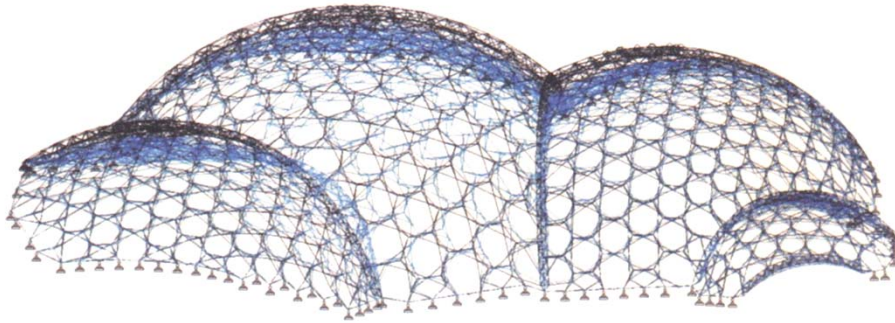


Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Inženjerske građevine
VLAČNE STRUKTURE



prof. dr. sc. Zlatko Šavor

Sadržaj:

- 1. uvod**
- 2. traženje oblika (*form finding*)**
- 3. materijali**
- 4. opterećenja**
- 5. primjeri (*case studies*)**

1. *Uvod*

1. UVOD

definicija vlačnih građevina:

- građevine gdje je jedan ili više elemenata glavne nosive strukture u vlaku
- vlačne građevine: membrane, krovovi sa kabelima, viseći mostovi, jarboli
- vlačni elementi: zatege, užad, tkanine

povijesni razvoj:

- najveći razvoj vlačnih građevina odvija se u posljednjih 60-ak godina
- prvi su se tom problematikom bavili njemački inženjeri Frei Otto i Jörg Schlaich, a kasnije i američki i japanski

1. UVOD

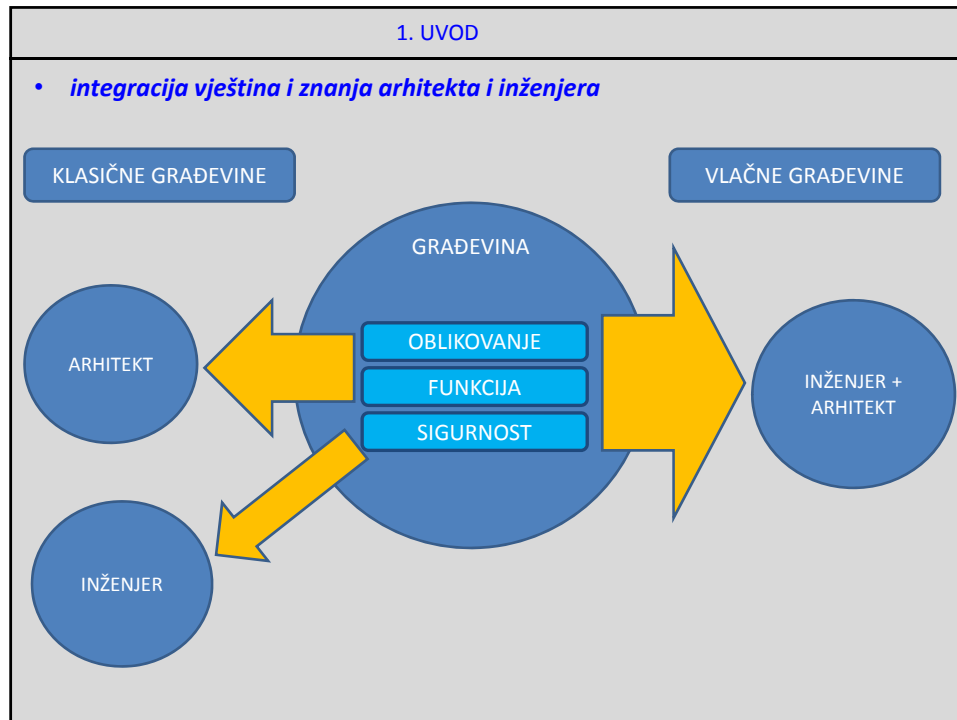
prednosti vlačnih građevina:

- pogodne za velike raspone
- velike mogućnosti oblikovanja i estetskih vrijednosti (umjetničkih izražaja)
- mali utrošak gradiva
- mogućnosti lake montaže, demontaže i reciklaže

1. UVOD

nedostatci vlačnih građevina:

- kompleksan (i skup) proces izračuna i izvedbe
- oblik strukture se ne može nametnuti – mora se pronaći
- izrazito geometrijski nelinearno ponašanje
- nemogućnost preuzimanja tlačnih naprezanja, savijanja i posmika
- mala dozvoljena iskoristivost naprezanja pri prednapinjanju zbog rezerve za ostala djelovanja



1. UVOD

podjela vlačnih građevina:

- rubno napete membrane**
- pneumatske strukture**
- Prednapete mreže i grede**

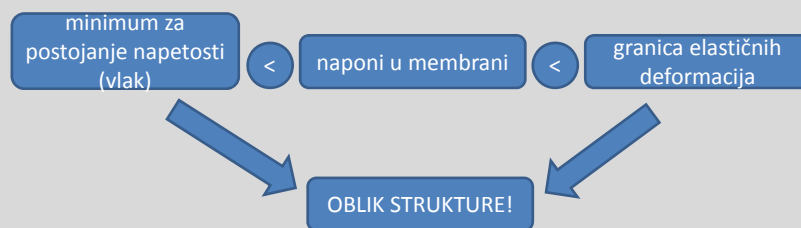
Millennium Dome,
Greenwich, London (2000)

Tokyo Dome,
Tokyo, Japan (1988)

most *Akashi Kaikyo,*
Hyogo, Japan (1998)

1. UVOD / RUBNO NAPETE MEMBRANE

- rubno napete membrane su konstrukcije gdje se membrana napinje (navlači) kako bi zadovoljila postavljene rubne uvjete
- rubni uvjeti su određeni unaprijed postavljenim okvirima, gredama i/ili kablovima
- razina napinjanja je određena da kroz vijek trajanja (za sva opterećenja) bude zadovoljeno:



1. UVOD / RUBNO NAPETE MEMBRANE

- naprezanja od dodatnih opterećenja (vjetar, snijeg...) mogu se povećati i do 10 puta
- inicijalni prednapon zato mora biti na otprilike 1/20 vlačne čvrstoće materijala
- vlačna čvrstoća je vrijednost dobivena uniaksijalnim naprežanjem čiste, nove i suhe tkanine, a na nju utječu:
 - temperatura
 - vlaga
 - puzanje
- tkanine se izrađuju od:
 - prirodnih vlakana (pamuk)
 - keramike (fiber-glass)
 - sintetičkih organskih materijala (poliester)
- premazuju se polimerima ili teflonom za poboljšanje vodonepropusnosti i glatkoće

1. UVOD / RUBNO NAPETE MEMBRANE

- primjeri izvedenih *rubno napetih membrana*:



Olimpijski stadion,
München, Njemačka (1972)



Montreal Olympic Velodrome,
Quebec, Kanada (1976)

1. UVOD / RUBNO NAPETE MEMBRANE

- primjeri izvedenih *rubno napetih membrana*:



Ulazni dio za Parque Expo '98,
Lisabon, Portugal (1998)



University of La Verne Boasts,
Buffalo, USA (1973)

1. UVOD / PNEUMATSKE STRUKTURE

- **pneumatske strukture** čine membrane koje su napete unutarnjim pritiskom zraka koji generiraju ventilatori
- oblik im je definiran razlikom unutarnjeg i vanjskog pritiska koji može varirati s obzirom na temperaturu i opterećenja snijega i vjetra
- unutarnji pritisak se nalazi u granicama od $0,2 \text{ kN/m}^2$ do $0,55 \text{ kN/m}^2$
- do gubitka stabilnosti i/ili lokalnog oštećenja strukture može doći uslijed:
 - djelovanja vjetra
 - djelovanja snijega (od $1,2 \text{ kN/m}^2$ do $2,4 \text{ kN/m}^2$ - veće od unutarnjeg pritiska pa se uvodi grijanje unutarnjeg zraka radi topljenja snijega)
 - masa zraka unutar membrane može se aktivirati uslijed dinamičkog djelovanja vjetra
- uobičajeni faktori sigurnosti su $\gamma_M = 6$ za materijal i $\gamma_F = 1,5$ za djelovanja

1. UVOD / PNEUMATSKE STRUKTURE

- primjeri izvedenih **pneumatskih struktura**:



natkrivanje sportskih terena



1. UVOD / PNEUMATSKE STRUKTURE

- primjeri izvedenih *pneumatskih struktura*:

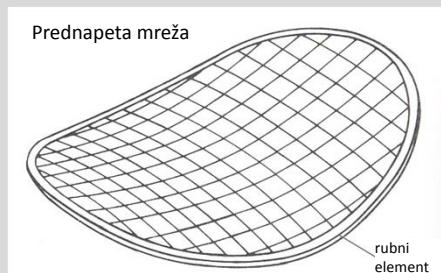
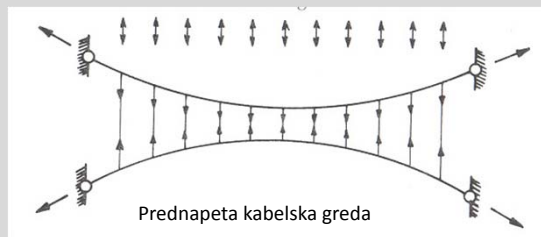


