

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE

5. PREDAVANJE



Vlačne strukture

VLAČNE STRUKTURE – SADRŽAJ PREDAVANJA (1.dio)

□ Uvod

- Osnovni pojmovi i razvoj
- Prednosti i mane
- Suradnja

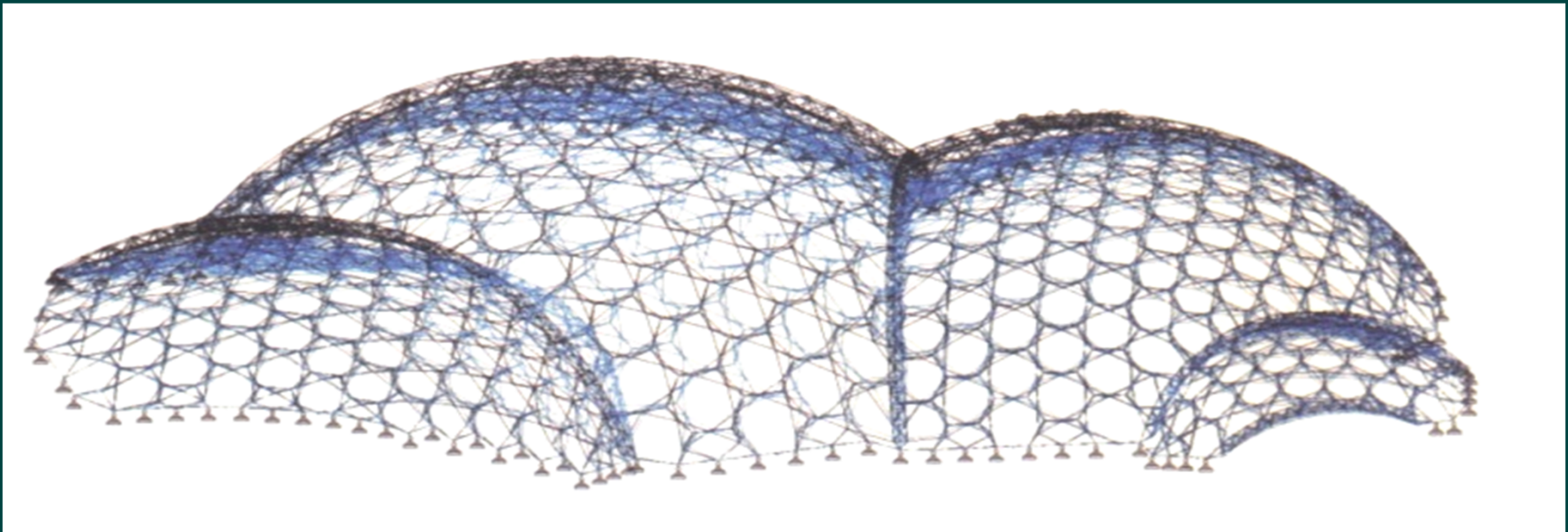
□ Podjela vlačnih struktura

- Rubno napete membrane
- Pneumatske strukture
- Prednapete mreže i grede

□ Postupak projektiranja vlačnih membrana

□ Traženje oblika (*form finding*)

- Elementarne analitičke metode
- Primjeri iz prirode
- Koncept minimalne površine (energije)
- Metodologija form-findinga
- Fizikalni modeli
- Računalni modeli
- Sinklastičke i antiklastičke plohe
- Pravila za smanjivanje težine
- Posljedice odstupanja od prirodnih formi



UVOD – OSNOVNI POJMOVI I RAZVOJ

- Vlačne građevine:
 - građevine gdje je jedan ili više elemenata glavne nosive strukture u vlaku
- vlačne građevine:
 - membrane
 - krovovi s 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

Frei Otto izučavao je membranske forme na fizikalnim modelima



UVOD – PREDNOSTI I NEDOSTACI

□ Prednosti

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

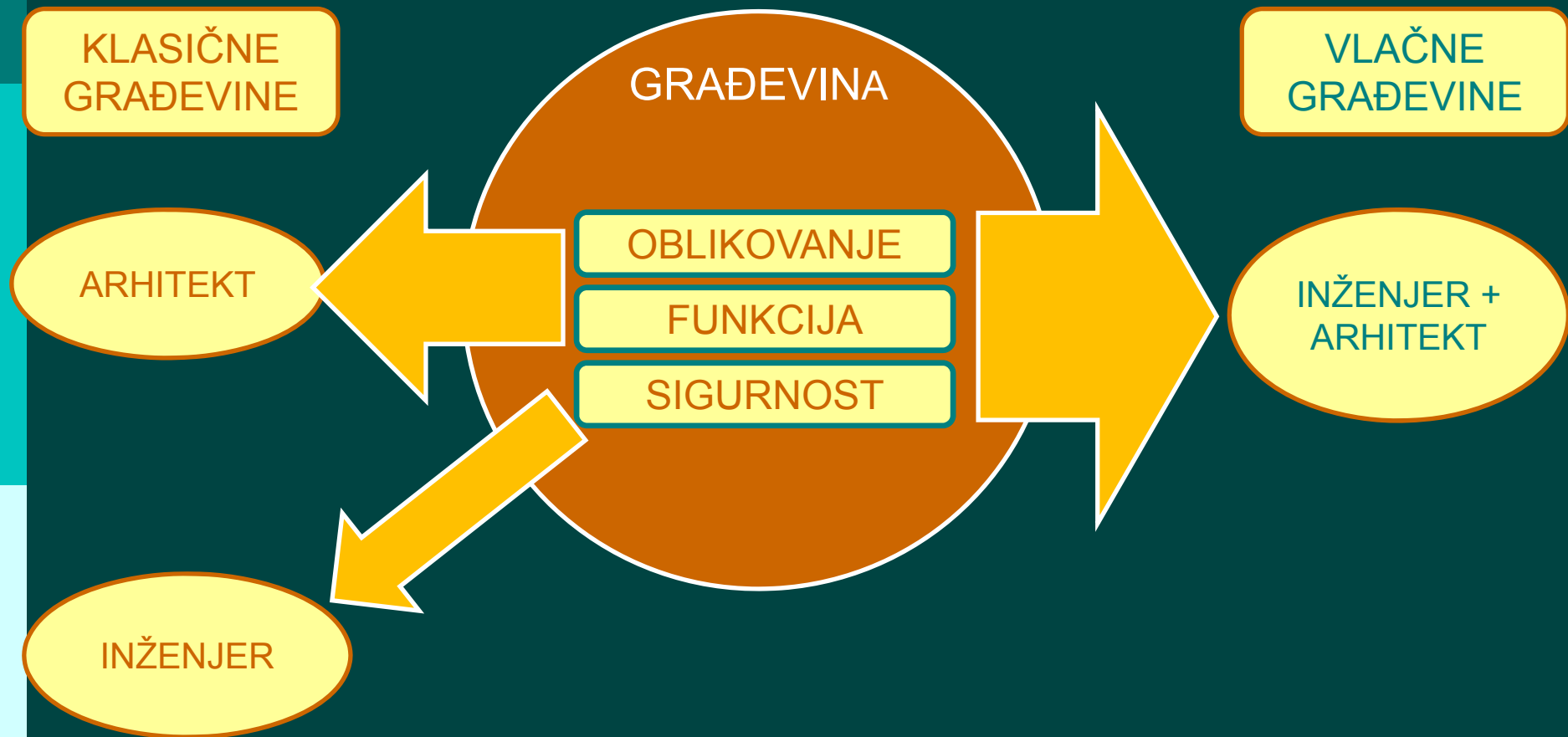


□ NEDOSTACI

- 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

UVOD – SURADNJA

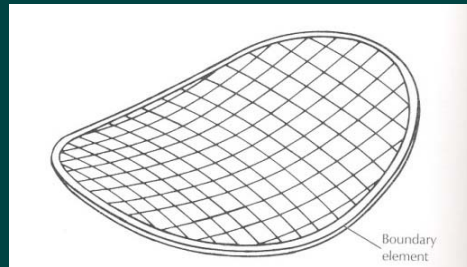
- integracija vještina i znanja arhitekta i inženjera



PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

□ Rubno napete membrane

- Millennium Dome, Greenwich, London (2000)



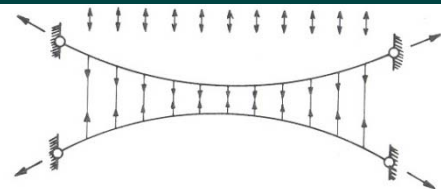
□ Pneumatske strukture

- Tokyo Dome, Tokyo, Japan (1988)



□ Prednapete mreže i grede

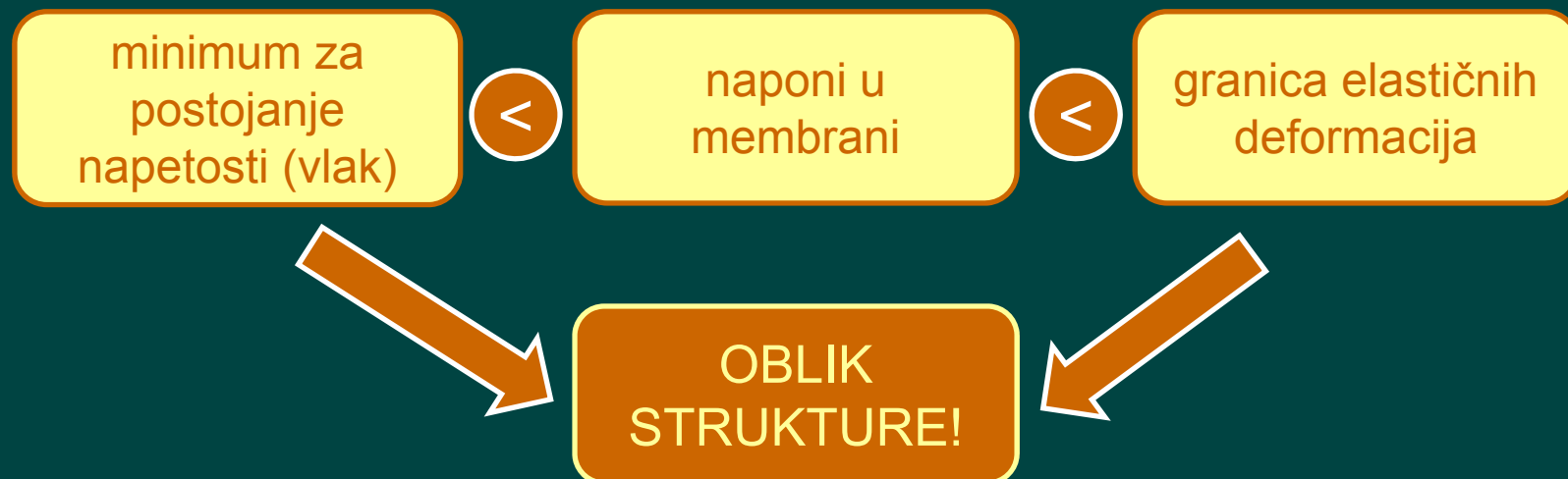
- most Akashi Kaikyo, Hyogo, Japan (1998)



PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Rubno napete membrane

- 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 tako da
 - kroz vijek trajanja (za sva opterećenja) bude zadovoljeno:



*Olimpijski stadion,
München, Njemačka (1972)*

PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Rubno napete membrane

- Naprezanja se usljed 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 naprezanjem 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

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



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



PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Pneumatske strukture

- Čine ih 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 kN/m² do 0,55 kN/m²
- Do gubitka stabilnosti i/ili lokalnog oštećenja strukture može doći uslijed:
 - djelovanja vjetra ; masa zraka unutar membrane može se aktivirati uslijed dinamičkog djelovanja vjetra
 - djelovanja snijega (od 1,2 kN/m² do 2,4 kN/m² - veće od unutarnjeg pritiska pa se uvodi grijanje unutarnjeg zraka radi topljenja snijega)
- Uobičajeni faktori sigurnosti su
 - $\gamma_M = 6$ za materijal
 - $\gamma_F = 1,5$ za djelovanja

PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Pneumatske strukture: primjeri

- Natkrivanje sportskih terena



PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Pneumatske strukture: primjeri

- ▣ Eden Project, Cornwall, UK



PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Prednapete mreže i grede

□ PREDNAPETE MREŽE

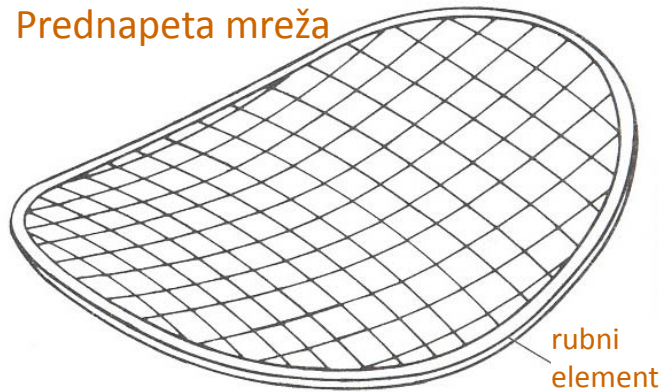
- sličnost s membranom – membrana (prostorni element) načinjena od sustava kablova (linijski elementi)

□ PREDNAPETE GREDE

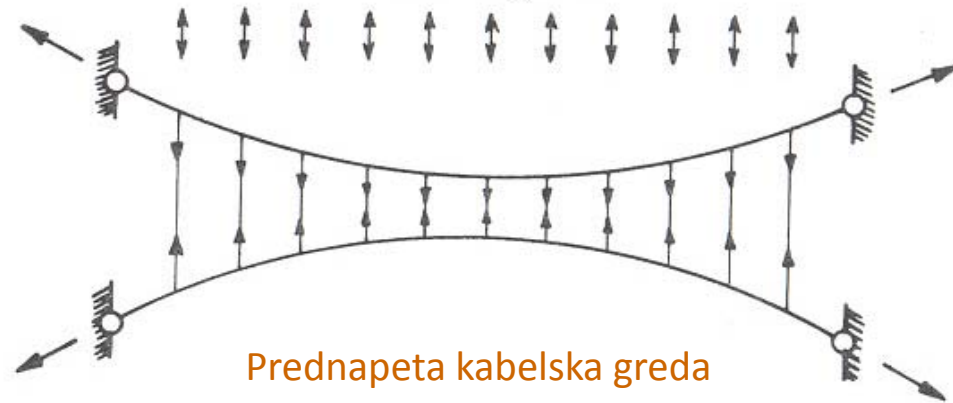
- vanjskim kabelima prednapeta greda – dvodimenzionalna verzija kabelske mreže

razlika sustava prednapetih greda i mreža

Prednapeta mreža



rubni element

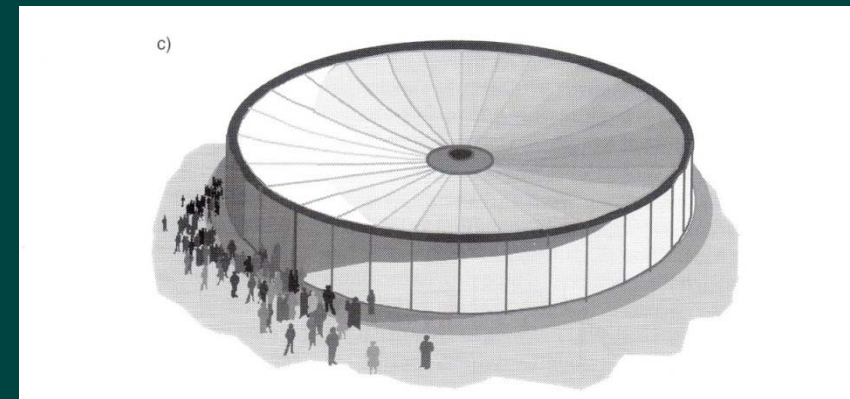
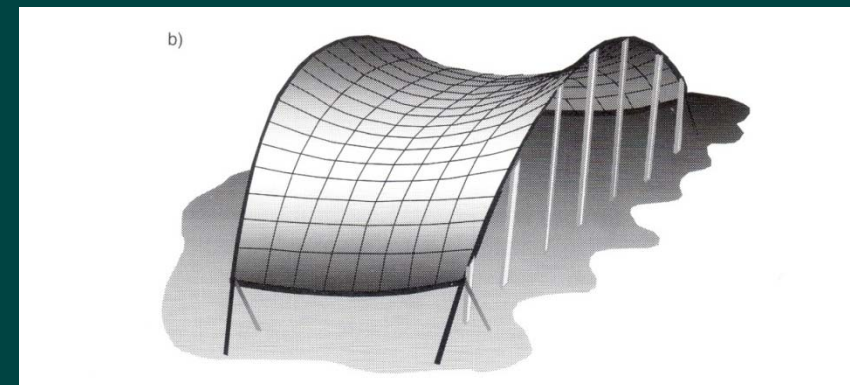
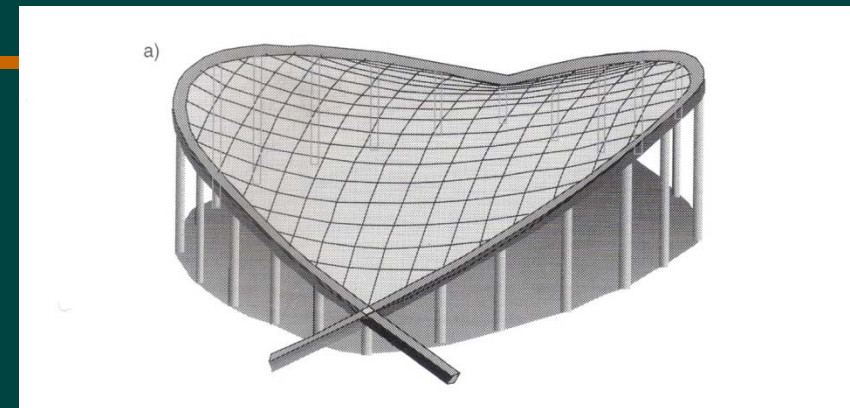


Prednapeta kabelska greda

PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Prednapete mreže i grede

- **PREDNAPETE MREŽE – mogući sustavi**
 - prednapeti direktno na kruti oslonac (npr. tlačni prsten)
 - prednapeti na fleksibilni oslonac koji je oslonjen na jarbole i stabiliziran zategama
 - viseće strukture stabilizirane teškim pokrovom

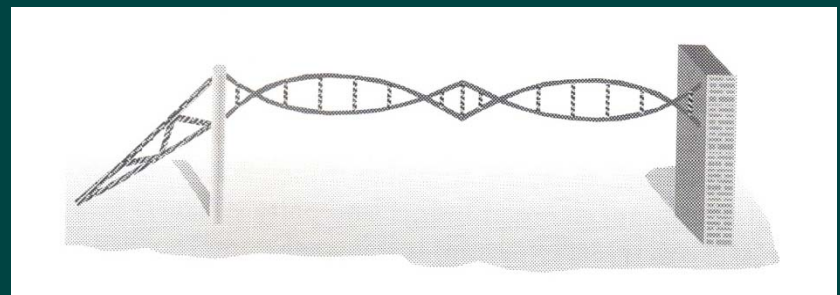
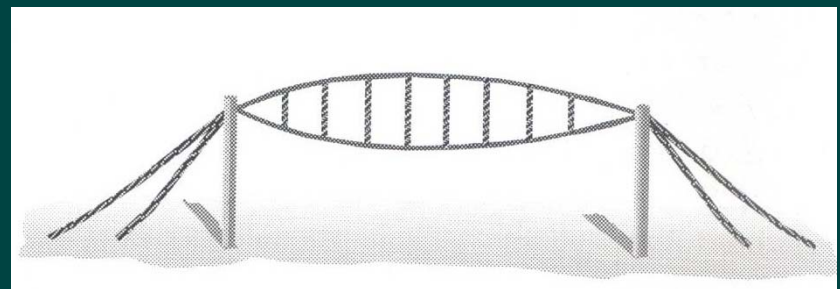
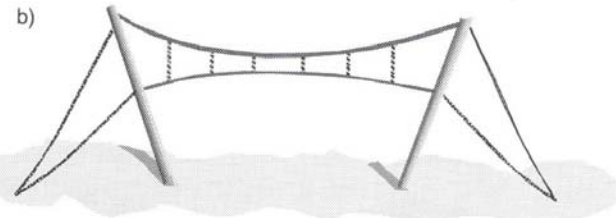
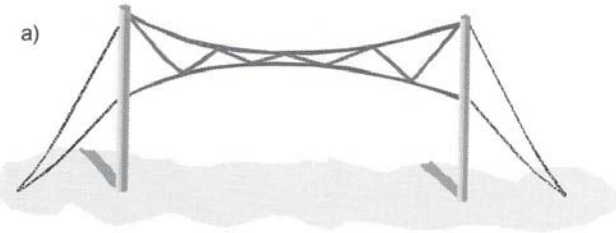


PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Prednapete mreže i grede

□ VANJSKIM KABELIMA PREDNAPETE GREDE – mogući sustavi

- rešetke prednapete vanjskim kabelima
- nosači prednapeti vanjskim kabelima
- hibridni sustavi nosača i rešetaka prednapetih vanjskim kabelima



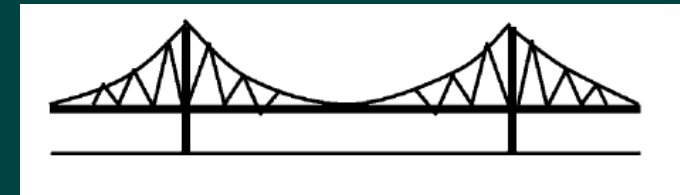
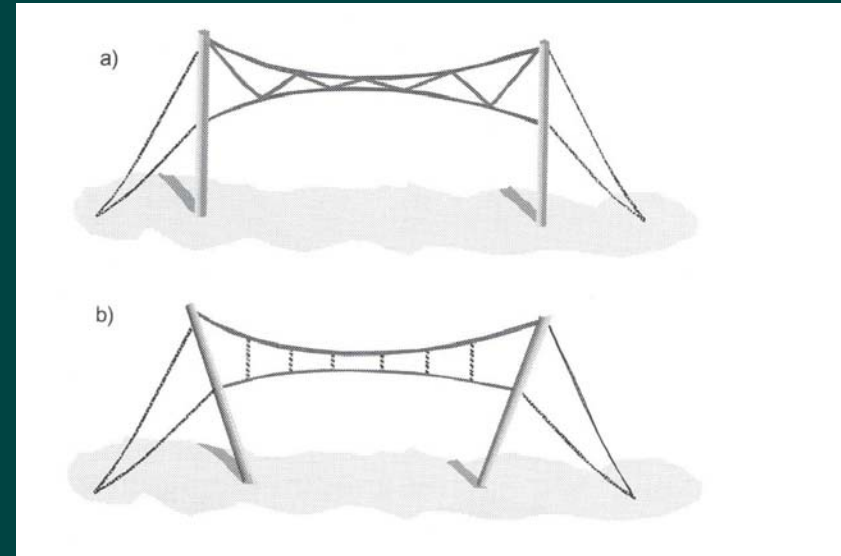
PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Prednapete mreže i grede

□ VANJSKIM KABELIMA PREDNAPETE GREDE – mogući sustavi

■ rešetke prednapete vanjskim kabelima

- gornji i donji pojas i ispuna od kablova koji su svi u vlaku
- oblik i prednapon moraju osigurati vlak kroz čitav vijek trajanja građevine
- moguća varijanta: viseća struktura gdje je glavni kabel stabiliziran teškim ovješnim elementima (viseći most)



Akashi Kaikyo, L=1.991 m, (1998)

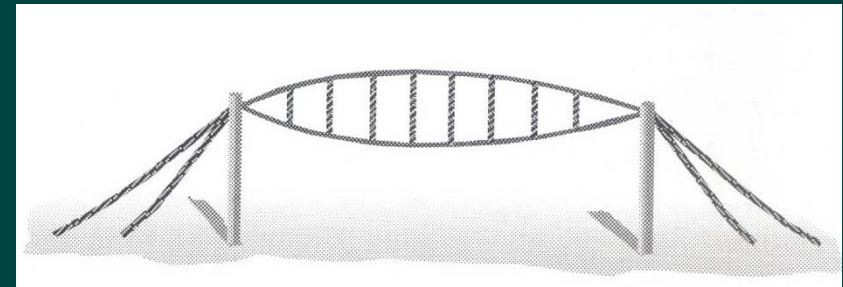
PODJELA VLAČNIH GRAĐEVINA

Prednapete mreže i grede

□ VANJSKIM KABELIMA PREDNAPETE GREDE – mogući sustavi

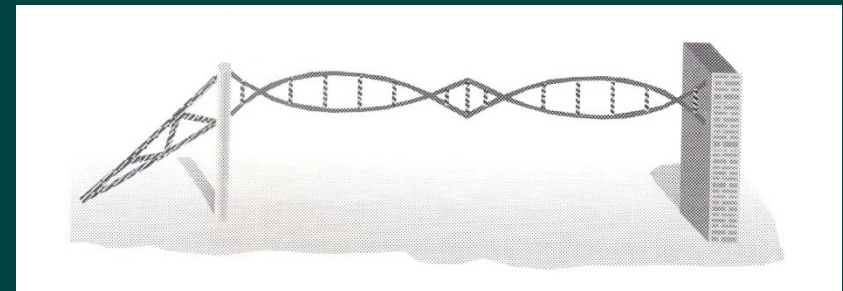
■ nosači prednapeti vanjskim kabelima

- ispuna između gornjeg i donjeg pojasa su tlačni elementi
- manje fleksibilni sustavi od kabelskih rešetaka



■ 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



POSTUPAK PROJEKTIRANJA VLAČNIH MEMBRANA

- Postupak se može podijeliti u 4 koraka:

1. Pronalaženje oblika (form finding)

2. Krojenje materijala

3. Statička analiza

4. Dinamička analiza

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 postupno korigira dok ne dođe u stanje statičke ravnoteže i zahtijevane razine prednapona (*izrazita geometrijska nelinearnost*)

POSTUPAK PROJEKTIRANJA VLAČNIH MEMBRANA

□ Postupak se može podijeliti u 4 koraka:

2. Krojenje materijala

- trodimenzionalni oblik napete strukture mora se pretvoriti u dvodimenzionalni 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



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

POSTUPAK PROJEKTIRANJA VLAČNIH MEMBRANA

- Postupak se može podijeliti u 4 koraka:

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

IZNALAŽENJE OBLIKA (*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



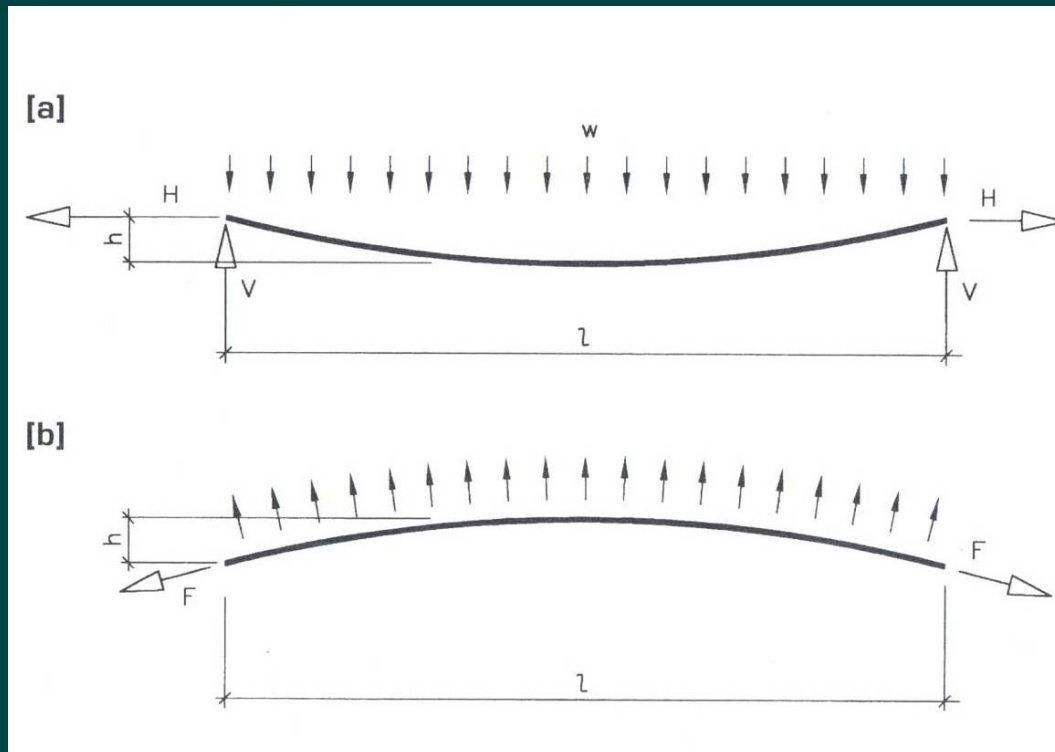
□ RJEŠENJE PROBLEMA:

- promatranje oblika iz prirode - priroda uvijek troši minimum energije za ostvarivanje određene namjene!

IZNALAŽENJE OBLIKA (FORM FINDING)

Elementarne analitičke metode

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



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

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

izduženje $\delta A = \frac{FA}{E}$

nova duljina $A' = A + \delta A$

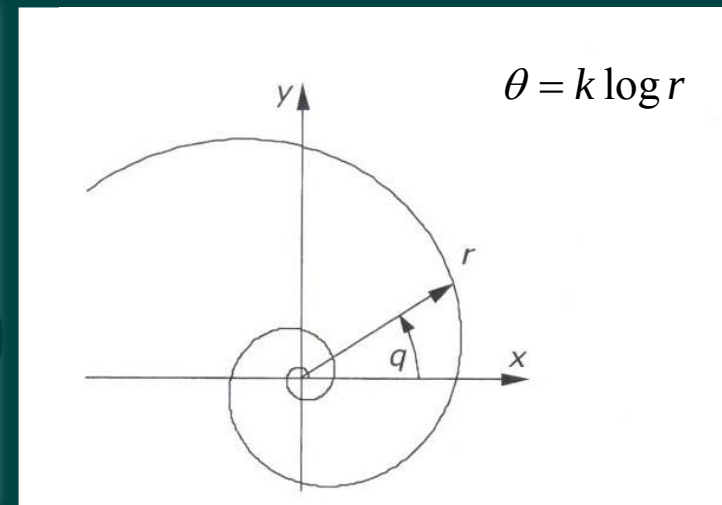
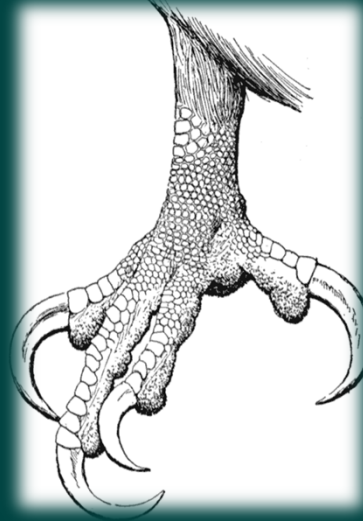
novi provjes $h' = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{A'^2 - l^2}$

- 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

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Primjeri iz prirode

- rast školjke
 - jednolik rast uz identičan oblik tokom rasta
- životinjska kandža
 - oblik omogućava da se vanjska sila prenosi aksijalno



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Primjeri iz prirode

□ rast drveća

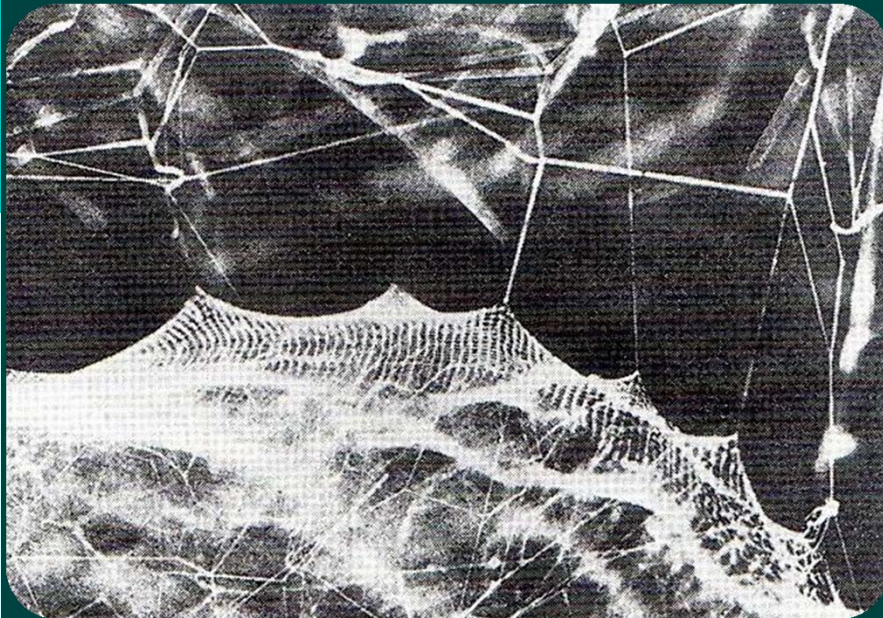
- jednolika raspodjela naprezanja na granama i deblu
- masa ne postoji na dijelovima koji ne sudjeluju u nosivosti!



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Primjeri iz prirode

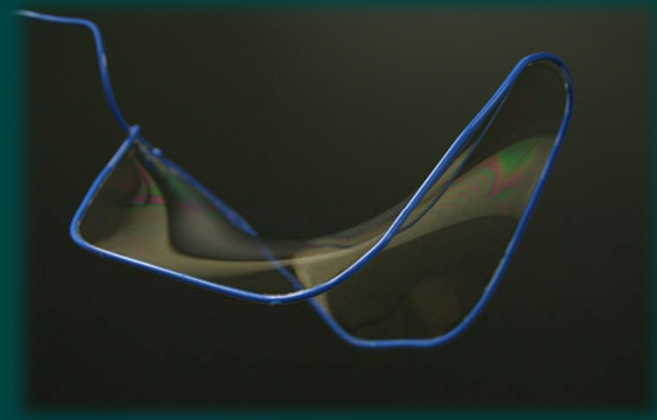
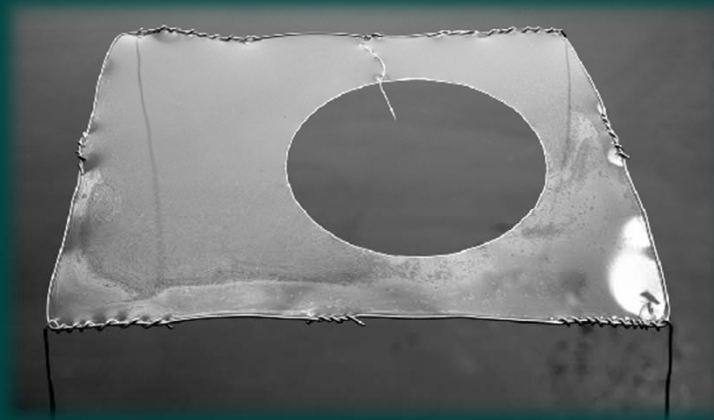
- ▣ mreža pauka Cyrtophora ----- Hellabrunn Aviary, München (Frei Otto)



IZNALAŽENJE OBLIKA (FORM FINDING)

Koncept minimalne površine (energije)

- ❑ **NAČELO:** *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!

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Koncept minimalne površine (energije)

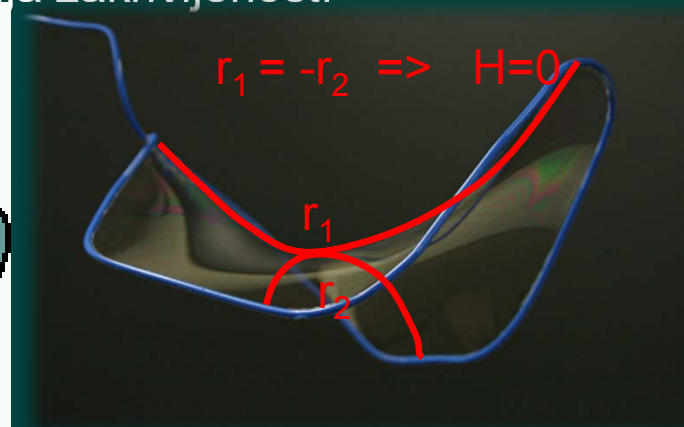
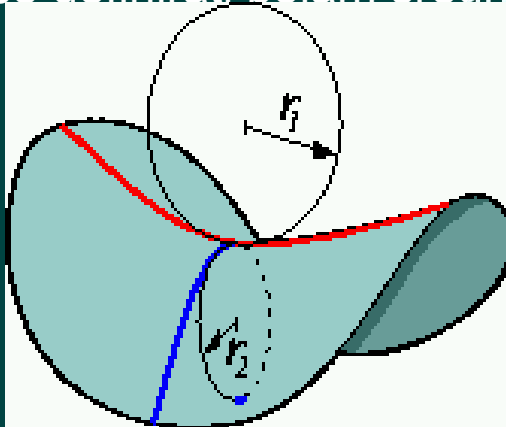
➔ AKO JE NAPETA POVRŠINA MINIMALNA, MINIMALNA JE I NJENA POTENCIJALNA ENERGIJA!

□ potvrda ove zakonitosti slijedi iz analize teorema Euler-Lagrange:

- p : razlika u pritisku vanjske i unutarnje površine plohe
- σ : naprezanje u plohi
- r_1, r_2 : maksimalni i minimalni radijus zakrivljenosti presječnica 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:

□ može se definirati pojam srednja zakrivljenost:



$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = 0$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

➔ PLOHA SA NAJMANJOM POVRŠINOM IMA U SVAKOJ TOČKI SREDNJU ZAKRIVLJENOST 0 !

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Koncept minimalne površine (energije)

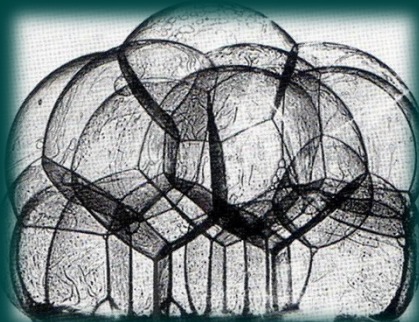
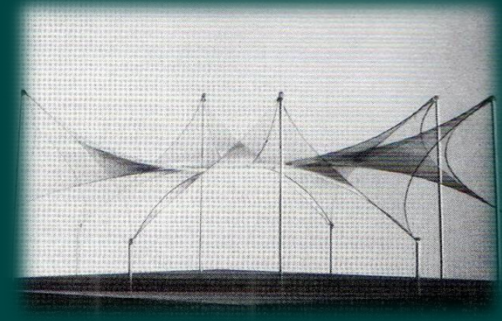
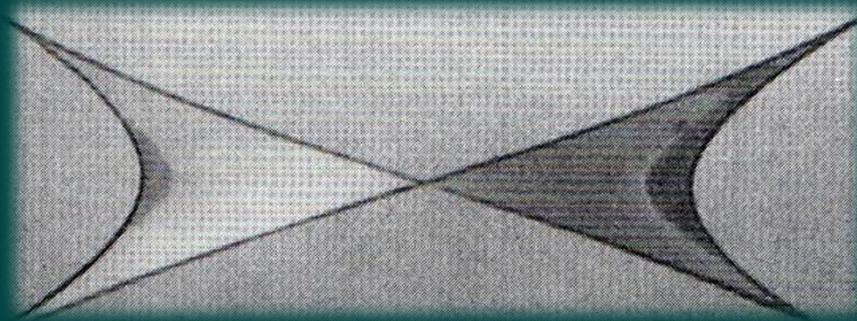
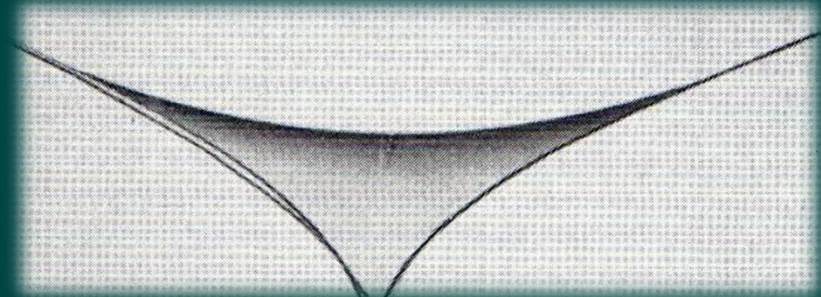
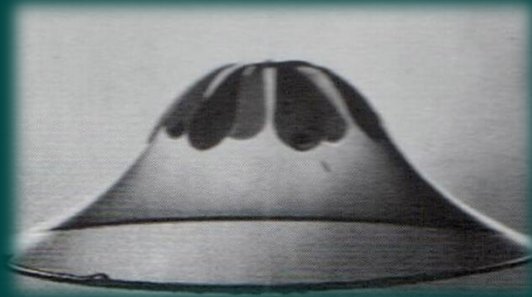
- ➔ PLOHA SA NAJMANJOM POVRŠINOM IMA U SVAKOJ TOČKI SREDNJU ZAKRIVLJENOST 0 !
- obrnuto ne vrijedi:
~~PLOHA KOJA U SVAKOJ TOČKI IMA SREDNJU ZAKRIVLJENOST 0 IMA NAJMANJU POVRŠINU!~~
 - stoga se u matematici uvodi podjela:
 - **stabilne minimalne površine** – one koje imaju najmanju površinu plohe
 - **nestabilne minimalne površine** – one koje imaju srednju zakrivljenost nula
- ➔ u kontekstu vlačnih struktura nas zanimaju samo stabilne min. površine!



