

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski strokovni študij
gradbeništva, Smer operativno
gradbeništvo

Kandidat:

Vedran Mekić

Sodobne tehnologije gradnje mostov

Diplomska naloga št.: 364

Mentor:
doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 2010

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **VEDRAN MEKIĆ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»**SODOBNE TEHNOLOGIJE GRADNJE MOSTOV**«

Izjavljam, da se dela za potrebe elektronske separatorke FGG odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela.

Ljubljana, 22.01.2010

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.21(043.2)
Avtor:	Vedran Mekić
Mentor:	Doc. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Sodobne tehnologije gradnje mostov
Obseg in oprema:	105 str., 1 pregl., 57 sl.
Ključne besede:	Konstruktivni sistemi mostov, gredni mostovi, tehnologija gradnje mostov, prostokonzolna gradnja, narivanje, montažna gradnja,

Izveček

V diplomski nalogi sem opravil pregled in analizo konstrukcijskih sistemov mostov, s poudarkom na grednih armiranobetonskih mostovih. S prednostmi in slabostmi so opisani posamezni statični sistemi različnih konstrukcijskih sistemov.

V nadaljevanju so predstavljene različne tehnologije gradnje mostov in primernost njihove uporabe v odvisnosti od dolžine razponov, statičnih sistemov, skupnih stroškov in hitrosti gradnje. Podrobno sta opisani prostokonzolna gradnja in gradnja z narivanjem.

Poudarek je na tehnologijah, ki se uporabljajo tudi v Republiki Sloveniji. Opisal sem tudi najzahtevnejše gradnje na slovenskem ozemlju. Nato sem analiziral dejavnike, ki vplivajo na odločitev o izbiri konstrukcijskega sistema in tehnologije gradnje. Posamezne tehnologije sem tudi primerjal med seboj. V zaključku pa sem podal še svoje mnenje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	624.21(043.2)
Author:	Vedran Mekić
Supervisor:	Assist. Prof. Jože Lopatič
Title:	Contemporary technologies for building bridges
Notes:	105p., 1 tab., 36 fig.
Key words	Constructional systems of bridges, beam bridges, technology for building bridges, balanced cantilever, incremental launching, precast construction

Abstract

In my graduation thesis I made a review of the different constructional systems of bridges. I placed more stress on beam bridges, that are made of reinforced concrete. Than I represented different statical systems of bridges with their advantages and disadvantages.

Below this I was discussing about different technologies for building bridges and their suitability in depend of the bridge's spans, statical systems, expenditure and time of building. I put more attention on balanced cantilever method, incremental launching and other technologies that are often used in Slovenia. Further in the thesis I presented some Slovenian bridges, which design and building was very hard also in the global point of view. In continuing of the document I made an analyse of factors that have an influence on the decision about which constructional system and which technology to choose in specific situation. I also compared different technologies. In conclusion I put also my opinion.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Jožetu Lopatiču.

Zahvaljujem se tudi staršema in podjetju Kraški zidar, ki so mi med študijem nudili finančno pomoč.

Zahvala gre tudi začasnemu mentorju prof. Ladislavu Klusačku, ki me je usmerjal v času opravljanja diplomske naloge na študijski izmenjavi v Brnu na Češkem.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PREGLED MOŽNIH KONSTRUKCIJSKIH SISTEMOV MOSTOV	7
2.1	Gredni mostovi	9
2.1.1	Statični sistemi grednih mostov	12
2.1.1.1	Posamezni prosto položeni vzdolžni nosilci	13
2.1.1.2	Nosilci s protiutežmi	13
2.1.1.3	Niz prosto ležečih nosilcev	14
2.1.1.4	Gerberjevi nosilci	15
2.1.1.5	Kontinuirni nosilci	15
2.1.1.6	Konzolni nosilci	16
2.1.2	Vrste prečnih prerezov grednih mostov	17
2.1.2.1	Ploščaste konstrukcije	19
2.1.2.2	Prerezi z vzdolžnimi nosilci	19
2.1.2.3	Škatlasti prečni prerezi	20
2.2	Okvirni mostovi	22
2.2.1	Statični siste okvirnih mostov	22
2.2.1.1	Tročlenski okvirji	22
2.2.1.2	Dvočlenski okvirji	23
2.2.1.3	Zaprti okvirji	23
2.2.2	Okvirji s poševnimi stebri	23
2.3	Ločni mostovi	24
2.3.1	Statični sistemi ločnih mostov	26
2.3.1.1	Vpeti loki	28
2.3.1.2	Enočlenski loki	28
2.3.1.3	Dvočlenski loki	28
2.3.1.4	Tročlenski loki	29
2.3.1.5	Rešetkasti loki	29

2.3.2	Oblika loka	29
2.4	Mostovi s poševnimi zategami	31
2.4.1	Dispozicija in statični sistemi	32
2.4.1.1	Nosilci z obešenimi mizami	33
2.4.1.2	Konzolno viseči nosilci	33
2.4.1.3	Kontinuirni viseči nosilci	34
2.4.1.4	»Extradosed« mostovi	34
2.4.2	Oblike nosilne konstrukcije	35
2.4.3	Oblike pilona	37
2.4.4	Zatege	38
2.5	Viseči mostovi	39
2.5.1	Konstruktivske posebnosti visečih mostov	40
3	TEHNOLOGIJA GRADNJE MOSTOV	42
3.1	Monolitna gradnja	44
3.1.1	Izvedba na nepomičnem gradbenem odru	44
3.1.2	Izvedba na pomičnem gradbenem odru	47
3.2	Montažna gradnja	50
3.2.1	Vgradnja montažnih elementov	51
3.2.2	Polmontažni postopki	54
3.2.2.1	T nosilci	54
3.2.2.2	I nosilci	55
3.3	Prostokonzolna gradnja	57
3.3.1	Monolitna prostokonzolna gradnja grednih mostov	59
3.3.2	Montažna konzolna gradnja grednih mostov	63
3.3.3	Monolitna konzolna gradnja ločnih mostov	66
3.3.4	Obračanje pollokov	67
3.3.5	Prostokonzolna gradnja mostov s poševnimi zategami	68
3.4	Gradnja s pomočjo narivanja in vzdolžnega vlečenja	69

4	PREGLED NEKATERIH OBSTOJEČIH MOSTOV IN PROBLEMOV PRI GRADNJI	78
4.1	Most čez Muro	78
4.1.1	Potek gradnje	80
4.2	Viadukt Črni Kal	83
4.3	Ločni most Predel	86
4.3.1	Tehnologija gradnje loka	87
4.3.2	Gradnja mostu	89
4.4	Vzpostavitev nosilnosti za primer izrednih obremenitev	90
5	IZBIRA KONSTRUKCIJSKEGA SISTEMA IN TEHNOLOGIJE GRADNJE V ODVISNOSTI OD OKOLJSKIH RAZMER	93
5.1	Dejavniki, ki vplivajo na odločitev o izbiri konstrukcijskega sistema	93
5.1.1	Dispozicija in dolžina razponov	95
5.1.2	Glavni nosilni sistem	96
5.2	Primerjave tehnologij gradnje	96
5.2.1	Manjši mostovi	97
5.2.2	Večji mostovi	98
5.2.3	Izbira tehnologije gradnje	99
5.3	Zanesljivost in življenjska doba mostov	100
5.4	Zaključek	102

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primer delovnih aktivnosti za gradnjo enega takta v sedmih dneh po prostokonzolni tehnologiji.