Eden Project, Cornwall, UK



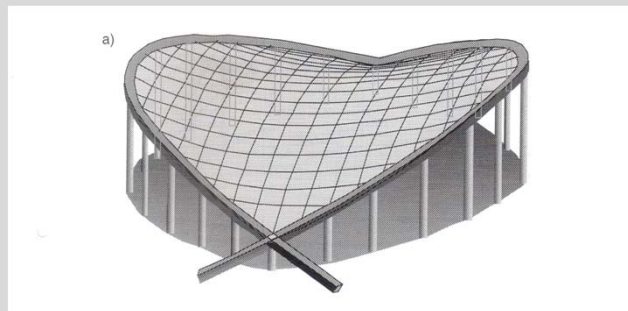
1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- *razlika sustava prednapetih greda i mreža*:



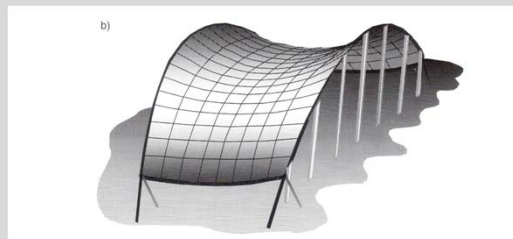
1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- ***prednapeta mreža*** – sličnost s membranom – membrana (prostorni element) načinjena od sustava kablova (linijski elementi)
- mogući sustavi ***prednapetih mreža***:
 - a) ***prednapeti direktno na kruti oslonac*** (npr. tlačni prsten)

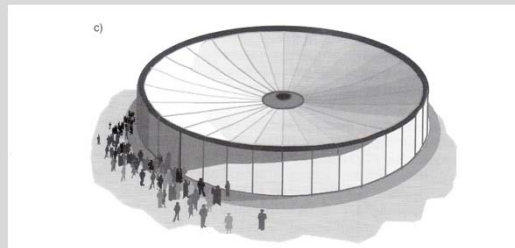


1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- b) ***prednapeti na fleksibilni oslonac*** koji je oslonjen na jarbole i stabiliziran zategama

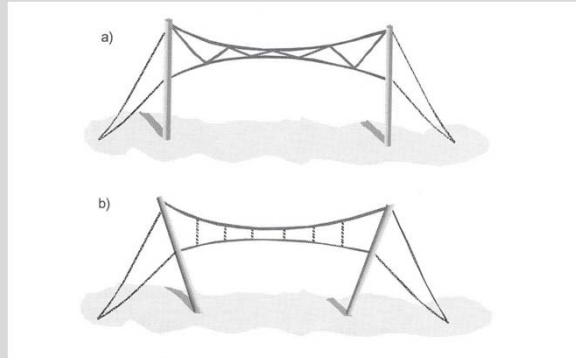


- c) ***viseće strukture*** stabilizirane teškim pokrovom



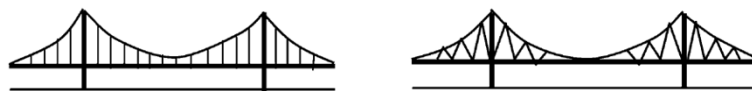
1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- **vanjskim kabelima prednapeta greda** – dvodimenzionalna verzija kableske mreže
- mogući sustavi **vanjskim kabelima prednapetih greda** :
 - a) **rešetke prednapete vanjskim kabelima**
 - gornji i donji pojas i ispuna od kablova koji su svi u vlak
 - **oblik i prednapon** moraju osigurati **vlak** kroz čitav vijek **trajanja** građevine



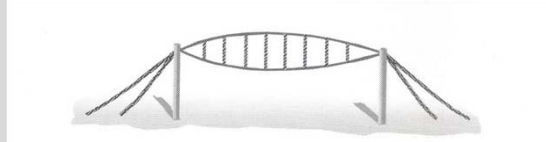
1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- **vanjskim kabelima prednapeta greda** – dvodimenzionalna verzija kableske mreže
- mogući sustavi **vanjskim kabelima prednapetih greda**:
 - a) **rešetke prednapete vanjskim kabelima**
 - moguća varijanta: viseća struktura gdje je glavni kabel stabiliziran teškim ovješnim elementima (viseći most)

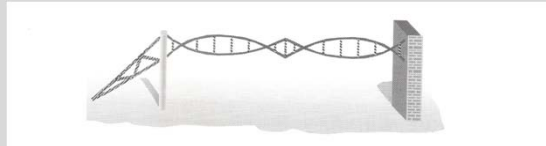


1. UVOD / PREDNAPETE MREŽE I GREDE

- mogući sustavi **vanjskim kabelima prednapetih greda**:
 - b) **nosači prednapeti vanjskim kabelima**
 - ispunja između gornjeg i donjeg pojasa su tlačni elementi
 - manje fleksibilni sustavi od kabelskih rešetaka



- c) **hibridni sustavi nosača i rešetaka prednapetih vanjskim kabelima**



- *prednapon* u elementima određuje deformacije i otpornost na zamor
- *povećanjem prednapona povećava se i cijena*, pa **krutost treba povećavati iteracijama geometrije**, a određene deformacije se moraju tolerirati

1. UVOD / POSTUPAK PROJEKTIRANJA VLAČNIH MEMBRANA

- **postupak se može podijeliti u 4 koraka:**
- 1. **pronalaženje oblika (form finding):**
 - potrebno je odrediti osnovni oblik strukture
 - iterativni postupak gdje se oblik postepeno korigira dok ne dođe u stanje statičke ravnoteže i zahtijevane razine prednapona (**izrazita geometrijska nelinearnost**)
- 2. **krojenje materijala:**
 - **trodimenzijski oblik napete strukture mora se pretvoriti u dvodimenzijski oblik** opuštenog materijala za krojenje i rezanje
 - čitava površina se mora izraditi od traka širine 2-3 m uz minimalni otpad
 - problem se rješava pomoću fizikalnih modela u mjerilu ili računalnih modela, ili kombiniranim metodama, uz određenu toleranciju greške



fizikalni model

izvedena konstrukcija

1. UVOD / POSTUPAK PROJEKTIRANJA VLAČNIH MEMBRANA

- *postupak se može podijeliti u 4 koraka:*

3. *statička analiza:*

- *računanje napona i deformacija pod zadanim opterećenjem na zadani oblik*
- proračun se vrši iterativno – *geometrijski nelinearno*
- ova nelinearnost nije toliko naglašena kao kod *form finding* postupka pa je konvergencija mnogo brža

4. *dinamička analiza:*

- nije uputno koristiti koeficijente oblika koji vrijede za konvencionalne građevine
- zato se provode ispitivanja u vjetrovnim tunelima na modelima da se odrede ovi koeficijenti
- pogreške ovakvih ispitivanja su česte zbog veće krutosti membrana umanjenih mjerilom modela
- konzervativni proračun podrazumijeva primjenu ekvivalentnog statičkog opterećenja i općenito je na strani sigurnosti

2. *Iznalaženje oblika (Form finding)*

2. FORM FINDING

ZADATAK:

- pronaći optimalni oblik koji će zadovoljiti funkciju i trajnost uz minimalni trošak

PROBLEM FORM FINDING-a:

- oblici vlačnih struktura se često ne mogu opisati matematičkim izrazima ili ti izrazi nisu direktno rješivi

RJEŠENJE PROBLEMA:

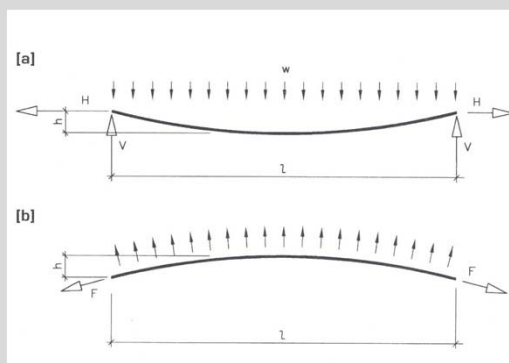
promatranje oblika iz prirode:

- *priroda uvijek troši minimum energije za ostvarivanje određene namjene!*

2. FORM FINDING

ELEMENTARNE ANALITIČKE METODE:

- osnovna načela nosivosti membrana i užadi mogu se prikazati na jednostavnom dvodimenzionalnom sustavu:



$$V = \frac{wl}{2} \quad H = \frac{wl^2}{8h}$$

$$F = \sqrt{(V^2 + H^2)} = \frac{w(l^2 + 4h)}{8h}$$

$$\text{duljina luka } A = 2 \left[\frac{l^2}{4} + \frac{4}{3}h^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{izduženje } \delta A = \frac{FA}{E}$$

$$\text{nova duljina } A' = A + \delta A$$

$$\text{novi provjes } h' = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{A'^2 - l^2}$$

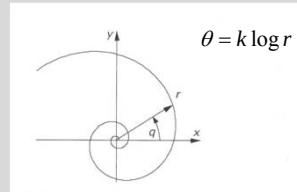
- novi provjes se ponovno ubacuje u početni izraz za silu i čitav postupak se ponavlja
- iteracije se nastavljaju sve dok početni (ciljani) i završni provjes nisu usporedivi

2. FORM FINDING

PRIMJERI IZ PRIRODE:

primjer: rast školjke – jednolik rast uz identičan oblik tokom rasta

primjer životinjske kandže – oblik omogućava da se vanjska sila prenosi aksijalno



primjer: rast drveća – jednolika raspodjela naprezanja na granama i deblu

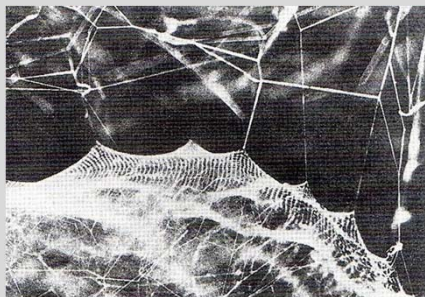
masa ne postoji na dijelovima koji ne sudjeluju u nosivosti !



