všem studentům základní principy postupného vývoje od záměru k nově vytvořenému prostoru, od ideje k realitě. Osvětlit princip zhmotnění vize. Základní důraz je proto položen na vysvětlení významu a účelu architektonického konceptu jako hlavní osy, která je nejen zárukou osobitého řešení konkrétního problému, ale i zárukou harmonického propojení všech vnějších vlivů i vnitřních zákonitostí, myšlenkové náplně i reálných technologických či ekonomických možností.

Když se absolvent bakalářského programu rozhoduje o dalším stupni své profesní kariéry, měl by již jednoznačně chápat architekturu jako široký všeobíhající princip, pevně zakotvený do stavebního díla – nikoliv jako „estetický doplněk“ k utilitárním potřebám stavby. Takové vzdělání mu umožní zapojit se do týmu podle svého naturelu a osobních preferencí, ale vždy už s vědomím inspirativních možností při naplňování společné myšlenky.

Aby tomu tak skutečně bylo, musí být výuka vyvážená. Musí zahrnovat předměty, které umožní důležitost konceptu pochopit. Musí přiblížit vztah mezi konceptem a konkrétním řešením detailu, přičemž není podstatné, zda pod pojmem „detail“ chápeme dispoziční řešení, účelnou krásu odpovídající konstrukce či důmyslný systém řízení vnitřního prostředí stavby.

V bakalářském studiu je proto například zařazeno 23 výukových hodin konstrukcí pozemních staveb, 6 hodin stavebních hmot a technologií a přes 25 hodin, zaměřených na statiku a konstrukční systémy. Ale především také 52 hodin ateliérové tvorby, ve kterých se studenti učí výše uvedené principy spolu s dalšími znalostmi využít či respektovat v procesu formování architektonického konceptu a konkrétního návrhu.

Absolvent bakalářského stupně tedy ví co je podstatou architektonické tvorby a dokáže se kvalifikovaně rozhodnout, zda je povolání architekta tou cestou, kterou se chce ve svém profesním životě vydat. A pokud usoudí, že jeho osobní preference a nadání je zaměřeno spíše na jinou oblast stavitelství, poskytuje mu Stavební fakulta ČVUT řadu dalších možností, kam se vydat. Ale znalosti zásad architektonické tvorby, vědomí důležitosti architektonického konceptu a často i lásku k architektuře si ponese sebou dále.

V magisterském studiu se pak výše popsany systém výuky dále prohlubuje, jen je zahrnováno stále více aspektů a rozšiřuje se výuka, zaměřená na schopnost komplexnější koordinace a formování konceptu ve složitějších podmínkách. Student zde již jednoznačně směřuje k povolání architekta.

Ve struktuře výuky byly od počátku zařazeny dva ateliery, nazývané konstrukční, které byly zaměřeny především na technickou a technologickou stránku projektu. Velkou změnou bylo zahájení zcela rozdílného zaměření těchto atelierů. Zatímco v bakalářském stupni se jedná o komplexní projekt a účelem kurzu je mimo jiné podrobné seznámení se strukturou projektu, s legislativními náležitostmi projektové dokumentace (především v úrovni projektu pro stavební řízení), projekt v magisterském stupni se od ak.roku 2009/10 přeměnil na kurz, který je dnes nazýván Atelier konstrukční speciální.

Tento atelier si klade za cíl naučit studenty propojovat ještě těsněji tvorbu architektonického konceptu s konstrukčními možnostmi, vlastnostmi materiálů či elegancí statického řešení. Zadávány jsou zde stavby dispozičně jednoduché (rozhledny, vyhlídkové plošiny, přístřešky), malé dopravní a inženýrské stavby (můstky, lávky, visuté stezky) a podobné jednoznačné úlohy, při jejichž řešení se může stát konstrukční princip či specifická vlastnost zvoleného materiálu přímo zdrojem inspirace pro koncept stavby.

Rozhovory mezi studenty a konzultanty – specialisty (především statiky, ale i odborníky na konstrukční systémy nebo TZB) se v tomto projektu většinou rovněž posouvají na zcela jinou úroveň. Pokud je zadání kvalitní a dobře připravené a student je talentovaný a pro věc zapálený, nejedná se již jen o prosté zjišťování, zda uvažovaná idea je vůbec realizovatelná, ale jde o skutečnou partnerskou spolupráci. Všichni zúčastnění – pedagogové i student – při ní nabízejí a vzájemně posuzují zdroje možného konceptu a pak společně postupují k jeho naplnění. Tato zkušenost nás logicky

dovedla i k pokusu propojit nad jedním projektem studenty více programů. Prozatím se jedná spíše o experiment, proběhly pouze dva ateliery, do kterých se vedle studentů architektury zapojili i studenti statiky. Výsledky nejsou zatím jednoznačné (vysoce erudovaný statik je pro „nehotového“ architekta pochopitelně větším přínosem při hledání konceptu než student), ale jeden klad taková spolupráce má – zakládá vzájemný respekt.

Atelier membránových konstrukcí, který na Katedře architektury Stavební fakulty ČVUT v Praze založil doc.Ing.arch. Miloš Kopřiva, do tohoto změněného pohledu na magisterský konstrukční projekt přesně zapadl. Membrány a fólie díky svým specifickým vlastnostem učí studenty tomu, co vlastně musí znát a respektovat u jakéhokoliv konstrukčního prvku stavby – ctít materiál. Využívat jeho kvality, respektovat jeho možnosti a těžit z jeho výjimečnosti. A membránové struktury v tomto směru představují dokonce velmi vyhraněný případ materiálové specifičnosti. Vlastnosti stavebního materiálu je nutné zcela respektovat, jinak konstrukce zkrátka nefunguje – ne že by fungovala špatně, ale nefunguje prostě vůbec. Navíc ve dvou směrech prohnuté „plachty“ vyžadují od autora architektonického řešení značnou prostorovou představivost – jakkoliv je dnes možné toto představivost podpořit kvalitním softwarem.

První výsledky studentských projektů, vytvořené v rámci Atelieru membránových konstrukcí (AMK), jsou velmi zajímavé. Ale především potvrzují původní představu o dokonalém souznění cílů předmětu Atelier konstrukční speciální se zadáními AMK.

Věříme, že tento atelier jim nejen poskytuje prostor pro seznámení s méně obvyklým elementem tvorby prostoru, ale pomůže jim i pochopit, že stejně důsledně je třeba využívat i kvalit každého materiálu, který architekt ve stavbě používá.

Zadání projektů buď vycházelo z předchozího atelieru – student tedy měl již vyřešené základní vazby, měl k dispozici promyšlený urbanistický koncept a základní ideu, nebo bylo zadání zcela nové – ale pak jsme dbali na to, aby nebylo zatíženo příliš složitými vazbami nebo nedořešenými vztahy. Chtěli jsme ponechat dostatek prostoru pro pochopení individuálních vlastností materiálu. Z tohoto důvodu byly do atelieru včleněny i krátké přednášky odborníků, ať již z výrobní či projekční praxe.

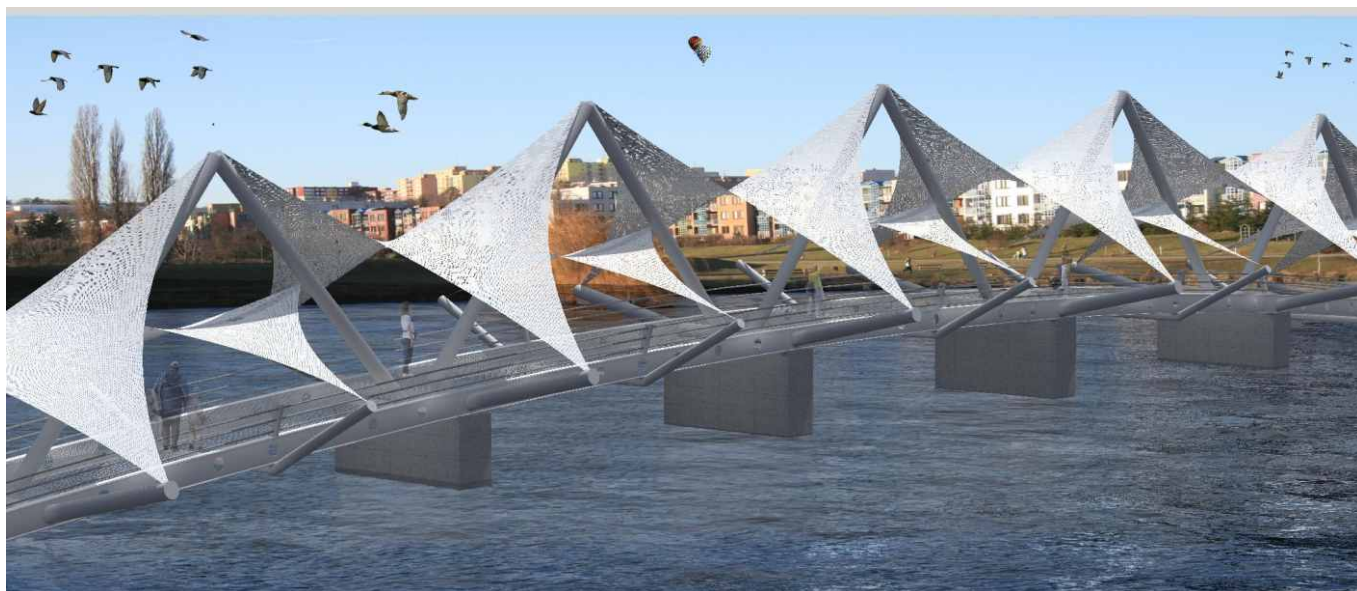
Samotný průběh atelieru umožnil studentům seznámit se s utvářením přirozených forem a tvarů membrán na bublinových modelech či modelech z tenkých tkanin, formovat prostor pomocí membrán a využívat jejich osobitých možností v architektonickém konceptu. Kromě reálných modelů se naučili simulovat membrány i pomocí specializovaného softwaru Formfinder a převádět tyto modely do běžných programů konstrukčních či vizualizačních.

Naprostá většina studentů se s konstrukcemi z membrán setkala takto detailně úplně poprvé. Pro řadu z nich byl nový ale i přístup k tvorbě konceptu, při kterém se materiál stává plnohodnotným inspiračním zdrojem, ale především nositelem kvality výsledného účinku. Poprvé řešili projekt až do designu takových detailů, jako je ukotvení plachty, vyústění odvodňivé plochy, pata sloupu, uchycení a tvar osvětlení... Možná i z důvodu „novosti pohledu“ byla v atelieru velmi tvůrčí atmosféra – všichni potřebovali rychle nasát nové poznatky a zjistit nové skutečnosti a proto velmi intenzivně spolupracovali a aktivně zasahovali do všech prezentací a dílčích konzultací.

Je samozřejmé, že v atelieru měli studenti možnost konzultovat své návrhy nejen s architekty, ale i se statiky či specialisty na tento typ konstrukcí, měli přístup ke speciálnímu softwaru a sami připravili i řešerše příkladů realizovaných staveb.

Výsledné návrhy ze všech dosud uskutečněných běhů jsou nejen zajímavé, ale i poměrně do detailu propracované. Dokladem úspěšnosti celého membránového programu je i skutečnost, že několik projektů tohoto atelieru bylo oceněno tzv. „Žlutou kartou“, která se uděluje vydařeným studentským projektům.

Budoucnost této výuky má jednoznačný potenciál velkého přínosu k pochopení vlivu kvality konstrukce na výslednou podobu díla a souznění konstrukce (či obecně technického řešení) s architektonickým konceptem. Proto celý atelier membránových konstrukcí pod vedením doc.Kopřivy uspořádal i tuto konferenci a proto připravuje i další kroky, které tento přínos potvrdí. Především užší zapojení dalších kateder do membránového programu i zapojení studentů do výzkumu na úrovni doktorského studia.



Obr. 1 | Studentský projekt ateliéru membránových konstrukcí



Obr. 2 | Studentský projekt ateliéru membránových konstrukcí



Obr. 2 | Studování přirozených tvarů membrán



Obr. 3 | Práce s fyzickým modelem

ABSTRAKT

V poslednej dobe nachádzame v Čechách stále častejšie pekné príklady ľahkých membránových konštrukcií. Prírodné svetlo difunduje cez povrch technických textílií, ktoré umožňujú veľké rozpony stavieb, unikátne tvary a kombináciu s ostatnými typmi materiálov ako sú kovy, drevo, betón a železo. Technické textílie sú v porovnaní s ostatnými stavebnými materiálmi veľmi ľahké, napriek tomu sú vďaka svojej štruktúre schopné prenášať veľké sily a dajú sa využívať na zaujímavé aplikácie.

KOMPOZITNÉ MATERIÁLY A ICH VLASTNOSTI

Technické textílie sú kompozitné materiály, ktoré využívajú prednosti rôznych druhov polymérov. Jedným typom technických textílií sú materiály na báze polyesteru (PES) a polyvinylchloridu (PVC). Základným polymérom, ktorý rozhodujúcou mierou ovplyvňuje vlastnosti výsledných produktov je polyester, z ktorého sa zvlákňovaním a spriadaním vyrába vysokopevnostné polyesterové vlákno. Veľkou prednosťou firmy Serge Ferrari je, že polyesterové vlákna vyrába vo vlastnom závode v Emmenbrücke (Švajčiarsko). Už tu, v prvej fáze výroby, sú formulované požiadavky na kvalitu vlákien a ich vlastnosti prispôbované vlastnostiam výsledného produktu. Z takto vyrobeného vlákna sa v kmeňovom závode firmy v La Tour du Pin (Francúzsko) tká plátno. Aj v tejto fáze výroby voľbou rôznych typov vlákien, ich hmotnosti a hustoty tkania sú ovplyvňované výsledné vlastnosti materiálov. Poslednou fázou komplexného spracovania polyesterovej tkaniny je nános PVC a ďalších zušľachťujúcich látok použitím patentovanej technológie Précontraint, taktiež v závode v La Tour du Pin. Zatiaľ čo polyester poskytuje výslednému produktu predovšetkým pevnosť, PVC ochraňuje technické textílie pred vplyvom UV žiarenia ako aj pred vplyvom ďalších atmosferických činiteľov.

SERGE FERRARI A PRÉCONTRAINT

Serge Ferrari je francúzska firma so sídlom v La Tour du Pin. Meno firmy dostala po svojom zakladateľovi, ktorý vyvinul a nechal patentovať technológiu predpínania polyesterovej tkaniny v oboch smeroch – v smere osnovy a útku alebo v pozdĺžnom a priečnom smere – počas všetkých technologických operácií povrchovej úpravy.

Technológia predpínania – po francúzsky Précontraint – predstavuje výnimočnú technológiu, vďaka ktorej získavajú materiály fy. Serge Ferrari významné výhody. Je to predovšetkým rozmerová stabilita, vďaka ktorej materiály Précontraint vykazujú najmenšiu deformáciu medzi výrobkami na báze polyesteru a PVC, ľahšie sa zvárajú vo všetkých smeroch a pri zváraní nevykazujú zvlnenie. Technológiou Précontraint dochádza k zmršteniu polyesterovej tkaniny takže nános PVC na povrchu materiálu je vyšší. Vyšší nános PVC má za následok lepšiu ochranu polyesteru a predĺženú životnosť finálneho výrobku.

PRÉCONTRAINT A SORTIMENT VÝROBKOV FIRMY SERGE FERRARI PRE ARCHITEKTÚRU

Pri tvorbe nových tvarov architekti hľadajú také povrchy, ktoré by udržali rovnomerné napätie v oboch smeroch. V prípade technických textílií membrána vyžaduje rovnomernú distribúciu síl v smere osnovy aj útku počas dlhej doby. Práve materiály vyrobené technológiou Précontraint predstavujú výrobky, kde sú tieto vlastnosti vhodne skĺbené a v prípade membránových štruktúr sa dosahuje vynikajúca rozmerová stabilita.

Projektovanie a stavba membránových štruktúr je v Českej republike veľmi dobre zvládnutá a predstavuje významný prínos k súčasnej architektúre.

Úžasné možnosti kreativity, tvorby nových tvarov a využitia rozmerovej stability materiálov Précontraint dokumentuje projekt amfiteátru Tubaloon v Kongsbergu, Nórsko.