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Koncept minimalne površine (energije)

- primjeri modela od sapunice za dobivanje minimalnih površina vlačnih građevina



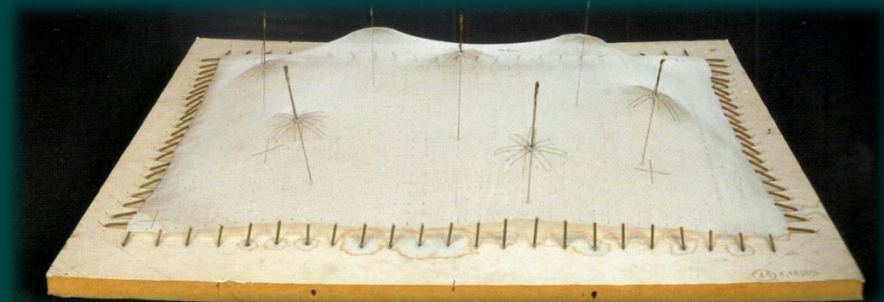
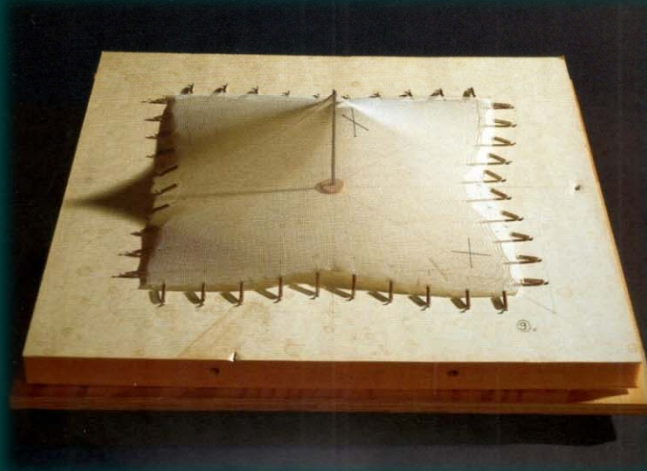
IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Metodologija form-findinga

□ koriste se dvije metode:

1. izrada fizikalnih modela

- u umanjenom mjerilu od
- sapunice, tkanine, papira...



2. izrada računalnih modela

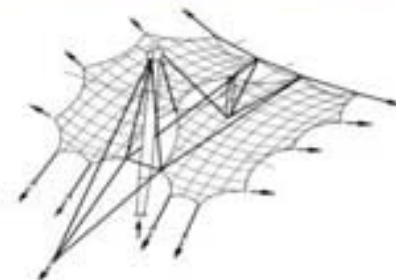
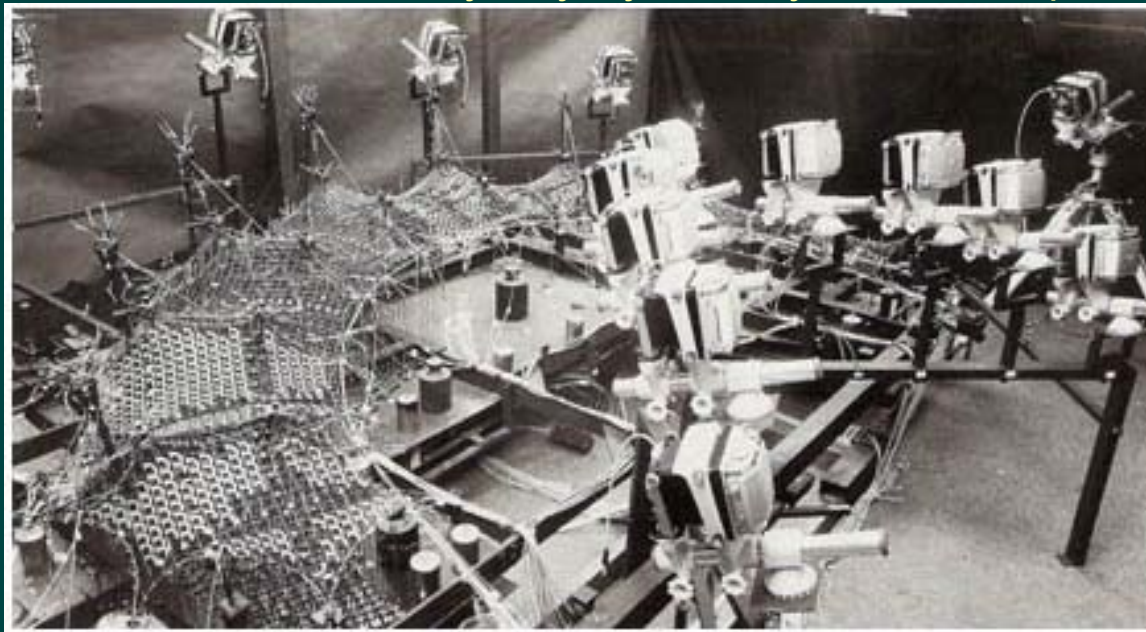
- koristeći različite numeričke tehnike i iteracije
- niz grafičkih i numeričkih podataka koji opisuju oblik strukture i naprezanja i deformacije u njenim točkama za određene kombinacije djelovanja

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Fizikalni modeli - primjeri

□ Olimpijski stadion u München-u (1972)

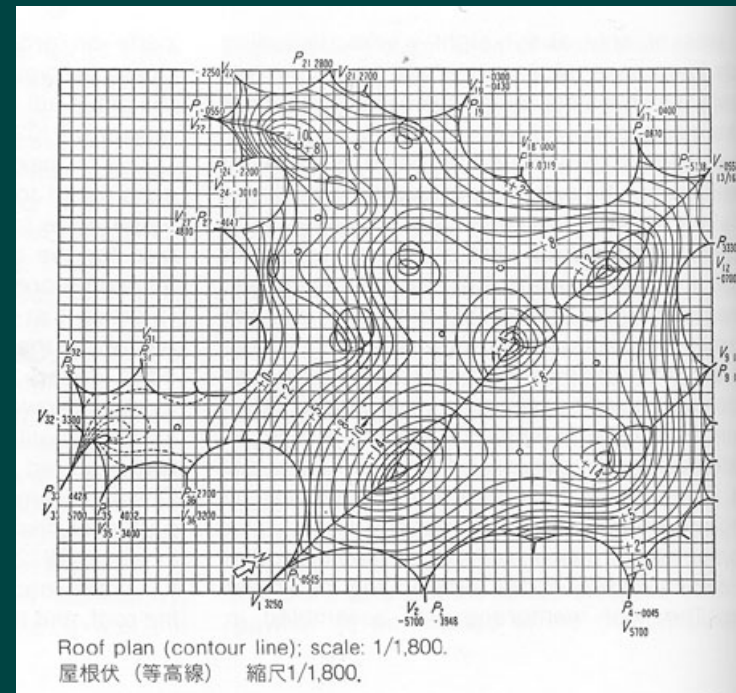
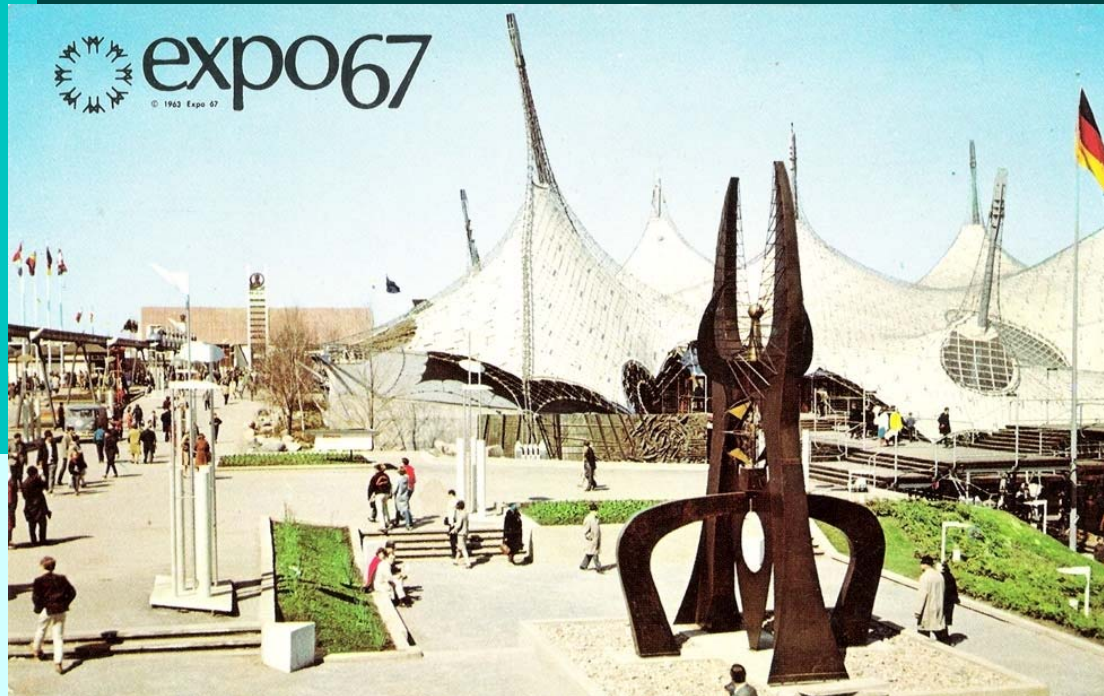
- model u mjerilu od 1:125
- fotogrametrijskih mjerenjem (*indirektno mjerenje prostornih objekata pomoću fotografije*) modela definirani su oblici za rezanje (*patterning*)
- pojavila se sistematska greška – na 750 mm širine mreže iznosila je 0,75 mm
- ovo je uzrokovalo ukupnu grešku u duljini kablova 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 s računalnim modelima
- fizikalni modeli su i dalje najbolji i često jedini način ispravne vizualizacije građevine



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Fizikalni modeli - primjeri

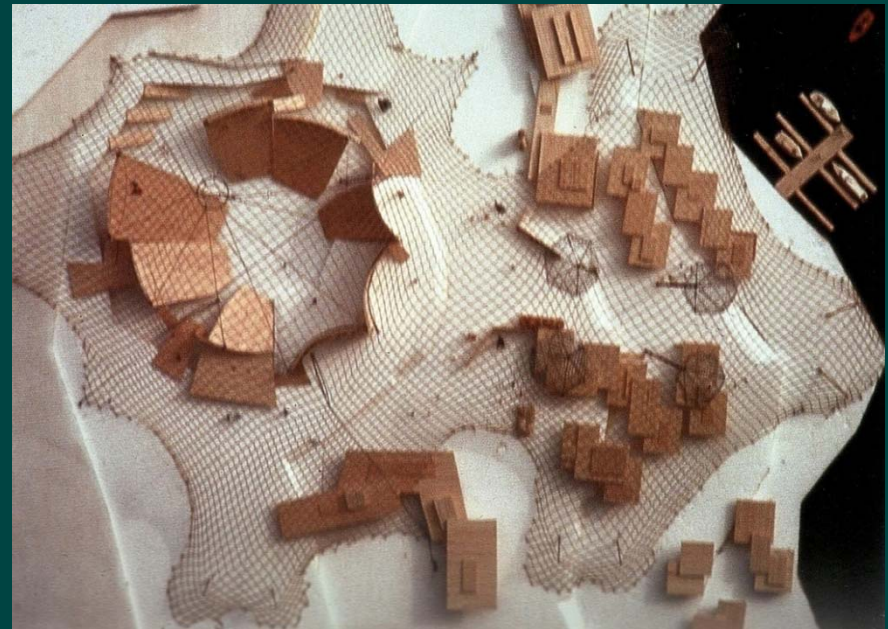
- Njemački Paviljon na Montreal Expo 1967 (Frei Otto)
 - korišteni su modeli od sapunice i tkanine



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Fizikalni modeli - primjeri

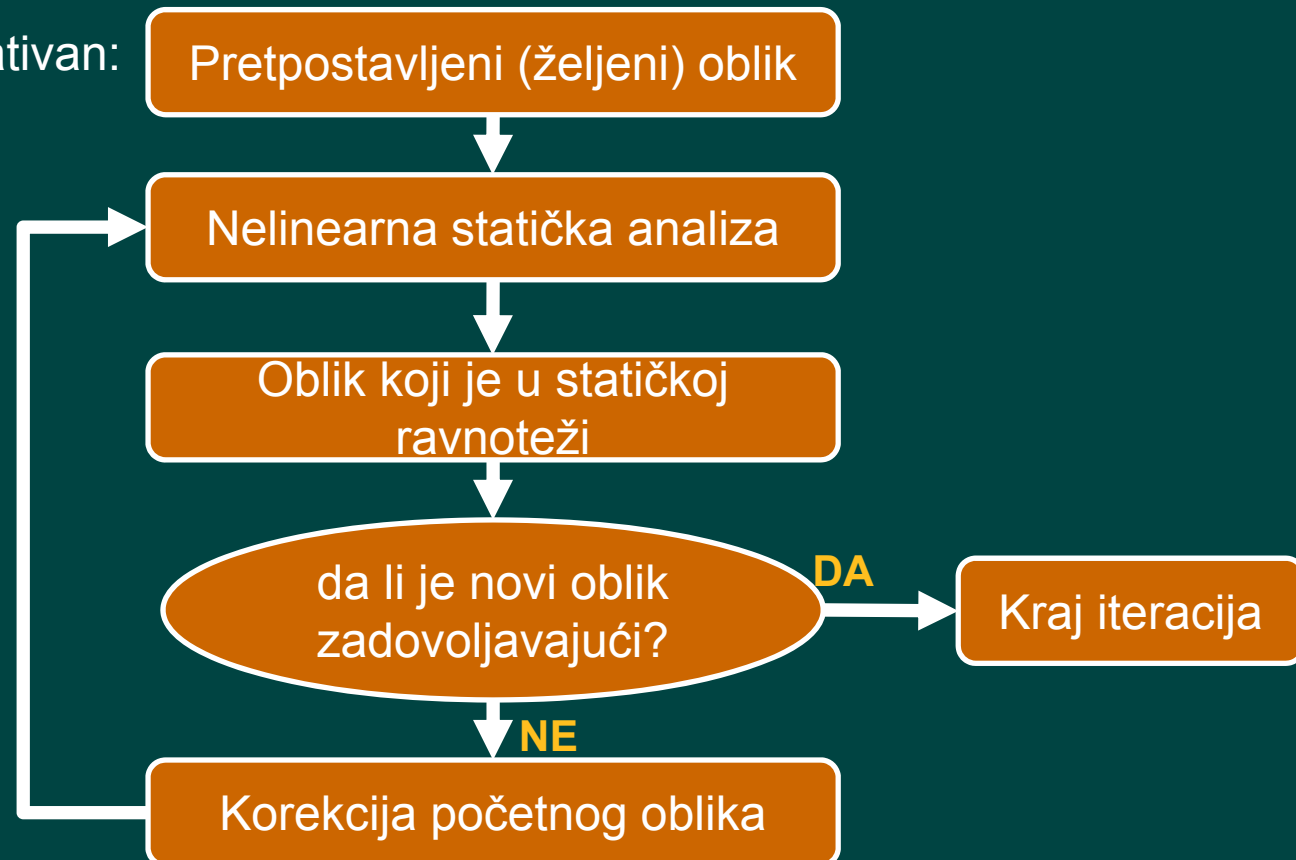
- Abidjan Arts Centre
 - natkrivanje muzeja, kazališta i komercijalnog prostora
 - model je predviđao natkrivanje 10.760 m² sa mrežom kablova
 - mreža je poduprta jarbolima kao tlačnim elementima



IZNALAŽENJE OBLIKA (*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:



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

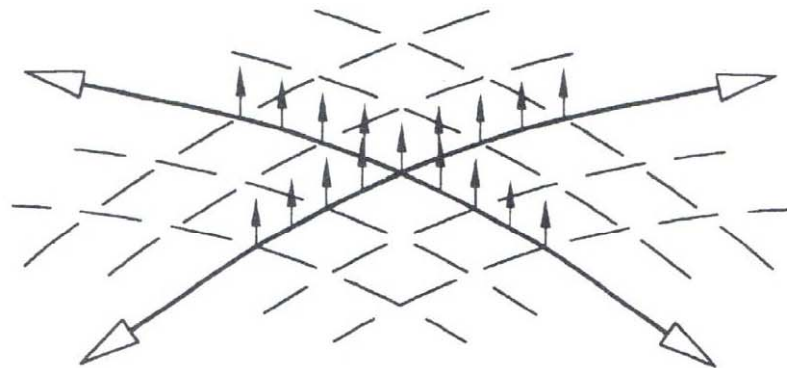
Računalni modeli

- 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

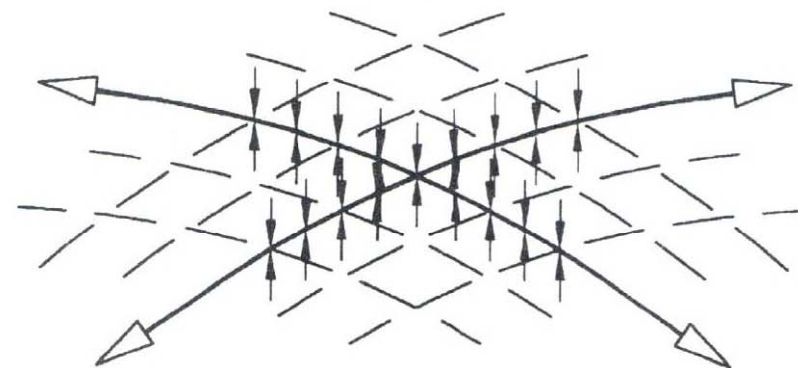
IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Sinklastičke plohe

- ❑ PLOHE S ZAKRIVLJENOSTIMA ISTOG PREDZNAKA
- ❑ obično pneumatske plohe s 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)



membrana pruža
otpor pritisku toplog
zraka iznutra



unutarnji pritisak pruža
otpor vanjskim
djelovanjima

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

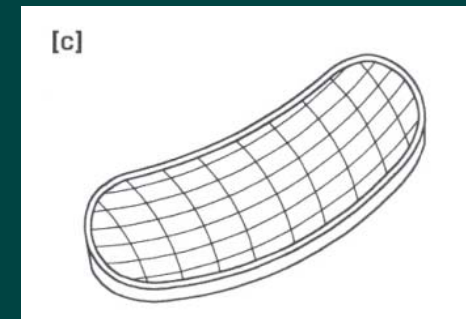
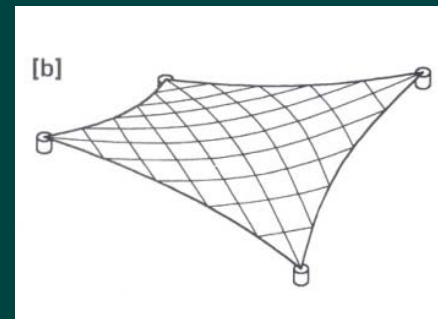
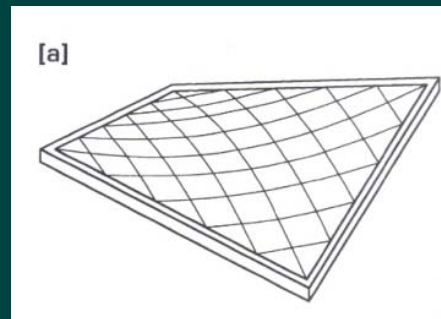
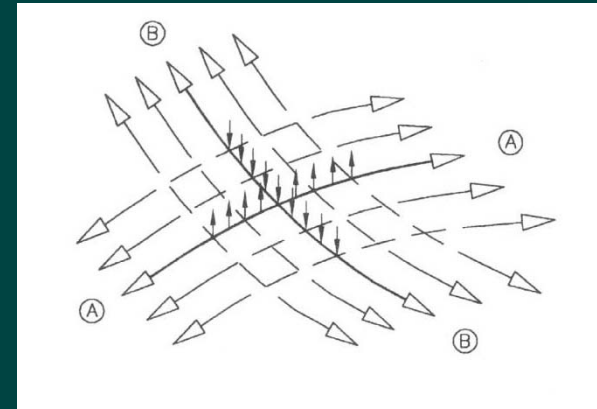
Antiklastičke plohe

□ PLOHE S ZAKRIVLJENOSTIMA RAZLIČITOG PREDZNAKA

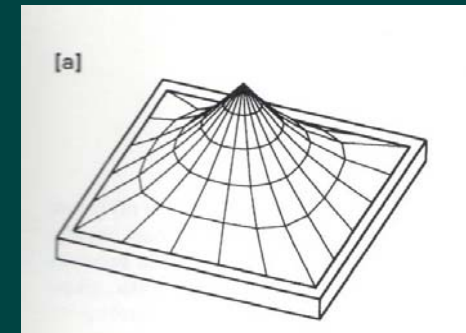
□ jedino ove plohe mogu imati minimalnu površinu!

