

5. MOSTOVI LUČNI

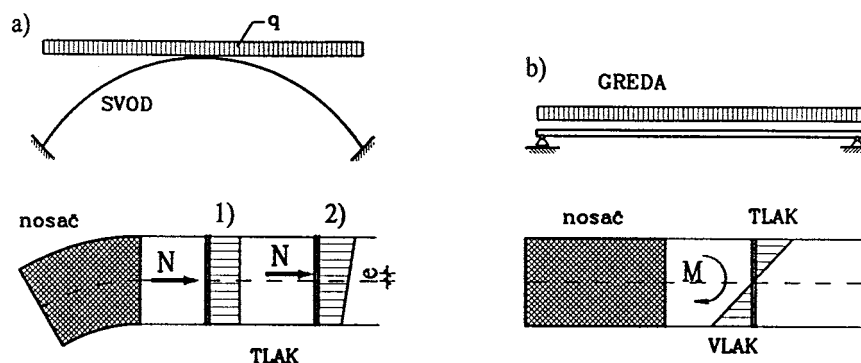
SADRŽAJ:

5.	LUČNI MOSTOVI	1
5.1.	Opći pojmovi	2
5.2.	Povijesni razvitak	3
5.2.1	Prvi svodovi	3
5.2.2	Mostovi starog Rima	4
5.2.3	Razdoblje do 18. stoljeća	6
5.2.4	Razvitak do početka 20. stoljeća	10
5.2.5	Prvih 50 godina betonskih lukova	11
5.3.	Oblikovanje i izvedba suvremenih masivnih lukova	14
5.3.1	Izvedbe na skeli	14
5.3.2	Prve konzolne izvedbe jadranskih lukova	16
5.3.3	Konzolna izvedba formiranjem rešetke	17
5.3.4	Kineski mostovi s krutom armaturom	18
5.3.5	Japanski postupci izvedbe	19
5.3.6	Francuski mostovi sa spregnutim nadlučnim sklopom	20
5.3.7	Suvremeni mostovi izvedeni konzolnim postupkom	22
5.3.8	Lukovi izvedeni zaokretanjem polovica	24
5.4.	Načela oblikovanja i konstruktivni detalji	24
5.4.1	Uobičajeni sustavi	24
5.4.2	Određivanje optimalnog oblika osi luka	27
5.4.3	Zakon promjene poprečnog presjeka luka	30
5.4.4	Metoda obrnutog opterećenja	33
5.5.	Statičke provjere	36
5.5.1	Modeliranje za proračun	36
5.5.2	Potporna (tlačna) linija	38
5.5.3	Provjere stabilnosti luka	39
5.5.4	Modeliranje štapnim elementima za proračun na računalu	41
5.5.5	Proračun luka u poprečnom smjeru	42
5.6.	Literatura	43

Zagreb, veljača 2003.

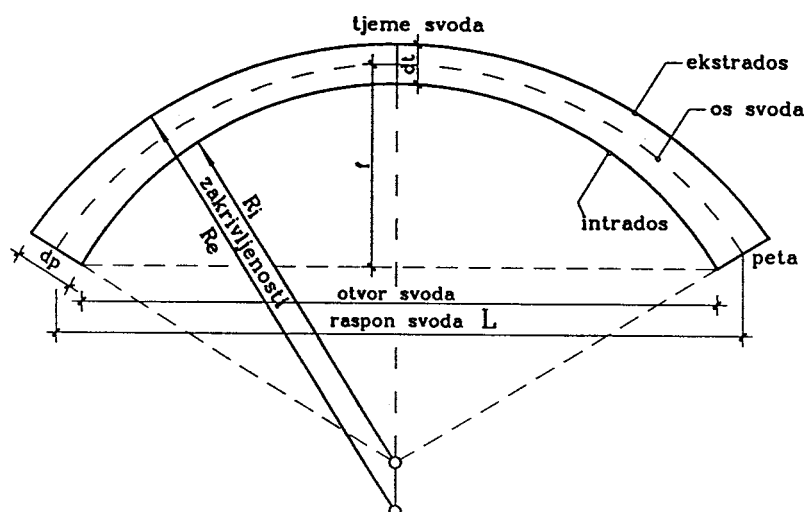
5.1. Opći pojmovi

Vanjsko opterećenje u grednim nosačima izaziva moment savijanja. U nosaču se formiraju tlačna i vlačna zona, da bi se opterećenje predalo na tlo putem reakcija na osloncima. Vertikalno opterećenje na gredni nosač rezultira vertikalnim reakcijama. Ukoliko gredu zakrivimo u konveksan oblik, formirajući tako luk ili svod, u njoj nastaje tlačna sila, kojoj se odupiru vertikalne i horizontalne reakcije na osloncima. Oblikovanjem lučnog nosača postiže se prijenos vanjskog vertikalnog opterećenja pretežno tlačnom silom. Momenti savijanja se smanjuju, a u idealnom slučaju čak iščezavaju (slika 1).



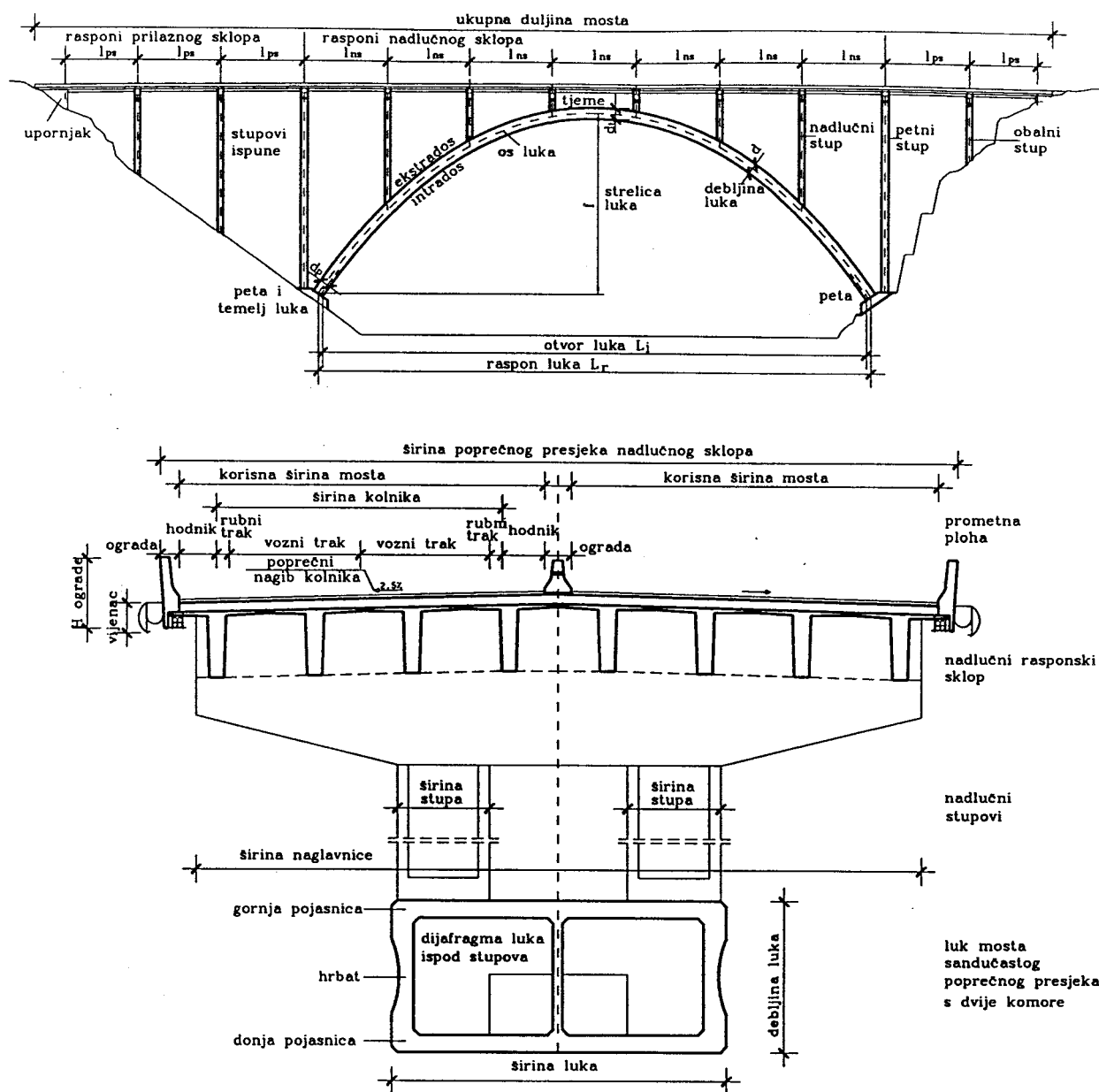
Slika 1. Raspored naprezanja po visini presjeka nosača. a) U idealnom slučaju luk je opterećen centričnom tlačnom silom (1), no u stvarnosti ona djeluje ekscentrično (2). b) Isto vanjsko opterećenje u grednom nosaču izaziva moment savijanja, dakle, tlačna i vlačna naprezanja.

Dio svoda uz oslonce naziva se peta svoda, dok je njegov predio oko najviše točke tjeme svoda. Visinska razlika između pete i tjemena svoda naziva se strelica svoda (slika 2). Intrados je linija donjeg ruba svoda, dok je ekstrados linija gornjeg ruba svoda. Raspon svoda (L) je horizontalni razmak središta ležajnih ploha, dok je otvor svoda horizontalni razmak između točaka intradosa. Bitan parametar kod promatranja svodova je spljoštenost ili plitkost, predstavljena omjerom strelice prema rasponu (f/L).



Slika 2. Osnovni dijelovi svoda.

Lučni most se, osim glavnog nosača, sastoji i od niza ostalih dijelova, koji su prikazani na slici 3. U slučaju kada se sekundarna konstrukcija, koja nosi kolnik, nalazi nad lukom nazivamo je nadlučni sklop. Općeniti naziv za ove dijelove je pomost.



Slika 3. Pojmovi vezani uz suvremeni lučni most s kolnikom gore.

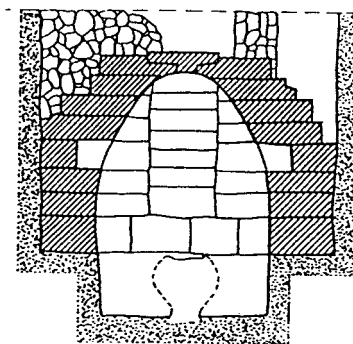
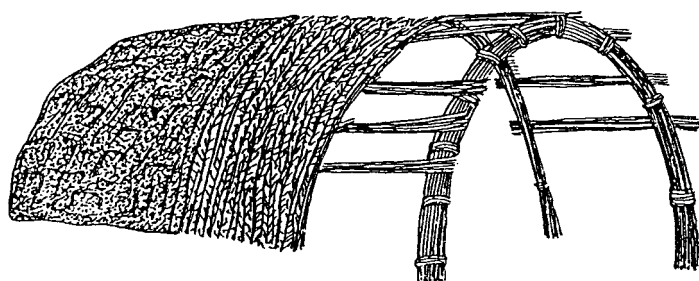
5.2. Povijesni razvitak

5.2.1 Prvi svodovi

Povijesni razvitak lučnih mostova vrijedan je prikaza jer se radi o jednom od najstarijih sustava za savladavanje većih raspona. Kroz najveći dio povijesti civilizacije svod je bio glavni način trajnog premoštenja neke prepreke. Svi ostali sustavi znatno su mlađi. Iskustva koja su prikupljena tisućljetnim građenjem lukova nisu eksplicitno sadržana u suvremenoj tehničkoj znanosti, teorijskim raspravama i pogotovo u računalnim programima. Suvremene građevine u koje su

kritički utkana iskustva prošlih naraštaja mogu postati samo bolje, jer i današnja razina znanja još sadrži mnogo zanatskih pravila koje je teško nadomjestiti matematičkim modelima.

Prvi lukovi i svodovi vjerojatno su nastali na tradiciji građenja blatom i trskom. Svežnjevi od trščanih stabljika bili su prvo gradivo za kuće u delti Eufrata i Tigrisa. Drevni graditelji su ih slagali u pravokutne okvire, ili zabijali, a potom savijali jednog prema drugom, povezujući ih u primitivan luk. Nizovi lukova povezivani su vodoravnim snopovima u okvir nalik na svod, koji je potom bio oblijepljen blatom. Obzirom da je povremeno bilo potrebno obnoviti pokrov, blatne su ploče s vremenom postajale sve deblje. Neke ovakve kuće izgorjele bi u čestim požarima, nakon kojih bi stvrdnuto blato ostajalo stajati i bez trščanog okvira. U gradu Uru su ispod slojeva mulja, zaostalog nakon Potopa, nađeni ulomci nagorjelih glinenih ploča koje s jedne strane nose otiske trske, pa se može pretpostaviti da su prvi svodovi načinjeni pri kraju kamenog doba, 4000 p.K., i to izvedbom “na mjestu”. Iz istog razdoblja potječu i prve opeke, pa se pretpostavlja da su prvi svodovi također građeni na trščanoj oplati, a polagači opeka morali su usvojiti načelo radijalnog slaganja. Prvi nađeni opečni svodovi su sagrađeni oko 3000 g. p.K.



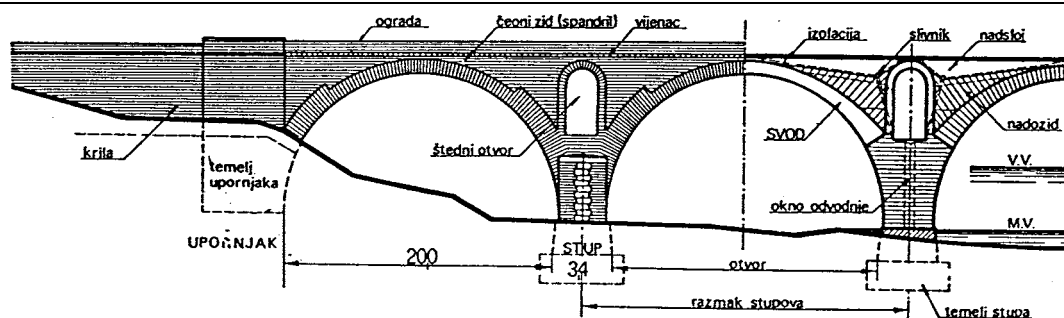
Slika 3. Rekonstrukcija prvog svoda na trščanim okvirima i nacrt drevnog kamenog konzolnog svoda.

Neki pretpostavljaju da su primitivne kulture preuzele ideju svoda iz prirode – kopiranjem kamenih lukova nastalih erozivnim procesima. Ovakvi prirodni fenomeni, koji oblikom podsjećaju na lukove nađeni su širom svijeta, no njihovo povezivanje s nizom radijalno složenih klesanaca predstavljalo bi prevelik skok u razvoju graditeljskih oblika. Sumerski graditelji su za veće raspone radije koristili konzolni svod, građen na skeli, od slojeva kamena međusobno povezanih bitumenskim vezivom, gdje je svaki slijedeći malo istaknut u odnosu na prethodni (slika 3). Nađeni su ovakvi svodovi raspona do 3,6 m.

Prvi svodeni mostovi su mnogo mlađi i danas im je teško odrediti pravu starost. Postoje građevine u Maloj Aziji i graničnom području između Irana i Iraka koje vjerojatno potječu iz predantičkog razdoblja, no sustavni razvitak građenja mostova vezan je uz mrežu planski građenih cesta, što su prvi ostvarili stari Rimljani.

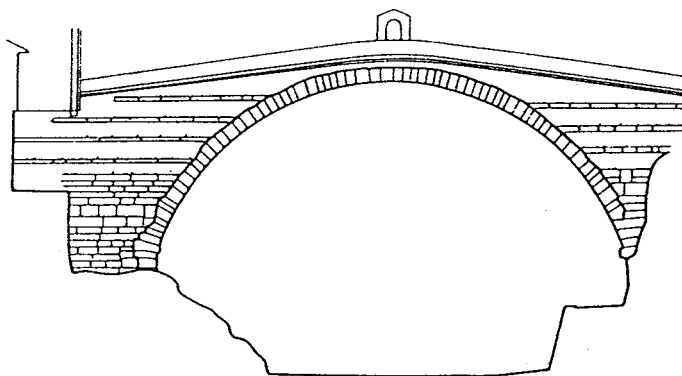
5.2.2 Mostovi starog Rima

Premda svod nije njihov izum, Rimljani su bili prvi europski (a vjerojatno i svjetski) graditelji koji su u punoj mjeri koristili značajke i prednosti luka, svoda i kupole. Do danas je sačuvano preko 400 starorimskih kamenih svodenih mostova koji se pouzdano mogu datirati iz razdoblja dugog oko 400 godina: od 174. g. p.K. pa do 260. g. po.K. Među njima su i tri akvadukta vodovoda Dioklecijanove palače, na prilazu Splitu. Mnogi od ovih mostova još služe svrsi, čak i teškom cestovnom prometu.



Slika 4. Dijelovi klasičnog svodenog mosta.

Najveći broj sačuvanih starorimskih mostova ima polukružni luk, no postoje i mostovi segmentnog intradosa. Najplići rimski luk ostvaruje sploštenost $f/l=0,19$. Kod većine mostova odnos debljine svoda i raspona se kreće između $1/10$ i $1/20$, a najdeblji svod sastoji se od klesanaca visokih 1,9 m. Izvođeni su i dvostruki svodovi. Visina nadsloja u tjemenu mosta uglavnom je bila minimalna (manja od debljine svoda). Uvriježena debljina stupova Rimskih mostova iznosila je oko $1/3$ raspona (ovo je gotovo pravilo za mostove do 10 m raspona). Najdeblji stupovi dostižu debljinu od oko $1/2$ raspona, dok su najvitkiji izvedeni u debljini od $1/5$ raspona. Najviši stupovi dosežu oko 40 m. Među mostovima koji su sačuvani, 70% ima raspon manji od 12,5 m, a 90% raspon manji od 21 m. Rekordni starorimski raspon svoda, od 35,6 m (slika 5), ostvaren je na jednom segmentnom mostu u sjevernoj Italiji.

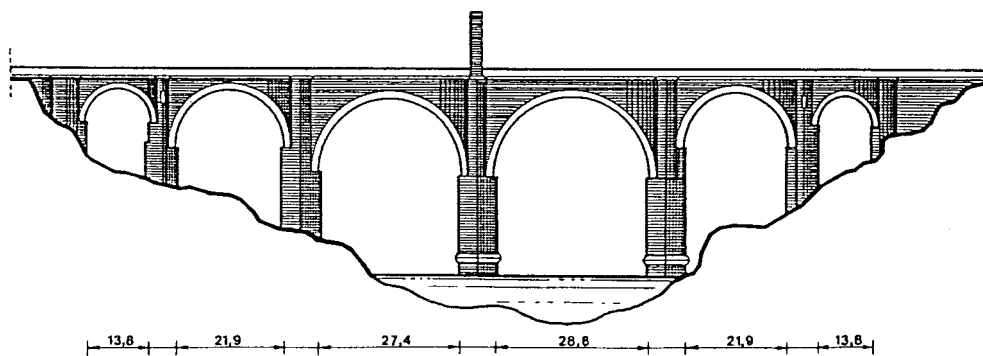


Slika 5. Pogled na most Svetog Martina, rekordan po veličini raspona među starorimskim ostvarenjima.

Rimskim graditeljima nije nedostajalo ideja, poznavali su graditeljske principe i vještine, a glavna ograničenja proizlazila su iz nedostatka izvora mehaničke snage i vrlo ograničene uporabe tvrdih metala. Rimljani su poznavali i prije uvriježena gradiva: kamen, drvo i opeku, pridodavši im novo gradivo - beton. Klesanci lukova obrađivani su i slagani tako da dosjedaju jedan uz drugog, dakle bez veziva, vjerojatno zbog poteškoća uslijed mogućih deformacija kod otpuštanja skele. Umijeće izrade vapnenog morta preuzeli su od Grka i usavršili. Od metala su izrađivali samo spajala, a olovo u sljubnicama korišteno je vrlo rijetko i štedljivo. Bogato iskustvo gradnje drvetom koristili su pri izvedbi skela. Svodovi složeni od usporednih prstenova svjedoče o racionalnoj uporabi skele, koja se mogla više puta premjestiti u jednom otvoru. Nosivost rimskih dizalica na ljudski pogon procijenjena je na preko 6 tona uz dohvat veći od 13 m.

Za razliku od kasnije građenih mostova sa zemljanom ispunom, rimski su uglavnom imali betonsku ispunu, koja je znatno pridonijela njihovoj začuđujućoj trajnosti. Rimski beton spravljan je tako što je prvo načinjen mort od grubih komada pucolana i vode, kojim su potom prelijevani unaprijed složeni komadi krupnog kamena (agregata), a kod gradnje mostova je korišten samo u ispuni, a nikada izložen.

Rimski graditelji poznavali su više načina temeljenja mostova. Pored plitkih temelja na čvrstom tlu, radili su temelje na kratkim zabijenim drvenim pilotima, a za podvodne temelje koristili su zaštitu drvenih zagata s glinenom ispunom ili su potapali sanduke s kamenom ispunom. Stup, ali i petni dio polukružnog luka izveli bi bez skele. Nakon toga izvodili su preostali dio svoda na drvenoj skeli. Koristili su jednu ili dvije skele, koje su po dovršenju jednog svoda premještane u drugi. Kamene istake pri petnim dijelovima preostalih svodova, kao i namjerno ostavljene udubine upućuju na to da se skela barem dijelom oslanjala na već ranije izvedene dijelove mosta. Otpuštanje skele vršilo se izbijanjem klinova, nakon čega je ona rastavljena i dio po dio prenošena u naredno polje.