61

KAZALO SLIK

Slika 1: Prednapenjanje nadvoza v Kopru	2
Slika 2: Različne rešitve konstrukcijskega sistema, različne dimenzije razponov, različna tehnologija izvedbe in različni prerezi za premostitev enake ovire	4
Slika 3: Karakterističen vzdolžni in prečni presek mosta	6
Slika 4: Razdelitev mostov glede na nosilne sisteme	8
Slika 5: Gredni most	9
Slika 6: Železniški most Britanija	10
Slika 7: Gredni mostovi so zelo primerni za krivine, kjer se prepletajo prometni tokovi	11
Slika 8: Različni statični sistemi in racionalni razponi	12
Slika 9: Konstrukcija s protiutežmi	14
Slika 10: Gerberjevi nosilci	15
Slika 11: Konzolni nosilec	17
Slika 12: Pregled treh različnih vrst prerezov	18
Slika 13: Okvirni most	22
Slika 14: Vzdolžni presek zaprtega okvirja	23
Slika 15: Ločni most Predel	24
Slika 16: Pregled različnih statičnih sistemov ločnih objektov	27
Slika 17: Most Rion-Antirion	31
Slika 18: Most Maracaiobo	33
Slika 19: Puhov most na Ptuj	34
Slika 20 in slika 21: Pahljačasta oblika zateg vpetih na vrhu pilona in vzporedne zatege	36
Slika 22: Različne oblike pilona	37
Slika 23: Nový Most v Bratislavi - nagnjen pilon	38
Slika 24: Viseči most Akashi Kaikyo ima najdaljši razpon med stebri-1991m	39
Slika 25: Različne variante izvedbe visečega mosta	41
Slika 26: Nepomični oder, ki se opira na stebre	44
Slika 27: Podpiranje mostu s tal	45
Slika 28: Vezanje armature	47
Slika 29: Pomični gradbeni oder	49
Slika 30: Razčlenjenost na posamezne montažne elemente	51
Slika 31: Montaža segmentov	53

Slika 32: Enostavni montažni postopek gradnje okvirnih mostov	53
Slika 33: Monolitna povezava prečnika s T nosilci	55
Slika 34: Lansirni rešetkasti nosilec je zelo uporaben pri montažni gradnji	56
Slika 35: Rešetkasti nosilec mora omogočiti gibanje tudi v prečni smeri saj se le tako lahko vzporedno namesti več montažnih nosilcev	56
Slika 36: Kabli posameznih segmentov	58
Slika 37: Potek kablov v spodnji plošči	58
Slika 38: S prostokonzolno gradnjo se je gradil tudi črnokalski viadukt	59
Slika 39: Faze betoniranja škatlastega prereza	62
Slika 40: Začasno podpiranje mostu	63
Slika 41: Segmentna gradnja	64
Slika 42: Podpiranje loka s pomočjo zateg in začasnega pilona	66
Slika 43: Faze betoniranja in obračanja polloka	67
Slika 44: Med postopkom narivanja je na prekladno konstrukcijo pričvrščen jeklen kljun	69
Slika 45: Narivanje poteka s pomočjo hidravličnih batov.	70
Slika 46: Postopek narivanja	73
Slika 47: Hidravlična naprava za narivanje	74
Slika 48: Princip delovanja hidravličnih batov	74
Slika 49: Kabli ustrezajo ovojnici upogibnih momentov	75
Slika 50: Most čez Muro	78
Slika 51: potek zunanjih kablov	80
Slika 52: Sredinski razpon je premoščen s pomočjo zunanjih zateg	82
Slika 53: Viadukt Črni kal slikan iz koprške strani	83
Slika 54: Potek konzolne gradnje Črnokalskega viadukta	85
Slika 55: Ločni most Predel	86
Slika 56: Prostokonzolna gradnja loka s pomočjo poševnih zateg	89
Slika 57: Neugodne zasnove prečnih prerezov	91

1 UVOD

V začetku so bili premostitveni objekti v glavnem iz lesa in kamna. Kitajci so že davno gradili kamnite mostove, ki stojijo še danes. Kamniti mostovi so bili značilni tudi za Rimljane in za obdobje srednjega veka. V Sloveniji imamo velik Solkanski most, ki še danes velja v mnogih pogledih za rekordni dosežek med kamnitimi mostovi. Izpostaviti je potrebno tudi Mostarski kamniti most, ki je bil zgrajen že leta 1566. Ta most ja eden najznamenitejših dosežkov turške arhitekture. Mostarski most je bil za svoje čase tako napreden, da so zanj rekli, da je mojstrovina, ki bo osramotila vse arhitekta. Nekateri še danes trdijo, da je to rimski in ne turški most. Kasneje so kamnite mostove nadomestili jekleni, betonski in sovprežni mostovi. V začetku 20. stoletja stopi beton med konkurenčne materiale in postane v sredini 20. stoletja primarni material za gradnjo premostitvenih objektov. Med premostitvene objekte uvrščamo mostove in viadukte. V diplomski nalogi bom uporabljal le besedo most.

Beton je zaradi svojih lastnosti zelo hvaležen material, brez katerega si sodobne gradnje mostov ne moremo predstavljati. Najboljša lastnost je, da z njim lahko oblikujemo prereze različnih oblik. Poleg tega zelo dobro prenaša tlake in ima relativno dobro odpornost na agresivno delovanje okolja. Slabost betona je majhna natezna odpornost. Za prevzem nateznih sil zato v beton pravilno vstavimo armaturo v natezno cono prereza. Ko se zaradi nateznih obremenitev v takšni coni pojavijo razpoke v betonu, se aktivira natezna nosilnost armature, kateri pripišemo vse natezne obremenitve elementa.

Pravo revolucijo v gradnji mostov je v petdesetih letih 20. stoletja povzročila uporaba prednapetega betona. Princip delovanja je takšen, da se v natezno najbolj obremenjene cone vstavi jeklene kable in se jih napne še pred nanosom obtežbe. Kable se vstavi v rebraste cevi v cono prereza, ki bo natezno obremenjena in se jih s pomočjo hidravlične opreme natezno obremeni. Posledica tega je, da dobimo v betonu dodatne tlake. Po nanosu obtežbe tako dobimo v coni, ki naj bi bila natezno najbolj obremenjena, zmanjšane natezne napetosti ali pa celo tlačne napetosti (zaradi vnešenega tlaka v beton, ki je posledica prednapenjanja). Na ta način se odpornost obremenjenega elementa močno poveča. Zaradi uporabe prednapetega betona so nosilci lahko postajali vse bolj vitki, razponi pa so bili vse daljši v primerjavi z

armiranim betonom. Prednapenjanje je ugodno tudi, ker preprečuje nastanek nateznih razpok, ki so posledica obremenitve zaradi zunanje obtežbe. Napetosti v prednapetih konstrukcijah so veliko enakomerneje porazdeljene in zato je tudi prerez bolj izkoriščen. Zaradi nerazpokanosti prereza, je konstrukcija tudi bolj toga, pomiki zaradi zunanje obtežbe pa so bistveno manjši, ker jih kompenziramo s pomiki zaradi prednapetja, ki so nasprotno usmerjeni. Pomanjkljivost takšnih konstrukcij je, ker moramo imeti večji prerez za prevzem tlačnih napetosti in namestitev kablov. Prednapeti mostovi so takoj postali zelo priljubljeni tudi zaradi nižje cene, v primerjavi z jeklenimi mostovi. Poleg tega pa je tudi vzdrževanje veliko lažje.



Slika 1: Prednapenjanje nadvoza v Kopru

(lastna fotografija).