□ dobivaju se oblikovanjem rubnog oslonca

■ u prostoru



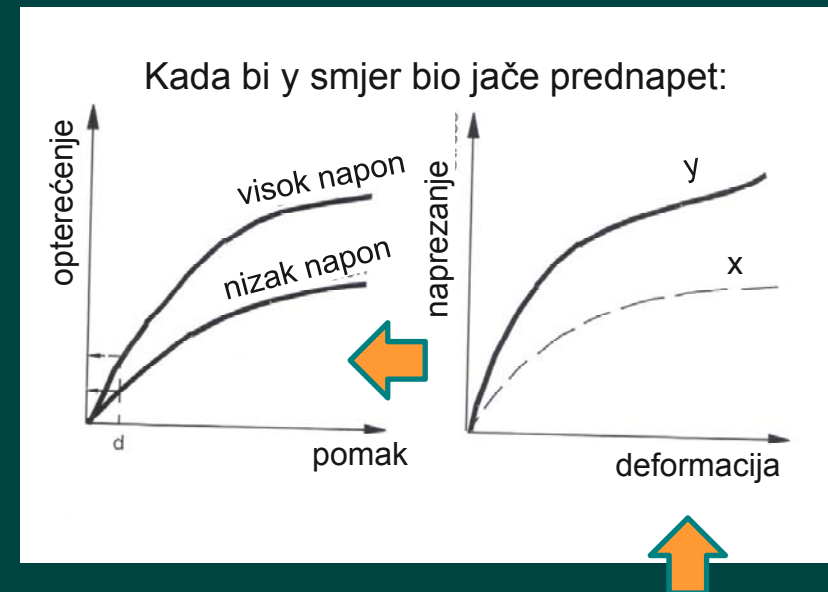
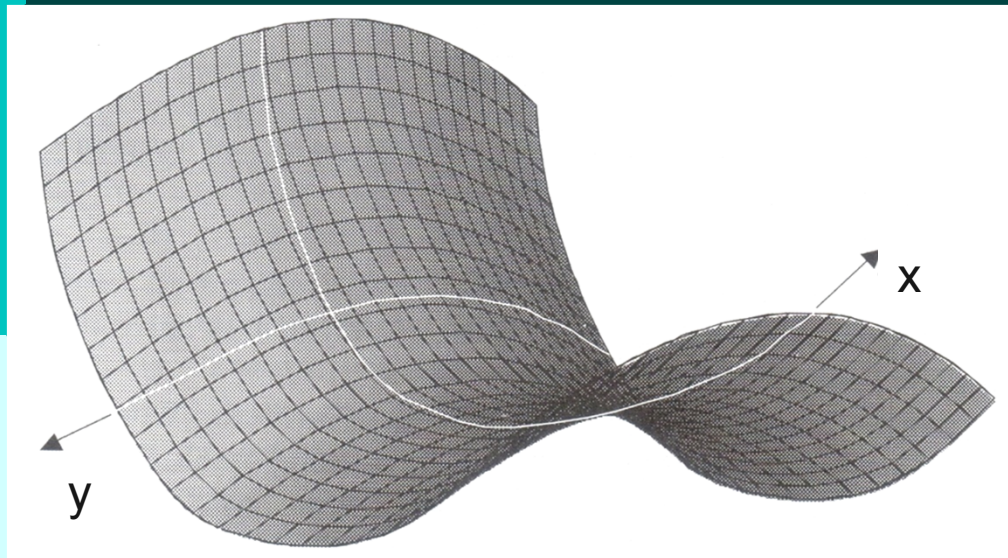
■ ili u ravnini ali je jedna točka plohe izvučena iz te ravnine



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

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!**

IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Pravila za smanjivanje težine – potrebno svojstvo lakih struktura

PUNOSTIJIENI NOSAČ

- ❑ Potrebna visina nosača povećava se s kvadratom raspona
- ❑ Vlastita težina za 10 x veći raspon je 1000 x veća

REŠETKA

- ❑ Rastavljanjem na vlačne i tlačne elemente i izbacivanjem srednjeg dijela koji doprinosi povećanju težine smanjujemo vl.težinu

VLAČNE STRUKTURE

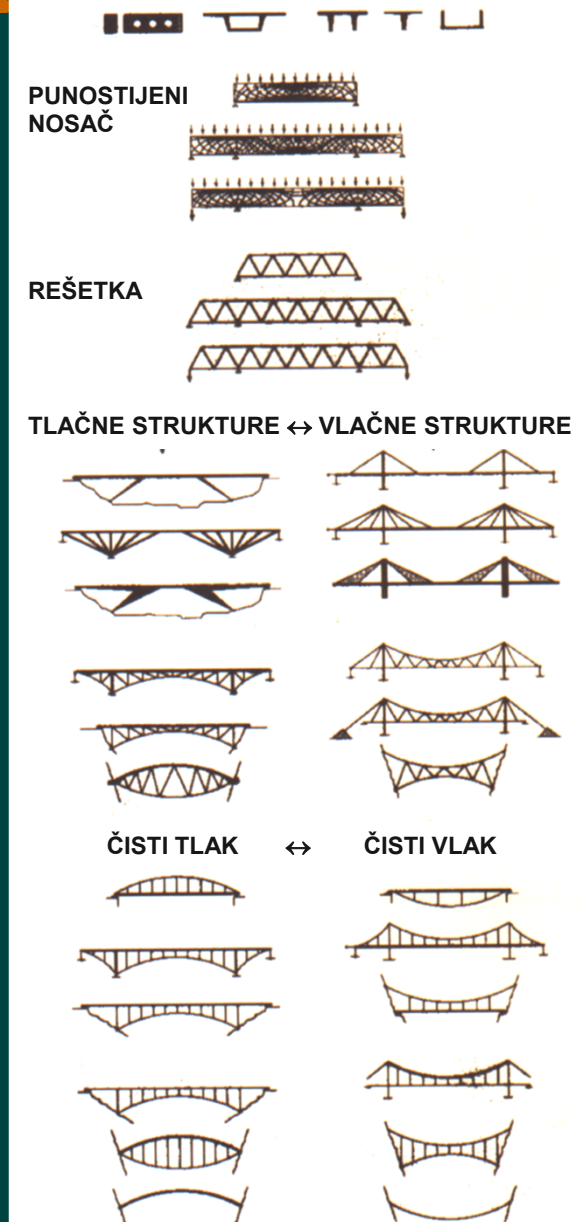
- ❑ Daljnja optimizacija → što veća upotreba vlačnih elem.
- ❑ Vlačni elementi imaju veću nosivost (javlja se problem velikih deformacija),
- ❑ Tlačni elementi otkazuju prije zbog problema stabilnost

PREDNAPETE MREŽE ILI GREDE

- ❑ Prednapinjanjem elemenata u kojima je moguć razvoj nepovoljnog tlaka i gubitak stabilnosti uvodimo vlak pa u konačnici u tom elementu izbjegnemo tlak.

PNEUMATSKE STRUKTURE

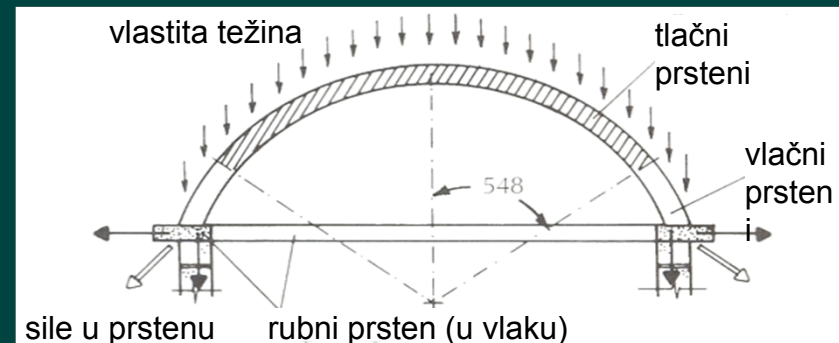
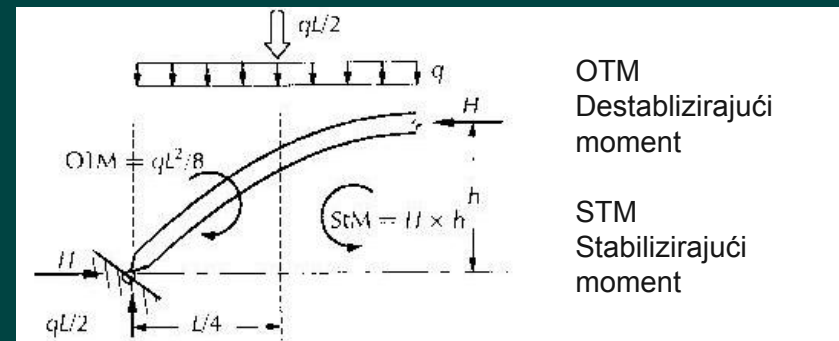
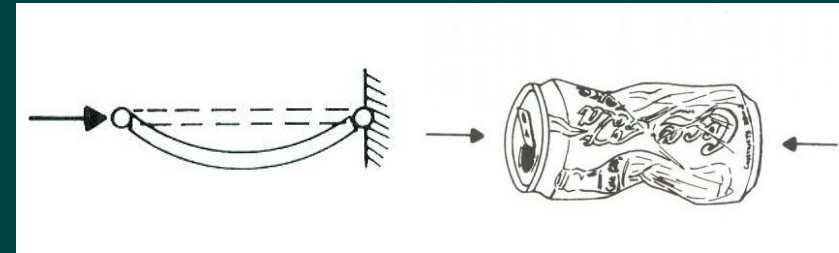
- ❑ Membrane (laki materijali) napete unutarnjim pritiskom zraka



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Pravila za smanjivanje težine – potrebno svojstvo 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
- sile koje se javljaju u elementima strukture potrebno je pokušati međusobno uravnotežiti umjesto da ih se direktno prenosi na temelje



IZNALAŽENJE OBLIKA (*FORM FINDING*)

Posljedice odstupanja od prirodnih formi

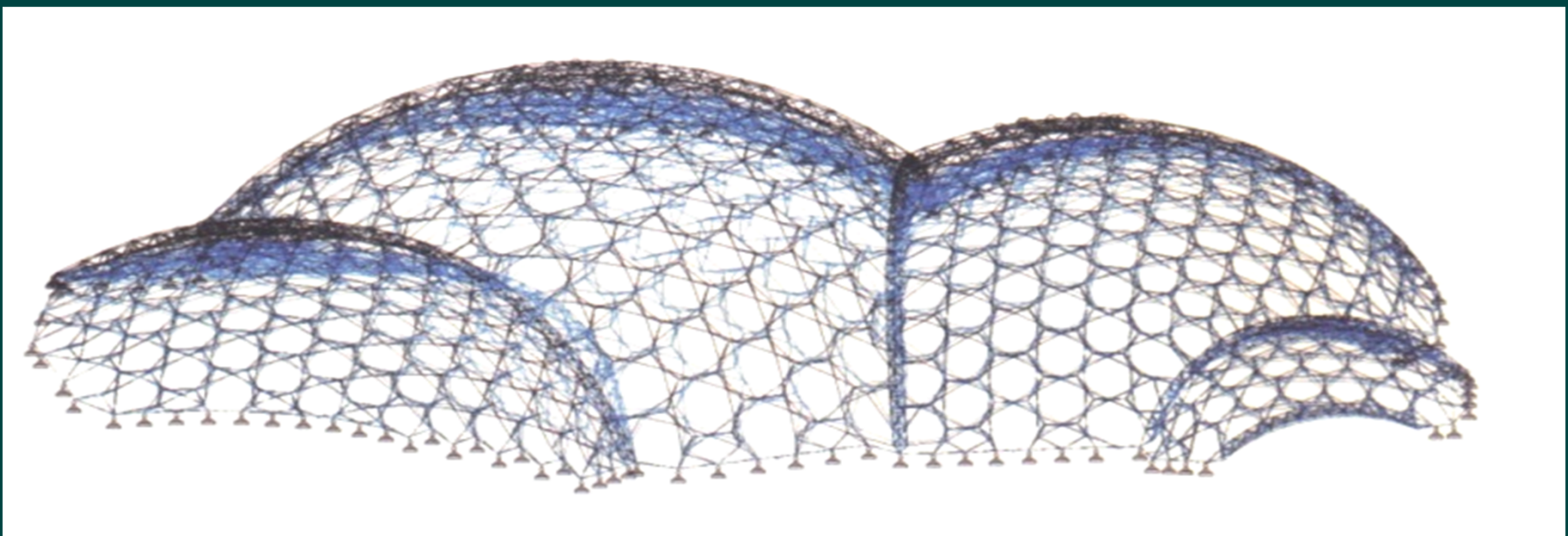
- Da bi se ostvario drugačiji oblik koji odstupa od prirodnog stanja (optimalne forme)
 - potrebno je ugraditi dodatne elemente (npr. kablove),
- Konstrukcija će tijekom vremena “puzati” prema svom prirodnom stanju
 - dodatne deformacije i preraspodjela naprezanja tijekom vremena
- primjer: **Millenium 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.

VLAČNE STRUKTURE – SADRŽAJ PREDAVANJA (2.dio)

- Materijali
- Djelovanja
- Primjeri izvedenih građevina



MATERIJALI

- unaprijeđenje i razvoj novih materijala su primarni faktor za upotrebu vlačnih struktura
- **metalni materijali:**
 - galvanizirano željezo,
 - legure aluminija,
 - nehrđajući 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*)



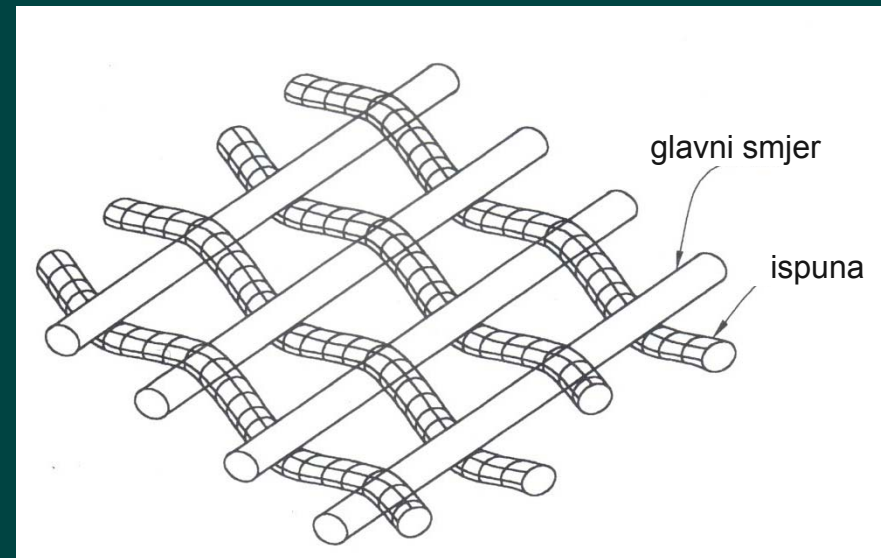
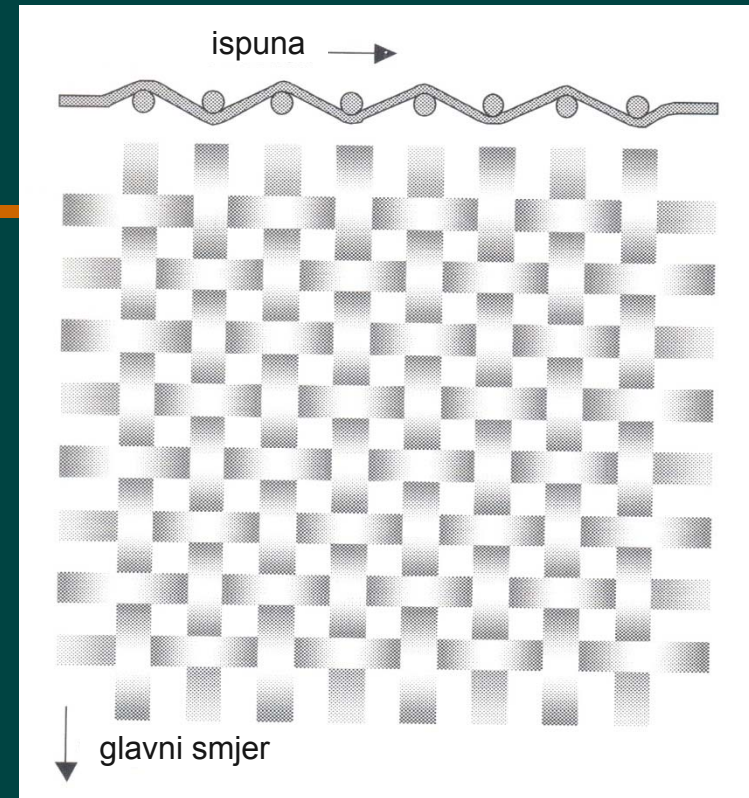
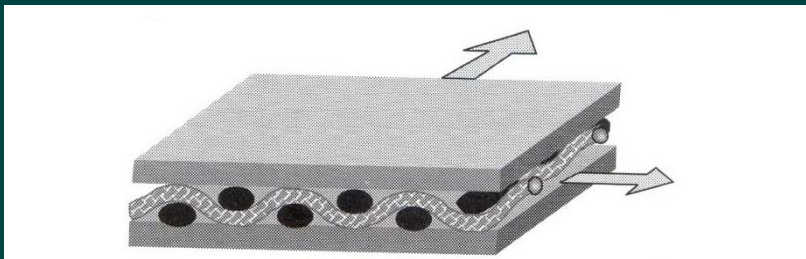
PTFE fiberglass membrana



PVC vlačna struktura

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



MATERIJALI

- vlačni elementi mogu se dodatno optimizirati povećavanjem svojstva

$$\text{duljina pucanja} = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{\text{čvrstoća}}{\text{jedinična težina}} = \frac{[\text{kN/m}^2]}{[\text{kN/m}^3]} = [\text{m}] \quad (\text{eng. rupture length})$$

