GRAĐEVINSKI FAKULTET

ZAVOD ZA KONSTRUKCIJE

KATEDRA ZA MOSTOVE

Ovješeni mostovi

1. Uvod

- U toku posljednjih tridesetak godina ovješeni mostovi doživljavaju spektakularan razvoj u cijelom svijetu.
- Ekonomičnost ovih mostova ne leži samo u odličnom iskorištenju materijala kod eksploatacije već i u jednostavnoj izvedbi konzolnom gradnjom bez pomoćnih skela, stupova i zatega.
- I ovi su sklopovi kao i mnogi drugi u čeličnim konstrukcijama bili ranije poznati, pa su i za betonske mostove većih raspona postali vrlo prihvatljiv sustav.

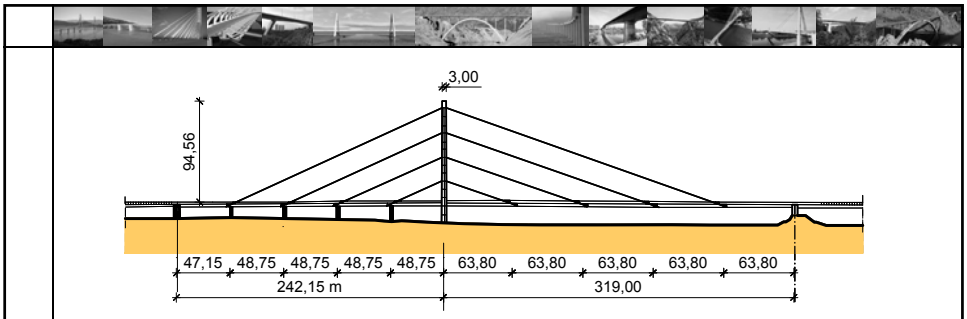


- Oblikovanju ovješenih mostova valja posvetiti osobitu pozornost, jer su to nesvakidašnje konstrukcije, koje se jako ističu u prostoru.
- Dok su prvi veliki mostovi sa kosim zategama bili sa niskom niveletom, jer je takva bila topografija terena, (Njemačka je ravničarska zemlja), danas je izveden i veliki broj mostova sa visokom niveletom.
- Zbog atraktivnosti i male konstruktivne visine ovi se sastavi često koriste i od većih pješačkih prijelaza.
- Zavješeni most sa najvećim rasponom danas je most ***Sutong*** u Kini raspona L=1.088m, to je čelični most, najveći most sa spregnutom gredom je ***Yangpu*** u Kini raspona 602m, dok je najveći betonski most ***Skarnsundet*** u Norveškoj raspona 530m.

2. Oblikovanje ovješenih mostova

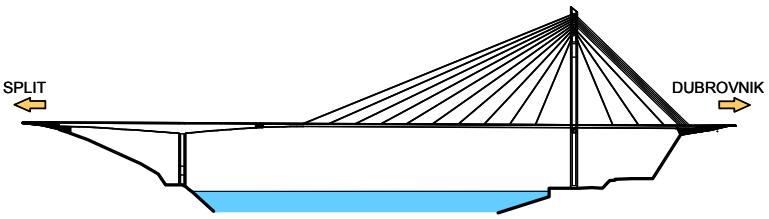
2.1. Uzdužna dispozicija

- Uzdužna dispozicija mostova sa kosim zategama ovisi o vrsti i obliku prepreke, dopuštenim gabaritima, ekonomiji, estetici itd.
- Na temelju uvida u izvedene ovješene mostove može se zaključiti da postoje tri osnovna sustava. Kad se radi o nesimetričnoj prepreci projektant obično predviđa most sa kosim zategama sa ekscentričnim pilonom npr. ***Knie Brücke***, i most ***Franja Tuđmana***.


3,00
94,56
47,15
48,75
48,75
48,75
48,75
63,80
63,80
63,80
63,80
63,80
242,15 m
319,00



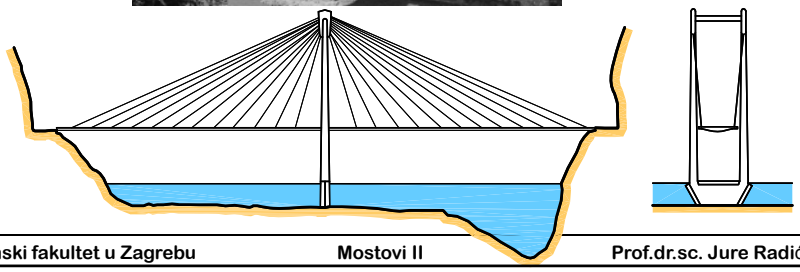



SPLIT
DUBROVNIK



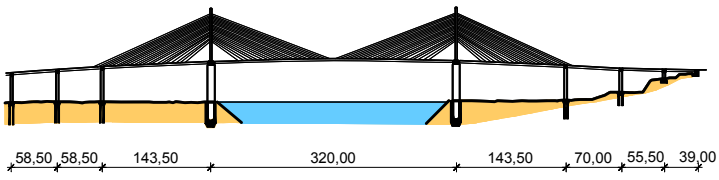
- Ako treba premostiti dva približno jednaka otvora može se odabrati simetričan most sa kosim zategama preko dva raspona sa pilonom u sredini npr. most ***L'Akkar (Indija)***.



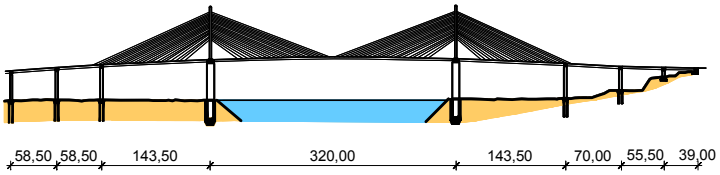


- Mostovi sa kosim zategama preko tri raspona sa dva pilona čine treći osnovni sustav, u pravilu je centralni otvor mnogo veći od bočnih i takva rješenja se najčešće koriste npr. most ***Brotonne***.

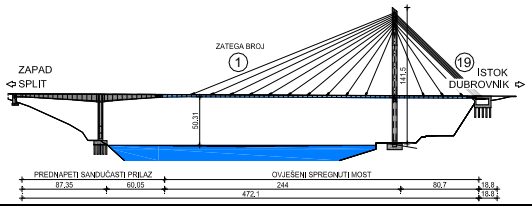




- Odnos bočnog raspona prema centralnom rasponu *l/L* kod ovog se standardnog sustava obično odabire 0,4 do 0,5.
- Što su bočni rasponi kraći to je manja varijacija momenata savijanja grede u njima i veća efikasnost stražnjih zatega uslijed povećane krutosti. Čini se povoljno daljnje smanjenje *l/L* ispod vrijednosti 0,4 no u tom slučaju dolazi do odizanja oslonaca na krajevima grede što stvara nove probleme.



- Kod asimetričnih mostova sa jednim pilonom odnos *l/L* je reda veličine 0,3 do 0,5.



- Kako treba voditi računa i o umornosti zatega bočnih otvora koje su u tom pogledu najnepovoljnije napregnute odabir optimalnog odnosa *l/L* ovisi o primijenjenom materijalu grede i o namjeni mosta.
- Za čelične mostove odnos pokretnog i stalnog opterećenja iznosi oko 0,4, a za betonske cca. 0,2, dok za željezničke mostove iznosi oko 1,1 za čelične mostove , odnosno 0,6 za betonske mostove.
- **Slijedi da za realizaciju optimalnog stanja napona bočne otvore čeličnih mostova treba odabirati manje nego betonskih mostova**.

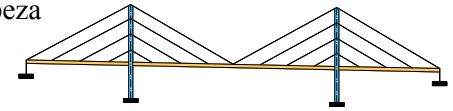
- Mostovi sa sa više od dva pilona
- Potrebno osigurati stabilnost pilona u uzdužnom smjeru:
  - kruta greda
  - kruti pilon
  - dodatne zatege

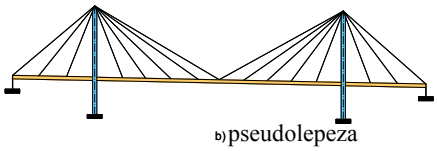

Millau

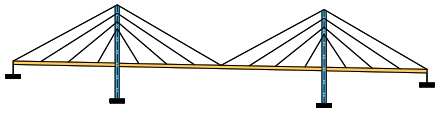

Rion - Antirion


Ting Kau

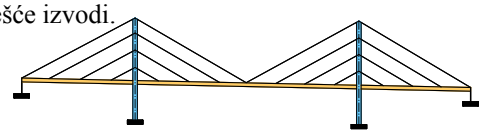
- Odabir dispozicije zatega je od primarnog značaja. Za ilustraciju troškovi za zatege su od mosta ***Brotonne*** iznosili 29% ukupnih troškova mosta, a za pilon samo 4%.
- Razlikujemo tri različite uzdužne dispozicije zatega: harfa, lepeza i pseudo-lepeza


a) harfa

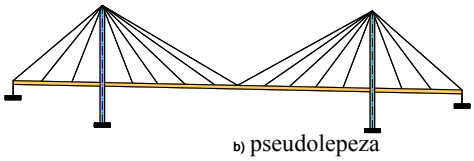

b) pseudolepeza


c) lepeza

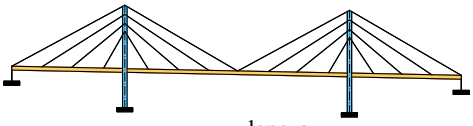
- Kod lepezaste dispozicije sve zatege konvergiraju na vrhu pilona, što stvara probleme kod usidrenja i stoga se rjeđe izvodi.
- Kod pseudo-lepezaste dispozicije su zatege kontinuirano rasprostrte po gornjem dijelu pilona, cime se olakšava sidrenje. Ova dispozicije se zbog ekonomije najčešće izvodi.



a) harfa

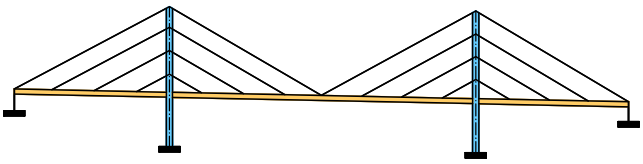


b) pseudolepeza

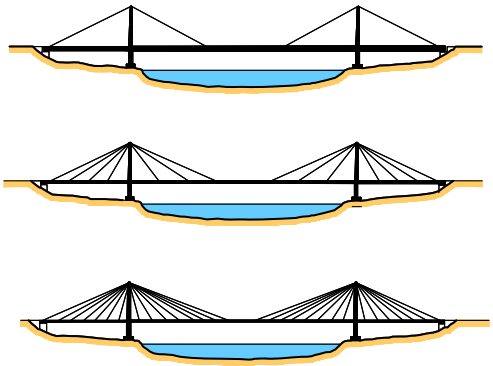


c) lepeza

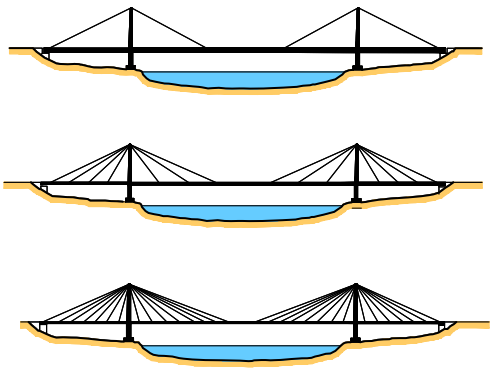
- Raspored u obliku harfe sa estetskog stanovišta predstavlja najelegantnije rješenje za dvije ravnine zatega, jer zatege ostaju paralelne bez obzira na kut gledanja. Priključci zatega pod istim kutom olakšavaju izvedbu, a i stabilnost pilona se povećava jer se zatege hvataju na cijeloj visini. Međutim u konstruktivnom pogledu ovaj sustav zahtjeva veću količinu zatega, proizvodi veće tlačne sile u gredi i daje zamjetne momente u pilonu.



- **Razvoj mostova sa kosim zategama**
- Prvi moderni mostovi sa kosim zategama su izvedeni sa 2 do 6 redova zatega u centralnom otvoru i međurazmacima između zatega 30 do 70 m. To je iziskivalo veliku krutost grede i kompliciranа usidrenja zatega na gredi i pilonima, a i montaža je bila složena sa primjenom velikog broja pomoćnih konstrukcija.
- Visina grede prema rasponu *h/L* iznosila je oko 1/70 i više.



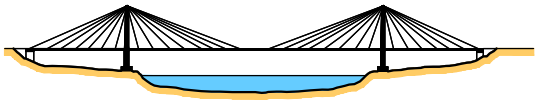
- Danas se najvećim dijelom grade mostovi druge generacije sa mnogo zatega. Međurazmaci zatega na gredi iznose 5 do 15m za betonske grede odnosno 10 do 20 m za čelične grede. Što je prije bila greda na elastičnim osloncima, kod ovog sustava postaje tlačni pojas konstruktivnog sistema obješenog na pilone (prostorne rešetke).



Prednosti sustava sa mnogo zatega su:

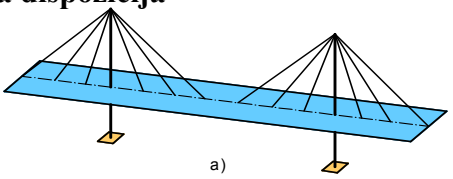
- jednostavnost montaže koja sukcesivno napreduje uz ugradbu slijedećih zatega
- pojednostavnjenje prijenosa sila uslijed smanjenja koncentriranih sila kod usidrenja i momenata savijanja kod grede
- jednostavnost zamjene zatega ako se za to ukaže potreba, bez prekida prometa, jer se uklanjanjem pojedine zatege vrlo malo mijenja distribucija unutarnjih sila
- odlične aerodinamičke karakteristike uvjetovane velikim sustavnim prigušenjem od velikog broja zatega različite duljine i frekvencije oscilacija.
- U statičkom pogledu ovaj se sustav može shvatiti kao konzolna rešetka, a krutost grede mora biti samo tolika da se osigura sigurnost na izvijanje i da deformacije od prometnog opterećenja ne budu velike.

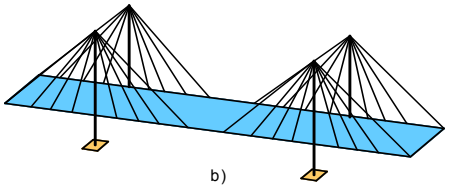


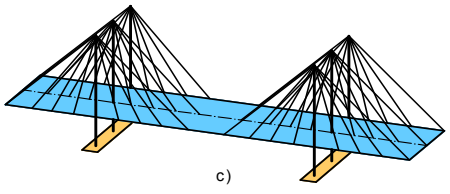


2.2. Poprečna dispozicija

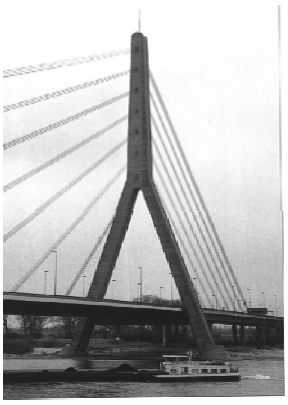
- Osnovna dilema je u odabiru **rasporeda zatega u jednoj ravnini (aksijalno) ili u dvije ravnine (lateralno),** jer o tome direktno ovisi oblikovanje poprečnog presjeka grede i pilona kao i statički i dinamički odgovor konstrukcije mosta

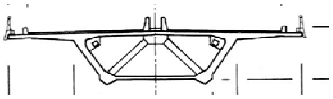




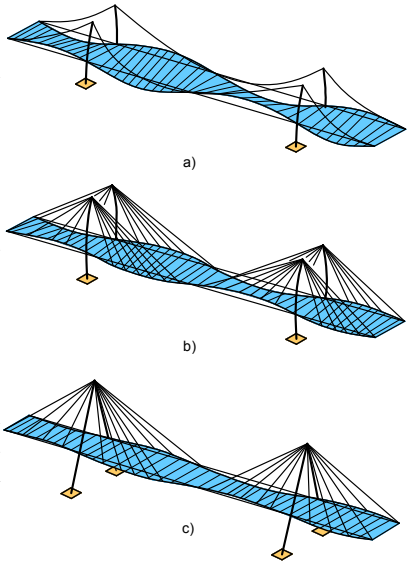


- *Aksijalno ovješenje* u jednoj centralnoj ravnini mosta koristi se kod cestovnog prometa u dva smjera odijeljenih zaštitnim pojasom (presjek autoceste). Naravno da taj zaštitni pojas mora biti dovoljno širok, ako se pilon želi locirati unutar njega, a na cijeloj duljini se mora predvidjeti i osiguranje od udara vozila u sidra zatega u vidu jakih odbojnika na dovoljnoj udaljenosti do sidara.
- Poprečni presjek grede nužno se mora oblikovati kao torzijski vrlo kruti sanduk, da bi se mogla preuzeti nesimetrična opterećenja.
- Leonhardt smatra da aksijalno ovješenje dolazi u obzir za raspone do oko 300m, iako su tehnički moguća rješenja sa daleko većim rasponima (Flehe, Brotonne, Dao Kanong, ali na uštrb ekonomije.



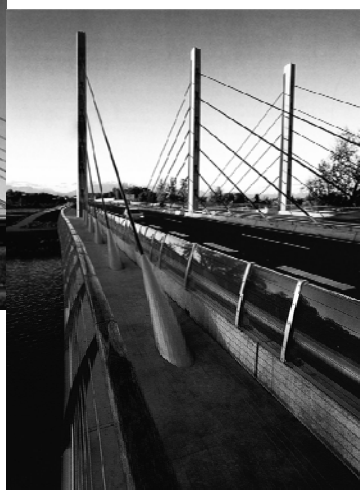


- Dvije ravnine zatega mogu biti vertikalne ili nagnute jedna prema drugoj sa sjecištem iznad uzdužne osi mosta.
- Druga konfiguracija predstavlja optimalno rješenje.
- Piloni, greda i zatege u tom slučaju čine prostornu rešetku i nemogući su diferencijalni pomaci usidrenja dviju zatega.
- Poprečni presjeci grede se pojednostavljuju i kod mostova sa mnogo zatega mogu biti vrlo vitki (d/L=150-400).
- Torzijska krutost se realizira konstruktivnim sustavom i u načelu nije potrebna za samu gredu, iako se kod velikih raspona ipak koristi za dodatno povećanje aerodinamičke stabilnosti grede gotovog mosta i naročito montažnih stanja.



• Sagrađeni su i neki mostovi sa tri ravnine ovješenja kao npr. most u Ljubljani.





2.3. Rasponski sklop

• postojanje svih velikih mostova, pa i mostova sa kosim zategama omogućeno je prvenstveno razvitkom pogodnih materijala

• tehnologijom izvedbe

• boljim poznavanjem teorije konstrukcija, uključivo probleme stabilnosti, aerodinamičko ponašanje

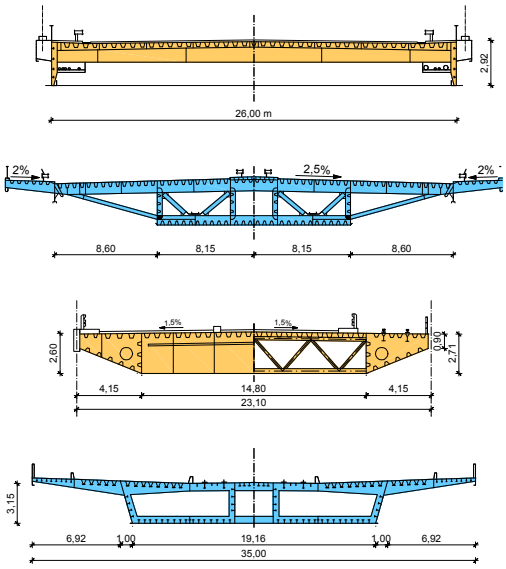
- za određivanje podobnosti jednog materijala za velike raspone bitna su četiri svojstva materijala:
  - **čvrstoća**
  - **specifična težina**
  - **krutost**
  - **troškovi**
- **Jedini materijali koji dolaze u obzir za izvedbu su beton i čelik. Ako ih usporedimo ustanovit ćemo da tlačna čvrstoća betona iznosi cca 10% čvrstoće čelika.**
- Mnogo više pokazuje nam odnos **čvrstoća/specifična težina** koji su u analizu prvi uveli aeronautički stručnjaci, a koji ima dimenziju jedinice duljine.
- Taj odnos za beton iznosi svega cca. 30% vrijednosti za čelik, što je mana masivnih konstrukcija, jer za preuzimanje korisnih opterećenja preostaje daleko manje ukupne čvrstoće nego kod čelika.

- S druge strane progibi od prometnog opterećenja kod masivnih mostova su mnogo manji nego kod čeličnih mostova, odnosno krutost je mnogo veća.
- Kod troškova, ako cijena za preuzimanje neke tlačne sile čelikom iznosi 100%, onda cijena za preuzimanje iste sile betonom iznosi samo 33% od čega samo 5% otpada na čisti beton a ostalo otprilike popola na oplatu i ubetoniranu armaturu.