2. FORM FINDING

PRIMJERI IZ PRIRODE:

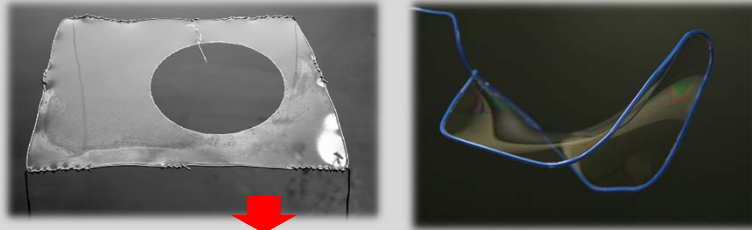
mreža pauka Cyrtophora i Hellabrunn Aviary, München (Frei Otto)



2. FORM FINDING

KONCEPT MINIMALNE POVRŠINE (ENERGIJE):

- prirodna struktura uvijek će poprimiti takav oblik pri kojem će potencijalna energija naprezanja unutar te strukture biti minimalna
- ovo načelo je najuočljivije na primjeru medija sapunice:



- na ravninskom okviru od žice razvijemo film od sapunice
- unutar tog filma "ugradimo" petlju načinjenu od konca
- ako probijemo film sapunice unutar ove petlje, ona će zauzeti oblik kružnice
- kružnica je oblik koji okružuje maksimalnu površinu za zadani opseg: $A/O=\max$
- ako je površina unutar kružnice maksimalna, tada je površina ostatka filma od sapunice minimalna => **naprezanje u sapunici minimizira napetu površinu**
- **ako je napeta površina minimalna, minimalna je i njena potencijalna energija!**

2. FORM FINDING

KONCEPT MINIMALNE POVRŠINE (ENERGIJE):

potvrda ove zakonitosti slijedi iz analize teorema Euler-Lagrange: $p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$

p : razlika u pritisku vanjske i unutarnje površine plohe

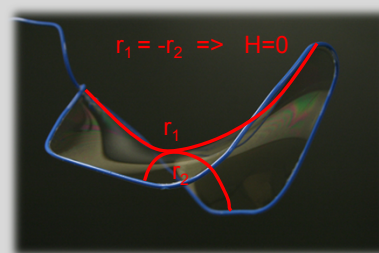
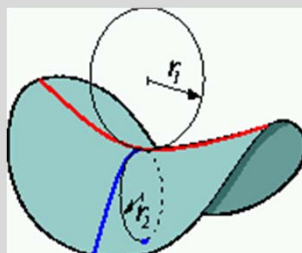
σ : naprezanje u plohi

r_1, r_2 : maksimalni i minimalni radijus zakrivljenosti presječna plohe sa dvjema međusobno okomitim ravninama koje su istovremeno okomite i na tangencijalnu ravninu promatrane točke plohe

$p=0$ (osim kod pneumatskih struktura), a σ je konstanta, pa slijedi: $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = 0$

može se definirati pojam srednja zakrivljenost: $H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$

Ploha sa najmanjom površinom ima u svakoj točki srednju zakrivljenost nula!



2. FORM FINDING

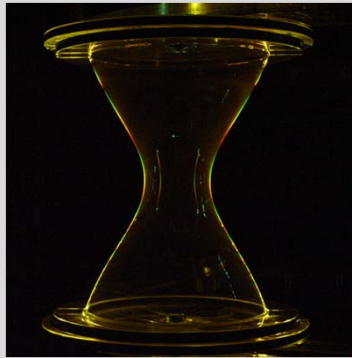
KONCEPT MINIMALNE POVRŠINE (ENERGIJE):

obrnuto ne vrijedi:

Ploha koja u svakoj točki ima srednju zakrivljenost nula ima najmanju površinu!

stoga se u matematici uvodi podjela:

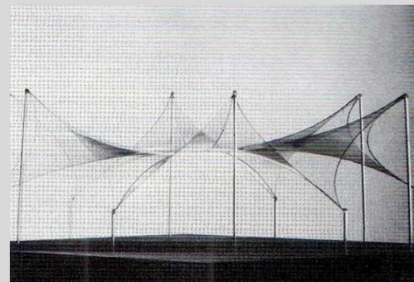
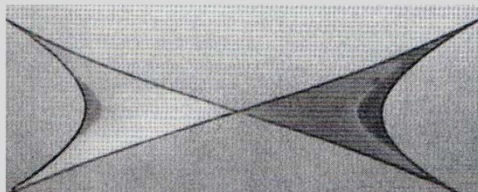
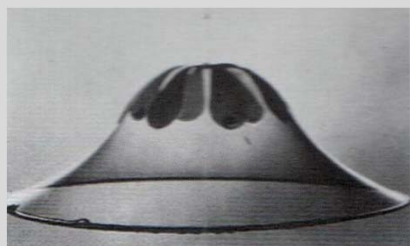
- **stabilne minimalne površine** – one koje imaju **najmanju površinu plohe**
 - **nestabilne minimalne površine** – one koje imaju **srednju zakrivljenost nula**
- u kontekstu vlačnih struktura nas interesiraju samo stabilne min. površine!**



2. FORM FINDING

KONCEPT MINIMALNE POVRŠINE (ENERGIJE):

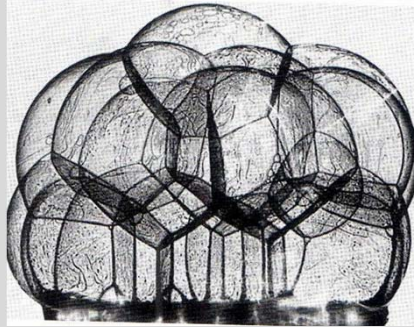
- primjeri modela od sapunice za dobivanje minimalnih površina vlačnih građevina:



2. FORM FINDING

KONCEPT MINIMALNE POVRŠINE (ENERGIJE):

- *primjeri modela od sapunice za dobivanje minimalnih površina vlačnih građevina:*

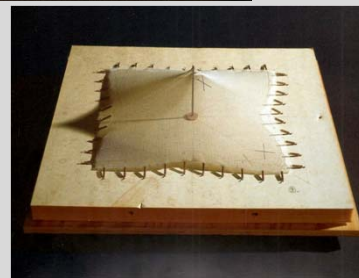
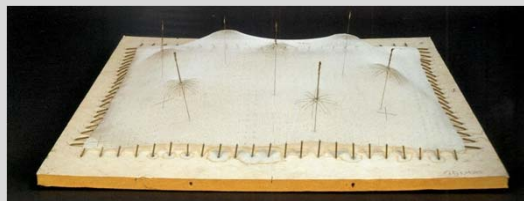


2. FORM FINDING

METODOLOGIJA FORM-FINDING-a:

koriste se dvije metode:

1. izrada fizikalnih modela u umanjenom mjerilu od sapunice, tkanine, papira...
2. izrada kompjuterskih modela koristeći različite numeričke tehnike i iteracije

fizikalni modeli

2. FORM FINDING

FIZIKALNI MODELI:

primjer: **Olimpijski stadion u München-u (1972)**

- model u mjerilu od 1:125
- fotogrametrijskih mjerenjem modela definirani su oblici za rezanje (*patterning*)
- pojavila se sistematska greška – na 750 mm širine mreže iznosila je 0,75 mm
- ovo je uzrokovalo ukupnu grešku u duljini kablova pa je došlo do preraspodjele sila
- ovo iskustvo pokazalo je da fizikalni modeli nisu *per se* pouzdana metoda *form-finding*-a, nego da se moraju kombinirati sa računalnim modelima
- fizikalni modeli su i dalje najbolji i često jedini način ispravne vizualizacije građevine

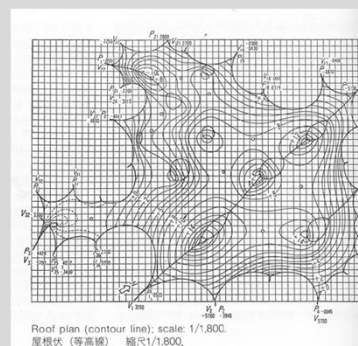


2. FORM FINDING

FIZIKALNI MODELI:

primjer: **Njemački Paviljon na Montreal Expo 1967 (Frei Otto)**

– korišteni su modeli od sapunice i tkanine



2. FORM FINDING

FIZIKALNI MODELI:

primjer: *Abidjan Arts Centre* – natkrivanje muzeja, kazališta i komercijalnog prostora

- model je predviđao natkrivanje 10.760 m² sa mrežom kablova
- mreža je poduprta jarbolima kao tlačnim elementima



2. FORM FINDING

FIZIKALNI MODELI:

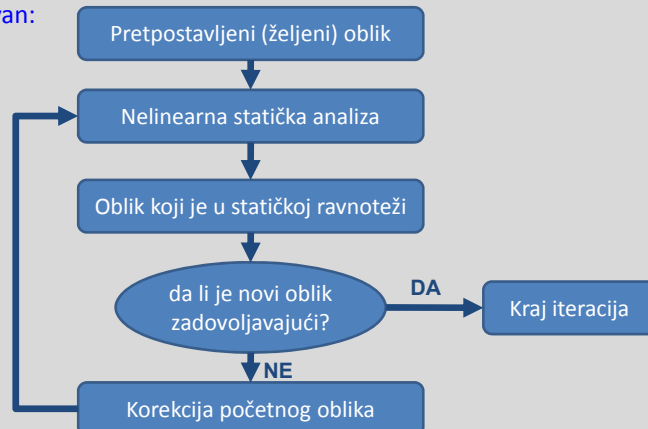
- **Frei Otto** izučavao membranske forme na fizikalnim modelima



2. FORM FINDING

RAČUNALNI MODELI:

- niz grafičkih i numeričkih podataka koji opisuju oblik strukture i naprezanja i deformacije u njenim točkama za određene kombinacije djelovanja
- postupci računalnih proračuna - metoda minimalne energije (površine) – **stabilna struktura je ona struktura koja ima pohranjenu minimalnu potencijalnu energiju u kablovima za njihovu minimalnu duljinu**
- postupak je iterativan:



2. FORM FINDING

RAČUNALNI MODELI:

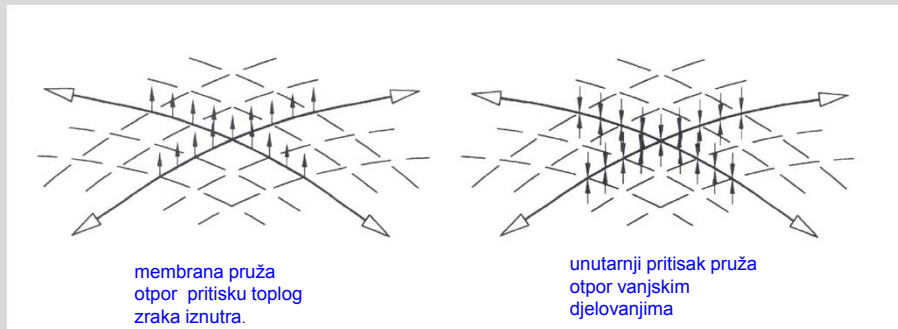
Numerički algoritmi *form finding*-a mogu biti usmjereni na nekoliko ciljeva:

1. **iznalaženje optimalnog oblika vlačne membrane (minimalna površina):**
 - zadaje se samo granica strukture, oblik membrane je potpuno slobodan
2. **iznalaženje oblika membrane koji je u statičkoj ravnoteži, ali nema nužno jednoliki napon u svim točkama:**
 - zadan početni oblik membrane

2. FORM FINDING

PLOHE S ZAKRIVLJENOSTIMA ISTOG PREDZNAKA – SINKLASTIČKE PLOHE:

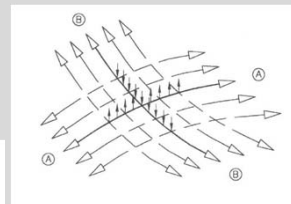
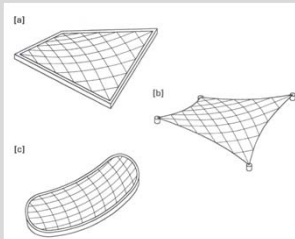
- obično pneumatske plohe sa razlikom u pritisku na dvije strane plohe
- opterećenja koja djeluju prema van (odižuće djelovanje vjetra) preuzimaju se povećanjem naprezanja u membrani
- opterećenja koja djeluju prema unutra (vjetar, snijeg) preuzimaju se smanjivanjem ukupne razlike vanjskog i unutarnjeg tlaka (neutralizacija pneumatskog pritiska)



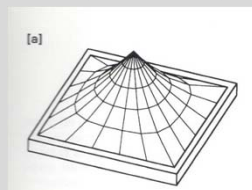
2. FORM FINDING

PLOHE S ZAKRIVLJENOSTIMA RAZLIČITOG PREDZNAKA – ANTIKLASTIČKE PLOHE:

- **jedino ove plohe mogu imati minimalnu površinu!**
- dobivaju se:
 - oblikovanjem rubnog oslonca u prostoru



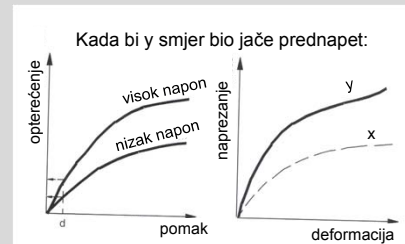
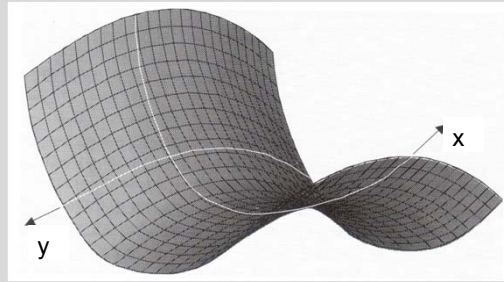
- rubni oslonac je u ravnini ali je jedna točka plohe izvučena iz te ravnine



2. FORM FINDING

PLOHE S ZAKRIVLJENOSTIMA RAZLIČITOG PREDZNAKA – ANTIKLASTIČKE PLOHE:

- varijabilna dodatna opterećenja (vjetar, snijeg...) uzrokuju dodatna naprezanja koja tada uzrokuju nejednoliku sliku naprezanja u glavnim smjerovima membrane
- od vertikalnog opterećenja (npr. snijeg) u x-smjeru će se naprezanja povećati, a u y-smjeru smanjiti – ima li smisla početno uvesti jednaki prednapon u oba smjera?

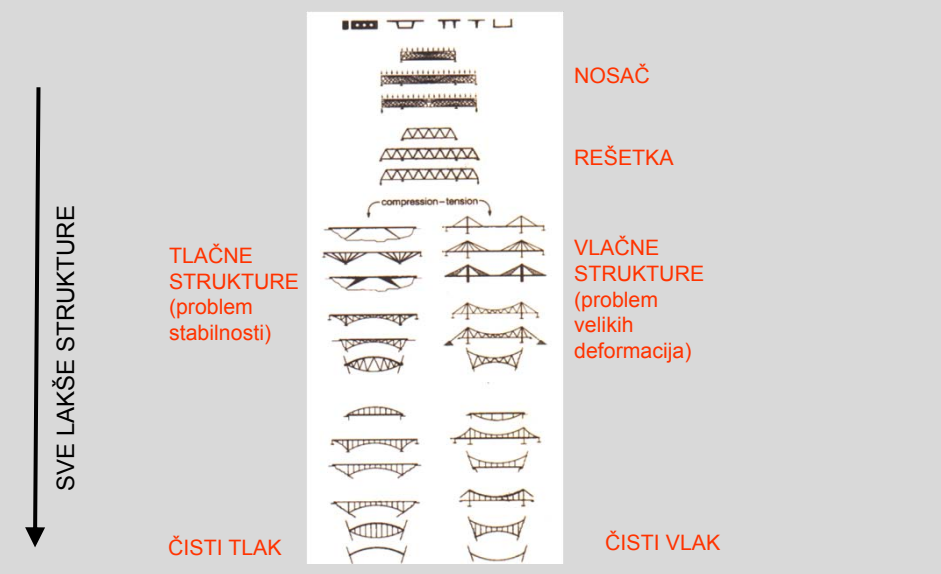


Da, zato što bi različiti prednapon definirao i različitu krutost u tim smjerovima što znači da smjer sa većom krutosti (veći prednapon) za jednak pomak dobiva veći prirast naprezanja!

2. FORM FINDING

PRAVILA ZA SMANJIVANJE TEŽINE – KARAKTERISTIKE LAKIH STRUKTURA:

- izbjegavati nosivost savijanjem!



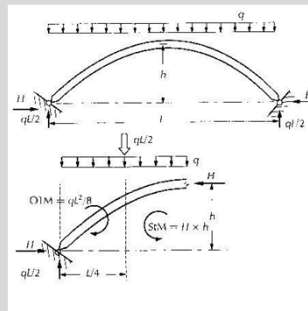
2. FORM FINDING

PRAVILA ZA SMANJIVANJE TEŽINE – ZNAČAJKE LAKIH STRUKTURA:

- tlačna sila treba biti prenijeta što kraćim elementima kako bi se izbjegli problemi stabilnosti i smanjila potreba za ukrutnim elementima



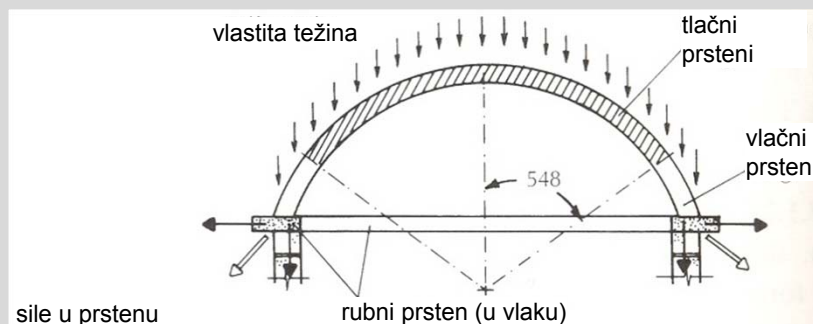
- ako tlačnu silu treba prenijeti na većoj udaljenosti, treba omogućiti da ona prolazi statičkim sustavima, koji su samo-stabilizirajući (prednapeti elementi)
- tlačnim elementima u ravnini treba dati oblik koji će im osigurati stabilnost



2. FORM FINDING

PRAVILA ZA SMANJIVANJE TEŽINE – KARAKTERISTIKE LAKIH STRUKTURA:

- sile koje se javljaju u elementima strukture potrebno je pokušati međusobno uravnotežiti umjesto da ih se direktno prenosi na temelje



- upotreba lakih materijala
- multifunkcionalnost elemenata strukture – pregradni zidovi ujedno i nosivi...