- odnos β/γ 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

MATERIJAL klasični:	β (N/mm ²)	γ (N/m ³) x 10 ³	β/γ (m)	MATERIJAL kompozitni:	β (N/mm ²)	γ (N/m ³) x 10 ³	β/γ (m)
opeka	3	18	166,67	karbonska vlakna	1 400	15,5	90 000
drvo	85 / 37,5	5	21 250 / 9375	tekstilno-karbonska vl.	800	15,5	52 000
beton	30	25	1 200	aramidska vlakna	1 600	13	123 000
čelik 52	520	79,5	6664	kevlar	750	13	58 000
čelik 105	1 050	79,5	13 376	staklena vlakna	1 100	20	55 000
titan	900	45	20 000	tekstilno-staklena vl.	450	20	22 500

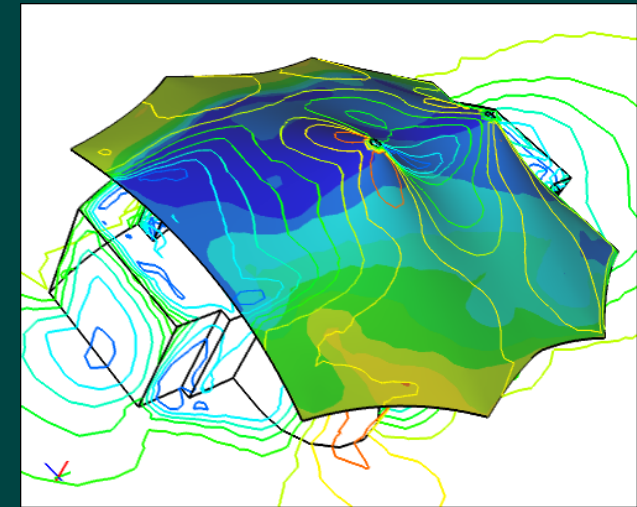
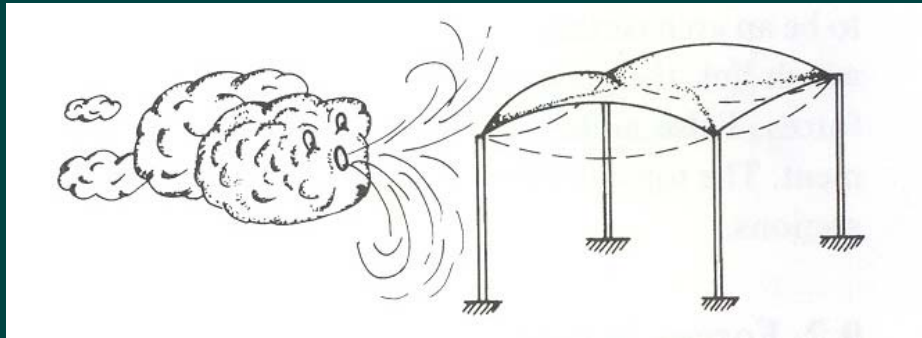
DJELOVANJA

- vlačne građevine moraju biti projektirane na sva opterećenja kao i ostale građ.
- 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

DJELOVANJA

□ Djelovanje vjetra

- posvetiti mu posebnu pozornost zbog njegovih aerodinamičkih svojstava
- vlačne strukture imaju malu krutost i malu vlastitu frekvenciju, pa dinamički utjecaji mogu značajno povećati veličinu djelovanja vjetra



- moguće metode proračuna za djelovanje vjetra:

□ *nazovistatička metoda:*

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

□ *dinamička analiza:*

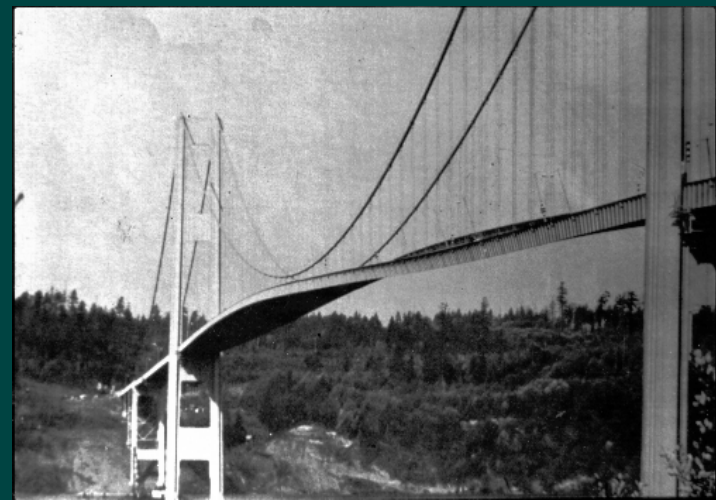
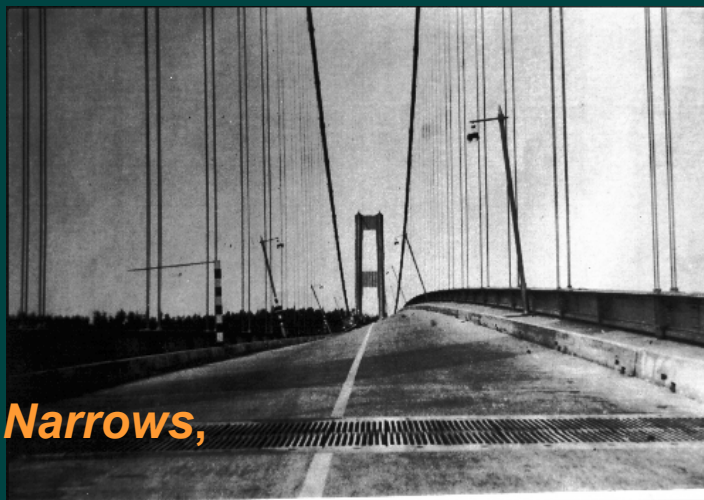
- veći rasponi (fleksibilnija struktura, velike deformacije)
- ispitivanja u vjetrovnim tunelima, *time-history* analiza

DJELOVANJA

□ Djelovanje vjetra

- 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

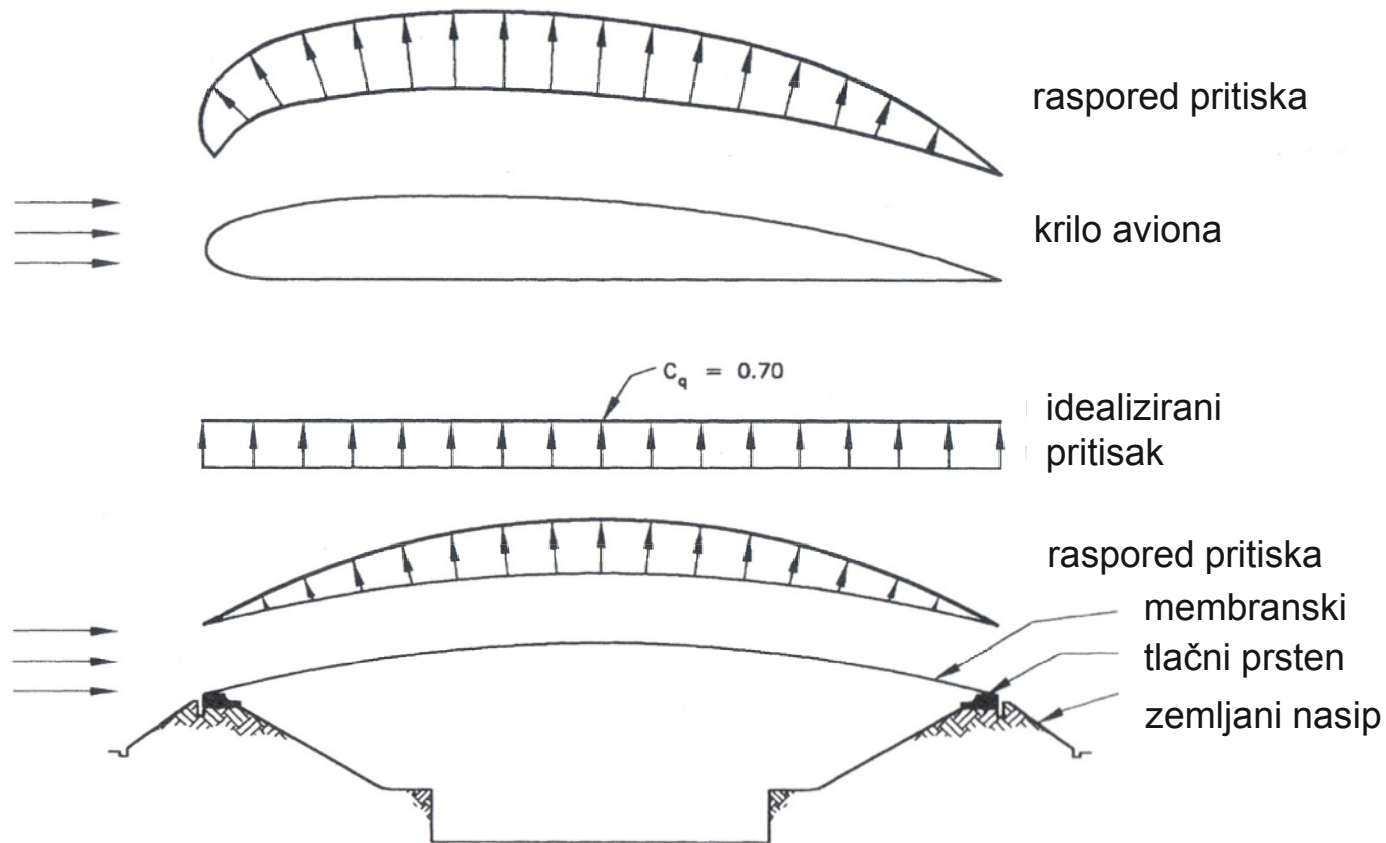
*most Tacoma Narrows,
flutter (1940)*



DJELOVANJA

□ Djelovanje vjetra

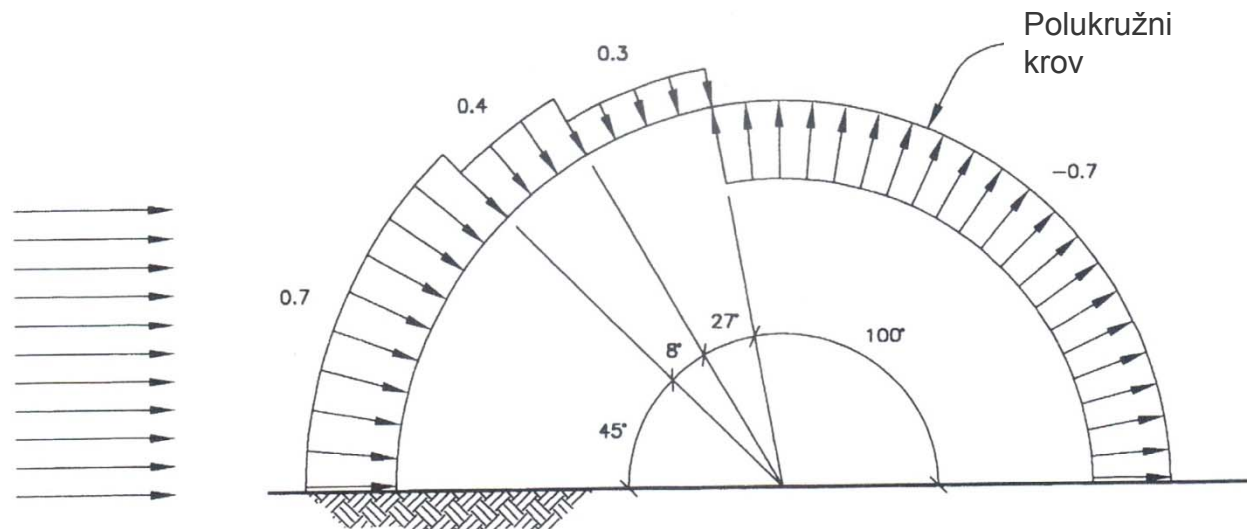
- često djeluje odižuće (*lift*) što može biti osobito opasno



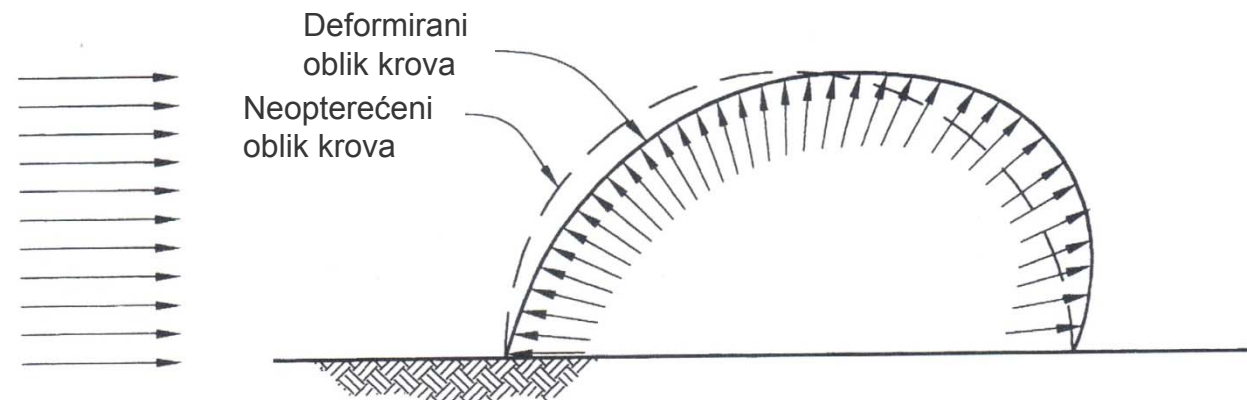
Presjek paviljona u Osaki

DJELOVANJA

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



Raspodjela koeficijenta pritiska na poprečnom presjeku polukružnog krova

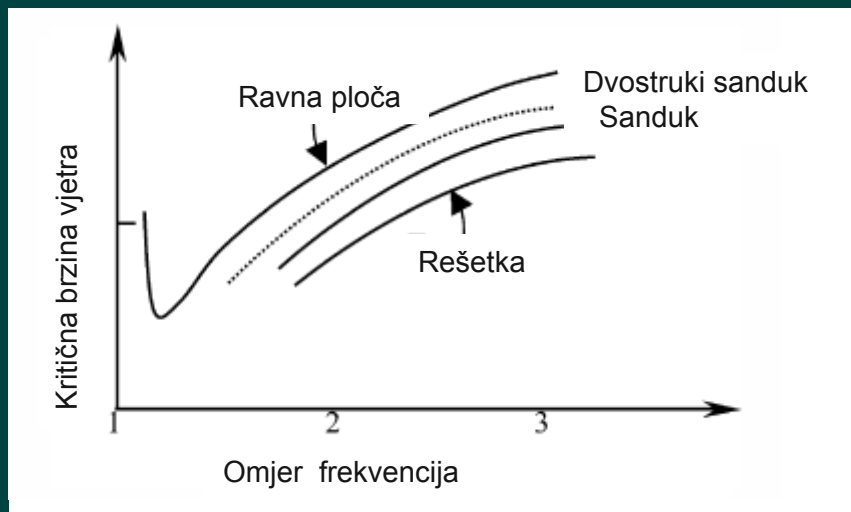


Deformirani oblik polukružnog krova uslijed unutarnjeg pritiska

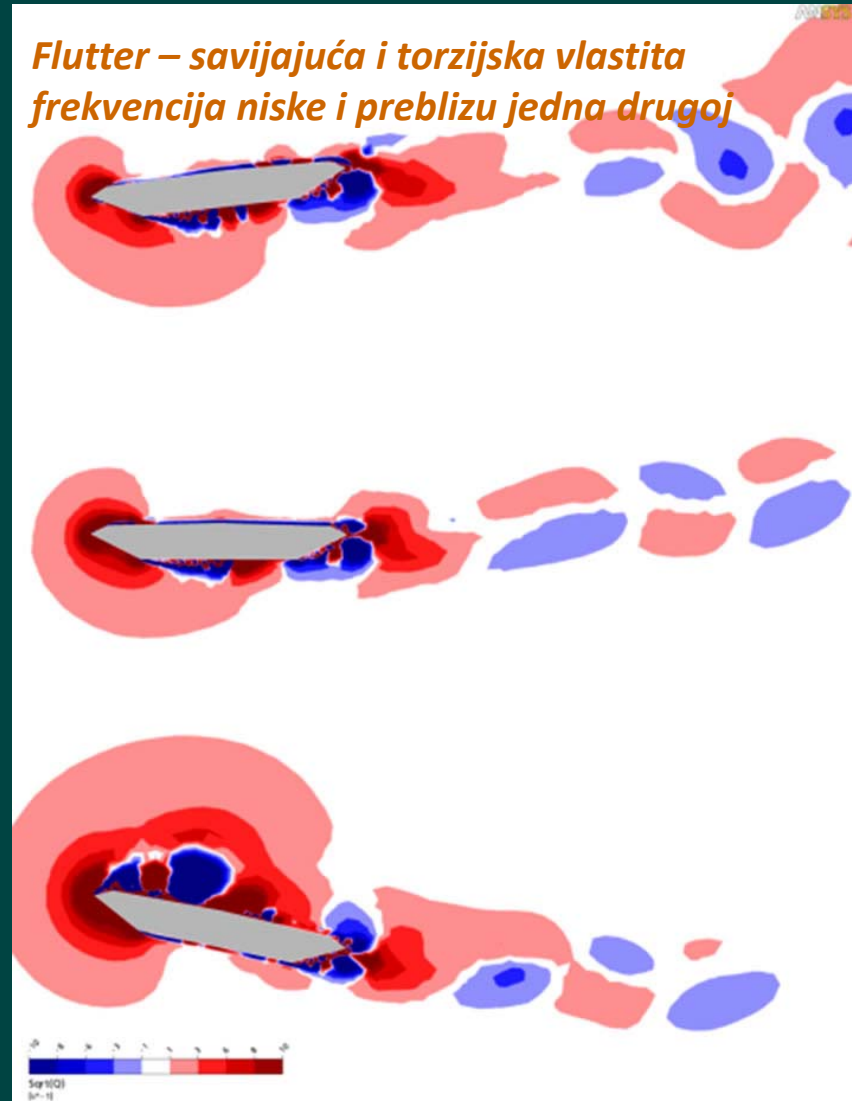
DJELOVANJA

□ Djelovanje vjetra

- 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



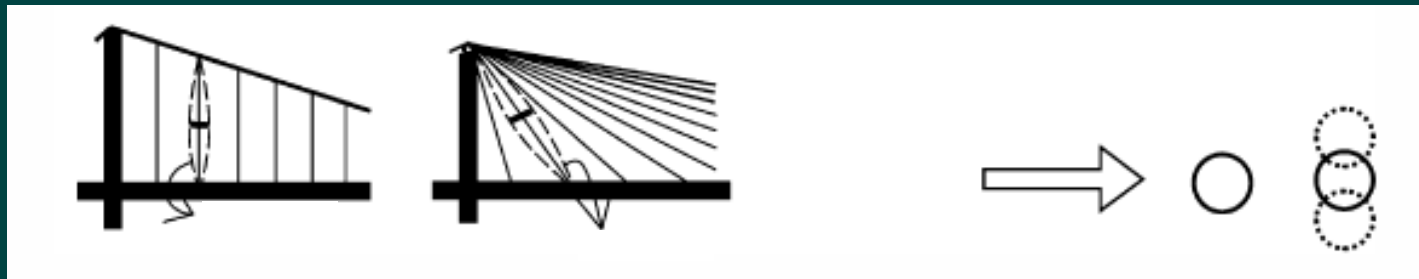
Flutter – savijajuća i torzijska vlastita frekvencija niske i preblizu jedna drugoj



DJELOVANJA

□ Djelovanje vjetra

- problemi djelovanja vjetra na kabele (vješaljke i zatege):
 - aerodinamička nestabilnost – *vrtloženje (von Karman)*