Iz svega toga možemo zaključiti:

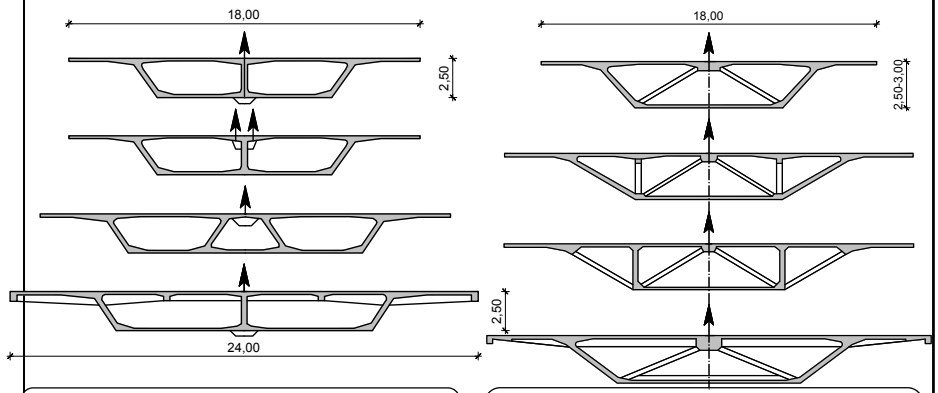
- Kod mostova sa kosim zategama najvećih raspona kao materijal za gredu dolazi u obzir samo čelik zbog daleko povoljnijeg odnosa čvrstoće prema vlastitoj težini.
- Kod ostalih raspona odabir materijala je cesto uvjetovan lokalnim uvjetima, a mogući su čelični, betonski i spregnuti poprečni presjeci.

• čelični poprečni presjeci



• Prednosti betonske grede leže u većoj krutosti, boljim karakteristikama prigušenja i manjim varijacijama napona u zategama uslijed manjeg utjecaja prometnog opterećenja i time povoljnijem ponašanju obzirom na umornost.

Za ovješenje u jednoj ravnini



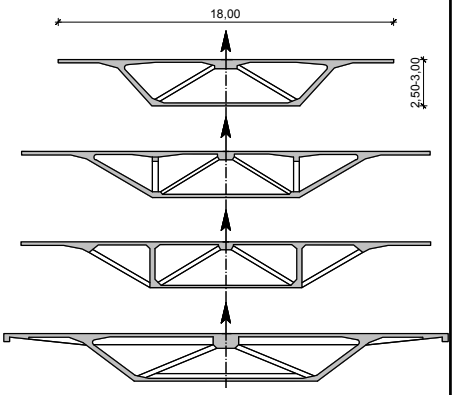
Betonski sandučasti poprečni presjeci s tri ili četiri hrpta

Betonski sandučasti poprečni presjeci s dva hrpta uz dodatne predgotovljene štapove ispune

Prednosti dva hrpta

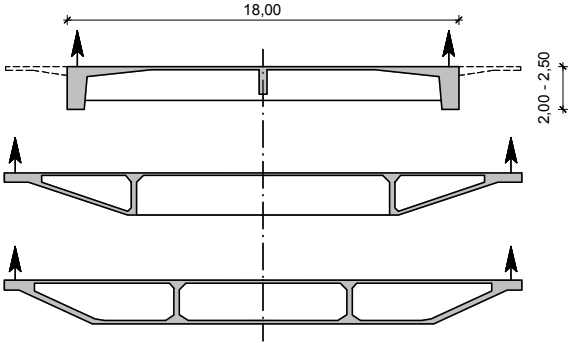
Konstrukcija je lakša, a velika krutost postiže se stvaranjem rešetke

Pristup sidrima zatega je lakši, pa je zatege moguće prednapinjati unutar poprečnog presjeka grede

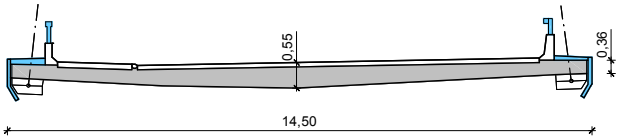


Betonski sandučasti poprečni presjeci s dva hrpta uz dodatne predgotovljene štapove ispune

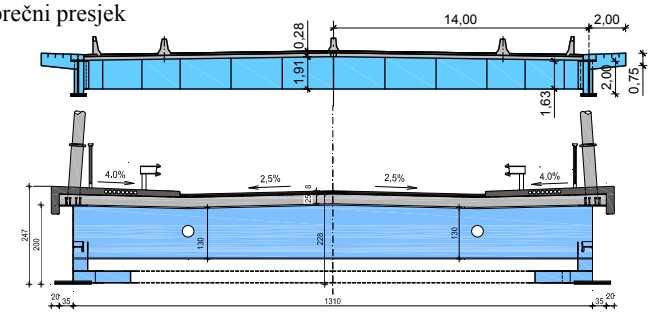
- betonski presjeci za lateralno ovješenje



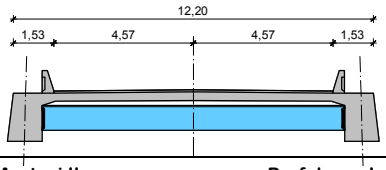
Ploča – novi oblik poprečnog presjeka



- Spregnuti presjeci su vrlo povoljni zbog jednostavnosti montaže, naročito kod mostova sa mnogo zatega kod kojih su momenti savijanja mali te su mogući vrlo vitki presjeci.
- Kombinacijom čelika i betona eliminira se nepovoljni utjecaj vlastite težine čiste betonske konstrukcije, a postiže se veća krutost u odnosu na čelične presjeke.
- spregnuti poprečni presjek

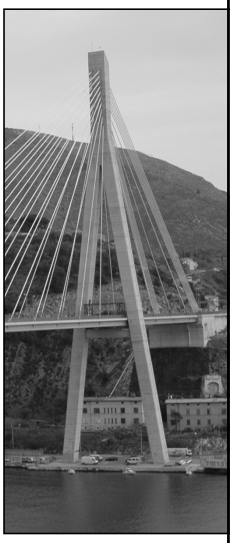


- novi oblik poprečnog presjeka – betonski uzdužni nosači i ploča sa čeličnim poprečnim nosačima



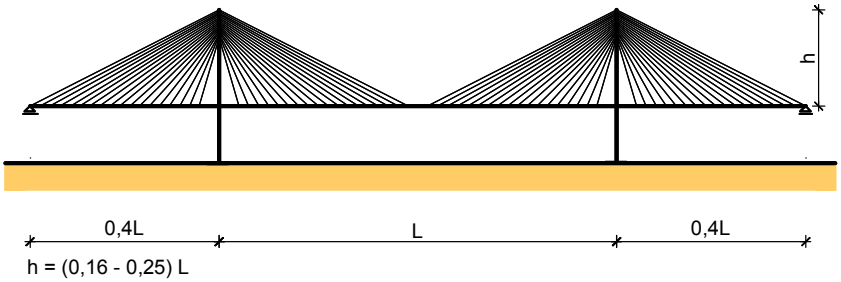
2.4. Piloni

- Visina pilona ima veliki utjecaj na količinu materijala za zatege i uzdužne tlačne sile u gredi.
- Optimalna visina pilona ovisi o uzdužnoj dispoziciji zatega.
- Minimalna vrijednost količine čelika za zatege :
  - ***h/L***=0,29 lepeza
  - ***h/L*** =0,50 harfa, apsolutni minimum jer su sve zatege pod kutom 45 stupnjeva - teorijski značaj - zbog problema elastične stabilnosti i potencijalnog utjecaja vjetra kod vrlo visokih pilona ***h***=(0,15-0,25)L.
- Za raspone ispod 200m može se usvojiti i ***h/L***=0,3.
- Za ***h/L***=0,2 ušteda u zategama: 14% za pseudo-lepezu prema harfi, odnosno 18% za lepezu u odnosu na harfu.



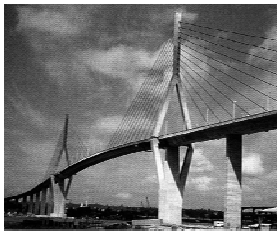
Odnosi visine pilona i raspona mosta

- Za asimetrične mostove s jednim pilonom vrijede isti odnosi ***h/L*** s time da se ***L*** definira kao raspon velikog otvora uvećan s korekcijskim faktorom 1,8.



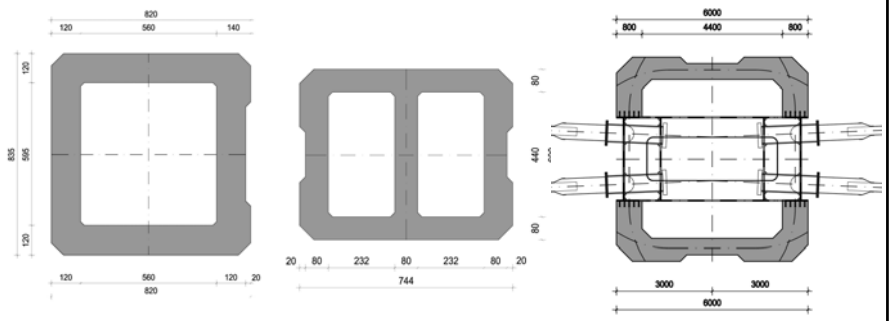
h = (0,16 - 0,25) L

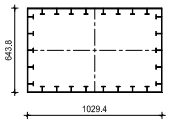
- piloni su u uzdužnom smjeru stabilizirani tzv. sidrenim zategama bočnih otvora
- fleksijska krutost pilona u uzdužnom smjeru – mala - utjecaj pokretnog opterećenja u pilonu prenosi se sidrenim zategama u bočnim otvorima a ne savijanjem pilona.



- Minimalna krutost pilona - potrebna sigurnost na izvijanje
- U poprečnom smjeru se teži velikoj krutosti pilona, jer treba preuzeti horizontalne sile od vjetra i seizmičkog djelovanja.
- Iskustva sa izvedenih mostova - betonski piloti ekonomičniji od čeličnih - razlika troškova raste s veličinom mosta.

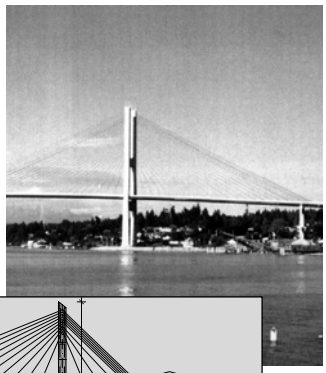


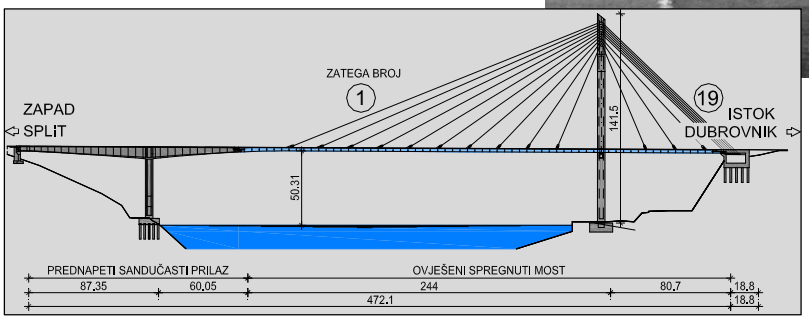




- sandučasti presjeci pilona i za čelične i za betonske pilone - usidrenja zatega na pilonu dostupna komunikacijom kroz pilon

- najekonomičniji - vertikalni piloni
- zatege i greda čine konzolni sustav, krak unutarnjih sila neposredno iznad ležaja pilona treba biti najveći, što je kod vertikalnih pilona i slučaj.





- U uzdužnom smjeru prema bočnom otvoru nagnuti piloni zahtijevaju kod istog kraka sustava nad osloncem više pilone



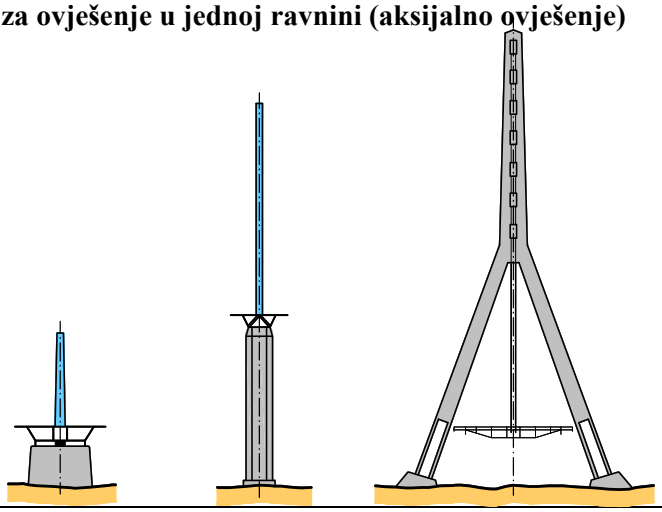




- Kod pilona nagnutih prema glavnom otvoru (most ***Batman***) sustava visina se smanjuje od vrha pilona prema ležaju i sidrene zatege su jače opterećene nego kod vertikalnih pilona, da ne spominjemo izvedbene teškoće i estetski dojam.

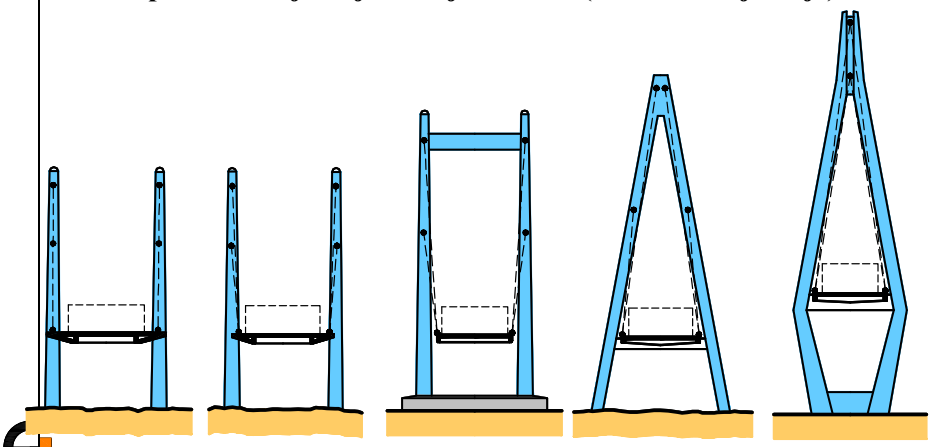
- Oblikovanje pilona u poprečnom smjeru ovisi o dispoziciji zatega, rasponu, visini nivelete, estetskim kriterijima itd.
- Svi sustavi pilona mogu se upotrijebiti i kod aksijalnog i kod lateralnog ovješenja.

• piloni za ovješenje u jednoj ravnini (aksijalno ovješenje)

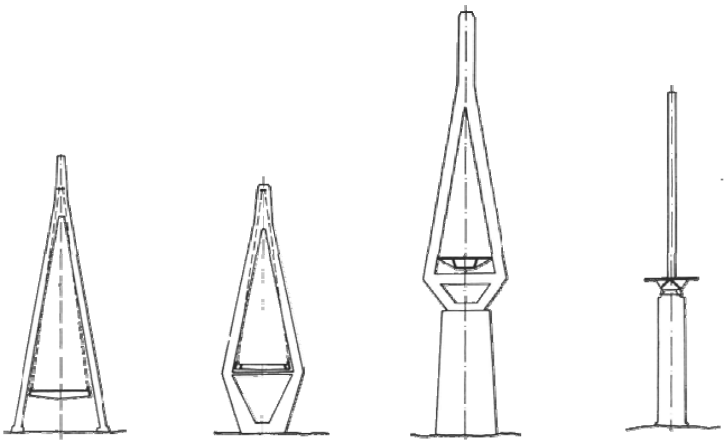


•Mostovi sa vitkim gredama i H pilonima su vrlo osjetljivi obzirom na aerodinamičnu nestabilnost "flutter"-a, jer su osnovne frekvencije fleksijskih i torzijskih oscilacija praktički jednake. Ako je visina pilona osjetno veća nego širina mosta koriste se okvirni piloni. Horizontalna greda na vrhu pilona omogućuje blago naginjanje stupova pilona, te kod lateralnog ovješenja ravnine zatega ostaju vertikalne.

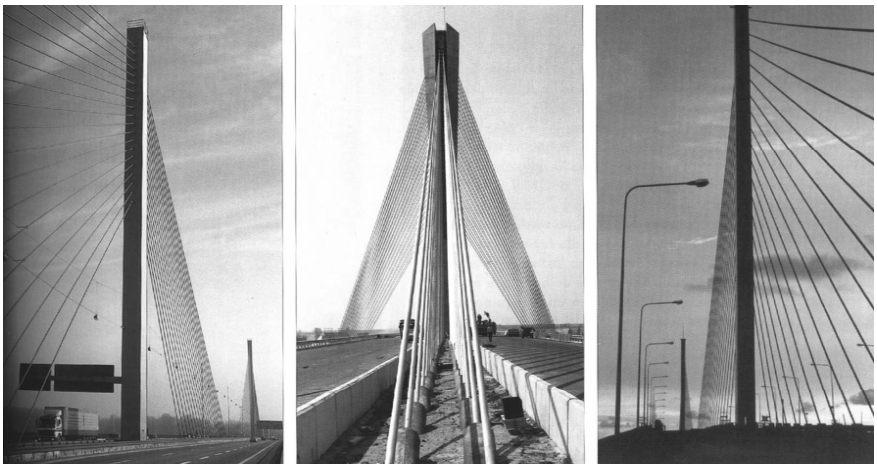
•piloni za ovješenje u dvije ravnine (lateralno ovješenje)



- Za najveće raspone najčešće se rade A piloni zbog velike krutosti u poprečnom smjeru, povećanja torzijske krutosti sustava i povoljnog estetskog dojma.
- Piloni su obično upeti u temelj ili stupove (samo dio iznad grede se cesto naziva pilonima), iako postoje i izvedbe sa upinjanjem u gredu i sa zglobnim oslanjanjem, kako bi temelji bili centrično opterećeni.



2.5. Zatege

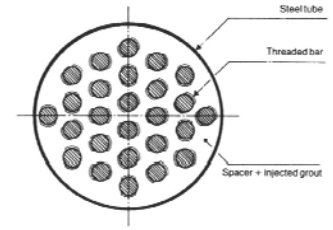


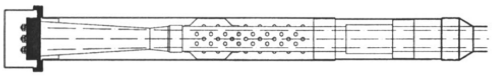
Zatege su osnovni element ovih mostova. Razvitak modernih mostova sa kosim zategama omogućen je prvenstveno primjenom visokovrijednog čelika za zatege na što je ukazao već F. Dischinger.

- Bitnu ulogu kod odabira materijala za zategе igraju, osim vlačne čvrstoće i modula elastičnosti antikorozivna zaštita i čvrstoća na zamor, konstruktivno oblikovanje kotvi i montaža.
- Modul elastičnosti vertikalnog ravnog kabela iznosi kod zatvorene spiralne užadi oko 155 kN/mm^2, a kod paralelnih žica oko 205 kN/mm^2.
- Koeficijent sigurnosti obzirom na vlačnu čvrstoću kod zatega iznosi tipično 2,2. Do te razine naprezanja može se pretpostaviti elastično ponašanje zatega i mogu se zanemariti efekti relaksacije.
- Sidra zatega moraju omogućiti točan unos projektiranih sila sa silama sloma ne manjim od sila sloma same zatege i tijekom životnog vijeka mosta ne smiju popustiti.



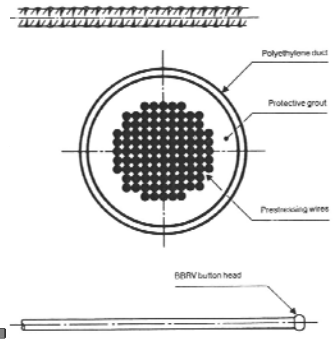
- Za razliku od standardnih kablova za prednapinjanje, smještenih unutar betonskog presjeka, zatege su izložene znatnim fluktuacijama naprezanja od djelovanja pokretnog opterećenja, temperature, vjetra itd. te je njihova čvrstoća na umornost od primarne važnosti.
- Umornost mogu prouzročiti oscilacije zatega uslijed vjetra i pokretno opterećenje.
- Oscilacije zatega se mogu reducirati primjenom raznih prigušivača.
- U konstruktivnom pogledu bitno je da ne dođe do savijanja zatege kod usidrenja pa sidrae treba postaviti u smjer tangente a ne sekantne krivulje predmetne zatege.
- Čvrstoća na umornost zatege prvenstveno ovisi o čvrstoći na umornost sidra.
- Zatege su obzirom na trajnost vrlo osjetljive te treba predvidjeti adekvatnu antikorozivnu zaštitu.

