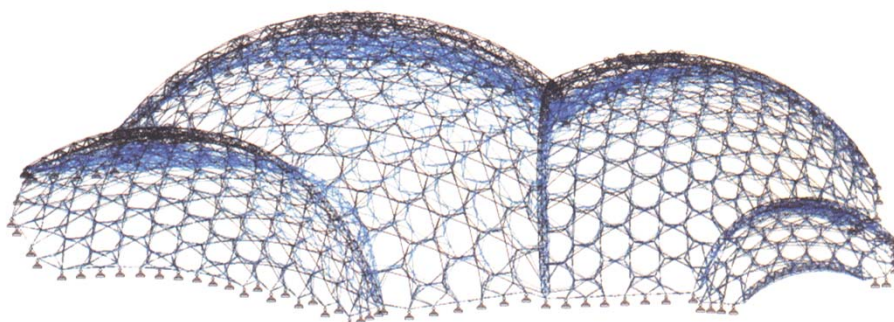


**ARHITEKTONSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**
Inženjerske konstrukcije



2.LAKE STRUKTURE VELIKIH RASPONA



CILJ SVAKE STRUKTURE:

- da bude što lakša
- vlastita težina je "nužno zlo"
- njezina prava svrha je prijenos pokretnih (korisnih) opterećenja i zatvaranja prostora za zaštitu od vanjskih utjecaja

II
V

TEŽNJA DA STRUKTURA BUDE ŠTO LAKŠA

ZAHTJEVI DRUŠTVA I LJUDSKIH POTREBA:

- sve veće potrebe za velikim prostorima za zadovoljavanje kolektivnih potreba
- ostvarivanje takvih prostora uz što manju potrošnju gradiva i energije

II
V

TEŽNJA ZA VELIKIM RASPONIMA

ZAHTJEVI KOD OSTVARIVANJA VELIKORASPONSKIH LAKIH STRUKTURA:

- prikladnost lokacije
- ljepota arhitektonskog oblikovanja
- učinkovitost konstrukcijskog oblikovanja
- optimizacija uporabe gradiva



Montreal Olympic Velodrome, Quebec, Kanada (1976)

CILJEVI UPOTREBE VELIKIH RASPONA:

- nije važno postizanje rekorda
- pronaći realno izvedivo rješenje
- određivanje faktora mjerila koji mogu poslužiti i za optimizaciju manjih raspona



ŠTO NAS MOŽE VODITI PRI OBLIKOVANJU I KONSTRUIRANJU
LAKIH STRUKTURA?

- oblikovanje elemenata po uzoru na prirodne strukture



modeli struktura po uzoru na drveće:
- konzolni elementi grana su deblji
prema osloncu
(veći moment -> veći presjek)



ŠTO NAS MOŽE VODITI PRI OBLIKOVANJU I KONSTRUIRANJU LAKIH STRUKTURA?

- oblikovanje elemenata po uzoru na prirodne strukture



termitnjaci – kupolaste strukture visoke par m izgrađene od bića veličine par mm

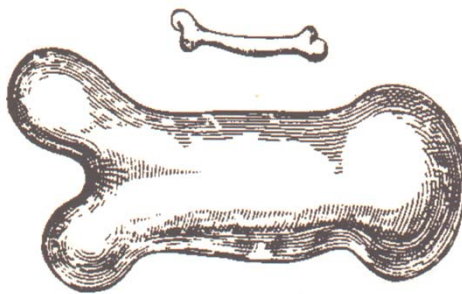
saćaste viseće strukture



PUT SILA JE JEDNOZNAČNO VIDLJIV I KAO TAKVE STRUKTURE DJELUJU SIGURNO I JEDNOSTAVNO!

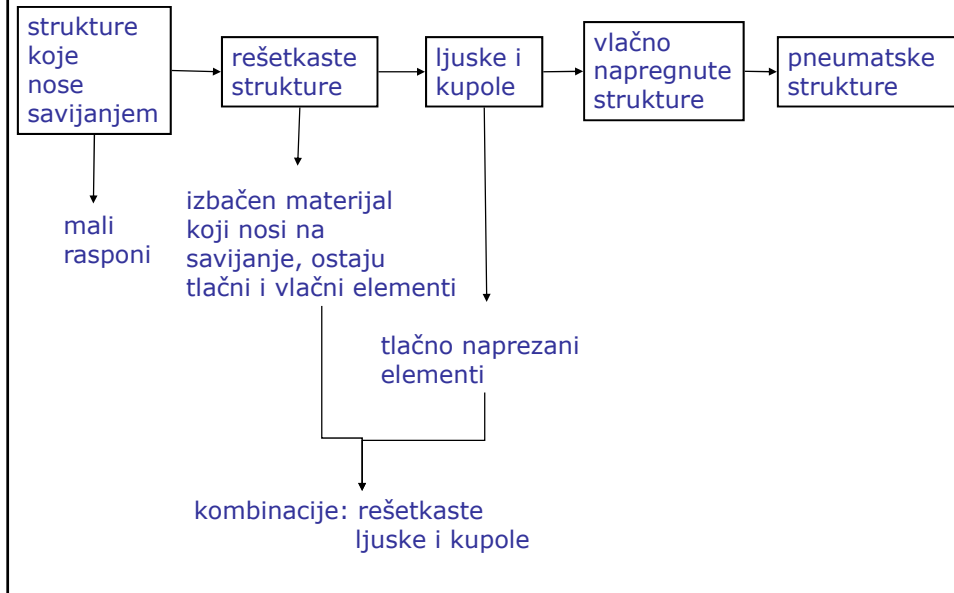
ŠTO NAS MOŽE VODITI PRI OBLIKOVANJU I KONSTRUIRANJU LAKIH STRUKTURA?