V závislosti od rozmerov membrány je možné voľiť z palety výrobkov Serge Ferrari od hmotností 490 g/m² až po 1500 g/m², pričom pevnosť v ťahu sa mení od 250/250 daN/5 cm až po 1000/800 daN/5 cm. Voľba materiálu je determinovaná nielen veľkosťou membrány, ale aj pevnosťou nosnej konštrukcie, prídavných materiálov a následnej optimalizácie nákladov za všetky časti projektu a taktiež v závislosti od očakávanej či požadovanej životnosti objektu. V nasledujúcej tabuľke sú ako príklad reprodukované technické parametre materiálov s najvyššími pevnosťami:

Na dosiahnutie vysokých kvalitatívnych parametrov, výrobky Serge Ferrari obsahujú rôzne prídavné látky. K týmto látkam patria aditíva proti horeniu, takže z hľadiska požiarnej ochrany všetky výrobky vyvinuté pre použitie v oblasti architektúry vyhovujú požiadavkám pre použitie na ľahkých stavbách. Ako je z tabuľky zrejmé pre potreby investorov sú k dispozícii certifikáty podľa rôznych národných noriem alebo podľa požiadaviek EN.

Pre povrchovú úpravu technických textílií boli vyvinuté laky na báze polyvinylidénfluoridu (PVDF) s vysokou odolnosťou proti znečisteniu. S množstvom PVDF v povrchovej vrstve výrazne vzrastá nielen odolnosť proti znečisteniu, ale aj životnosť. Okrem vynikajúcej rozmerovej stability, materiály Précontraint sa vyznačujú ďalšími výhodami, z ktorých je potrebné vyzdvihnúť odolnosť voči extrémnym klimatickým podmienkam. Bežne sa dajú použiť pri teplotách do – 30 oC, krátkodobo aj pri nižších. Nasledovné obrázky dokumentujú aplikáciu PES/PVC membrán zo sortimentu Serge Ferrari v arktických a antarktických podmienkach.

Obdobne materiály na báze PES a PVC znášajú aj vysoké teploty bežne do +70°C, často v kombinácii s vysokou vlhkosťou alebo slanou atmosférou či ďalších negatívnych vplyvov. Za podmienok, keď iné stavebné materiály podliehajú degradácii, Précontraint materiály si udržujú svoje technické parametre na vysokej úrovni:

Ukážka je z projektu výstavnej haly postavenej v roku 1982 v oblasti rovníkovej Afriky, Saint Louis v Gabune a dokumentuje, že vysokokvalitná oceľ podľahla korózii tropického podnebia. Odberom referenčných vzoriek a meraním sa zistilo, že membrána za rovnakých podmienok vykázala dobrú odolnosť a udržala si pevnosť v ťahu v smere osnovy na úrovni 86 % a v smere útku na úrovni 76 % pôvodného materiálu.

ĎALŠIE APLIKÁCIE MATERIÁLOV SERGE FERRARI

Súčasný sortiment výrobkov firmy Serge Ferrari je veľmi široký a siaha od priemyselných aplikácií ako sú materiály pre prikrývanie v automobilovom priemysle, v poľnohospodárstve, stavebníctve, či materiály pre aplikáciu v reklame, životnom prostredí alebo pre použitie vo vojenskom priemysle. Druhou veľkou skupinou sú materiály používané v rôznych oblastiach architektúry. Výrobky Précontraint je možné použiť okrem už spomenutej oblasti membránových štruktúr aj v oblasti slnečného tienenia alebo architektúre interiérov. Ďalšími materiálmi sú Stamisol pre textilné fasády, Soltis pre slnečnú ochranu a Batyline pre architektúru interiérov predovšetkým pre podhľady. Na všetky tieto typy materiálov vlastní firma Serge Ferrari ochranné známky.

SOLTIS – MATERIÁLY PRE SLNEČNÚ OCHRANU

Na rozdiel od materiálov Précontraint, ktoré majú celistvý povrch, materiály Soltis sú perforované. Používajú sa k ochrane pred svetelnou a tepelnou zložkou slnečného žiarenia, ktoré predovšetkým v letných mesiacoch predstavuje veľkú záťaž budov a ich užívateľov. Perforovaný materiál Soltis predstavuje systém mikroventilácie, ktorým v závislosti od hustoty a veľkosti otvorov je možné dosiahnuť výrazné odblokovanie účinku tepla. Súčasne sa významne znižuje intenzita svetla v interiéri, tým aj účinok oslepuvania a odrazu slnečných lúčov. Všetky materiály Soltis sa vyrábajú technológiou Précontraint, vďaka ktorej sa dosahuje ich vynikajúca rozmerová stabilita, plochosť a pri minimálnej hrúbke aj mimoriadna pevnosť. Medzi materiály, ktoré najlepšie regulujú tepelný a svetelný tok patrí Soltis 92 predovšetkým pri použití v exteriéri - na vonkajšie rolety. Vďaka perforácii materiály Soltis umožňujú výhľad z interiéru do okolia. Široká paleta farieb zase predstavuje bohatú inšpiráciu pre architektonickú tvorbu.

STAMISOL FT – MATERIÁLY PRE VENTILOVANÉ FASÁDY

Stamisol FT je relatívne nový typ materiálu na báze PES/PVC s perforovanou štruktúrou. Jeho flexibilita, technické parametre a vlastnosti materiálov pre membrány vytvárajú podmienky pre nové, jedinečné riešenia. Poskytujú veľkú slobodu vytvárania nových tvarov fasád, 3D efektu, vďaka možnosti potlače prispôsobenie a integrovanie fasády do prostredia a v neposlednom rade rýchlu inštaláciu alebo pridávanie či výmenu panelov v prípade, že budova je renovovaná alebo rozširovaná. Pre rôzne požiadavky boli vyvinuté špeciálne podkonštrukcie umožňujúce pohodlnú a rýchlu inštaláciu Stamisolu FT. Pri použití na celom povrchu fasády a pri prekrytí okien Stamisolom FT poskytuje tento materiál súčasne efekt slnečného tienenia. Investor má tak prospech zo zníženia energetickej náročnosti budov. Vývoj Stamisolu FT bol možný vďaka viac ako 30 – ročnej skúsenosti pri realizácii ambiciózných projektov v oblasti textilnej architektúry, slnečného tienenia, ale predovšetkým vďaka patentovanej technológii Précontraint.

BATYLINE – MATERIÁL PRE ARCHITEKTÚRU INTERIÉROV

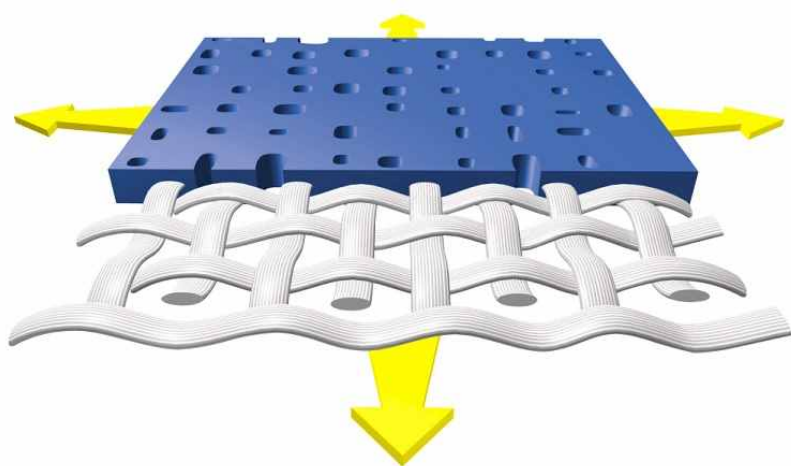
Svoje výhodné postavenie ako materiál pre podhľady, deliace steny a podobné prvky má Batyline vďaka ľahkosti a flexibilitě. K ďalším výhodným vlastnostiam patria veľmi dobré akustické vlastnosti, pevnosť a odolnosť voči vlhkému prostrediu. Aplikáciou rozmanitého príslušenstva je možné používať Batyline napínaný v paneloch rôznej veľkosti alebo zváraný do veľkých celkov je schopný prekryvať monolitné plochy až do 200 m². Batyline je možné tvarovať, takže pomocou tohoto materiálu sa dajú prekryvať oválne tvary, nepravidelné povrchy a vytvárať 3D efekty. Paleta farebných odtieňov poskytuje ďalšie široké možnosti stvárňovania interiéru pričom výber farieb je možné koordinovať s ďalšími paletami materiálov Soltis pre slnečné tienenie a Stamskin pre nábytok.

SERGE FERRARI A ŽIVOTNÉ PROSTREDIE

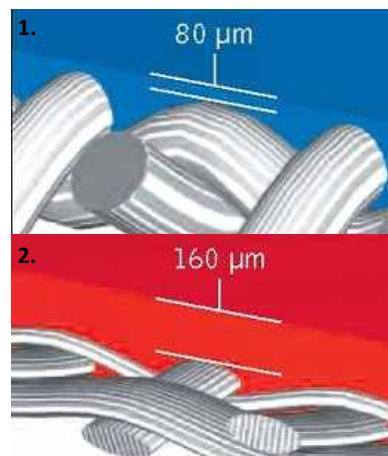
Firma Serge Ferrari vyvinula a patentovala ako prvá na svete technológiu recyklovania materiálov na báze PES a PVC. Technologický postup recyklovania spočíva v rozrezaní materiálu na malé kusy a následnom rozpúšťaní v zmesi organických rozpúšťadiel. Po rozpustení dochádza k separovaniu PES a PVC a opakovanému použitiu oboch substrátov. PVC sa vracia späť do výroby technických textílií, z polyesteru sa vyrábajú technické filtre a podobné výrobky. Proces recyklovania pod názvom Texyloop je v prevádzke od roku 2006 v závode firmy Serge Ferrari vo Ferrare (Taliansko).

ZÁVER

Francúzska firma Serge Ferrari je popredným výrobcom technických textílií na báze polyesteru a PVC. Využíva unikátnu technológiu predpínania Précontraint, vďaka ktorej materiály získavajú vynikajúcu rozmerovú stabilitu. V sortimente firmy sa nachádzajú 4 typy materiálov využívané v architektúre. Materiály Précontraint sú určené pre ľahké membránové konštrukcie s veľkou pevnosťou a vysokou odolnosťou voči atmosferickým vplyvom. Materiály Soltis boli vyvinuté pre použitie na slnečné tienenie a poskytujú vynikajúci tepelný a svetelný komfort. K najnovším materiálom patrí Stamisol FT, ktorý je určený pre použitie na ventilovaných fasádach. Pre použitie v interiéroch sú v sortimente materiály Batyline. Všetky materiály po skončení svojej funkcie sa recyklujú technológiou Texyloop vyvinutou firmou Serge Ferrari, ktorou sa dosahuje 100 %-né využitie získaných substrátov.



Obr. 1 | Schéma technológie Précontraint



Obr. 2 | 1. Nános PVC pri tradičnom postupe
2. Nános PVC postup Précontraint



Obr. 3 | Výstavisko České Budějovice



Obr. 4 | Autobusová stanica, České Budějovice



Obr. 5 | Tubaloon, Kongsberg, Norsko



Obr. 6 | Tubaloon, Kongsberg, Norsko



Obr. 7 | Nafukovacia športová hala 100 x 60 x 18 m, Kuopio, Fínsko



Obr. 8 | Vedecká základňa Antarktída



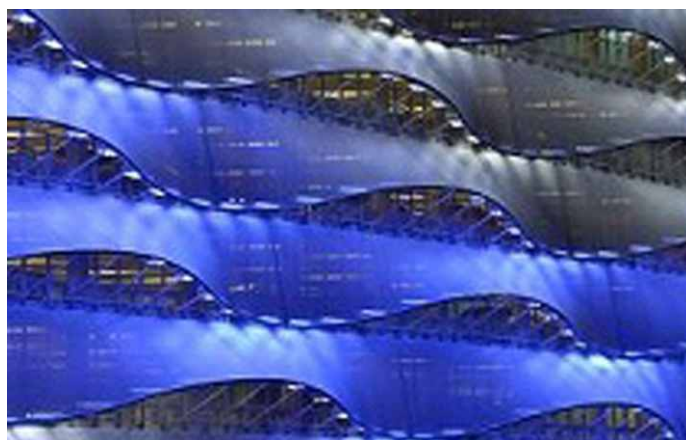
Obr. 9 | Vysokokvalitná oceľ podľahla korózii tropického podnebia haly postavenej v roku 1982 v oblasti rovníkovej Afriky



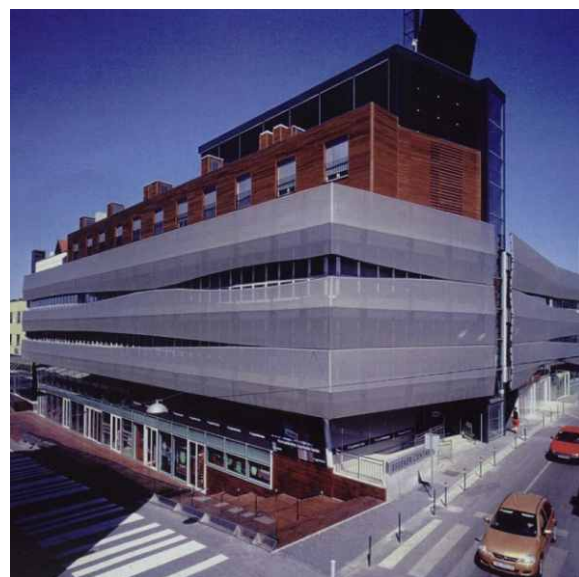
Obr. 10 | Kreishaus, Hameln (Nemecko)



Obr. 12 | Súkromný dom (Belgicko)



Obr. 13 | Parkovací dom, Cardiff Bay, Veľká Británia



Obr. 13 | Esseker Center, Osijek, Chorvátsko



Obr. 14 | Plaváreň hotela Vitality, Vendryně



Obr. 14 | Francúzska národná knižnica, Paríž

Princip a vlastnosti fóliových střešních a fasádních systémů.

Před více než 30-ti lety vznikla myšlenka využít tehdy nový materiál – fólii z ETFE (ethylen tetrafluorethylen) - pro zastřešení velkých atrií. Byl vyvinut princip transparentních střešních a fasád s využitím průhledných fólií z materiálu ETFE. Princip těchto systémů, nahrazujících skleněné střechy a fasády, spočívá ve vytvoření polštářů z několika vrstev fólie (obvykle tří) o velmi malých tloušťkách. Tyto polštáře jsou nafouknuty stlačeným vzduchem o tlaku ca 220 Pa a trvale napojeny na rozvod stlačeného vzduchu. Toto trvalé napojení zajistí v případě snížení tlaku vzduchu v polštářích, jejich dofouknutí. Nafouknutím polštáře dojde jednak k vypnutí fólií, jednak ke stabilizaci nosné konstrukce a vzniklé vzduchové vrstvy plní izolační funkci. Střešní systém má následující komponenty:

- svažené polštáře z ETFE fólie
- upínací profily, suplující rámy oken u skleněných zastřešení
- systém rozvodu a zajištění stlačeného vzduchu
- nosnou konstrukci, na níž jsou upevněny upínací profily

ETFE fólie je transparentní, barevná nebo potištěná fólie o tloušťkách obvykle 100 – 250 mikronů, která je absolutně resistantní vůči UV záření. Pevnost fólie dovoluje navrhovat střešní systémy s nosností až 250 kg/m², vyznačuje se velkou deformovatelností, neboť při přetržení bylo naměřeno prodloužení až 400 %.

Upínací hliníkové protlačované profily jsou navrženy tak, aby do nich bylo možno fóliové polštáře upnout, přerušit tepelné mosty, odvodnit vně i uvnitř profilů a zajistit těsnění celé střechy. Upevnění fólie je provedeno tak, že do obvodu svaženého polštáře z ETFE fólie je zavařeno lanko o průměru 6 – 10 mm, toto lanko je při upínání zasunuto do speciálního profilu, který se vloží do vlastního profilu. Fólie je tak spolehlivě upnuta po celém obvodu a utěsnění napomáhá i nafouknutí vlastního polštáře. Tepelné mosty jsou přerušeny úplným oddělením vnějších a vnitřních profilů těsněním z EPDM. Styk mezi vrchními a spodními profily jsou provedeny pouze šrouby po cca 250 mm.

Důležitou součástí celého střešního systému s ETFE fólií je zabezpečení stlačeného vzduchu a jeho distribuce k jednotlivým polštářům. Jako zdroj stlačeného vzduchu slouží kompresorová stanice ve venkovním provedení, umístitelná v sousedství vlastní střechy. Tato stanice má hlavní a záložní kompresor, které jsou ovládány výsledky měření tlaku tlakovým čidlem obvykle z nejvzdálenějšího polštáře. Standardní tlak 220 Pa je tak v polštářích udržován v povoleném rozmezí. Kompresorová stanice pracuje automaticky. V případě potřeby je stanice vybavena sušičkou vzduchu.