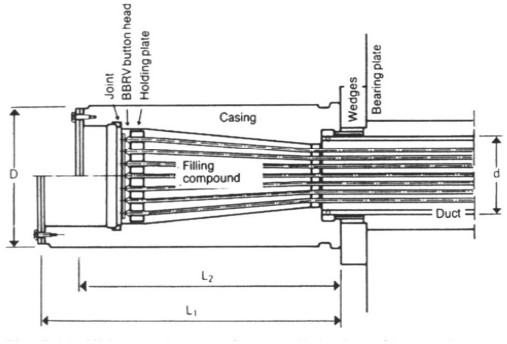


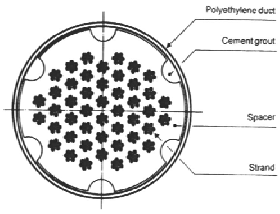


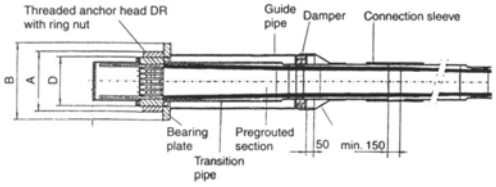
a) Paralelne šipke

b) Paralelne žice

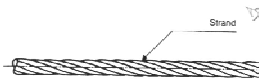


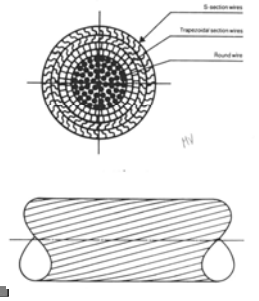




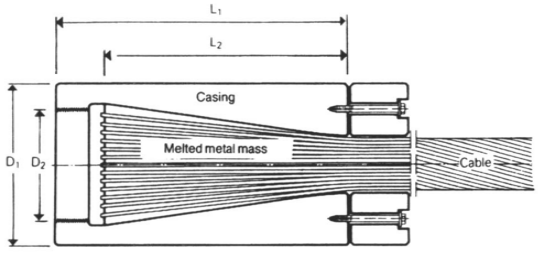


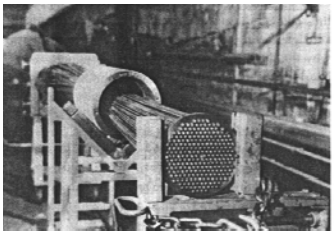
c) Paralelni strukovi

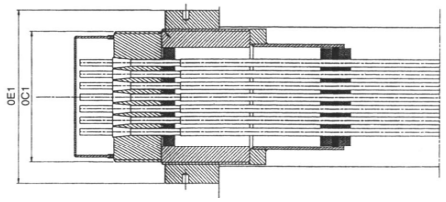


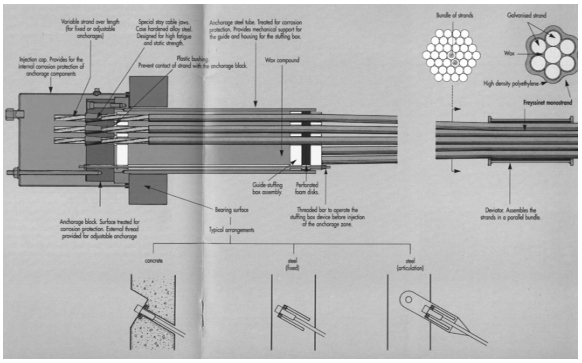


d) Zatvoreno spiralno uže



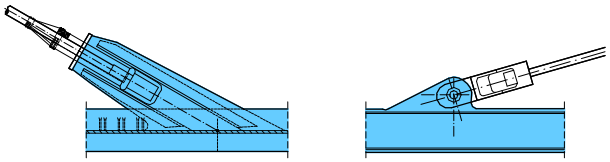




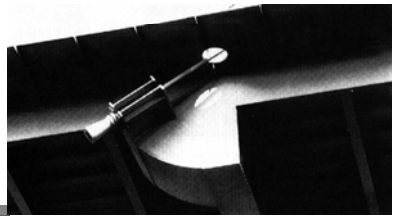


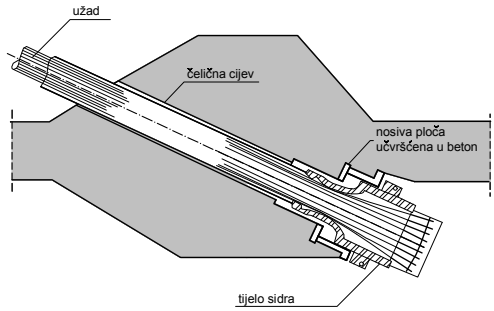
2.4.1. Sidra zatega

- Usidrenja zatega na gredu ovise o poprečnom presjeku, materijalu grede i načinu ovješenja.



sidrenje u čeličnu gredu

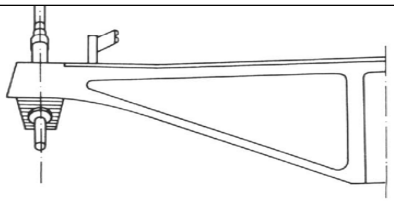


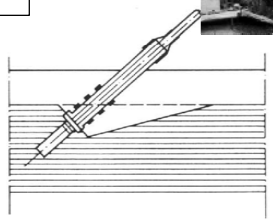






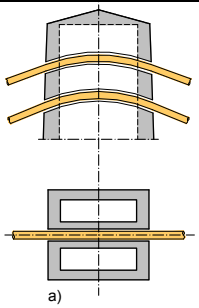
sidrenje u betonsku gredu



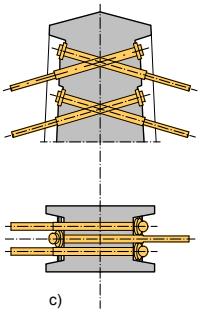


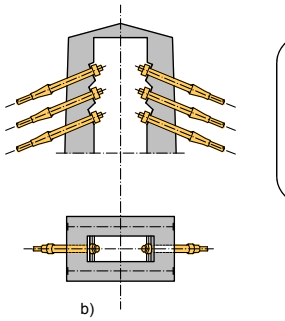
- Usidrenja zatega na pilon ovise o poprečnom presjeku i materijalu pilona, te o uzdužnoj i poprečnoj dispoziciji zatega.

zatege se uvlače u zaštitne cijevi ugrađene u pilon, kako bi se omogućila zamjena zatega i vode sedlom preko pilona

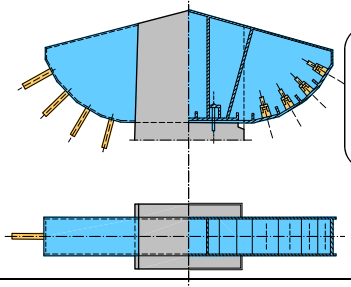


pri usidrenju s križanjem može doći do torzije pilona

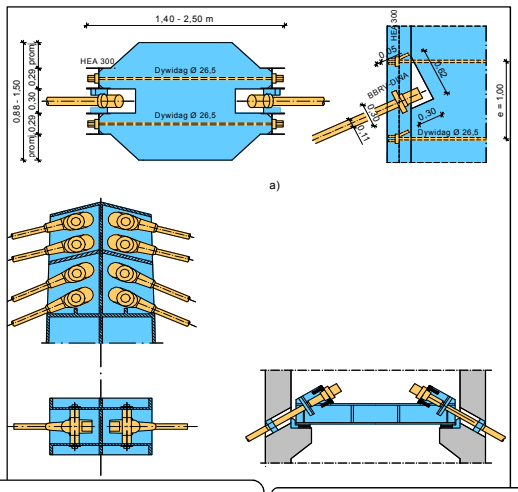




kod pilona dovoljnih dimenzija najbolje je rješenje pri kojem se vlačne sile u stijenkama pilona od djelovanja zatega preuzimaju kratkim kabelima u stijenkama



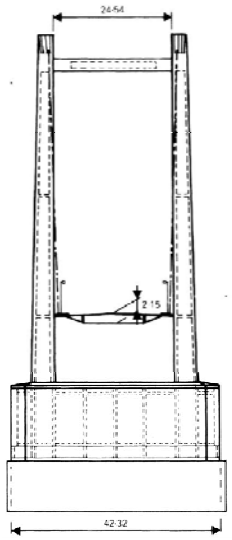
za zrakasto raspoređene zatege (lepeza) moguće je jedino usidrenje preko posebne čelične konstrukcije koje je i najskuplje



u konstrukciju od čeličnih limova

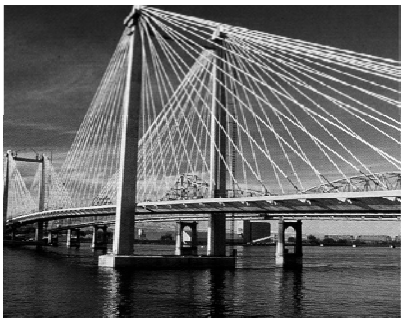
preko čeličnog nosača

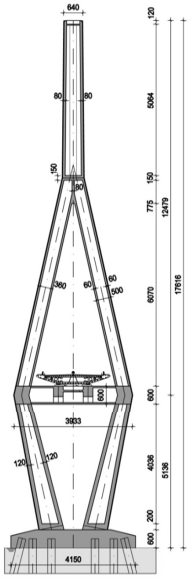
2.6. Ležajevi i dilatacije



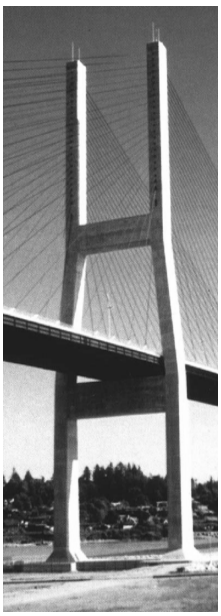
Vertikalni ležajevi su kod lateralnog ovješenja u načelu neophodni samo na krajnjim osloncima. Kod pilona se ne moraju predvidjeti pri čemu se greda i tamo vješa na zatege, čime se izbjegavaju veliki negativni momenti savijanja u gredi (totalno ovješenje).

Most Pasco-Kennewick

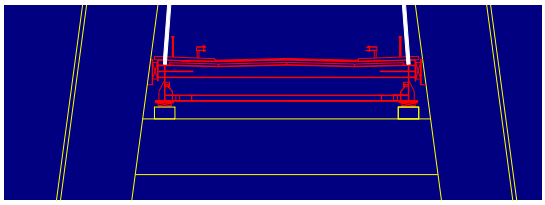




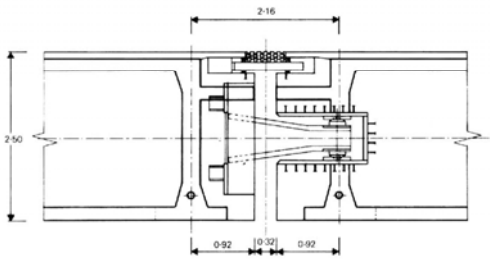
- Uobičajena izvedba s tzv. parcijalnim ovješenjem, vertikalni ležajevi postavljaju se i na poprečnom nosaču pilona, ovješenje u okolici pilona se prekida.
- momenti savijanja grede u bočnim otvorima i kod pilona u velikoj mjeri ovise o načinu oslanjanja grede na pilon.
- greda upete u pilon - momenti se smanjuju u bočnim poljima, a jako rastu nad pilonom.
- slobodno oslanjanje - momenti savijanje grede kod pilona su mali, ali zato jako rastu u bočnim otvorima.
- Ponekad se primjenjuje i kompromisno rješenje sa djelomičnom upetošću.



- Stabilnost pilona na izvijanje se bitno poboljšava ako se predvidi nepokretan ležaj za preuzimanje horizontalnih sila u uzdužnom smjeru. Kako je konstruktivni sustav (lepeza i pseudo-lepeza) u uzdužnom smjeru vrlo mekan taj ležaj se može postaviti i na jedan kraj mosta, tako da je potrebna samo jedna velika prijelazna naprava.
- Uzdužno nepokretni ležaj se može smjestiti i na pilonu pa se onda kočne sile predaju temelju pilona savijanjem, što je lako izvedivo jer su u pilonu velike uzdužne sile te dolazi do malog dodatnog ekscentriciteta.
- Ležajevi za horizontalna poprečna opterećenja (vjetar) se stavljaju na svim krutim osloncima.



- Kod simetričnih mostova sa kosim zategama preko tri raspona uzdužno nepomični ležajevi se mogu postaviti i na oba kraja mosta ako se u sredini centralnog otvora predvidi zglob sa prijelaznom napravom, čime se kod simetrične slobodne montaže izbjegava potreba za uspostavljanjem fleksijskog kontinuiteta na tom mjestu. Neki autori ipak smatraju da takvo rješenje nije najbolje zbog složenosti konstrukcije zgloba (horizontalno pomičan, vertikalno nepomičan) i zbog neizbježnog loma nivelete, uslijed djelovanja pokretnog opterećenja, a kod betonskih greda i puzanja i skupljanja.

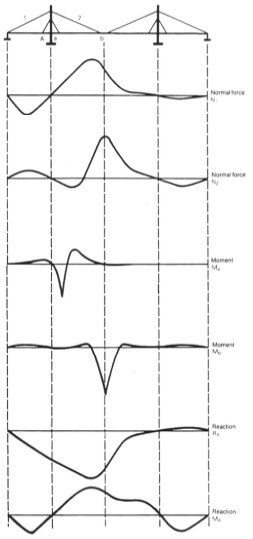


3. PRORAČUNI

3.1. Općenito

- Most sa kosim zategama je višestruko statički neodređeni sustav. Područje (veličina) sile najvećim dijelom je određena odnosom krutosti zatega, pilona i grede.

- Momenti savijanja na gredi približavaju se onima na kontinuiranom nosaču na čvrstim osloncima; ti momenti se smanjuju što se više smanjuje razmak između zatega.Vertikalne komponente sila u zategama su približno jednake ležajnim reakcijama izračunatim na taj način.



3.2. Modeliranje statičkog sustava

Modeli (cijeli, djelomični) ovise o složenosti konstrukcije i stupnju projekta.

Piloni → "beam" elementi

Greda → "beam" elementi → ako to odgovara stvarnom ponašanju grede (kruti sandučasti presjek); uvijek u preliminarnim analizama ili u fazama montaže.

Greda → "shell" elementi → ako se njeno ponašanje značajno razlikuje od grede (lateralno ovješenje, deformabilni poprečni presjek).

Greda → "plate" elementi → kod razmatranja lokalnih problema.

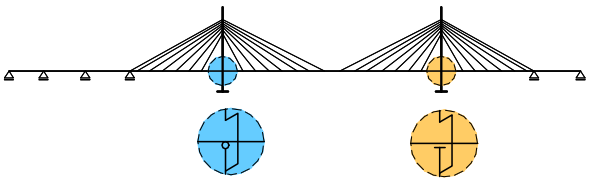
Zatege → "beam" elementi + mali momenti tromosti i idealizirani *E* koji omogućuje zamjenu progibne linije zatege sa ravnim štapom.

Zatege → "cable" elementi → opisuju stvarno ponašanje zatega; svakako kod nelinearnog proračuna.

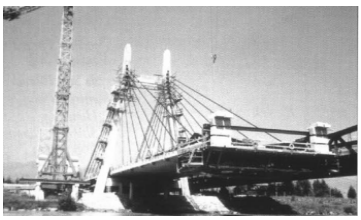
3.2. Modeliranje statičkog sustava

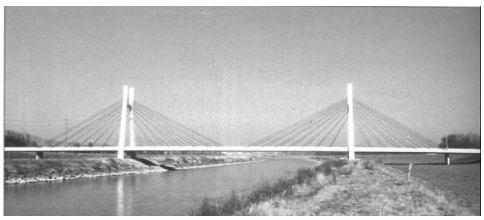
•Pojednostavnjenje – dovoljna točnost

3.2.1. Ravninski modeli

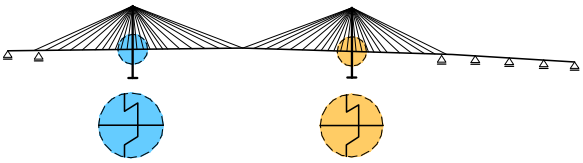


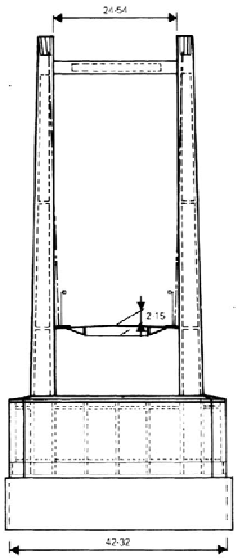
Diepoldsau

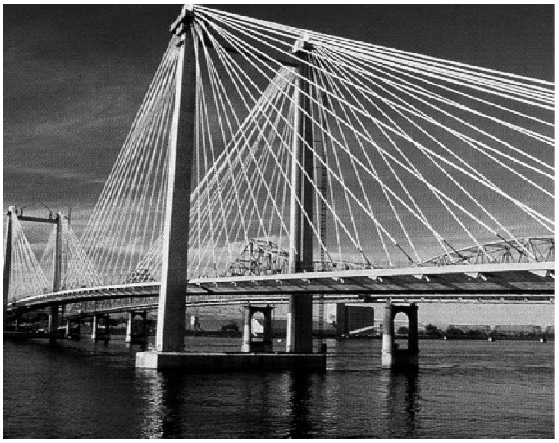




Pasco-Kennewick



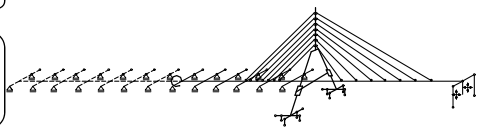




3.2.2. Prostorni modeli

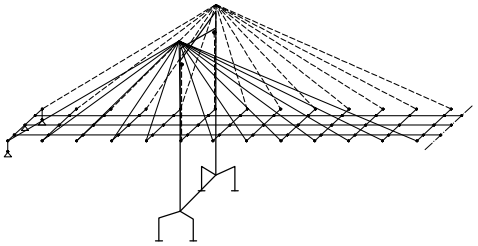
Prostorni model mosta Flehe

omogućio uzimanje u obzir djelovanje vjetra, promjene temperature, utjecaj oblika pilona u poprečnome smjeru



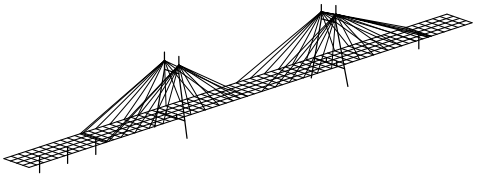
Prostorni model mosta Zarate-Brazo Largo

nesimetrično opterećenje u poprečnom presjeku (kolnik i željeznička pruga s jedne strane), veliki utjecaj nelinearnosti



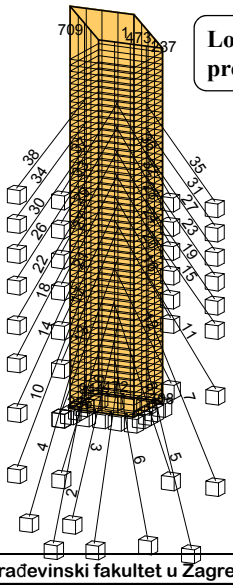
Prostorni model mosta Diepoldsau s pločastim el.

proračun poprečnog savijanja pilona, uzdužno i poprečno savijanje pločaste grede



3.2.3. Lokalni modeli

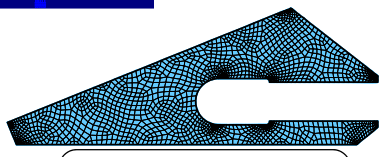
Lokalni modeli za proračun vrha pilona

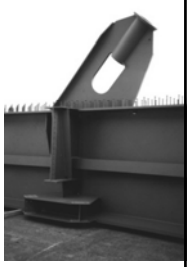




Opterećenja pilona:

- **Vlastita težina**
- **Tlačne sile kosih zatega**
- **Horizontalne komponente**
- **Vjetar uzd. i popr.** - M





Lokalni model za proračun sidrenja zatege na glavni nosač

3.3. Zatege

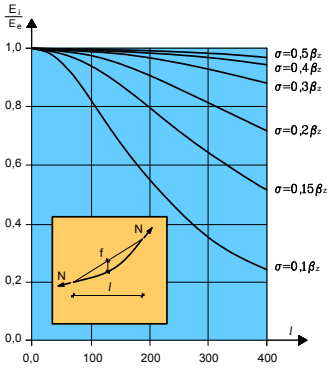
- Zbog male krutosti na savijanje zatege se deformiranjem uravnotežuju pod utjecajem vlastite težine zauzimajući oblik lančanice.
- Da bi se u proračun mogla uvesti idealizirana ravna zatega potrebno je pronaći idealizirani sekantni modul elastičnosti E_i.

$$E_i = E_e \Big/ \left(1 + \frac{(\gamma l)^2}{12\sigma_m^3}\frac{(1+\mu)^4}{16\mu^2}E_e\right)$$

γ - jedinična težina

l - horizontalni raspon zatege

$$\mu = \frac{\sigma_{low}}{\sigma_{up}} \qquad \sigma_m = \left(\sigma_{low} + \sigma_{up}\right)/2$$



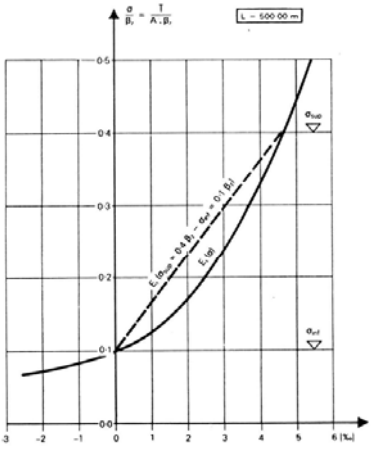
E_e=205 000 N/mm^2

β_z=1 700 N/mm^2

γ=80 kN/m^3

σ=N/A

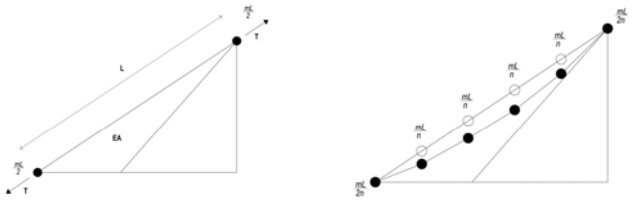
$$\frac{E_i}{E_e} = \frac{1}{1 + \frac{(\gamma \times l)^2 \times E_e}{12 \times \sigma^3}}$$



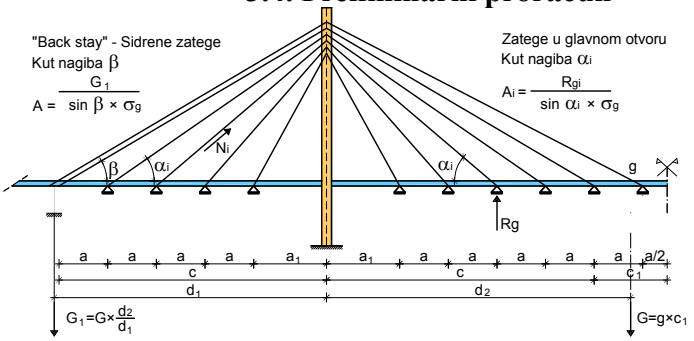
Omjer E_i/E_e – pokazuje utjecaj progiba zatege na njenu krutost

dijagram σ-ε za zategu horizontalne dužine 500m i napona $0.1\beta_z$

- modeliranje zatege
- jedna zatega = jedan element (truss ili cable) i koncentriranje mase zatege u čvorove priključka na gredu i pilon
- više elemenata za modeliranje jedne zatege



3.4. Preliminarni proračun



gredu možemo promatrati kao kontinuirani nosač na čvrstim osloncima

Sile u zategama: $N_i = R_{g,i} / \sin \alpha_i$

Za zatege "back stay" pretpostavlja se da indirektno podupiru onaj dio srednjeg raspona koji nije uravnotežen s bočnim rasponom. Sile u tim zategama dobiju se projekcijom sile G1 u smjeru zatega.