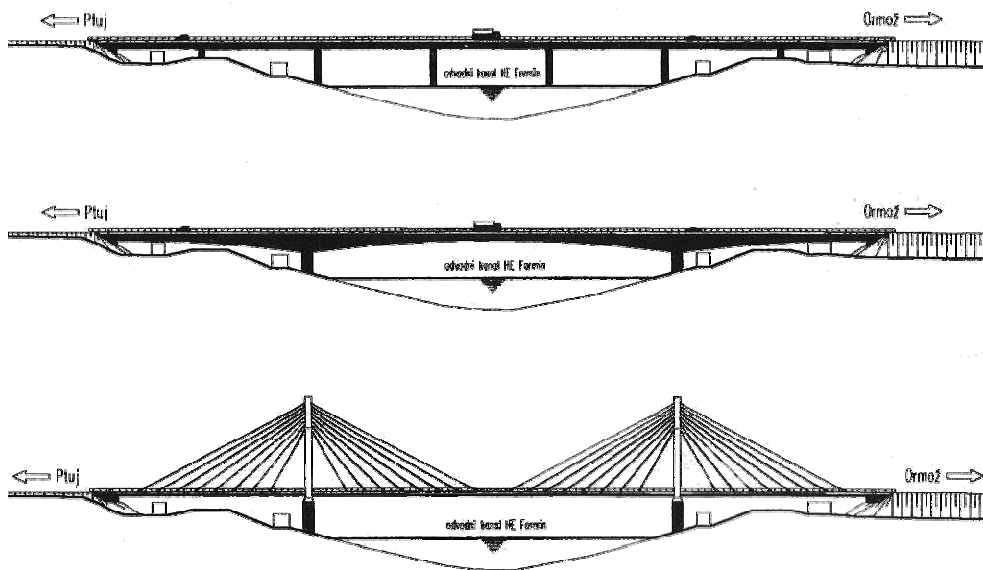
Optimalna konstrukcijska rešitev je odvisna od cele vrste parametrov. Pred pričetkom načrtovanja in gradnje mostu je potrebno najprej imeti bistvene podatke, ki so potrebni:

- načrt, kjer so vidne vse možne ovire, ki jih je potrebno premostiti. Ovire so lahko reke, ceste, kanjoni, železniške proge.... V takšni fazi konstruktorji približno že vedo kje bo potekala nova prometnica,

- vzdolžni prerez potencialne trase,
 - potrebna širina mostu. Od širine mostu je odvisna računsko obtežba,
 - vrsta in nosilnost tal. Rezultate se dobi s pomočjo vrtin. Kot rezultat poda geolog geološko poročilo. Podatki o lastnostih tal so zelo pomembni, saj vplivajo na izbiro konstrukcijskega sistema ter na ekonomsko najugodnejše razpone,
 - lokalni pogoji, kot na primer možnost dostopa na gradbišče za transport opreme, materialov in konstrukcijskih elementov. Kateri materiali so razpoložljivi in ekonomični na tem področju ali sta električna energija in voda pri roki ali je možna uporaba moderne tehnologije gradnje,
 - vreme in druge krajevne razmere, ki so značilne za to področje, kot so možnost poplav, vodostaj, dolžina sušnega obdobja, povprečni letni potek temperatur, možnost zmrzali,
 - topografija okoljskega terena (nižinski svet, gorat svet, naselje s posameznimi hišami, veliko mesto z visokimi zgradbami). Tudi ti pogoji vplivajo na izbiro mostu.
- Konstruktor mora biti seznanjen z lego mostu in z njegovo okolico.

Glede na zgornje podatke, v primeru manjših mostov izkušen konstruktor ob oceni kakšna vrsta mostu bi bila najprimernejša, kakšen vpliv imajo pogoji temeljenja na odločitev o razponu in o konstrukcijskem sistemu, kam postaviti stebre ter kakšna vrsta temeljenja je primerna. Ko je izdelan osnutek načrta planiranega mostu, se pristojni pogovorijo o morebitnih težavah. Konstruktor pa se odloči kakšne vrste stebrov, in kakšno obliko prečnega prereza bo uporabil.

Pri večjih mostovih pa konstruktor v idejni študiji poizkuša z nekaj alternativnimi rešitvami z drugačno skupno dolžino, z drugačnimi razponi, z drugačnimi konstrukcijskimi sistemi in z drugačno tehnologijo izvedbe. Nato se rezultate primerja in se tako lažje sprejme odločitev o najugodnejši rešitvi. Ta faza je zelo pomembna, saj dober koncept v veliki meri zagotavlja uspešnost projekta. Preostala dela so prav tako pomembna, vendar so bolj rutinska. V idejni študiji se obdelujejo in ocenjujejo vsi aspekti, ki vplivajo na projekt zato, da bi prišli do najugodnejše rešitve za iskan namen na predvideni lokaciji.



Slika 2: Različne rešitve konstrukcijskega sistema, različne dimenzije razponov, različna tehnologija izvedbe in različni prerezi za premostitev enake ovire

(vir: Markelj V. Projekt mosta s poševnimi zategami čez kanal Forcin. Saje F. in Lopatič J. Zbornik 23. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 57).

Šele sedaj se prične z izračuni, pa še to z grobo natančnostjo, le toliko, da se preveri ali bodo določene dimenzije zadostne, oziroma ali je v prerezu na najbolj obremenjenih mestih, kjer bo več armature oziroma prednapeti beton dovolj prostora za vgradnjo betona. Nato se uporabijo še računalniški programi, s pomočjo katerih lahko spremenimo nekatere dimenzije elementov in tako pridemo do bolj ekonomične in običajno tudi do bolj estetske rešitve. Za tem se prične z izdelovanjem načrtov. Ker pa pogosto načrti ne zadostujejo za pridobitev prave predstave o tem, kako bo most umeščen in skladen s prostorom ter kakšen vpliv nanj bo imel, je pogosto potrebno v razmerju izdelati še maketo objekta z okolico oziroma računalniško simulacijo. Tako tudi zaskrbljeno prebivalstvo dobi boljšo predstav o posegu v okolje.

Po odobritvi predhodnega dela se prične z natančnim izračunom notranjih statičnih količin za vse vrste obtežbe, kateremu sledi izdelava končnih načrtov mostu. Pred pričetkom gradnje je potrebno zagotoviti tudi opremo, ki ustreza izbrani tehnologiji gradnje.

Pri zahtevnih objektih je zelo priporočljivo, da odgovorni investitorji zaradi čim manjših možnosti nastanka napak zahtevajo izvajanje neodvisne inženirske kontrole. Pobuda za takšno kontrolo je prišla potem, ko sta se leta 1970 zrušila mostova Milford Haven bridge in Melbourne. »Strošek dodatne kontrole, s katerim se zmanjša možnost napake, je zelo majhen v primerjavi s koristjo, ki jo takšna kontrola prinese«. (Rožič D. in Markelj V. ICE-neodvisna inženirska kontrola na primeru mostu preko Save v Beogradu. V: Saje F. in Lopatič J. (ur.). Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 8.-9. Oktober 2009. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 41). Pri večjih projektih znaša dodatni strošek neodvisnega inženirja le okoli 0,5% od vrednosti investicije. Cilj takšne kontrole je zasnovati varno konstrukcijo, ki jo bo mogoče zgraditi brez zastojev in za primerno ceno. Neodvisni projektant pri tem ugotavlja ali je projekt izdelan brez napak in ali bo varen za uporabo. Neodvisna inženirska kontrola obsega naslednje aktivnosti:

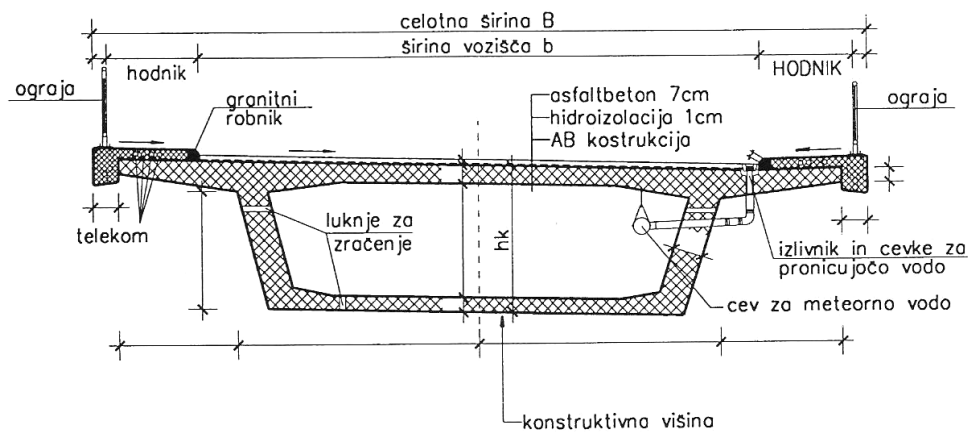
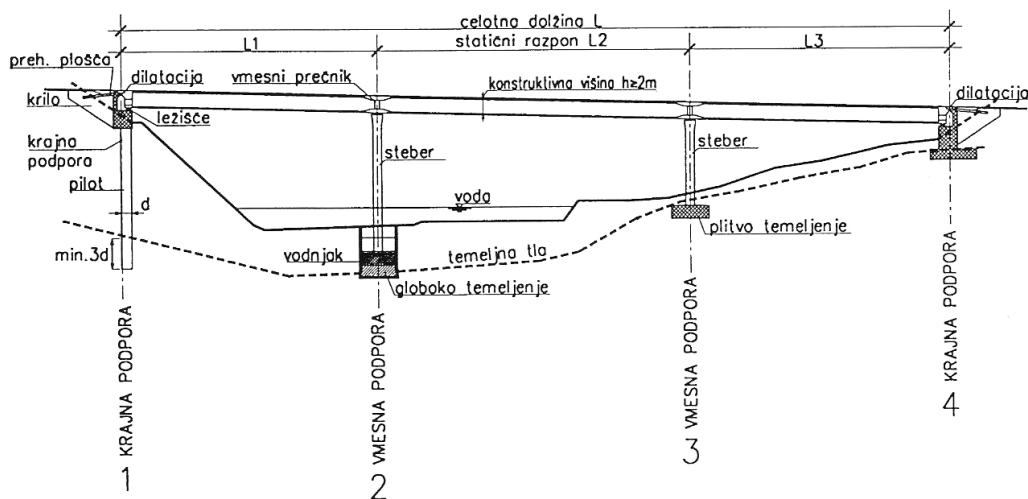
- pregled zasnove objekta,
- pregled dokumentacije (geološko-geomehansko poročilo, poročilo o potresni ogroženosti),
- izdelava lastnega neodvisnega računskega modela na podlagi obtežb, ki jih zahtevajo standardi.
- kontrola predvidenih faz gradnje,
- pregled risb,
- ocena obnašanja konstrukcije v fazi uporabe,
- izdaja potrdila neodvisne inženirske kontrole.

Lahko pa se kontroli doda še ostale aktivnosti, kot so:

- pregled osnovnih predpostavk projekta,
- pregled opažnih in armaturnih načrtov in
- dodatne študije, s katerimi se potrdi primernost izbrane konstrukcije.

Danes se v praksi stremi k temu, da naj konstruktor ne bo specializiran za gradnjo objektov po vrsti uporabnega materiala, pač pa po vrsti konstrukcijskega sistema in naj ne bo le statik, ampak projektant in graditelj objekta, ki hkrati skrbi za varnost, funkcionalnost, oblikovanje

in trajnost objekta. Ko je most zgrajen, je potrebno njegovo redno vzdrževanje, zato, da bo njegova življenjska doba primerno dolga.



Slika 3: Karakterističen vzdolžni in prečni prerez mosta

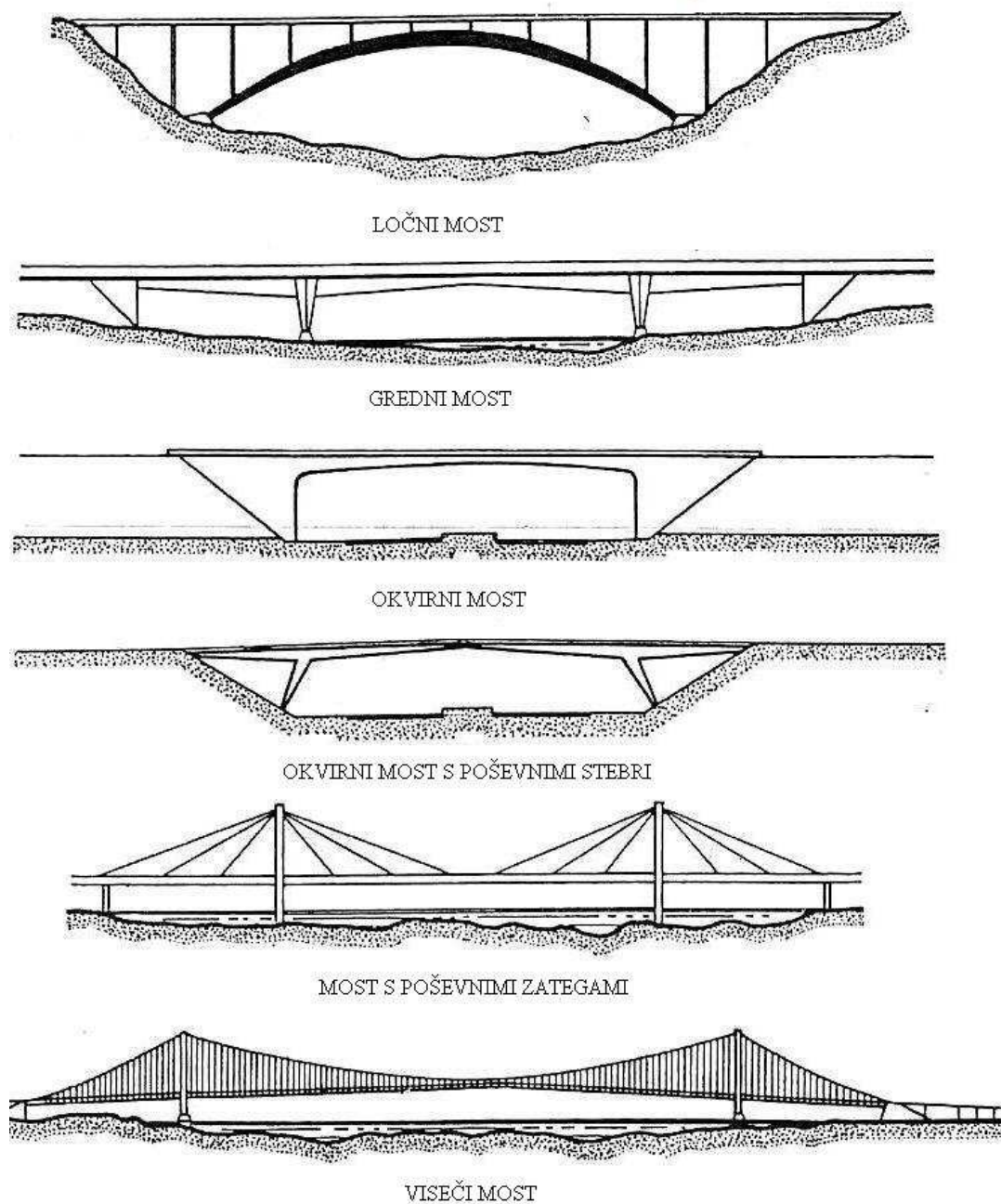
(vir: Ministrstvo za promet in zveze. Smernice za projektiranje premostitvenih objektov, str 7).