Vlastnosti střešního systému s ETFE

Nízká váha – měrná hmotnost vlastní fólie ve třech vrstvách ca 0,5 kg/m² a je tak mnohonásobně lehčí než sklo (ca 50 kg/m²) nebo makrolon (ca 12 kg/m²). Měrná hmotnost kompletního střešního systému činí 2,5 – 4 kg/m² a je tak několikanásobně lehčí než zasklení srovnatelných vlastností. Důsledkem této nízké váhy je subtilnější nosná konstrukce, na níž se střešní systém upevňuje. Tato vlastnost dovoluje navrhovat větší rozpětí a je s výhodou využita při rekonstrukci stávajících objektů, u nichž je třeba zajistit co nejmenší přetížení.

Nosnost – při tlaku 200 Pa je nosnost fóliového střešního systému až 250 kg/m² a střecha je tak pochozí. Při navrhování fóliové střechy je nutno zohlednit stav, při němž není v polštářích vzduch. Střecha je i za tohoto stavu plně funkční, při dešti a sněhu může dojít k vytvoření „vodního pytle“ a tím nerovnoměrného zatížení. Z těchto důvodů se doporučuje navrhovat tvar střechy tak, aby bylo toto nebezpečí minimalizováno (zaoblení, sklon střechy apod.). V místech, kde se takováto situace může vyskytnout, je vhodné umístit pod spodní fólii nerezová lanka s roztečí 250 – 300 mm, která v této situaci fólii podeprou a zvýší tak nosnost střešního systému.

Deformovatelnost – subtilnost nosné konstrukce nesouvisí jen s nízkou váhou systému, ale i s možností deformace nosné konstrukce (nižší tuhosti než pro sklo), neboť fólie se této deformaci (na rozdíl od skla) přizpůsobí.

Velikost oken – standardní šířka fóliového elementu je 3,5 m, délka elementu je takřka neomezená, byly realizovány elementy o délce až 50 m.. Velikost plochy realizovaných oken i nepravidelných tvarů je až 100 m². Převýšení polštáře závisí na jeho šířce (vzdálenosti podélných hran) a činí uprostřed šířky cca 10 % na každou stranu od středu.

Tvarovatelnost – fólie umožňuje vyplnit rámy, svažené do prostorových tvarů, protože se dokáže jakýmkoliv tvarům

přízpůsobit. Tento střešní systém tak nabízí architektům takřka neomezené možnosti.

Průchod světla – ETFE fólie je velmi transparentní pro viditelné světlo (380 - 780 nm) v rozmezí 94 – 97 %. Průchod UV záření (320 – 380 nm) je také velmi dobrý a činí 83 – 88 %. Průchodu UV záření se využívá při použití tohoto střešního systému u botanických a zoologických zahrad a u sportovních staveb (aquaparků, bazénů apod.). Procházející světlo má přirozené barevné podání, fotosyntéza u rostlin probíhá takřka jako ve venkovním prostředí a u aquaparků je možno se opalovat.

Ekologičnost střešního systému - fólie ETFE je povolena Montrealským protokolem. Základní materiál je klasifikován jako třída II dle Montrealského protokolu, fólie je vyráběna technologickým postupem na vodní bázi bez rozpouštědel a je plně recyklovatelná. Energetická náročnost po dobu celé životnosti ve srovnání s ostatními transparentními systémy je několikanásobně nižší.

Požární vlastnosti – Z hlediska reakce na oheň podle EN 13 501-1 je tento materiál těžce zapálitelný, bez vývinu kouře a neodkapávající při hoření (klasifikace B-s1-d0). Ve fólii ETFE se při požáru, při dosažení teploty více než 250 °C, vytvoří otvor, který se již dále nerozšiřuje a odvětrá prostor átria. Z hlediska hašení je významná ta vlastnost TEXLON střešního systému, že na rozdíl od transparentních prosklených střeš (střepey), v případě požáru na zakročující požárníky nic nepadá.

Samočistící schopnost – fólie ETFE má obdobné vlastnosti jako teflon. Povrch fólie je extrémně hladký a každý déšť smyje každé znečištění, včetně ptačího trusu. Samočistící schopnost šetří náklady na čištění a příp. i investiční náklady na zajištění přístupu z důvodu čištění.

Snadná opravitelnost – poškození ETFE fólie je možno snadno opravit přelepením samolepící ETFE páskou.

Akustika – nízká hmotnost fóliového systému má za následek nízký útlum hluku (9-12 dB), což je vhodné pro snižování hluku uvnitř budovy, nebo propouští uvnitř vznikající hluk ven. Obdobně ovšem prochází snando hluk zvenčí. Při dešti nafouknuté polštáře fungují jako ozvučnice a hluk při intenzivním dešti je větší, než pod prosklenou střechou. Snížení hluku od deště na úroveň zasklené střechy je možno dosáhnout umístěním mřížky nad fólii. Tato mřížka zpomaluje odtok vody z fólie, vytváří na fólii vrstvu vody a kapky dopadají na hladinu vody a nikoliv na fólii. Tím dojde ke snížení hluku.

Odolnost proti kroupám – fóliové polštáře jsou proti kroupám odolnější než sklo, neboť fungují jako trampolína. Dojde-li k porušení ETFE zastřešení, jsou skleněné střechy již dávno zničené.

Tepelná izolace – koeficient prostupu tepla závisí na počtu vrstev fólie:

2 vrstvy	2,94 W/m ² K
3 vrstvy	1,96 W/m ² K
4 vrstvy	1,47 W/m ² K
5 vrstev	1,18 W/m ² K

Zastínění – potisk fólie stříbrnou barvou dovoluje zvolit vzor podle požadovaného stupně zastínění. Pro změnu stupně zastínění byl vyvinut systém pneumaticky řízeného zastínění. Princip tohoto systému spočívá v potisku horní a střední fólie orientovaným vzorem. Přepouštěním vzduchu v polštářích se dosahuje pohybu střední fólie k nebo od horní fólie a tím ke změně stupně zastínění v rozmezí 15 – 25 %.

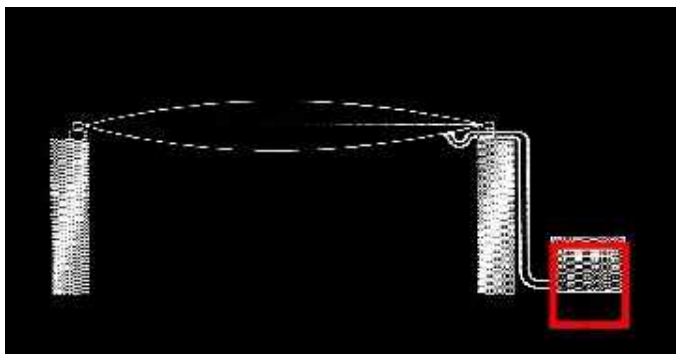
Životnost - Na základě zkušeností za více než 25 let realizovaných projektů, u nichž za tu dobu nedošlo ke změně vzhledových ani mechanických vlastností, je možno předpokládat životnost ca 50 - 100 let

Do dnešní doby bylo realizováno více než 1.000 projektů se zastřešením a fasádou z ETFE fólie. Následuje několik příkladů realizovaných projektů.

Dvouvrstvá fasáda – EDEN Stadion – Nový Zéland

Třívrtvá střecha – Elements, Livingston, Anglie

Třívrtvá střecha a fasáda – Mediacité, LIEGE, Belgie



Obr. 1 | Systém rozvodu stlačeného vzduchu



Obr. 2 | Automatická kompresorová stanice



Obr. 3 | Standardní šířka elementu 3,5m, délka až 50m



Obr. 4 | Adelaide Entertainment Centre, Austrálie



Obr. 3 | 2 - vrstvá fasáda – EDEN Stadion, Nový Zéland



Obr. 4 | 3 - vrstvá střecha – Elements, Livingston, Anglie



Obr. 4 | 3 - vrstvá střecha a fasáda - Médiacité, Liege, Belgie (2007)

Retractable roofs (Jörg Tritthardt, büro für leichtbau, Tritthardt+Richter)

In principal there are different kinds of moving for membrane roofs.
An Overview can you find in the Book IL5 from 1972.

The most popular systems are:

Linear moving roofs and central moving roofs

In membrane structures you pick the membrane in lines or on points.

The moving distance it is interesting for the linear moving. If all points/lines move the same distance the driving system and their control system can be simplified.

So you can get different combinations:

Linear moving – membrane lines – over rectangular plan

examples: simple awnings from hand made to professional design study Ettlingen, Quba Mosque 1986, Villa d'Este Hohenems 1977

(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig 5, Fig 6)

Linear moving – membrane lines – over rhombus plan

examples: see model pictures (Fotos bfl)

(Fig. 7)

Linear moving – membrane points each point is moving a different distance

examples: Teatro Romano

(Fig. 8)

Nearly Linear moving system--- membrane points each point is moving nearly the same distance

examples: Athens

(Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11)

central moving – membrane points each point is moving the same distance (moving to a circular line)

examples: Kolosseum Rome, polygonal-circular umbrella

(Fig. 12)

central moving – membrane points each point is moving a different distance (moving to a not regular line

examples: Stadium Frankfurt, Stadium Bucarest, asymmetrical- rectangular umbrella

(Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16)



Fig. 1 | Toldo



Fig. 2 | Sevilla



Fig. 3 | Ettlingen design study



Fig. 4 | Retractable structure - Quba Mosque



Fig. 5 | Roof terrace



Fig. 6 | Hohenems (1977)

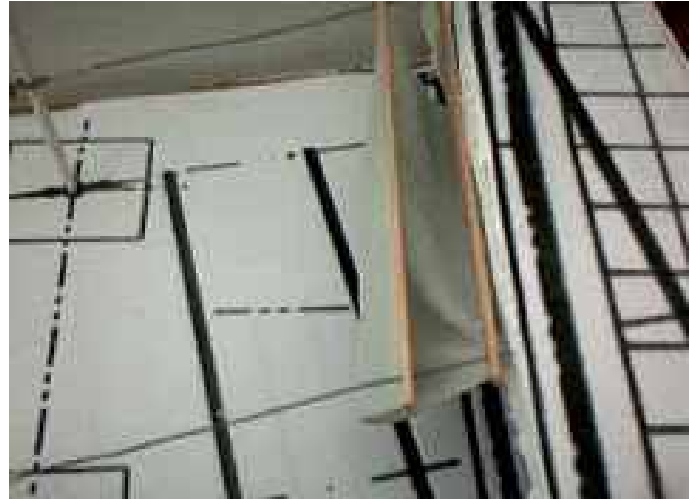
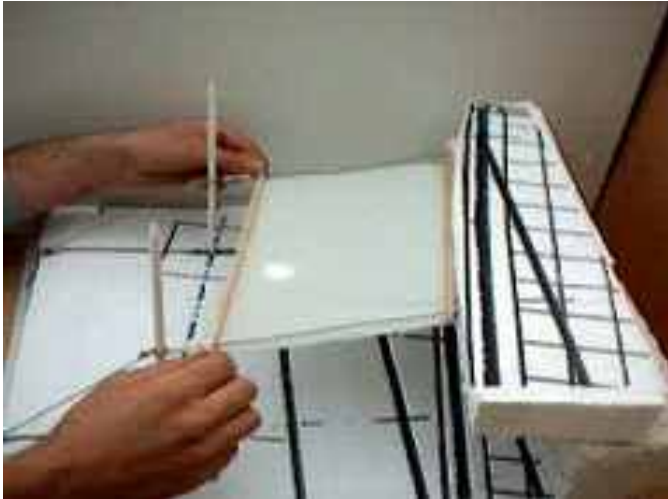


Fig. 7 | Model picture

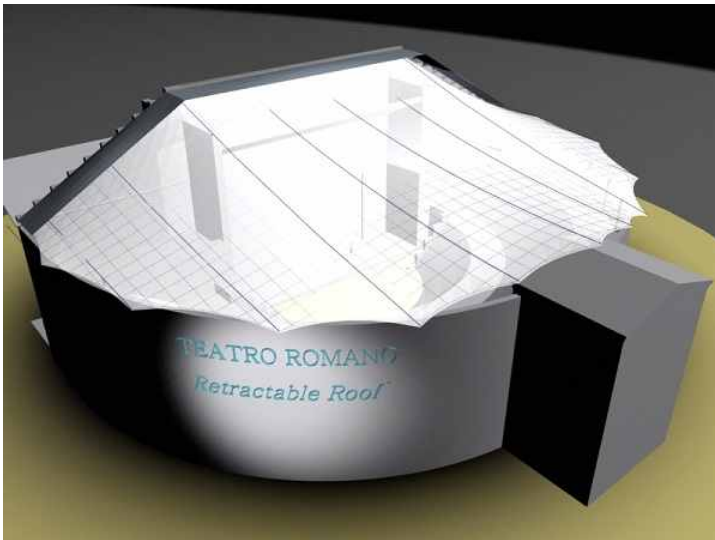


Fig. 8 | Design study - Teatro Romano retractable roof

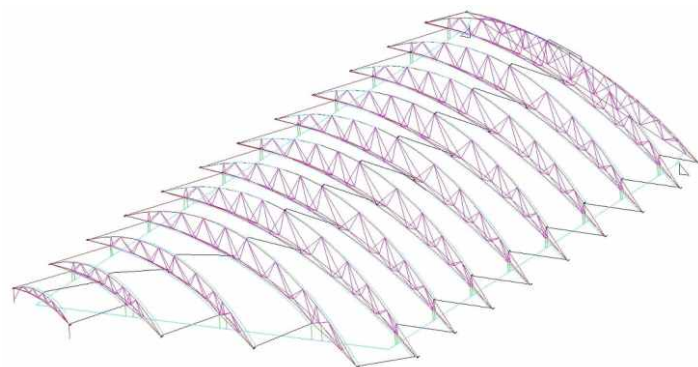


Fig. 9 | Athens



Fig. 10 | Athens



Fig. 11 | Athens mock up

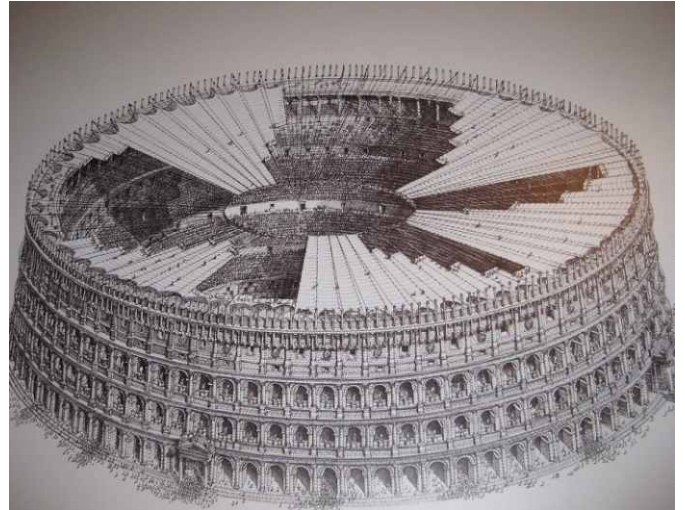


Fig. 12 | Kolosseum Rome, polygonal-circular umbrella



Fig. 13 | Frankfurt

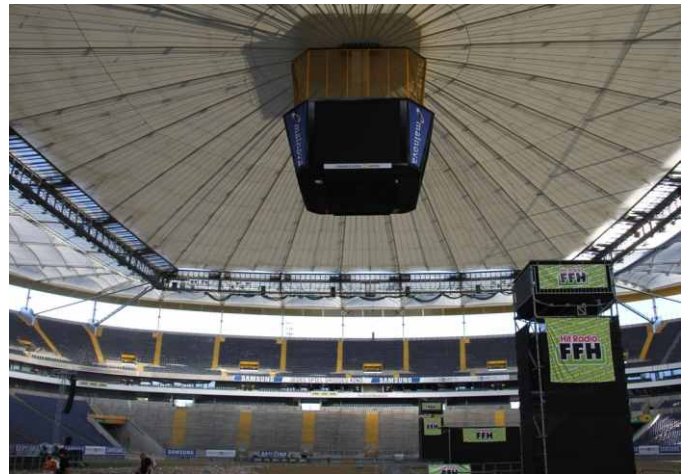
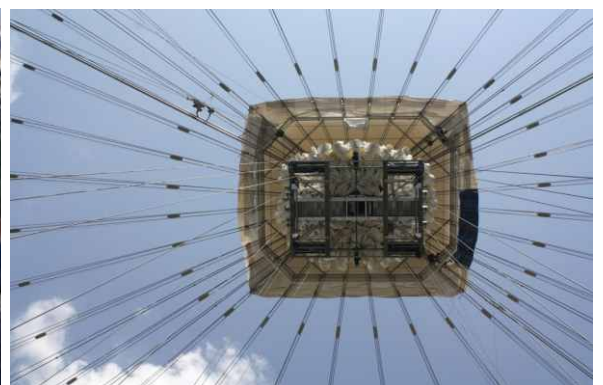


Fig. 14 | Bucarest



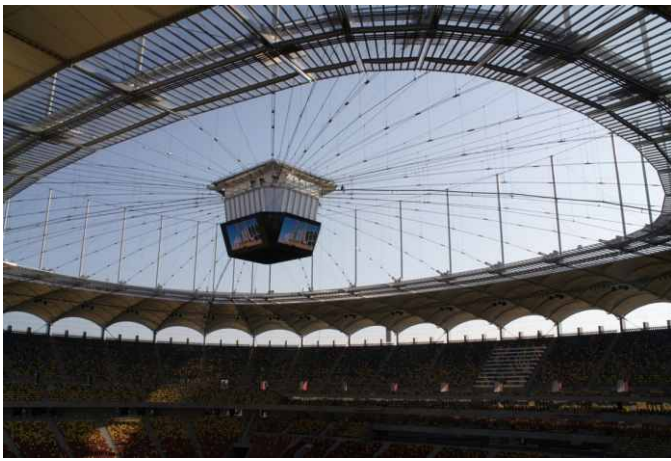


Fig. 15 | Bucarest



Fig. 16 | Dublin

Vysoká pec č. 1

Ostrava se může pochlubit zcela unikátním skvostem průmyslového dědictví – vysokou pecí č. 1, který nedávno zpřístupnila široké veřejnosti. Nachází se v areálu národní kulturní památky Vítkovických železáren a spolu s plynojemem, o němž jsme psali v čísle 3, a energetickou ústřednou č. VI tvoří klíčové objekty komplexu.