- ljudsko tijelo – “savršena struktura” – svaki element ima svoju ulogu koja je jasno uočljiva i međusobno se nadopunjuje s ostalim elementima
- kost – pneumatska struktura – tekućinom ispunjena vlačna membrana



- usporedba kosti ptice i dinosaura -> uči nas o važnosti mjerila kod struktura -> veći rasponi povećavaju vlastitu težinu strukture

RAZVOJNI NIZ PREMA SVE LAKŠIM STRUKTURAMA:



POKAZATELJ "LAKOĆE" STRUKTURE:

odnos $\frac{g}{p}$ $\longrightarrow$ što je manji odnos
struktura je laganija

- na veličinu p (pokretno, korisno) opterećenje ne možemo utjecati – ona je zadana konkretnim projektnim zadatkom

||
v

- na odnos g/p možemo, dakle, utjecati smanjivanjem vrijednosti g (vlastita težina strukture) i to je osnovni zadatak lakih struktura

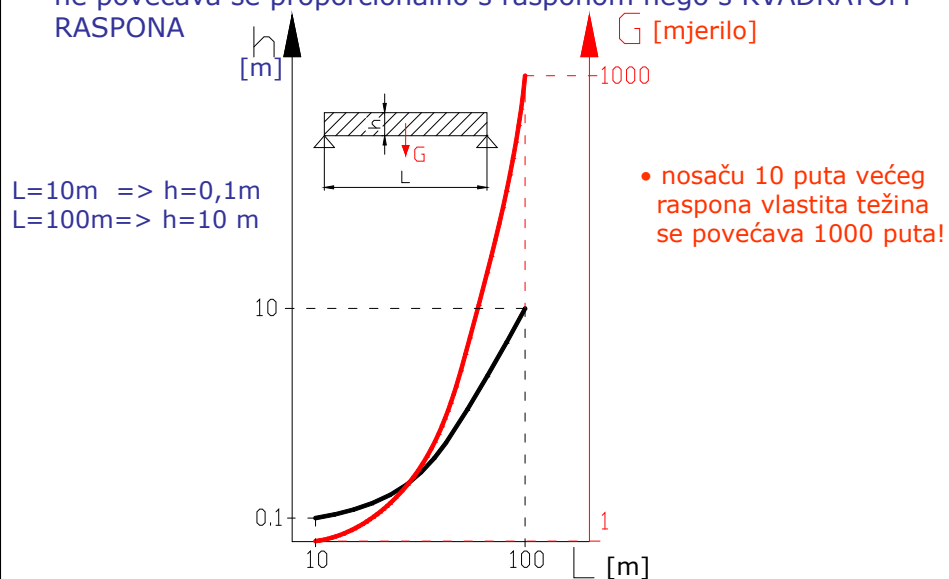
KAKO STVORITI LAKU STRUKTURU?

Pri projektiranju lake strukture moramo voditi računa o slijedećem:

- 1) FAKTOR MJERILA
- 2) ZAMJENA ELEMENATA NAPREZANIH SAVIJANJEM ELEMENTIMA NAPREZANIM "ČISTIM" VLAKOM ILI TLAKOM
- 3) OPTIMIZACIJA VLAČNIH ELEMENATA
- 4) PREDNAPINJANJE
- 5) RAZLIKE LAKIH STRUKTURA U "2D" (mostovi) I "3D" PROSTORNIH STRUKTURA (kupole, ljuske, membrane)

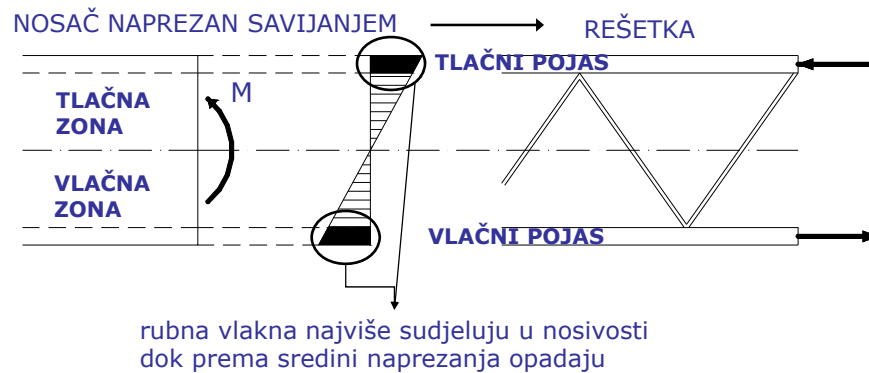
1) FAKTOR MJERILA

- debljina nosača koji uslijed savijanja nosi samo svoju težinu ne povećava se proporcionalno s rasponom nego s KVADRATOM RASPONA



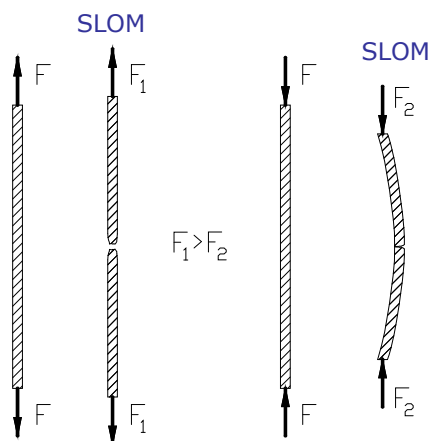
2) ZAMJENA ELEMENATA NAPREZANIH SAVIJANJEM ELEMENTIMA NAPREZANIM "ČISTIM" VLAKOM ILI TLAKOM

- iz prethodne točke vidjeli smo da je generalna težnja smanjiti vlastitu težinu nosača
- to ćemo ostvariti "rastavljanjem" punog nosača na vlačne i tlačne elemente izbacivanjem središnjeg dijela koji ne sudjeluje mnogo u nosivosti već samo doprinosi povećanju težine:



2) ZAMJENA ELEMENATA NAPREZANIH SAVIJANJEM ELEMENTIMA NAPREZANIM "ČISTIM" VLAKOM ILI TLAKOM

- daljnja optimizacija – što veća uporaba vlačnih elemenata jer oni imaju veću nosivost



- tlačni elementi otkazuju prije zbog izvijanja (problem stabilnosti)