2 PREGLED MOŽNIH KONSTRUKCIJSKIH SISTEMOV MOSTOV

Mostovi lahko obremenjujejo okolje, zato je potrebno še bolj paziti na njihovo oblikovanje in skladno vključevanje v urbani in ruralni prostor. Pri projektiranju je konstruktor nosilec projekta. Njegov cilj je, da se ob zagotavljanju gradbene funkcionalnosti in varnosti konstruira skladna oblika inženirske konstrukcije in objekta kot celote, samostojno ali v sodelovanju z arhitektom oblikovalcem. Izbira nosilnega sistema nastane na osnovi preučitve funkcije objekta, morfologije ovire, geoloških lastnosti tal, geometrije prometnic, izrabe terena v območju objekta, karakteristik gradbenih materialov, razpoložljivih tehnologij, podlog za projektiranje. Za izbrani konstrukcijski sistem se spreminjajo razpetine, skupna dolžina, namestitve stebrov, izbere se material nosilne konstrukcije in nakažejo se možni načini gradnje. Osnovni dispozicijski elementi omogočajo analizo in konstruiranje različnih variant prečnih prerezov nosilne konstrukcije. Dobro in pravilno projektirana nosilna konstrukcija je običajno skladno in logično oblikovana. Zlasti za avtocestne mostove velja arhitektonsko pravilo, da je okraševanje objekta z nepotrebnimi oblikovnimi dodatki nezaželeno. Dober in uspešen projektant mora poznati zgodovino arhitekture in gradbeništva, kar mu olajša delo pri oblikovanju mostov in ga usmerja k sodelovanju in posvetovanju z arhitektom oblikovalcem.

Mostove lahko delimo po raznih kriterijih, na primer: po namenu, materialu, lokaciji. Za projektiranje, konstruiranje in statično analizo je najvažnejša razdelitev glede na nosilne sisteme. Glede na zasnovo konstrukcije, obliko, način prevzema ter prenosa sil razlikujemo pet osnovnih nosilnih konstrukcijskih sistemov mostov:

- gredne sisteme,
- okvirne sisteme,
- ločne sisteme,
- viseče sisteme in
- sisteme s poševnimi zategami.



Slika 4: Razdelitev mostov glede na nosilne sisteme

(vir: Jure Radić. Mostovi, str. 196).

Nosilna konstrukcija prenaša obtežbo iz funkcionalnega dela mostu v tla. Mostovi so lahko iz enega konstrukcijskega sistema, več enakih ali pa več različnih. Kot primer lahko vzamemo ločni most, ki premošča kanjon. Takšen most je lahko sestavljen iz gredne in ločne konstrukcije.

2.1 Gredni mostovi



Slika 5: Gredni most

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=26036>, datum 20.12.2009. Slikal: Philip Bourret).

Izhodišče grednih mostov predstavljajo leseni hlodi in kamnite plošče v horizontalnem položaju nad prepreko. Osnovni karakteristiki grednih mostov sta ločenost zgornje konstrukcije od podpor ter dejstvo, da se obtežbe zgornje konstrukcije prenašajo na spodnjo konstrukcijo preko ležišč. Če se že pojavijo tudi vzdolžne sile, pa le te praviloma predstavljajo relativno majhne obremenitve. Ker se na ležiščih pojavljajo zaradi gravitacijskih obtežb pretežno vertikalne sile, je gradnja spodnje konstrukcije relativno enostavna. Gredne konstrukcije različnih konstrukcijskih in statičnih variant so najbolj pogosto uporabljen nosilni sistem pri mostovih z manjšimi ali s srednjimi razponi. Razlogi za to so predvsem enostavnost izvedbe ter oblikovna in funkcionalna prilagodljivost na različne naravne pogoje in prometne potrebe. Posebej primerne so za zelo dolge mostove, za mostove v krivinah, s prometnimi pentljami in za takšne, kjer se prometnice prepletajo na več nivojih. Velika prednost pred drugimi nosilnimi sistemi je tudi najmanjša potrebna razpoložljiva višina za

gradbeni oder, kar pride posebej do izraza pri prepletanju prometnic. Teorija grednih mostov se je razvijala preko lesenih in jeklenih, do armiranih in prednapetih mostov. Prvi večji kovinski mostovi so se začeli graditi z napredkom proizvodnje železa in z iznajdbo varjenega železa podobnih lastnosti današnjemu jeklu. Iz tega obdobja je tudi železniški most Britanija s srednjima razponoma za tiste čase izjemnih 141m. V 17. stoletju so se nato razvili rešetkasti vzdolžni nosilci za železniške mostove.



Slika 6: Železniški most Britanija

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 32).

Za razliko od ločnih mostov, kjer so dominantne osne sile, so pri grednih konstrukcijah dominantni upogibni momenti in prečne sile, kar pogojuje drugačno zasnovo nosilne konstrukcije, kot v primeru kjer so dominantne osne sile. V primerjavi z ločnimi je poraba armature pri grednih konstrukcijskih sistemih veliko večja. Večji so tudi stroški materiala. Prednost grednih mostov pa je v hitrejši in enostavnejši izvedbi, bolj rutinskem delu in tudi v enostavnejšem projektiranju. Velika prednost je tudi relativno majhna občutljivost na pomike podpore. Zaradi pomikov podpore v horizontalni nosilni konstrukciji ne pride do večjih dodatnih horizontalnih sil. V nasprotju s tem pa so ločne konstrukcije zelo občutljive na diferenčne posedke. Ekonomične so montažne gredne konstrukcije, saj se lahko posamezne dele predhodno izdelata. Predhodno izdelani elementi so lahko standardizirani in se jih zato lahko uporabi na več različnih objektih. Pri monolitni gradnji pa je zaradi poenostavljanja gradbenega odra in opaža zaželeno predvsem poenotenje prečnih prereзов. Prečni prerez gredne konstrukcije je odvisen od geometrijskih razmerij, od širine konstrukcije, od tehnologije gradnje in od razponov posameznih polj. Pri grednih mostovih je zelo pomembna

ustrezna ureditev ležišč in prehodnih konstrukcij. Gredni sistemi so primerni za vse materiale (les, armiran beton, prednapeti armiran beton, jeklo – s in brez sovprežnosti) razen kamna.

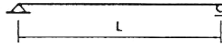
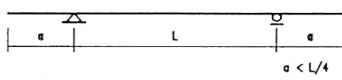
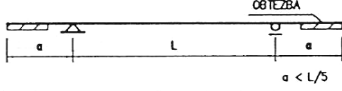
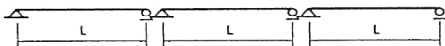
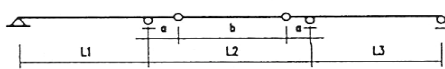
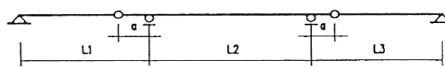
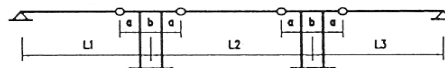
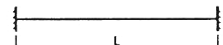
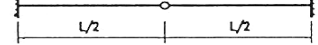
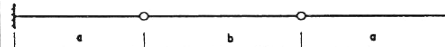
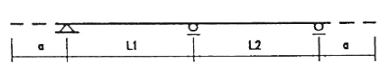
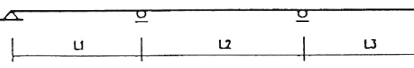
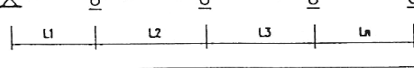


Slika 7: Gredni mostovi so zelo primerni za krivine, kjer se prepletajo prometni tokovi (vir: Leonhardt Fritz. 1994. Brucken: Asthetik u. Gestaltung, str. 137).

V drugi polovici 20. stoletja so se gredni mostovi hitreje razvili in zato je danes možno doseči razpone tudi daljše kot 300m. Razlogi za to so predvsem v:

- razvoju tehnike prednapenjanja,
- boljših karakteristikah betona in armaturnega jekla,
- montažni gradnji in
- prostokonzolni gradnji in gradnji z metodo narivanja prekladne konstrukcije.