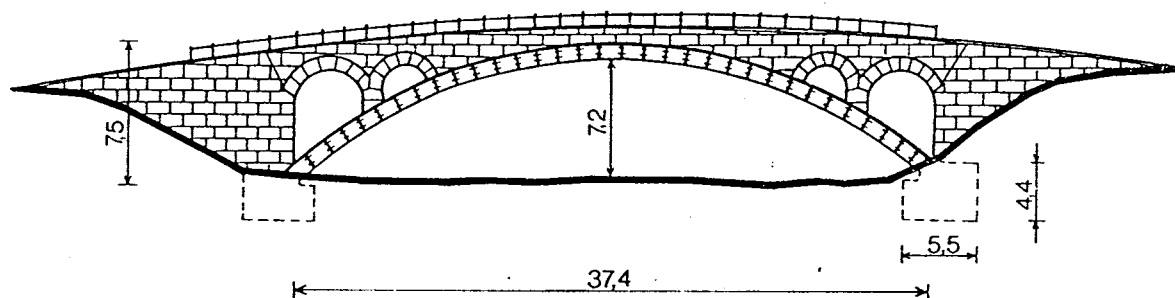


Slika 6. Pogled na starorimski most preko rijeke Taho u Alcantri, Španjolska.

Uz most najvećeg raspona treba spomenuti najdulji lučni most – Puente Romano u Meridi (Španjolska) preko 62 raspona, ukupne duljine 755 m, te najviši most – Pont du Gard, visine 47,8 m. Zanimljivo je da je najveći raspon rimskog mosta, od 35,6 m, držao rekord na tlu Europe sve do izvedbe maurskog mosta u Malabadiju, 1150. g., a premašen je tek 1204., kada je u Bernu sazidan svod raspona 45 m. Starorimski graditelji bili su sposobni preuzeti, razraditi i unaprijediti postojeća saznanja (upošljavanjem obrazovanih Grka), poboljšati ih vlastitim izvornim doprinosima (beton) i sagraditi mostove koji spadaju među najuspješnije i najtrajnije građevine naše civilizacije (slika 6).

5.2.3 Razdoblje do 18. stoljeća

Na području Europe srednji vijek, od pada Zapadnog Rimskog carstva 476. g.po.K., uistinu predstavlja mračno razdoblje, iz kojeg nemamo mnogo podataka o mostogradnji, niti očuvanih građevina koje bi starorimske mostove povezivale s prvom građevinom srednjevjekovnog graditelja koja se s njima može mjeriti - mostom u Avignonu, dovršenim oko 1185. Ipak, vjerojatno je da je vještina očuvana u zemljama Bliskog i Srednjeg istoka, šireći se karavanskim putevima do Dalekog istoka. Najstariji zapisi o lučnim mostovima sagrađenim u Kini su iz 2. i 3. stoljeća po.K., a sačuvani su ostaci više građevina iz 5. stoljeća. Prva značajna sačuvana građevina je segmentni lučni most raspona 37,4 m, iz 600-te godine, koji je za ono vrijeme bio vrlo smiona i originalna konstrukcija (slika 7). Pored znatne sploštenosti (0,192) segmentnog luka, treba uočiti i štedne otvore nad lukom. Starorimski mostovi su imali štedne otvore samo nad stupovima, a nad lukom se oni u Europi javljaju tek u 14. st. Na nekim starim kineskim mostovima uočljivi su tanki stupovi, koji nisu mogli podnijeti jednostrani potisak svoda.

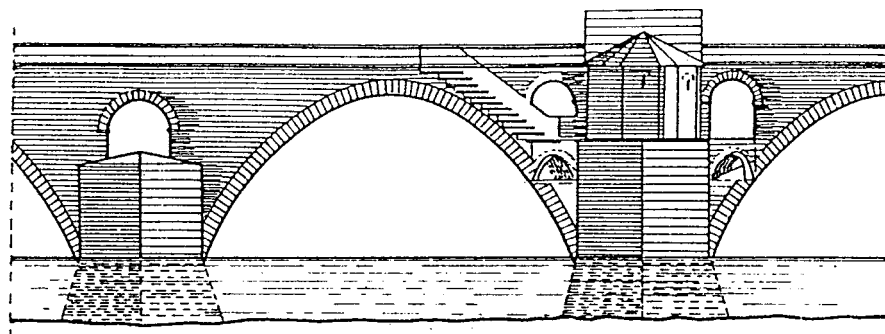


Slika 7. Most An-Chi preko rijeke Chiao, provincija Hopei, Kina, sagrađen 605. – 617. g.

Tradiciju starorimskog graditeljstva održalo je Istočno Rimsko carstvo, čije razdoblje završava padom Carigrada u ruke Turaka 1453. Sačuvani mostovi u Turskoj i na Srednjem istoku upućuju na mogućnost manje ili više kontinuiranog održavanja zanata do vremena kada su ga Arapi i Turci bili spremni preuzeti. Uz prodor Turaka vezana je uporaba šiljatog luka u europskoj mostogradnji (neki ga zovu Maurskim ili Gotičkim). Nadolazeće arapske kulture preuzele su i usavršile starorimsko umijeće gradnje mostova, dodavši izvorne elemente.

Smatra se da se povijest mostogradnje u Europi nakon pada Zapadnog rimskog carstva nastavlja mostom u Avignonu, građenim 1177. – 1185. g. Zapravo, u više srednjovjekovnih gradova u relativno kratkom razdoblju od polovice do kraja 12 stoljeća započinje gradnja velikih lučnih mostova (preko Maine u Wurzburgu, Dunava u Regensburgu, Temze u Londonu i Elbe u Drezdenu). U više država tadašnje Europe u 12. stoljeću su djelovala benediktinska redovnička bratstva koja su se bavila gradnjom i održavanjem cesta mostova, izvorno u cilju olakšavanja hodočašća. Osim znanja, fragmentarno sačuvanih u samostanima još od starorimskog razdoblja, dodatni poticaj izgradnji čvrstih prijelaza dali su Križarski ratovi, tijekom kojih je velik broj Europljana imao se prilike upoznati s dometima orijentalnog graditeljstva.

Graditelj mosta u Avignonu – Johan Benezet (St. Benoit) dobro je poznao starorimsko graditeljstvo. Njegov most (slika 8) ima raspone od 20 do 35 m, ukupna duljina iznosila je oko 600 m, širina 4,9 m. Koristio je, ali i unaprijedio neke starorimske elemente, kao što su trokutasti leđobrani oko stupova. Širina stupova iznosi oko četvrtinu najmanjeg svijetlog otvora. No, pravi izvorni doprinos ostvaren na ovom mostu očituje se u oblikovanju svoda: radi se o krivulji sastavljenoj od tri kružna odsječka s tri različita središta, kakva do tada nije korištena, a koju možemo ocijeniti povoljnijom od dotadašnjih polukružnih ili segmentnih lukova.



Slika 8. Pogled na most u Avignonu. Do danas su sačuvana 4 raspona.

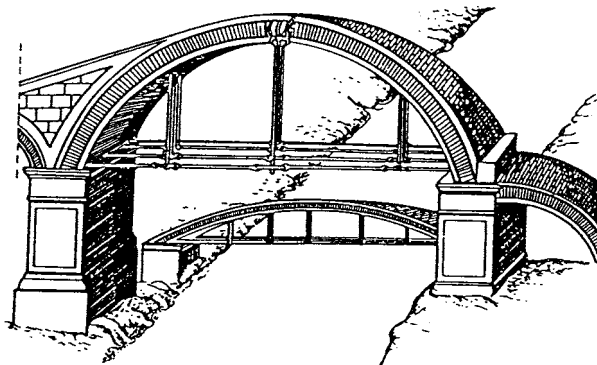
Srednjovjekovni svod najvećeg raspona bio je sagrađen u Italiji, u Trezzu, preko rijeke Ada, 1377. godine. Luk visine strelice 21 m imao je raspon od 72 m, a bio je izveden od samo jednog sloja klesanaca. Most je srušen već 1416. Mostovi očuvani u Švicarskoj i sjevernoj Italiji daju naslutiti da je oprez srednjovjekovnog graditelja kod ostvarivanja većih raspona bio više uvjetovan problemima s temeljenjem negoli nepoznavanjem zanatskih pretpostavki premoštenja većeg raspona. Od iznimnih ostvarenja, očuvanih do danas, još treba spomenuti Karlov most u Pragu, dug 500 m i 10 m širok, građen od 1357. do 1503., Pont Valentre, građen od 1308. do 1355. u Cahorsu, u Francuskoj, sa zašiljenim svodovima, potom most preko rijeke Arno u Firenci, čuveni Ponte Vecchio, sagrađen 1345. Ovaj posljednji se sastoji od tri plitka segmentna luka s rasponima od 27 do 30 m, i sploštenošću od 0,20. Stupovi su tek nešto širi od 6 m, što oblikovanje mosta čini za ono vrijeme radikalnim, pa se smatra da ova građevina, zajedno s mostom Scaligero na rijeci Adige u Veroni naviješta renesansu. Most Scagliero, poznat i kao Ponte del Castelvecchio, preko tri raspona, od kojih je najveći 48 m, građen je oko 1355.

Srednjovjekovni svodovi mostova (kao i starorimski) oblikovani su tako da mogu stajati samostalno, odnosno svaki za sebe, premda su istodobno građeni svodovi gotičkih katedrala koji nisu mogli stajati bez vanjskih potpornja (kontrafora, lebdećih upornjaka). Pretpostavlja se da je razlog tome bio vojne naravi: u slučaju rušenja jednog svoda, bilo je bitno da drugi ostanu stajati zbog lakše obnove. Osnovno obilježje gotičkih kupola očituje se u koncentraciji težine i potiska u pojedine točke oslonca, kako bi prostor katedrale primio više svjetlosti. Ovaj princip nije primjenjivan kod mostova koji se oslanjaju na masivne stupove. Zbog toga, zbog već opisanih problema s temeljenjem i zbog nemogućnosti procjene sila i naprežanja u elementima građevine, izvođeni su vrlo masivni stupovi. Širina stupova u uzdužnom smislu upućuje na nesigurnost oko mogućnosti preuzimanja potiska, tako da varira, ovisno od osjećaja graditelja, između $1/4$ i $2/3$ pripadnog svijetlog otvora. Rasponi srednjovjekovnih svodova većih mostova varirali su od 12 do 22 metra, uz rijetke iznimke. Kod oblikovanja linije svoda prevladava polukružni luk, no osim njega građeni su segmentni i bačvasti svodovi, a na nekim građevinama i svod ojačan rebrima, što predstavlja novinu u gradnji mostova, vjerojatno preuzetu iz crkvenog graditeljstva. Šiljati lukovi s dva ili tri središta zakrivljenosti, imaju prednost pred polukružnima u manjem opterećenju na skelu tijekom gradnje.

U obradi kamena srednjovjekovni graditelji ne dosežu preciznost starorimskih uzora, niti njihovu monumentalnost kod slaganja svodova. Koriste se manji i slabije obrađeni klesanci, a nepreciznosti se kod slaganja kompenziraju mortom. Druge građevine (katedrale) iz istog doba upućuju da se ne radi o nedostatku zanatske vještine, već prije o utjecaju općih društvenih okolnosti. Primjetna je težnja uporabe ljepših, jednolikijih i bolje oblikovanih klesanaca u vidljivom dijelu svoda, dok su se za unutarnji dio koristio lošiji i lošije oblikovan kamen. Za razliku od Rimljana, srednjovjekovni graditelji uvriježeno su koristili vapneni mort. Problem njegove nepostojanosti i varijacija u kakvoći bio im je poznat, pa je ostalo zabilježeno da su ga pokušavali popraviti dodacima (nisu poznavali svojstva prirodnog cementa). Većeg napretka na području temeljenja od rimskog doba nije bilo.

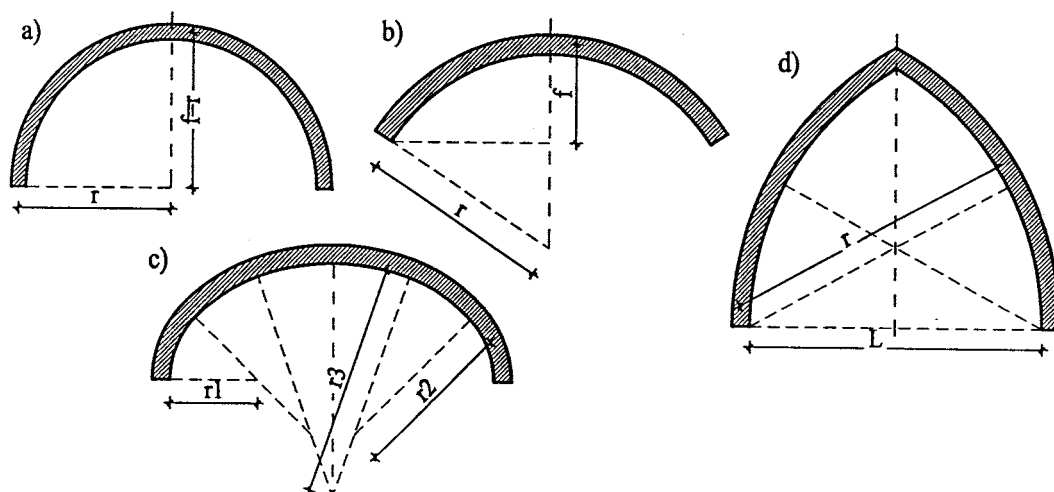
Tijekom renesanse, koja je začeta u Italiji u 15. st., mijenjaju se svjetonazori Europljana, a znanost i umjetnost doživljavaju procvat. Ako se svodeni mostovi promatraju s motrišta arhitektonskog oblikovanja, a posebno dekorativnih elemenata, renesansna obilježja mogu se razlučiti od srednjovjekovnih. Međutim, s tehničkog motrišta u građenju mostova nema vidljive prijelomnice u značajkama. Poboljšanja u oblikovnom smislu i povećanje raspona i smjelosti lukova obilježena su pojedinim iskoracima značajnih graditelja. Polagani napredak zanatskog građenja nastavlja se do početka 18. stoljeća, a neke smione ideje na području mostogradnje biti će realizirane stoljećima kasnije. U radovima Leonarda da Vincija po prvi puta je formulirana spoznaja da je veličina potiska

luka ovisna o obliku svoda. Među znanstvenim vizionarima renesanse ističe se Faust Vrančić, u povijesti graditeljstva znamenit po prvim skicama izvedivih zavješanih mostova (slika 9). Manje je poznato da je u svom djelu predvidio i lučne mostove s preuzetim potiskom.



Slika 9) Jedan od mostova Fausta Vrančića iz knjige "Machinae Novae", iz 1615. Ideja preuzimanja potiska željeznim zategama bila je znatno ispred svog vremena.

U doba renesanse završava razdoblje dominacije polukružnog luka i zašiljenog gotičkog luka. Pojava sve pliće lukova je najprimjetnija kroz 16 st., dok u 17 st. započinje razdoblje istinske dominacije segmentnog luka, te razvitak ostalih oblika, prikazanih na slici 10.

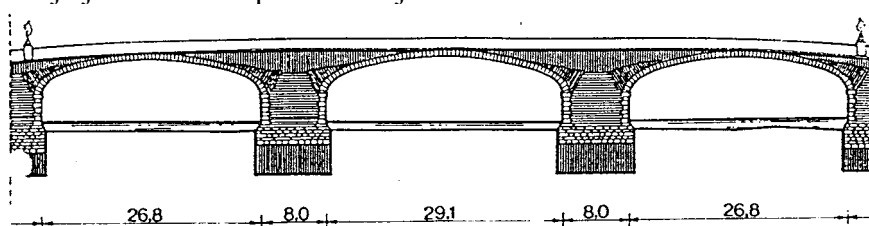


Slika 10) Oblici osi svoda ili luka klasičnih mostova. a) polukružni svod b) segmentni svod (kružni isječak) c) košarasti svod, s tri središta zakrivljenosti d) gotički ili šiljati svod, s dva središta zakrivljenosti.

Empirijska pravila konstruiranja lučnih mostova, prema kojima se izmjere mosta određuju u odnosu na njegovu težinu ili visinu, formulirao je u svojoj knjizi talijanski graditelj Alberti, oko 1450. Ovdje su po prvi puta izmjere određene na temelju opterećenja, što prethodi dimenzioniranju kakvo poznajemo. Među znanstvene doprinose renesanse ubraja se i konstruktivni princip rešetke, bitan za skele lukova.

Jedan od najljepših i najpoznatijih mostova ovog doba je most Rialto, preko kanala Grande u Veneciji, no pravi doprinos najzamjetniji je na mostu preko Arna u Firenci, zvanom Santa Trinita (slika 11), kojeg je izvorno sagradio Bartolommeo Ammanati 1567. do 1570. Obris svoda prati lančanicu – krivulju opisanu funkcijom kosinusa hiperbolnog. Amanati je os svoda izveo preokrenuvši krivulju provješene lanca, nakon što je zaključio da takav oblik jamči povoljnu razdiobu unutarnjih sila u svodu. Sploštenost mosta iznosi 1:8, ili 0,125, vrijednost koja predstavlja

velik iskorak u odnosu na do tada ostvarene. Tek 1921. je analitičkim putem potvrđeno da obrnuta lančanica predstavlja jedan način optimalizacije oblika svoda.



Slika 11) Uzdužni presjek mosta Santa Trinita, Firenca 1570.

Most najvećeg raspona iz ovog razdoblja sagrađen je u Francuskoj, svod Vieille-Brioude iz 1479. imao je otvor od 54,26 m. Osim njega treba spomenuti pariški most preko Seine, Pont Neuf, iz 1606., nedaleko kojeg stoji i most Pont Royal, sa svodom s tri središta zakrivljenosti. Most preko Garrone u Toulouseu, sagrađen 1632., ima košaraste svodove od opeke s najvećim rasponom 34,4 m.

Graditelji Otomanskog carstva također ostvaruju značajna djela, no nisu uključeni u razvitak koji je vodio formiranju građevinarstva na znanstvenoj osnovi te pri kraju razdoblja znatno zaostaju. Među turskim ostvarenjima ovog doba najznačajniji je Hajrudinov most u Mostaru, sagrađen 1556., s rasponom 27,3 m, presvođenim šiljatim lukom visine 19 m.

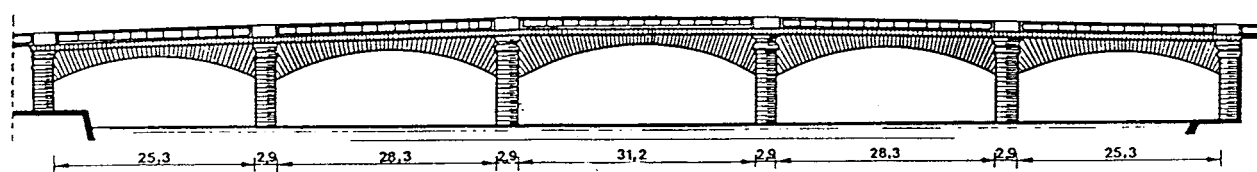
5.2.4 Razvitak do početka 20. stoljeća

Novo razdoblje u građenju lučnih mostova nastupa nakon što su u 17. stoljeću objavljena fundamentalna djela tehničke mehanike i nakon što je u Parizu osnovana vladina ustanova za poticanje razvitka građevinarstva, Corps des ponts et Chaussees. 1716. je u Parizu osnovana i institucija Ingenieurs des Ponts et Chaussees, koja je imala zadatak da svoju djelatnost posveti isključivo gradnji mostova i cesta te da ju potpuno odvoji od arhitekture. Time je gradnja mostova postala samostalna profesija i to ne više samo zanatska vještina, već inženjerska znanost. Od tog vremena (početak 18. stoljeća) građevinske konstrukcije se sustavno proračunavaju. Prva znanstvena primjena statike na analizu svođenih sklopova nalazi u knjizi izdanoj 1695. u kojoj je kod iznalaženja unutarnjih sila u luku – nosaču dominantno opterećenom tlačnom silom prvi put primijenjen verižni poligon.

Prvi predavač i upravitelj Ecole des ponts et Chaussees, Jean Perronet bio je graditelj trinaest neobično smionih i lijepih mostova te veliki inovator, među čije doprinose ubrajamo:

- proučavanje i primjenu košarastih lukova, čime je povećana sploštenost i dodatno oslobođen protjecajni profil
- uvođenje uskih stupova, širine $1/9$ do $1/12$ pripadnog raspona, u odnosu na uvriježenih $1/5$. Ovakvi stupovi ne mogu prenijeti jednostrani potisak svoda, već preuzimaju samo razliku potiska susjednih raspona
- razdvajanje masivnog stupišta na dva odvojena stupa, koji podupiru svod rastavljen u rebra

Među njegovim ostvarenjima ističe se most Neuilly, sagrađen 1773. s pet košarastih lukova otvora po 39 m i strelice 9 m, (sploštenost 0,23), debljine stupova 4.3 m, što iznosi $1/9$ otvora. Valja, također, spomenuti njegove mostove Nemour, gdje je sploštenost $1/15$, Sainte-Maxence, sploštenosti $1/10$, La Concorde sa $1/8$ (slika 12).



Slika 12. Perronet-ov most Pont de la Concorde, Pariz 1790.

Novi doprinosi donijeli su sa sobom i neke neželjene posljedice: na Perronet-ovim mostovima zabilježeno je značajno slijeganje nakon otpuštanja skele, u veličini od oko $1/72$ raspona.

Industrijska revolucija donijela je masovnu proizvodnju lijevanog željeza od kojeg je izrađen prvi metalni most 1779. godine i to lučni most preko rijeke Severn u Coalbrookdalu (Velika Britanija), raspona 30.0 m.