2. FORM FINDING

ODSTUPANJE OD OBLIKA MINIMALNE POVRŠINE:

- potrebno je ugraditi dodatne elemente (kablove), da se ostvari drugačiji oblik koji odstupa od "prirodnog stanja" (optimalne forme)
- konstrukcija će tokom vremena "puzati" prema svom prirodnom stanju -> dodatne deformacije i preraspodjela naprezanja tokom vremena
- primjer: **Millenium Dome** – namjerno odstupanje od prirodne forme radi drugačijeg arhitektonskog dojma – potreba za 7 puta više kablova



Projektiranje koje teži prirodnom stanju daje stabilne, trajne i estetski prihvatljive građevine. "Dobra" arhitektura nije uvijek isto što i "lijepa" arhitektura.

3. Materijali

3. MATERIJALI

- unaprjeđenje i razvoj novih materijala su primarni faktor za upotrebu vlačnih struktura

metalni materijali:

- galvanizirano željezo, legure aluminija, nehrđajuči čelici visokih čvrstoća

nemetali:

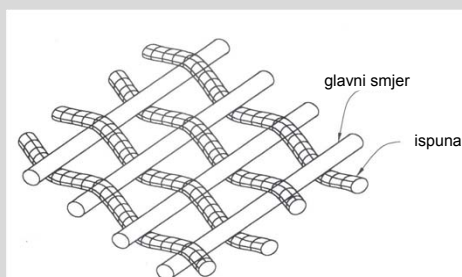
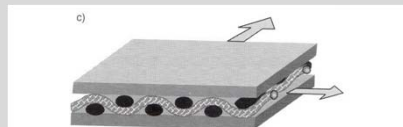
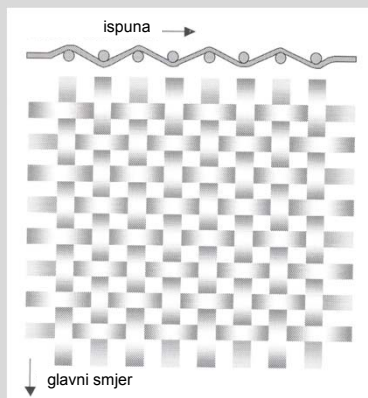
- staklo ojačano vlakancima (*fiberglass*), plastika, drvene ploče
- tkanine – PVC obložen polyesterom, *fiberglass* obložen PFTE-om (teflonom)

kompozitni materijali:

- karbonski ojačana plastična vlakna (*carbon reinforced plastic fibers - CRPF*)

3. MATERIJALI

- prikaz tipičnog platna – dva smjera pružanja vlakanca
- u jednom smjeru vlakanca su ravna (glavni smjer), a u drugom valovita jer se isprepleću s prvim smjerom (ispuna)
- pri opterećenju u smjeru ispune glavni smjer se skraćuje, jer se vlakanca iz smjera ispune ispravljaju pritom kriveći glavni smjer
- općenito je platno kruće u glavnom smjeru, a mekše u smjeru ispune



3. MATERIJALI

- vlačni elementi mogu se dodatno optimizirati povećavanjem svojstva "duljine pucanja" (eng. *rupture length*)

- $$\text{duljina pucanja} = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{\text{čvrstoća}}{\text{jedinična težina}} = \frac{[\text{kN/m}^2]}{[\text{kN/m}^3]} = [\text{m}]$$

- odnos β/γ , dakle, predstavlja kritičnu duljinu pri kojoj puca nit koja visi i to samo pod djelovanjem svoje vlastite težine

- drvo je u tom smislu čak učinkovitije od čelika, dok su kompozitna gradiva najučinkovitija

3. MATERIJALI

- neke vrijednosti odnosa β/γ :

MATERIJAL klasični:	β (N/mm ²)	γ (N/m ³) x 10 ³	β/γ (m)
opeka	3	18	166,67
drvo	85/37,5	5	21 250 / 9375
beton	30	25	1 200
čelik 52	520	79,5	6664
čelik 105	1 050	79,5	13 376
titan	900	45	20 000

MATERIJAL kompozitni:	β (N/mm ²)	γ (N/m ³) x 10 ³	β/γ (m)
karbonska vlakna	1 400	15,5	90 000
tekstilno-karbonska vlakna	800	15,5	52 000
aramidska vlakna	1 600	13	123 000
kevlar	750	13	58 000
staklena vlakna	1 100	20	55 000
tekstilno-staklena vlakna	450	20	22 500

4. Djelovanja

4. DJELOVANJA

- vlačne građevine moraju biti projektirane na sva opterećenja kao i ostale građevine
- opterećenje vlastitom težinom je malo ($<0,5 \text{ kN/m}^2$) i često se zanemaruje
- dodatna opterećenja (pokrov) obično su manja od onih kod klasičnih građevina
- teška točkasta opterećenja (reflektori i semafori na stadionima...) predstavljaju osobiti problem zbog velike deformabilnosti membrana, pa ih treba izbjegavati postavljajući takva opterećenja na rubne grede ili jarbole
- opterećenje od potresa je zanemarivo zbog male mase konstrukcije
- opterećenje od snijega može biti mjerodavno (posebno u slučaju pneumatskih struktura), a također je bitno odgovarajuće riješiti odvodnju, jer se uslijed topljenja snijega (ili padanja kiše) mora izbjeći nakupljanje vode u konkavnim dijelovima membrane
- temperaturna opterećenja na tkanine obično se mogu zanemariti

4. DJELOVANJA

- posebna pozornost mora biti posvećena djelovanju vjetra zbog njegovih aerodinamičkih svojstava
- vlačne strukture imaju malu krutost i malu vlastitu frekvenciju, pa dinamički utjecaji mogu značajno povećati veličinu djelovanja vjetra

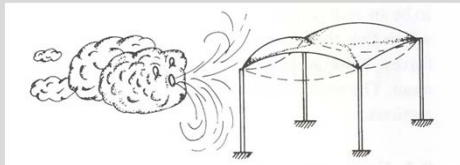
moгуće metode proračuna za djelovanje vjetra:

1. nazovi-statička metoda:

- manji rasponi
- koristeći faktore oblika izračuna se ekvivalentno statičko opterećenje i proračun se dalje vrši nelinearno

2. dinamička analiza:

- veći rasponi (fleksibilnija struktura, velike deformacije)
- ispitivanja u vjetrovnim tunelima, *time-history* analiza

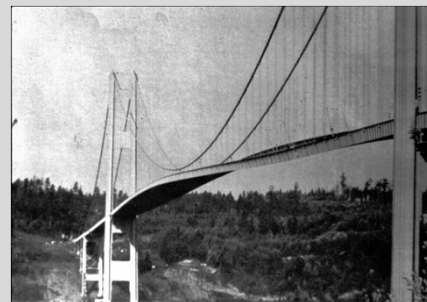


4. DJELOVANJA

razlozi zašto nazovistatička analiza često nije primjerena za vlačne strukture:

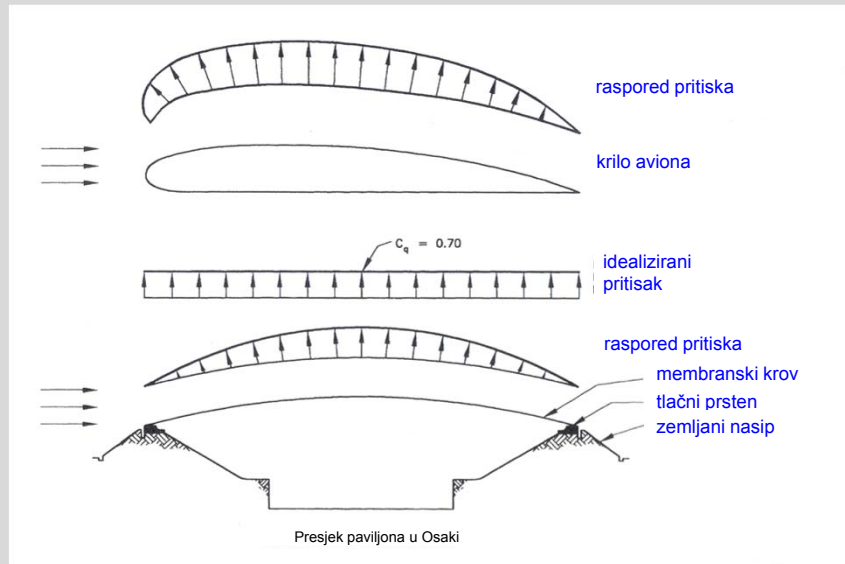
1. vjetar je djelovanje koje prvenstveno ovisi o obliku strukture na koju djeluje
2. kableske i membranske građevine su fleksibilne i lake i kao takve podložne velikim deformacijama
3. te deformacije mijenjaju njihov oblik pa se prema tome mijenja i opterećenje vjetrom tijekom vremena
4. promjenjivo djelovanje vjetra (brzina i smjer) može uzrokovati vibracije
5. krovovi i kablovi su nekonvencionalni oblici za koje često u propisima ne postoje faktori oblika

most Tacoma Narrows, flutter (1940)