Železářský podnik ve vesnici Vítkovice založil v roce 1828 na návrh profesora vídeňské polytechniky F. X. Riepla olomoucký arcibiskup Rudolf, jehož jméno původně huť nesla. Prvenství v technické historii českých zemí získal podnik v roce 1836 výstavbou novinky – vysoké koksové pece, která byla zároveň první v celé rakouské monarchii. Druhá následovala v roce 1838. Po smrti svého zakladatele se železářny dostaly do vlivu bankovního domu Salomona Rothschilda, který v jejich blízkosti založil v roce 1852 jámu Hlubina. Bezprostředně tak na sebe navazoval technologický tok těžby uhlí, výroby koksu a jeho využití při výrobě železa. V roce 1872 byla zafoukána pec nové konstrukce, tzv. skotského typu. Tato pec byla postavena v místě dnešní vysoké pece č. 1. Od této doby také zůstalo zachováno číslování vysokých pecí, které je odvozeno od jejich původní lokace.

V současnosti se v areálu nachází ještě dvě nefunkční vysoké pece označené čísly 4 a 6. Závod se v průběhu let vyvíjel a rozšiřoval o další podniky, jako například mostárnu, rourovnu, ocelárnu, a také se modernizoval. Od 60. let 20. století prošly modernizací i vysoké pece. Poslední investiční akcí byla v roce 1988 modernizace vysoké pece č. 1, která produkovala ročně přibližně 300 tisíc tun speciálního a slévárenského železa. Stosetmdesátiletá historie výroby železa v areálu skončila v září 1998, kdy se uskutečnil historicky poslední odpich. Postupný vývoj a nepřetržitá kontinuita výroby zanechaly po zastavení provozu jedinečný stavební a technický fond z různých časových období, jemuž vévodí tři nefunkční vysoké pece.

Koncept obnovy AP ATELIEREM

Pro areál, který je od roku 2002 spolu s dolem Hlubina národní kulturní památkou, se hledalo poměrně dlouho nové využití. Konečné řešení se našlo v podobě oživení areálu novými aktivitami zaměřenými na celkovou proměnu tzv. Dolní oblasti Vítkovic v kulturně vzdělávací centrum, kde se bude propojovat historie s budoucností při zachování původního industriálního prostředí.

Pro přiblížení historie výroby železa bylo rozhodnuto, že vysoká pec č. 1, symbol Vítkovických železáren, bude zpřístupněna veřejnosti prostřednictvím naučné stezky demonstrující komplexním způsobem technologii výroby železa. Nejprve byl AP ATELIEREM architekt Josefa Pleskota vypracován koncept obnovy, provedeno statické posouzení konstrukcí, došlo k odstranění nepůvodních přístavků a dochované konstrukce byly zakonzervovány. Velký důraz AP ATELIER kladl na budoucí bezpečný pohyb návštěvníků, v kolizních místech proto byly jednotlivé prvky zpevněny, případně vyměněny. Ve stopě původního skipového výtahu, kterým putovala zavážka do vysoké pece, dalo architektonické studio vybudovat nový skleněný výtah, který vyveze návštěvníky do místa vsázky de facto cestou technologického toku materiálu. Zhruba v polovině výšky tělesa vysoké pece byl proříznut otvor a do něj umístěna lávka. Návštěvníkům se díky tomu naskýtá unikátní pohled do nitra prostoru, kde se odehrával vlastní proces tavby. S nevšedním zážitkem, pohledem do nasvětlené šachty vysoké pece s částečně dochovanou vyzdívkou, se nikde jinde ve světě prozatím nemohou setkat. V tomto místě dosahovaly teploty přes 1000 °C. Druhý výtah, kterým mohou návštěvníci pokračovat do vyšší úrovně či sestoupit, je umístěn v původním tubusu výtahu obsluhy pece. Pro zvětšení kapacity byl původní plášť prolomen a zvětšen pomocí půlkruhové prosklené stěny.

Jednotlivé trasy, které seznámí zájemce o průmyslové dědictví s ohřívači větru či uzávěrem vysoké pece, začínají u výchozího místa – shromažďovacího místa, které je kryto membránovou střechou ve tvaru křídel, zavěšenou na tenkých ocelových lanech. (Jedním z požadavků na tento prostor bylo jeho mobilní zastřešení, které by využívalo stávajících konstrukcí a současně sem vneslo nový moderní a především funkční prvek).

Multifunkční prostor vznikl na odlévací plošině, která může sloužit jednak k poznání práce slévačů, jednak se zároveň může stát i místem divadelních představení. Pro komfort diváků bylo na původní konstrukci instalováno mobilní zastřešení v podobě plachty, která v případě nepříznivého počasí zakryje část prostoru před vysokou pecí.

Dnešní výšku nosných konstrukcí pece, která činí asi 60 metrů, by do budoucna měla doplnit ještě válcová skleněná nástavba – vyhlídková věž. Slovy autora návrhu architekta Josefa Pleskota: „Vysoká pec zaujímá při Místecké silnici a ve vztahu k celému městu mimořádně cenné urbanistické postavení. Jde o stavbu, která unese pozici městské dominanty, stále živého ducha místa, sebevědomí a hrdosti. Navíc se zdá, že s odstupem jednoho století lze bez ideologických emocí zahrát na struny odkazu ruského konstruktivismu a oživit myšlenku Tatinovy věže III. internacionály v jiné významové rovině, v jiných souvislostech, s jiným étosem doby...“ V každém případě by symbolická skloocelová

nástavba nad tělesem pece, upozorňující na nové společenské a kulturně vzdělávací centrum, umocnila význam celého železářského komplexu a stala se novým poutačem, který přiláká nejenom odbornou veřejnost a upozorní na lokalitu zaručující kulturní a vzdělávací potenciál.

Návrh technického řešení i jeho realizaci dostalo na starost Sdružení ARCHTEX / KONTIS Praha, které se zabývá textilní a membránovou architekturou již několik let.

Zadáním bylo zastřešit prostor o šířce 25 m a délce 33 m, což odpovídalo původní jeřábové dráze, která byla ještě prodloužena o jedno pole.

Původní dráha

Textilní zastřešení bylo navrženo jako lomenice o 9 polích s prostorovým zakřivením. Nosnou pohyblivou konstrukci vytváří trojboké ocelové vazníky, využívající původní jeřábovou dráhu, prodlouženou o jedno pole v podobě 11m konzoly. Přední a zadní vazník, které jsou poháněné elektromotory se synchronizací, umožňují roztáhnout střechu o ploše cca 800 m² během pár minut. Mezilehlé 3 příhradové vazníky zajišťují tuhost v příčném směru a slouží jako rozpěry původní jeřábové dráhy v jednotlivých polích hlavně při zatížení membrány větrem. Vzhledem k sezónnosti akcí se s účinky zatížení sněhem nepočítá. Přesto bylo nutné původní konstrukci doplnit a ztuzit, aby mohla sloužit novému účelu a přenést především vodorovné síly, které byly u původního mostního jeřábu minimální. Statické řešení vypracovali projektanti firmy EXCON.

Samotná membrána z kompozitní textilie Precontraint 702, francouzského výrobce Serge Ferrari je svařena z definovaných stříhů do jednoho celku.

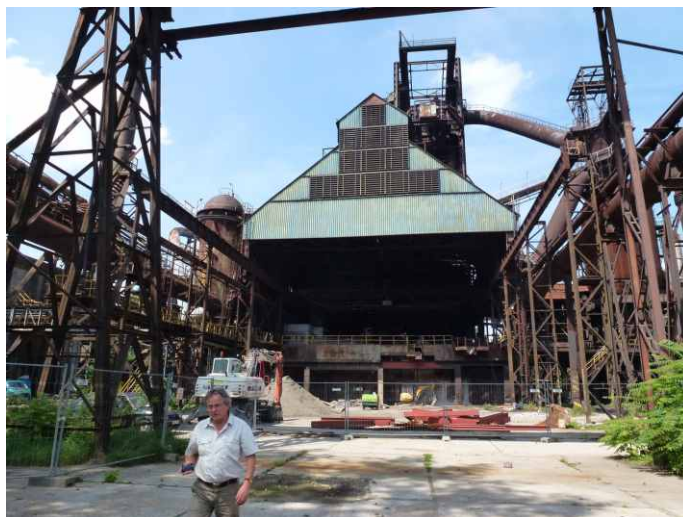
Jedná se o vysokopevnostní PES textílii s nánosem PVC a zalakováním, které zvyšuje odolnost proti UV záření a proti usazování špíny. Její pevnost i životnost daleko převyšuje vlastnosti autoplachet nebo stanových hal, kterým se vzhledem mírně podobá. Statické fungování textilního zastřešení umožňuje pevnost textilie 300/280dN/5cm (osnova / útek) při tloušťce pouhých 0,56 mm.

Důležitým faktorem pro volbu tohoto materiálu je také jeho požární zatřídění do kategorie B-s2-d0.

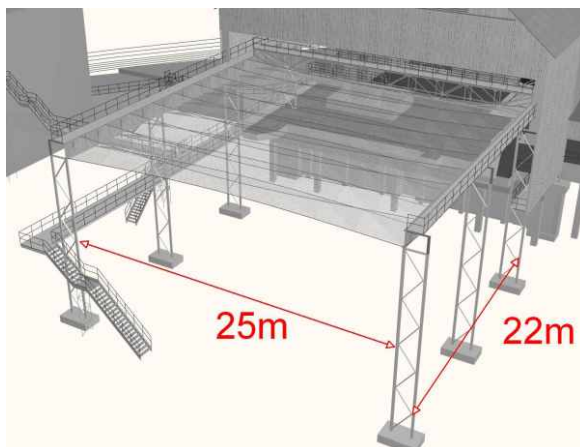
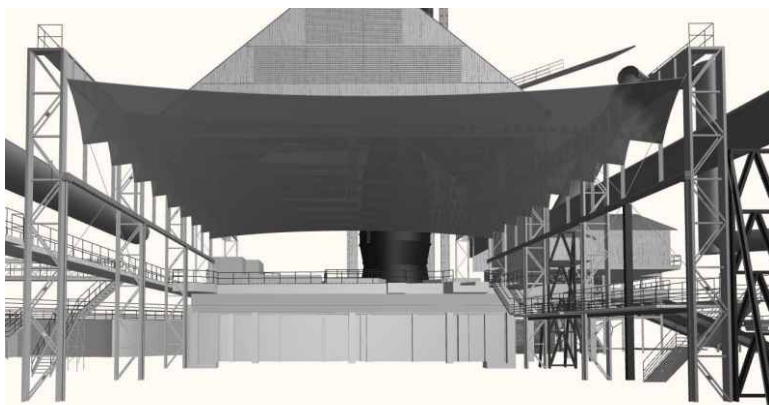
Horní hřebeny textilie jsou zavěšeny na nosných nerezových lanech, které jsou volně vlečené lanovými vozíky na jeřábové dráze. Ve spodních úžlabích je vložena oblouková trubka s kotevními pákovými mechanismy, které slouží pro manuální předeprnutí celé membrány. Předeprnutí je velmi důležitým faktorem, bez kterého by membrána nefungovala.

Dešťová voda je svedena v místech kotvení těchto napínacích mechanismů do žlabu a dále podél jednotlivých sloupů do kanalizace v areálu.

„Parkování“ složené střechy pod zastřešením původní odlévací plošiny chrání membránu před větrem a sněhem.



Obr. 1 | Vysoká pec č. 1



Obr. 2 | Vysoká pec č. 1 - 3D model



Obr. 3 | Vysoká pec č. 1 - průběh realizace



Obr. 4 | V zatažené poloze



Obr. 5 | V roztažené poloze



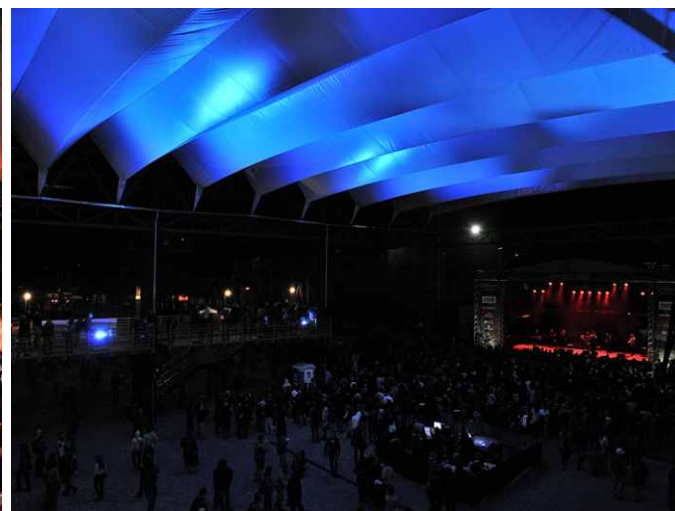
Obr. 6 | V roztažené poloze - pohled shora



Obr. 7 | Detail uchycení pohyblivého mechanismu



Obr. 8 | Hudební festival Colors of Ostrava



Dopravně obchodní centrum Mercury České Budějovice

Ojedinelé spojení komerčního provozu obchodního centra s funkcí autobusového nádraží. Autobusové nádraží jako městotvorný prvek, jako veřejný prostor. „Drak“ spojený ocasem pevně se zemí a s křídly mířícími k nebi. Gradace prostorů ve vertikálním směru, od podzemních parkovišť, přes nákupní galeOjedinelé spojení komerčního provozu obchodního centra s funkcí autobusového nádraží. Autobusové nádraží jako městotvorný prvek, jako veřejný prostor. „Drak“ spojený ocasem rii, k otevřené ploše autobusového nádraží na střeše. Autobus na střeše nad městem je schopen povýšit cestu na poetické dobrodružství.

Membránové konstrukce zastřešují nástupiště, jejich dynamika a lehkost korespondují s kinetikou dopravy, přesto pravidelný rytmus plachet dává celému prostoru řád a činí jej přehledným. Membrány dávají budějovickému autobusovému nádraží charakter, víte, které místo opouštíte, poznáte, že už jste doma.

Objekt vznikl na místě původního, již nevyhovujícího autobusového nádraží, tvořeného čtyřpodlažní budovou a nástupišti s přístřešky ze 70. let minulého století. Hlavní ideou bylo scelit porušenou urbanistickou strukturu místa. Spojení nádraží s obchodním centrem umožňuje dlouhodobě ponechat stanoviště autobusů v oblasti, kde by se bez dalšího komerčního využití podobná služba v tržním prostředí jen obtížně užívala. Jedinečností projektu je synergie pěšího provozu i provozu osobních automobilů, integrované autobusové dopravy, vlakového nádraží – rychlostního koridoru a potenciálního terminálu letecké dopravy kraje. V budoucnu lze kromě napojení na místní městský okruh očekávat napojení na hlavní českobudějovický dálniční obchvat.