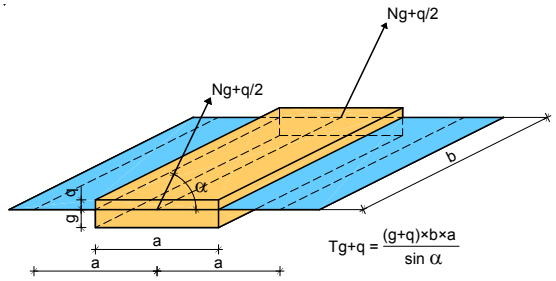
Za dimenzioniranje: granični napon σ_g za djelovanje vlastite težine i dodatnoga stalnog opterećenja = ?

Pretpostavimo da zatega od pokretnog opterećenja preuzima silu Nq koja je proporcionalna sa silom Ng

Definiramo parametar η = q/g kao odnos prometnog i stalnog opterećenja.

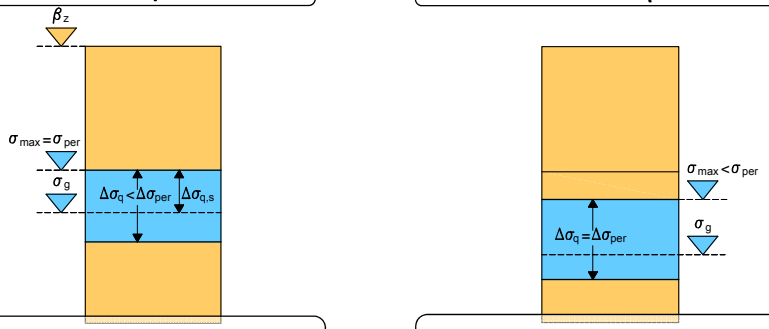
za betonske cestovne mostove: η = 0,2-0,3 (nizak)

za čelične željezničke mostove: η = 1,0-2,0 (visok)



nizak η

visok η



mjerodavan kriterij čvrstoće: $\sigma_g + \sigma_{qup} < \sigma_{per}$

mora se koristiti kriterij umora : $\Delta\sigma_q < \Delta\sigma_{per}$

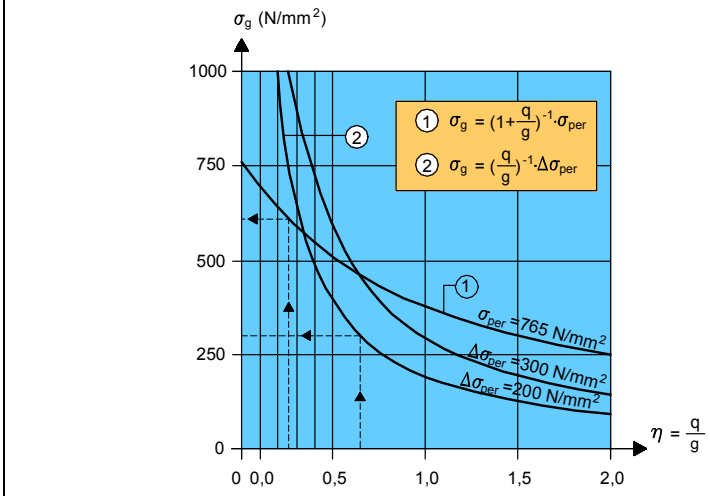
Za oba ova kriterija može se uspostaviti odnos σ_g i η

$$\sigma = \left(1+\frac{q}{g}\right)^{-1} \sigma_{per}$$

$$\sigma_g = \left(\frac{q}{g}\right)^{-1} \Delta\sigma_{per}$$

Dopušteni napon u zategama: $\sigma_{per} = 0{,}45 \cdot 1700 = 765$ N/mm²

Razliku napona jamči proizvođač: $\Delta\sigma_{per} = 200$ N/mm² ili 300 N/mm²



Dopušteni naponi σ_g u funkciji η za kriterij čvrstoće 1 i kriterij zamora 2

Potrebna površina zatega: $A_i = N_{g,i} / \sigma_g$

3.5. Dinamički proračun

- Utjecaj dinamičkih sila na ovješene i viseće mostove je veći nego na bilo koje druge mostove i vrlo je važan za proračun.

  -aerodinamički efekt
  -psihološki efekt
  -seizmičko djelovanje.

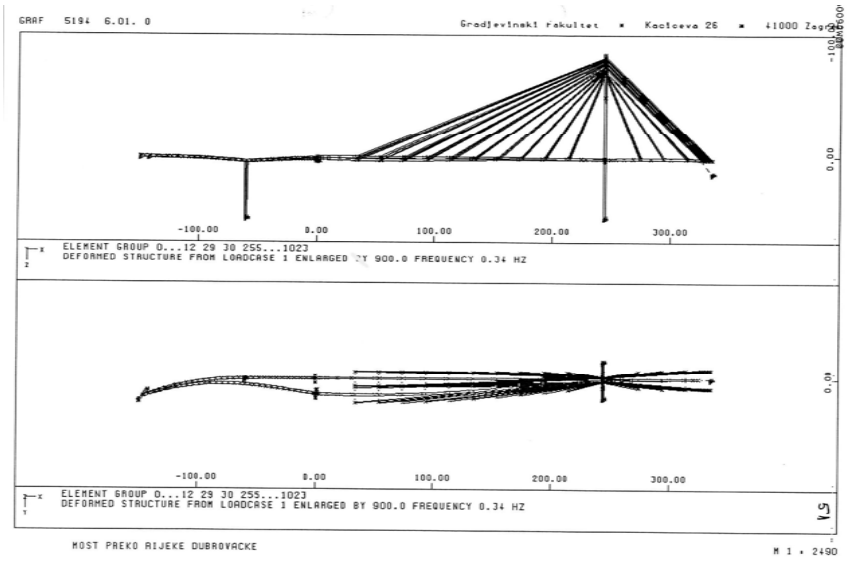
- aerodinamička stabilnost točnije nestabilnost bila je uzrok rušenja visećih mostova ranijeg razdoblja, a to je pak uvjetovalo poboljšanje i napredak na tom području.
- Oscilacije uzrokovane vjetrom i prometom koje ne uzrokuju oštećenje mosta mogu vrlo neugodno djelovati na njegove korisnike.

- vlastite frekvencije i tonovi promatrane konstrukcije
- savojna (fleksijska) i torzijska vlastita frekvencija

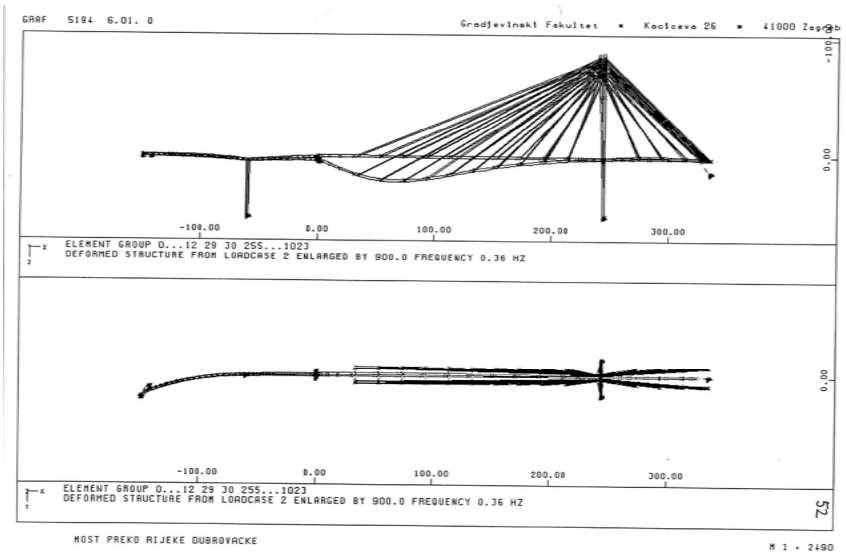
- obično je odgovor konstrukcije na dinamičko djelovanje sadržan u prvih nekoliko tonova konstrukcije, međutim kod fleksibilnih konstrukcija potrebno je razmatrati veći broj tonova

- za most ***Franja Tuđmana*** uzeto je 50 tonova

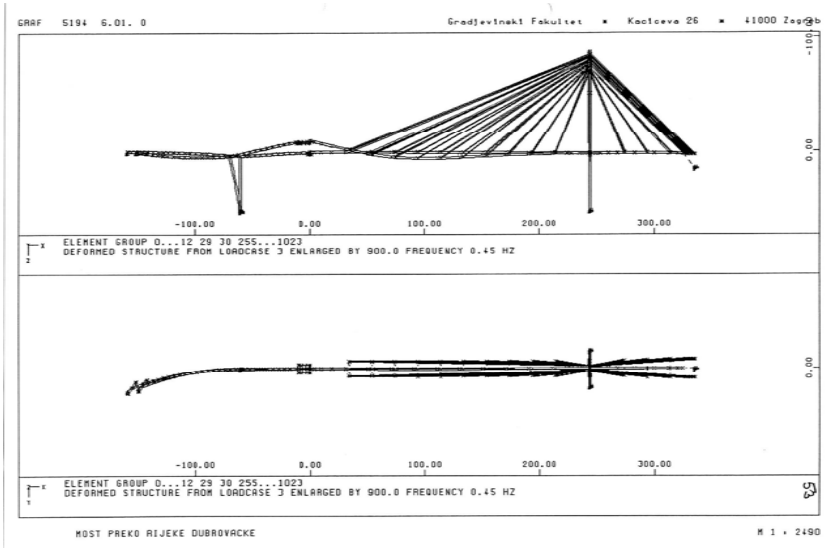
most ***Franja Tuđmana*** - prvi ton



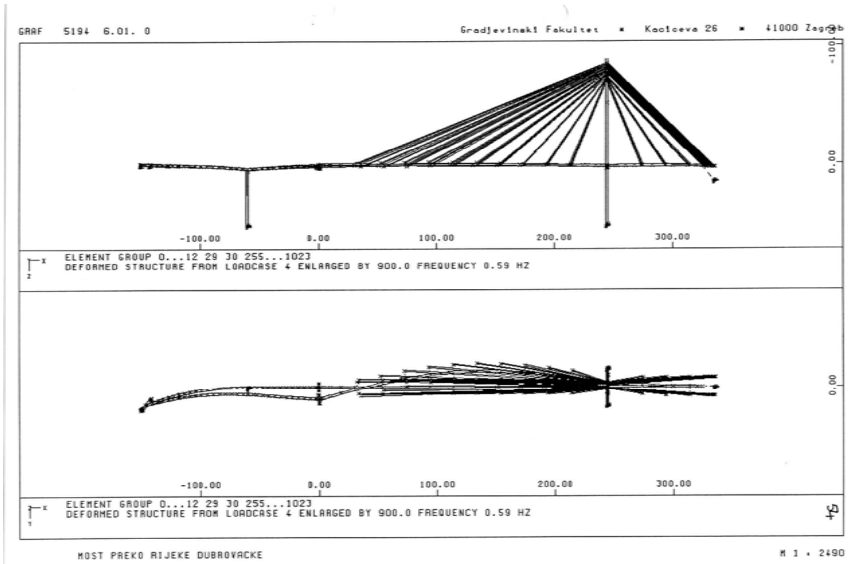
most ***Franja Tuđmana*** - drugi ton



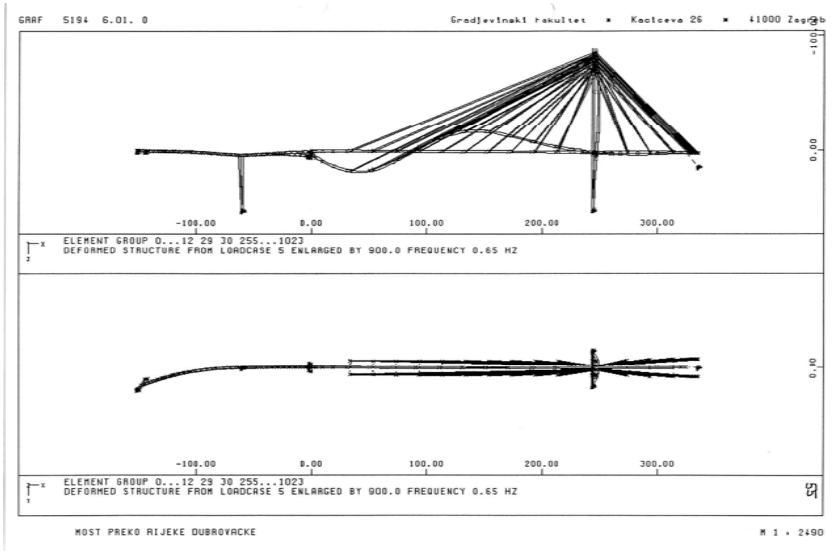
most ***Franja Tuđmana*** - treći ton



most ***Franja Tuđmana*** - četvrti ton

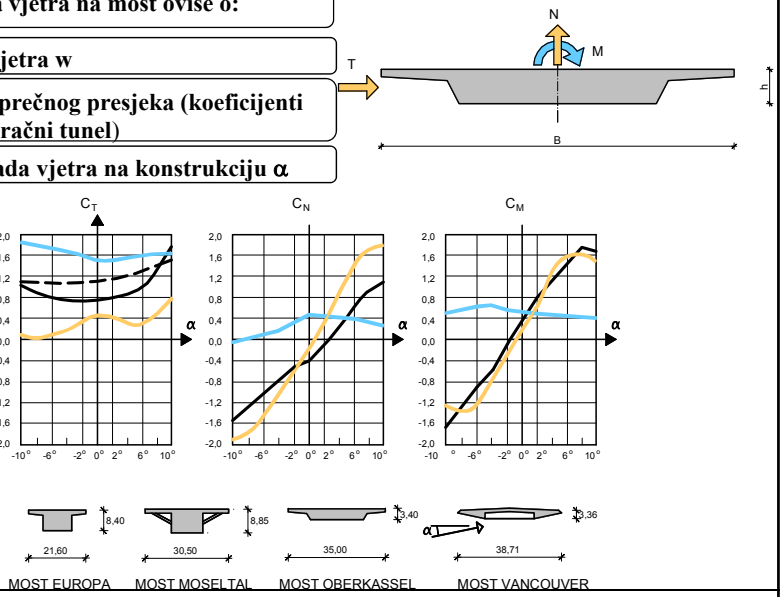


most ***Franja Tuđmana*** - peti ton



Djelovanja vjetra na most ovise o:

- pritisku vjetra w
- obliku poprečnog presjeka (koeficijenti oblika – zračni tunel)
- kutu napada vjetra na konstrukciju α



Strujanje zraka uzrokuje

⇩

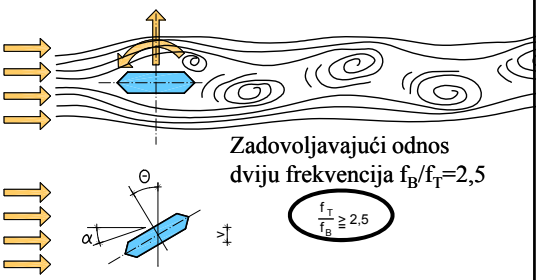
savijajuće i torzijske oscilacije konstrukcije

⇩

uslijed male promjene kuta djelovanja vjetra → odižuće djelovanje

⇩

flutter → rušenje mosta Tacoma 1940.

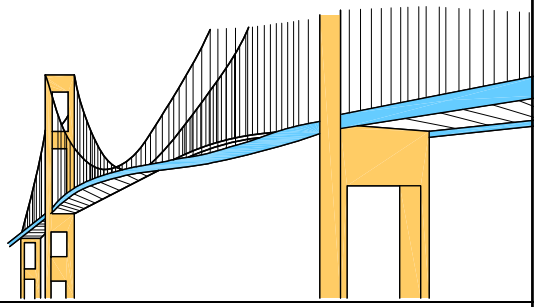


Zadovoljavajući odnos dviju frekvencija $f_B/f_T=2,5$

$$\frac{f_T}{f_B} \geq 2,5$$

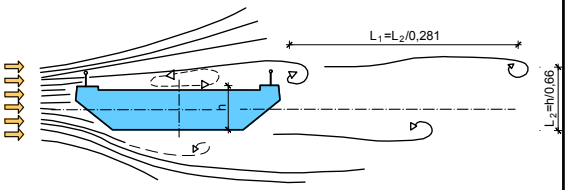
Flutter nastaje kada su:

- savijajuća i torzijska vlastita frekvencija preniske
- preblizu jedna drugoj po vrijednosti
- podudaranje oba slučaja

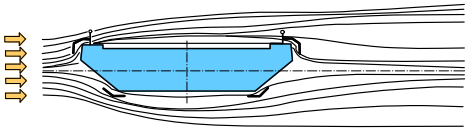


- Nakon ove katastrofe uslijedila su ispitivanja koja su pokazala da "flutter" nastaje kada su **savijajuća i torzijska vlastita frekvencija preniske, kada su preblizu jedna drugoj po vrijednosti ili kada se podudare oba ova slučaja.**
- Mathivat smatra da zadovoljavajući omjer te dvije frekvencije iznosi 2.5.
- "Flutter" može biti uzrokovan i odvajanjem vrtloga na rubovima poprečnog presjeka što je posljedica neadekvatnog oblikovanja poprečnog presjeka .

Djelovanje vjetra na gredu bez deflektora



Djelovanje vjetra na gredu sa deflektorom

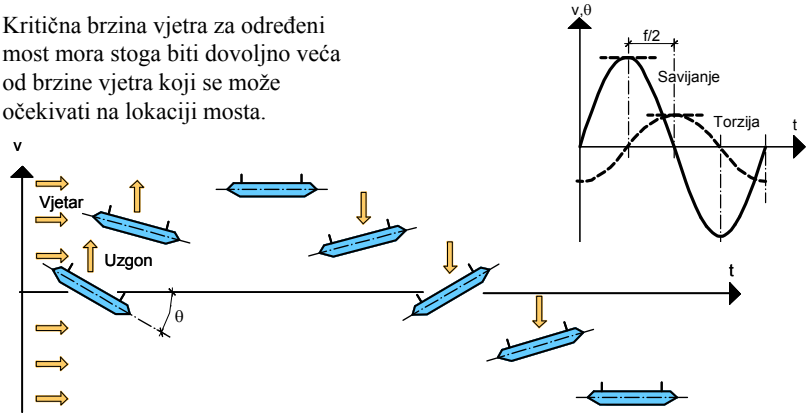


Djelovanje fluttera na gredu mosta ⇨ **iznad određene brzine vjetra v_{crit} greda počinje primati veću energiju od one koju može disipirati prigušenjem.**

⇩

pojava savijajućih i torzijskih pomaka s naglim povećavanjem amplituda sve do sloma konstrukcije

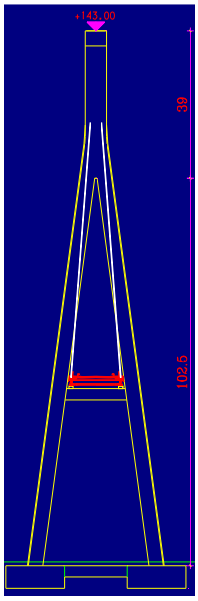
Kritična brzina vjetra za određeni most mora stoga biti dovoljno veća od brzine vjetra koji se može očekivati na lokaciji mosta.



Konstruktivne mjere za izbjegavanje flutter-a

- Oblikovati aerodinamički i torzijski kruti poprečni presjek, pogotovo ako imamo jednu ravninu ovješenja ili dvije vertikalne paralelne ravnine ovješenja sa "H" pilonom,
- Ovješenje bi trebalo biti u dvije ravnine i to tako da su dvije ravnine zatega nagnute jedna prema drugoj sa "A" pilonom, time dobijemo prostorni sustav koji je torzijski krut pa krutost same grede ne mora biti velika.





- Također su bitni geometrijski odnosi širine rasponskog sklopa (***B***), visine rasponskog sklopa (***D***) i duljine glavnog raspona (***L***).