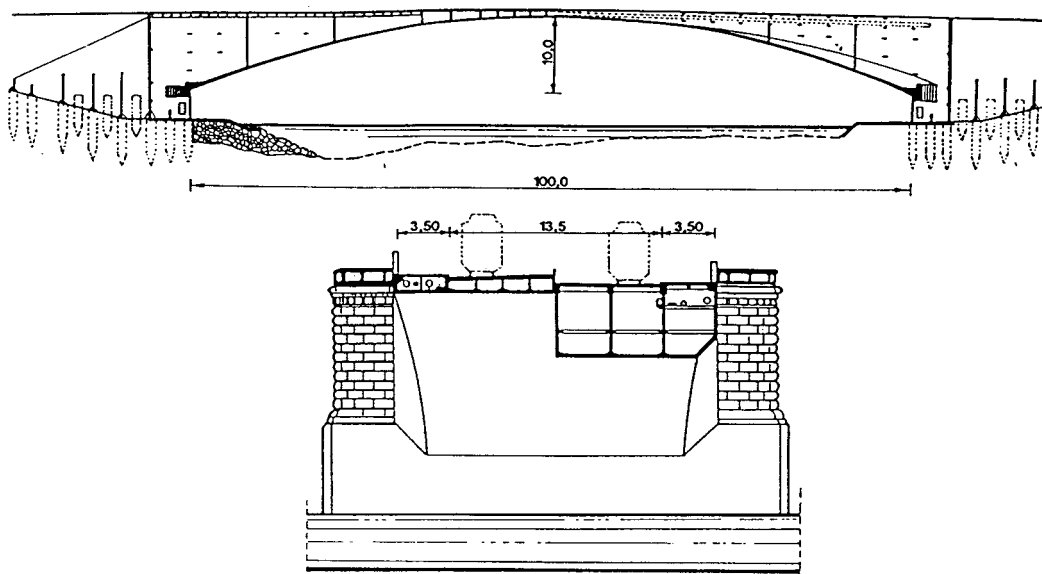
Širenje željezničke mreže u Europi zahtijevalo je gradnju mnogobrojnih mostova većih raspona (zbog ograničenja na vođenje trase) i nosivosti (prometno opterećenje znatno više utječe na izmjere mosta). Naglo se mijenja odnos vlastite težine prema prometnom opterećenju. Budući da je za naponska stanja u svodovima povoljno da je prometno opterećenje malo prema stalnom, potaknuta su nova istraživanja, na osnovi kojih su popravljene postojeće i razvijene nove teorije koje i danas koristimo. Razvijene su i nove tehnike temeljenja, među kojima osobit značaj ima temeljenje u kesonima pod pritiskom.

Početak 19. stoljeća obilježen je početkom znanstvenih istraživanja i komercijalne izrade hidrauličkih veziva. Proizvodnja Portland cementa započela je 1844. u Engleskoj. Pomoću novog veziva mogli su se za kamene svodove koristiti sve manji i lošije obrađeni komadi (u jednom svodu rekordnog raspona beton čini 40% zapremine). Međutim, jedno od najvećih otkrića, na kojem se temelji razvitak masivnih konstrukcija XX. stoljeća, je armirani beton, kojeg su otkrili Francuzi Lambot i Monier (1867.) Beton i armirani beton dokinuli su izvedbu velikih kamenih lučnih mostova u prvoj polovici XX. stoljeća.

5.2.5 Prvih 50 godina betonskih lukova

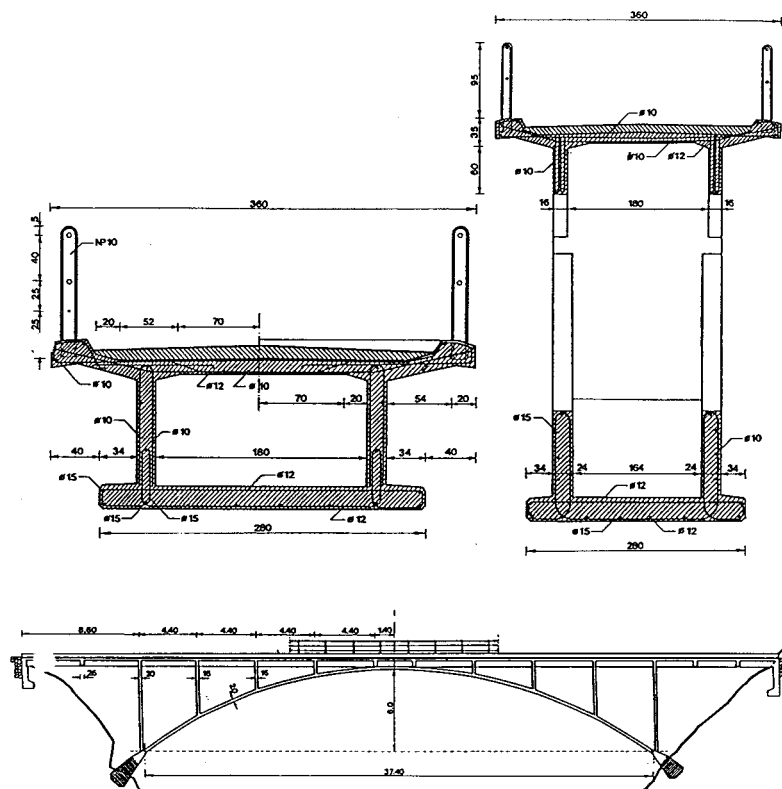
Gradnja prvih betonskih mostova (1875.) dala je naslutiti velik potencijal ovog gradiva za izvedbu svodova i lukova, no pokušaji izvedbe većih objekata ukazali su na znatne nepoznanice i probleme proistekle iz nedovoljnog poznavanja značajki betona, konkretno, dugotrajnih pojava puzanja i skupljanja. Početak dvadesetog stoljeća je obilježen djelovanjem trojice velikih graditelja. Francois Hennebique (1842. – 1921.), Robert Maillart (1872. – 1940.) i konačno Eugene Freyssinet (1879. – 1962.) otkrivaju i razrađuju oblike lukova i svodova primjerene armiranom betonu.

Francois Hennebique je među prvima spoznao osnovne značajke armiranog betona i razvio sklopove prilagođene novom gradivu. Njegov prvi značajan lučni armiranobetonski most, gdje su elementi sklopa konstruktivno i statički raščlanjeni izveden je 1900. u Francuskoj, u mjestu Châtellerault. Hennebique je povezao tlačnu kolničku ploču s lučnim nosačima u monolitnu rebrastu konstrukciju. Sagrađio je preko 100 mostova među kojima se ističe “Risorgimento”, most preko Tibra u Rimu (slika 13.), s tada rekordnim otvorom. Sklop se sastoji od donje pojasne ploče, svodenog oblika, punih vertikalnih uzdužnih zidova i kolničke ploče.



Slika 13. Uzdužni i poprečni presjek rimskog mosta Risorgimento, iz 1911. g.

Robert Maillart je doprinio konstruktivnom oblikovanju armiranobetonskih lučnih mostova gradeći od plošnih elemenata - ploča i stijena - cjelovite prostorne konstrukcije. Razvio je izvorni sustav koji se sastoji od trozglobnog luka izvedenog od lučnih diskova, koji se u blizini tjemena stapaju s rebrastim nadlučnim sklopom u jedinstven sandučasti presjek. Drugi Maillartov pronalazak je ukrućeni poligonalni luk, koji prenosi samo tlačne sile, dok kolnički sklop, zajedno sa stupovima, služi za ukrućenje i preuzima na sebe sve momente savijanja. Ideja je ostvarena na mostovima Val Tschiel i Schwandbach (slika 14.).

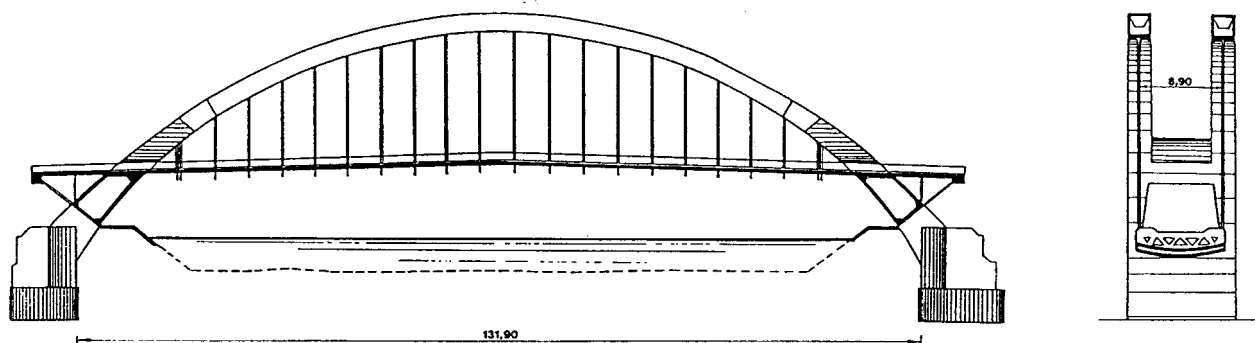


Slika 14. Uzdužni i poprečni presjek Maillartovog mosta Schwandbach, iz 1933. g.

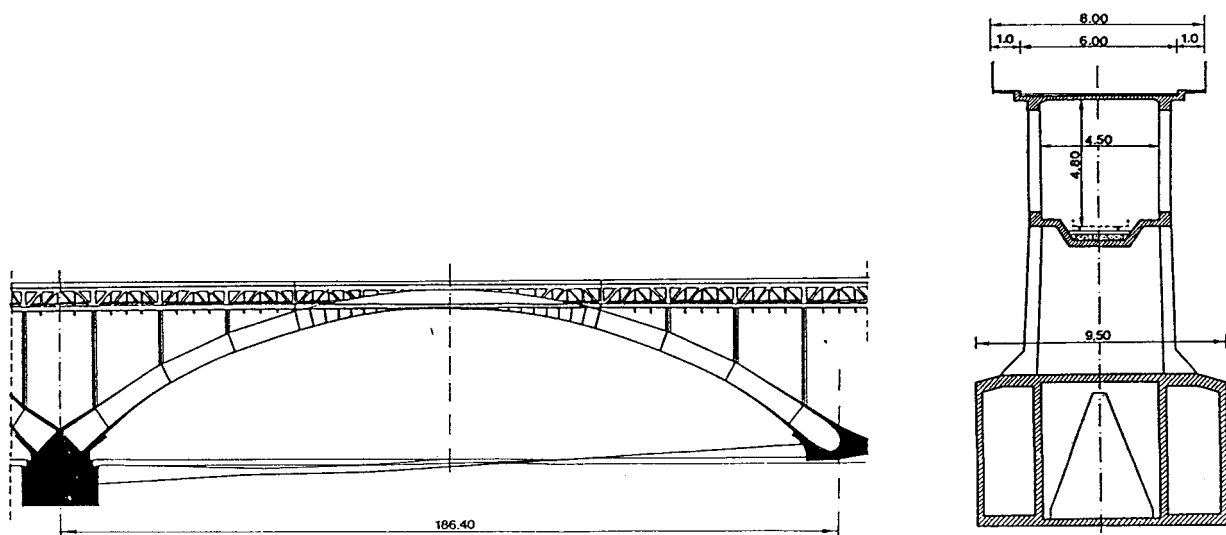
Eugene Freyssinet, po mnogima najveći konstruktor ovog stoljeća, započinje svoje djelovanje projektiranjem i izvedbom nearmiranog betonskog lučnog mosta Le Veudre. Most je sagrađen na klasičnoj skeli, ali ona nije spuštana uvriježenim postupkom, već su lukovi od skele odignuti razupiranjem pomoću hidrauličnih preša postavljenih u tjemenu zglobu. Most je dovršen 1910, da bi već godinu dana kasnije (1911) bilo ustanovljeno spuštanje sklopa u tjemenu, pa su preše ponovno ugrađene i luk iznova odignut. Analizom uzorka spuštanja lukova započinje istraživanje dotada nepoznate pojave puzanja betona, a postupak podizanja lukova sa skele razupiranjem prešama prihvaćaju i drugi konstruktori lukova.

Po Freyssinetovom je projektu 1923. je sagrađen lučni most s preuzetim potiskom (luk sa zategom) preko Seine, po imenu Saint-Pierre du Vauvrey (slika 15), tada rekordnog raspona od 132 m.

Kod Plougastela, preko rijeke Elorn (Francuska), Freyssinet gradi jedan od svojih najznačajnijih mostova (slika 16). Most je dvokatni, tako da se na vrhu sklopa odvija cestovni, a ispod njega željeznički promet.



Slika 15. Uzdužni i poprečni presjek mosta Saint-Pierre-du-Vauvray, glavnog raspona 132 m, iz 1923. g.



Slika 16. Uzdužni i poprečni presjek mosta prijeko rijeke Elorn, iz 1930. g.

1950. – 1953. je Freyssinet izradio je projekte za tri mosta u Venezueli, ostvarivši iskorak u načinu građenja lukova. U to doba drugi sustavi počinju ugrožavati dominaciju lučnih mostova na srednjim

rasponima, zahvaljujući razvitku postupaka izvedbe bez teških i skupih skela. Masivni lučni mostovi još su građeni na drvenim konstrukcijama koje su nerijetko bile složenije od njih samih. Nasuprot tome, konzolna montaža čeličnih rešetki razvijena je još u 19. stoljeću, a tako su izvedeni i neki veliki čelični lukovi. Freyssinet postaje idejni začetnik konzolne gradnje masivnih lukova bez skele oslonjene o tlo, koja je kasnije primijenjena i razrađena kod izgradnje jadranskih lukova, počevši od Šibenskog mosta 1965.

Jedan od pionira armiranog betona – Melan patentirao je konstrukcije s krutom armaturom, izvedenom od rešetkastih nosača. Samonosivi armaturni sklop smanjuje ili dokida potrebu za skelom oslonjenom o tlo. Među njegovim izvedbama treba spomenuti jedan trozglobni svod s krutom armaturom raspona 42,4 m i sploštenosti 1/16. Postupak je bio raširen prvih desetljeća XX stoljeća, no nije se održao u nadmetanju s drugim postupcima i gradivima. Iznova se koristi (u doradnom obliku) kod gradnje suvremenih velikih lučnih mostova u Kini, opisanih kasnije.

O. F. Nilsen je 1932. god. konstruirao novi tip lučnog mosta s upuštenim kolnikom. Sustav se sastoji od dva vitka luka povezana s kolničkom konstrukcijom vitkim dijagonalama oblika slova "V". Pri tome u pojedinim kombinacijama opterećenja nose samo vlačne dijagonale, dok su tlačne isključene iz nosivosti. (Ovakav sustav dijagonala je kasnije korišten kod visećih mostova.) Sustav koristi relativno malo građiva zahvaljujući znatnoj krutosti koja je postignuta kosim dijagonalama.

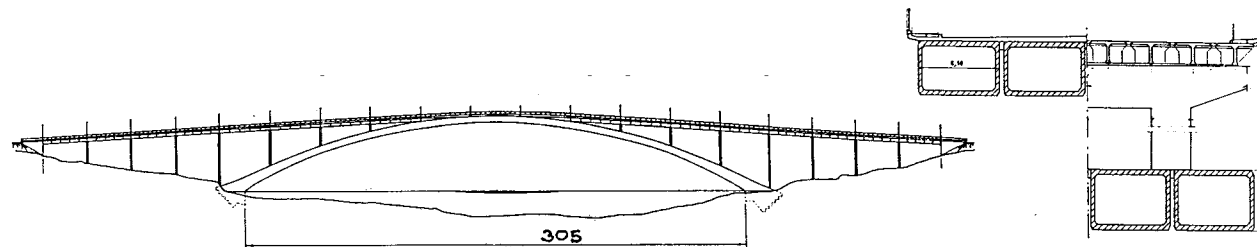
Od teoretskih doprinosa projekatana mostova treba istaknuti studiju o armiranobetonskim lukovima R. Vallette-a iz 1930./31., načinjenu na temelju autorovog proučavanja razvitka pukotina na postojećim mostovima. Pored već od ranije poznatog načina optimiziranja oblika osi luka u smislu smanjenja momenata savijanja, Vallette se bavi iznalaženjem zakona promjene momenta inercije presjeka luka duž osi u cilju dalje redukcije momenata savijanja. Pokazao je da je racionalno izvesti luk stalnog momenta inercije od tjemena do približno četvrtine raspona, s minimalnim momentom inercije približno u desetini raspona od oslonca. Na armiranobetonskom mostu La Roche – Guyon, projektiranom prema Vallette-ovoj teoriji, postignut je vrlo povoljan omjer najvećih vrijednosti momenata savijanja u polju i na upetim osloncima, od svega 1,12. Ovakvim postupkom, odnosno ujednačavanjem momenata podešavanjem presjeka i linije luka, projektirani su i drugi veliki lukovi.

5.3. Oblikovanje i izvedba suvremenih masivnih lukova

Tijekom 20. stoljeća izvedeno je mnogo lučnih mostova različitih sustava, različitim postupcima gradnje. Neki od njih nisu se održali, premda sadrže zanimljiva promišljanja (širi pregled dan je u vrelima 2 i 3). U prvom dijelu ovog poglavlja prikazani su samo mostovi značajnih raspona koji sadrže izvorne inženjerske doprinose na polju konstruiranja ili građenja. Budući da lučni mostovi danas mogu konkurirati drugim sustavima samo uz racionalizaciju izvedbe, to su ovdje svrstani po sličnim izvedbenim postupcima. U drugom dijelu prikazani su neki hrvatski lučni mostovi malih i srednjih raspona.

5.3.1 Izvedbe na skeli

Starije izvedbe mostova na drvenim skelama ovdje nisu prikazane, usprkos tome što su same skele iznimna inženjerska ostvarenja, nerijetko složenija za statičku analizu i izvedbu od samog mosta. Izdvojena su dva mosta velikih raspona, izvedena na različitim skelama, i s različitim udjelom montažnih elemenata: most Gladesville načinjen je najvećim dijelom od montažnih odsječaka na skeli s više oslonaca u prepresi, dok je most Noslach izveden na rešetkastoj skeli sustava Cruciani, oslonjenoj samo na temelje luka.

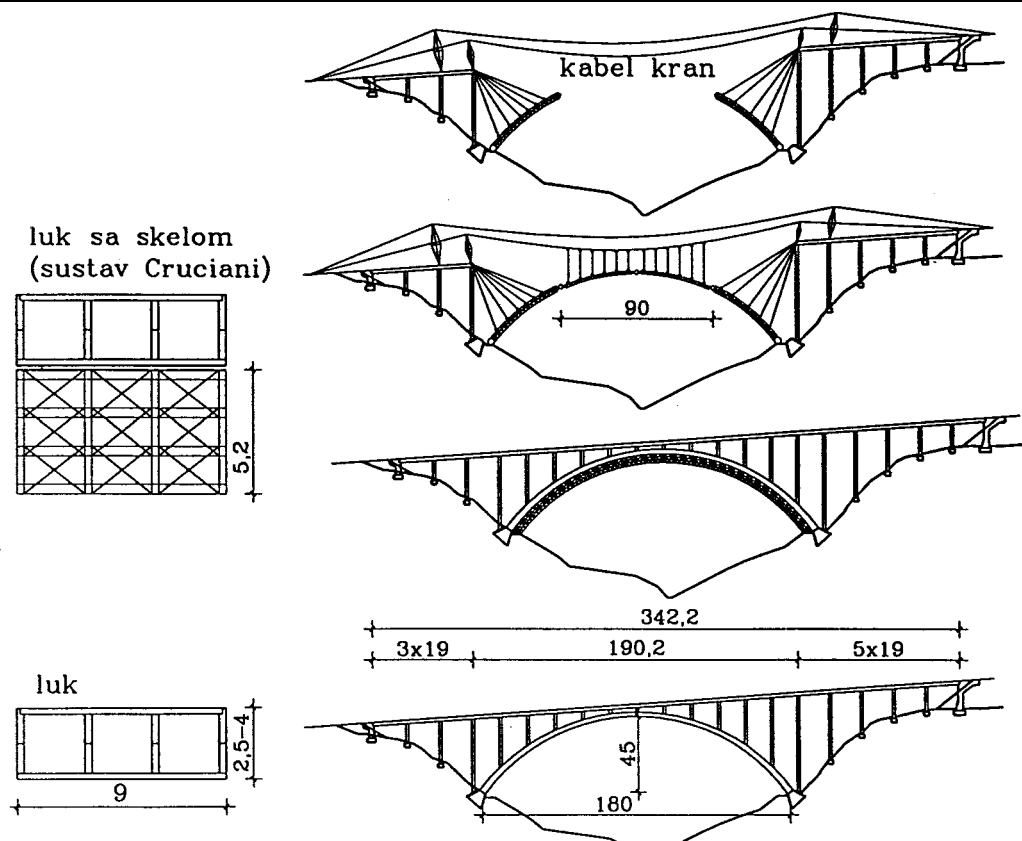


Slika 17. Skica mosta Gladesville, Sydney, iz 1964.

U Sydneyu, Australija, 1964. je dovršen lučni most Gladesville, koji je, s rasponom od 304,8 m držao rekord do dovršenja Krčkog mosta (Slika 17). Luk se sastoji od četiri šuplja usporedna luka, širine po 6,1 m, pravokutnog presjeka promjenjive visine (4,27 do 6,9 m). Tijekom gradnje bili su međusobno razmaknuti za 30 cm, tako da se mogu izvesti jedan po jedan, na istoj skeli. Međuprostor je tek naknadno zapunjen betonom. Uzdužni montažni odsječci lukova su bez uzdužne armature, a spajani su mokrim reškama. Skela je bila čelična, cijevna, a tijekom izvedbe bočno je pomicana četiri puta. Rektifikacija luka i odvajanje od skele izvršeno je razupiranjem prešama smještenim u četvrtinama raspona. Nadlučni sklop izveden je kao roštilj sačinjen od montažnih prednapetih nosača, koji se preko montažne naglavnice oslanjaju na vitke stupove izvedene na mjestu. Nad stupovima je ostvarena protežnost roštilja iz susjednih polja.

Na skelama sustava Cruciani, koji se razvija od 50-ih godina 20. stoljeća, izvedeno je oko 50 lučnih mostova. Osobitost sustava je u korištenju lakih rešetkastih nosača, po dijelovima montažnih, koji se oslanjaju samo na pete budućeg luka. Izvorna skela sastavljena je od svežnjeva dasaka s dijagonalama od prednapetog drveta, te ukruta i spregova od užadi, i pogodna je za izvedbu lukova do raspona od 120 m. Lukovi većih raspona izvedeni su na skelama kojima su užad za ukrućivanje zamijenjena čeličnim cijevima. Nedostatak sustava je u velikom utrošku drveta, pa se on većinom koristio u alpskim krajevima.