3) OPTIMIZACIJA VLAČNIH ELEMENATA

- vlačni elementi mogu se dodatno optimizirati povećavanjem svojstva "duljine pucanja" (eng. rupture length)
- 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 zbog utjecaja svoje vlastite težine
- ova optimizacija može se provesti samo primjenom novih građiva, ona ne ovisi o konstruktivnim zahvatima
- drvo je u tom smislu čak učinkovitije od čelika, dok su kompozitna građiva najučinkovitija

3) OPTIMIZACIJA VLAČNIH ELEMENATA

- 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 S 355	520	79,5	6664
čelik S 1050	1 050	79,5	13 376
titin	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

- napravimo sažetak dosad prikazanog:



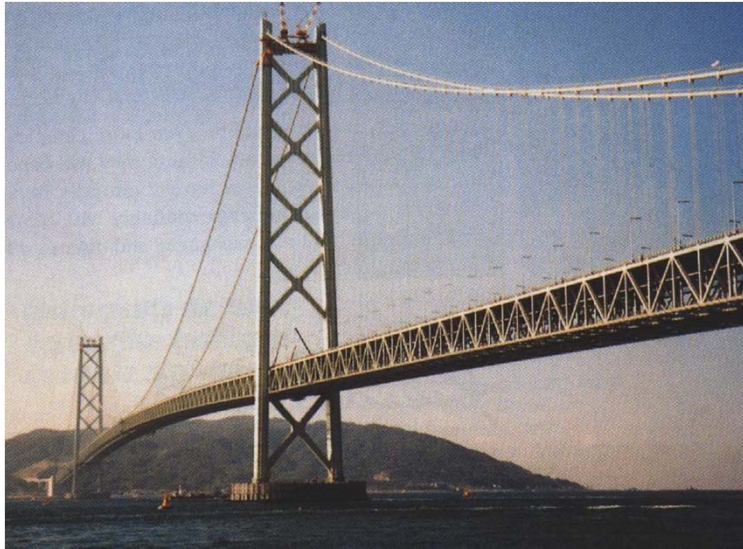
- TREBA UVIJEK TEŽITI OPTIMALNOM RJEŠENJU:
 - konstrukcija mora biti onoliko "teška" koliko je to opravdano da se ispune zahtjevi stabilnosti i ograničenja deformacija!

- TAKO DOLAZIMO DO SLIJEDEĆE TABELE (VRIJEDI ZA MOSTOVE):

TIP STRUKTURE		OPTIMALNI RASPONI		
razina izvedivosti do g≈5p	PUNOSTIJNI NOSAČI	do 100 m		
	REŠETKE, LUKOVI	do 250 m		
	LAKE VLAČNE STRUKTURE	od 300 m	do 1000 m	sidrenje unutar strukture
			od 1000 m	sidrenje izvan strukture

NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI VISEĆIH MOSTOVA:

most **Akashi-Kaikyo** u Japanu (1988)
raspon $L=1.991\text{m}$



NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI VISEĆIH MOSTOVA:

most **Storæbelt** (Veliki Belt) u Danskoj
(1998), raspon $L=1.624\text{m}$

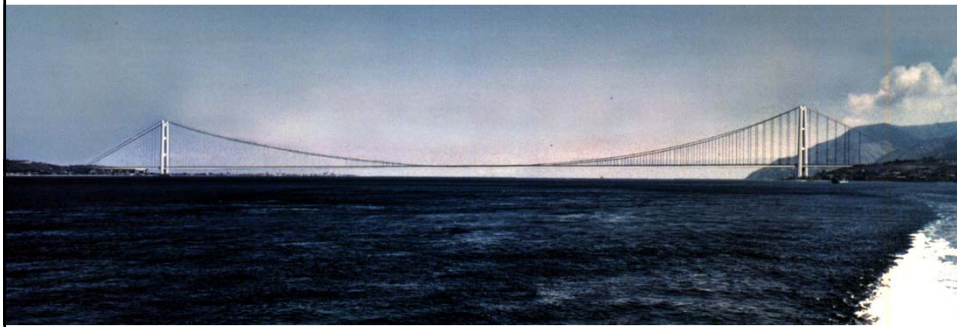


NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI VISEĆIH MOSTOVA:

most **Jiangyin** u Kini (1998)
raspon $L=1.385m$



- trenutno je u planu izgradnja visećeg mosta za povezivanje Sicilije i Italije koji bi bio raspona 3.500m
- polovina nosivosti užeta promjera 1,7 m biti će iskorištena samo na nošenje vlastite težine užeta, dok će druga polovina preuzeti težinu rasponskog sklopa i korisna (pokretna) opterećenja
- ovim mostom bila bi dosegnuta granica lakih visećih struktura od čelika – za danji pomak biti će potrebni novi materijali sa većim odnosom β/γ



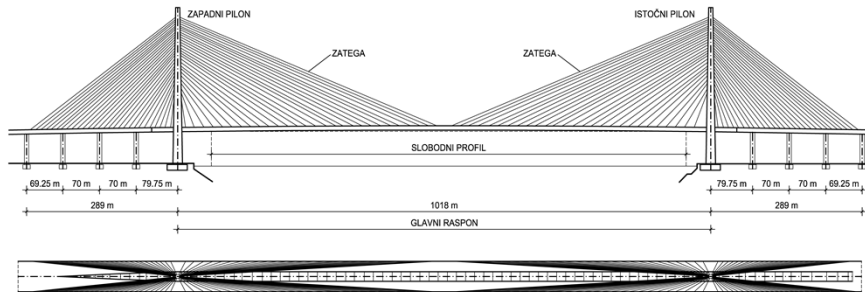
NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI OVJEŠENIH MOSTOVA:

most **Sutong**, Kina (2008)

$L=100+100+300+1088+300+100+100\text{m}$



Most **Stonecutters**, Hong Kong (2010)



Osnovne izmjere mosta

- glavni raspon: 1018 m
- postrani rasponi: 4 raspona $2 \times (79,75 + 70 + 70 + 69,25) = 2 \times 289$ m
- ukupna duljina: 1596 m
- visina pilona: 293 m
- širina kolničke ploče: 51 m







NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI OVJEŠENIH MOSTOVA:

most **Tatara** Japan (1999)
raspon $L=890\text{m}$



NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI OVJEŠENIH MOSTOVA:



most **Normandie**
u Francuskoj (1995)
raspon $L=856\text{m}$

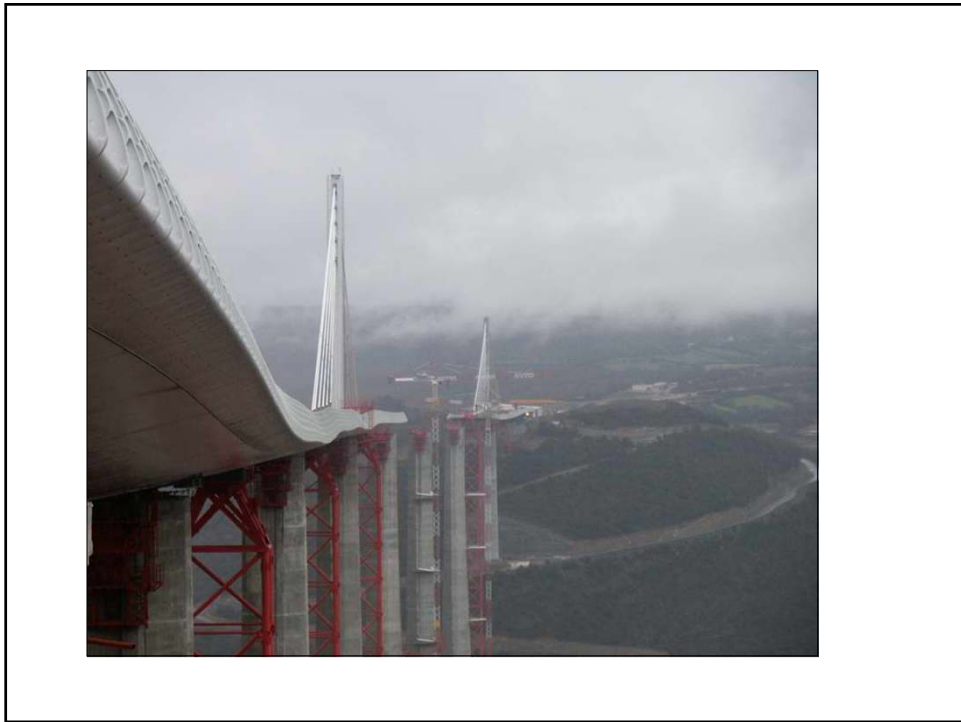


vijadukt **Millau**, Francuska (2004)

rasponi: $204+6\times 342+204\text{ m}$

projektant: Michel Virlogeux
arhitekt: Sir Norman Foster





most **Rion-Antirion**, Grčka, 2004

rasponi: $286+3 \times 560+286$ m



NAJVEĆI IZVEDENI RASPONI OVJEŠENIH MOSTOVA:

most **Öresund** na prijelazu Danska-Švedska
(2000), raspon $L=490$ m



most **Alamillo**, Španjolska (1992)

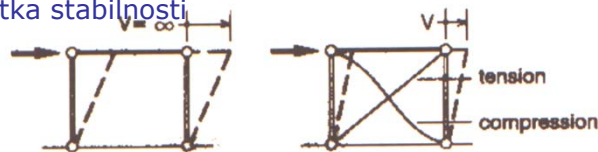
projektant: Santiago Calatrava



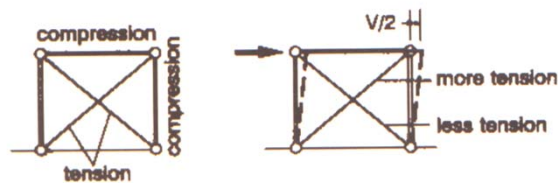
Nastavit ćemo sa započetim slijedom metoda ostvarivanja lakoće struktura...

4) PREDNAPINJANJE

- cilj je izbjeći nepovoljni tlak koji uzrokuje otkazivanje uslijed gubitka stabilnosti