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

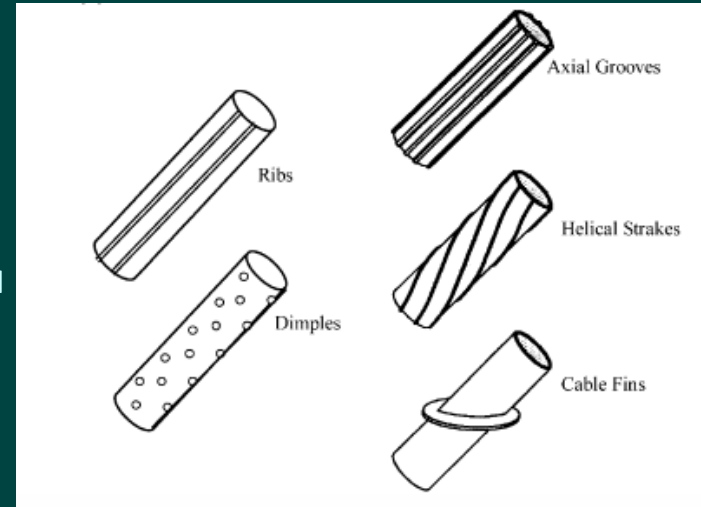


DJELOVANJA

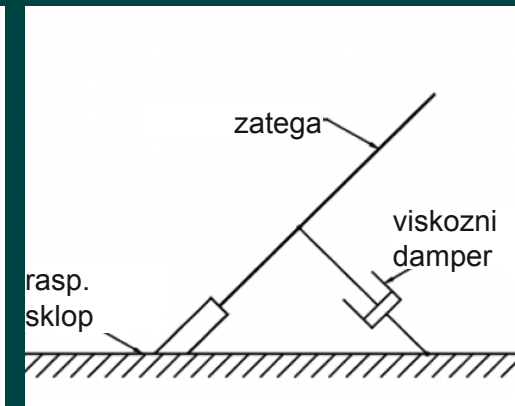
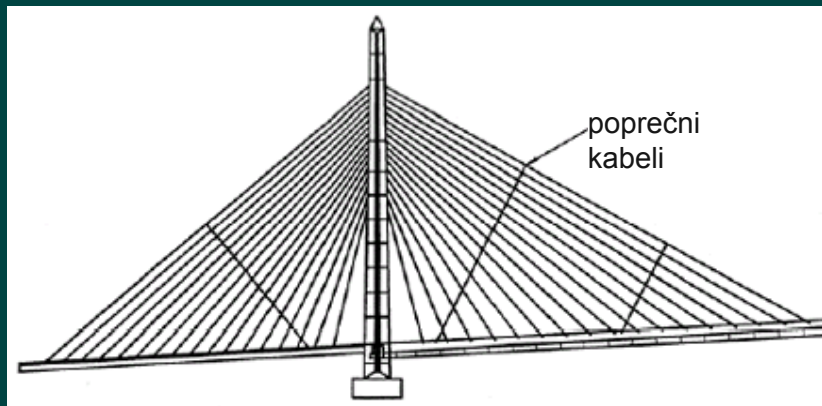
□ Djelovanje vjetra

■ Problemi *rain and wind* vibracija se rješavaju

□ obradom površine zaštitne cijevi zatege – postavljaju se spiralni žljebovi za kontroliranu odvodnju vode



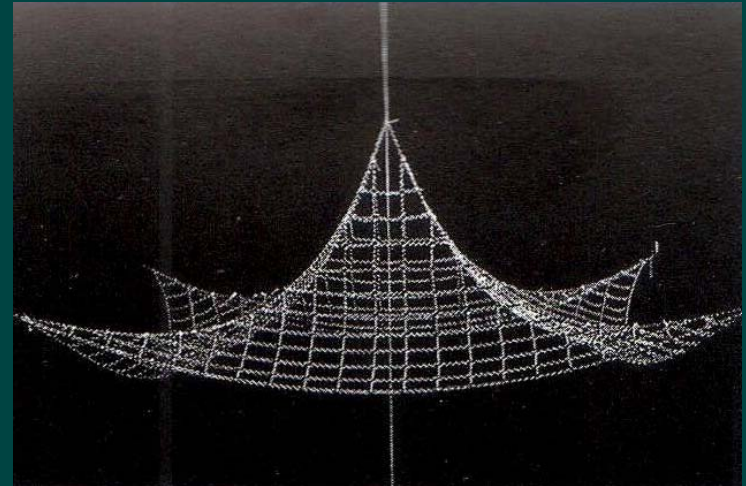
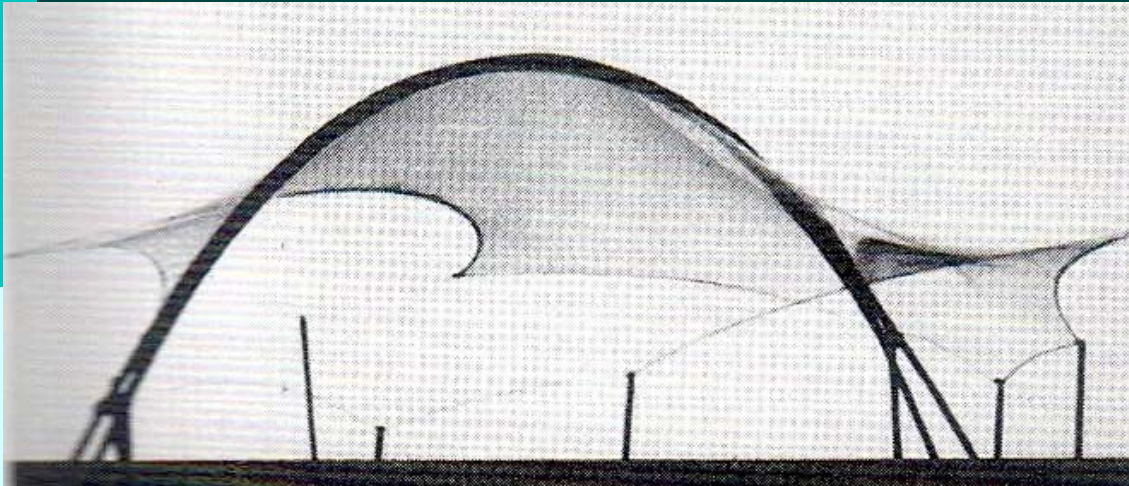
□ ugrađivanjem prigušivača poprečno na smjer pružanja zatega



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ 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



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Federal Garden Exhibition, Köln (1957)**

- Kabeli i jarboli izvedeni u čeliku
- Membrana prvenstveno u neimpregniranoj tkanini od mješavine pamuka i poliestera, kasnije zamijenjena poliesterskom tkaninom presvučenom PVC-om
- Raspon 33 m
- Površina pokrivena membranom 684 m²
- Površina tkanine 998 m²



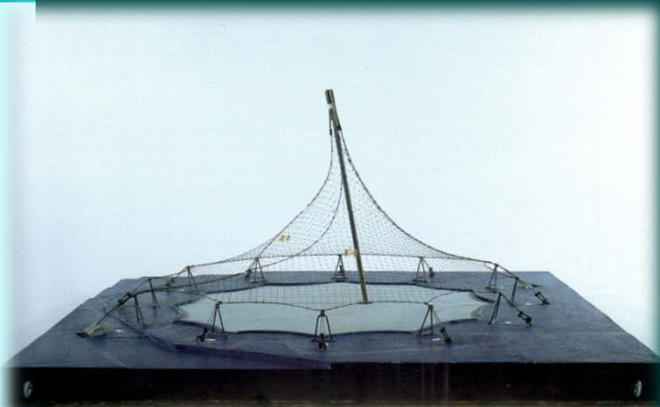
PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ International Garden Festival, Hamburg (1963)



■ Institute for Light Weight Structures, Stuttgart (1967)



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Expo Paviljon, Montreal (1967)**

- jarboli izvedeni u čeliku ST 37 (80 t), visine 14 – 38 m
- membrana u poliesterskoj tkanini presvučenoj PVC-om, površina koju pokriva 7730 m², površina tkanine 9500 m²
- mreža kabela u čeliku, 7t čelika za prednapinjanje
- volumen betona temelja 350 m³, armaturni čelik 20 t



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Olympic Stadium, München (1972)**

- Rubno napeta membrana ovješena o jarbole, 260 x 250 m
- Osnovni rubni čelični kabeli sidre se u betonske blokove na oba kraja.

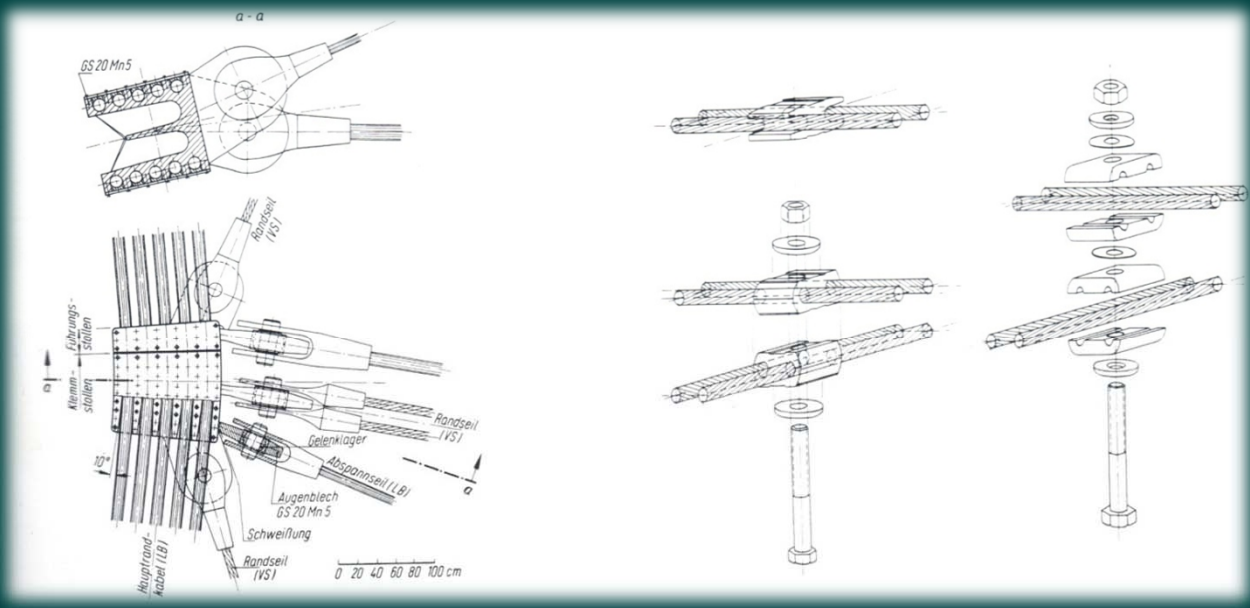
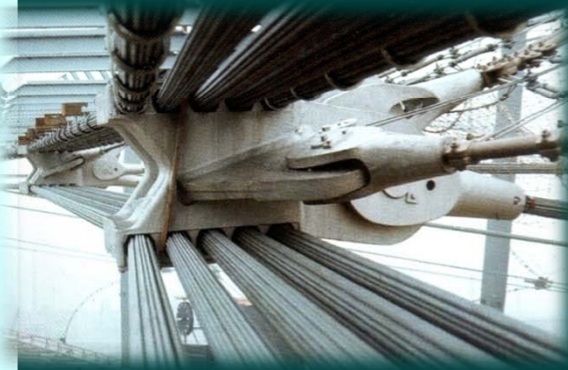
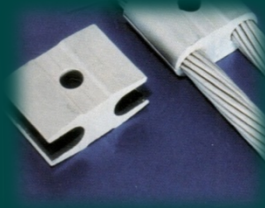


PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Olympic Stadium, München (1972)**

- Rubni kabeli stabilizirani su mrežom manjih kabela koji su pričvršćeni za rubne.



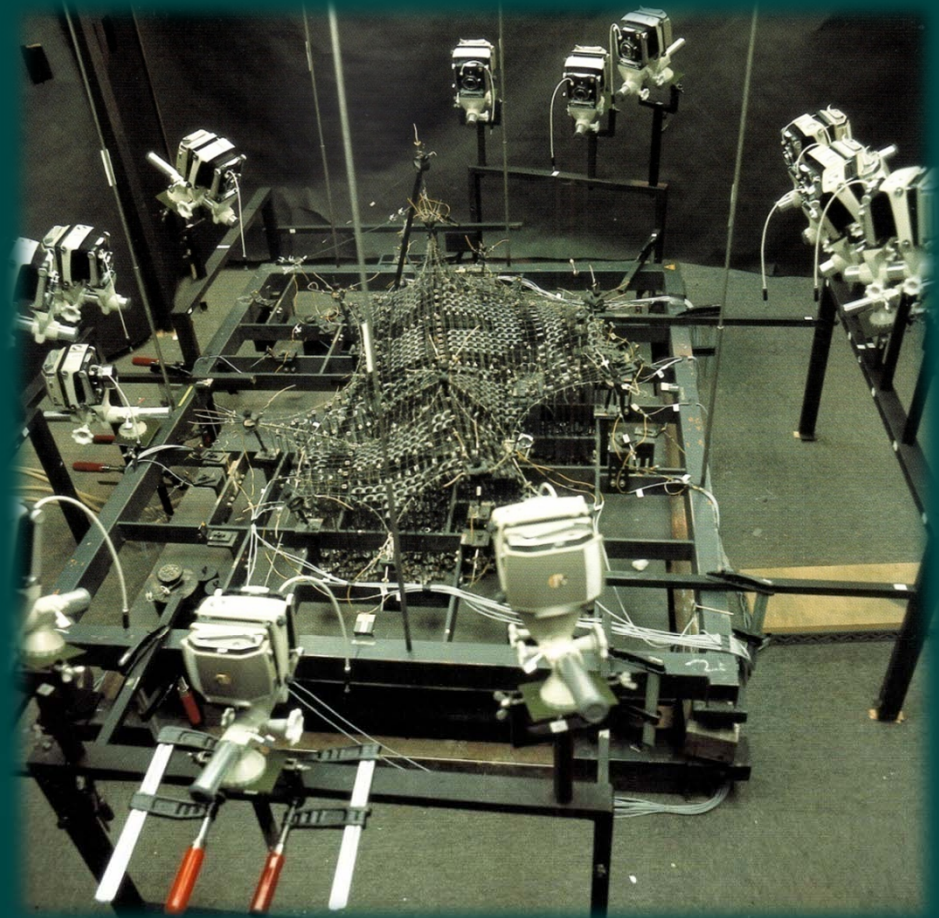
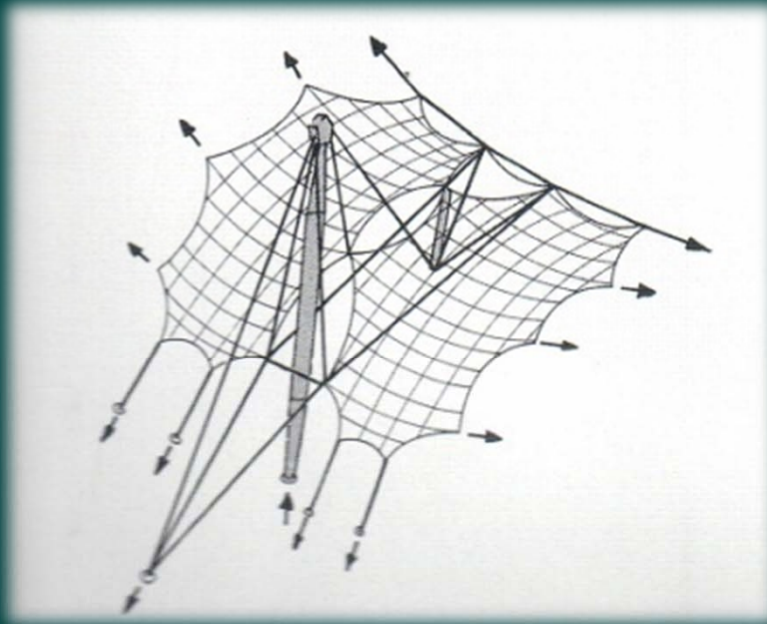
PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Olympic Stadium, München (1972)**

□ Mjerni model s fotogrametrijskim uređajima

□ Mreža kabela sa sustavom prijenosa opterećenja



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ **Krov bazena, Regensburg (1972)**

- Nosivi sustav je membranska konstrukcija točkasto napregnuta
- Jarbol je od čelika, membrana od tekstila

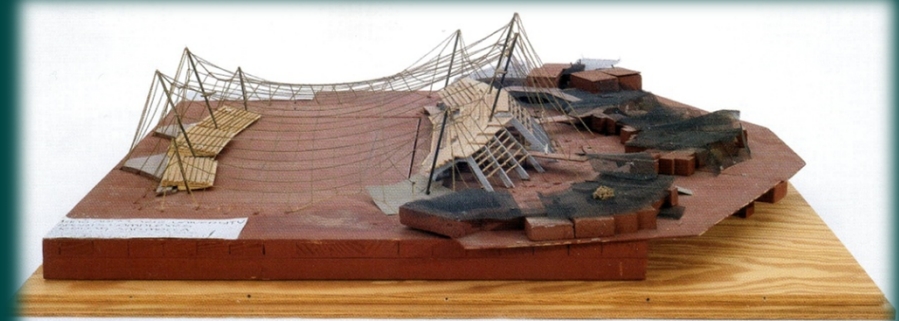


PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Frei Otto

■ *Sports Hall, Jeddah, Saudijska Arabija (1981)*

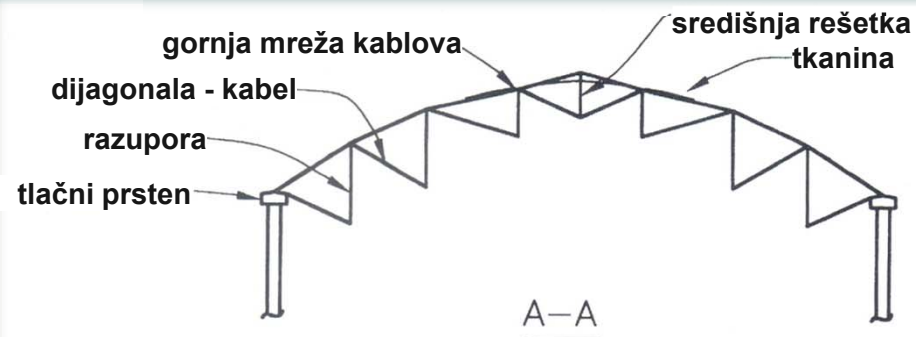
- membrana u poliesterskoj tkanini presvučenoj PVC-om, površina koju pokriva 7500 m², površina tkanine 9000 m²
- Jarboli visine 30 m
- Raspon 100 m



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Atlanta Georgia Dome Stadium (1992)

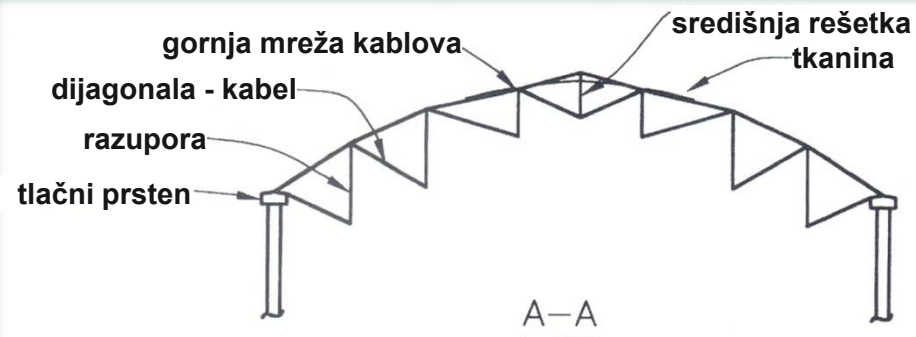
- Kupola sa kabelima
- Tri vlačna koncentrična obruča
- Obruči povezani vertikalnim čeličnim podupiračima



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

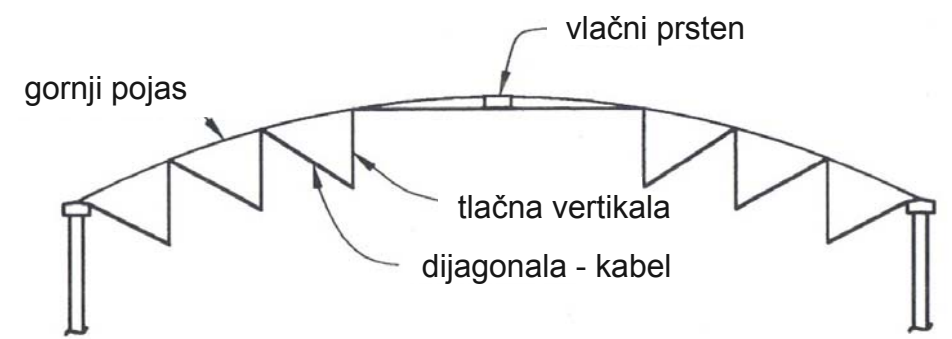
□ Atlanta Georgia Dome Stadium (1992)

- Na vrhovima podupirača šest kabela koji su osigurani čeličnim zakovicama i zavarenim spojevima.
- Mreža kabela spojena je pomoću umetnutih čeličnih ploča s ab betonskim prstenastom gredom oko opsega kupole.
- Preko osnovne konstrukcije razvučeno je i pričvršćeno 114 panela tkanine na bazi teflona.
- Spojevi su napravljeni aluminijskim sklopovima te dodatno ojačani varenjem.