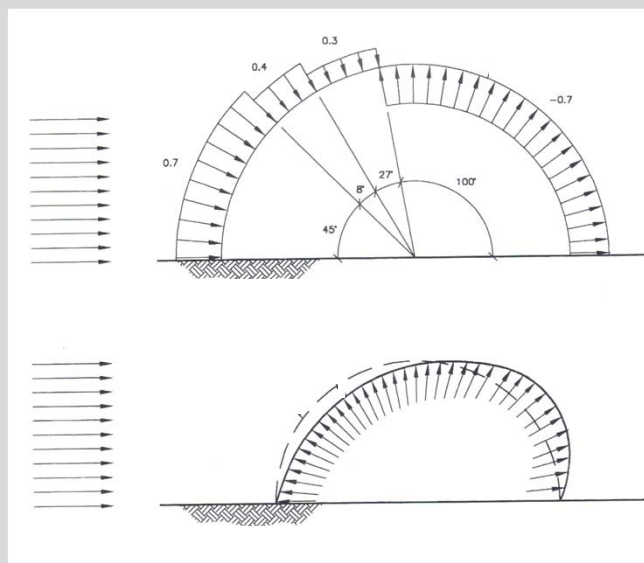
4. DJELOVANJA

- opterećenje vjetrom često djeluje odižuće (*lift*) što može biti osobito opasno



4. DJELOVANJA

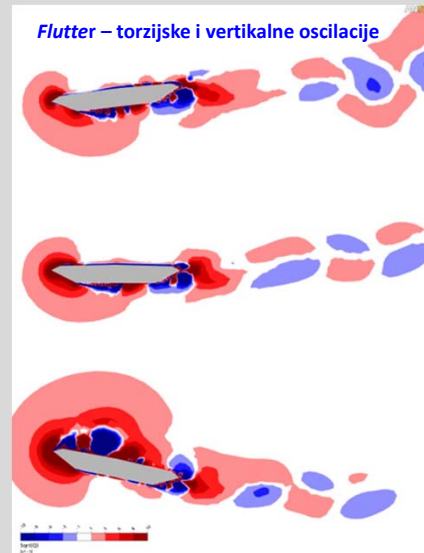
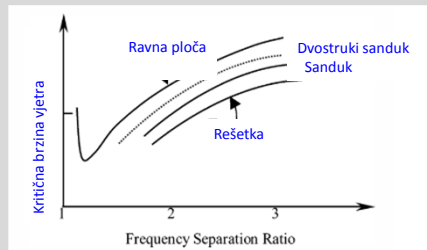
- djelovanje vjetra na pneumatske građevine može uzrokovati izjednačenje vanjskog i unutrašnjeg pritiska i gubitak stabilnosti



4. DJELOVANJA

aerodinamičko ponašanje konstrukcije ovisi o:

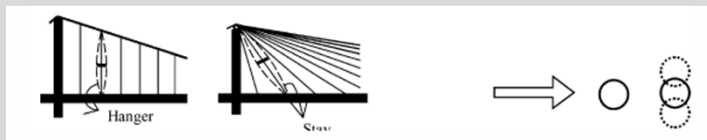
1. kutu djelovanja vjetra uključujući i topografiju terena
2. masi i geometriji konstrukcije
3. krutosti konstrukcije
4. vlastitoj frekvenciji konstrukcije
5. prigušenju konstrukcije



4. DJELOVANJA

problemi djelovanja vjetra na kablove:

- aerodinamička nestabilnost – **vrtoženje (von Karman)**



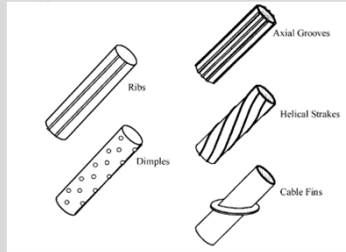
- naslage snijega mijenjaju poprečni presjek kabela i uzrokuju gubitak aerodinamične stabilnosti – **galopiranje**



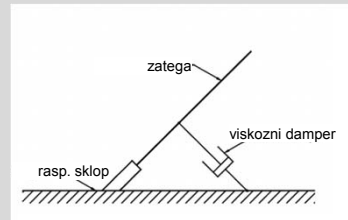
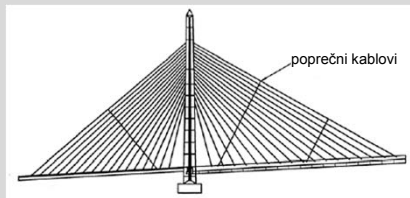
4. DJELOVANJA

problemi djelovanja vjetra na kablove:

- problemi **rain and wind** vibracija se rješavaju obradom površine zaštitne cijevi zatege – postavljaju se spiralni žljebovi za kontroliranu odvodnju vode



- ugrađuju se prigušivači poprečno na smjer pružanja zatega

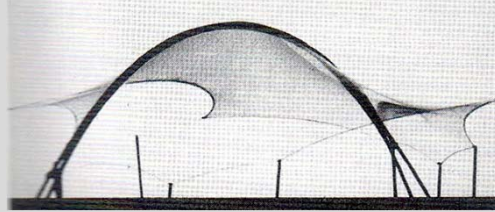


5. Primjeri

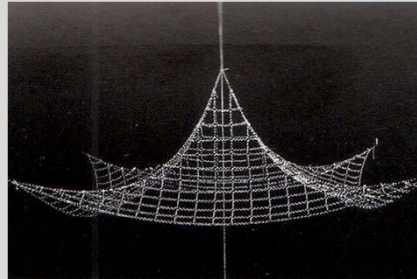
5. PRIMJERI

Frei Otto

- arhitekt, inženjer i znanstvenik koji je bio pionir u projektiranju lakih građevina
- svoja djela je radio prema uzorima iz prirodnih stanja
 - modeli iz sapunice:



- modeli lančanica:



5. PRIMJERI

Frei Otto

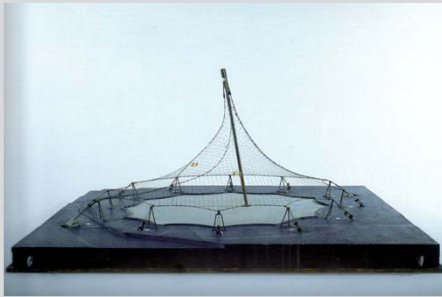
*Federal Garden Exhibition, Köln
(1957)*



IGA, Hamburg (1963)

5. PRIMJERI

Frei Otto

Institute for Light Weight Structures, Stuttgart (1967)

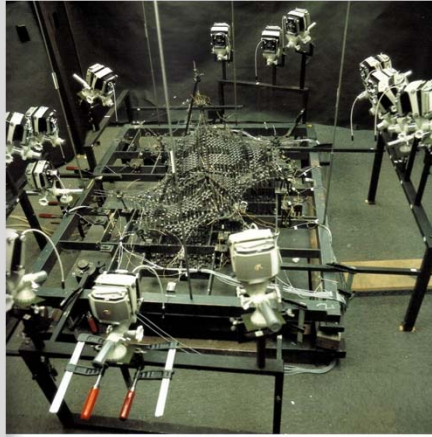
5. PRIMJERI

Frei Otto

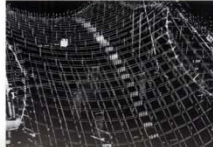
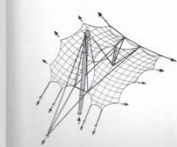
Expo Paviljon, Montreal (1967)

5. PRIMJERI

Frei Otto

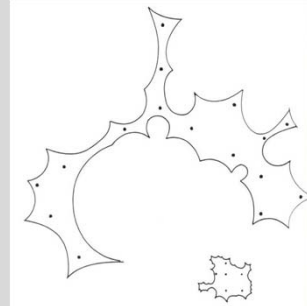


Models for Munich Olympics, measurement model with photogrammetric apparatus

*Olympic Stadium, München (1972)*

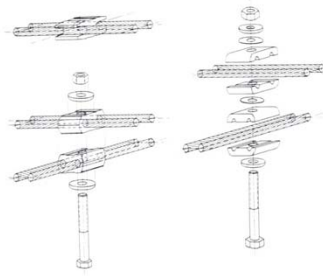
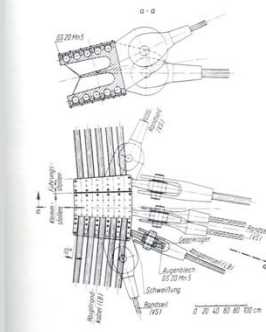
5. PRIMJERI

Frei Otto

Olympic Stadium, München (1972)

5. PRIMJERI

Frei Otto

Olympic Stadium, München (1972)

5. PRIMJERI

Frei Otto

Krov bazena, Regensburg (1972)

5. PRIMJERI

Frei Otto

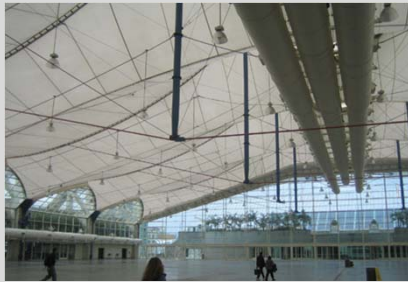
Sports Hall, Jeddah (1981)