- to ćemo ostvariti transformacijom nepovoljnog tlaka u vlak

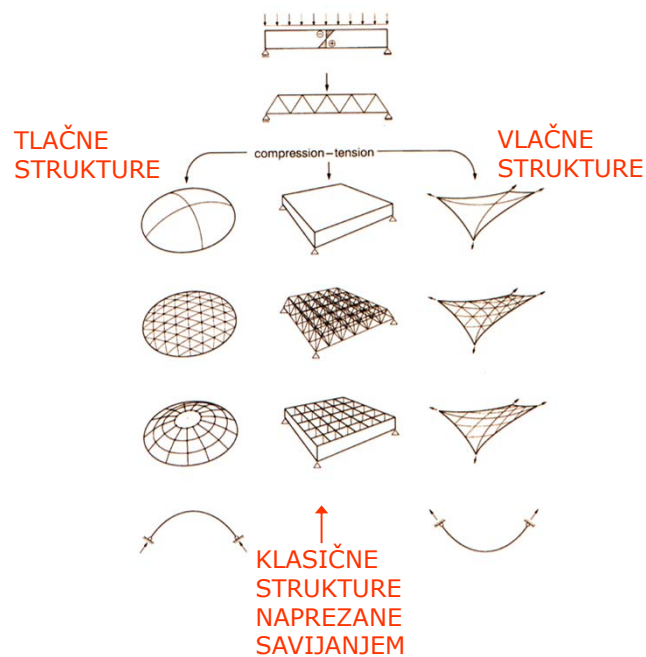


- ovime se omogućava izvedba vrlo lakih nosača sa kablovima ili mrežom kablova

5) RAZLIKE LAKIH STRUKTURAMA U "2D" (mostovi) I "3D" PROSTORNIH STRUKTURA

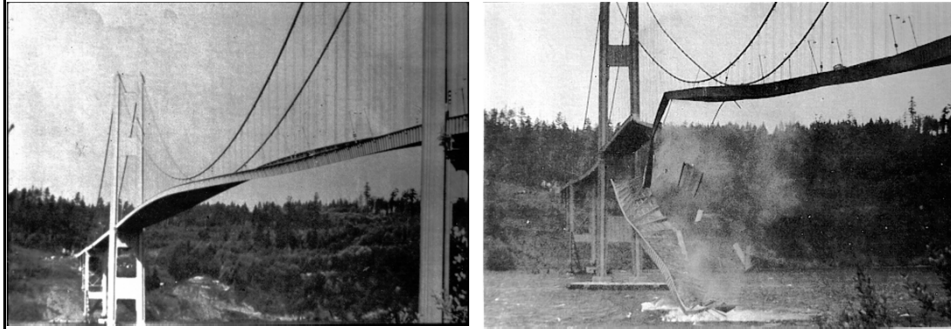
- dosada smo se pri definiranju lakih struktura zadržavali na onima koji imaju naglašenu jednu ili dvije dimenzije - **mostovi**
- sada ćemo to proširiti na prave **prostorne strukture**, a to su:
 - **tlačno napregnute kupole** ili **ljuske**
 - **slobodne viseće** (vlačne) strukture
 - **prednapete viseće** strukture
 - **pneumatske** strukture
- njihovu geometriju dobijamo dodavanjem još jedne ravnine zakrivljenosti u poprečnom smjeru
- **sve su one opterećene samo tlačnim ili vlačnim naprezanjima**

PREGLED PROSTORNIH LAKIH STRUKTURA:



PREDNOSTI PROSTORNIH LAKIH STRUKTURA
U ODNOSU NA MOSTOVE:

- njihova dvostruka zakrivljenost daje im dodatnu stabilnost, koja je kod analognih "2D" struktura u mostogradnji najveći problem



poznato rušenje Tacoma mosta zbog nedovoljne stabilnosti u poprečnom smjeru pri djelovanju vjetra

NEDOSTATCI PROSTORNIH LAKIH STRUKTURA
U ODNOSU NA MOSTOVE:

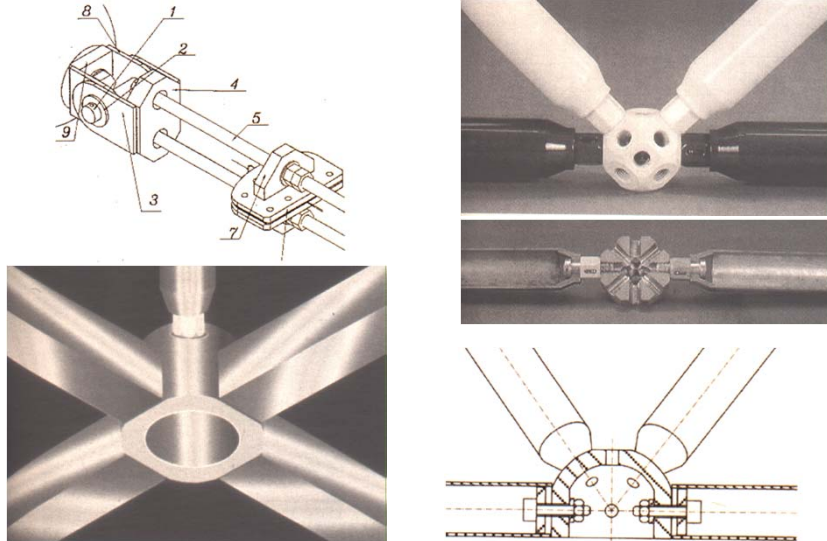
- složena i skupa proizvodnja (oplata, krojenje...)

STRUCTURE	MANUFACTURE	GEOMETRY
 SQUARE NET	 SQUARE NET	 free
 TRIANGULAR NET	 TRIANGULAR NET	 restricted
 TEXTILE MEMBRANE	 TEXTILE MEMBRANE	 free
 THIN METAL SHEET MEMBRANE	 THIN METAL SHEET MEMBRANE	 restricted

→ prikaz dvostruko zakrivljenih struktura u odnosu na proizvodnju i geometriju

NEDOSTATCI PROSTORNIH LAKIH STRUKTURA
U ODNOSU NA MOSTOVE:

- mnogo detalja koji zahtijevaju veliku preciznost izvedbe

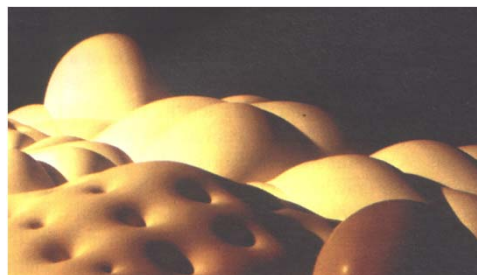
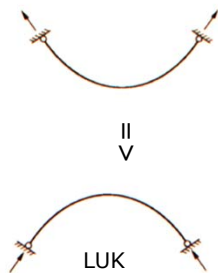


PREGLED PROSTORNIH LAKIH STRUKTURA:

1) LJUSKE I KUPOLE

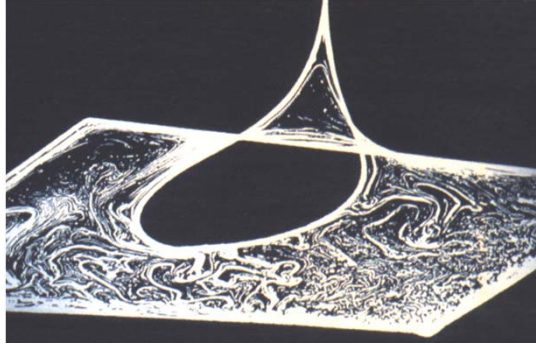
- strukture napregnute na tlak
- idealan oblik se dobije "inverznom" metodom:
 - vlačno opterećeni elementi kao što su užice ili membrana zauzimaju oblik koji kada se "preokrene" daje optimalni tlačni element