2.1.1 Statični sistemi grednih mostov

ZAPOREDNA ŠTEVILKA	STATIČNI SISTEM	STATIČNA DOLOČENOST	NAZIV STATIČNEGA SISTEMA MOSTU	MEJE RACIONALNIH RAZPONOV MOSTOV (L v m')			
				ARMIRANI BETON	PREDKAPETI ARMIRANI BETON	SOVPREŽNI PRESEK JEKLO-BETON	KONSTRUKCIJSKO JEKLO
1		STATIČNO DOLOČENI SISTEMI	GREDA NA DVEH PODPORAH	5-15(20)	15-45	25-45	40-80
2			GREDA NA DVEH PODPORAH S KONZOLAMI	15-30	25-50	-	-
3			GREDA NA DVEH PODPORAH S KONZOLAMI IN KONTRA OBTEZBO	20-40	30-50	-	-
4			NIŽ GREDA NA DVEH PODPORAH	-	15-45	25-45	40-80
5			GREDA NA ENEM POLJU S KONZOLAMI IN OBESENIM NOSILEM "GERBERJEV NOSILEC"	20-40	30-50	-	-
6			GERBERJEV NOSILEC S ČLENKI V KROVNIH POLJH	20-40	30-50	-	-
7			"STOL" S KONZOLAMI ZA OBESENE NOSILCE	-	60-120	-	-
8		STATIČNO NEDOLOČENI SISTEMI	VPETA GREDA	20-50	50-120	-	60-200
9			VPETA GREDA S ČLENKOM V SREDINI	20-40	50-120	-	-
10			VPETA GREDA Z OBESENIM NOSILEM	-	75-150	-	-
11			KONTINUIRANA GREDA PREKO DVEH POLJ S ALI BREZ KONZOLE	15-25	25-80	25-80	50-150
12			KONTINUIRANA GREDA PREKO TREH POLJ	15-35	35-150	35-150	60-250
13			KONTINUIRANA GREDA PREKO VEČ POLJ	15-30	30-150	30-150	60-250

Slika 8: Različni statični sistemi in racionalni razponi

(vir: Ministrstvo za promet in zveze. Smernice za projektiranje premostitvenih objektov, str 33).

Glede na statični sistem imamo različne možnosti koncipiranja grednih sklopov. Razlikujemo gredne mostove s statično določenimi sistemi in statično nedoločenimi sistemi. Statični sistem je odvisen od tega ali imamo prosto ležečo konstrukcijo, kontinuirno konstrukcijo, od števila in razporeditve prekinitev, od različnih načinov povezanosti gornje in spodnje nosilne konstrukcije, od tega ali ima konstrukcija protiutež ali ne....

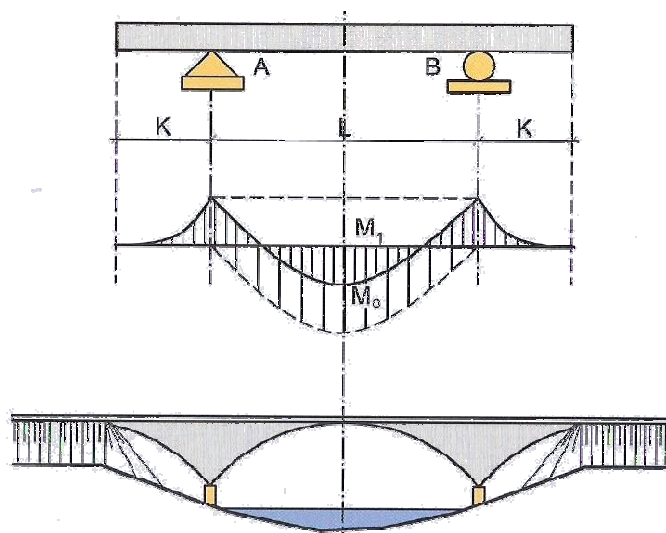
2.1.1.1 Posamezni prosto položeni vzdolžni nosilci

Najenostavnejši gredni nosilni sistem je prosto ležeč nosilec z enim razponom. Običajno se uporabljajo nosilci, ki so na enem koncu fiksno, na drugem koncu pa pomično podprti. Možna je tudi varianta s fiksnim podpiranjem na obeh koncih. Vendar pa dobimo v tem primeru tudi dodatno osno silo. Posamezno položeni nosilci so posebno ugodni za montažno gradnjo. Nosilec na dveh podporah je najbolj uporaben za manjše mostove v vseh materialih. Z večjo uporabo prednapetega armiranega betona in sovprežnosti jekla in betona so se bistveno spremenile meje za racionalno uporabo nosilca na dveh podporah. Velika prednost prosto ležečih nosilcev je v enostavnem projektiranju in v enostavni izvedbi. Pomanjkljivost takšnega statičnega sistema je, da je potrebno vzdolžne nosilce dimenzionirati na polno vrednost pozitivnega momenta M_0 ter nujna uporaba ležišč in dilatacij, zaradi česar sta gradnja in vzdrževanje dražje. Prav to pa daje prednost okvirnim sistemom.

2.1.1.2 Nosilci s protiuteži

Zaradi želje po zmanjšanju višine vzdolžne nosilne konstrukcije, je potrebno zmanjšati maksimalne upogibne momente v sredini razpona. To se do neke mere lahko stori z izvedbo konzol za podporami, ki služijo kot protiutež. Posledica tega je, da dobimo večje negativne momente nad podporami, zaradi česar so na teh mestih potrebne vute ali odebelitve, kar pa ima zaradi dobljenih zaobljenih konstrukcij še ugoden estetski učinek. »Dolžina konzole je omejena z dopustnim pomikom na koncu konzole, kjer je prehod iz nasipa na most« (Jure Radić. 2007. Masivni mostovi. Zagreb, str. 80). konzola je lahko tudi krajša, vendar, če je bolj masivna kljub temu povzroča nad podporo velik negativni moment. Takšni objekti so primerni za mestne mostove in za mostove na lokalnih in regionalnih cestah. Pomanjkljivost

takšnega statičnega sistema je povečana teža, ki je posledica konzol. Zaradi tega pride do večjih stroškov ležišč, stebrov in temeljev. Velika pomanjkljivost pa je to, da je na prehodu iz konzole na nasip težko zagotoviti tako kvalitetne prehodne naprave, ki bi omogočale miren prehod iz nasipa na most in, ki bi bile poleg tega še trajne. Zaradi tega se v praksi takšnemu statičnemu sistemu izogibamo.



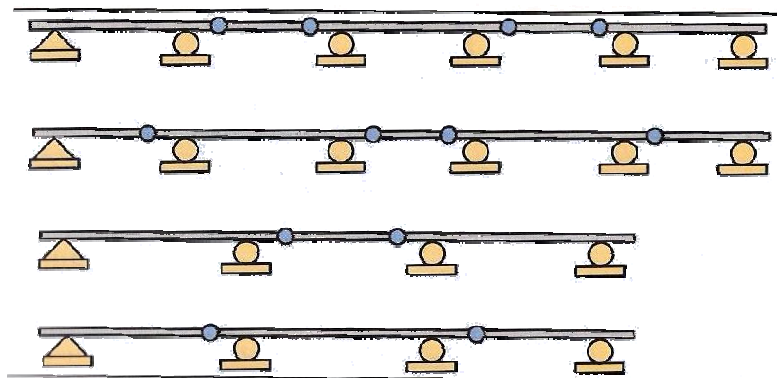
Slika 9: Konstrukcija s protiutežmi

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 75).

2.1.1.3 Niz prosto ležečih nosilcev

Niz takšnih nosilcev je zaradi enostavne izvedbe primeren za premoščanje več zaporednih razponov. Takšne vrste konstrukcij so se dolgo uporabljale pri prednapetih armiranobetonskih sistemih z večjim številom razponov. Kljub temu pa se danes v praksi, zaradi prepogostih prekinitev, takšnemu statičnemu sistemu zaradi funkcionalnih razlogov izogibamo, saj so dilatacije zahtevna in občutljiva oprema in jih je potrebno redno vzdrževati. Tudi vožnja po takšnemu mostu je zaradi velikega števila dilatacij zelo neudobna. Zaradi vode je pri takšnih konstrukcijah prihajalo do poškodb nad podporami. Funkcionalno ugodnejši statični sistem je kontinuirna konstrukcija z minimalnim številom prekinitev. V tem primeru uporabimo več pomičnih in eno nepomično podporo.