Architektonicko-stavební řešení

Dopravně-obchodní centrum je navrženo jako objekt se dvěma podzemními a čtyřmi nadzemními podlažními o celkové ploše 60,5 tisíce metrů čtverečních. V suterénu může parkovat cca 700 osobních automobilů (z toho několik desítek míst je vyčleněno pro invalidy), což znatelně odlehčí městu a vyřeší problém nízkého počtu parkovacích míst v jeho centru. Suterén zároveň slouží technickému zázemí. Parter objektu je využit pro potřeby hypermarketu, občerstvení a obchodní galerie s prodejny. Druhé nadzemní podlaží nabízí prostor pro restaurace, kavárny a opět další prodejny a služby. Zároveň je zde umístěno i zázemí objektu. V nejvyšších dvou patrech se nachází zázemí provozovatele autobusového nádraží. Na střechu autobusy přijíždějí po zastřešené nájezdové rampě o podélném spádu 10%. Vzhledem ke klimatickým podmínkám v zimním období, kdy ani chemický posyp často neúčinkuje, je rampa pro zajištění bezpečnosti vytápěna.

Základovou konstrukci tvoří milánské stěny a železobetonová základová deska. Jako konstrukční systém byl navržen železobetonový skelet (osový systém 8 x 10m). Stropní konstrukce je tvořena železobetonovou deskou zesílenou v místech sloupů železobetonovými hlavicemi. Železobetonová konstrukce stavby zůstala v některých místech obnažená: kromě pohledových betonů hlavního kompozičního prvku nájezdové rampy pro autobusy je to ještě fasáda hlavního únikového schodiště a atikové panely v koruně objektu po celém jeho obvodu. Na tyto části stavby byly navrženy barevné nátěry (červená, modrá, žlutá a bílá). Prstenec ocelové únikové lávky po třech stranách objektu je využitý pro instalaci velkoplošných reklamních panelů hlavních nájemců.

Fasádní plášť hlavní hmoty budovy je hliníkový, provětrávaný, skládaný se skrytým fixačním rastrem kotveným k nosným obvodovým železobetonovým stěnám objektu, umožňující teplotní dilataci. Ve všech podlažích tvoří fasádu horizontální panely s hladkým povrchem bez krycích spárových lišt. Okna a dveře jsou pozičně mírně zapuštěny za líc pláště. Barevnost je zvolena ve škále tří šedých odstínů: tmavě šedá, střední šedá a světle šedá, a t směrem zdola nahoru, nejvyšší horizontální řada panelů je perforovaná. Některá místa fasádního pláště jsou prosklená. Vstupní nároží a ustupující část v přízemí, delší stěna terminálu autobusového nádraží ve třetím nadzemním podlaží – tudy proniká denní světlo do hlavní dvorany propojující prostor pasáží po celé výšce objektu.

Zastřešení

Nástupiště autobusů ve třetím nadzemním podlaží jsou zastřešena membránově. Zastřešení je zajímavým architektonickým prvkem, působí odlehčeně a vzdušně. V principu je řešeno dvěma způsoby: markýzy na severní a jižní straně odbavovací budovy nádraží a výstupní ostrůvky na jižní polovině střechy.

Markýzy tvoří ocelové konzoly z trubkových profilů, kotvených do železobetonových stěn budovy. Na tyto konzoly je upevněna membrána, která tvoří lomenici na přední hraně. Přední a zadní strana plachty je dopínána nerezovými lany s rektifikací. Zastřešení markýz má 38 polí na každé z podélných stran budovy, celková délka markýz je 107,5 m na každé straně budovy. Ostrůvky mají samonosnou ocelovou konstrukci. Na sloupy jsou upevněny dvojice ráhen ve střídavém sklonu, které tak tvoří dvě řady spojených lomenic. Jednotlivá pole membrán mají obdélníkový půdorys a tvar hyperbolického paraboloidu. Délka ostrůvků činí asi 62 m a šířka 18 m. Použitá membrána je zhotovena z materiálu PES se zátěrem PVC a akrylovým zalakováním (výrobce Ferrari, Francie). Rozsahem jde o největší realizaci tohoto druhu zastřešení v České republice.

Vybudovaný komplex výrazně přispěl ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu v daném místě novou úpravou tras a průchodů pro chodce. Realizace dopravně-obchodního centra si nevyžádala zástavbu „zelených“ ploch, naopak značně přispěla k urbanistickému zkvalitnění dané lokality, k řešení problematiky parkovacích kapacit a ke zvýšení bezpečnosti dopravy. Vytvořila předpoklady pro další koncepční úpravu a rozvoj širšího centra města.

(Obr. 1)

Fakta:

Objekt: Dopravně-obchodní centrum České Budějovice

Investor: CB – Mercury Center a.s.

Generální projektant: ATELIER 8000 spol. s r.o., České Budějovice

Dodavatel stavby: Skanska CZ, a.s., divize Pozemní stavitelství

Realizace: 9/2005 – 3/2007

Zastavěná plocha: 12 833 m²

Celková užitná plocha: 60 542 m²

Obestavěný prostor: 225 066 m²

Výstaviště České Budějovice – Pavilon T

Multifunkční pavilon sloužící zároveň jako monumentální vstupní brána do areálu. Základní hmota objektu je protnuta tubusem z membrán, který spojuje stavbu se sousedním pavilonem. Lehká plachtová konstrukce definuje specifickým způsobem trasu hlavního pohybu návštěvníků, slouží k identifikaci prostoru.

Východní fasáda ve tvaru evokujícím turbínu, respektive její výseč, je tvořena oblým přesahem střechy tvořícím lem fasády, skládaným kovovým pláštěm z profilovaných plechů, kruhových otvorů a předsazenými membránami. Ty jsou vypnuty na ocelových lanech v podobě lopatek turbíny a mají stínící funkci. Inspirací pro jižní fasádu pavilonu byla žena ležící na boku.

Membrány jsou použity rovněž jako stínící prvky dotvářející architektonický dojem stavby. Při stínění jižní prosklené stěny vzniká dialog mezi rastrem fasády a křivkami plachet. Na východní fasádě jsou membrány součástí evokované výseče „turbíny“.

Nový výstavní pavilon je umístěn v severní části areálu. Multifunkční pavilon slouží zároveň jako monumentální vstupní brána do areálu. Hmota pavilonu T je vstupním koridorem rozdělena na haly T1 a T2 (4 400 m² a 850 m²). Pavilon je navržen na ortogonálním půdorysu s rozměry cca 150 x 50 m, do něhož z jihu zasahuje kruhová výseč kopírující stávající komunikaci kruhového objezdu pavilonu Z. V příčném řezu má pavilon tvar půl-elipsy odsazené kolmo od terénu, jejíž výška roste směrem ke středu půdorysu. Podélný řez objektu tvoří od země odsazený oblouk. Světlá výška haly je v nejvyšších bodech krajních polí pavilonu 9 m, z těchto bodů pozvolna roste na maximální světlou výšku 11,4 m v půdorysném středu pavilonu.

Hlavní vstupy do obou hal jsou ze zastřešeného koridoru, kterým se od hlavní brány až ke stávajícímu pavilonu Z táhne pás membrán spojující oba pavilony opticky i funkčně. Nosná konstrukce pavilonu je tvořena systémem dřevěných lepených vazníků v osově vzdálenosti 4 m. Jednotlivé vazníky jsou posazeny na zvýšených betonových patkách a sloupech. Střešní plášť objektu plynule přecházející do fasády tvoří průmyslový hliníkový systém se stojatou drážkou a šířkou lamely cca 600 mm. Celá konstrukce je zateplená minerální izolací.

Severní fasádu tvoří celistvý fasádní plášť, který je přerušený jen pásem oken. Jižní fasáda je v místě vykrojení prosklená. Nad touto fasádou jsou zvenčí umístěny membrány pnuté na ocelové konstrukci v mírném odsazení od fasády, které slouží jako zastínění proti jižnímu slunci. Východní fasáda ve tvaru evokujícím turbínu, resp. její výseč, je

tvořena oblým přesahem střechy tvořícím lem fasády, skládaným kovovým pláštěm z profilovaných plechů, kruhových otvorů a předsazenými membránami. Ty jsou vypnuty na ocelových lanech v podobě lopatek turbíny, které mají stínící funkci. Západní fasáda je pojednána funkčně, je tvořena skládaným kovovým pláštěm z profilovaných plechů s podlouhlým okenním otvorem obdélníkového tvaru, který ve středu přechází do posuvných vrat. Hlavní prostor haly T1 tvoří multifunkční plocha, jejíž hlavní funkce je výstavní. Pro tuto funkci je plocha vybavena systémem šachet v rastru 4x4 m pro možnost napojení jednotlivých výstavních stánků na veškeré instalační sítě. Prostor je možno využít i pro společenské akce nebo pro sportovní účely. Je možné jej dále dělit pomocí posuvných nafukovacích dělicích příček. Nad vstupní částí haly T1 s pokladnou a mobilní šatnou je vestavěna prosklená galerie s jednacími salonky. Podél celé severní fasády se táhne pás technologie a veškerého zázemí pavilonu. Hala T2 má při menších rozměrech stejné vlastnosti jako hlavní hala T1.

Pavilon T byl poslední realizací zesnulého architekta Jiřího Stříteckého (společně s Martinem Krupauerem), v prosinci 2012 zde proběhlo rozloučení s touto nezapomenutelnou osobností.

(Obr. 2)

Fakta:

Objekt: Pavilon T – Výstaviště České Budějovice

Autor: ATELIR 8000, Martin Krupauer - Jiří Střítecký, HAP Jiří Střítecký a Eva Šťávová, HIP Petr Kolbaba

Spolupráce: Požární bezpečnost staveb ALTO, statika KUPROS, TZB, Štrob, zahradní a sadové úpravy Miroslava Cimbůrková, výmalba Paly Paštika

Dodavatel: dřevěné nosníky Graf Holztechnik, střešní plášť Vertikal, textilní architektura KONTIS Praha a ARCHTEX

Zastavěná plocha: 6 050 m²

Obestavěný prostor: 67 183 m³

Klient: Výstaviště České Budějovice, a. s.

Adresa: Husova 526, České Budějovice

Projekt: 2009-2011

Realizace: 2010-2011

Další realizované projekty:

Vltavská vodní cesta – velín a přístav České Vrbné *(Obr. 3)*

- velín a přístav Hluboká n. Vltavou *(Obr. 4)*

- velín VD Hněvkovice *(Obr. 5)*

- velín jez Hněvkovice *(Obr. 6)*

Projektové studie – Rekonstrukce lávky BBC Praha 4 *(Obr. 7)*

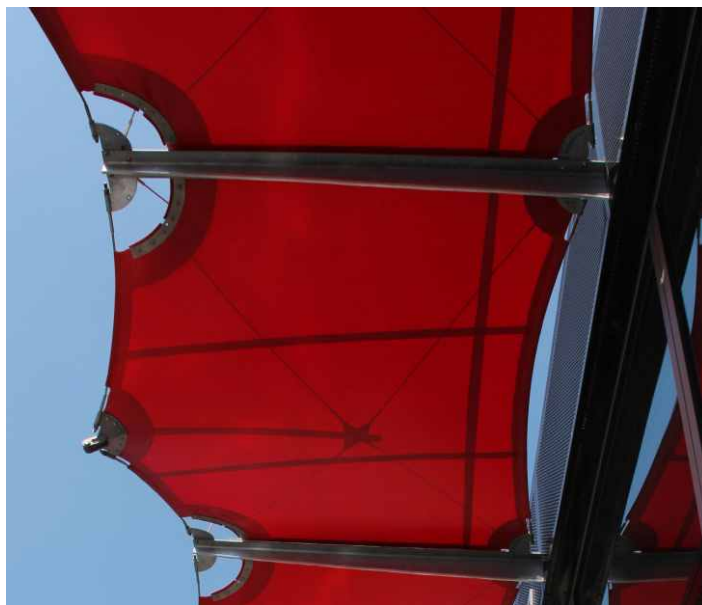
- Prodloužení lávky Praha 11 *(Obr. 8)*



Obr. 1 | Dopravně obchodní centrum Mercury České Budějovice



Obr. 2 | Výstaviště České Budějovice – Pavilon T



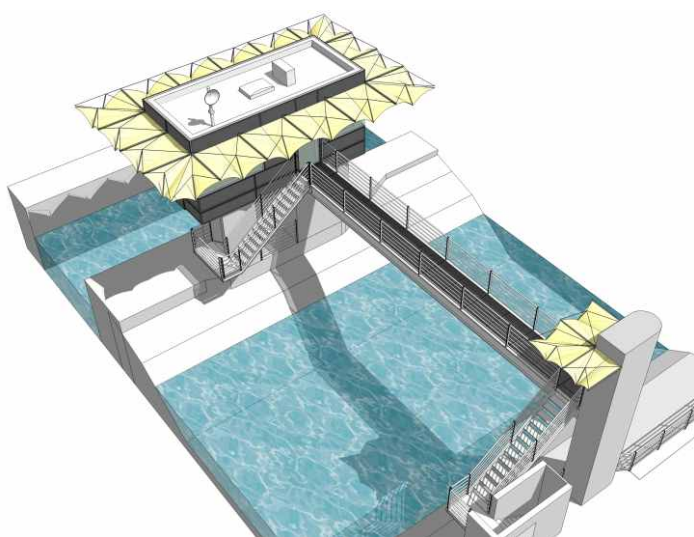
Obr. 3 | Velín a přístav České Vrbné



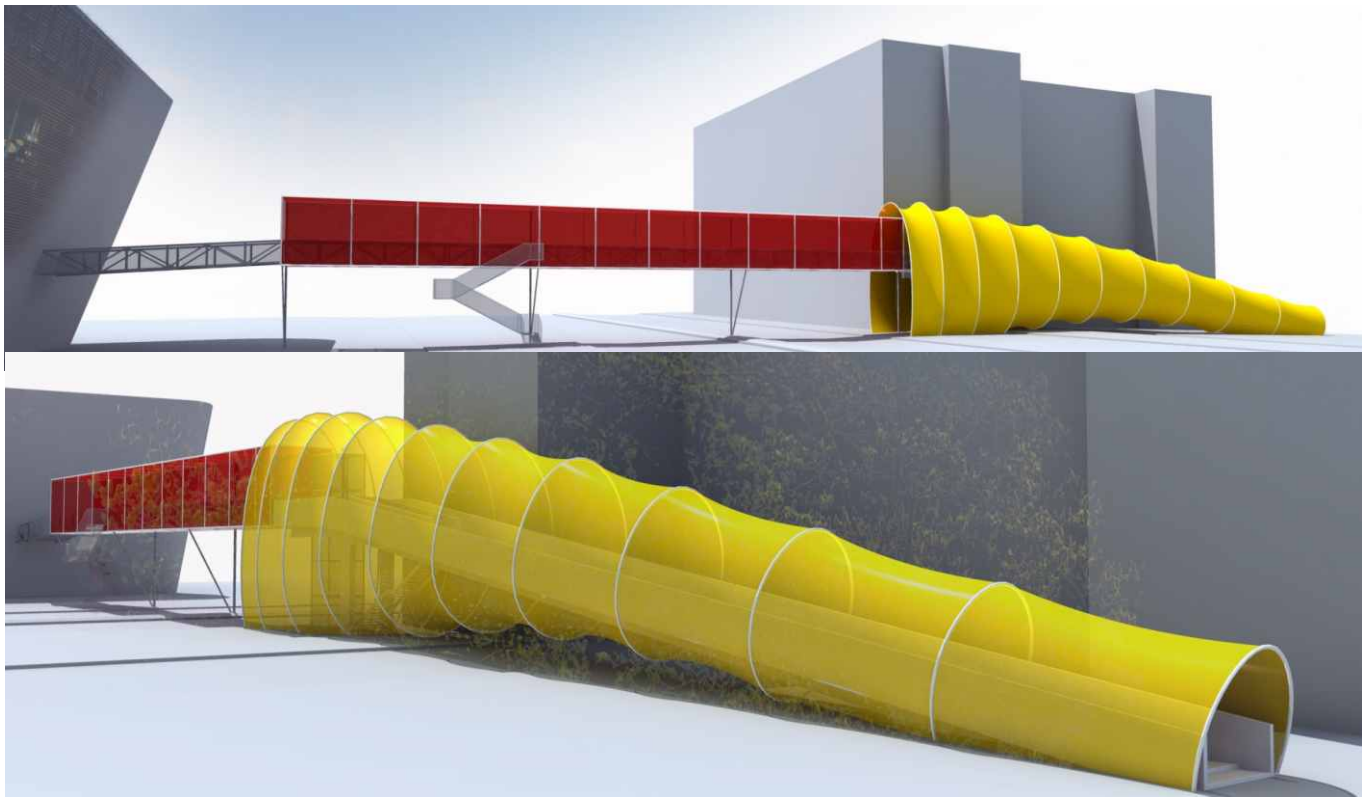
Obr. 4 | Velín a přístav Hluboká n. Vltavou



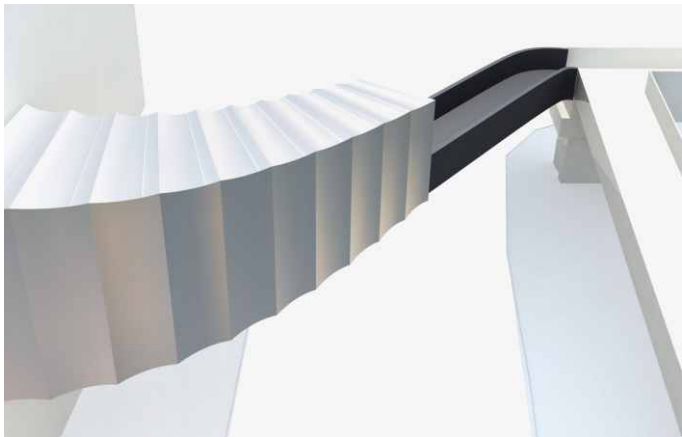
Obr. 5 | Velín VD Hněvkovice



Obr. 6 | Velín jez Hněvkovice



Obr. 7 | Rekonstrukce lávky BBC Praha 4



Obr. 8 | Prodloužení lávky Praha 11

Realizace zastřešení autobusového nádraží Hradec Králové

Jednovrstvá membrána, která zastřešuje ve formě lehkých křídel odjezdová a příjezdová stání autobusového terminálu v Hradci Králové, se stala charakteristickým konstrukčním a zároveň výtvarným motivem této nové stavby, dokončené v roce 2008. S membránovou konstrukcí bylo u tohoto objektu počítáno již od prvopočátečního konceptu ve fázi dopravně-urbanistického a architektonického soutěžního návrhu.