5. PRIMJERI

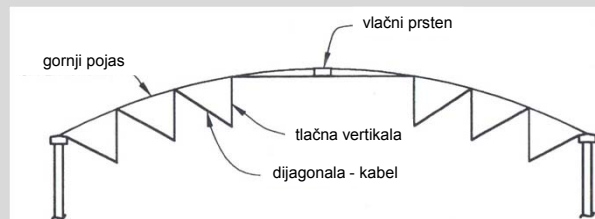
Aerodrom u Denveru

5. PRIMJERI

Konferencijski centar u San Diegu



5. PRIMJERI

Kupola sa kabelima - *Tropicana Dome Stadium, Florida (1990)*

5. PRIMJERI

Kupola sa kabelima - *Tropicana Dome Stadium, Florida (1990)*

5. PRIMJERI

Kupola sa kabelima - *Georgia Dome Stadium (1992)*

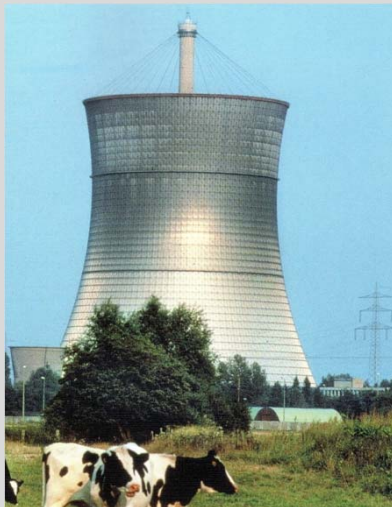
5. PRIMJERI

Kupola sa kabelima - Georgia Dome Stadium (1992)

5. PRIMJERI

Rashladni toranj atomske centrale od mreže kabela, Schmehausen (1974)

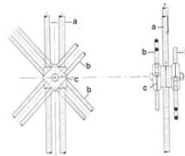
- mreža kablova je podignuta na središnji jarbol od betona
- gore i dolje su tlačni prstenovi sandučastog čeličnog presjeka
- kablovi su postepeno dodavani podizanjem svakog segmenta
- u konačnici je s unutarnje strane postavljena obloga



5. PRIMJERI

Rashladni toranj atomske centrale od mreže kabela, Schmehausen

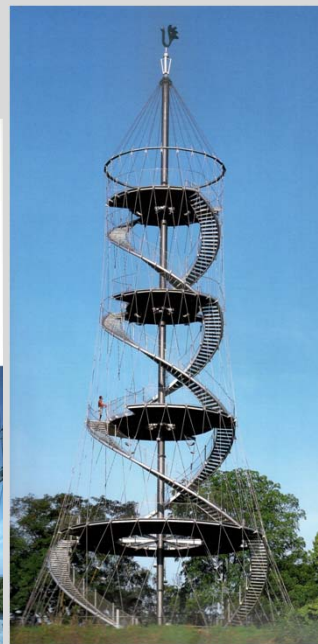
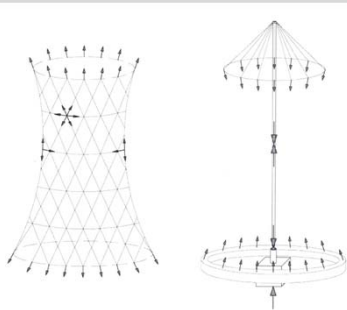
- mreža kablova je podignuta na središnji jarbol od betona
- gore i dolje su tlačni prstenovi sandučastog čeličnog presjeka
- kablovi su postepeno dodavani podizanjem svakog segmenta
- u konačnici je s unutarnje strane postavljena obloga



5. PRIMJERI

Toranj Killesberg, Stuttgart (2001)

- dvostruko spiralno stepenište
- platforme su obješene na mrežu od 48 kablova
- gore je tlačni prsten, dolje kružni temelj, a u sredini tlačni jarbol



5. PRIMJERI

Klizalište, München (1983)

- dvije mreže kablova koje se u sredini pomoću rubnog kabla napinju na vertikalni rešetkasti luk

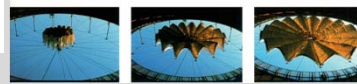
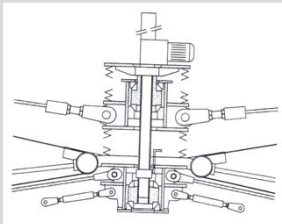
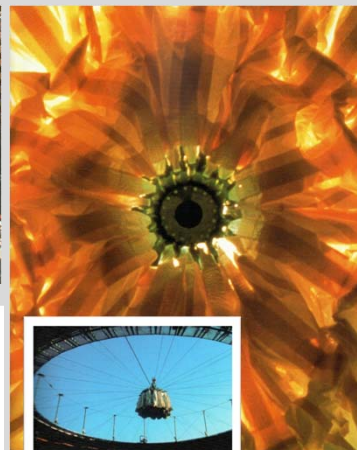


5. PRIMJERI

Krov Arene za borbu bikova, Zaragoza, Španjolska (1990)

- vanjska membrana je fiksna, a unutarnja se rastvara u slučaju potrebe za svega 2-3 minute

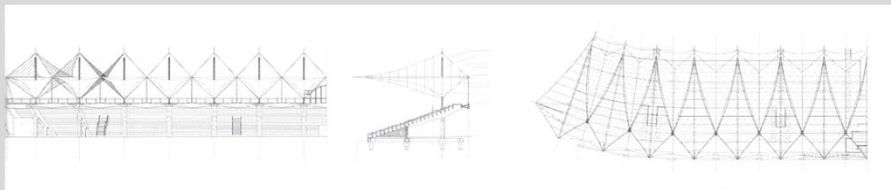
- u sredini su dva vlačna prstena ($2r=36m$) odvojena tlačnim štapovima, a na rubu tlačni prsten ($2r=83$)



5. PRIMJERI

Natkrivanje *Marschweg* stadiona, Oldenburg (1995)

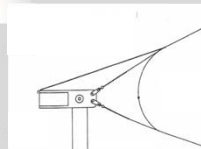
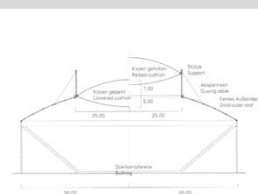
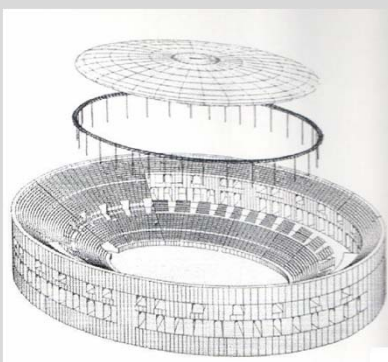
- 14 membranskih segmenata pravokutnog tlocrta je razapeto između horizontalnih konzolnih nosača
- membrane su prednapete spuštanjem jedne njihove točke za 4 m



5. PRIMJERI

zrakom napuhana membrana: *Rimski amfiteatar*, Nimes (1988)

- zimi se zračni jastuk razvuče iznad elipsastog čeličnog tlačnog prstena
- zračni jastuk se sastoji od dva sloja (membrane) – gornjeg i donjeg – donji se oslanja na mrežu kablova, a gornji je pridržan pritiskom zraka
- čitav jastuk se može pomicati gore-dolje kako bi dozvolio ulaz zraka i svjetla



5. PRIMJERI

zrakom napuhana membrana: Rimski amfiteatar, Nimes (1988)

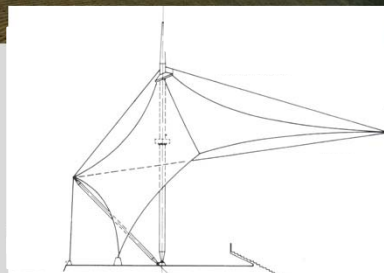
- zimi se zračni jastuk razvuče iznad elipsastog čeličnog tlačnog prstena
- zračni jastuk se sastoji od dva sloja (membrane) – gornjeg i donjeg – donji se oslanja na mrežu kablova, a gornji je pridržan pritiskom zraka
- čitav jastuk se može pomicati gore-dolje kako bi dozvolio ulaz zraka i svjetla



5. PRIMJERI

međunarodni stadion kralja Fahd-a, Riyadh, Saudijska Arabija (1985)

- "šatori" u kružnom rasporedu ostavljaju dojam divovskog cvijeta
- konstrukcija od jarbola i kablova bez tlačnog prstena, sila se prenosi direktno u temelje



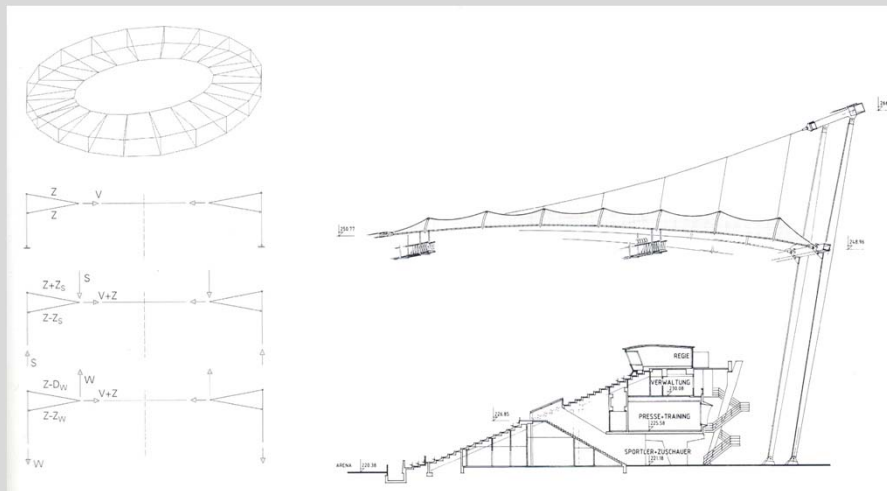
Gottlieb Daimler Stadion – nosivi sustav