  Prema dosadašnjim iskustvima možemo tako zaključiti da će betonski mostovi sa dvije ravnine ovješenja biti sigurni od pojave "flutter"-a ako su zadovoljeni sljedeći odnosi:

$$B \geq 10D \qquad \textbf{ili} \qquad B \geq L/30.$$

- Čelični mostovi sa rasponom većim od 400m su mnogo osjetljiviji na oscilacije, pa bi uz ovješenje na "A" pilon trebao biti zadovoljen odnos

$$B \geq L/25.$$

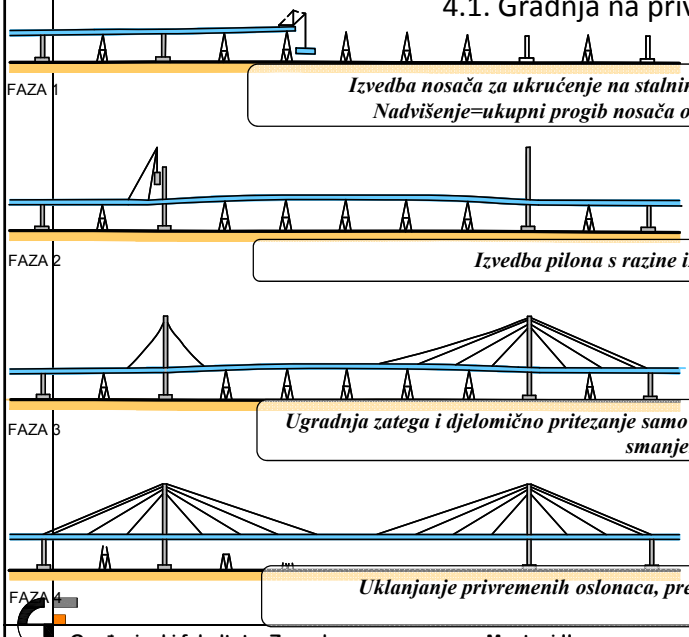
4. IZVEDBA



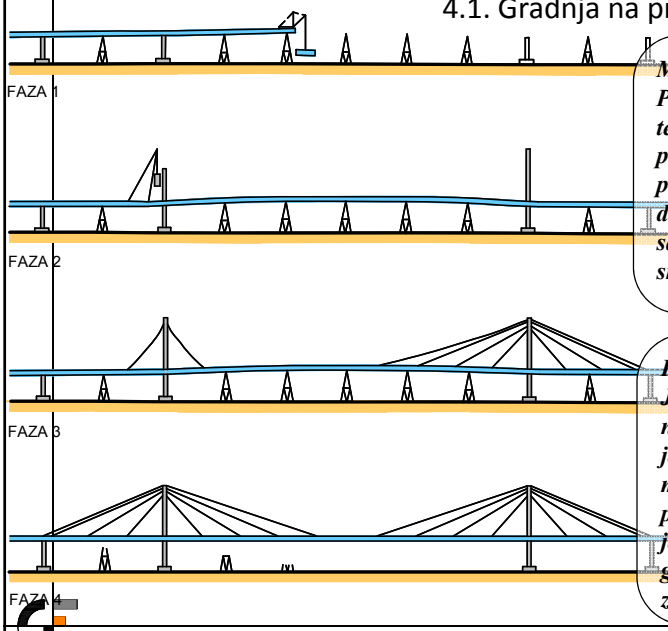
- Izvedba mosta s kosim zategama je čimbenik koji djeluje na koncepciju i projektiranje. Stoga će izbor konstrukcijskog sustava i materijala, kao i izvedba detalja konstrukcije biti u uskoj vezi s načinom izvedbe.

- Kod mosta s kosim zategama nosivost pojedinačne zatege ovisi o prijenosu horizontalne komponente sile iz zatege u gredu, a ona se ne može aktivirati ako prethodno nije ugrađen dio grede u koji se kosa zatega sidri.

4.1. Gradnja na privremenim osloncima



4.1. Gradnja na privremenim osloncima



MANE:
Privremeni oslonci, cijena, temeljenje u vodotocima, potreba za slobodnim prostorom, isplativo samo uz dovoljnu krutost na savijanje u uzdužnom smjeru

PREDNOSTI:
Jednolika izvedba s jednog na drugi kraju uz jednostavan transport, mogućnost kombinacije s plovnim dizalicama, jednostavna kontrola geometrije i prednapinjanja zatega

4.2. Gradnja uzdužnim potiskivanjem

Most preko Dunava, Metten, Njemačka

Sandučasti nosač betoniran u odsječ. 17 m, 1.takt donja ploča, 2. takt hrptovi i gornja

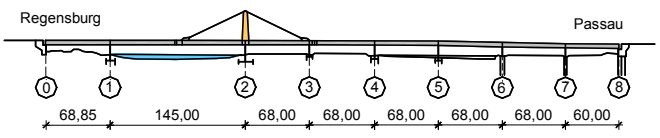
Potiskivanje preko glavnih i pomoćnih stupova, L=34 m, u gl. otvoru L=58 m, kljun L=35 m

poprečni nosači iznad stalnih stupova, ležajevi zamijenjeni konačnim, sekundarni eksc. kabeli uvedeni u sanduk i prednapeti, demontirani pomoćni stupovi u prilazima

izbetoniran upeti spoj između sanduka i pilona, betonirani prednapeti poprečni nosači na mjestima uvođenja zatege u sanduk, a pilon u odsječcima od 5,30 m

Zatega, dvokraka, u uzdužnoj osi mosta, betonski štap s jezgrom od kabela za prednapinjanje – izvedena na skeli u tri odječka od nožice do vrha pilona

Uvučeni kabeli preko sedla, izbetonirana glava pilona, kabeli prednapeti po programu, demontirani i pomoćni stupovi na mjestima uvođenja zatega u snaduk.

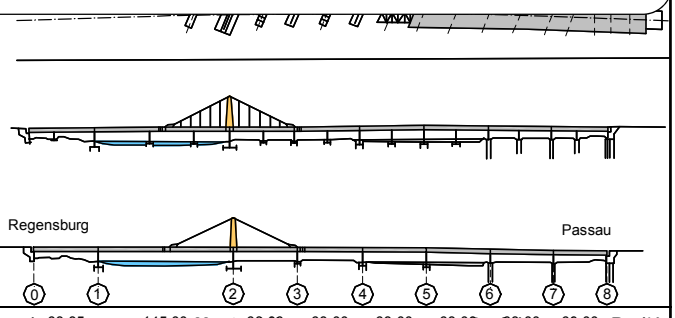


4.2. Gradnja uzdužnim potiskivanjem

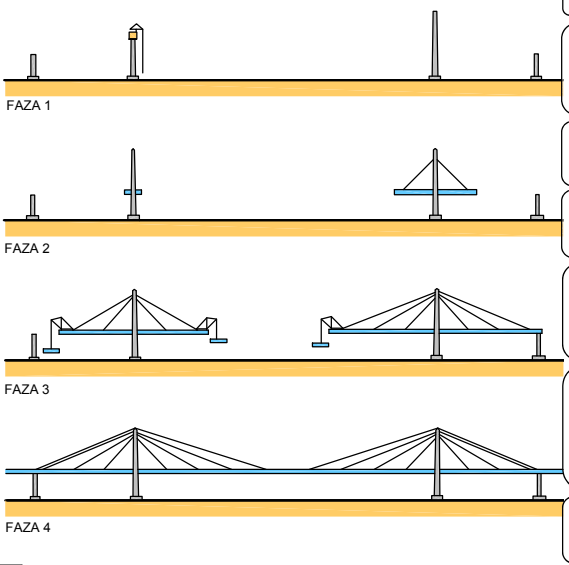
Most preko Dunava, Metten, Njemačka

MANA
prednapete betonske zatege – izgradnja na skeli

PREDNOSTI
- beton djeluje kao antikorozivna zaštita kabela za prednapinjanje, zaštita od udara vozila, zaštita od atmosferilija
- moguće primijeniti normalne kabele za prednapinjanje i redovite propise za betonske prednapete konstrukcije (u to doba DIN 4227)



4.3. Slobodna konzolna gradnja

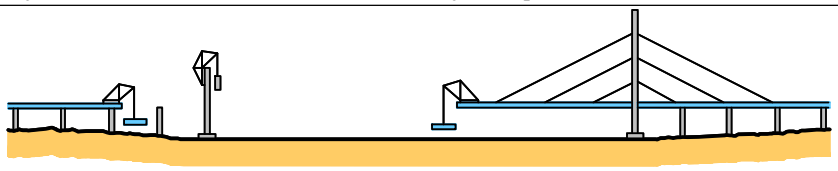


- Glavni stupovi, pilon
- Dio kolničkog nosača na mjestu pilona privremeno pričvrstiti
- Konzolni postupak pomoću derrick krana simetrično
- Kose zatege usporedno radi smanjenja momenta
- Pri ugradnji svakog sljedećeg dijela ugrađena zatega aktivira silu u nosaču
- Pričvršćenje nosača za krajnji stup – produženje slobodne konzolne gradnje u srednjem rasponu
- Jedna polovica pa pomicanje na drugi pilon
- ugradnja opreme

4.3. Slobodna konzolna gradnja

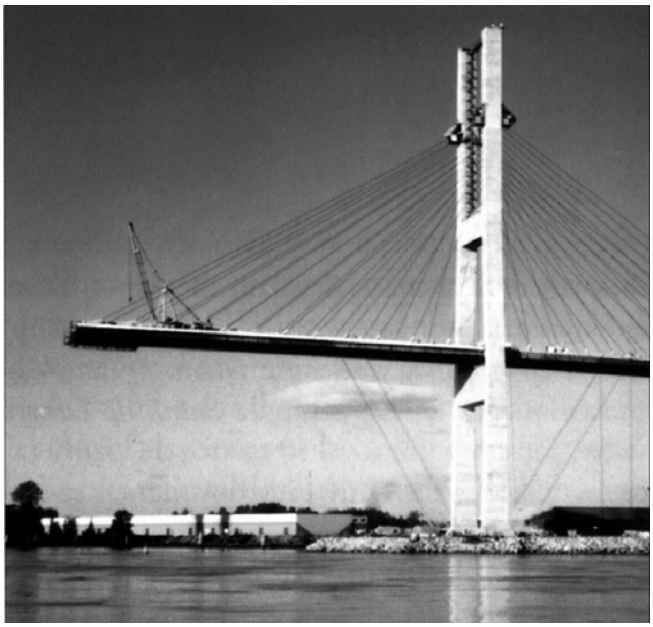
Kombinacija gradnje na privremenim osloncima u bočnim otvorima i slobodne konzolne gradnje u glavnom otvoru.

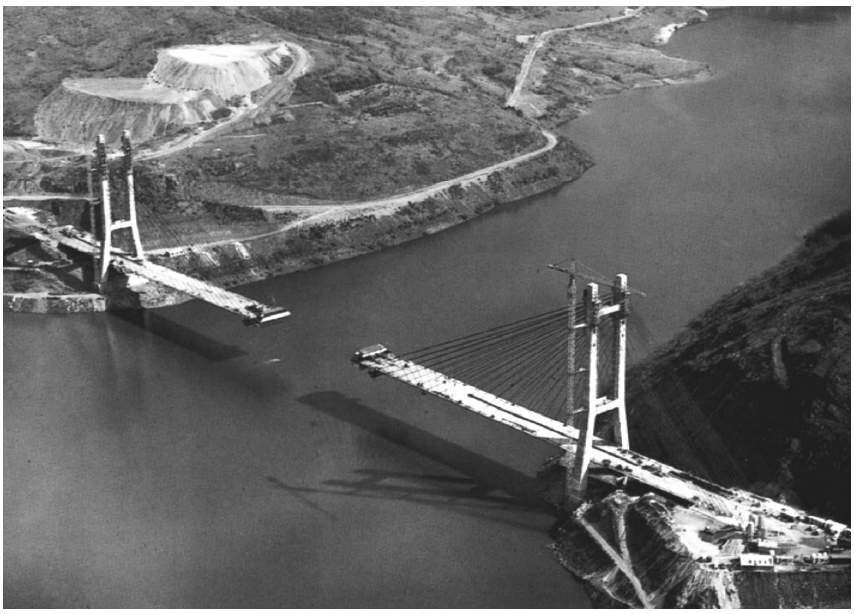
Kose zatege počinju se ugrađivati s trenutkom početka slobodne konzolne gradnje u srednjem otvoru, i to obostrano, u bočnom i srednjem rasponu.



Jednostrana slobodna konzolna gradnja kolničkog nosača primjenjuje se kada se bočni otvori mogu izvesti bez privremenih oslonaca.

Planirati izgradnju sa što manje pomoćnih oslonaca, zatega (veliki razmak između glavnih zatega), privremenih podupirača uz pilona jer povećavaju ukupne troškove.

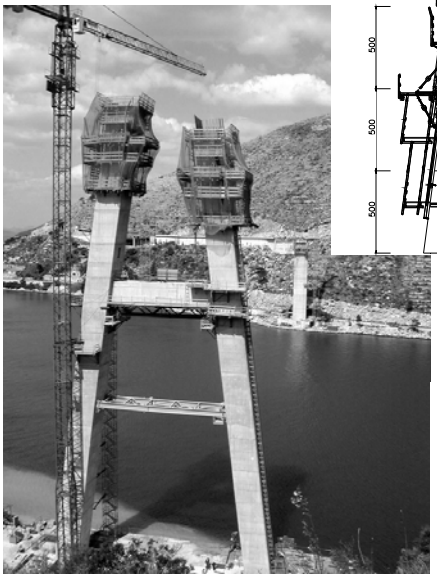


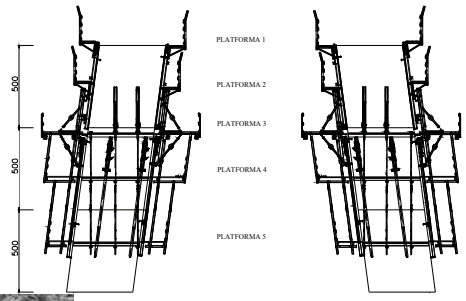






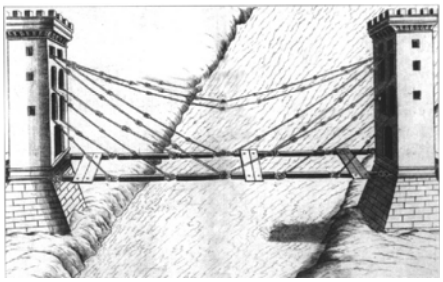




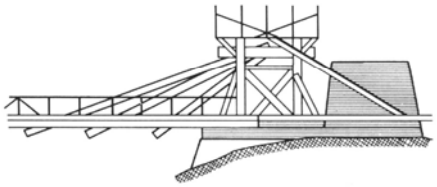


5. Povijesni razvitak i značajniji primjeri ovješenih mostova

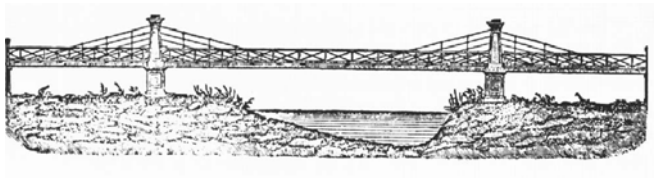
- Već su stari Egipćani koristili ideju ovješenja kod projektiranja brodova vješajući jedra na jarbol.
- Skica za prvi lančani most sa mnoštvom kosih lanaca venecijanskog graditelja Faustusa Verantiusa (Fausta Vrančića) rodom iz Dalmacije nastala je tek 1617.



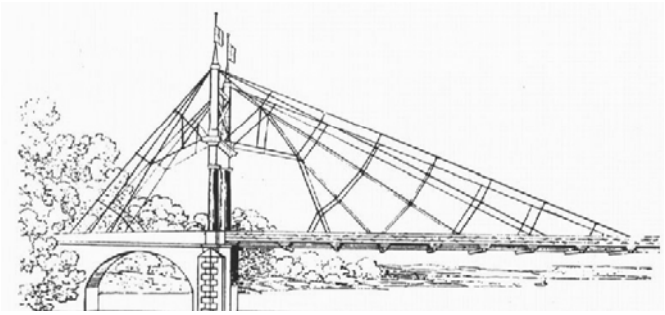
- Immanuel Löescher iz Freiburga - teorijski rad za most sa kosim zategama izveden od drva (1784).



- prvi autentični uspješni most sa kosim zategama postaje ***Twerton*** most preko rijeke Avon raspona 36,6m iz godine 1838, projektant T. Motley.



- Početkom XIX stoljeća izvedeno je još nekoliko mostova sa kosim zategama ali su se neki od njih srušili kao most preko rijeke Saale kod Nienburga.
- Most je sagrađen 1824., a srušio se 1825., uzrok rušenja nikad nije bio službeno objavljen, no vidljivo da zatege slijede neobične linije što je uzrokovalo velike momente drugog reda na koje konstrukcija nije bila dimenzionirana.

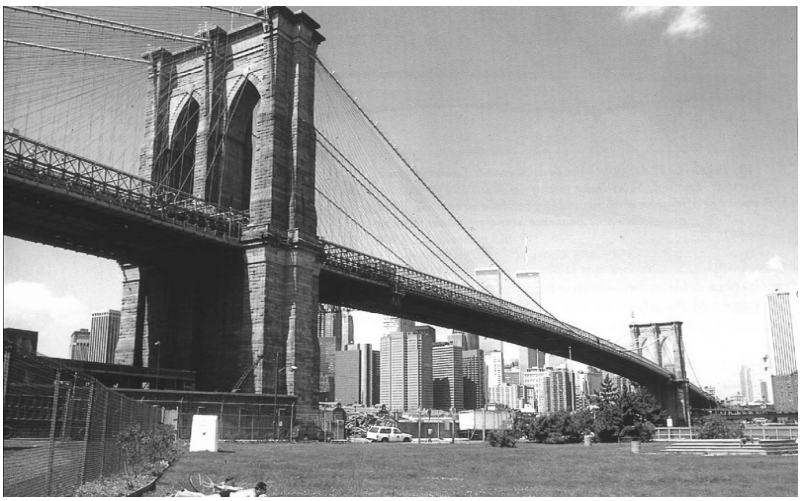


- To je prouzročilo nepovjerenje prema takvim konstrukcijama, naročito nakon Navier-ovog zaključka da treba prednost dati visećim mostovima.

- Stvarne uzroke rušenja treba međutim tražiti u neshvaćanju kompliciranog hiperstatičkog sustava naročito obzirom na djelovanja temperature i konstruktivne nedostatke i neprikladnosti ondašnjih materijala za zatege.

- Viseći mostovi preuzimaju primat za veće raspone, a kose zatege se ponekad koriste kao dodatni elementi za povećanje krutosti i povećanje aerodinamičke stabilnosti grede za ukrućenje.

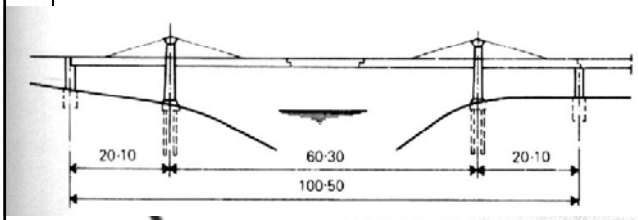
- Tako je J.Roebling koncipirao svoje remekdjelo most ***Brooklyn*** u New Yorku (1867), ne na bazi proračuna nego intuitivno.

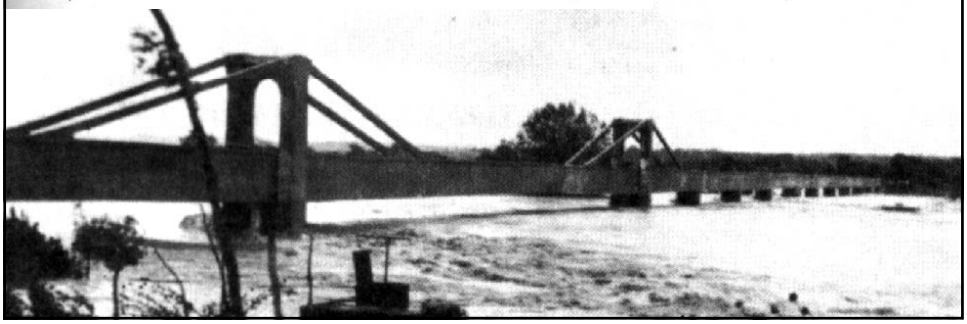


- Slično konstruktivno oblikovanje zajedničkog djelovanja standardnih kablova visećih mostova i kosih zatega primijenjeno je kod mostova preko Moldave u Pragu (1868) i ***Albert*** mosta preko Temze u Londonu (1868).

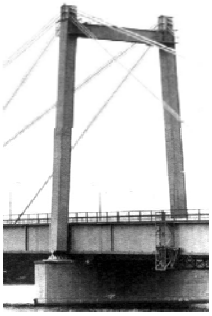


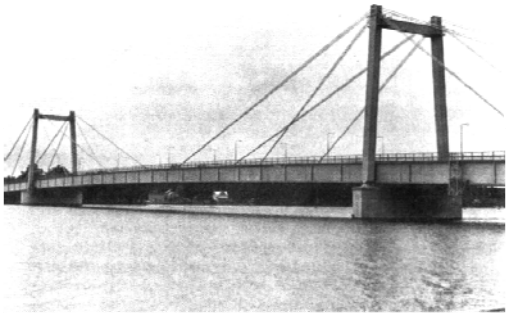
- Vrlo značajno ostvarenje je prvi armirano-betonski most sa kosim zategama, akvadukt ***Tempul*** kod Jereza de la Frontera u Španjolskoj, koji je projektirao poznati španjolski profesor Eduardo Torroja.