Most Nösslachbrücke (Austrija), raspona 180 m, sastoji se od dva luka blizanca, sandučastog presjeka, s tri komore, izvedena na istoj skeli (slika 18). Skela je trokatna, poprečno premješšana i sagrađena u etapama. Prvo je izveden dvokatni petni dio skele, potom su na ove dijelove priključene jednokatne rešetke, pridržane privremenim vješaljicama. Središnjim rešetkama dodan je kat, tako da postanu samonoseće. Po zatvaranju privremenih zglobova dodan je treći kat kompletnoj rešeci, te se po polaganju oplata moglo pristupiti postupnom simetričnom betoniranju donje ploče luka. Stabilnost rešetke osigurana je horizontalnim kabelima za pridržanje.



Slika 18. Skica mosta Nösslachbrücke (Austrija), raspona 180 m, dovršenog 1967.

5.3.2 Prve konzolne izvedbe jadranskih lukova

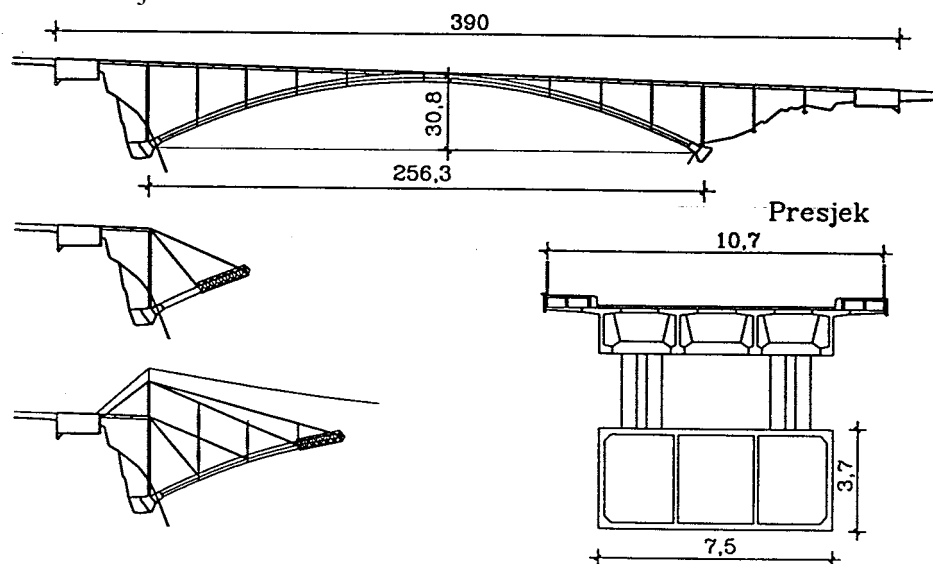
Tijekom šezdesetih i sedamdesetih godina XX stoljeća razvijen je veći broj različitih tehnoloških postupaka za izvedbu masivnih grednih mostova, pa su prednapeti gredni mostovi građeni na rasponima i u okolnostima koje su ranije bile predodređene za lukove. Ipak, upravo u to vrijeme sagrađena su dva lučna mosta na našoj jadranskoj obali, koji su izvornošću načina izvedbe označili ponovno oživljavanje i razvitak ideje poznatih starijih graditelja Melana i Maillarta, da već u vrijeme gradnje lučnih sklopova treba iskoristiti naponska stanja u sklopu. Pored toga, one predstavljaju nastavak Freyssinettovih izvedbi lukova s djelomičnom skelom.

Za lučni most u Šibeniku, raspona 246,4 m, a potom i za most kopno – otok Pag, raspona 193,2 m, primijenjen je 1964 i 1967. konzolni način gradnje. Lukovi su betonirani na mjestu, u čitavom poprečnom presjeku i u jednakim odsječcima po duljini, na čeličnoj skeli koja je s jedne strane bila pridržavana za očvrslu dio betonskog sklopa, dok je s druge strane bila pridržavana zategama koje su se zrakasto širile od stupova na obalama. Čelična skela premješšana je duž luka pomoću plovne dizalice velike nosivosti. Zatege su se sastojale od krutih čeličnih profila (četiri “U” profila) kojima su se postupno dodavali i napinjali prednapeti kabeli, ovisno o veličini sile u zategama u pojedinim fazama gradnje. Krutošću čeličnih profila kontrolirane su deformacije pri gradnji, dok su dodatnim kabelima povećavane nosivosti zatega. Zatege iza stupova, koje su držale ravnotežu konzola, bile su usidrene u masivne upornjake s kamenom ispunom (Šibenski most), odnosno izravno u čvrstu stijenu (Paški most).

Opisani način izvedbe označio je velik napredak u gradnji masivnih lučnih mostova, ali je imao bitnih zamjerki. Betoniranje lukova na mjestu, u odsječcima duljine oko 30 m zahtijevalo je izradbu

dviju čeličnih skela teških po sedamdeset tona. Za njihovo premještanje trebalo je pri svakom taktu osigurati plovnu dizalicu velike nosivosti, koja nije inače bila potrebna na gradilištu.

Šibenski most sadrži upeti armiranobetonski luk raspona 246 m. Strelica luka ima visinu od svega 30.8 m, pa on po odnosu $f:l=1:8$ spada među veoma plitke. Luk je šupljeg sandučastog presjeka s tri komore. Širina mu je stalna, dok se visina mijenja od 2.9 m u petama do 3.7 m u tjemenu. Nadlučni sklop sastoji se od niza roštilja. Po četiri uzdužna nosača kolnika izvedena su kao montažni prednapeti elementi duljine 23.0 m.



Slika 19. Skica Šibenskog mosta, raspona 246,4 m, iz 1965.

Otok Pag spojen je s kopnom lučnim mostom raspona 193.2 m. Prema statičkom sustavu glavni je nosač upeti luk, visine strelice 27.6 m, što mu daje odnos $f:l=1:7$. Luk srpolikog oblika u tjemenu ima visinu od 3.0 m, a pri petama 2.3 m, dok mu je širina stalna i iznosi 7.0 m. Rješenje nadlučnog rasponskog sklopa, rasponi i raspored nosača odgovaraju konstrukciji primijenjenoj na šibenskom mostu, s tim da je na šibenskom mostu prometna ploha nešto šira.

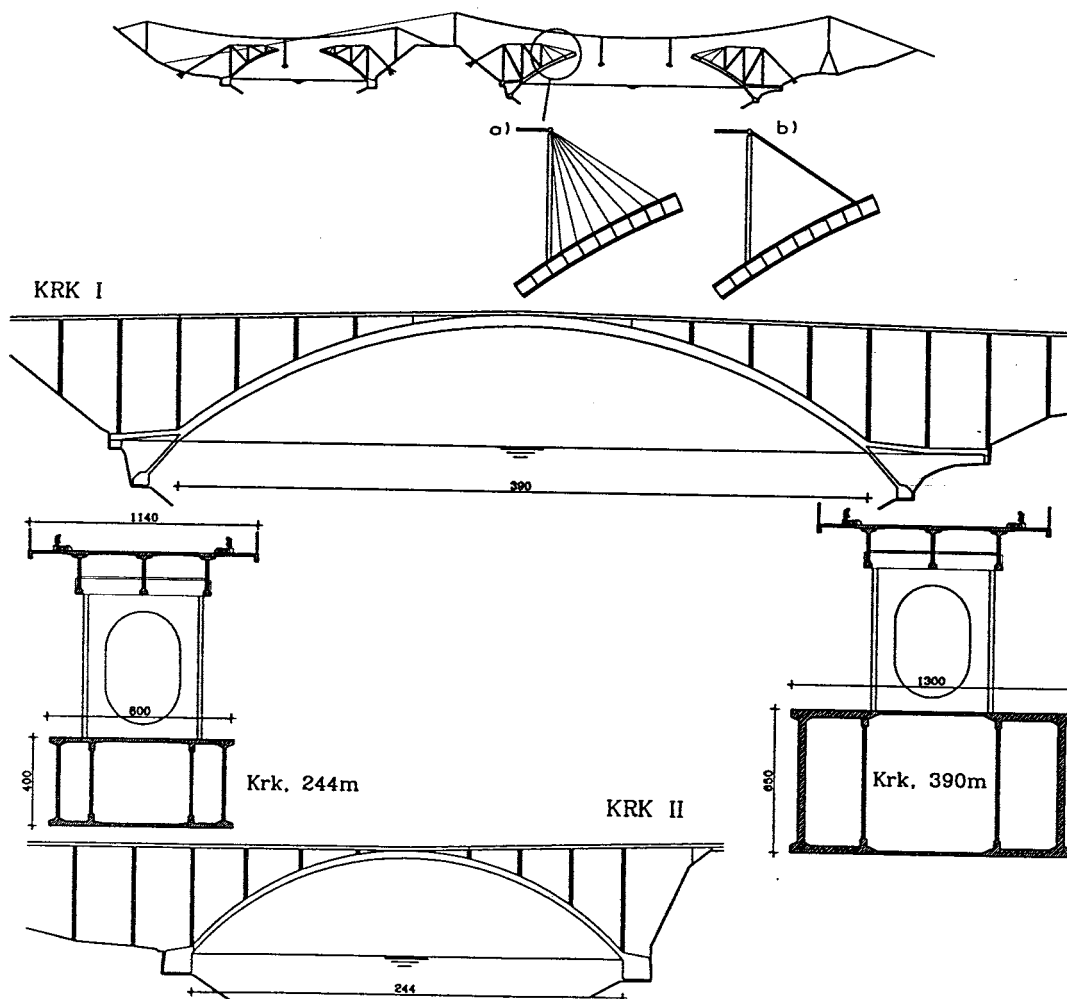
5.3.3 Konzolna izvedba formiranjem rešetke

Postupkom istodobnog građenja luka i nadlučnog sklopa želi se postići uključivanje dijelova u zajedničko nošenje već tijekom gradnje i skraćenje trajanja građenja. Postupak se sastoji u postupnoj izvedbi rešetkaste konzole, koja se sastoji od vlačnog pojasa – nadlučnog sklopa, tlačnog pojasa – luka i privremenih vlačnih dijagonala između stupova. Ovakav način građenja nadahnut je građenjem Krčkog mosta, gdje je gornji pojas rešetke formiran privremenim zategama. Postupak je dalje razrađen u Japanu, kako je prikazano kasnije.

Otok Krk spojen je s kopnom preko dva lučna mosta, s lukovima raspona 390 m i 244 m. Razlika između širine prepreke, koja iznosi 470 m, i raspona velikog luka savladana je oslanjanjem luka na međustupove u moru i razupiranjem horizontalnim razuporama raspona 33.5 m. Zajednička osobina obaju lukova je nepromjenjivost vanjskih dimenzija po čitavoj duljini i izrada od montažnih dijelova (60% poprečnog presjeka luka većeg raspona i 86% luka manjeg raspona je sklopljeno od montažnih dijelova).

Izvedba lukova započela je izvedbom srednjeg dijela (komore) sanduka, od montažnih dijelova ploče i rebara. Međusobni spojevi izvedeni su preklapanjem armature u obliku omče, uz dodatak

uzdužnih šipki. Na taj način formirani su elementi dugi po 5 m, koji su kabelima ovješeni o prethodno izveden stalni stup. Nakon izvedbe narednog nadlučnog stupa, čitav odsječak između stupova pridržan je u rešetkastom sustavu pa su kabeli pojedinih odsječaka mogli biti demontirani. Montažni elementi unutarnje komore imaju debljinu od samo 15 cm.



Slika 20. Skice Krčkog mosta, s lukovima raspona 390 m i 244 m, iz 1981.

Na Šibenskom i Paškom mostu, prije samog spajanja luka, provedena je regulacija naprezanja aktiviranjem hidrauličkih preša u tjemenu, nakon čega je luk zaključen, bez mogućnosti naknadnih regulacija. Na Krčkom mostu ostavljena je i mogućnost naknadnog aktiviranja preša, što je i učinjeno nakon dvije godine uporabe mosta, kada je veliki luk podignut 63 mm, da bi nakon još jedne godine bio podignut još jednom, za 93 mm. Nakon toga preše su ubetonirane. (Za usporedbu, na Masleničkom mostu nisu korištene preše, već je luku dano nadvišenje od 13,7 cm kako bi se os nakon skupljanja i puzanja betona ostvarila u projektiranom obliku.)

Vlačne dijagonale ne moraju biti samo privremenog značaja: u Kini je izveden most preko rijeke Jiangije, raspona 330 m, kao cjeloviti rešetkasti sklop. On nije prvi rešetkasti luk: poznati most Rip, u Australiji, raspona 183 m sagrađen je konzolnim postupkom sredinom 70-ih godina, na takav način da su izvedeni rešetkaste konzole, koje su u tjemenu spojene zglibom.

5.3.4 Kineski mostovi s krutom armaturom

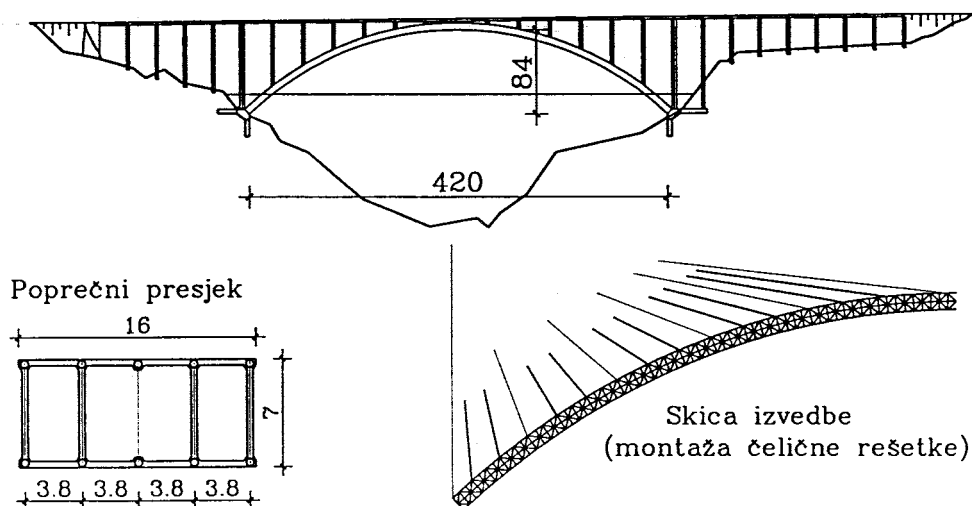
U Kini se već više od 30 godina grade i proučavaju sklopovi načinjeni od čeličnih cijevi ispunjenih betonom na takav način, da se postigne učinak spreznjanja. Ovdje je zanimljivo spomenuti promišljanja o poboljšanju značajki lukova ugradbom betona u šuplje čelične cijevi prof. Krune Tonkovića, koji je na sličan način izveo most u Skradinu, raspona 90 m, 1955. godine.

Izvedba kineskih mostova teče na sljedeći način:

- konzolnom montažom sa zategama izvodi se rešetkasti luk od šupljih čeličnih cijevi
- cijevi samonosivog luka ispunjavaju se betonom, na takav način da se postigne dobra prionjivost između betona i stjenke cijevi. Koristi se beton s minimalnim skupljanjem.
- na ispunjenu rešetku povećane nosivosti vješa se skela na kojoj se betonira luk. Rešetkasti sklop ostaje ubetoniran, kao kruta armatura.
- po dovršenju luka nad njim se izvodi rasponski sklop.

Cijevni lukovi mogu se montirati i horizontalnim ili vertikalnim zakretanjem lučnih polovica.

Najveći masivni lučni most na svijetu, Wanxian, preko rijeke Jangce, raspona 420 m, izveden je 1998. gore opisanim postupkom. Beton luka je marke 60. Poprečni presjek luka je prigodom izvedbe podijeljen u 7 polja, koja su sukcesivno betonirana. Svako polje izvedeno je u čitavoj duljini trake (od pete do pete) takvim redosljedom, da se održi stabilnost luka. Nadlučni rasponski sklop, širok 24 m, sastoji se od 10 prednapetih nosača "T" oblika poprečnog presjeka.



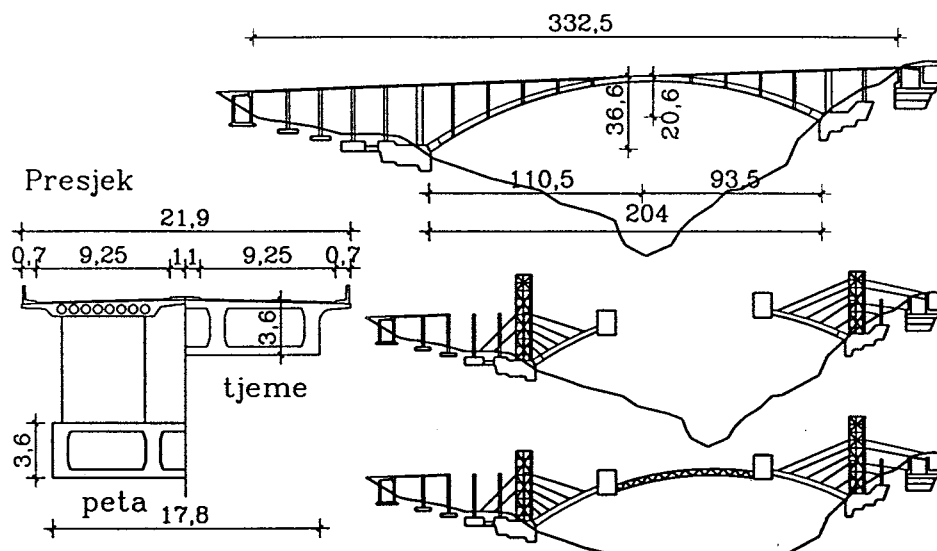
Slika 21. Skice mosta Wanxian, raspona 420 m, iz 1998.

5.3.5 Japanski postupci izvedbe

U Japanu je, u razdoblju od 1974. do 1989. sagrađeno 7 velikih betonskih lučnih mostova raznim inačicama konzolnog postupka. U načelu su kombinirane tri metode izvedbe:

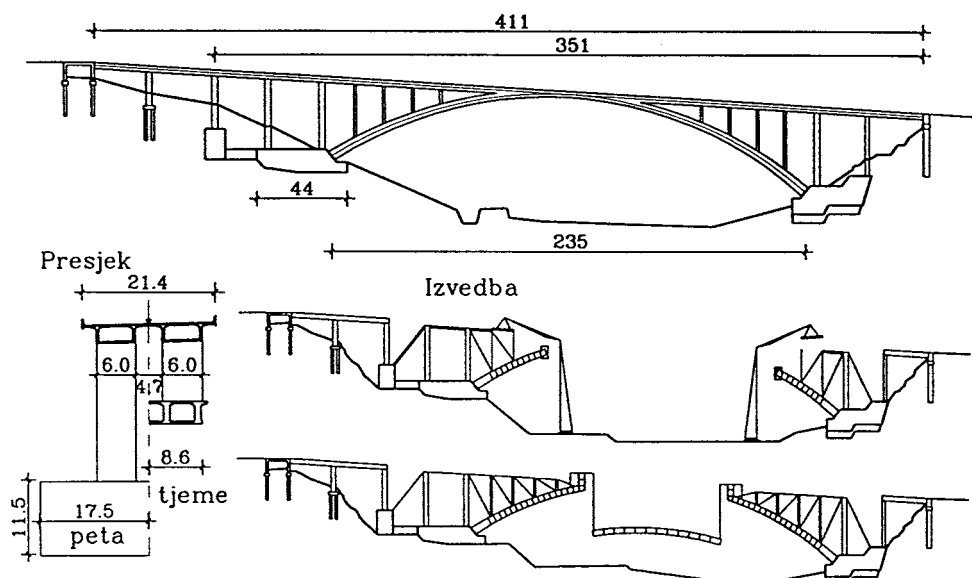
1. Konzolna izvedba s formiranjem rešetke koju sačinjavaju lukovi, stupovi, grede za ukrućenje i dijagonale.
2. Konzolna izvedba s privremenim zavješanjem luka o pomoćni pylon.
3. Montaža samonosive krute armature od čeličnih profila, uz naknadno presvlačenje betonom (Melanov postupak).

Most Usagawa izveden je kombinacijom konzolne izvedbe s pomoćnim pilonom i montaže krute armature (2+3).



Slika 22. Skica mosta Usagawa, iz 1982.