Prostorová koncepce tohoto autobusového nádraží byla totiž založena na předpokladu, že zde vznikne halový objekt, který pomocí zavěšené ocelové konstrukce zastřeší dopravní plochy autobusového nádraží tak, aby daná lokalita vytvářela zřetelný orientační bod ve městě a nebyla pouhou otevřenou plochou komunikací s nástupišti. Membránová konstrukce toto umožnila a navíc vtiskla tomuto objektu nezaměnitelný tvar s typickými organickými tvary, tak charakteristickými pro membránové stavby.

Membránové zastřešení navíc umožnilo průnik rozptýleného denního světla do celého areálu nádraží, takže si celý prostor ponechává dojem vzájemné propojenosti interiéru a exteriéru. Zkušenosti z projektování a realizace membrány na autobusovém nádraží v Hradci Králové se staly podnětem pro koncepci dalších projektů membránové architektury na některých dalších stavbách připravovaných ateliérem Patrika Kotase.

Oficiálně se nová stavba jmenuje Terminál hromadné dopravy Hradec Králové, jelikož stavba zahrnuje 13 stání pro městskou trolejbusovou dopravu (s návazností na blízké vlakové nádraží) a 12 stáními pro linkovou meziměstskou dopravu. K tomu patří ještě 20 řad odstavných stání pro autobusy a trolejbusy v severní části. K řešení také patří omezení dopravy v prostorech Riegrova náměstí, které leží mezi terminálem a vlakovým nádražím. Vzletná, lehká konstrukce nesoucí textilní – membránové zastřešení hal působí příjemně moderním dojmem především proto, že podobné textilní architektonické řešení se v České republice příliš nevyskytuje, ovšem v celosvětovém měřítku můžeme podobné stavby najít již mnohem dříve, jako příklad se dá třeba uvést Olympijský stadion v Mnichově z roku 1972, který proslul právě díky obdobnému řešení zastřešení.

Samotné budovy odbavovacích hal jsou dvě jedna pro MHD a druhá pro meziměstskou dopravu. Jsou prosklené ze všech stran a slouží nejen jako informační centra, ale také nabízí pro cestující občerstvení. Mimo elektronický informační systém a rotující prosklená schodiště vévodí interiéru obrovská skleněná koule, která působí skoro jako letící balón vznášející se nad celým prostorem haly. Nejde ovšem jen o nějakou levnou dekoraci, ale především o funkční umístění dispečera.

Vize dispečera, který se vznáší nad cestujícími a diktuje, který autobus a kam pojedete se mi zdá zcela neomaleně utopická. Dispečer – vládce se vznáší nad hlavami lidí v zrcadlové kouli. Dá se pouze odhadovat kolik takovýto módní výstřelek stojí peněz a nakolik je jeho umístění praktické, užitečné a nutné. Ovšem na druhou stranu je to prvek zcela ojedinělý a takovéto nádraží si zcela jistě zapamatujete jednou pro vždy.



Obr. 1 | Terminál hromadné dopravy v Hradci Králové

MEMBRÁNY V INTERIÉRU

Jako první membránové konstrukce u nás – ačkoliv se tomu systému neříkalo membránové konstrukce – byly tzv. napínané podhledy, známé pod obchodním názvem BARISOL (nyní převzala iniciativu firma BERNIZET). Šlo o PVC fólii, buď jednobarevnou, nebo později s potiskem (obr. č.1)

Tyto fólie s nalepeným lemem se napínají za zvýšené teploty 55°C až 70°C, kdy se fólie plošně roztáhne až o 10% a změkne (obr. č.2). Upíná se do lehkých hliníkových lišt montážní špachtlí. Po vychladnutí se fólie vypne. Je možno vytvořit až plochu 50m², aniž by se fólie prohnula. Pro větší plochy se používá separační lišta, kam se zasouvají obě fólie (obr. č.3).

Do fólie lze instalovat světla do povrchové teploty 60°C, výústky VZT, čidla EPS.... Hmotnost fólie je 0,18 až 0,2 kg/m², únosnost má 60 kg a tah na stěně je zhruba 10 kg/bm. Je nesnadno hořlavá, samozhášecí, bez produktu kouře. Je bez emise těkavých látek, zápachu a zdravotně nezávadná. Je 100% vodotěsná, sterilní a snadno udržovatelná. Dle norem EU je zařazena do třídy jakosti 1. Vyrábí se jako monochromatická ve zhruba 100 odstínech, v lesku, v matu (obr. č.4) translucenční (obr. č.5), antibakteriální pro zdravotnická zařízení, s akustickou mikroperforací (obr. č.6) (pod obchodním názvem Microsorber).

Velmi atraktivní jsou podhledy s digitálním potiskem s jakýmkoliv motivem, geometrické obrazce (obr. č.7), reálné přírodní motivy (obr. č.8, 9, 10, 11) či kopiemi uměleckých děl (obr.č.12). Efekt nočního nebe se vytváří nejčastěji světelnými vlákny (obr. č.13). Tvar podhledů je libovolný (obr.č. 14, 15, 16), je možno z něj tvarovat hlavice sloupů i fabiony (obr. č. 17, 18), světelné prostorové objekty (obr. č.19). Z těchto materiálů se vyrábí i kazetové podhledy, které umožňují po vyjmutí kazety přístup do prostoru nad podhledem (obr. č.20). V současnosti se vyvíjí i fólie do exteriéru, snášející i mínusové teploty (od firmy DPS – Cristal Moon). Jedinou nevýhodou PVC fólie je, že je náchylná k poškození ostrými předměty.

Další interiérovou membránovou konstrukcí jsou napínané stěny (obr. č.21), které mají jedinečné estetické a akustické vlastnosti a to jak v oblasti prostorové i stavební akustiky. Montáž je obdobná jako u napínaných podhledů. Materiálem je v tomto případě 5m široká polyesterová tkanina, napuštěná teplem tvrditelnou polyuretanovou směsí, takže je daleko odolnější proti mechanickému poškození. Tak jako podhledy se vyrábí jako monochromatická v nespočetných odstínech nebo digitálně potištěná (obr. č.22, 23, 24).

Nyní ke klasickým membránovým konstrukcím používaných v interiérech (obr. č.25). Nejčastěji jsou používány membrány z technických textilií bavlněných, polyesterových, polyamidových, polyvinilalkoholových, polyaramidových nebo kovových vláken. Tyto mohou být dále pokryty PVC, PTFE nebo ETFE materiálem.

Nejčastěji jsou využívány jako stínící (obr. č.26, 27), akustické, dekorativní a k optické korekci vnitřního prostoru používané prvky (obr. č.28, 29). Tyto membrány tlumí zvukové vlny vysokých a středních kmitočtů. K vytvoření dokonalé akustické pohody jsou kombinovány např. se segmentovými panely z minerální vaty, tlumící střední a nízké kmitočty (obr. č.30).

Vzhledem k tomu, že mají vysoké opticko-difuzní vlastnosti se dá z bodových zdrojů dosáhnout velkoplošného nepřímého osvětlení (obr. č.31), nebo vytvořit efektní prostorová svítidla (obr. č.32) Membránové prostorové prvky se skvěle používají k optickému tvarování vnitřního prostoru staveb (obr. č. 33).

Učebnicovým příkladem použití ETFE membránových konstrukcí je Water Cube (obr. č.34) realizovaný jako plavecký stadion pro olympijské hry v Pekingu (obr. č.35). Ten byl posléze v roce 2010 přestavěn na Národní Aquacentrum (obr. č.36). Myšlenka „vzduchových bublin“ ve vodě, která dala tvar membránovému plášti plaveckému stadionu (a promítá se i do interiéru již při olympijských hrách) byla dotažena téměř k dokonalosti. V přestavbě na Národní Aquacentrum však byla pomocí ETFE fólií dotažena do nadstandardně snového podvodního světa, se vzduchovými bublinami, medúzami, vodními rostlinami...(obr. č.37).

Pro vytvoření efektního vnitřního prostoru mají báječné použití i PTFE membrány, které většinou tvoří střešní plášť (obr. č.38), v některých případech i fasádu. Při použití membránových konstrukcí se ve vnitřním prostoru zúročuje jejich lehkost a tudíž zastřešení velkých rozponů s minimem podpor. Stanové tvary střech dávají interiéru optickou vzdušnost

a lehkost, navíc barevnost průsvitu je ve spektru barev v partii na psychiku člověka blahodárně působící (obr. č.39). Lze konstruovat i posuvné, skládací zastřešení (obr.č.40). Velice dobře působí i kombinace průhledných ETFE fólií s PETFE translucentními membránami.

Zcela dokonalé jsou pro vytvoření vnitřního prostoru transparentní ETFE vícevrstvé fólie (obr. č.41). Jejich lehká, subtilní nosná konstrukce, působící jako pavučina, téměř neviditelná, dávající konzumentovi interiéru pocit „open air“ (obr. č.42), který se i nejlepším světovým architektům ve skle prostě kvůli váze skla a tudíž nutnosti mohutnosti konstrukcí, nepodařilo dosáhnout. Navíc oproti proskleným střechám propouští ETFE fólie ÚVA záření, nezbytné pro živé organismy, takže se s výhodou dá toto opláštění použít u botanických a zoologických zahrad, aquaparků a wellness či SPA zařízení (obr. č.43), která jsou tím pádem celoročně využitelná pro opalování, relaxaci.... (sluneční louky, přírodní solária pod střechou...)

Výrazně kreativně působí práce s umělým světlem, ať přímým nebo LED zdroji přímo v ETFE membránách (obr. č.44).

Mohl bych se pustit do srovnávání prosklených konstrukcí vytvořených těmi nejlepšími světovými architekty a membránovými konstrukcemi. Ale neučiním tak, protože podle mého názoru membránové konstrukce vyhrávají na celé čáře. Musím to takto otevřeně přiznat, přestože miluji sklo v architektuře pro jeho noblesu a lehkost. Ale proti pokroku ve vývoji je zpozdilé bojovat.

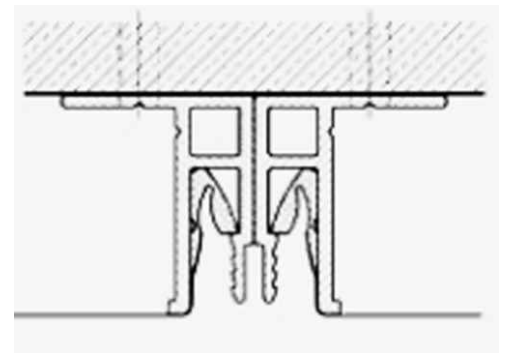
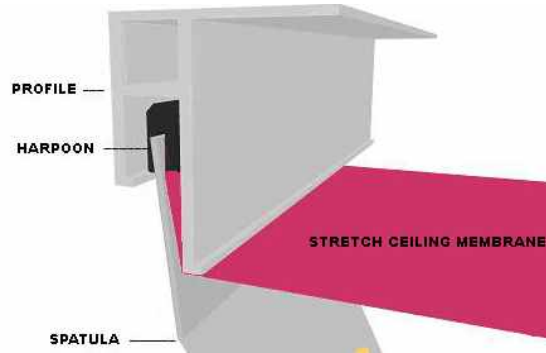
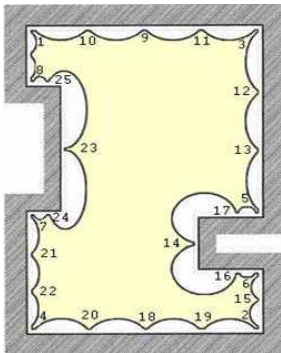
Bravo membránám, dávají nám, architektům, neuvěřitelné kreativní možnosti a za to obrovský dík (obr. č.45).