- dva vanjska ovalna tlačna prstena s glavnim osima od 280m i 200 m oslanjaju se na 40 ekvidistantnih stupova
- unutrašnji vlačni prsten od 8 kabela $\varnothing 79$ mm i dva vanjska tlačna prstena povezani su sa 40 meridijalnih vezača od kabela, čiji donji kabeli nose membranu
- membrana je u radijalnom smjeru u svakom segmentu pridržana sa 7 radijalnih lukova sa zategom
- ti se lukovi oslanjaju se na donji kabel meridijalnih vezača na mjestima gdje je povezan s gornjim kabelom
- obzirom da membrana stabilizira lukove protiv izvijanja dovoljan im je promjer $D=200$ mm za raspon od $L=20$ m
- svi segmenti mebrane su predgotovljeni
- prema načelu vlastitog usidrenja (*self-anchoring*) sile u tlačnim prstenovima $D=u \cdot R_z$ moraju biti konstantne i jednake silama u vlačnom prstenu $Z=u \cdot R_z$
- uslijed promjenjivih radijusa tlačnih prstenova (u tlocrtu od 104m na zakrivljenim dijelovima do 248m u ravnim segmentima mijenjaju se i skretne sile, pa je sukladno prednapinjanje meridijalnih vezača u zakrivljenim segmentima veće nego u segmentima u pravcu
- gornji tlačni prsten je u ravnini gornjih kabela meridijalnih vezača morao biti oblikovan kao rešetka s dva prstena povezanih dijagonalama da se poveća svojnja krutost, zbog velike vitkosti i male zakrivljenosti nad ravnim dijelovima i jer se kod neravnomjerne raspodjele opterećenja snijegom moralo računati sa potpunim otpuštanjem prednapinjanja

5. PRIMJERI

Gottlieb Daimler stadion, Stuttgart (2005)

- dva vanjska tlačna prstena, jedan unutarnji vlačni
- na meridijalne kablove se oslanjaju lukovi na koje je napeta membrana krovišta



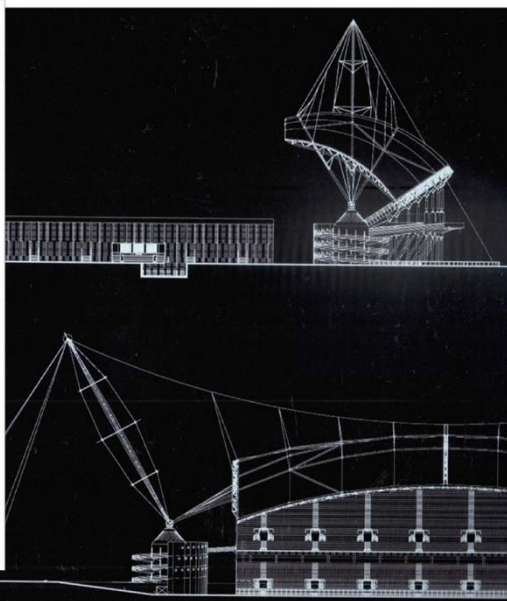
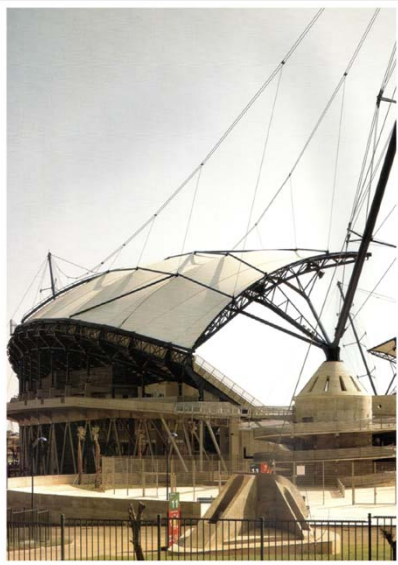
5. PRIMJERI

Gottlieb Daimler stadion, Stuttgart (2005)

- dva vanjska tlačna prstena, jedan unutarnji vlačni
- na meridijalne kablove se oslanjaju lukovi na koje je napeta membrana krovišta



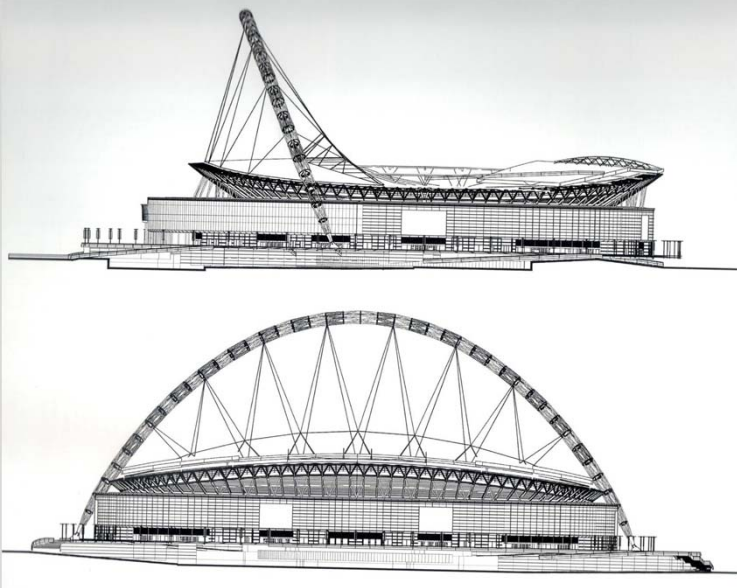
5. PRIMJERI

Stadion Estadio Algarve, Algarve, Portugal (2004)

5. PRIMJERI

Stadion *Estadio Algarve*, Algarve, Portugal (2004)

5. PRIMJERI

Stadion *Wembley*, London (2006)

5. PRIMJERI

Stadion Wembley, London (2006)



5. PRIMJERI

Estadio da Luz, Lisbon, Portugal (2003)



5. PRIMJERI

Millenium stadion, Cardiff, Wales (1999)

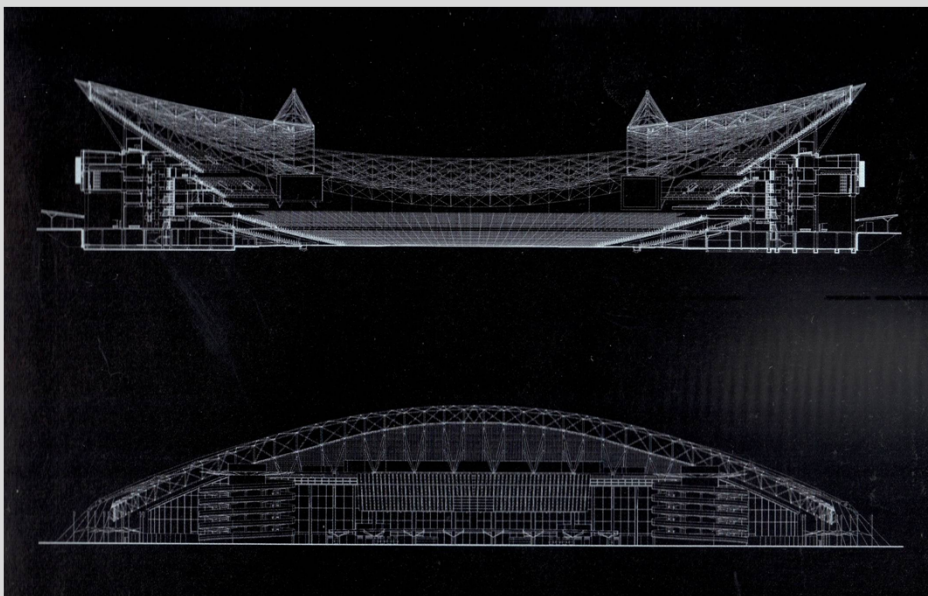
5. PRIMJERI

Reebok stadion, Bolton (1997)

5. PRIMJERI

Telstra stadion, Sydney, Australija (1999)

5. PRIMJERI

Telstra stadion, Sydney, Australija (1999)

5. PRIMJERI

Olimpijski stadion, Montreal (1988)

- membransko krovište od kevlara je nekoliko puta bilo potrgano vjetrom



5. PRIMJERI

Olimpijski stadion, Montreal (1988)

- membransko krovište od kevlara je nekoliko puta bilo potrgano vjetrom i snijegom



5. PRIMJERI

Millenium Dome, Greenwich (2000)

- 72 kabla raspoređena su meridijalno na površini membrane
- ovi kablovi su napeti vješaljima koje su pridržane na 12 rešetkastih čeličnih jarbola visine 100 m, i odozdo pridržani zategama
- sile od meridijalnih kablova prenose se na vanjske rubne kablove i unutrašnji vlačni prsten
- između kablova je razapeta membrana