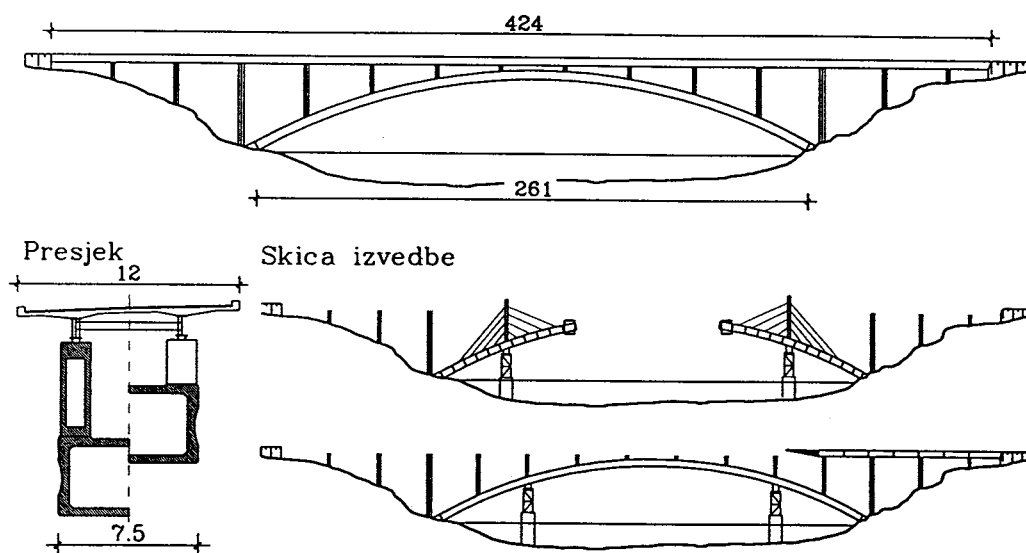
Najveći masivni lučni most u Japanu, Beppu-Myouban dovršen je 1989. godine, kombiniranom metodom (1+3). Dvije trećine luka od pete prema tjemenu izvedene su kao rešetka, konzolnim prepuštanjem, dok je u središnjem dijelu luka ugrađena rešetka od čeličnih profila, koja je kasnije obučena u beton. Rešetka u fazi izvedbe formirana je od luka, dodatno prednapetog privremenim kabelima, stupova i dodatnih privremenih čeličnih elemenata: horizontala i dijagonala. Smatra se da je metoda s formiranjem privremene rešetke pogodna za građevine do raspona od 150 m, a u kombinaciji s Melanovim postupkom i za rasponne veće od 200 m. Konstruktori japanskih lučnih mostova smatraju da je tijekom izvedbe neophodno privremeno prednapinjanje luka. Zanimljivo je da su privremene dijagonalne zatege nakon zatvaranja luka iskorištene za prednapetu armaturu nadlučnog rasponskog sklopa.



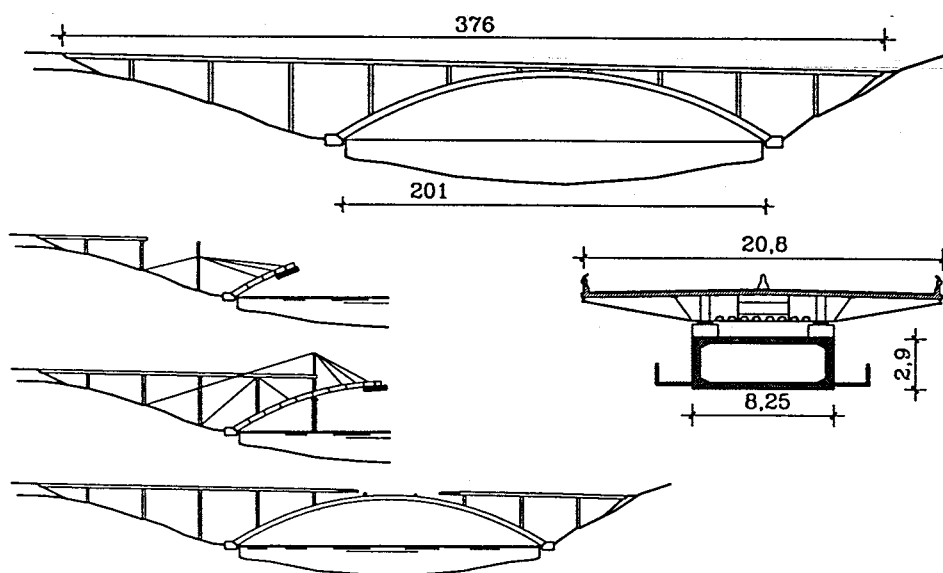
Slika 23. Skica mosta Beppu-Myouban, iz 1989.

5.3.6 Francuski mostovi sa spregnutim nadlučnim sklopom

Upeti luk most Chateaubriand kod Rance-a ima raspon od 261 m, dok je na mostu La Roche-Bernard, raspon 201 m. Ono što ih čini osobitim je izvedba spregnutog nadlučnog sklopa, koji je se kod mosta Chateaubriand sastoji od ploče debljine 20 do 40 cm spregnute s dva I nosača visoka 110 cm, na rasponima od 29 m, dok se kod mosta La Roche-Bernard sastoji od ploče debljine 30 cm spregnute sa sandučastim sklopom širokim 8 m. Oba luka su upeta. Na mostu La Roche-Bernard visina lučnog nosača varira od 3.5 m u peti do 2.9 m u tjemenu, dok je na mostu Chateaubriand stalna i iznosi 4.2 m. Prometnica na mostu Chateaubriand je uža od one na mostu La Roche-Bernard, (odnos je 12 naprema 20.3 m), dok je širina obaju lukova slična (7.5 naprema 8 m).



Slika 24. Skica mosta Chateaubriand (Rance), raspona 261 m, iz 1994.



Slika 25. Skica mosta La Roche-Bernard, iz 1994.

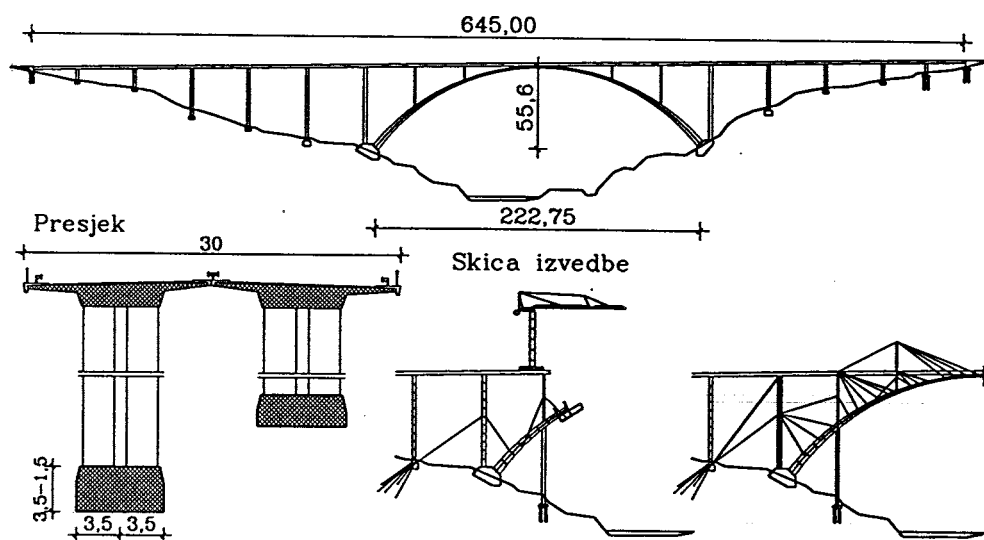
Mostovi su izvedeni na sličan način. Peta luka izvedena je konzolnim postupkom uz podupiranje do drugog nadlučnog stupa, gdje su izvedni privremeni stupovi za podupiranje luka. Na mostu Chateaubriand podupiranje je izvedeno na 2×29 m od pete a na La Roche-Bernardu na 46 m (u oba slučaja na 0,22 raspona). Središnji dijelovi lukova izvedeni su konzolnim postupkom, s privremenim pilonom nad pomoćnim stupom i sa pomoćnim zategama. Betoniranje je izvedeno u

odsječcima, na licu mjesta. Kod projektiranja mosta Chateaubriand razmatrano je rješenje sa središnjim zglobom u luku, koji bi umanjio probleme stabilnosti jako sploštenog luka, no od toga se odustalo. Nadlučni sklop izveden je potiskivanjem nosive metalne konstrukcije s jedne obale. Montažni elementi nadlučnog sklopa mosta La Roche-Bernard bili su dugi 37 m, a u poprečnom smislu sastojali su se od polovice sanduka. Izvedba spregnute armiranobetonske kolničke ploče uslijedila je nakon dovršenja montaže čeličnog dijela sklopa i uklanjanja pomoćnih stupova. Masa nadlučnog sklopa mosta Chateaubriand, širine 12 m, iznosi svega 10 tona po metru dužnom, što se smatra velikom prednošću ovakve koncepcije.

5.3.7 Suvremeni mostovi izvedeni konzolnim postupkom

Konzolni postupak s privremenim kosim zategama i betoniranjem u odsječcima danas je vjerojatno najčešći način izvedbe lukova velikih raspona. Ovdje će biti prikazana tri novija mosta, izvedena na sličan način, od kojih svaki ima nekih posebnosti.

Lučni most preko doline rijeke Kyll, u Njemačkoj, izveden je kao puni armiranobetonski presjek širine 7 m, a promjenjive visine, od 1,5 do 3,5 m. Upeti puni luk na rasponu od gotovo 223 m je vjerojatno jedinstven. Puni nadlučni stupovi i prednapeti pločasti nadlučni rasponski sklop sudjeluju u prijenosu opterećenja s lukom i osiguravaju njegovu stabilnost. Most je izveden konzolnim postupkom, s privremenim kosim zategama. Pri tome su konzole bile dodatno poduprte pomoćnim stupovima koji su izvedeni ispod nadlučnih stupova najbližih peti luka.



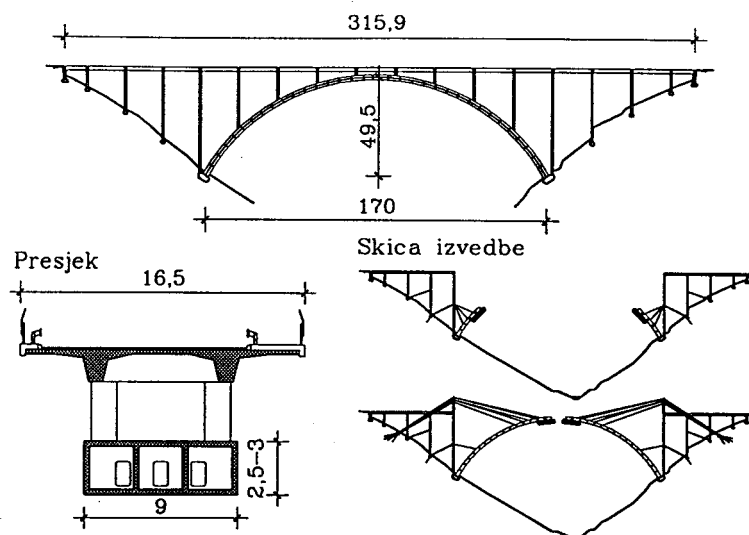
Slika 26. Skica mosta Kyll, iz 1997.

Most Grosse Mühl izveden je kao sandučasti sklop s tri komore i kontinuiranom rebrastom nadlučnom konstrukcijom povrh. Čitav raspon od 170 m izveden je bez pomoćnih stupova u dolini, ali s pomoćnim pilonima nad petnim stupovima. Nadlučni rasponski sklop izveden je betoniranjem na mjestu, polje po polje.

Maslenički most za autocestu sadrži upeti luk raspona 200 m i strelice 65 m. U poprečnom presjeku oblikovan je kao dvodijelni sanduk konstantnog vanjskog obrisa. Na najvećem dijelu luk je konstantnog poprečnog presjeka, a izmjere mu se linearno povećavaju samo od prvih stupova prema petama. Os luka odabrana je po složenoj logaritamskoj funkciji, tako da su momenti savijanja za stalno opterećenje minimalni. Vanjske vertikalne plohe sanduka imaju reljefno uzdužno zaobljenje -

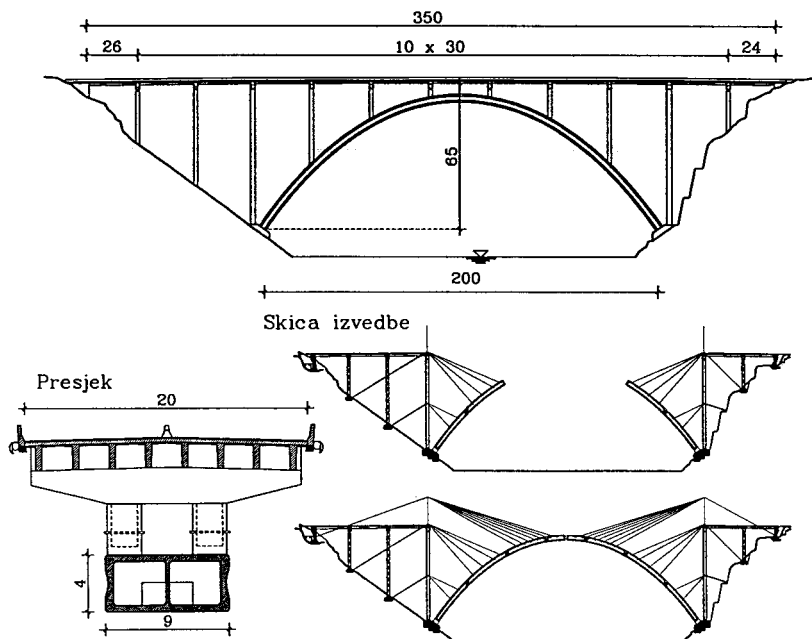
profilaciju. Vanjske izmjere luka iznose $B/H=9,0/4,0$ m. Stijenke pojasa debljine su 45,0 cm, uz linearno povećanje na 80,0 cm od prvih stupova prema petama.

Nadlučni rasponski sklop je roštiljni, sačinjen od osam montažnih prednapetih nosača, spojenih monolitnom kolničkom pločom. Montažni nosači su T-presjeka visine 175 cm, raspona 30 m a mase 77 t. Montažni nosači uzdužno su ograničeno naknadno prednapeti kabelima u jednoj fazi. Fleksijski kontinuitet nad stupovima ostvaruje se gipkom armaturom. Poprečni nosači predviđeni su samo na osloncima. Kolnička ploča je konstantne debljine 25 cm, armirana gipkom armaturom.



Slika 27. Skica mosta Grosse Mühl, iz 1991.

Rasponski sklop oslonjen je na upornjake i njima najbliže stupove preko uzdužno pomičnih ležaja, na dva stupa kod tjemena preko uzdužno nepomičnih ležaja, dok je s ostalim stupovima monolitno vezan. Stupovi se sastoje od dva pojedinačna stupa, sandučastog poprečnog presjeka.

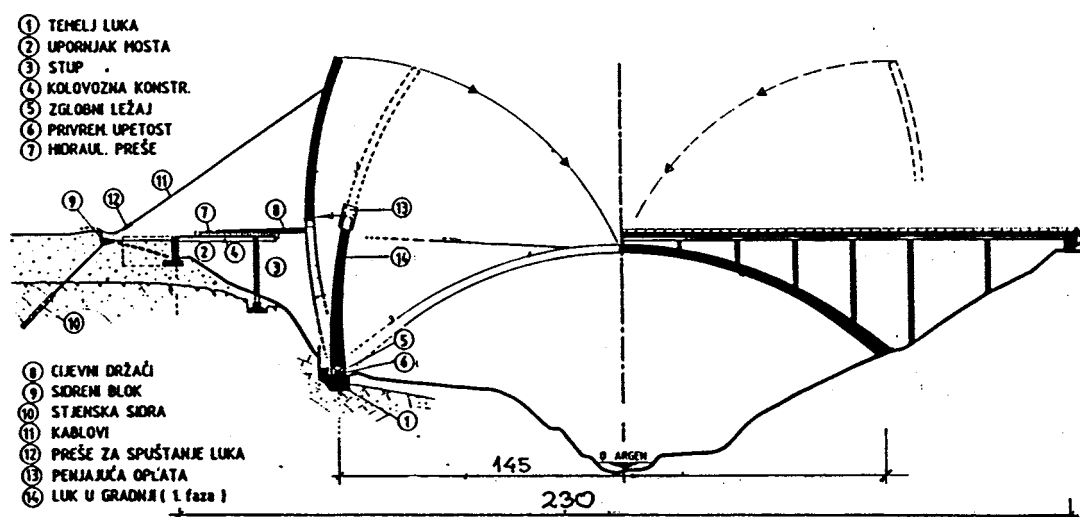


Slika 28. Skica Masleničkog mosta za autocestu, iz 1997.

Luk je izveden u pomičnoj oplati, u odsječcima duljine 5.26 m. Petni stupovi povišeni su pomoćnim čeličnim pilonima visine 23 m kako bi se olakšala konzolna izvedba.

5.3.8 Lukovi izvedeni zaokretanjem polovica

Ovim inovativnim postupkom do sada je izvedeno tek nekoliko lukova. Ideja se sastoji u tome da se lučne polovice, predgotovljene ili betonirane na mjestu, zakretanjem, odnosno postupnim spuštanjem dovedu u konačni položaj i potom povežu u tjemenu. Pri tome se tijekom izvedbe polovice oslanjaju na privremeni zakretni zglob, koji se nakon izvedbe može ubetonirati, tako da je u konačnom stanju luk upet. Prednost postupka je u tome što je betoniranje jednostavnije u uspravnom položaju u podiznoj oplati, negoli u kosom položaju, u pomičnoj skeli. Postupak je ograničen na raspone do maksimalno 200 m, zbog problema pri radu na velikoj visini. Ovakvim postupkom, s betoniranjem odsječaka na mjestu, u segmentnoj oplati, izveden je most Argentobel, 1985. g., raspona 145 m.



Slika 29. Skica mosta Argentobel, iz 1985.

5.4. Načela oblikovanja i konstruktivni detalji

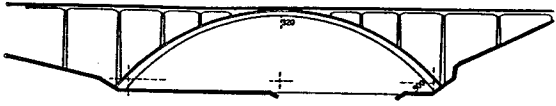
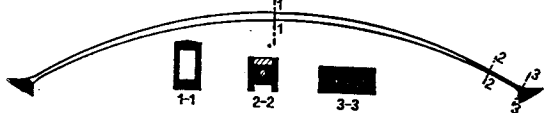
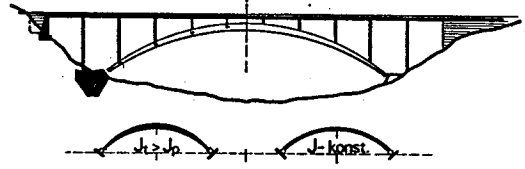
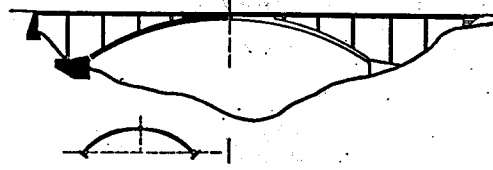
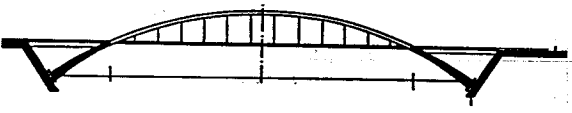

Iz prikaza izvedenih građevina vidljivo je bogatstvo oblika lučnih mostova, koji proističu iz različitih konstruktivnih promišljanja, izvedbenih mogućnosti, pa i društvenih okolnosti. Pravila koja će biti prikazana u ovom odjeljku nisu nepromjenjiva, ali daju iskustvene okvire kojih se možemo pridržavati dok, kao iskusni projektanti, ne budemo spremni iz njih iskoračiti.

5.4.1 Uobičajeni sustavi

Prvo pitanje kod oblikovanja je kada uopće predvidjeti luk kao sustav premoštenja prepreke? Smatra se da lučni sustavi mogu biti konkurentni ostalima za raspone od 40 do 400 m. Najviše se primjenjuju za raspone od 50 do 250 m. U prošlosti, kao što je vidljivo iz prikaza, lukovi nisu imali prave konkurencije u sustavima za veće raspone, no danas se razmatraju i druga rješenja: masivni gredni mostovi grade se do raspona od 300 m, dok se za zavješene mostove (mostove s kosim zategama) rasponi od 250 do 350 m smatraju optimalnima. Stoga se ondje, gdje postoje uvjeti za prijem horizontalnih sila u tlo, lukovi razmatraju kao jedan od varijanti premoštenja. Okvirno, neki uobičajeni sustavi prikazani su na slika 30, s rasponima u kojima su najčešće primjenjivani.

Ako promatramo lučne nosače zasebno, bez uključivanja pomosta (konstrukcije koja nosi kolnik) u nosivi sklop, možemo ih podijeliti u skupine prema statičkom sustavu:

1. Upeti lukovi, bez zglobova, s različitim promjenama presjeka duž luka. (U krajnjem slučaju prelaze u elastično upete lukove.)
2. Jednoglobni lukovi, sa zglobom u tjemenu.
3. Dvoglobni lukovi.
4. Trozglobni lukovi.

SKICA SKLOPA	Statički sustav Racionalni raspon
	UPETI LUK 40 - 300 m
	ELASTIČNO UPETI LUK 40 - 150 m
	DVOZGLOBNI LUK 80 - 200 m
	TROZGLOBNI LUK 60 - 120 m
	UPETI LUK S UPUŠTENIM KOLNIKOM 80 - 200 m
	LUČNI ZIDOVI (DISKOVI) 40 - 100 m

Slika 30. Uobičajeni sustavi lučnih mostova i primjenjivi rasponi.

Na srednjim i većim rasponima¹ osnovni sustav je upeti luk. Gotovo svi noviji lučni mostovi raspona većeg od 100 m su upeti ili elastično upeti. Najčešće se izvode s kolnikom gore, tako što se nad lukom izvodi nadlučni sklop koji se sastoji od stupova i grednog sklopa. Nadlučni sklop obično je od armiranog ili prednapetog betona, s rasponima od 10 do 50 m, no izvedeni su i kao spregnuti.

Upeti svodovi su najjednostavniji u konstruktivnom pogledu. Oni su trostruko statički neodređeni, pa se u njima javljaju znatna naprezanja uslijed promjene temperature, pomaka oslonaca te puzanja i skupljanja betona. Obzirom na to, teoretski se umetanjem zglobova mogu postići neki ekonomski učinci kod oblikovanja svodova, no u praksi većina zglobova predstavlja problem kod održavanja, pa ih treba izbjegavati. Izuzetak predstavljaju Freyssinnetovi, odnosno betonski zglobovi. Ipak, suvremeno stremljenje u masivnim sklopovima ide ka tome da se razdioba unutarnjih sila podešava polaganim promjenama poprečnog presjeka, a dodatna naprezanja prihvaćaju armaturom luka.