2.1.1.4 Gerberjevi nosilci



Slika 10: Gerberjevi nosilci

(vir: Jure Radić – Masivni mostovi, str. 78).

Z vstavljanjem momentnih členkov v nosilce, ki potekajo skozi več polj, lahko nosilec razdelimo na manjše odseke. Takšnemu nosilnemu sistemu pravimo Gerberjev nosilec, ki je ime dobil po svojem avtorju. Gerberjevi nosilci so se pogosto uporabljali pri armiranobetonskih in jeklenih mostovih v obdobju od leta 1920 do začetka petdesetih let 20. stoletja. Členke se vstavi tako, da dobimo ugodno razporeditev upogibnih momentov v polju in nad ležišči. Členki morajo biti na primerni oddaljenosti od podpor. Prednost takšnih nosilcev je relativno majhna občutljivost na neenakomerno posedanje temeljev, saj se nosilci na mestu momentnih členkov lahko prosto sučejo. Kljub temu pa se konstruktorji takšnim nosilcem v praksi zaradi problemov glede funkcionalnosti in trajnosti raje izogibajo. To velja predvsem za masivne mostove. Največ težav povzročajo dilatacije na mestih, kjer so členkaste prekinitve. Zaradi negativnih lastnosti uporaba Gerberjevih nosilcev v Nemčiji ni dovoljena že od leta 1970.

2.1.1.5 Kontinuirni nosilci

Zelo primeren nosilni sistem za mostove z več razponi je kontinuirni nosilec, brez prekinitev od začetka pa do konca mostu. Dolžina takšnega nosilca je lahko tudi več 100m ter lahko poteka preko več deset razponov. Velikost in razmerja razpetin so odvisna od morfologije, predvsem od višine ovire, pogojev temeljenja in potencialnega postopka gradnje. Največja

prednost kontinuirnih sistemov je v tem, da se pri dolgih mostovih izognemo izdelavi spojev na voziščni konstrukciji. Zaradi kontinuirnosti nosilcev, dobimo ugodno razporeditev upogibnih momentov in zato so nosilci manjših višin. To je zelo ugodno, saj je bolj estetsko ter tako prihranimo tudi pri porabi materiala. Do razpona 100m običajno uporabljamo nosilce konstantne višine, pri večjih razponih pa imamo nad podporami zaradi negativnih upogibnih momentov še vute. Zaradi statičnih razlogov je zelo ugodno, če so vsi razponi enaki, saj so takrat maksimalni momenti enaki v vseh vmesnih poljih. Nepomično ležišče, ki omogoča zasuk se običajno postavi na en (nižji) konec mosta. Vsa ostala ležišča so lahko vzdolžno pomična. Ugodne lastnosti kontinuirnih nosilcev so:

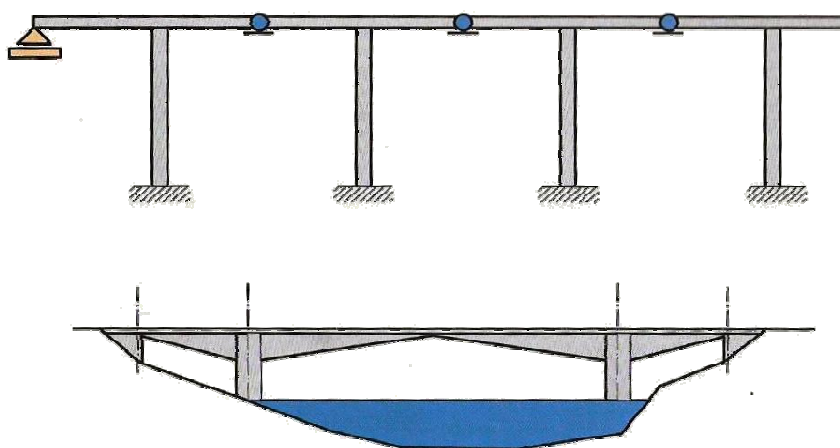
- relativno majhna teža in zato tudi prihranek na materialu. Razlog za to je v tem, da del nosilca ugodno vpliva na nosilnost drugega dela,
- možnost prerazporeditve upogibnih momentov, zaradi česar lahko uporabimo na manj obremenjenih mestih ekonomične prereze,
- boljše oblikovne možnosti in manjša višina nosilca, ter
- majhno število prekinitev in dilatacij.

Kontinuirni nosilci so danes največkrat uporabljeni sistemi ne glede na izbrani material.

2.1.1.6 Konzolni nosilci

Konzolni nosilci so fiksno vpeti v stebre, zato so na tem mestu vsi medsebojni pomiki in zasuki onemogočeni. V sredini razponov pa imamo momentne členke, zato se na tem mestu prenašajo le prečne sile. Zaradi členkov dobimo manjše upogibne momente v polju. Takšen statični sistem se v zadnjih desetletjih uporablja predvsem zaradi konzolnega postopka gradnje armiranobetonskih prednapetih mostov. Konzolni nosilci so primerni za premostitev globokih ovir večjih razponov. Na ta način se lahko dosežejo razponi tudi do 300m. Potem, ko je dokončana spodnja konstrukcija, gradnja zgornje konstrukcije poteka simetrično v obeh smereh stebra. Razlog za takšen postopek je cilj, da pride do čim manjše razlike v obtežbi med levim in desnim delom in s tem do čim manjših upogibnih momentov v stebrih. V sredini razpona se lahko med obe razmaknjeni konzoli vstavi montažni element in tako dobimo na tem mestu dva členka. Tudi pri tem statičnem sistemu je največja slabost prisotnost dilatacij na mestu momentnih členkov. Zato je potrebno nad členki izvesti elastične kontinuirne plošče

s pomočjo katerih se izognemo prekinitvam na vozišču in tako tudi povečamo trajnost konstrukcije. Konzolni nosilci so praviloma spremenljive višine. Višina se povečuje v smeri proti stebrom, kjer so negativni upogibni momenti maksimalni.



Slika 11: Konzolni nosilec

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str 77).

2.1.2 Vrste prečnih prerezov grednih mostov

Gredni mostovi so glede na vrsto prečnega prereza lahko ploščasti, z vzdolžnimi nosilci ali škatlasti.

TIP PREREZA	NAZIV PREREZA	PREČNI PREREZ	ARMIRANI BETON		PREGNAPETI BETON	
			RAZPON L x H	KONSTRUKTIVNA VSRA $h_v = L/a$	RAZPON L x H	KONSTRUKTIVNA VSRA $h_v = L/a$
PLOŠČASTI PREREZI	1		5-20	$\frac{L}{15-20}$	15-25	$\frac{L}{15-25}$
	2		15-25	$\frac{L}{15-20}$	20-30	$\frac{L}{15-25}$
	3		15-25	$\frac{L}{15-20}$	20-30	$\frac{L}{15-25}$
	4		10-25	$\frac{L}{15-20}$	20-30	$\frac{L}{15-25}$
	5		10-25	$\frac{L}{15-20}$	20-30	$\frac{L}{15-25}$
GREDNI PREREZI	6		15-30	$\frac{L}{10-15}$	-	-
	7		15-30	$\frac{L}{10-15}$	25-45	$\frac{L}{15-20}$
	8		-	-	5-25	$\frac{L}{10-25}$
	9		-	-	25-45	$\frac{L}{15-25}$
ŠKATLASTI PREREZI	10		-	-	30-200	$\frac{L}{12-25}$
	11		-	-	30-200	$\frac{L}{12-25}$
	12		-	-	30-200	$\frac{L}{12-25}$
	13		-	-	60-250	$\frac{L}{15-30}$

Slika 12: Pregled treh različnih vrst prerezov

(vir: Ministrstvo za promet in zveze. Smernice za projektiranje premostitvenih cestnih objektov, str 37).