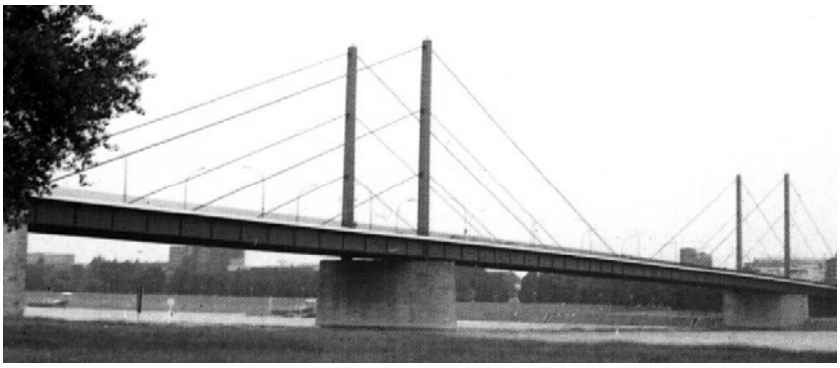


- Evoluciju modernih mostova sa kosim zategama od pedesetih godina ovog stoljeća omogućili su postupci numeričke analize uz primjenu računala.
- Te metode omogućuju proračun unutarnjih sila u konstruktivnim elementima za konačno stanje i za stanje montaže, a prvi puta su sistematski provedene za montažu prvog modernog mosta sa kosim zategama ***Strómsund*** u Švedskoj (1956).





- Prvi veliki njemački most je ***Theodor Heuss*** most preko Rajne u Düsseldorf-u (1957).
- Njegovom je uspješnom izgradnjom iniciran fascinantni razvoj ovog konstruktivnog sustava u početku gotovo isključivo u Njemačkoj gdje je trebalo obnoviti cijeli niz mostova porušenih tijekom II. svjetskog rata.



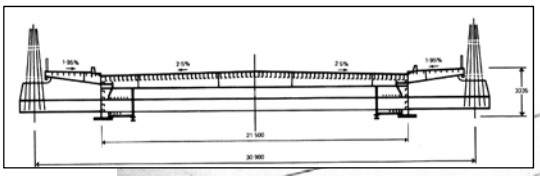
- Slijede ***Severins*** (1959) prvi izvedeni asimetrični most preko dva raspona sa A-pilonom

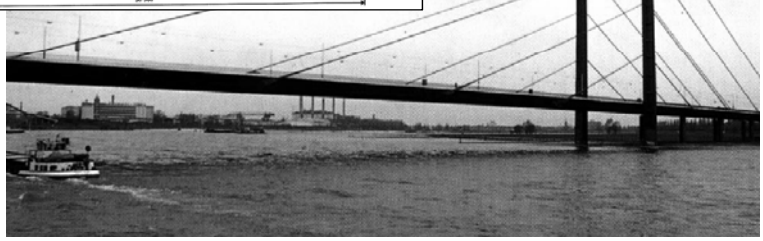


- ***Nordelbe Brücke*** prvi most sa zategama u jednoj ravnini (aksijalno).
- ***Friedrich Ebert Brücke*** (1967) prvi izvedeni objekt druge generacije mostova sa kosim zategama sa mnogo zatega. Implikacije ovog statičkog sustava čije je ponašanje slično gredi na elastičnoj podlozi za razliku od ponašanja sličnog kontinuiranom nosaču za prvu generaciju mostova sa kosim zategama sa malo zatega nisu odmah bile shvaćene.



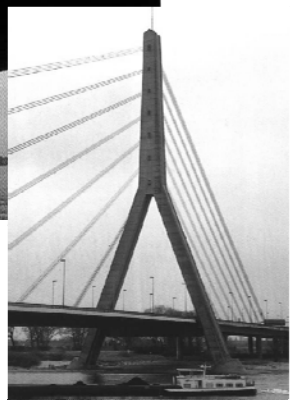
• ***Knie Brücke*** (1969) je asimetrični most sa zategama u obliku harfe u dvije ravnine, sa stupovima ispod svih priključaka zatega na gredu u postranom otvoru čime je učinkovitost dvostrukog sistema harfe povećana do te mjere da je poprečni presjek bilo moguće oblikovati sa vrlo vitkim punostijenim nosačima bez torzijske krutosti.



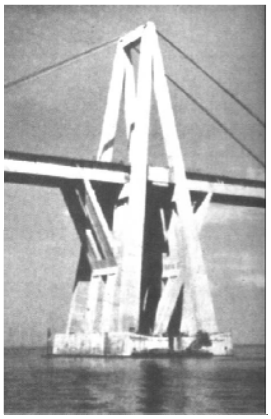


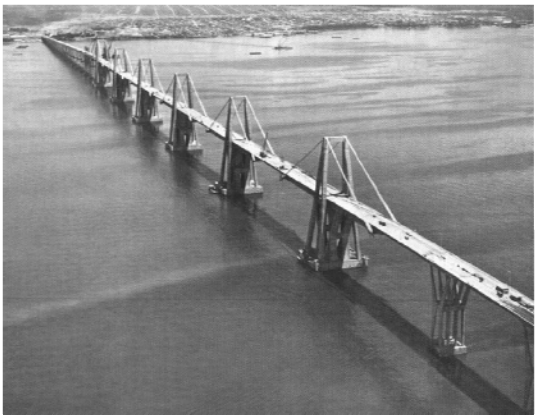
• most ***Flehe*** (1979) – betonski pilon



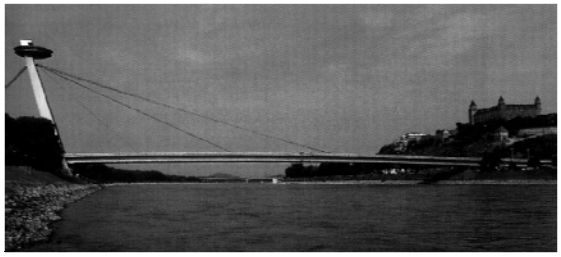


- Nešto kasnije od prvih njemačkih mostova sa kosim zategama R.Morandi projektira nekoliko mostova sa kosim zategama sa gredom i pilonima u betonu; ***Maracaibo*** (1962).
- Inženjerski zanimljivi mostovi - u estetskom smislu nisu osobito uspjeli

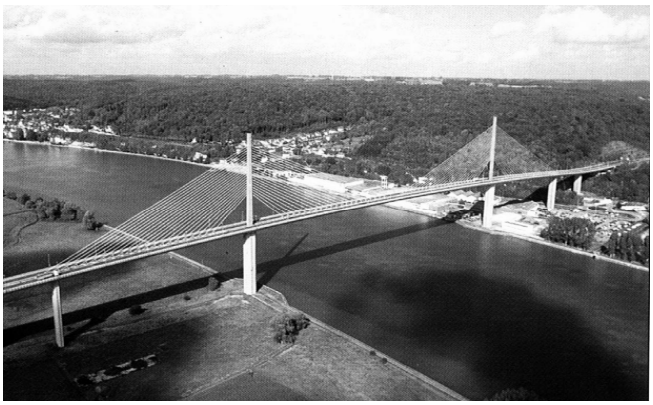




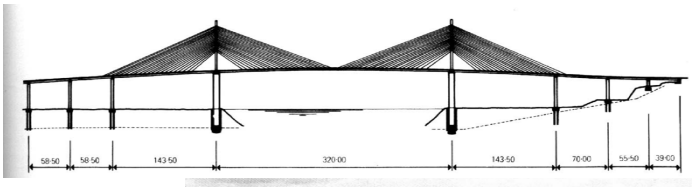
- Kasnih sedamdesetih godina i ostali svijet prihvaća ove mostove , naročito Japan sa topografijom terena koja zahtijeva mostove velikih raspona.
- Japanski mostovi sa kosim zategama su kao i njemački skoro isključivo izvedeni u čeliku.
- Ovješeni mostovi sa čeličnom gredom grade se u Velikoj Britaniji, Belgiji, Slovačkoj, Španjolskoj, Nizozemskoj, Švedskoj, SAD, Tajlandu; u Novom Sadu sagrađen je 1981 most sa središnjim ovješenjem rasponoa L=351m, projektant N. Hajdin sa suradnicima

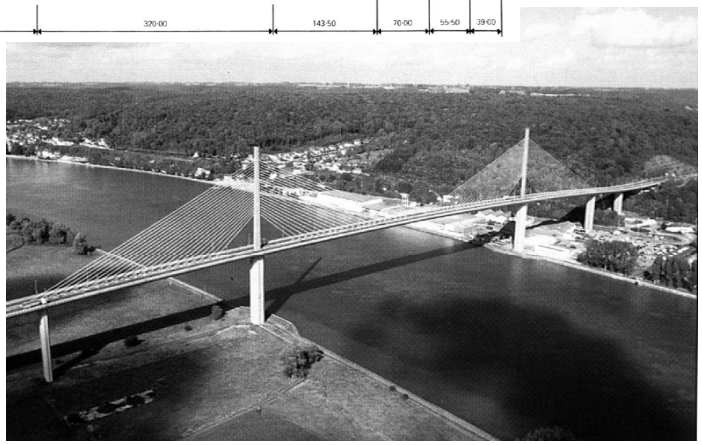


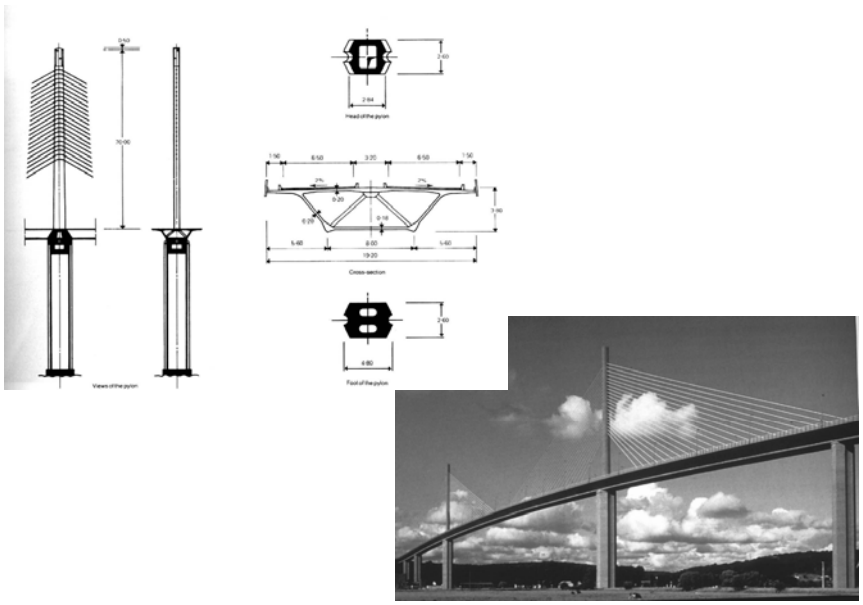
- Dok su prvi francuski mostovi sa kosim zategama kao ***St. Nazaire*** (1975) nastavljaju njemačku tradiciju čelične grede sa ortotropnom pločom, most ***Brottone*** (1977) sa betonskim sandukom i gusto raspoređenim zategama u centralnoj ravnini predstavlja sasvim novo originalno rješenje.



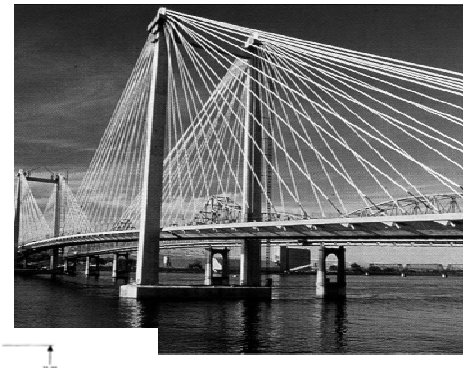
Brotonne, 1977, Francuska

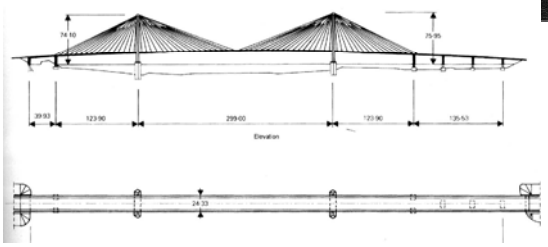


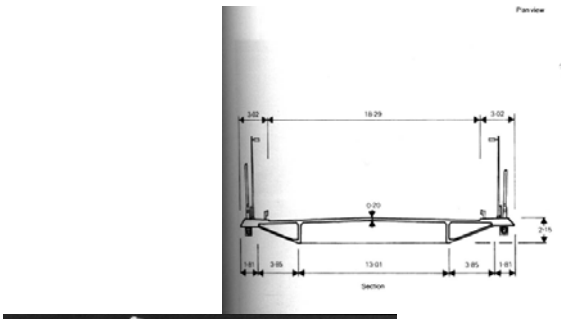




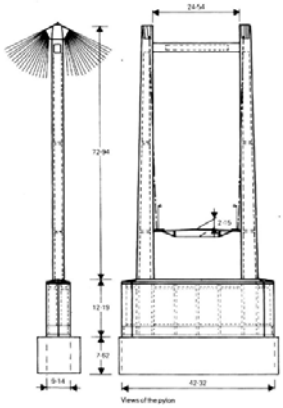
Pasco - Kennewick, 1978, USA





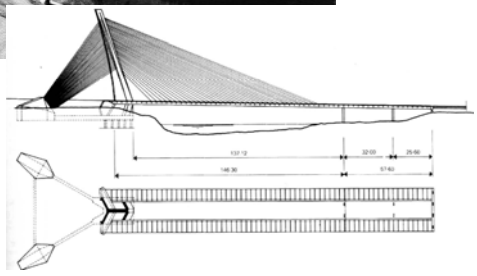


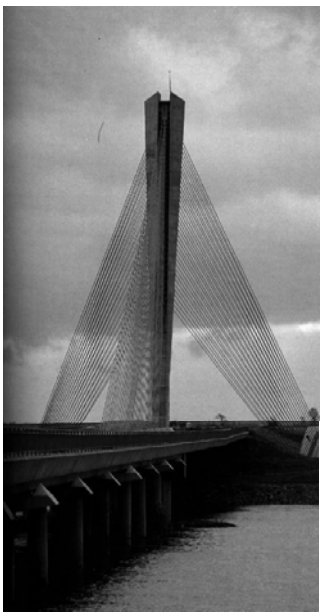


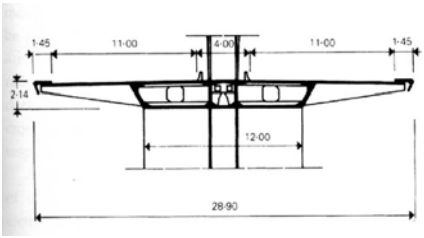


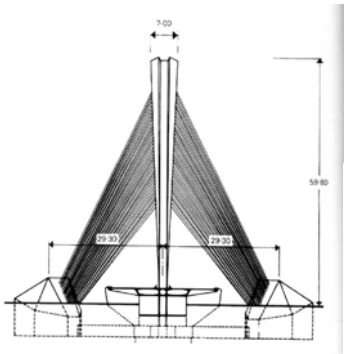
Sancho El Mayor, 1978, Španjolska







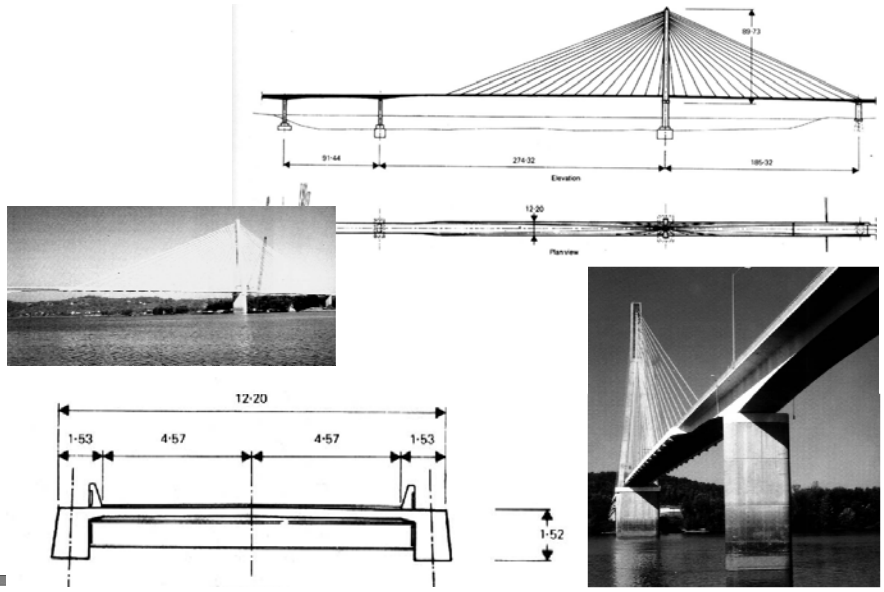




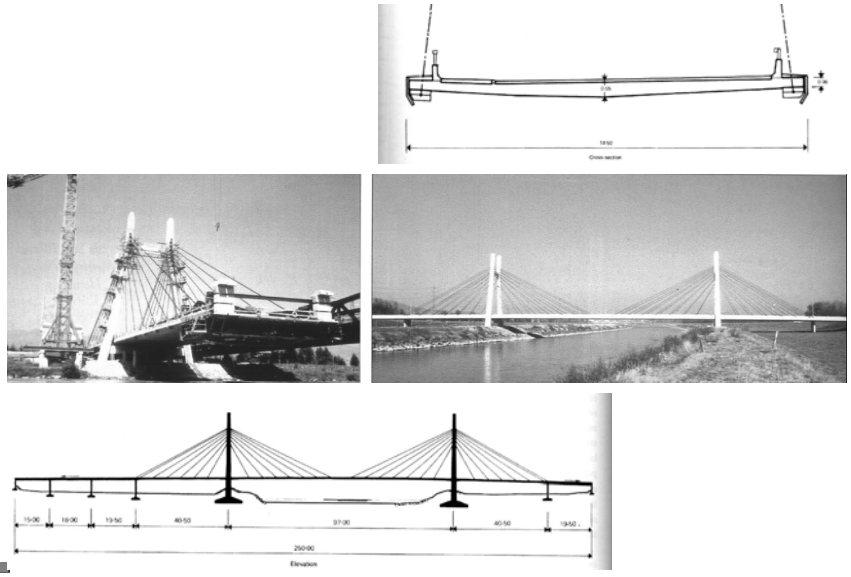
- Kod kasnijih Morandijevih mostova zategе su obučene u betonsku oblogu, a isto je napravio C.Menn na mostu ***Ganter*** (1980).