Upeti lukovi su i izvedbeno povoljni, jer je kod montažne gradnje ili gradnje u industrijskoj oplati praktičnije zadržati stalni poprečni presjek. Klasični upeti lukovi bili su oblikovani na takav način, da im se poprečni presjek podebljava prema petama, dok se kod elastično upetih lukova poprečni presjek prema petama smanjuje, tako da sklop dobiva srpolik oblik. Umetanje zglobova u konstrukciju još valja razmotriti kod izvedbe, kao privremeno rješenje kojime se smanjuju neki nepovoljni utjecaji.

Elastično upeti lukovi srpastog oblika, promjenjivog momenta inercije duž luka, izvode se na rasponima od 40 do 150 m. Nadlučni sklop može se izvesti bez stupova ili s minimalnim brojem stupova. Obzirom na nešto višu cijenu od grednog sklopa, ovakvi mostovi pogodni su za lokacije na kojima je bitno arhitektonsko oblikovanje (gradski okoliš, nadvožnjak).

U posebnim okolnostima izvode se vijadukti ili mostovi preko rijeka kao nizovi lučnih sklopova, uz velike oblikovne mogućnosti.

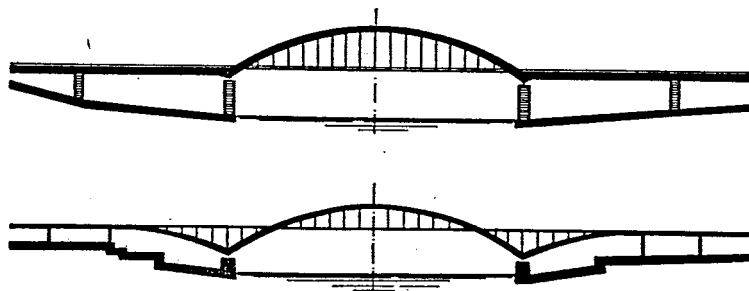
Dvozglubni masivni lukovi danas se rijetko izvode, premda se umetanjem dvaju zglobova pri petama mogu smanjiti neka nepovoljna djelovanja, kakvo je, na primjer, utjecaj pomaka ili zakretanja vrha temelja. Svršishodan oblik dvozglubnih lukova je takav, da im je debljina najveća u tjemenu, a da se smanjuje prema petama. Karakterističan oblik ovakvih elemenata je srpolik. U posebnom slučaju, dvozglubni lučni nosač s punim spandrilnim zidovima približava se grednom mostu sandučastog poprečnog presjeka promjenjive visine. Jedini moderni dvozglubni luk velikog raspona izveden je 1967. u Austriji: to je most Lingenau, raspona 210 m. U pete luka ugrađeni su čelični ležaji, a most je izveden na čeličnoj cijevnoj skeli.

Još znatnije smanjenje unutarnjih sila od parazitnih utjecaja dobiva se pretvaranjem lučnog nosača u statički određen sustav trozglubnog luka. Ovakvi mostovi gradili su se početkom 20. stoljeća, no u praksi se pokazalo da zglobovi izazivaju više teškoća no probitaka. Trozglubni lukovi imaju svoj karakterističan oblik: najdeblji su na bokovima.

Izvedivi su i drugačiji, složeni sustavi, proizašli iz posebnih okolnosti projektiranja ili izvedbe. Neki suvremeni mostovi izvedeni u Španjolskoj krajem 20. stoljeća pokazuju da oblikovne mogućnosti lukova ni izdaleka nisu iscrpljene, osobito uz primjenu novih gradiva ili spregnutih (kompozitnih) presjeka.

¹ Srednjim rasponima obično nazivamo one od 35 do 100 m, a većim one od 100 do 200 m.

Lučni sustavi s preuzetim potiskom i kolnikom dolje, kao što su luk sa zategom, Langerova greda ili Nielsenov luk, vrlo rijetko se izvode kao masivni. Nekoliko masivnih mostova izvedeno je u formi lukova s preuzetim potiskom i kolnikom gore, no ovakvi se sustavi nisu uvriježili (slika 31).



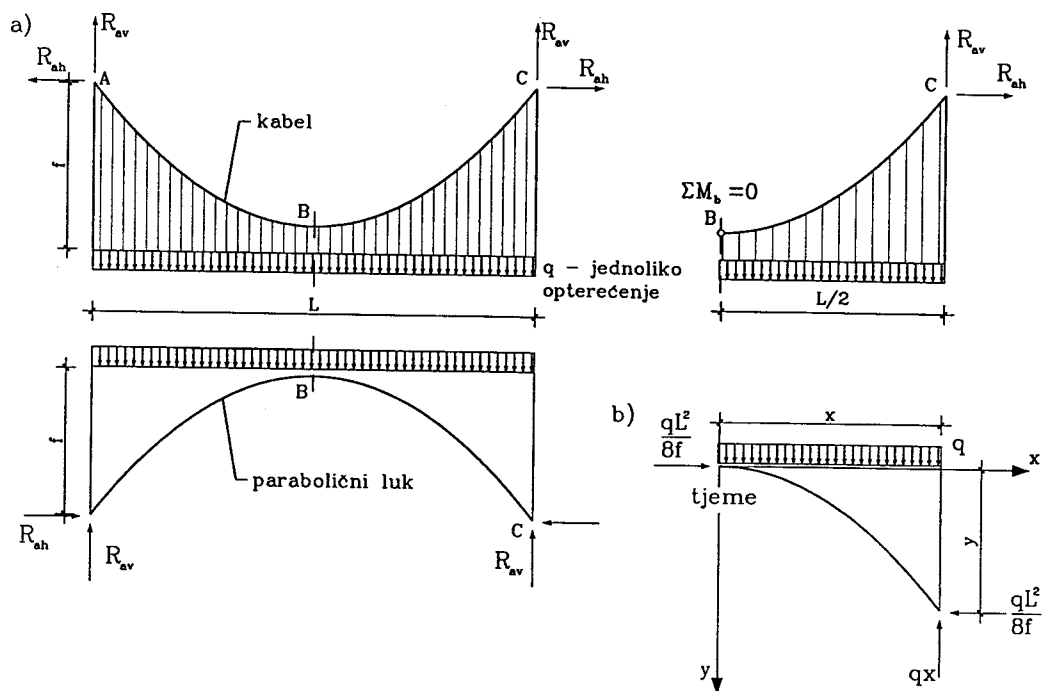
Slika 31. Neobičajeni sustavi masivnih lučnih mostova, s preuzetim potiskom.

5.4.2 Određivanje optimalnog oblika osi luka

Već je u uvodu spomenuto da se povoljnim oblikovanjem osi luka može postići optimalno iskorištenje gradiva nosača. Ranije je oblikovanje imalo presudan značaj za sigurnost nearmiranih ili zidanih lukova, dok je danas ono bitno zbog racionalnosti armiranobetonskih nosača. Os se oblikuje tako, da se pri djelovanju stalnog tereta u luku pojave najmanji mogući momenti savijanja, dok se za djelovanje pokretnog tereta dopušta veći ekscentricitet tlačne sile, odnosno veći momenti. Nastoji se da do vlačnih naprezanja u rubnim vlaknima presjeka dođe samo u slučaju izvanrednih opterećenja.

Određivanje unutarnjih sila u konstrukcijama pripada području tehničke mehanike, pa ovdje neće biti prikazano izvođenje općih izraza za sile u lukovima. Umjesto toga, prikazati će se jednostavna i ilustrativna analogija koja povezuje viseće mostove, s dominantnim vlačnim elementom, sa lučnim mostovima, s dominantnim tlačnim elementom.

Promotrimo model središnjeg raspona visećeg mosta. On se sastoji od nosećeg kabla, vješaljki i grede po kojoj se odvija promet. Pretpostavimo da su vješaljke toliko guste, da je noseći kabel jednoliko opterećen, a da je vlastita težina kabla zanemariva u odnosu na dominantno opterećenje od grede q (slika 32).



Slika 32. a) Analogija visećeg i lučnog mosta b) Ravnoteža sila u paraboličnom luku opterećenom kontinuiranim opterećenjem.

Sustav je simetričan, pa su reakcije:

$$R_{av} = R_{cv} = \frac{qL}{2} \quad (1)$$

Kabel ne može preuzeti moment savijanja, pa suma momenata na bilo koju točku mora biti jednaka nuli. Postavimo izraz za sumu momenata u polovici raspona.

$$\sum M \text{ oko } B \rightarrow \left(\frac{qL}{2} \frac{L}{2} \right) + (f R_{ch}) = R_{cv} \frac{L}{2} \quad (2)$$

Uvrstimo li \$R_{cv}\$ iz izraza (1), dobivamo:

$$R_{ch} = \frac{qL^2}{8f} \quad (3)$$

Promatrajući ravnotežu horizontalnih sila možemo zaključiti kako dobivena vrijednost \$R_{ch}\$ odgovara horizontalnoj sili u kablju u sredini raspona \$F_b\$.

Iz gornjih izraza može se zaključiti kako se sila u kablju smanjuje s povišenjem pilona mosta. Osim toga, vidi se da su izrazi izvedeni neovisno o obliku kabla.

Može se pokazati da će ovješeni kabel, opterećen jednoliko i kontinuirano, poprimiti oblik parabole. Budući da kabl ne može preuzeti momente savijanja, koje u lučnom nosaču želimo dokinuti, praktično je i za os luka odabrati parabolu istog oblika.

Lako se može pokazati da su izrazi za reakcije (1) i potisak u luku, odnosno horizontalnu silu, (3) isti kao za kabel. Prema tome, najveća uzdužna sila u peti luka je:

$$N_A = N_B = \sqrt{R_{AV}^2 + R_{AH}^2} \quad (4)$$

Da bismo pokazali kako u paraboličnom luku jednoliko opterećenje ne izaziva moment savijanja, promotrimo ravnotežu krutog tijela, odnosno odsječka luka na slika 32 b.

Pretpostavimo oblik osi općom jednačbom parabole:

$$y = A + Bx^2 \quad (5)$$

Postavimo koordinatni sustav tako da je ishodište u tjemenu:

$$x = 0 \Rightarrow y = 0$$

pa je $A=0$.

Također vrijedi

$$x = \frac{L}{2} \Rightarrow y = f \quad (6)$$

prema tome, konstantu B nalazimo iz uvjeta:

$$f = B \frac{L^2}{4} \quad (7)$$

tako dobivamo jednadžbu parabole u obliku koji se često koristi kod preliminarnog oblikovanja osi luka:

$$y = \frac{4f}{L^2} x^2 \quad (8)$$

Promotrimo sumu momenata oko tjemena.

Momenti u smjeru kazaljke na satu:

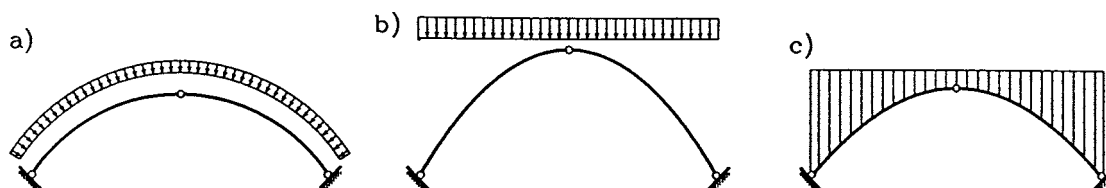
$$q \frac{x^2}{2} + \frac{qL^2}{8f} \frac{4f}{L^2} x^2 = qx^2 \quad (9)$$

Momenti u obrnutom smjeru:

$$qx \cdot x = qx^2 \quad (10)$$

Očito je da se momenti suprotnog smjera poništavaju. Na isti način može se dokazati da je suma momenata u svakom presjeku jednaka 0.

Pokazano je da je paraboličan oblik osi luka najpovoljniji za slučaj opterećenja jednoliko rasprostrtim teretom. Na sličan način može se pokazati da je za slučaj jednolikog opterećenja usmjerenog radijalno najpovoljniji oblik osi kružni (slika 33 b). U stvarnosti, stalno opterećenje lučnih mostova ne može se svesti na ove slučajeve. Utjecaj nadlučnih stupova i projekcije težine luka na horizontalu čini realno opterećenje bližim onome na slici 33 c, gdje je opterećenje nad petama najveće, a u tjemenu najmanje, dok se između peta i tjemena mijenja po nekoj zakonitosti. Diferencijalnim računom može se pokazati da je u slučaju promjene opterećenja po paraboloidnom zakonu najpovoljniji oblik osi luka krivulja koja slijedi funkciju kosinusa hiperbolnog, odnosno lančanica (slika 33 c).



Slika 33. Optimalni oblik lučnih nosača za određene slučajeve opterećenja.

a) za jednoliko radijalno opterećenje optimalan je kružni oblik.

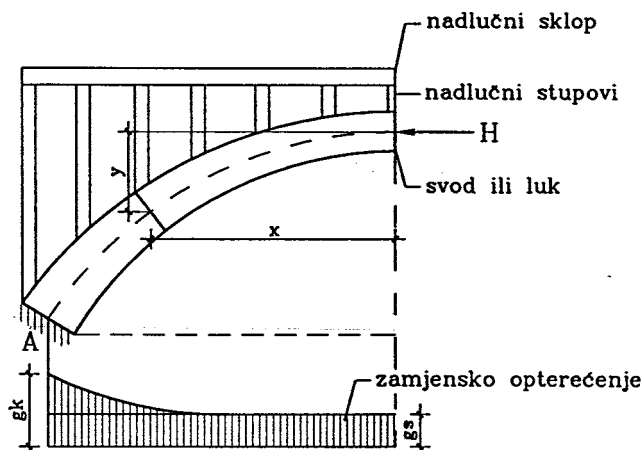
b) za jednoliko opterećenje po horizontalnoj projekciji optimalan je oblik parabole.

c) za promjenjivo opterećenje optimalan je oblik lančanice (kosinus hiperbolni).

Promotrimo jedan način konstruiranja lančanice prikladne za oblikovanje osi luka, odnosno za određivanje potporne linije u analitičkom obliku.

Pretpostavlja se (slika 34):

- sva opterećenja prenose se svodom ili lukom, a nadlučni sklop se promatra kao stalni teret
- stalno opterećenje na mostu je unaprijed poznato i mijenja se po paraboličnoj funkciji



Slika 34. Oznake i zamjensko opterećenje za određivanje krivulje luka po zakonu lančanice.

Opterećenje u tjemenu označimo s g_s , a opterećenje u peti s g_k .

Neka je njihov omjer:

$$m = \frac{g_k}{g_s} \quad (11)$$

Jednadžba osi luka tada ima oblik:

$$y = \frac{f}{m-1} (ch \xi k - 1) \quad (12)$$

Krivulja koju opisuje (12) naziva se po inženjeru koji ju je izveo Legay-eva katenoida.

Oznake znače:

$$\xi = \frac{x}{\frac{l}{2}} \quad (13)$$

dok se vrijednost k određuje kao:

$$k = Arch\ m = \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) \quad (14)$$

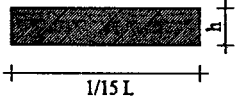
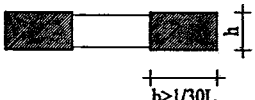
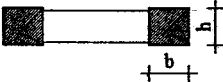
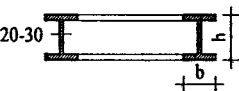
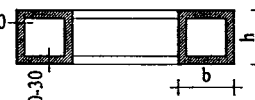
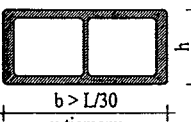
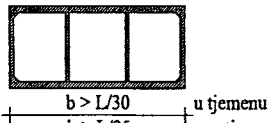
U slučaju kada je $m=1$, katenoida se pretvara u kvadratnu parabolu. Kod starijih mostova nad svodom je bio pun nadsloj, ili su nadlučni stupovi bili na vrlo malom razmaku, pa je aproksimacija potporne linije katenoidom bila relativno uspješna. U slučaju znatnih razmaka nadlučnih stupova, na mjestima njihovog oslanjanja u luk se unose znatne koncentrirane sile, dok je dio između stupova neopterećen, pa zamjensko opterećenje prema slika 34 više ne predstavlja zadovoljavajuću aproksimaciju. U stvari, os luka na mjestima unosa koncentrirane sile trebala bi imati lom, što uz nepovoljan estetski dojam, stvara i izvedbene poteškoće. Izlomljena linija lučnog nosača usvaja se samo kod gipkih lukova s krutom gredom, manjih raspona. U ostalim slučajevima os luka se iterativno podešava nakon provedenog proračuna unutarnjih sila.

Do danas su razvijeni i različiti drugi postupci za optimalno oblikovanje osi svoda, pri čemu su korištene različite funkcije. Primjerice, os luka Masleničkog mosta za autocestu oblikovana je po složenoj logaritamskoj funkciji, da bi joj oblik dodatno bio dotjeran brojnim numeričkim provjerama, po principu tlačne linije.

5.4.3 Zakon promjene poprečnog presjeka luka

Najjednostavnije je predvidjeti jednak poprečni presjek luka preko čitave njegove duljine. Ovo rješenje može biti optimalno i u pogledu izvedbe, na primjer ako se koristi skela na kojoj se betoniraju uzastopni odsječci. Međutim, ako presjeke luka želimo uskladiti sa silama i momentima u tim presjecima, onda presjek luka treba mijenjati u skladu s unutarnjim silama.

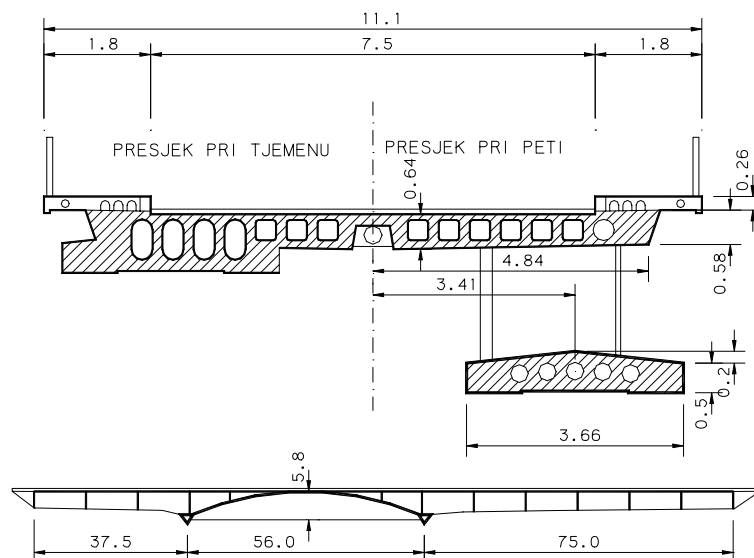
Uobičajeni poprečni presjeci masivnih lukova prikazani su na slika 35. Njihove izmjere dane su u odnosu na raspon luka, zbog osiguranja stabilnosti nosača.

	SKICA POPREČNOG PRESJEKA	Raspon luka u m Visina presjeka
PUNI SVOD		L = 40 do 100 m visina h u tjemenu luka: $h = (1/40 \text{ do } 1/60) L$ (manji rasponi) $h = (1/60 \text{ do } 1/100) L$ (veći rasponi)
DVOSTRUKI SVOD		L = 40 do 100 m $h = (1/60 \text{ do } 1/100) L$ (u tjemenu)
RAZDVOJENI PUNI LUKOVI		L = 40 do 100 m $h = (1/40 \text{ do } 1/60) L$ $h/b = 1 \text{ do } 2$
RAZDVOJENI LUKOVI "I" PRESJEKA		L = 70 do 150 m $h = (1/40 \text{ do } 1/60) L$ $h/b = 2 \text{ do } 2.5$
RAZDVOJENI SANDUČASTI LUKOVI		L = 100 do 200 m $h = (1/50 \text{ do } 1/70) L$ $h/b = 1 \text{ do } 1,5$
SANDUČASTI S DVIJE KOMORE		L = 150 do 250 m $h = (1/50 \text{ do } 1/100) L$
SANDUČASTI S TRI KOMORE		L = 200 do 400 m $h = (1/50 \text{ do } 1/100) L$

Slika 35. Uobičajeni poprečni presjeci masivnih lukova i svodova i prikladni rasponi.

Jednostavni punostijeni svodovi mogu biti jednodjelni (presjek 1) ili višedjelni (presjek 2). Obično su izvedeni na manjim i srednjim rasponima, jer su za veće raspone povoljniji sandučasti ili rastavljeni presjeci, koji imaju znatno veći moment inercije uz istu površinu presjeka. Izuzetak predstavlja punostijeni luk mosta Kyll, izveden u Njemačkoj 1997., što znači da su moguća i drugačija promišljanja. Razdvojeni vitki lukovi (presjeci 3 i 4) trebaju biti međusobno povezani okvirima ili spregovima, radi opasnosti od izvijanja u vertikalnoj ravnini. Prednost razdvojenih

lukova ili svodova očituje se kod izvedbe; koja može teći na jednoj skeli koja se pomiče poprečno (način koji su koristili stari Rimljani, a primijenjen je i kod mosta Gladesvile).



Slika 36. Oblikovanje presjeka mosta Rakovac, preko Korane u Karlovcu (prof. K. Tonković)

Razdvojeni svodovi su ošupljeni, a u tjemenu se stapaju s kolničkom pločom. Na skošenim gornjim plohamo ne može se zadržavati voda.

Osim oblikovanjem osi luka, iskorištenje gradiva u nosaču može se popraviti i promjenom značajki poprečnog presjeka luka. Pri tome jednu krajnost predstavljaju vitki lukovi, koji ne mogu prenijeti značajnije momente, dok drugu krajnost predstavljaju kruti upeti lukovi, kod kojih dominira savijanje. Između njih nalaz se elastično upeti lukovi, kod kojih se nastoji postići optimalna razdioba naprezanja po kriteriju utroška gradiva. Danas ovaj kriterij gubi presudan značaj, kojeg je imao u prošlosti, jer je za cijenu mosta sve bitniji način izvedbe, a za većinu postupaka povoljni su vrlo slični poprečni presjeci duž osi luka, ili se oni mijenjaju duž luka tako da je veća masa koncentrirana uz oslonce (deblji poprečni presjek uz pete).