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

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



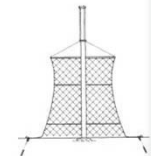
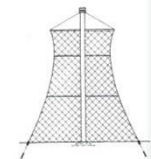
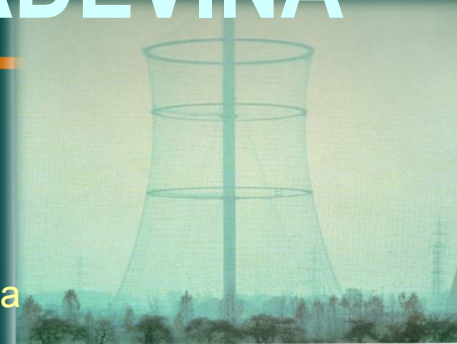
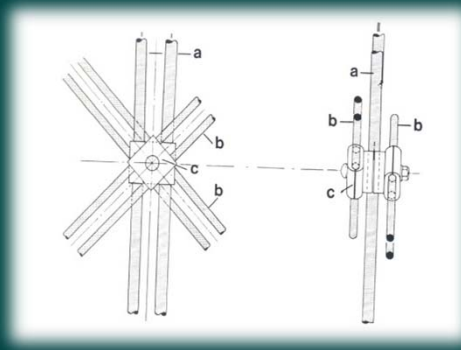
PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

- ❑ Rashladni toranj atomske centrale od mreže kabela, Schmehausen (1974)
 - Promjer 141 – 91 m, visina 180 m



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

- ❑ **Rashladni toranj atomske centrale od mreže kabla, Schmehausen (1974)**
 - mreža kablova je podignuta na središnji jarbol od betona
 - gore i dolje su tlačni prstenovi sandučastog čeličnog presjeka
 - kablovi su postupno dodavani podizanjem svakog segmenta
 - u konačnici je s unutarnje strane postavljena obloga



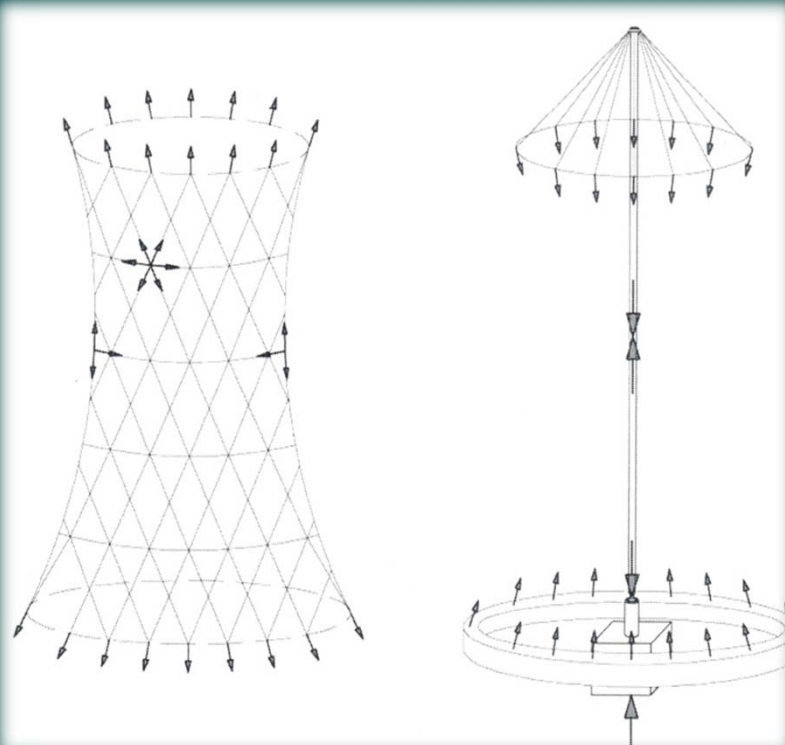
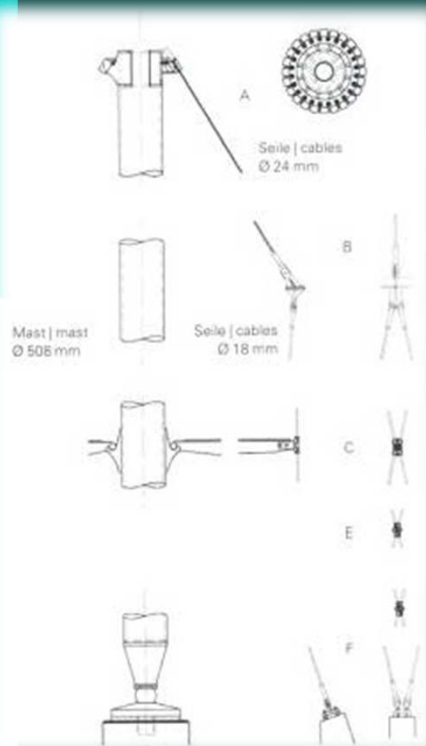
PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

- **Toranj Killesberg, Stuttgart (2001)**
 - Visina 40,3 m, širina pri dnu 21 m
 - dvostruko spiralno stepenište



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

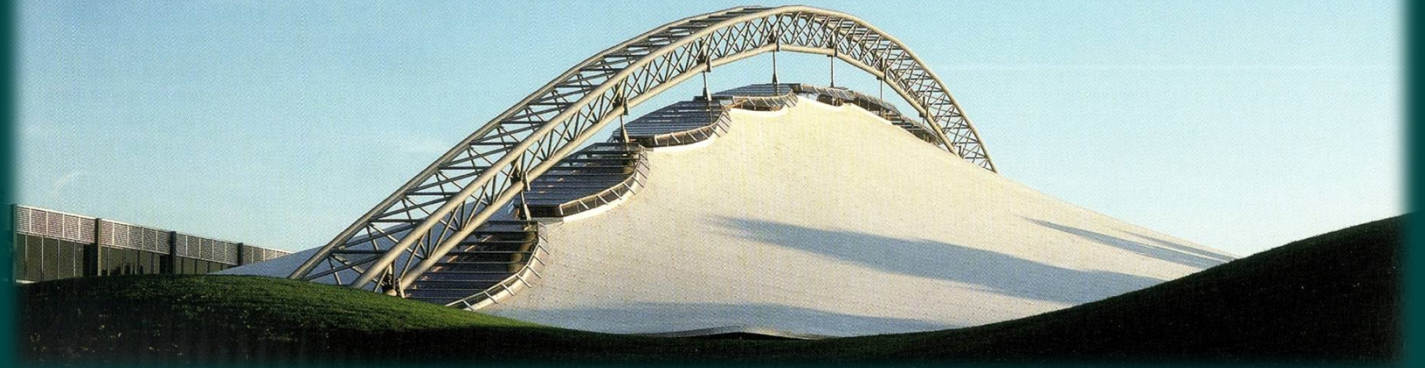
- Toranj Killesberg, Stuttgart (2001)
 - platforme su obješene na mrežu od 48 kablova
 - gore je tlačni prsten, dolje kružni temelj, a u sredini tlačni jarbol



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Klizalište, München (1983)

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



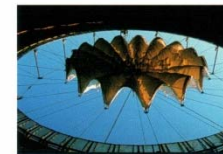
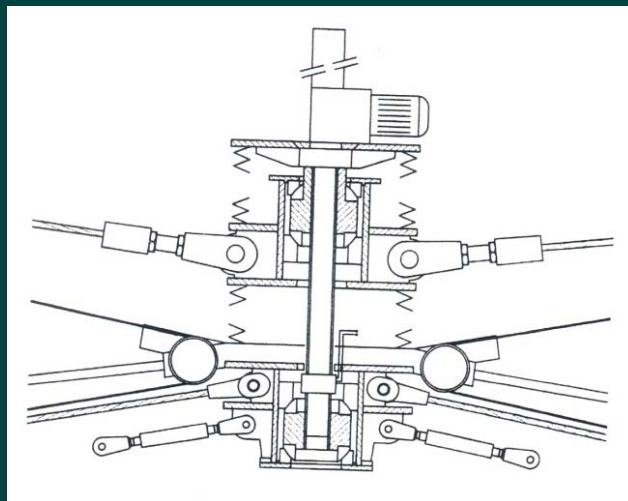
PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

- **Krov Arene za borbu bikova, Zaragoza, Španjolska (1990)**
 - u sredini su dva vlačna prstena ($2r=36\text{m}$) odvojena tlačnim štapovima, a na rubu tlačni prsten ($2r=83$)
 - membrana u poliesterskoj tkanini presvučenoj PVC-om, površina koju pokriva 5400 m^2 ,
 - visina 15 m



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

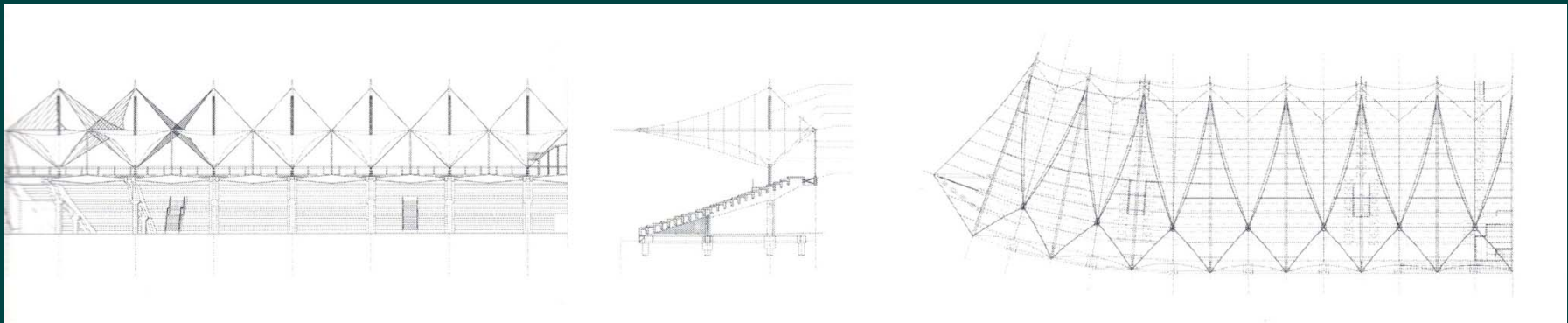
- Krov Arene za borbu bikova, Zaragoza, Španjolska (1990)
 - vanjska membrana je fiksna, a unutarnja se rastvara u slučaju potrebe za svega 2-3 minute



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Natkrivanje Marschweg stadiona, Oldenburg (1995)

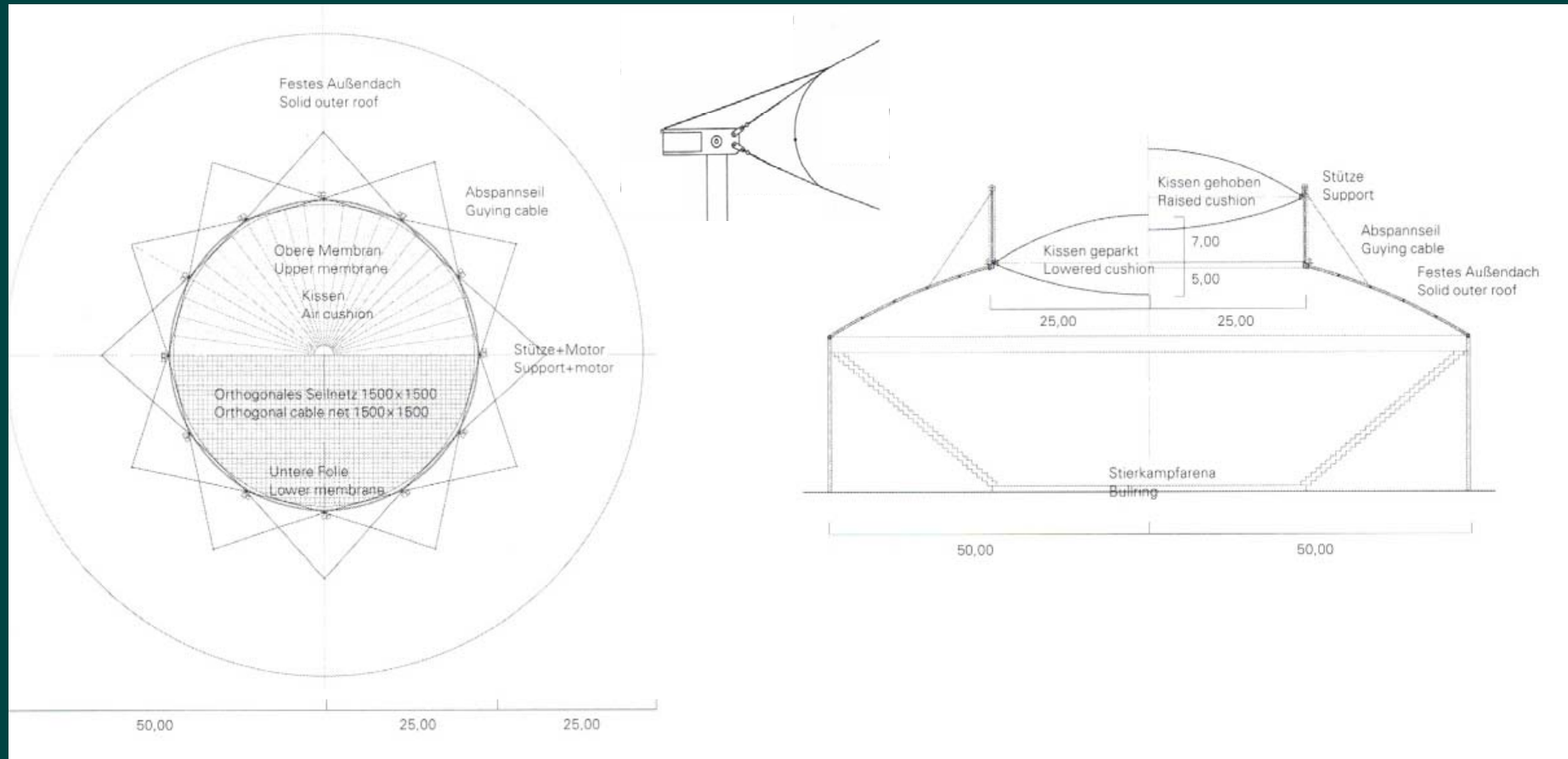
- 14 membranskih segmenata pravokutnog tlocrta je razapeto između horizontalnih konzolnih nosača
- membrane su prednapete spuštanjem jedne njihove točke za 4 m



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Rimski amfiteatar, Nimes (1988)

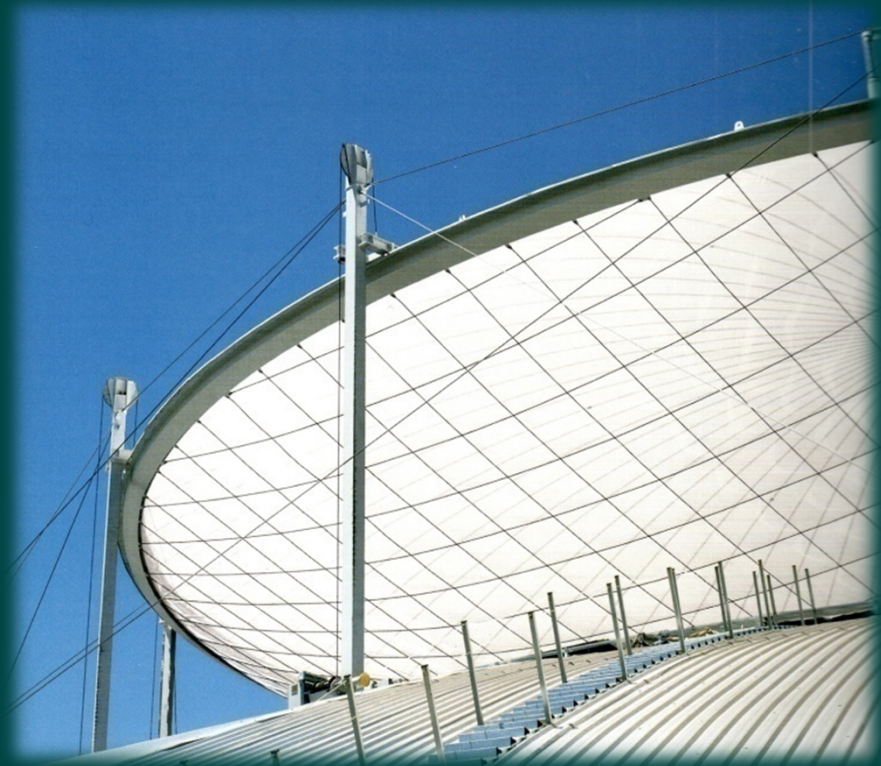
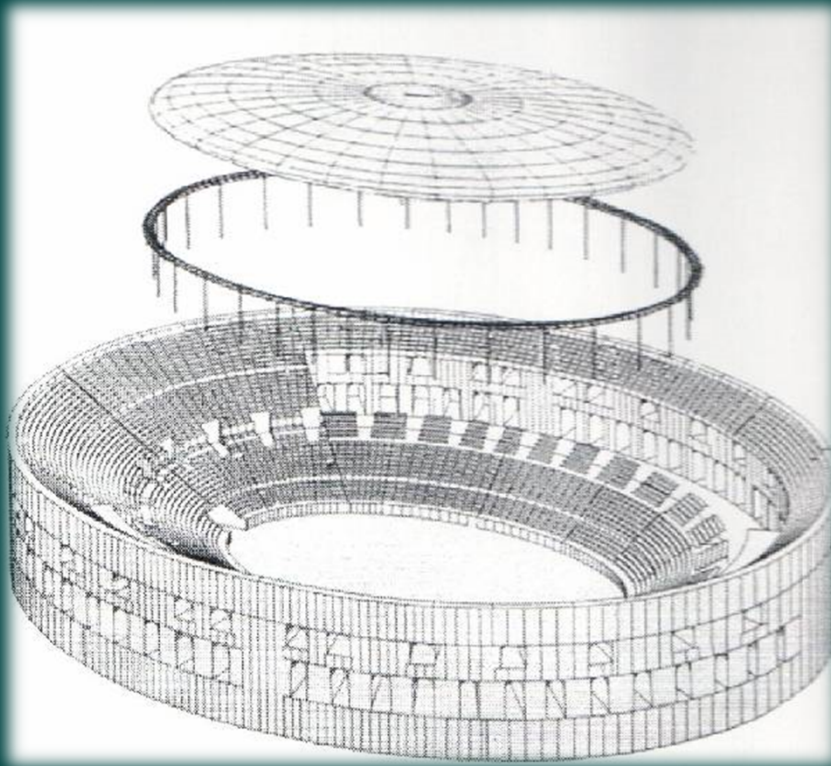
- zrakom napuhana membrana
- zračni jastuk se sastoji od dva sloja (membrane) – gornjeg i donjeg – donji se oslanja na mrežu kablova, a gornji je pridrжан pritiskom zraka



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Rimski amfiteatar, Nimes (1988)