2D PRIKAZ - LANČANICA



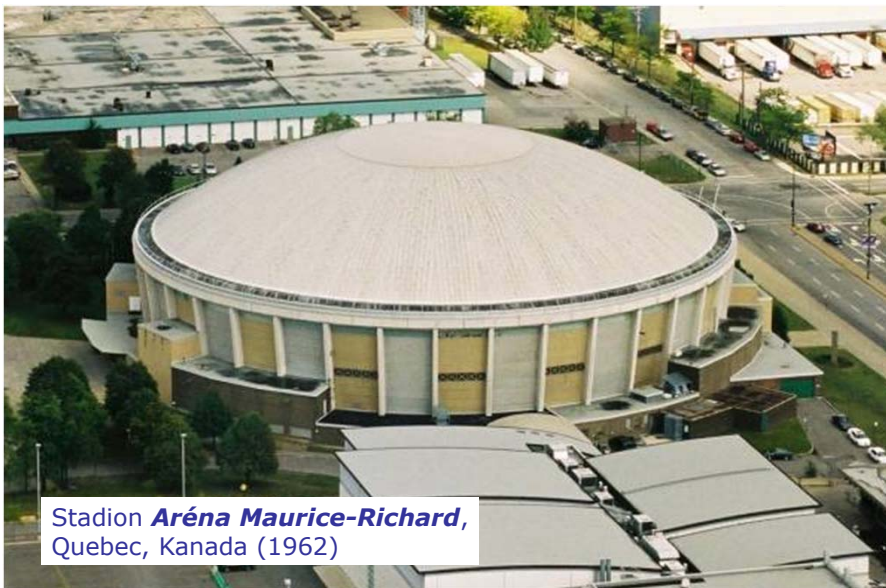
gumena membrana napuhana zrakom i oblikovana gipsom – gipsani model daje idealnu tlačnu strukturu

- uz oblikovanje takvom "inverznom" metodom dobiju se veliki rasponi uz minimum upotrebe materijala
- zato je pravilno modeliranje i dimenzioniranje moguće tek uz upotrebu računala



inverzijom "vlačnog oka", koje se dobije napinjanjem konca okruženog filmom od sapunice, možemo dobiti idealan oblik ljuske koja će biti u vlaku

1) LJUSKE I KUPOLE:



Stadion **Aréna Maurice-Richard**,
Quebec, Kanada (1962)

1) LJUSKE I KUPOLE:



Stadion **Fukuoka**,
Japan (1993)



1) LJUSKE I KUPOLE:



Crkva **Rochus**,
Düsseldorf (1955)

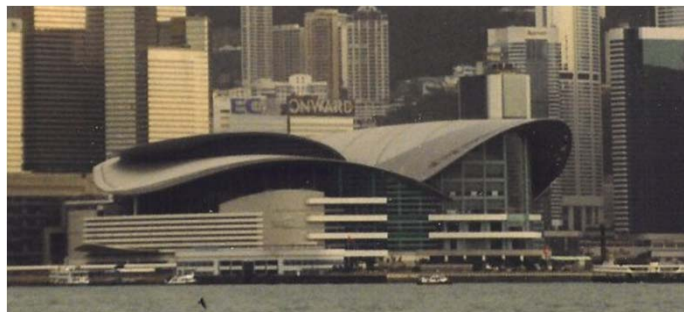


izložbeni prostor **Global Garden**,
Newcastle, Engleska (2000)

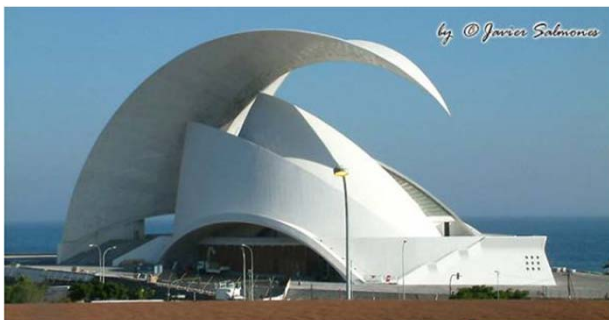
1) LJUSKE I KUPOLE:



**Hong Kong
Convention &
Exhibition
Centre (1997)**



1) LJUSKE I KUPOLE:



koncertna dvorana
Tenerife, Španjolska
(2003)

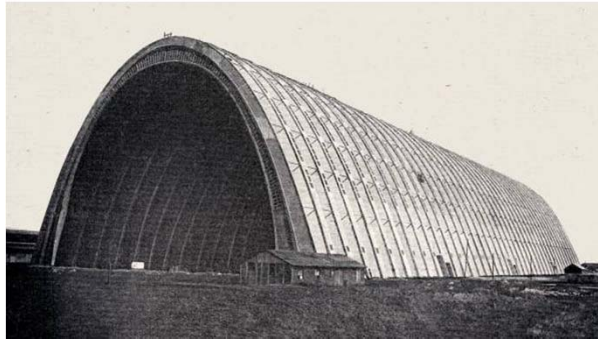


Kongresni centar **CNIT**, Francuska (1958)

1) LJUSKE I KUPOLE:



Sydney Opera,
Australija (1973)



Orly Hangars,
Francuska (1923)

1) LJUSKE I KUPOLE:



Opera **National de Lyon,**
Francuska (1830)

- moguće je ljske i kupole oblikovati i kao rešetkaste strukture te na taj način uštedjeti materijal i što je još važnije smanjiti njihovu vlastitu težinu



Essen (1962)