U starijoj stručnoj literaturi napisane su mnoge rasprave o zakonu promjene momenta tromosti i promjene veličine poprečnog presjeka duž luka kako bi se presjek uskladio s veličinom unutarnjih sila po kriteriju minimalnog utroška gradiva. Predloženi su i neki zakoni promjene proizašli iz težnje za jednostavnijim analitičkim rješavanjem lukova. U današnje vrijeme elektroničkih računala, ovakva razmatranja gube važnost.

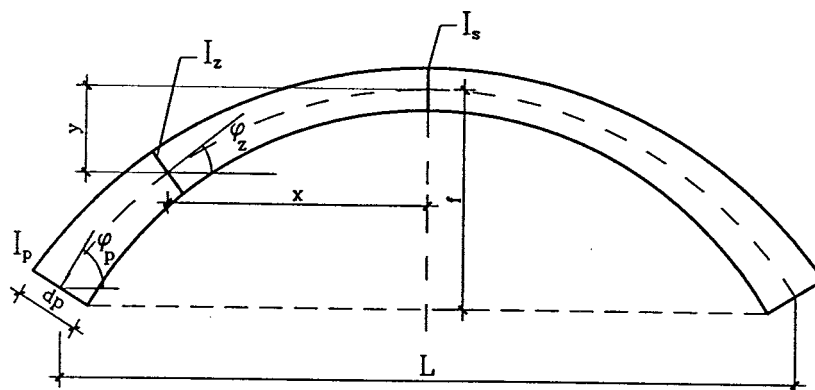
Za upete lukove u praksi se najčešće koristio Ritterov izraz, koji proizlazi iz dijagrama maksimalnih momenata u upetom luku. Prema njemu, u srednje dvije trećine raspona presjek gotovo da i ne treba mijenjati, a tek uz oslonce treba naglo povećati njegovu visinu. Izraz dovodi u vezu odabrani moment inercije u tjemenu I_s i moment inercije proizvoljnog presjeka I_z preko kuta nagiba tangente na os luka ϕ_z :

$$\frac{I_s}{I_z \cos \phi} = 1 - (1 - n) \xi \quad (15)$$

gdje je:

$$\xi = \frac{2x}{l}, \text{ kao i kod izraza (13)}$$

n – koeficijent koji ovisi o odnosu stalnog i pokretnog opterećenja
uobičajeno: za cestovne mostove 0,3 a za željezničke 0,20 do 0,25.



Slika 37. Oznake uz zakon promjene poprečnih presjeka masivnih lukova.

Vidljivo je da izraz za promjenu poprečnog presjeka ovisi o unaprijed zadanoj krivulji osi luka. Pojednostavljeni izraz, koji pretpostavlja konstantnu projekciju momenta tromosti duž luka, glasi:

$$I_s = I_z \cos \phi_z \quad (16)$$

i pogodan je za neke prethodne proračune upetih lukova. Kod dvozglobnih ili elastično upetih lukova moment inercije pri petama manji je od onog u tjemenu. Za prethodne proračune primjenjuje se izraz:

$$I_z = I_s \cos \phi_z \quad (17)$$

Osim s momentom inercije, zakon promjene poprečnog presjeka možemo vezati i s površinom poprečnog presjeka. Odabire se zakon između nepromjenjivog poprečnog presjeka:

$$A_s = A_z$$

i zakona promjene presjeka po kosinusu kuta tangente na luk:

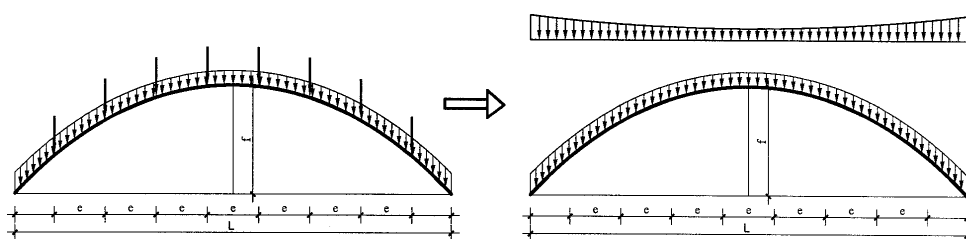
$$\frac{A_s}{A_z \cos \phi_z} = 1 \quad (18)$$

Ovakva promjena (po zakonu kosinusa) slijedi zakon promjene uzdužne sile duž presjeka, ali na većim rasponima daje izvedbeno neprihvatljivo velike presjeke.

5.4.4 Metoda obrnutog opterećenja

Os betonskog luka obično se oblikuje prema tlačnoj liniji dobivenoj za stalno opterećenje. Svako odstupanje geometrije osi luka od tlačne linije dovodi do povećanja momenata savijanja, pa se pri djelovanju prometnog opterećenja mogu javiti vlačni naponi u betonu, posebno u presjecima luka na mjestu unosa koncentrirane sile, odnosno ispod stupova. Da bi se osigurala dostatna trajnost, posebno pri gradnji mostova u agresivnom okolišu (blizina mora), poželjno je da svi presjeci budu u tlaku ili barem da vlačna naprezanja ne premaše čvrstoću betona. Stoga je razvijeno niz metoda za pronalaženje optimalne tlačne linije luka.

Većina analitičkih metoda koncentrirano opterećenje zamjenjuje adekvatnim jednolikim opterećenjem po luku (Slika 38.) i za rezultat daje rješenje diferencijalne jednačbe u obliku neke matematičke funkcije. No, opterećenje luka u današnjim mostovima uglavnom se bitno razlikuje od pretpostavljenog. Rasponi nadlučnog sklopa postaju sve veći, pa računaska pretpostavka o kontinuiranom opterećenju luka više ne vrijedi, nego se opterećenje preko stupova prenosi na luk u diskretnim točkama oslanjanja.



Slika 38. Zamjensko jednoliko opterećenje

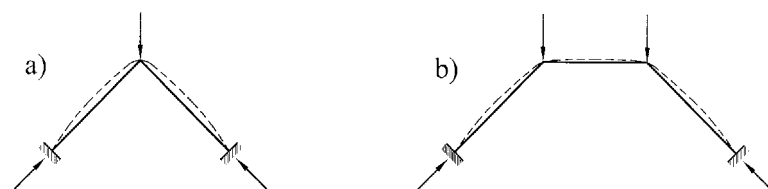
Iz tog razloga više nije moguće odrediti jednačbu cijelog luka u zatvorenom obliku jer na mjestima stupova krivulja ima lomove. Problem određivanja optimalnog oblika osi za poznati raspon i strelicu luka sastoji se od:

- određivanja koordinata točaka položaja stupova i
- određivanja skupa jednačbi krivulja koje spajaju te točke.

U postupku je inherentna pretpostavka da nadlučni rasponski sustav ne sudjeluje u prijenosu opterećenja, već da je on stalni teret na luku. Ova pretpostavka dobro se slaže sa realnim stanjem u sustavima u kojima je rasponski sklop ležajevima odvojen od donjeg ustroja.

Osnovna ideja “metode obrnutog opterećenja“

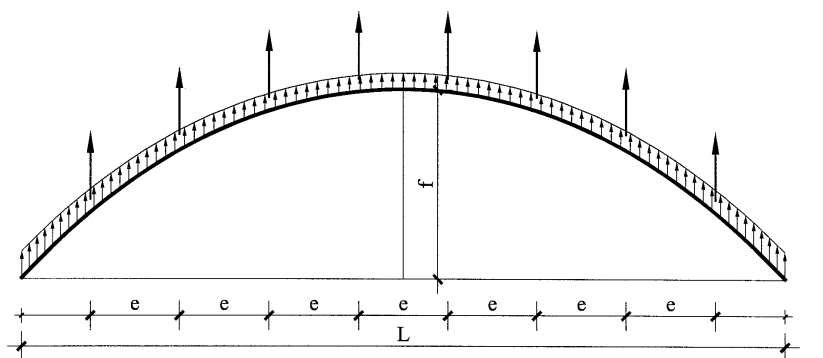
Pretpostavimo li da na luk djeluje samo jedna sila u sredini raspona i da luk nema težinu, za taj problem postoji samo jedan statički sustav (oblika trokuta) u kojem nema momenata savijanja - Slika 39a. U slučaju da želimo postaviti krivulju, potrebno ju je odabrati da što manje odstupa od ovog rješenja (---). Za opterećenje od dvije sile rješenje je oblika trapeza - Slika 39b.



Slika 39.

Na oba opisana primjera može se primijetiti da su to u stvari ravnotežni položaji lančanice te iz toga možemo zaključiti: *Problem pronalaženja tlačne linije luka je analogan problemu traženja ravnotežnog položaja lančanice opterećene istim silama ali suprotnog smjera.*

Odnosno tražimo statički sustav u kojem postoje samo uzdužne sile i nema momenata savijanja, a to je upravo lančanica.



Slika 40. Metoda obrnutog opterećenja.

Algoritam proračuna

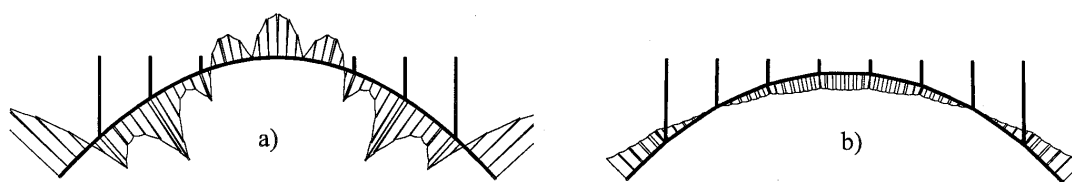
Postupak se izvodi u četiri koraka:

1. Za odabran raspon mosta L i strelice luka f postavlja se početna krivulja (polinom 2. reda), koja se opterećuje zadanim koncentriranim silama na mjestima stupova i vlastitom težinom luka ali u suprotnom smjeru. Pri tom se koriste “cable” konačni elementi koji mogu preuzeti samo aksijalnu vlačnu silu. Elementima se zadaje i beskonačno velika aksijalna krutost da bi izbjegli lokalno produljenje konačnog elementa. Statika takvog sustava rješava se po teoriji III reda.
2. Na početni polinom 2. reda dodaju se tako dobiveni pomaci točaka i dobiva nova geometrija, koja je u stvari skup lančanica neznatno slomljenih na mjestima stupova (rješenje 1).
3. Tako dobivene točke povezuju se potom standardnim štapnim elementima s opisanim poprečnim presjekom luka i opterećuju u pravilnom smjeru. Statika ovakvog modela provodi se po teoriji I-reda jer je to krivulja u deformiranom položaju. Pri izvedbi mosta moraju se izračunati nadvišenja konstrukcije za elastične i plastične deformacije i dalje rješavati po teoriji II-reda.
4. Na osnovu koordinata točaka rješenja 1 postavlja se polinom željenog stupnja koji najbolje aproksimira točke u smislu da kvadrat odstupanja bude minimalan. (rješenje 2).

Kod betonskih mostova gdje je udio prometnog opterećenja svega 8 do 10 %, os luka se određuje samo za opterećenje od vlastite težine. S estetskog stanovišta kod betonskih lukova, rješenje 1 (progibna linija lančanice) ima neznatne lomove i može se odabrati kao konačna os. Također bez obzira koju os odabrali betonski lukovi se izvode u pravilu u ravnim segmentima duljine $\sim 5\text{m}$, te su uvijek poligonalno izvedeni.

Poprečni presjek luka izvodi se zbog jednostavnosti oplata konstantne visine. Eventualna promjena poprečnog presjeka izvodi se između pete i prvog nadlučnog stupa promjenom debljine pojedinih elemenata poprečnog presjeka prema unutra (npr. podebljanjem donje i gornje ploče ili hrpta).

Os vitkog armiranobetonskog luka nije krivulja koja se može opisati jednom jednadžbom, već se zbog lomova tlačne linije na mjestima stupova sastoji od skupa krivulja definiranih između stupova. Os luka dobivena ovim postupkom odgovara deformiranom konačnom položaju nakon što su se odvile sve dugotrajne deformacije puzanja i skupljanja betona. Pri statičkom proračunu lučnih mostova neznatne promjene krivulje od nekoliko cm, a koje odstupaju od rješenja br. 1 mogu izazvati promjene momentnih dijagrama i do 50%. Isto tako postoji velika razlika u rezultatima po teoriji I i II reda. Stoga je potrebno lučne mostove računati po teoriji II-reda, odnosno tražiti ravnotežu na deformiranom sustavu.



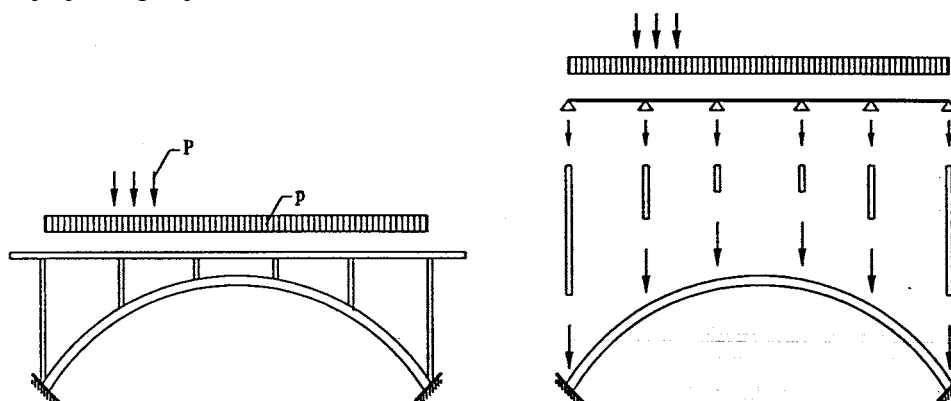
Slika 41. a) momentni dijagram za luk oblika parabole
b) za luk određen metodom obrnutog opterećenja

5.5. Statičke provjere

Podjele nosivih konstrukcija prema statičkom sustavu ranije su imale različit značaj od današnjeg. Proračun višestruko statički neodređenih sustava prije uvođenja računala i proračuna metodom konačnih elemenata bio je vrlo spor i mukotrpan. Korišteni su pojednostavljeni postupci strogo ograničenih mogućnosti, za koje su izrađivana pomagala u vidu tablica ili uticajnih linija. Da bi se njima mogao koristiti, projektant se trebao odlučiti za neki sustav i njemu prilagoditi koncepciju sklopa. Kompjutorski proračun oslobodio je inženjere nekih ograničenja, no pojednostavljene provjere još uvijek imaju velik značaj kod razrade projektnog rješenja. One su nezamjenjive pri promišljanju koncepcije sklopa u početnoj fazi projektiranja, te kod ocjene točnosti proračuna provedenog na računalu.

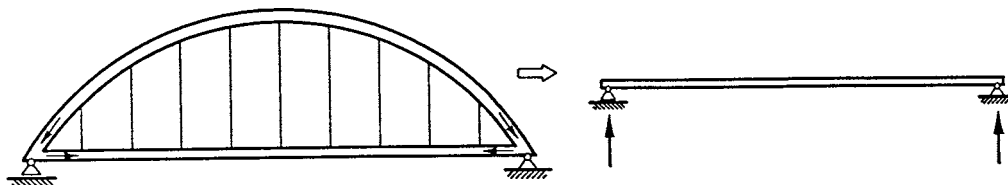
5.5.1 Modeliranje za proračun

Nosivi sklop lučnog mosta sastoji se od osnovnog, lučnog ili svođenog nosača, te od sekundarnog, najčešće nadlučnog sklopa, koji se sastoji od stupova ili vješaljki i grednog nosača po kojemu se odvija promet. (ove dijelove nazivamo i pomost.) Osnovna podjela lučnih mostova u statičkom smislu vrši se prema stupnju uključivanja sekundarnog sklopa u nosivi sustav. Naime, čitavo opterećenje na glavnom rasponu može se prenositi samo putem svoda ili luka, bez udjela ostalih dijelova (slika 42b), no povoljnije stanje nastaje kada se i ostali dijelovi mosta uključe u prijenos opterećenja (slika 42a). Sjetimo se da dobar dio preostalih rimskih mostova svoju dugovječnost dijelom duguje betonskom nadsloju, koji je u stanju preuzeti dio opterećenja, odnosno, osigurati njegovu povoljniju raspodjelu na svod.



Slika 42. Pojednostavljeni prikaz raščlambe nosivog sustava lučnog mosta, sa (a) ili bez (b) uključivanja nadlučnog sklopa.

Druga važna podjela odnosi se samo na mostove kod kojih je i pomost uključen u prijenos opterećenja. Naime, već u uvodu je istaknuto kako je bitno obilježje svodjenih mostova prijenos horizontalnih sila na tlo, no postoje složeni sustavi lučnih nosača kod kojih je horizontalna sila na krajevima (potisak) preuzeta zategom unutar samog nosača. Ovakvi sklopovi iznutra djeluju kao luk (opterećenje se prenosi dominantno uzdužnom silom) dok po svojim reakcijama, prema van, djeluju kao greda (vertikalno opterećenje uzrokuje samo vertikalne reakcije) (slika 43).

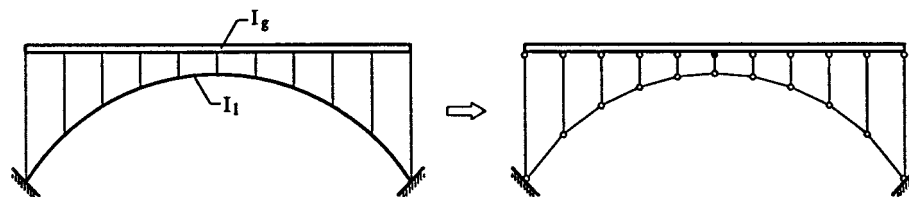


Slika 43. Primjer luka s preuzetim potiskom.

Među mostovima koji predaju horizontalne reakcije na tlo možemo formirati zasebne skupine u odnosu krutosti luka I_l i grede I_g nadlučnog sklopa. Ova podjela ilustrira udio pomosta (nadlučnog sklopa) u prijenosu opterećenja. Čim je krutost grede veća, veći je i njezin doprinos ukupnoj nosivosti. Naprotiv, greda manje krutosti ima sekundarni značaj, prenoseći opterećenje samo između nadlučnih stupova.

Uz pretpostavku da promatramo upete lukove, kakvi su u praksi najčešći, možemo razdvojiti tri sustava:

- Upeti kruti luk sa gipkom konstrukcijom pomosta. Kada je omjer $I_l/I_g \leq 20$ sklop se može promatrati prema slika 38. b, odnosno kao da glavni prijenos opterećenja vrši luk, bez učešća pomosta. Lukovi velikih raspona uglavnom pripadaju ovoj skupini.
- Gipki luk s krutom gredom. Kada je omjer $I_l/I_g < 1$ sklop se može promatrati prema slika 40, odnosno, na taj način što se spojevi luka interpretiraju zglobovima. U stvarnosti su svi spojevi u ovakvom sustavu monolitni, međutim im je krutost takva da ne mogu prenijeti značajnije momente. Stoga u luku prevladavaju horizontalne sile, dok su momenti savijanja sekundarnog značaja. Naprotiv, kruta je greda opterećenja značajnijim momentima. Sustav je pogodan za manje raspone, jer su gipki lukovi podložni izvijanju. Masivne mostove s gipkim lukom i krutom gredom odozgo prvi je gradio Maillart, pa su i prozvani po njemu. Ovakvom sustavu sličan je gipki luk s krutom gredom odozdo – Langerova greda.
- Upeti kruti luk s krutom konstrukcijom pomosta. Unutar podjele ne postoje stroge granice između različitih sustava. Obično se uzima da se omjer krutosti kreće u granicama omjer $1 \leq I_l/I_g \leq 20$. Kod proračuna je potrebno modelirati cjelovit složeni sustav s realnim krutostima.

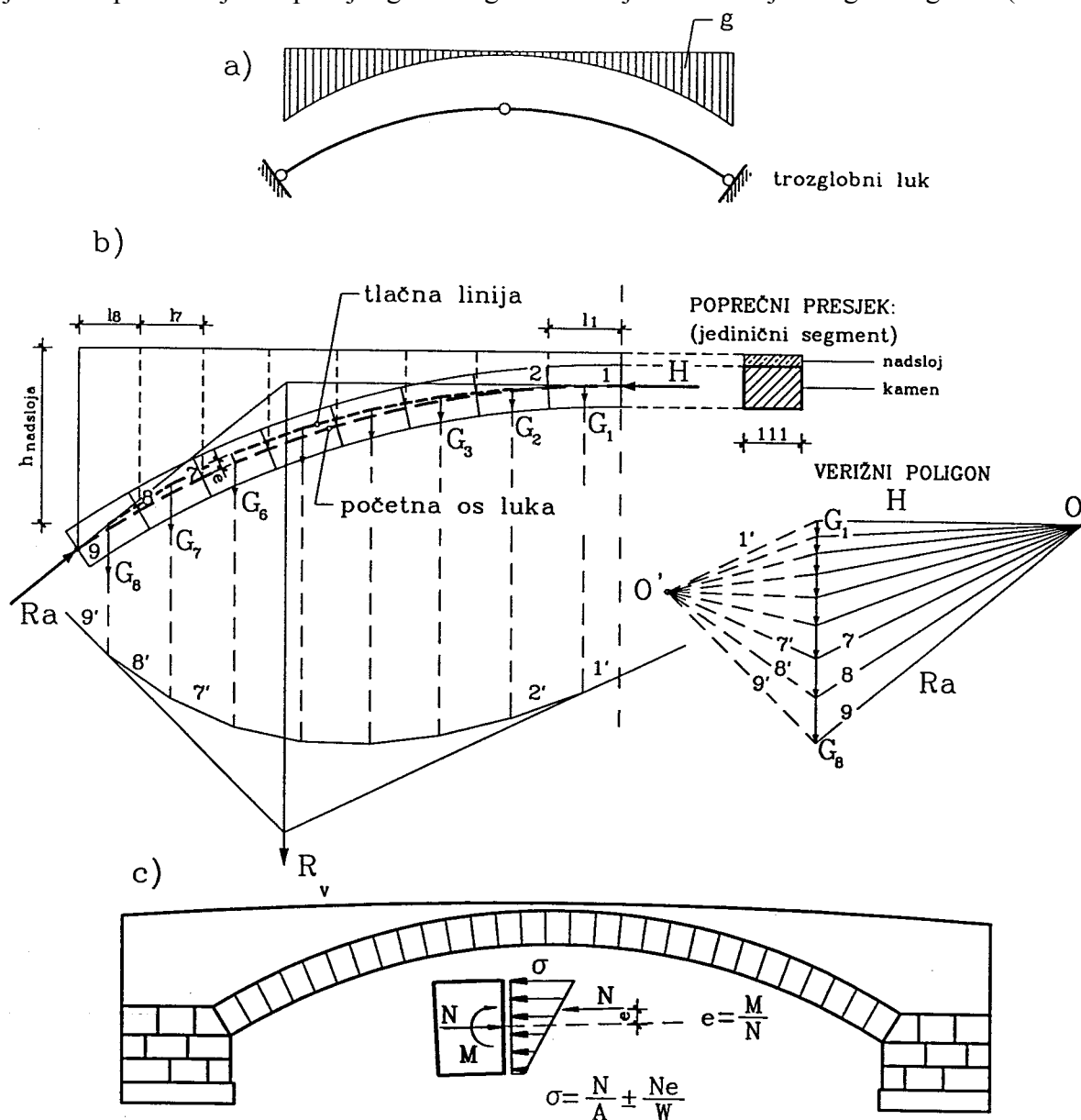


Slika 44. Moguća statička interpretacija gipkog luka s krutom gredom.