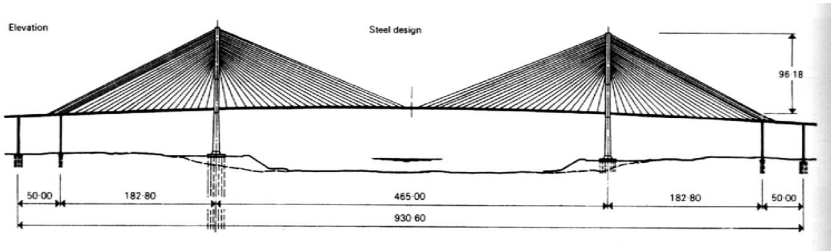
East Huntington, 1985, USA



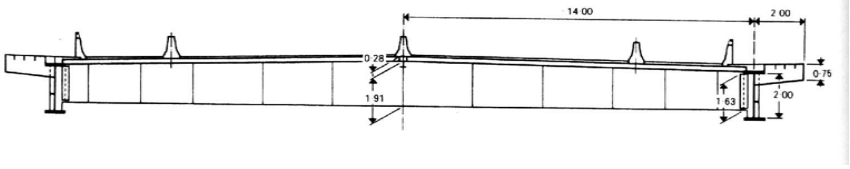
Diepoldsau, 1985, Španjolska

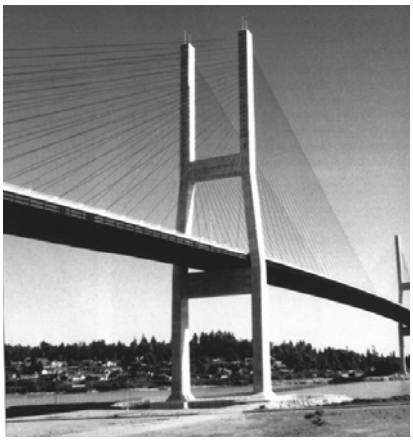


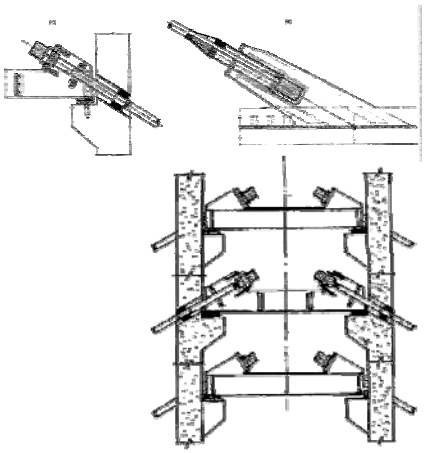
Annacis, 1986, Canada



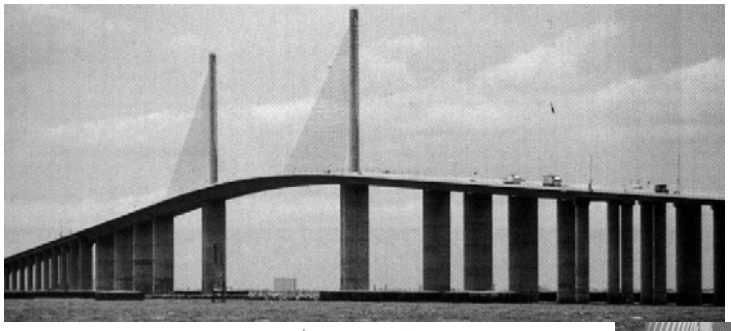


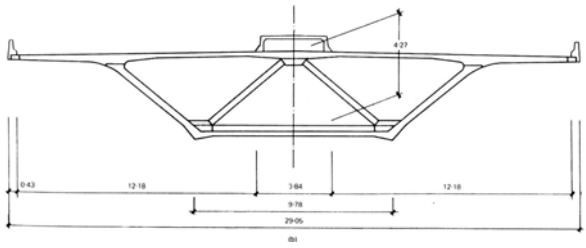






Sunshine Skyway, 1987, USA



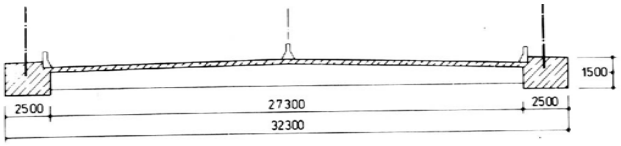




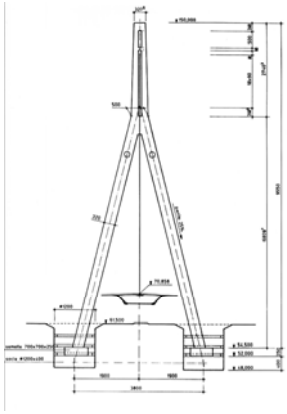
Dame Point, 1989, USA





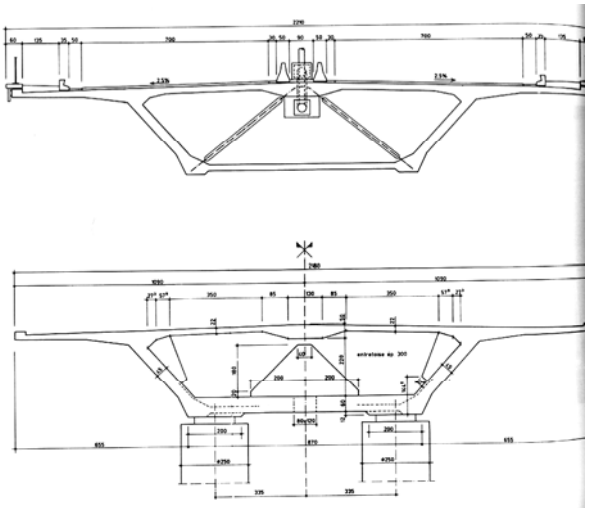


Wandre, 1989, Belgija

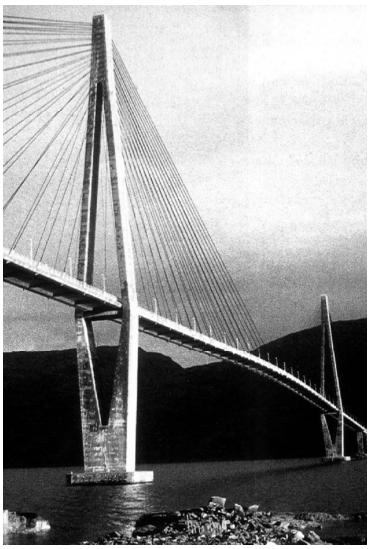




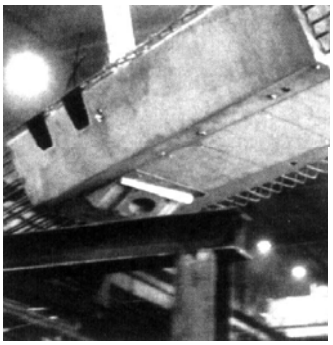




Helgeland, 1991, Norveška

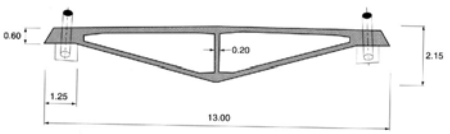


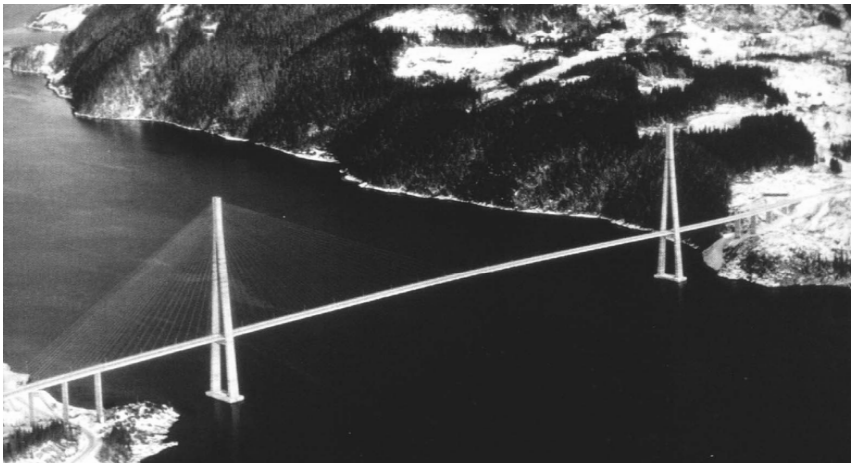




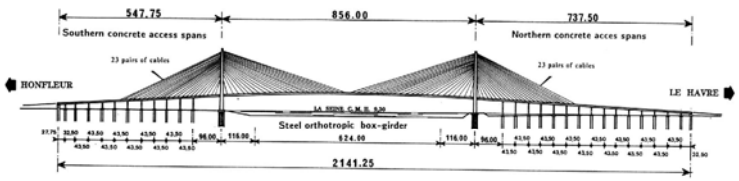
Skarnsundet, 1991, Norveška,

Najveći raspon za betonske presjeke



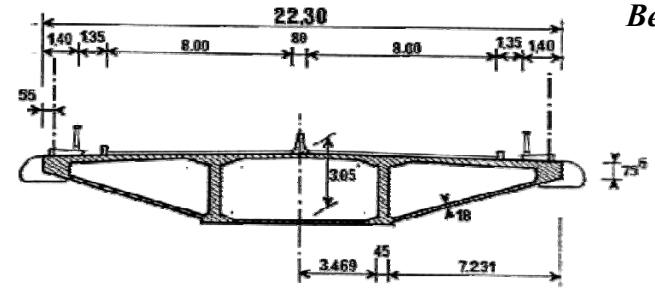


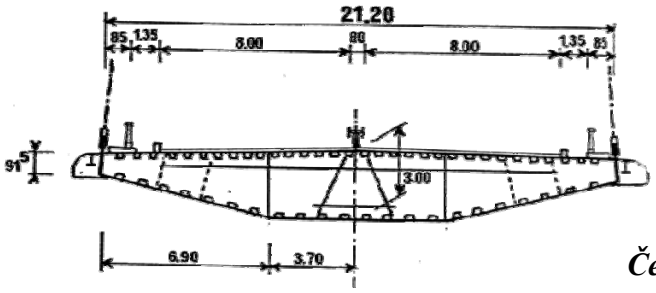
Normandie, 1994, Francuska





Betonska greda





Čelična greda

Sidrenje zatega na pilon

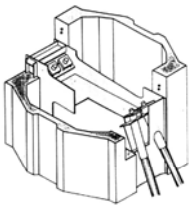
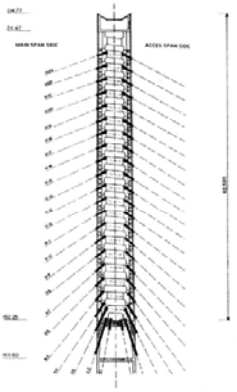
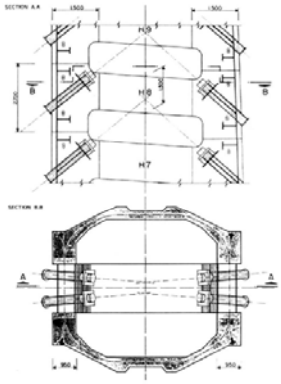
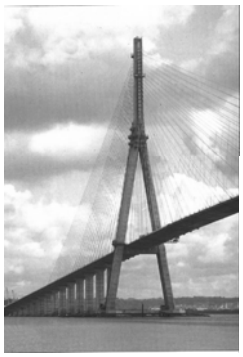


Figure 15 – Perspective view of pylon crest







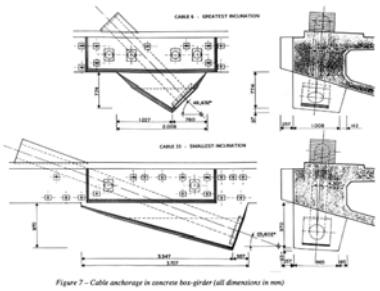
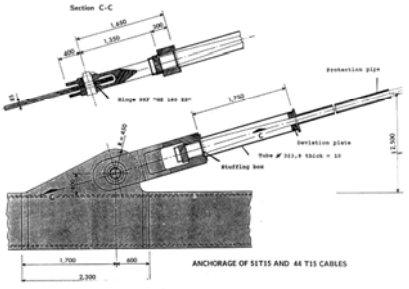


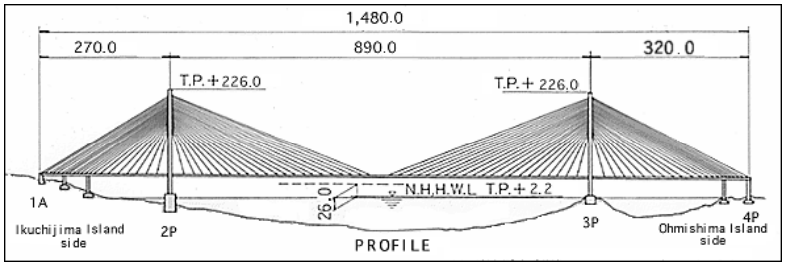
Figure 7 – Cable anchorage in concrete box-girder (all dimensions in mm)

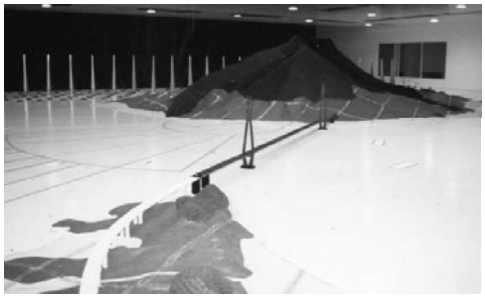


Sidrenje zatega na betonsku i čeličnu gredu

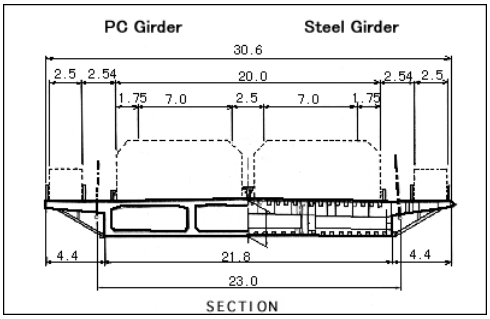


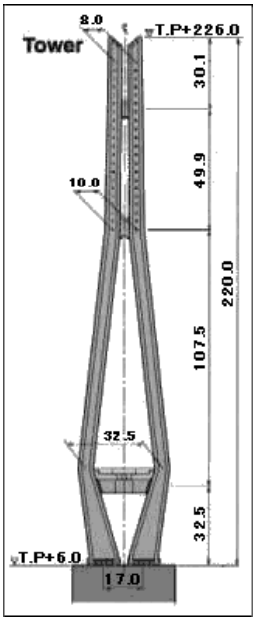
Tatara, 1999, Japan

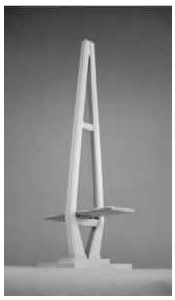












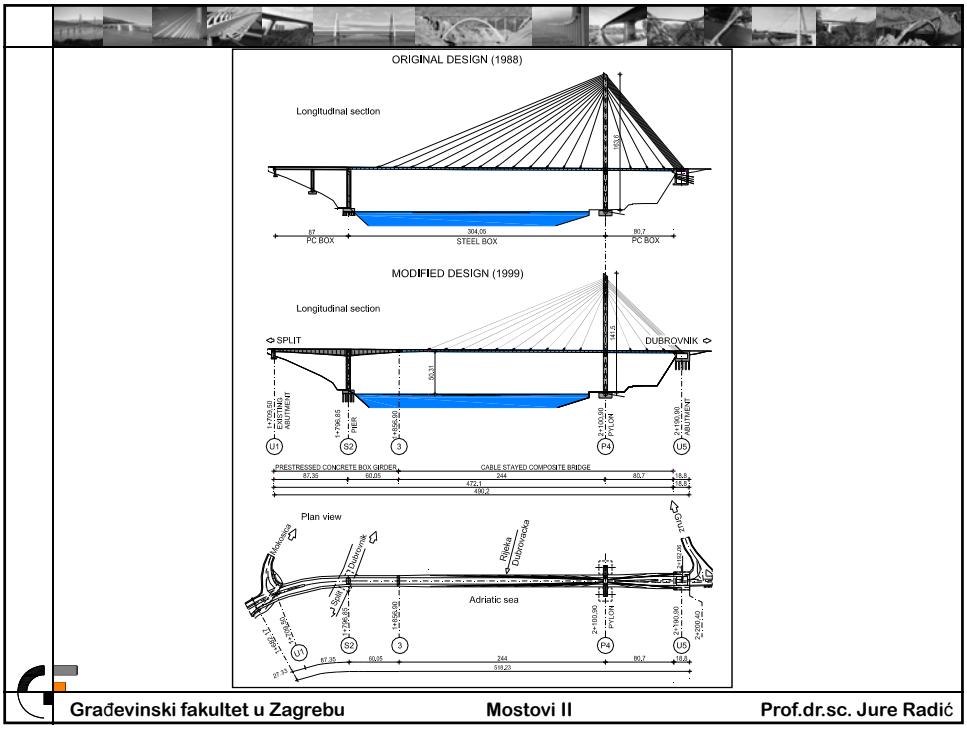


Most Franja Tuđmana, 2002, Hrvatska

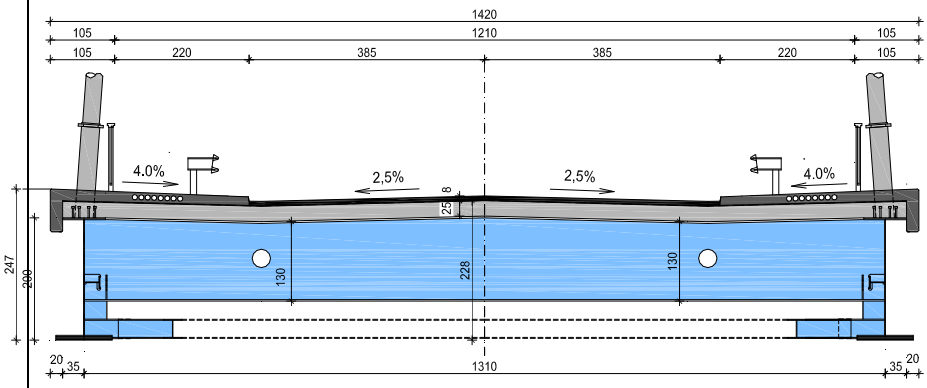


Most Franja Tuđmana, 2002, Hrvatska





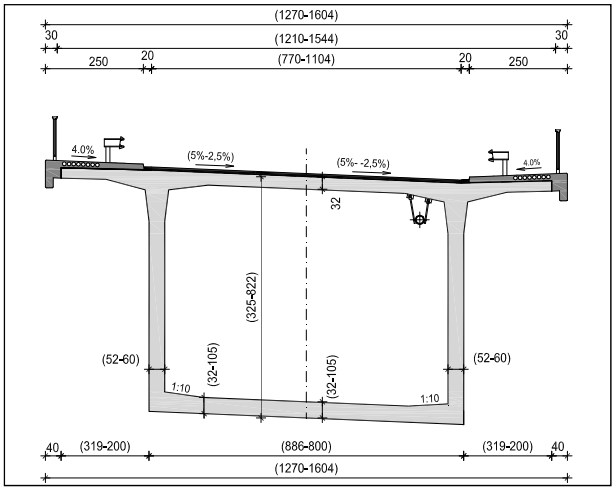
Poprečni presjek ovješenog mosta



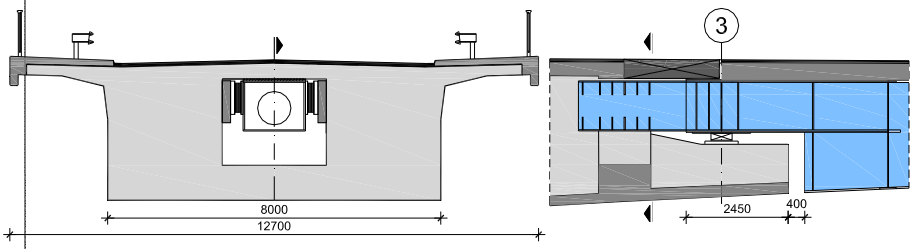
Poprečni presjek ovješenog mosta



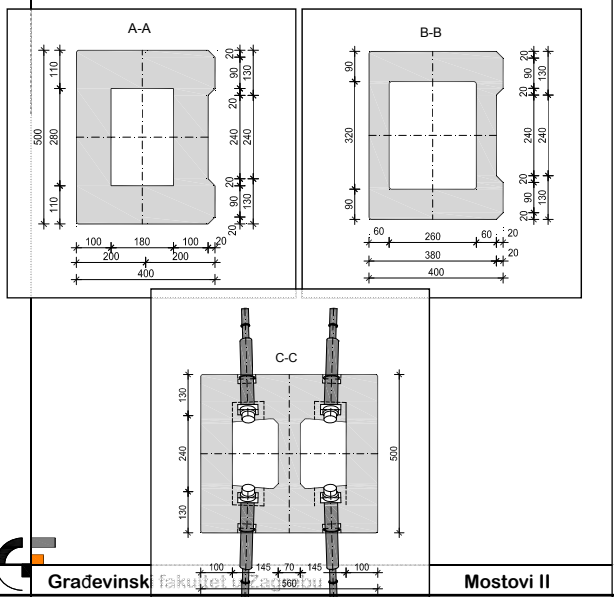
Poprečni presjek prilaznog mosta - prednapeti sanduk

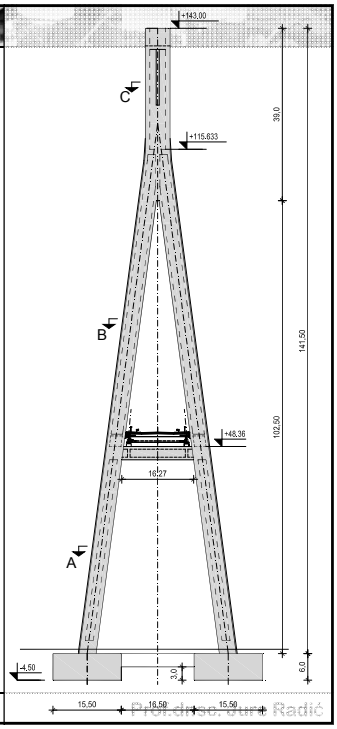


Zglobna veza prilaznog vijadukta i ovješenog mosta

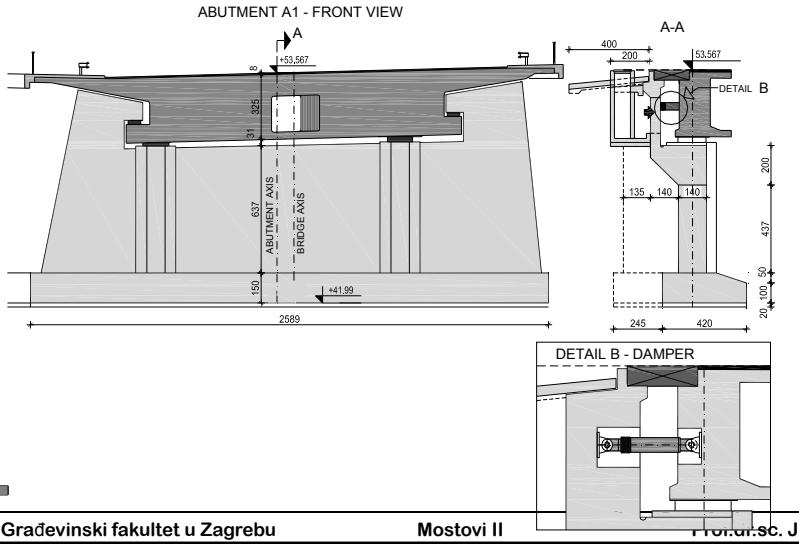


Pilon

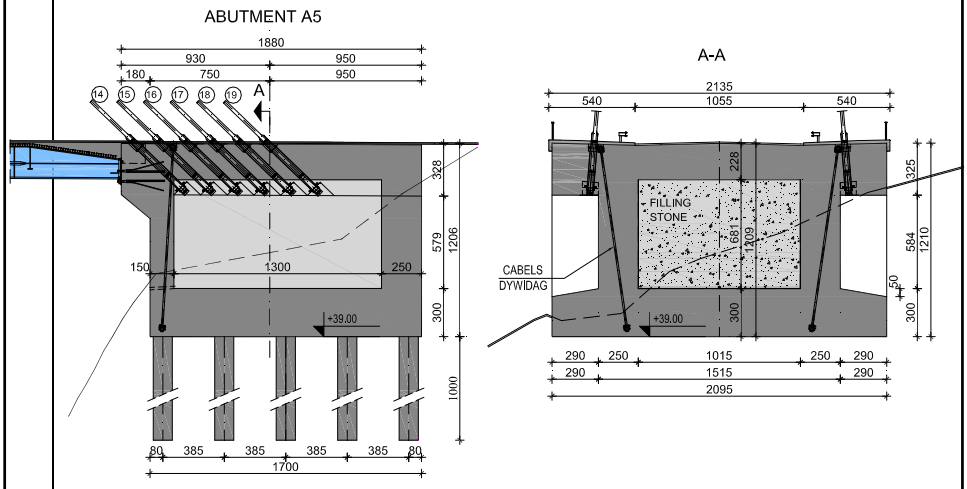




Zapadni (Splitski) upornjak



Istočni (Dubrovački) upornjak



IZVEDBA - PRILAZNI MOST






IZVEDBA -PILON



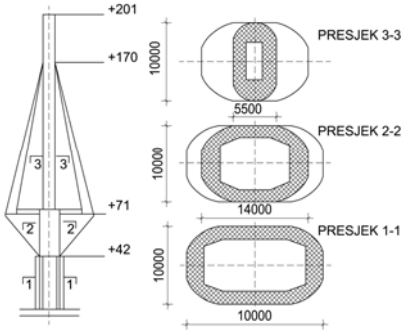


IZVEDBA - OVJEŠENI MOST



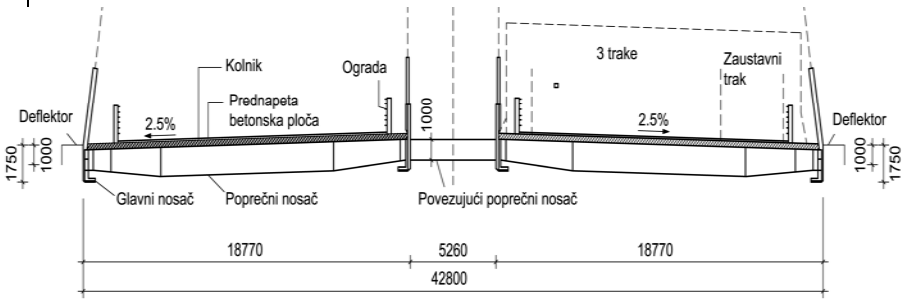
Most *Ting Kau*

Osnovni problem zavješenih mostova sa više raspona je stabilizacija središnjeg pilona, koji se za razliku od pilona konvencionalnih zavješenih mostova ne može vezati sidrenim zategama na čvrstu točku kao npr. upornjak ili stup. To je naročito problematično tijekom izvedbe zavješenog sklopa balansnim konzolnim postupkom.
Zbog toga su primjenjene uzdužne stabilizacijske zatege, koje dijagonalno povezuju vrh središnjeg pilona sa rubnim pilonima na razini zavješenog sklopa.
Tri betonska pilona C60 su visine do 201,35m nad morem i čine ih tri segmenta, svaki nepromjenjivog poprečnog presjeka.