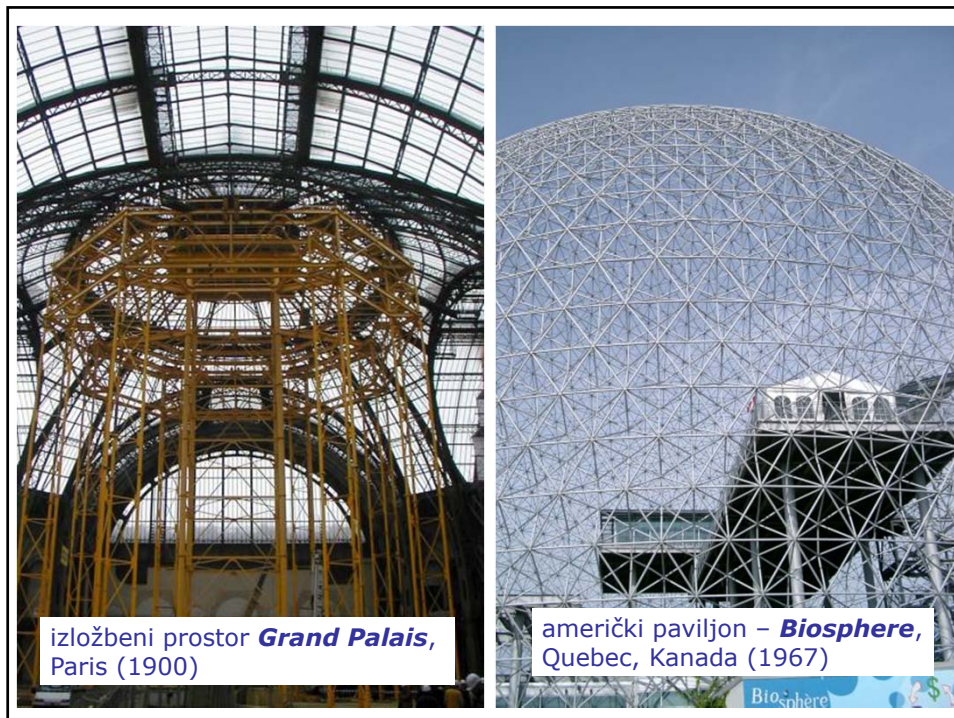
**Bundesgartenschau,
Mannheim**



aerodrom **Chek Lap Kok,**
Hong Kong



Orvieto Hangars,
Italija (1935)



2) SLOBODNO VISEĆE (VLAČNE) STRUKTURE:

- iskorištavaju efikasnost vlačno napreznih elemenata koji imaju velik odnos β/γ
- problemi koji proistječu zbog slobodnog ovješnja:
 - stabilnost
 - velike deformacije



rješavaju se utjecajem vlastite težine
ili dodavanjem dodatnog tereta

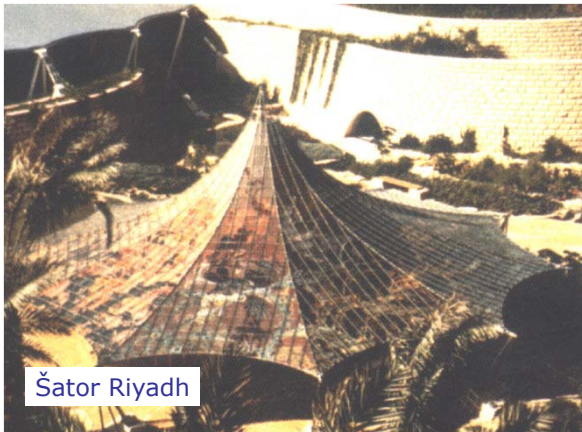
2) SLOBODNO VISEĆE (VLAČNE) STRUKTURE:



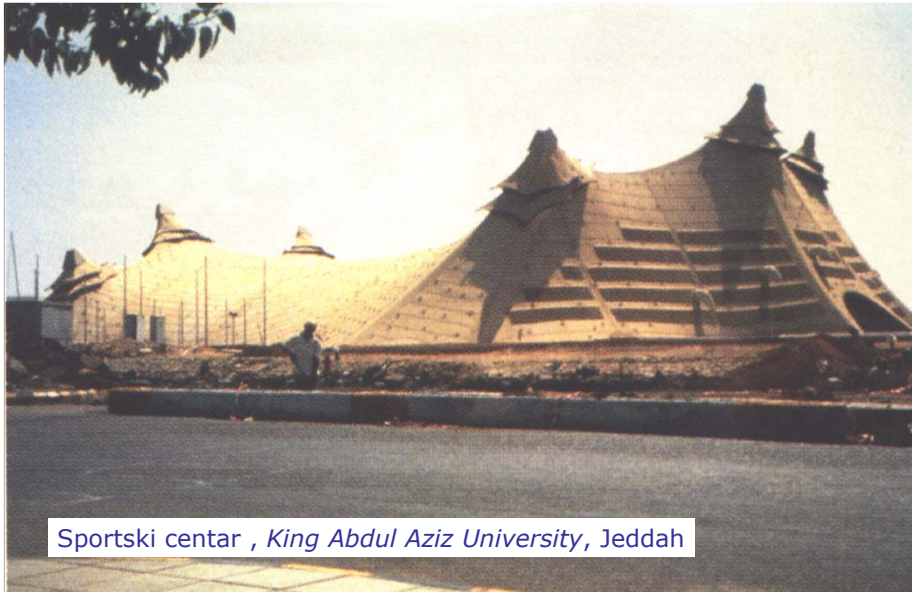
tramvajska stanica u Heilbronnu (2001)

3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:

- problem stabilizacije riješen je prednapinjanjem, redovito u dva osnovna smjera, ali moguće i varijacije
- tipovi:
 - "šator" sa središnjim tlačnim elementom i radijalnim vlačnim užetima između kojih je napeta membrana



3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:



Sportski centar , King Abdul Aziz University, Jeddah

3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:

- tipovi:
 - dvostruko zakrivljeno "sedlo" - hipar



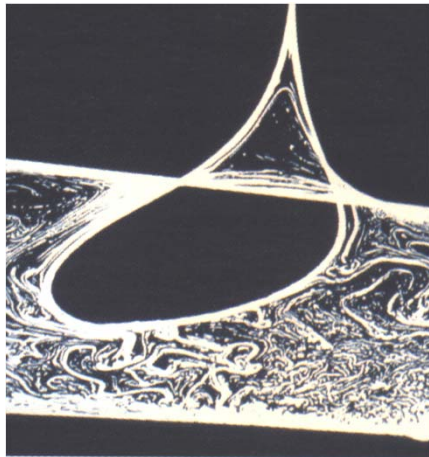
Venecija Bienale, (1996)