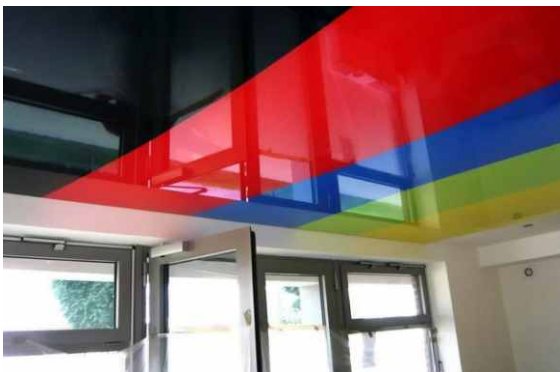
Obr. 01



Obr. 02

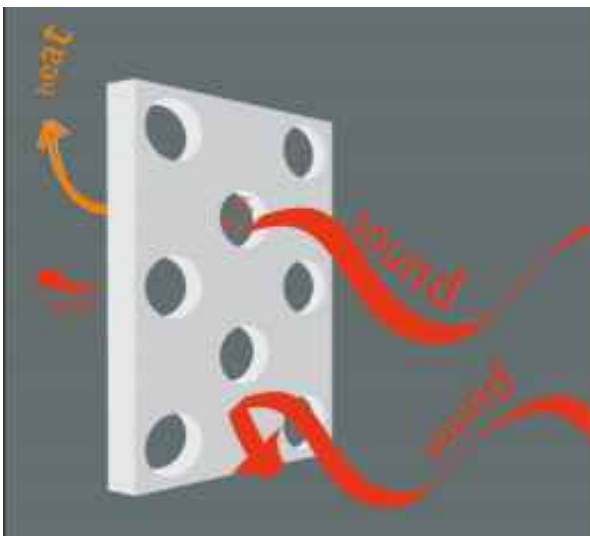


Obr. 03



Obr. 04

Obr. 05



Obr. 06



Obr. 07



Obr. 08



Obr. 09



Obr. 10



Obr. 11



Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15



Obr. 16



Obr. 17



Obr. 18



Obr. 19



Obr. 20



Obr. 21



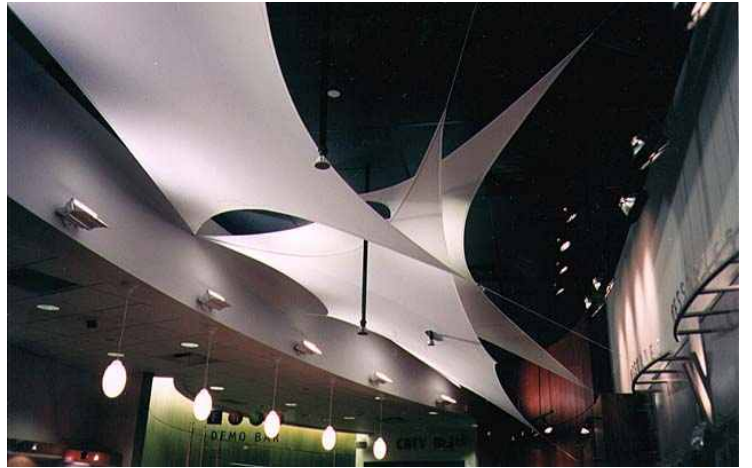
Obr. 22



Obr. 23



Obr. 24



Obr. 25



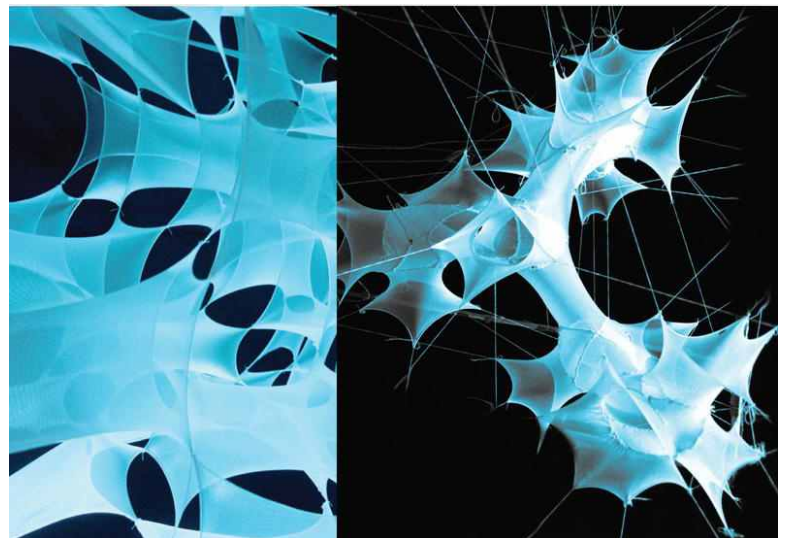
Obr. 26



Obr. 27



Obr. 28



Obr. 29



Obr. 30



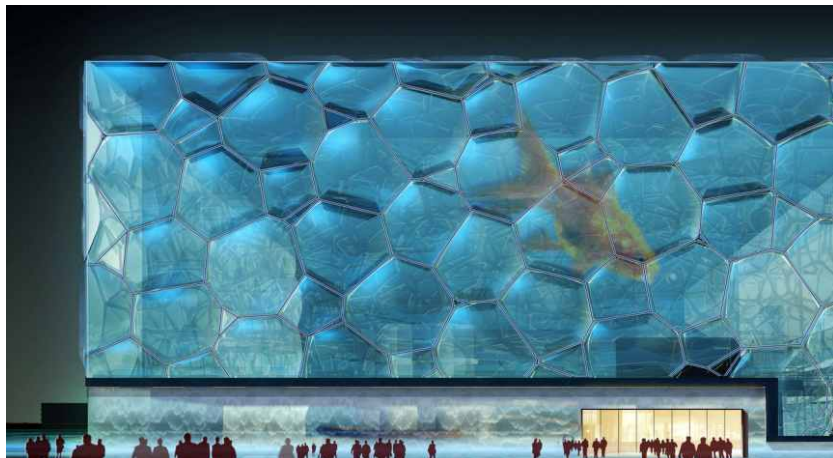
Obr. 31



Obr. 32



Obr. 33



Obr. 34



Obr. 35



Obr. 36



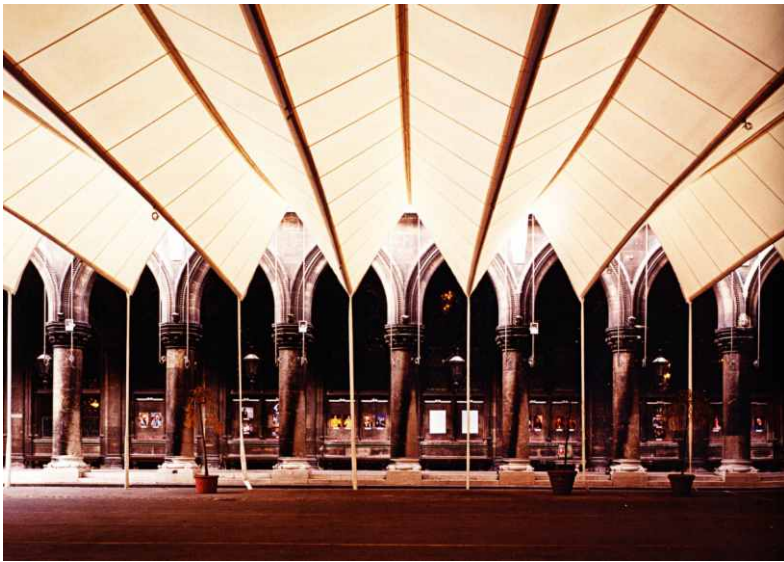
Obr. 37



Obr. 38



Obr. 39



Obr. 40



Obr. 41



Obr. 42

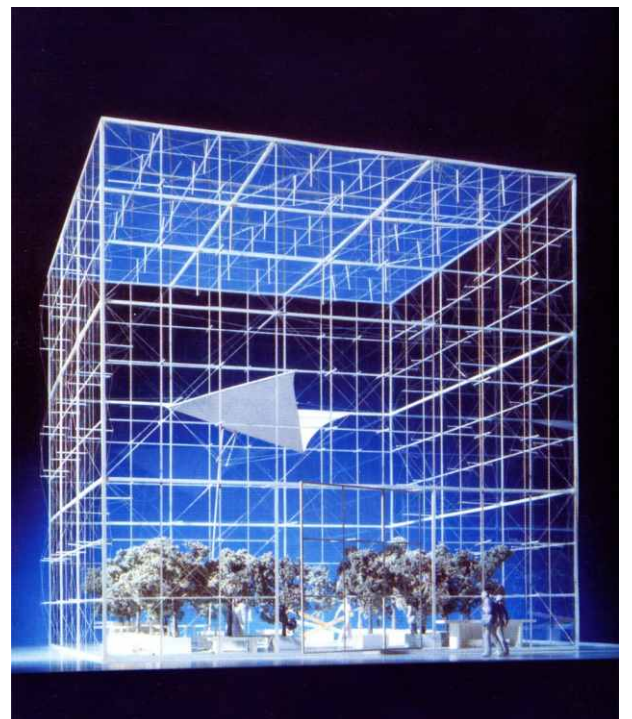


Obr. 43



world of pictures by KlausH - Illumination at Clarks Bay

Obr. 44



Obr. 45

Úvod

Předepnuté membránové konstrukce z textilních materiálů nebo nerezových sítí mohou tvořit plnohodnotné nosné konstrukční prvky a překonávat poměrně velká rozpětí bez dalších pomocných lan či jiných sekundárních konstrukcí. Díky intenzivnímu rozvoji výpočetní techniky v posledních desetiletích a v souvislosti se zvýšenou poptávkou po membránové architektuře lze v dnešní době na trhu nalézt výpočetní programy, vyvinuté výhradně pro návrh membránových konstrukcí. Na průměrně vybavených osobních počítačích tak dnes lze řešit i složitější nelineární úlohy, jakou předepnutá membránová konstrukce bezesporu je. Software se uplatní jak pro návrh geometrie a tvaru konstrukce, tak i pro výpočet napjatosti a vnitřních sil a to i s vlivem spolupůsobení podpůrné konstrukce, která bývá u těchto staveb zpravidla ocelová. V neposlední řadě ho lze užít také pro tvorbu a výslednou podobu stříhu prostorové konstrukce, která bývá svým tvarem mnohdy velice složitá a „ruční“ přenos geometrie do 2D je v podstatě nemožný. Tento článek si neklade za cíl hlubší popis samotné membrány, která by nikdy nemohla fungovat jako samonosná konstrukce bez vhodného dvojího zakřivení a plošného předpětí, ale jeho předmětem je zejména popis a řešení přenosu sil do okolní konstrukce - podpůrné ocelové konstrukce, která má za úkol tyto síly, vyvozené předpětím membrány a dalšími vnějšími zatíženími (sníh, vítr), spolehlivě přenést do základů. Ocelová konstrukce musí také vykazovat vodorovnou tuhost, která bývá často při návrhu podceňována. U jednodušších konstrukcí bez návaznosti na další stavby se tuhost celku zajišťuje obvyklým způsobem, tj. šikmými prvky (táhly) do více směrů, nebo např. rámovými rohy (obr. 1).

Přenos sil

Obecně lze podpory membránové konstrukce rozdělit na bodové, viz obr.1 a liniové, které se uplatní zejména pokud podpůrnou konstrukci tvoří oblouk, nebo jedná-li se o hlavní prstenec u pagod nebo trychtýřů, viz obr. 2.

Liniové kotvení membrány je prováděno přes tzv. keder - lištu, která bývá vyrobena z tužšího polymeru a přes kterou je membrána zdvojena. Lišta se pak zasouvá do pomocného (často hliníkového) profilu, který je potom k podpůrné konstrukci kotven běžnými spojovacími prostředky, viz obr. 3.

Podobný princip přenosu sil je použit i pro bodové ukotvení membrány, kde je lišta sevřena mezi 2 ocelové plechy, tvořící nárožní prvek, viz obr. 4.

Součástí uspořádání nárožního kotvení jsou i detaily pro připojení obvodových lan, viz obr. 4. Tato lana, uložená v kapsách po obvodu membrány, jsou pomocí závitového terminálu a matice dopínána přes trubky nárožního profilu, čímž lze dosáhnout optimálního předpětí v membráně a požadovaného tvaru celé textilní části konstrukce. Vzepětí oblouku obvodového lana má obrovský vliv na výsledné reakce v podporách, protože síly v lanech jsou úměrné poloměru zakřivení. Obecně platí, čím větší poloměr zakřivení (přímější lano), tím větší síla musí působit v laně při dosažení požadovaného stavu napjatosti membrány, viz obr. 5. V obvodových lanech se potom koncentruje cca 85% nárožní reakce, při návrhu je však třeba počítat i s koncentrací zbytku napětí v samotné membráně. Materiál membrány je v místě kotvení zpravidla zdvojen (přes keder lištu), což napomáhá účinnému přenesení lokálního napětí bez nutnosti použití silnějšího (únosnějšího) materiálu na celou plochu konstrukce.

Další důležitou součástí konstrukce, která se uplatní při přenosu sil mezi membránou a podpůrnou konstrukcí je prvek napojení rohového profilu ke styčnickovému plechu sloupu, tím může být tzv. „schäkel“, který umožňuje rotaci okolo jedné osy – čepu. Pokud je pro správné fungování konstrukce žádoucí i rotace okolo druhé osy v uložení, použije se tzv. „wirbelschäkel“, viz obr. 4 vlevo. Tyto prvky jsou téměř vždy nerezové. Jednodušší variantou je potom vidlička se závitovým terminálem, který se k nárožnímu profilu přišroubuje přes trubku podobně jako obvodová lana, viz obr. 4 vpravo.

Podpůrná ocelová konstrukce

Ocelová konstrukce by v ideálním případě měla být již součástí numerického modelu spolu s membránou a to ve skutečných, navržených rozměrech. Tím se zohlední tuhost (poddajnost) konstrukce a vzájemná interakce se promítna do výsledků globální analýzy napjatosti v membráně a vnitřních sil v konstrukci. Toto platí zejména, pokud je membrána kotvena na liniový – nosníkový prvek, kde např. poddajnost kotvení u podpory není shodná s poddajností nosníku uprostřed rozpětí a v případě odděleného výpočtu membrány (s tuhými podporami) tak může docházet

k nepřesnostem, které mohou řádově dosahovat i desítek procent. Ne vždy je však v možnostech stavebního inženýra takový komplexní výpočet provést. Pro základní tvar – hyperbolický paraboloid se čtyřmi kotevními body v rozích, viz obr. 6, se velmi často provádí výpočet odděleně a to bez větších odchylek.

Konstrukce tohoto typu často přímo navazují na přilehlou budovu a tak podpůrné body membrány jsou realizovány jak pomocí šikmých sloupů s táhly, tak přímým kotvením do hmoty budovy. Vzhledem k tomu, že při větších plochách zastřešení a vyšší hodnotě zatížení sněhem nejsou výjimkou tahové reakce v rozích membrány i v řádu stovek kN, je vždy nutné posoudit také vliv těchto reakcí na konstrukci samotné budovy. Ideální je součinnost již v době výstavby a příprava kotevních míst vhodným vyztužením konstrukce apod. Klasickým kotevním bodem rohu membrány, vzdálenějšího od budovy je potom zmiňovaný šikmý sloup s táhly, viz obr. 6 vlevo. Tlačený sloup bývá navržen z běžné konstrukční oceli a opatřen koncovými detaily pro připojení lan, viz obr. 7 vlevo, a uložení na čep, viz obr. 7 vpravo. Koncovou povrchovou úpravou po přivaření všech plechů bývá nejčastěji žárový zinek. Čepy sloupů (ideálně provedené tak, aby umožnily rotaci sloupu v rovině výslednice reakce z membrány) a šikmá kotevní lana se navrhuji z nerezí.

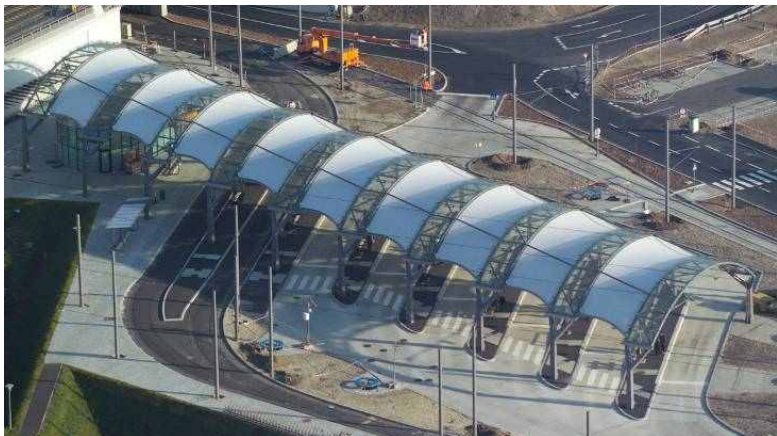
Hlavní šikmá lana sloupů musí umožňovat rektifikaci tvaru celého systému a musí být dopínatelná tak, aby jejich pomocí mohla být konstrukce vypnuta do požadovaného stavu vodorovným posunem vrcholu sloupu, ke kterému dochází při napínání lana a otáčení sloupu v úložném čepu. Na lanech jsou z tohoto důvodu instalovány napínáky, viz obr. 8 vlevo a uprostřed. Levnější variantou je potom dělená patka, kde efekt napínáku zajistí vysokopevnostní šrouby, viz obr. 8 vpravo.

Kotvení do základů

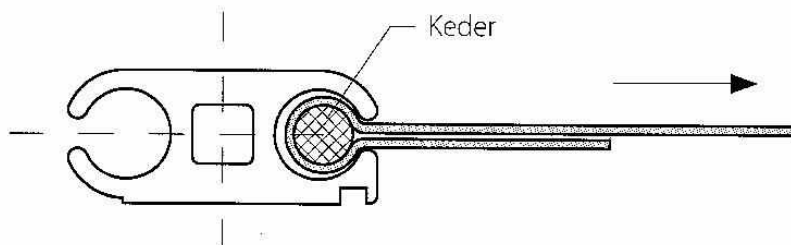
Přenos sil z membrány přes ocelovou konstrukci do základů končí kotvením patního plechu sloupů nebo lan. Při vyšších silách bývá staticky výhodné, pokud se patní plech prováže s výztuží základu a předem zabetonuje. Styčníkový plech s otvorem pro čep je potom k patnímu plechu připojen montážním svarem. V praxi se ale velmi často používá chemické kotvení, viz obr. 8 uprostřed, které se provede dodatečně do hotového základu a tím bez zvýšených nároků na geometrickou přesnost během betonáže. Základy pod táhla jsou při běžných (nižších) silách navrhovány jako tížné. Pokud jsou patky sloupu a táhel blízko sebe, lze provést sdružený základ. Alternativou betonových základů při vyšších hodnotách svislých tahových sil, nebo pokud si to vyžadují zvláštní okolnosti, je kotvení pomocí zemních vrutů, viz obr. 9. Toto kotvení provádí specializované firmy, které dokáží garantovat únosnost kotvy v místních podmínkách provedením tahové zkoušky před předáním objednateli.