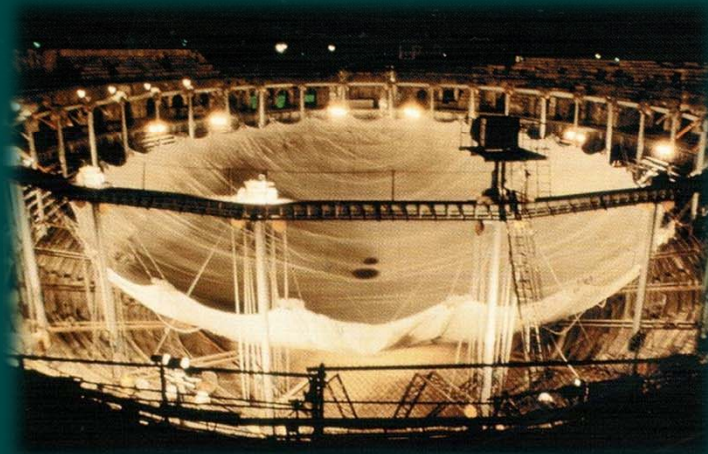
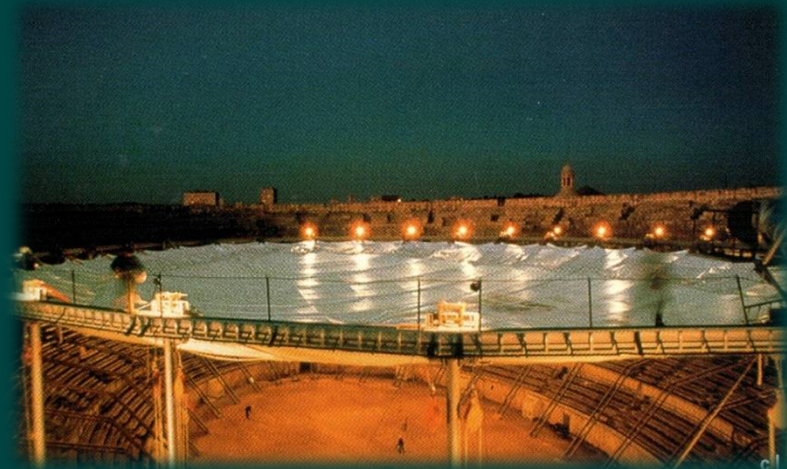
- zrakom napuhana membrana
- zračni jastuk se sastoji od dva sloja (membrane) – gornjeg i donjeg – donji se oslanja na mrežu kablova, a gornji je pridržan pritiskom zraka



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

□ Rimski amfiteatar, Nimes (1988)

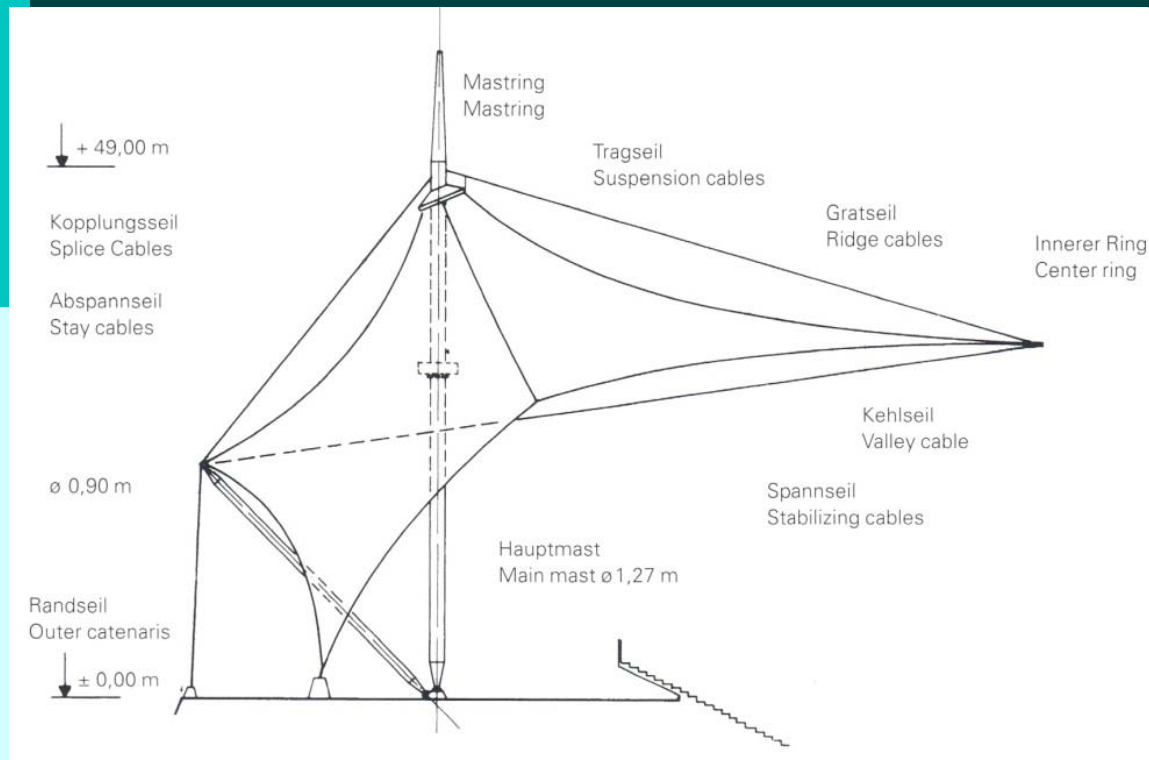
- zimi se zračni jastuk razvuče iznad elipsastog čeličnog tlačnog prstena
- čitav jastuk se može pomicati gore-dolje kako bi dozvolio ulaz zraka i svjetla



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

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

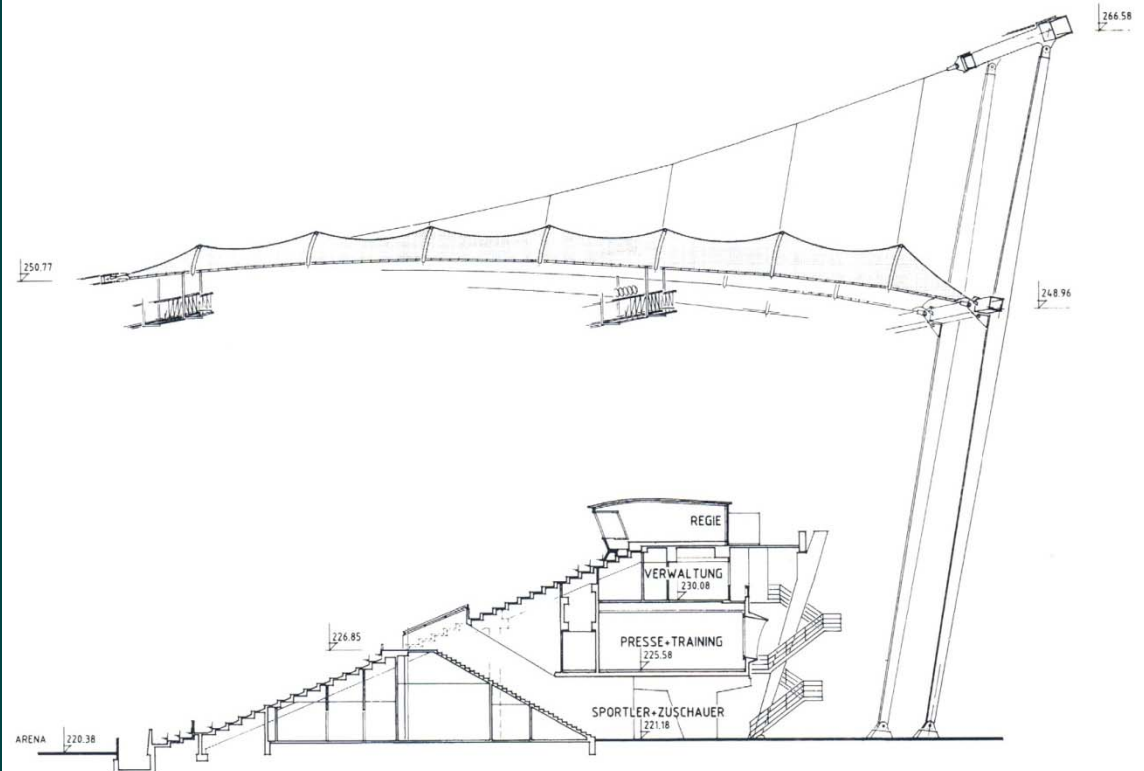
- “šatori” u kružnom rasporedu ostavljaju dojam divovskog cvijeta
- konstrukcija od jarbola i kabela bez tlačnog prstena, sila se prenosi direktno u temelje



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Gottlieb Daimler stadion, Stuttgart (2005)

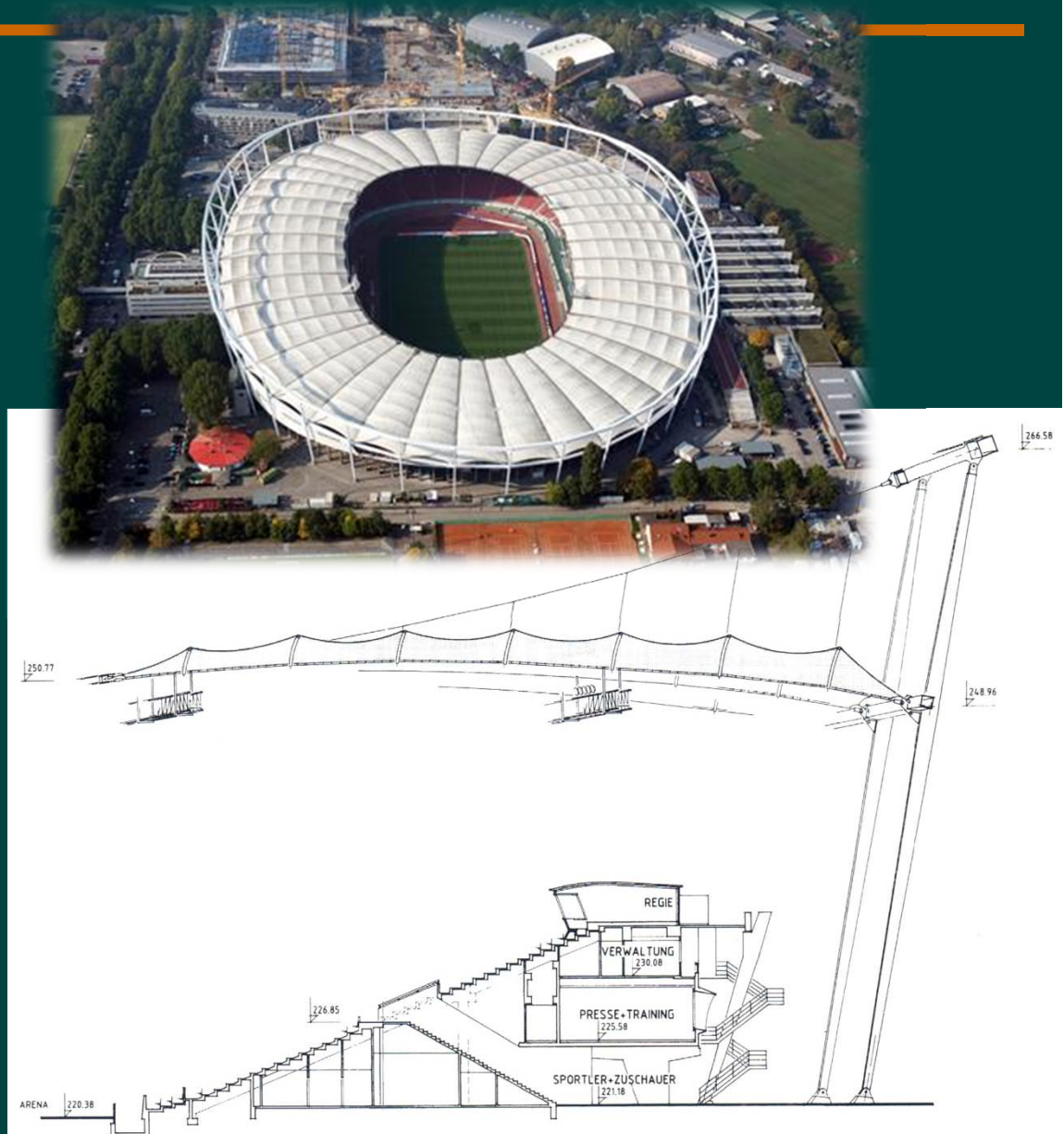
- dva vanjska ovalna tlačna prstena s glavnim osima od 280 m i 200 m oslanjaju se na 40 kosih stupova
- jedan unutrašnji vlačni prsten od 8 kabela Ø 79 mm
- Prsteni su povezani sa 40 meridijalnih vezača od kabela, čiji donji kabeli nose membranu
- membrana je u radijalnom smjeru u svakom segmentu pridržana sa 7 radijalnih lukova sa zategom
- ti se lukovi oslanjaju se na donji kabel meridijalnih vezača na mjestima gdje je povezan s gornjim kabelom



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Gottlieb Daimler stadion, Stuttgart (2005)

- obzirom da membrana stabilizira lukove protiv izvijanja dovoljan im je promjer $D=200\text{ mm}$ za raspon od $L=20\text{ m}$
- svi segmenti mebrane su predgotovljeni
- prema načelu vlastitog usidrenja (*self-anchoring*) sile u tlačnim prstenovima $D=u \cdot R_d$ moraju biti konstantne i jednake silama u vlačnom prstenu $Z=u \cdot R_z$



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Gottlieb Daimler stadion, Stuttgart (2005)

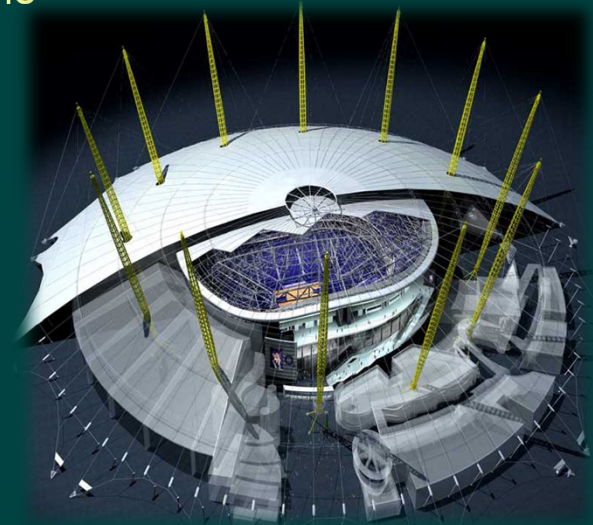


- uslijed promjenjivih radijusa tlačnih prstenova
 - (u tlocrtu od $R=104$ m na zakrivljenim dijelovima do $R=248$ m u ravnim segmentima) mijenjaju se i skretne sile, pa je sukladno prednapinjanje meridijalnih vezača u zakrivljenim segmentima veće nego u segmentima u pravcu
- gornji tlačni prsten je 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

PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ *Millenium Dome, Greenwich (2000)*

- 72 kabla raspoređena su meridijalno na površini membrane
- ovi kablovi su napeti vješaljkama 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



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Stadion *Wembley*, London (2007)

- tlocrt: 103.000 m²
- temeljni piloti: 4000 kom duljine do 35m
- armatura: 15.000 t
- beton: 212.000 t
- konstrukcijski čelik: 23.000 t
- broj nadkrivenih sjedećih mjesta: 90.000
- krov površine: 50.000 m²

■ Luk:

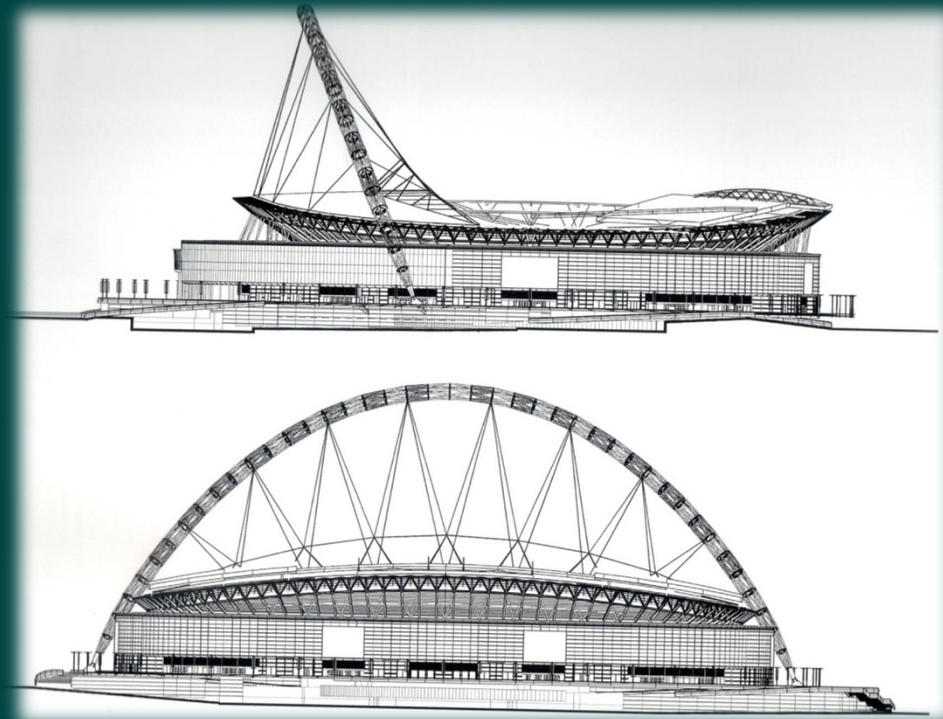
- promjer 7,4 m;
- raspon $L=315$ m;
- strelica $f=133$ m;
- težina $G=1.750$ t
- rešetkastog oblika koji čine 41 čelični prsten (dijafragme) povezane spiralnim pojasevima od cijevi (ukupno 500 cijevi)
- ima 13 segmenata koji se smanjuju prema petama, gdje je luk zglobno oslonjen na betonske baze



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Stadion *Wembley*, London (2007)

- luk je nagnut prema horizontali za 68 stupnjeva, a pridržavaju ga prednje i stražnje zatege koje su povezane na glavnu konstrukciju stadiona
- prednji rub sjevernog krova je ovješten na luk preko prednjih kabela
- kableli su postavljeni u dijagonalnom rasporedu
 - da rasporede opterećenje tako da je savijanje u ravnini pod kontrolom
 - a istovremeno da pridrže luk van ravnine da se odupre izvijanju
- luk nosi 5000 t krovne konstrukcije, pa nema unutarnjih stupova
- osim toga ima i dekorativnu ulogu



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ Montreal Olympic Velodrome, Quebec, Kanada (1976)

- Toranj visine 175 m (najviši kosi toranj)
- Toranj i krov su napravljeni od 5,500 m² kevlara (aramidna sintetička vlakna, materijal velikog odnosa vlačne čvrstoće i težine, ali i velike krтости)
- Krov težine 66 tona pokazao se teškim za povlačenje, a nije se mogao koristiti za vjetrove brzine veće od 40 km/h.
- Popustio je više puta zbog vjetra, jednom zbog nakupljenog snjega.



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

■ San Diego Convention center (1989)

■ Membrana

- ovješena kabelima,
- tkanina od staklenih vlaknaca presvučena PTFE-om
- pokriva površinu od 8400 m²,
- raspona je 91,5 m

■ Jarboli visine 27 m

■ Nosiva konstrukcija: dijelom čelična, dijelom armiranobetonska



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA

▣ Aerodrom u Denveru (1994)

■ Membrana

- poduprta jarbolima
- tkanina od staklenih vlaknaca presvučena PTFE-om
- pokriva površinu od 34848 + 5231 m²,

■ Jarboli visine 39 m



PRIMJERI IZVEDENIH GRAĐEVINA



*Estadio da Luz, Lisabon, Portugal (2003),
membrana ovješena na luk*



*Estadio Algarve, Algarve, Portugal (2004),
membrana ovješena kabelima na jarbole*

**SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE
SLJEDEĆE PREDAVANJE**

Vodotornjevi