Plesna pozornica Kőln, (1957)

3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:

- tipovi:
 - analogija sa "vlačnim okom"



Institut für leichte Flächentragwerke

3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:

- tipovi:
 - strukture ovješene na kablovima



stadion **Europahalle**,
Karlsruhe (1983)



3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:



Lufthansa Hangar,
Frankfurt (1972)

3) PREDNAPETE VLAČNE STRUKTURE:



**Ashkhabat
Olympic
Stadium,**
Turkmenistan
(2000)

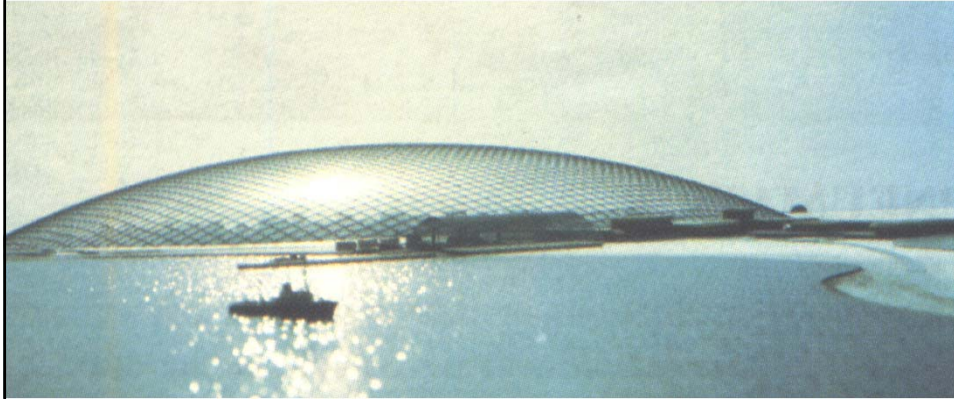


Materijali koji
se često koriste:

- poliuretanom
obloženo
stakleno
platno
- pvc obloge

4) PNEUMATSKE STRUKTURE

- ostvaruju se izazivajući razliku u tlaku između unutarnjeg i vanjskog medija ->npr. zrak, voda, helij...
- ekonomično i sigurno zatvaranje velikih prostora

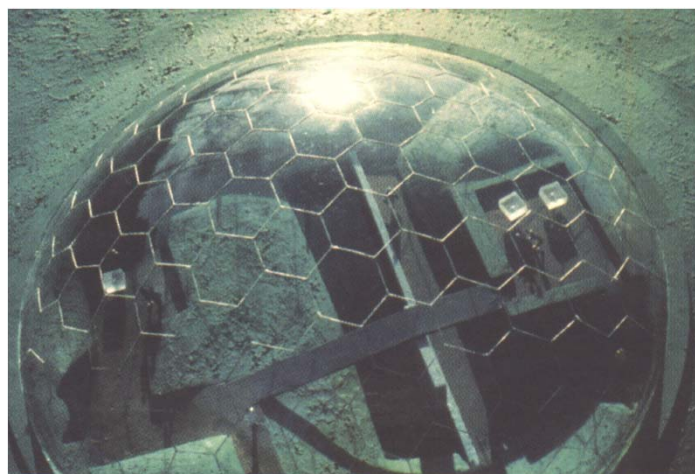


City of Arctic (1971)

- primjer modela – gumena membrana napuhana zrakom

4) PNEUMATSKE STRUKTURE

- studije pokazuju izvedivost pneumatske građevine od aluminijskih ploča raspona 800m!



PRIMJENA VELIKORASPONSKIH LAKIH STRUKTURA:

INDUSTRIJSKE GRAĐEVINE:

- HANGARI
- SKLADIŠTA
- ZRAČNE LUKE

DRUŠTVENE GRAĐEVINE:

- SAJMOVI I VELESAJMOVI
- KONGRESNE DVORANE
- KAZALIŠTA I AUDITORIJI
- AKTIVNOSTI NA OTVORENOM

SPORTSKE GRAĐEVINE:

- STADIONI
- SPORTSKE HALE (DVORANE)
- BAZENI
- "LEDENE" DVORANE
- ATLETSKE DVORANE

EKOLOŠKE GRAĐEVINE:

- SANITARNA ODLAGALIŠTA
- IZOLACIJE OD ZAGAĐENJA

PREDNOSTI LAKIH STRUKTURA:

• EKOLOŠKO GLEDIŠTE:

- optimalna iskorištenost čvrstoće materijala
- moguća demontaža
- omogućena reciklaža gradiva
- zadovoljavaju zahtjeve održivog razvoja

• SOCIOLOŠKO GLEDIŠTE:

- otvaranje novih radnih mjesta jer je orijentacija na izradi i proizvodnji detalja
- davanje veće važnosti intelektualnom razvoju inženjera naspram današnjem pristupu radu kao "ispunjenju radnog vremena"

• KULTUROLOŠKO GLEDIŠTE:

- obogaćivanje arhitekture
- lakoća, prozračnost, fleksibilnost naspram težine, zatvorenosti i krutosti -> izaziva ugodnije osjećaje
- put sila je lakše uočljiv -> tehnologija djeluje poput prirode dajući dojam sigurnosti

NEDOSTATCI LAKIH STRUKTURA:

- relativno mala otpornost na prirodna djelovanja
- vjetar, snijeg, temperatura (iako ne i potres!)
- velika cijena i stručnost radne snage potrebne za izvedbu
- skupi materijali

ZAKLJUČAK:

- PREDNOSTI UVELIKE PREMAŠUJU NEDOSTATKE TE JE SVAKAKO PREPORUČLJIVO ORIJENTIRATI SE NA PROJEKTIRANJE UPRAVO OVIH STRUKTURA, AKO ZA TO POSTOJE UVJETI!