5.5.2 Potporna (tlačna) linija

Tlačna linija predstavlja rezultatnu krivulju hvatišta tlačne sile u presjecima luka ili svoda. Praktično, to znači da je tlačnom linijom određen položaj, odnosno ekscentricitet, djelovanja tlačne sile u svakom presjeku luka, za neko promatrano opterećenje. Dakle, pomoću tlačne linije može se odrediti veličina momenata u u svim presjecima luka. S druge strane, kod projektiranja lukova od gradiva znatne tlačne, a minimalne vlačne čvrstoće, oblik tlačne linije definira najpovoljniji oblik osi luka ili svoda, odnosno oblik pri kojemu će se u njemu pojaviti minimalna vlačna naprezanja.

Kod projektiranja starijih lukova od kamena ili nearmiranog betona postavljao se uvjet da rezultanta tlačnih sila ni u kojem presjeku i ni za koji slučaj opterećenja ne izađe van jezgre poprečnog presjeka, kako se ne bi pojavila vlačna naprezanja. U doba elektroničkih računala ova metoda ima uglavnom povijesnu vrijednost, no budući da jasno pokazuje polazište za racionalan odabir osi luka, ovdje će biti prikazan jedan primjer grafičkog određivanja tlačne linije trozglobnog luka (slika 45).



Slika 45. Grafičko određivanje tlačne linije:

Pretpostavke:

- svod se modelira simetričnim trozglobnim lukom jedinične širine
- zglobovi luka nalaze se u osi svoda
- opterećenje je proporcionalno visini nadsloja
- u obzir se uzima samo stalni teret
- verižni poligon prolazi kroz sve zglobove

Postupak:

Opterećenje vlastitom težinom i nadslojem rastavlja se na segmente proizvoljne širine. pretpostavimo da je luk opterećen nizom koncentriranih sila u osi crtamo verižni poligon s obzirom na proizvoljno odabran pol nanošenjem zraka poligona u duljinama odsječaka luka nalazimo pravac reakcije R_v horizontalna reakcija u tjemenu H i kosa u peti R_a sijeku se s reakcijom R_v u istoj točki poznatim pravcima H i R_a određen je novi pol O , kao i veličina samih reakcija H i R_a s novim zrakama 1, 2 do n crta se odgovarajući poligon koji mora prolaziti kroz zglobove odstupanje poligona tlačne linije od osi svoda (e) pokazuje koliko je os dobro odabrana tlačna linija je slična momentnom dijagramu

Kontrola naprezanja:

Prema poznatim izrazima, pomoću uzdužne sile u svodu i veličine odstupanja tlačne linije od osi.

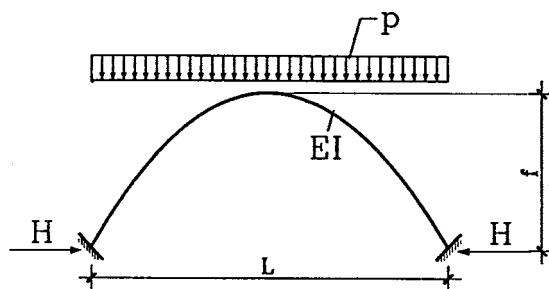
Nakon što je os svoda odabrana za djelovanje vlastite težine i stalnog tereta, svod se provjerava i na prometno opterećenje, postavljeno simetrično i nesimetrično. Kod ovih provjera zglobovi proračunskog modela, trozglobnog luka, pretpostavljaju se na rubovima jezgre poprečnog presjeka svoda, ovisno o slučajevima opterećenja, čime se donekle korigira greška zbog razlike pretpostavljenog i stvarnog statičkog sustava (u stvarnosti se najčešće radi o upetom luku).

Ispitivanjem većeg broja tlačnih linija, od kojih svaka odgovara jednom slučaju opterećenja, konstruktor stječe sliku o naprezanjima u svodu. Ovakve grafoanalitičke provjere danas se eventualno provode samo kod provjeravanja povijesnih svodova, jer ih uspješno zamjenjuju računalni postupci metodom konačnih elemenata. Ipak, za svaki sklop treba znati načiniti osnovne računske provjere ručno, kako bi se isključila mogućnost grube pogreške. Pored toga, ako smo svjesni pretpostavki i ograničenja jednostavnih provjera, one su nezamjenjive kod koncipiranja, odnosno preliminarnog projektiranja građevine.

5.5.3 Provjere stabilnosti luka

Kod proračuna armiranobetonskih lukova i svodova, kao i kod proračuna bilo kakvih tlačnih elemenata, potrebno je provjeriti stabilnost nosača. Provjere lučnih mostova vrše se za ravninu osi nosača (okomita ravnina) i ravninu okomitu na ravninu nosača. Problemi rastu s vitkošću konstrukcije, a iskustvene preporuke za minimalne izmjere svodova i lukova uzimaju u obzir i stabilnost (slika 35). Uobičajene debljine lukova i svodova su između 1/60 i 1/70 raspona, a Freyssinet je dopuštao i veće vitkosti, do 1/80. Maillart je u nekim lukovima ostvario i vitkost veću od 1/100 L.

Proračun lukova na stabilnost u ravnini osi nosača vrši se provjerom stabilnosti zamjenskog ravnog štapa iste krutosti, u svemu prema zakonitostima poznatim iz Tehničke mehanike. Ovdje će biti prikazan samo izraz za kritičnu veličinu jednolikog opterećenja za parabolični luk (slika 46).



Slika 46. Parabolični luk opterećen kontinuiranim opterećenjem p – osnovna provjera stabilnosti u osi nosača.

Kritična veličina potiska (uzdužne sile u tjemenu) dana je izrazom:

$$H_{kr} = K \frac{E I_s}{L^2}$$

gdje je :

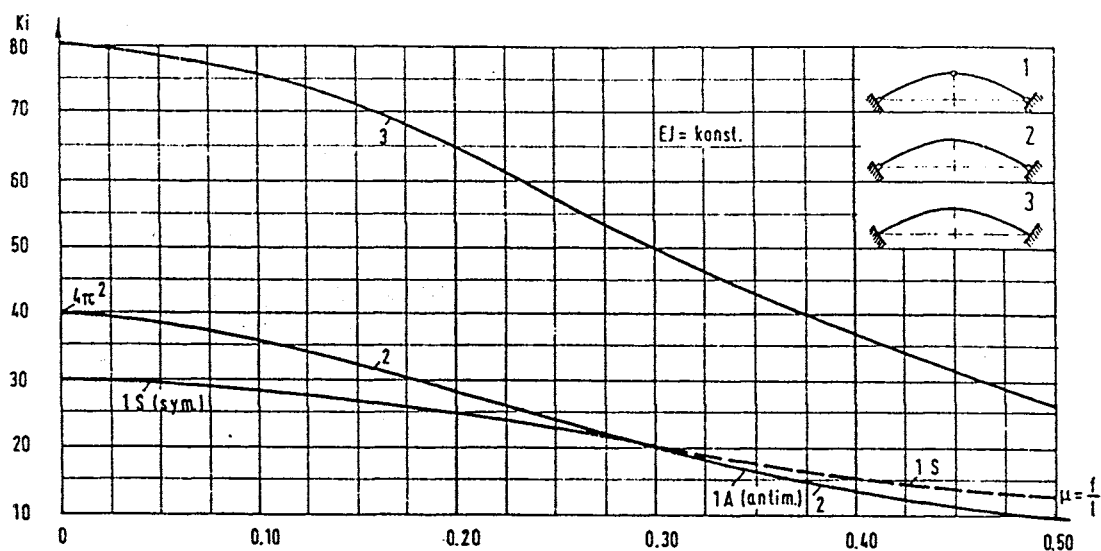
E – modul elastičnosti

I_s – moment inercije u tjemenu

L – raspon

K – koeficijent ovisan o statičkoj shemi (upeti luk, dvozglojni, trozglojni), odnosu strelice i raspona (f/L) i od zakona promjene presjeka duž raspona

Vrijednost koeficijenta K određena je pokusima i teorijskim analizama, a može se očitati iz dijagrama priloženog na slika 47.



Slika 47. Vrijednosti koeficijenta K za upeti luk (krivulja 3), dvozglojni luk (krivulja 2) i trozglojni luk (krivulja 1).

Poprečna stabilnost svodova i lukova predstavlja složen problem koji opsegom izlazi van opsega predviđenog gradiva. Ukoliko su dimenzije luka ili svoda dobro odabrane (npr. prema slika 35), a sam nosač prikladno oblikovan i armiran opasnost od gubitka stabilnosti van ravnine nosača nije velika.

5.5.4 Modeliranje štapnim elementima za proračun na računalu

Statički proračun započinje izradom pojednostavljenog modela za proračun na računalu, metodom konačnih elemenata. Za sada se najčešće koriste štapni modeli, i to ravninski, u fazi idejnog projekta, odnosno prostorni, u fazi detaljnije razrade. Složeniji modeli, načinjeni prostornim konačnim elementima, koriste se kada je osnovna razdioba unutarnjih sila već poznata, ili se koriste samo za razradu detalja sklopa. Kod manjih i srednjih grednih mostova oblikovanje sklopa često je dovršeno prije samog proračuna, koji služi za dimenzioniranje armature. Kod lučnih mostova često će biti potrebno korigirati os luka na osnovi rasporeda momenata savijanja u njemu, a može se razmotriti i drugačiji zakon promjene poprečnih presjeka od izvorno predviđenog.

Proračun se prvo vrši za granična stanja u uporabi, dakle za dovršen most, i to po teoriji elastičnosti (teoriji I reda). U kasnijoj fazi provode se provjere po teoriji II reda, odnosno detaljnija razrada stanja kroz koje most prolazi tijekom gradnje.

Već je ranije rečeno da luk prenosi opterećenje dominantno uzdužnom silom i savijanjem. Povoljnije stanje nastaje većim udjelom horizontalne sile. Izraz za horizontalni potisak u luku,

$R_{ch} = \frac{q L^2}{8f}$, sadrži strelicu luka f u nazivniku, dakle, čim je ona manja manji je udio horizontalne

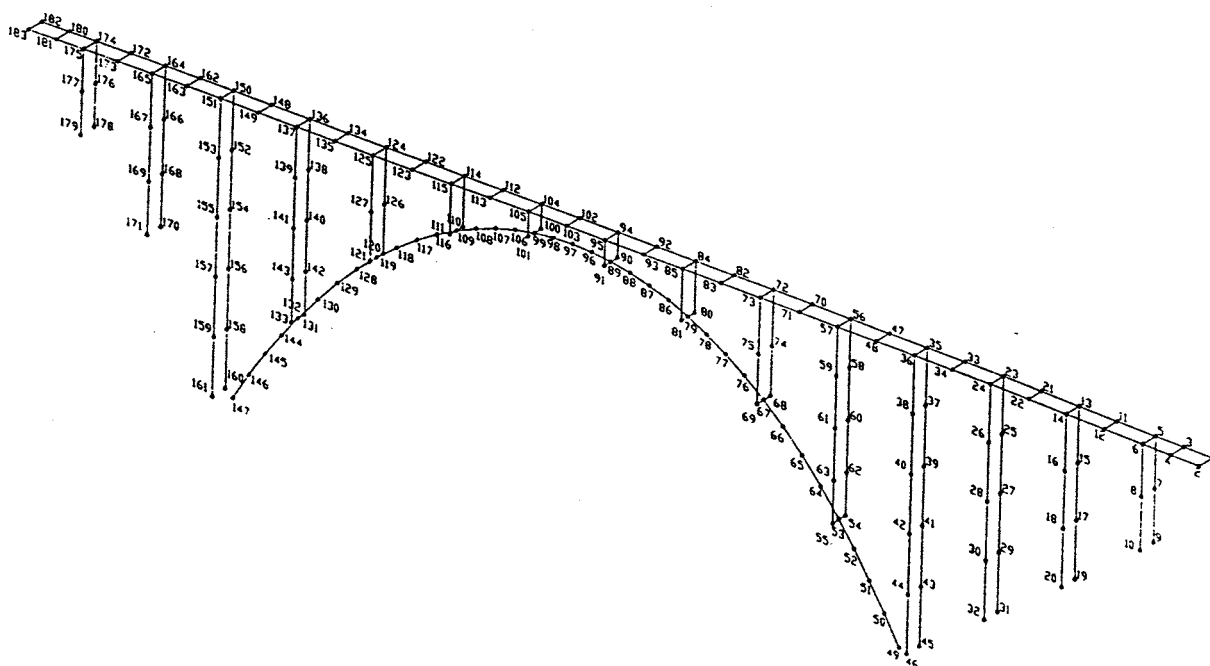
sile, a sukladno tome, povećava se opterećenje luka momentom savijanja. Uslijed vertikalnih opterećenja na luk dolazi do elastičnog skraćivanja luka, a uslijed dugotrajnih pojava u betonu dolazi do nepovratnih deformacija koje skraćuju luk. Pri ovome se strelica luka smanjuje, pa je često potrebno izvršiti provjere po teoriji II reda, uz uzimanje u obzir geometrijske nelinearnosti. Ove pojave proračunski treba predvidjeti, tako da se propiše nadvišenje luka pri izvedbi.

Kod razmatranja stanja u izvedbi proračun može biti znatno složeniji od proračuna graničnih stanja u eksploataciji mosta. Tijekom izvedbe jednim od suvremenih postupaka, luk prolazi kroz različite faze opterećenja, formirajući sustav koji po razdiobi unutarnjih sila nije sličan konačnom, a često je pridržan pomoćnim elementima od različitih gradiva, kao što su zatege ili skela. Budući da se radi o elementima manje krutosti, moguće su velike deformacije sustava, pa proračun po teoriji elastičnosti gotovo i ne daje uporabljive rezultate. Za provjere ovih stanja računalnim modelom potrebno je znatno iskustvo.

Do sada su spominjana samo vertikalna opterećenja. Za provjere na horizontalna ili djelovanja koja se mogu javiti u različitim smjerovima često će biti potrebno načiniti poseban računalni model. Razmatranja o dinamičkom proračunu prelaze okvire ovog rada, no treba upamtiti da modeli razvijeni za vertikalna opterećenja ponekad neće biti dovoljni.

Formiranje proračunskog modela započinje zamjenom lučnog ili svodenog nosača nekim brojem štapova čiji krajevi leže u odabranoj osi luka. Nizom štapova može se zamijeniti čitav nosač u poprečnom smislu (slika 48), ili se njime prikazuje presjek jedinične širine, a moguće je prikazati i neki drugi dio presjeka. Broj elemenata kojima se zamjenjuje luk nikako ne bi smio biti manji od 16. Elementi su postavljeni sekantno u odnosu na idealiziranu os, od koje najviše odstupaju u svome srednjem dijelu. Ovakvo stanje i nije daleko od stvarnog ako se luk izvodi sukcesivnim betoniranjem odsječaka, jer su oni najčešće stvarno ravni, no kod izvedbe na skeli postoji određena pogreška. Ona se manifestira u krivoj slici poprečnih sila, koje se javljaju na mjestu loma osi zbog skretanja uzdužne sile. Greška se umanjuje povećanjem broja elemenata kojima se modelira luk.

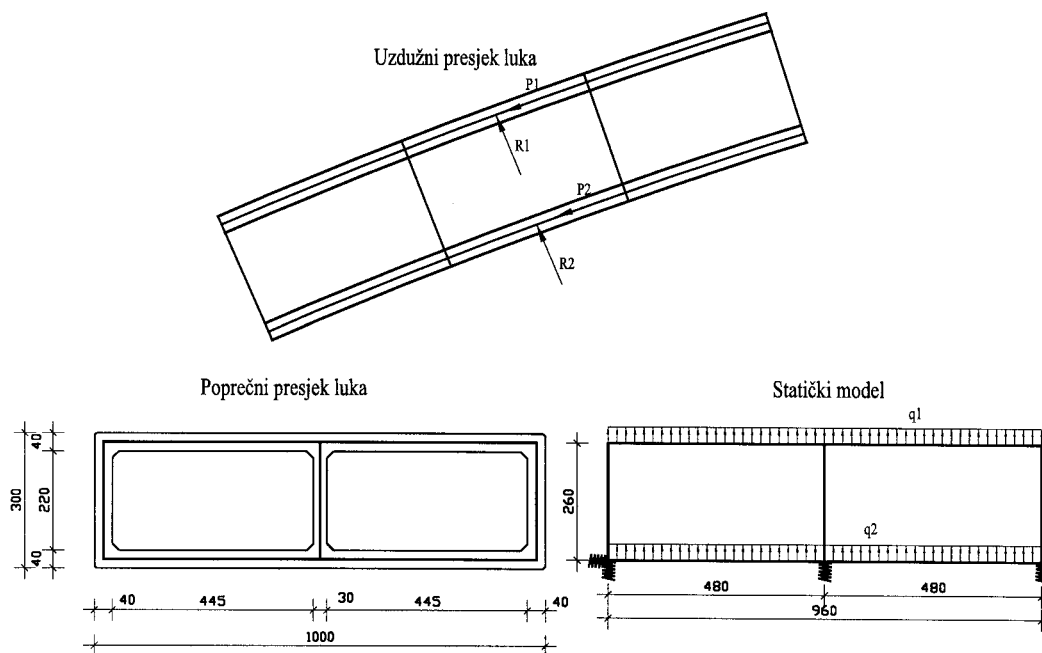
Razdioba konačnih elemenata duž luka neka bude takva da krajevi nadlučnih stupova padaju u čvorove na luku. To znači da elementi između točaka oslanjanja nadlučnog sklopa mogu biti jednake duljine, ali je načelno luk modeliran elementima različite duljine.



Slika 48. Jedan od numeričkih modela novog Masleničkog mosta. Luk je modeliran jednim nizom štapova, dok je nadlučni sklop, zbog velike širine, zamijenjen s 2 niza štapova.

5.5.5 Proračun luka u poprečnom smjeru

Unutrašnje rebro ne pridonosi torzijskoj krutosti luka i otežava izvedbu, ali se eventualno postavlja zbog smanjenja momenata savijanja koji se u poprečnom smjeru pojavljuju od djelovanja vlastite težine, skretnih sila i korisnog tereta. Skretne sile u gornjem i donjem pojasu luka šupljeg poprečnog presjeka djeluju prema gore, u suprotnom smjeru od djelovanja gravitacije a njihova vrijednost može biti i veća od vlastite težine.



Slika 49. Proračun skretnih sila.

Skretne sile računaju se prema:

$$q_1 = \frac{P_1}{R_1} \quad \text{i} \quad q_2 = \frac{P_2}{R_2}$$

gdje je:

P_1 – uzdužna sila u gornjoj ploči (kN/m) $P_1 = \sigma_{m1} \cdot h_{gpl}$

R_1 – radijus zakrivljenosti osi gornje ploče (m).

σ_{m1} – napon u sredini gornje ploče (kN/m²).

h_{gpl} – debljina gornje ploče (m).

Konačan izraz za vrijednost skrene sile u gornjoj ploči glasi:

$$q_1 = \frac{P_1}{R_1} = \frac{\sigma_{m1} \cdot h_{gpl}}{R_1} \quad (\text{kN/m}).$$

U proračunu kao i kod sandučastih grednih mostova potrebno je uzeti u obzir i opterećenja temperaturom. Moguće razlike u temperaturi u unutrašnjosti luka i vani, te razlike između osunčane strane i strane u hladu.

Uzdužna armatura luka kreće se od ϕ 20 do ϕ 28 na razmacima od 15 do 20 cm. Vilice se kreću od ϕ 16 do ϕ 22 na razmacima od 15 do 20 cm. Zbog bolje ugradnje i vibriranja betona poželjno je koristiti što veće razmake armature.

5.6. Literatura

- [1.] Tonković, K.: MOSTOVI, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1981.
- [2.] Tonković, K.: MASIVNI MOSTOVI – OPĆA POGLAVLJA, Školska knjiga, Zagreb, 1977.
- [3.] Tonković, K.: MASIVNI MOSTOVI – GRAĐENJE, Školska knjiga, Zagreb, 1979.

- [4.] Čandrlić, V.: SKRIPTE UZ PREDAVANJA, korištene na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, šk. god. 1999./2000.
- [5.] Polivanov, N.I.: ARMIRANOBETONSKI GRADSKI I DRUMSKI MOSTOVI, Građevinska knjiga, Beograd 1959.