Obr. 01 Zajištění celkové tuhosti konstrukce pomocí dvojic táhel nebo rámovým rohem



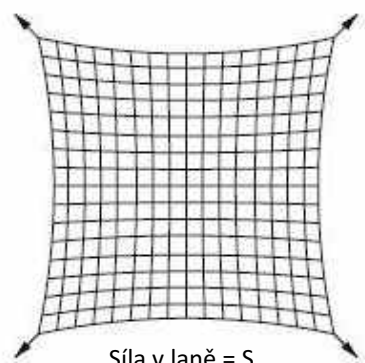
Obr. 02 Příklady liniového přenosu sil do ocelové konstrukce (oblouk a prstenec)



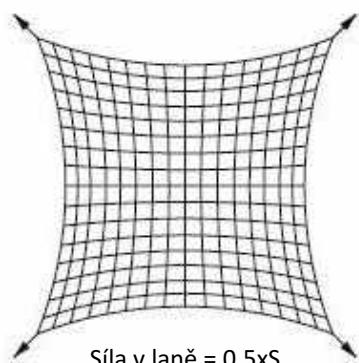
Obr. 03 Keder lišta v hliníkovém profilu pro liniové kotvení membrány



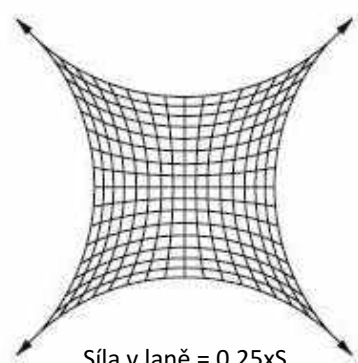
Obr. 04 Nárožní kotvení membrány k ocelové konstrukci



Síla v laně = S



Síla v laně = $0,5 \times S$

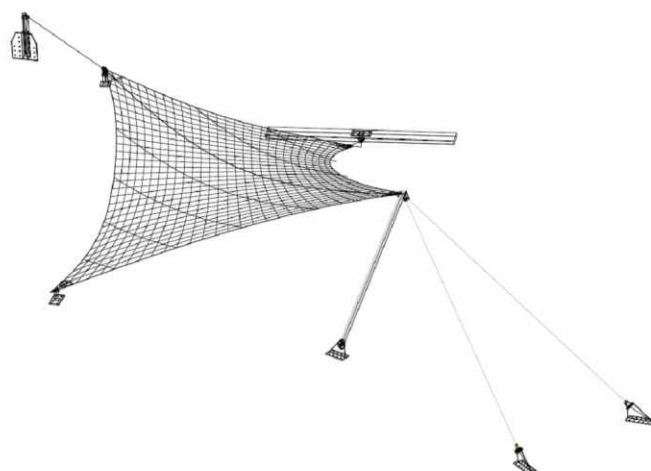


Síla v laně = $0,25 \times S$

Obr. 05 | Relativní vztah zakřivení a výsledné síly u obvodového lana membrány



Obr. 06 | Hyperbolický paraboloid se čtyřmi kotevními body v rozích



Obr. 07 | Koncové detaily sloupů - přípoj šikmého lana a uložení na čep



Obr. 08 | Rektifikační prvek, napínák a dělená patka s vysokopevnostními šrouby



Obr. 09 | Kotvení pomocí zemních vrutů

STATIKA KONSTRUKCÍ S MEMBRÁNOVÝMI PRVKY

Úvod

Využití textilních a fóliových membránových konstrukcí pro zastřešení rozsáhlých trvalých staveb stále běžnější. Membrána je plnohodnotný konstrukční prvek. Výhody využití těchto materiálů jako zároveň konstrukčního prvku i střešního, případně stěnového pláště:

- nevšední tvar
- velká rozpětí
- nízká hmotnost
- střešní konstrukce

Typologie a konstrukční systémy, materiály

Předpětí = základní předpoklad působení membránových prvků

Mechanicky předepnuté

u nekovových membrán dva opačně zakřivené povrchy předepnuté proti sobě

- bodově uchycené plachty – hyperbolický paraboloid (Obr. 4)
- kuželové membrány (Obr. 5)
- membrány na obloucích (Obr. 6)

Pneumaticky předepnuté

přetlak nebo podtlak (Obr. 7), (Obr. 8)

- polštáře, haly, tensairity

Materiály:

- tkaniny - skleněná vlákna + PTFE; PES + PVC
ortotropní materiál, optimální stanovení vlastností biaxiálním testem, pevnost až 170 kN/m
- fólie ETFE - tloušťka do 0,2 mm, pevnost až 65 kN/m
2 – 5 vrstev fólie, osazeny do hliníkového rastru pro rozpon nad 3,5m podpůrná lanová síť

Návrh a působení konstrukce s membránou

Základní pravidla při návrhu konstrukce s plachtou:

Tvar plachty odpovídá stavu napjatosti – vliv předpětí na geometrii

Uchycení plachty a nosná konstrukce musí přenést tahové síly plachty (od předpětí + příčného zatížení)

Mělo by být uvažováno s možností rektifikace (v průběhu výstavby + po dobu životnosti)

Konstrukce jako celek musí zajistit prostorovou stabilitu, tzn. přenést veškeré zatížení do základové konstrukce

Zpravidla není nosná konstrukce tuhá, nutno uvážit její poddajnost a spolupůsobení plachty

Ocelové prvky u membránových konstrukcí

- kotevní, hřebenová, úžlabní, obvodová lana kotvení
- tuhá nosná konstrukce (Obr. 13)

Uchycení plachet

- obvodové prvky – lana (Obr. 14)
- připojení k tuhé konstrukci - keder profily (Obr. 15)

- bodové uchycení – lana, táhla (*Obr. 16*)

Výpočet konstrukcí s plachtami:

- společné či oddělené řešení
- problematika aktivace, montáže
- nutná znalost materiálových charakteristik (ortotropní plachta, lana) a tuhostí
- zavedení předpětí do výpočtu a jeho velikost
- numerická stabilita modelu s velkými deformacemi
- stanovení správné hodnoty předpětí při montáži

- naprostá většina geometricky nelineárně, zohlednění průvěsu lan předpětí jako vstup před výpočtem před zatížením dalšími vlivy

ETFE - stabilizace nosné konstrukce vlivem horizontálních sil od předpětí nebo předeprnutím vodorovné vrstvy fólie, ale zatížení krajních vazeb od těchto sil

Předpětí

Předpětí = základní parametr, aktivuje tuhost a schopnost přenášet zatížení. Dosaženo buď natažením ve dvou směrech s opačnou křivostí, nebo vůči tuhé bodové či liniové konstrukci.

- odpovídající detaily (rektifikace)
- odpovídající montážní postup
- předeprnutí jednoho směru ovlivní druhý
- individuální pro každou konstrukci s ohledem na geometrii a zatížení, běžně 0,7 – 2,0 kN/m², výjimečně do 5,0 kN/m²

Princip vnesení předpětí

- postup vnášení předpětí na obvodu (*Obr. 17*)
- postup vnášení plošného předpětí (*Obr. 19*)

Způsob vnesení předpětí

- natažením plachty (*Obr. 20*)
- natažením kotevních a obvodových lan (*Obr. 18*)
- zvětšením rozměru (*Obr. 21*)

Stanovení vnitřních sil

V průběhu aktivace konstrukce X na aktivované konstrukci

- vložené dynamometry, manometry hydraulických zařízení
- tenzometricky (známe nulový stav)
- analýza vlastního kmitání prvku – teorie příčného kmitání (vliv ohybové tuhosti, průvěsu, tuhosti uchycení konců prutů, pružnost podpor)
- pomůcka - z měření definované výchylky a potřebné síly k jejímu vyvození
- z měření elektromagnetické permeability (tyčové prvky)

Souhrn

- Membrána je plnohodnotný konstrukční prvek
- Předpětí je základní předpoklad působení membránových prvků
- Konstrukce musí zajistit prostorovou stabilitu a přenesení tahových sil z membrán



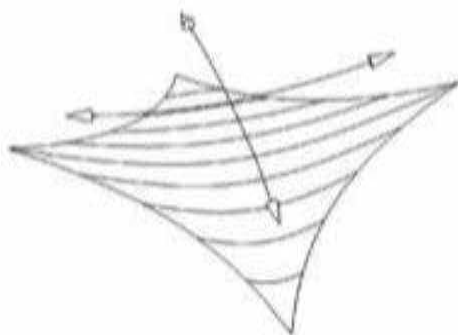
Obr. 1 | Přístav Genoa (Renzo Piano)



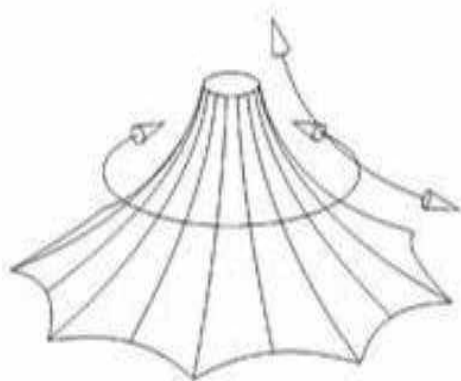
Obr. 2 | membrána může tvořit konstrukční prvek či střešní popř. stěnový plášť



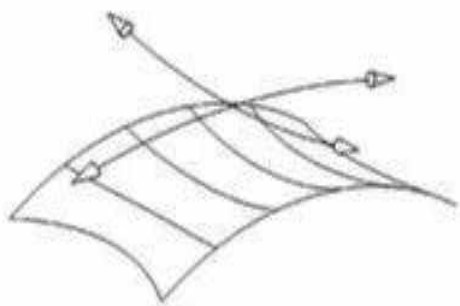
Obr. 3 | Millenium Dome, Londýn, Richard Rogers (1999/2000)



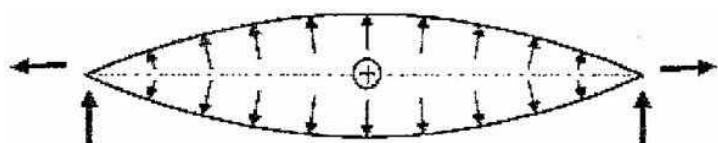
Obr. 4 | Bodově uchycená plachta - hyperbolický paraboloid



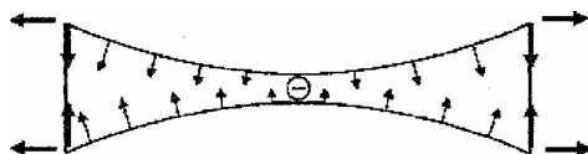
Obr. 5 | Dvě opačně zakřivené povrchy předeptuté proti sobě - kuželová membrána



Obr. 6 | Dvě opačně zakřivené povrchy předeprnuté proti sobě
- membrána na obloucích



Obr. 7 | Pneumaticky předeprnutá konstrukce - přetlak



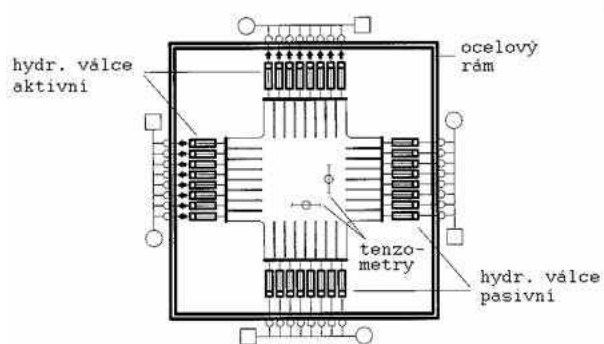
Obr. 8 | Pneumaticky předeprnutá konstrukce - podtlak



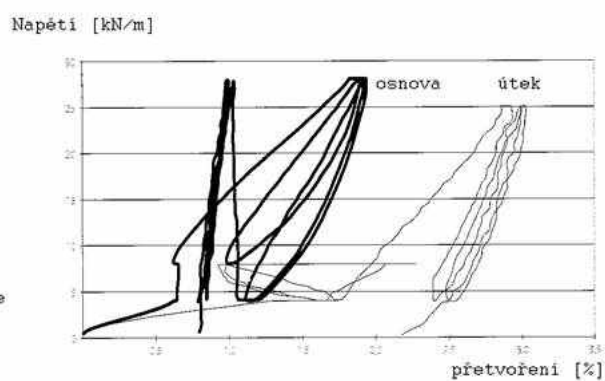
Obr. 9 | Použití fólie ETFE - Allianz arena, Mnichov



Obr. 10 | Použití fólie ETFE - Water Cube, Peking



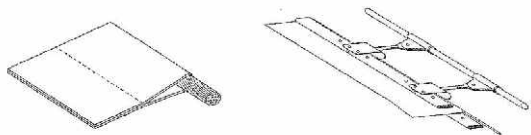
Obr. 11 | Optimální stanovení vlastností tkanin a fólií biaxiálním testem



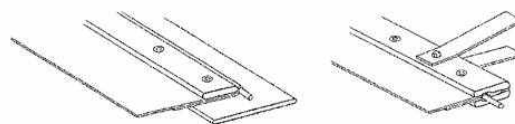
Obr. 12 | Příklad kotvení membránové konstrukce - ocelové prvky



Obr. 13 | Tuhá nosná konstrukce



Obr. 14 | Uchycení plachty pomocí obvodových prvků - lan



Obr. 15 | Připojení k tuhé konstrukci - Keder profily



Obr. 16 | Bodové uchycení - lana, táhla

POSTUP VNAŠENÍ
PŘEDPĚTÍ NA OBVODU

Předpětí pododajného
prvku

přímým natažením

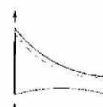


Změna polohy
tuhých prvků

natočením



posunem



LINIOVÉ

BODOVÉ



Obr. 17 | Princip vnesení předpětí



Obr. 18 | Způsob vnesení předpětí natažením kotevních a obvodových lan

Změna tvaru
tuhých prvků

zvětšením



kontrakcí



POSTUP VNAŠENÍ
PLOŠNEHO PŘEDPĚTÍ

PNEUMATICKÉ

MECHANICKÉ



Obr. 19 | Princip vnesení předpětí



Obr. 20 | Způsob vnesení předpětí natažením plachty



Obr. 21 | Způsob vnesení předpětí zvětšením rozměru

Literatura

- Tensile Surface Structures. Michael Seidel, © 2009 Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, ISBN: 978-3-433-02922-0
- Berger H. (1999). *Form and Function of Tensile Str. for Permanent Buildings*. *Eng. Struct.*, Vol.21:No8. pp. 669-679.
- Burrows S, Ecker K, Guesgen J, Lutz R, Miehe B, Moerland P, Parrish J, Reinardy R, Schenk F, Thompson I and Uys E. (2006). *The Allianz Arena*. *The Arup Journal*, No1. pp. 24-31.
- Foster B and Mollaert M. (2004). *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, TensiNet.
- Gründig L, Moncrieff E, Singer P and Ströbel D. (2000). *A History of the Principal Developments and Applications of the Force Density Method in Germany*. In *Proc. IASS-IACM 2000*, June 4-7, Greece. 13 p.
- Kulbach V. (2007). *Cable Structures - Design and Static Analysis*, Estonian Academy Publishers, Tallinn. 224 p.
- Lewis WJ. (2003). *Tension Structures – Form and Behaviour*, Thomas Telford Publishing. 256 p.
- Linkwitz K. (1999). *About Formfinding of Double-Curved Structures*. *Eng. Struct.*, Vol.21:No8. pp. 709-718.
- Jermoljev D and Machacek J. (2012). *Interaction of Non-Metallic Membranes With Supporting Steel Structure*. In *Proc. METNET Seminar 2012 in Izmir, HAMK*, October 10-11, Turkey. pp. 42-53.
- Majorana CE, Salomoni VA, Mazzucco G and Pauletti RMO (2012). *Large Membrane Roof Analysis: Nonlinear Modeling of Struct., Connect. and Exper. J of Architectural Engineering*, Vol.16:No4. pp. 151-163.
- Pauletti RMO and Brasil RMLRF. (2005). *Structural Analysis and Construction of the Membrane Roof of the Mem. dos Povos de Belém do Pará*. In *Proc. of the 2nd Simp. Latinoamer. de Tensoestructuras*, Caracas. 10 p.
- Seidel M. (2009). *Tensile Surface Structures - A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*, John Wiley & Sons. 240 p.
- Wakefield DS. (1999). *Engineering Analysis of Tension Structures: Theory and Practice*. *Eng. Struct.*, Vol.21:No8. pp. 680-690.