Most *Ting Kau*

Vrlo vitki segment iznad zavješenog sklopa stabiliziran je poprečnim zategama, sidrenim u čelične poprečne nosače povezane sa srednjim segmentom pilona ispod zavješenog sklopa. Zbog plovnog puta donje zatege su sidrene u vrh baznog presjeka pilona, koji je zato većih izmjera.
Srednji pilon temeljen je na 52 bušena pilota Ø 2,5m, nosivosti 5 MN svaki, koji su oslonjeni na čvrstu stijenu. Za stabilizaciju pilota i zaštitu pilona od udara broda izveden je umjetni otok, koji može preuzeti udare plovila do 220.000t.
Rubni piloni temeljeni su plitko na čvrstoj stijeni.



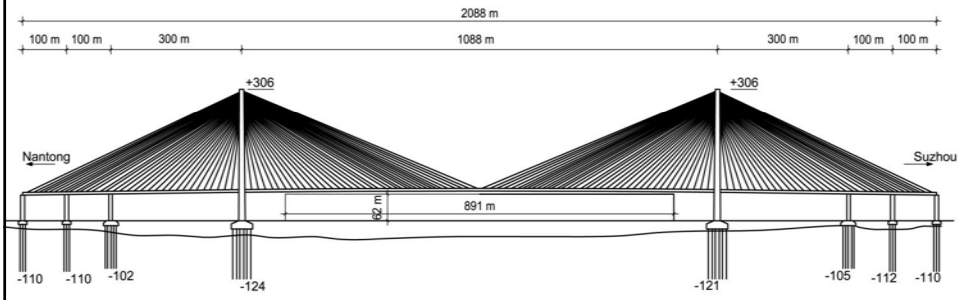
Most *Ting Kau*



Most ***Sutong***

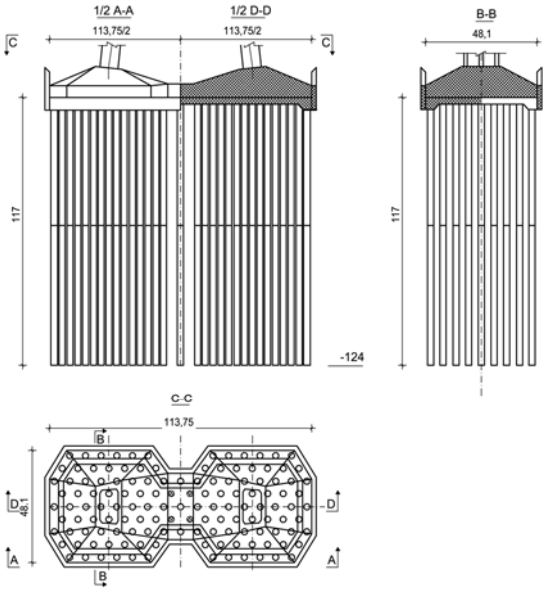
Most **Sutong** prelazi rijeku Jangtze oko 100km uzvodno od Shanghai-a i povezuje gradove Suzhou na južnoj obali i Nantong na sjevernoj obali rijeke. Taj most sa najvećim rasponom za zavješene mostove 1.088m pušten je u promet 2008.godine.

Most je kontinuiran preko 7 raspona sa dva pilona, dvije ravnine kosih zatega oblika nazovi-lepeze (bočno zavješenje), čeličnim aerodinamički oblikovanim sandučastim zavješenim sklopom i po dva među-stupa u postranim otvorima. Ti među-stupovi povećavaju krutost mosta i smanjuju naprezanja u pilonu i zavješenom sklopu.
Rasponi iznose: 100 + 100 + 300 + 1088 + 300 + 100 + 100 = 2.088m.



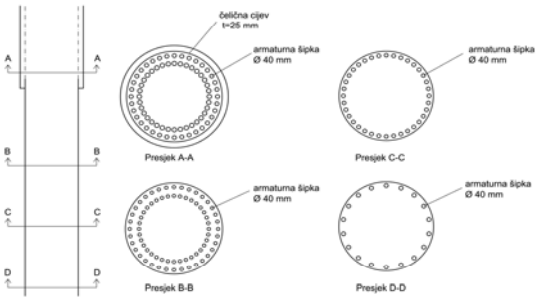
Most ***Sutong***

Od različitih varijantnih rješenja temeljenja odabrano je duboko temeljenje na bušenim pilotima temeljem rezultata za udar broda, zaštitu korita rijeke i povećanja krutosti na potresna djelovanja, kao i promišljanja o estetici, izvedbi i konstrukcijskom ponašanju.



Most ***Sutong***

Temeljenje svakog pilona je na grupi od 131 bušenog pilota Ø 280/250cm i duljine 115m.Beton je razreda čvrstoće C30, projektna vrijednost vertikalnog pritiska je 17,5 Mpa, a modul elastičnosti 30.000 MPa. Piloti su na gornjih 55m spregnuti s čeličnom cijevi t=25mm, a na preostalom dijelu betonski Ø 2,5m.

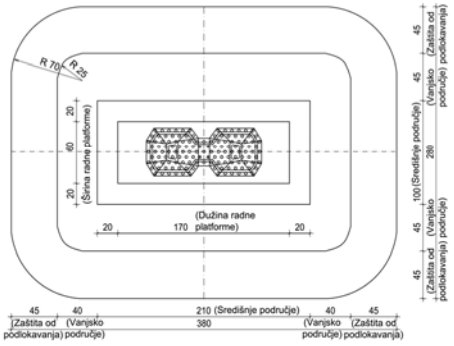


Uvjeti na otpornost na udar broda da se spriječe lokalna oštećenja su, da kod visoke vode donji dijelovi pilona moraju preuzeti udar, a da kod niske vode brod ne smije udariti direktno u pilote.

Obzirom na drugi uvjet temelj sjevernog pilona smješten u dubljoj vodi, morao je biti ojačan dodavanjem sloja podložnog podvodnog betona debljine 3,0-5,5m i povećanjem razmaka između ruba naglavne ploče i pilota betoniranjem zagatnog zida. Podložni beton i postrani zid povezani su s naglavnom pločom pilota moždanicima i čeličnom rešetkom. Slična rješenja primjenjena su i kod drugih stupova.

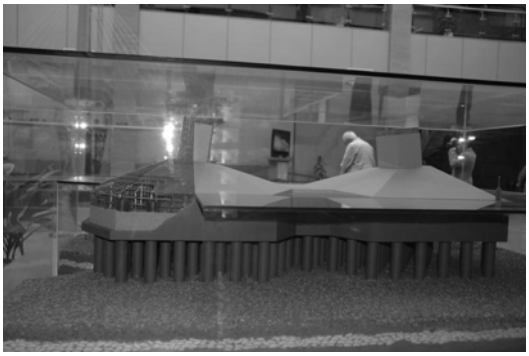
Most ***Sutong***

Zaštita od podlokavanja izvedena je u dvije faze, prethodna zaštita i stalna zaštita. Prethodna zaštita je izvedena bacanjem vreća pijeska za osiguranje sigurnosti platformi za izvedbu i olakšavanje izvedbe stalne zaštite od podlokavanja, koja je provedena bacanjem graduiranog kamenja i oklopnog kamenja na vreće pijeska za formiranje sloja vrlo otpornog na eroziju na dnu korita rijeke. Zaštita od podlokavanja podijeljena je na tri područja, središnje područje veličine platforme za izvedbu, vanjsko područje i rubno područje.



Most ***Sutong***

Za određivanje dimenzija, veličine materijala i debljine sloja svakog od područja provedeni su proračuni i ispitivanja. Ukupna količina materijala za zaštitu od podlokavanja svakog temelja iznosila je oko 550.000 m^3 .
Mnogi tehnički problemi, konstrukcija platforme od čeličnih cijevi, sudjelovanje zaštitnih cijevi u prijenosu sila stalnih konstrukcija, injektiranje vrhova pilota, spuštanje 6.000t teškog zagata i betoniranje masivne naglavne ploče, riješeni su temeljem ispitivanja i proračuna.



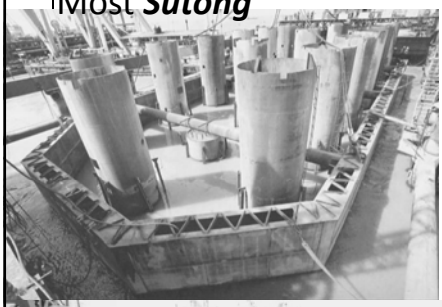
Most ***Sutong***

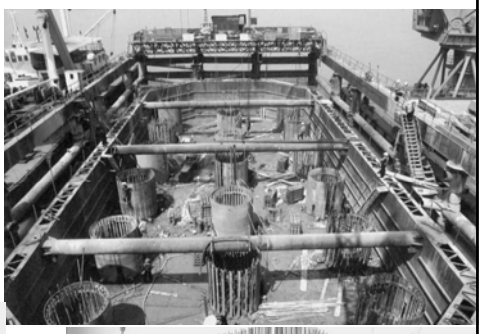
Izvedba temelja trajala je 24 mjeseca.





Most ***Sutong***





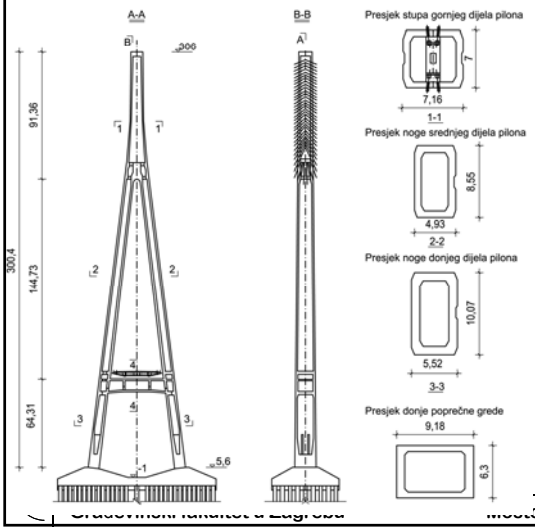




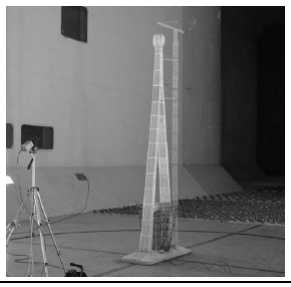
Most ***Sutong***

Pilon

Odabran je lagani, jednostavni AB pilon obrnutog Y-oblika sandučastog poprečnog presjeka, visine 300,4m.



Kose zategе sidrene su u čeličnim sidrenim kutijama.
Provedena su ispitivanja slobodno stojećeg pilona u vjetrovnom tunelu za određivanje kritične brzine galopiranja, čvrstoće i stabilnosti.



Most ***Sutong***

Piloni su izvedeni pomoću automatske hidrauličke podizne skele u 68 sekcija duljine po 4,5m.



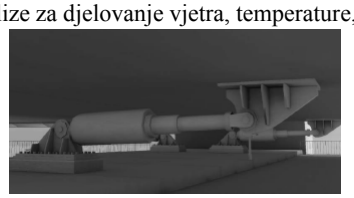
Geodetska mjerenja su pokazala da je vertikalnost pilona 1/40.000 i da je najveći osni linijski otklon 7mm.

Piloni su izvedeni za 16 mjeseci.

Most ***Sutong***

Čelični sandučasti zavješeni sklop i kose zatege

Projektna brzina vjetra za most Sutong bila je 38,9 m/s na visini 10m i povratnim periodom od 100 godina (kao EN 1991-4).
Niti potpuno „plivajući“ niti fiksni konstrukcijski sustav nisu zadovoljili za djelovanje vjetra i temperature. Zato je odabran sustav viskoznih prigušivača sa graničnicima temeljem statičke i dinamičke analize za djelovanje vjetra, temperature, potresa i kočenja, tzv. „polu-plivajući“ sustav...



Taj sustav ima prednost da može ograničiti dinamičke pomake i opterećenja od djelovanja turbulentnog vjetra, kočenja i potresa disipiranjem energije, ali istovremeno osigurava minimalni otpor za polagane pomake uslijed temperature, prometa i statičkog djelovanja vjetra. Funkcija graničnika jest da prigušivači ne daju otpor za pomake zavješenog sklopa, sve dok su relativni pomaci u uzdužnom smjeru unutar duljine hoda prigušivača, a prigušivač funkcionira kao fiksna veza između pilona i zavješenog sklopa kad je relativni pomak veći od duljine hoda prigušivača.

Most ***Sutong***

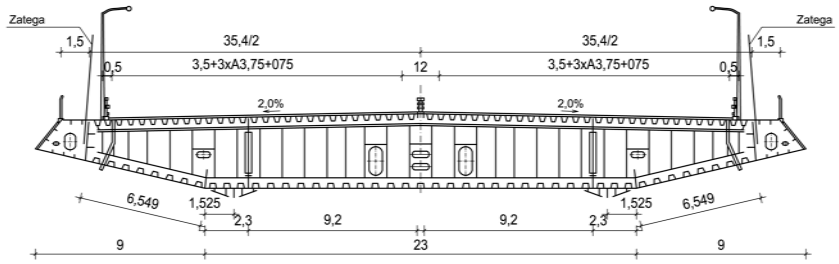
Kose zatege su sastavljene od pocinčanih paralelnih žica Ø 7mm HDPE cijevima, čvrstoće 1.770 Mpa.
Projektirane su za životni vijek 50 godina i ispitane na umornost i vodonepropusnost, a konstrukcijski detalji (sidra) su projektirani tako da se olakša njihova zamjena.

Provedena su ispitivanja kosih zatega u vjetrovnom tunelu i ispitivanja na prigušenje za određivanje koeficijenta pritiska vjetra, za proučavanje mjera za ublažavanje vibracija i verificiranje utjecaja tih mjera, jer su i zavješeni sklop i zatege fleksibilni, sa velikim rasponom veličina vlastitih frekvencija vibracija.

Glavna briga bili su vrtloženje zavješenog sklopa i pilona, parametarske vibracije i linearna rezonancije zatega i vibracije kosih zatega uslijed vjetra i kiše.
Aerodinamičke mjere poduzete za ublažavanje vibracija od zajedničkog djelovanja vjetra i kiše uključile su primjenu zaštitnih HDPE cijevi sa konkavnim udubinama i vanjske magneto-reološke (MR) prigušivače za ograničenje amplituda njihovih vibracija, a poduzete su i mjere za olakšanje ugradbe poprečnih zatega, ako se za to ukaže potreba..

Most ***Sutong***

Zavješeni sklop je čelični sanduk aerodinamičkog oblika sa deflektorima - dodatnim elementima za smanjenje pritiska vjetra (*fairings*).



Provedena su modelska ispitivanja poprečnog presjeka u vjetrovnom tunelu u mjerilima od 1:70 do 1:13,5. Ta ispitivanja su otkrila utjecaj Reynolds-ovog broja na sklop i očito vrtloženje sklopa za napadni kut +3° u mirnom strujanju. U detaljnom projektu položaj tračnica za pokretna kolica pregled mosta na donjem rubu sanduka je optimiziran temeljem rezultata ispitivanja u vjetrovnom tunelu. Tračnice su postavljene na horizontalnu donju pojasnicu sa deflektorima (*fairing panels*) smještenim s obje strane tračnica.

Most ***Sutong***

Za vrijeme konzolne gradnje najveća duljina konzole iznosila je 540 m i jedan od najvećih rizika bila je stabilnost i sigurnost za djelovanje vjetra. Zbog toga su provedena detaljna ispitivanja u vjetrovnom tunelu za najnepovoljnije uvjete za gotovi most, ali i za kritične faze gradnje.



Rezultati ispitivanja su pokazali da je kritična brzina vjetra odabranog poprečnog presjeka mnogo veća od projektne kritične brzine vjetra i za gotovi most i za kritične faze gradnje, tako da konstrukcija ima dobru aerodinadinamičku stabilnost. Međutim, za maksimalnu brzinu vjetra sigurnost nekih konstrukcijskih elemenata je bila relativno mala uslijed utjecaja galopiranja. Ispitivanja su pokazala i da podesivi prigušivači masa (*tuned mass dampers*) ne bi bili učinkoviti zbog relativno vrlo malih frekvencija vibracija konstrukcije.

Most ***Sutong***

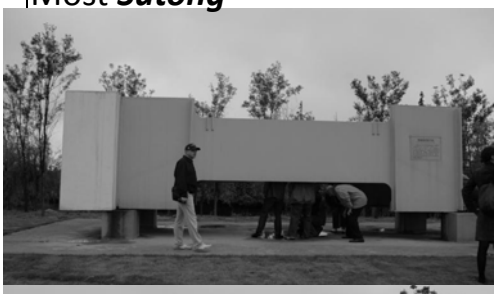
Sekcije čeličnog sanduka izrađene su u radionici. Za ubrzanje montaže i smanjenje trajanja konzolne gradnje, sekcije postranih otvora oslonjene su na pomoćne stupove i konzole i postavljene u konačni položaj pomoću plovne dizalice.



Najveći segment ugrađena pomoću plovne dizalice bio je duljine 60m i težine 1.250t.
Montaža zavješenog čeličnog sandučastog sklopa trajala je 10 mjeseci. Standardne sekcije montirane su u ciklusu od prosječno 5 dana.

Izvedba mosta Sutong započela je lipnja 2003, a most je otvoren za promet u svibnju 2008. Cijena cijelog projekta je oko 1,2 milijarde dolara, uključujući 23km prilaznih cesta, 6km prilaznih mostova i sam glavni zavješeni most.

Most ***Sutong***







Most ***Sutong***











LITERATURA :

R. Walther, B. Hourriet, W. Isler : Cable Stayed Bridges

Niels J. Gimsing : Cable Supported Bridges, Concept and Design

Roik, Albrecht, Weyer : Schragseilbrucken

Mthivat J.: The cantilever construction of prestressed concrete bridges

BBR : Cable – Stayed Structures

K. Šavor, Z. Šavor : Ovješeni mostovi, Ceste i mostovi 33 (1987) 2, str. 41-47

Z. Šavor : Mostovi sa kosim zategama, Zbornik radova I, Nekonvencionalni objekti, Simpozij Specijalni inženjerski objekti, DHGK, Brijuni, 1988.

F. Leonhardt, W. Zellner : Past, present and future of cable-stayed bridges

Čandrlić V.: Skripta predavanja iz Masivnih mostova

Tonković K.: Zauzdani sklopovi mostova