2.1.2.1 Ploščaste konstrukcije

Ploščo, kot nosilno konstrukcijo mostov uporabljamo v primerih manjših razponov, oziroma kot sekundarno nosilno konstrukcijo, ki jo podpirajo glavni vzdolžni nosilci. Takšni mostovi so za izvedbo najenostavnejši, vendar s povečevanjem razpona postanejo hitro neracionalni. V statičnem smislu je prednost ploščastih konstrukcij ugoden prenos koncentriranih sil. Slabost pa je v tem, da z večanjem razpona lastna teža nesorazmerno hitro narašča. V primeru, ko je plošča glavna horizontalna nosilna konstrukcija, govorimo o ploščastih mostovih. Ploščaste konstrukcije se lahko izvede kot monolitne ali pa montažne konstrukcije.

Plošče so lahko polne, z odebelitvami, s konzolami ali luknjaste. Polne armiranobetonске plošče so primerne za mostove z razponi do 15m. Kot kontinuirne plošče, so uporabne do razpona 20m. Takšne plošče so ugodne tudi zaradi zelo enostavne izvedbe. V primeru širokih mostov s pločnikom, so primerne plošče, ki imajo v prečni smeri konzole. Pri večjih razponih se zelo pozna tudi teža plošče. Takrat se lahko uporabi luknjaste plošče z odprtinami raznih oblik. Odprtine se lahko izkoristi tudi za inštalacije. Pomembno pa je, da se v odprtini na najnižji točki pusti luknjo za odvodnjavanje. V nasprotnem primeru se lahko v odprtinah začne nabirati voda, ki nima kam odteči. V primeru zmrzovanja to lahko povzroči resne poškodbe plošče. Kljub temu se mnogi graditelji zaradi trajnostnih razlogov raje izogibajo takšnim ploščam.

2.1.2.2 Prerezi z vzdolžnimi nosilci

Za razpone med 15m in 40m se najpogosteje uporabljajo prerezi z vzdolžnimi nosilci. Prečni prerez takšnih konstrukcij je sestavljen iz voziščne plošče in vzdolžnih nosilcev, ki podpirajo ploščo. Plošča nad nosilci zagotavlja nosilnost v prečni smeri, poleg tega pa pripomore tudi k razporeditvi napetosti iz bolj obremenjenih na manj obremenjene nosilce. Za večje razpone je bolj ekonomično izbrati konstrukcije z manjšim številom reber oziroma nosilcev, ki so zaradi prednapenjanja širši. Za manjše razpone pa so primerni prerezi z večjim številom vzdolžnih nosilcev na manjših razmakih. Zaradi enostavne vgradnje so takšne konstrukcije zelo primerne za montažno gradnjo. Pri montažni gradnji je navadno prerez sestavljen iz večjega

števila reber (do 10 reber). V primeru, ko imamo samo dve rebri, se konstrukcija obravnava kot izrazit gredni nosilec s pripadajočo ploščo nad rebroma.

Debelina in oblika reber je lahko zelo različna. Odvisna je predvsem od načina prednapenjanja, načina podpiranja, in izvedbenih lastnosti. Zaradi boljše razporeditve obtežbe, imamo nad podporami tudi prečne nosilce. Prečni nosilci pripomorejo tudi k torzijski odpornosti in pri prenosu horizontalnih sil zaradi potresa in vetra.

2.1.2.3 Škatlasti prečni prerezi

V primerih, ko je razpon med podporama še večji, so najprimernejše konstrukcije s škatlastim prečnim prerezom. Škatlasti prerezi so zelo primerni za izvedbo kontinuirnih nosilcev, saj sta zgornja in spodnja plošča zaradi svoje velike površine sposobna dobro prenašati tako pozitivne kakor tudi negativne upogibne momente. V tem imajo veliko prednost pred rebrastimi prerezi, ki veliko bolje prenašajo pozitivne kot negativne upogibne momente. Intenziven razvoj takšnih nosilcev je nastopil z začetkom uporabe prednapetega betona. Škatlasti prerezi se uporabljajo za srednje in večje razpone, torej od 40m pa vse do 300m. S takšno vrsto prereza se dosegajo največji razponi in največje skupne dolžine med grednimi mostovi. Za razpone do 50m se običajno uporabljajo škatlasti nosilci konstantne višine. Takšne nosilce lahko uporabljamo tudi za 80m dolge razpone, vendar moramo v tem primeru zaradi negativnih upogibnih momentov povečati debelino spodnje tlačne plošče nad podporami. Za večje razpone pa uporabljamo nosilce s spremenljivo višino. Višina prereza mora zaradi lažjega pregleda in sanacij omogočati tudi pohodnost znotraj škatlastega prereza. V primeru kontinuirnih konstrukcij z večjimi razponi, lahko pogosto iz oblike spodnjega pasa ugotovimo obliko linije upogibnih momentov. Zgornja plošča je hkrati tudi plošča vozišča, ki ima v prečnem prerezu v levi in desni smeri konzoli. Od razpona in širine je odvisno ali bo most v prečnem prerezu izveden kot posamezni škatlasti prerez ali pa bo sestavljen iz dveh oziroma več škatlastih prerezov. Možna je tudi uporaba enega večceličnega škatlastega prereza, ki je z notranjimi rebri razdeljen na dva ali več delov. Možnosti gradnje kot montažne ali monolitne konstrukcije so raznolike. Gradnja je lahko izvedena tako na nepomičnem, kot tudi na pomičnem gradbenem odru.

Najbolj pogosto uporabljeni postopki gradnje mostov s škatlastimi prerezi so:

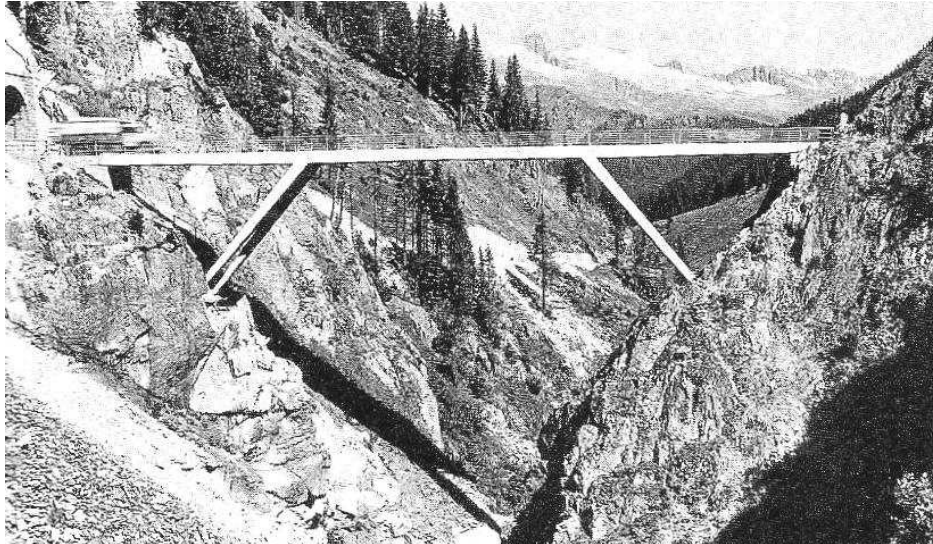
- prostokonzolna gradnja,
- gradnja s pomočjo narivanja,
- izvedba na nepomičnem gradbenem odru in
- montažna izvedba predhodno pripravljenih odsekov velike dolžine.

Prostokonzolna gradnja lahko poteka tako, da se odseke betonira na licu mesta ali pa po montažnem postopku. Pri montažnem postopku so odseki krajši. Takšna gradnja ponavadi poteka simetrično na obe strani stebra. Včasih pa konfiguracija terena ne dopušča simetrične dispozicije. Takšen primer je lahko, ko zaradi varovanja okolja ne smemo v kanjon z elementi in z opremo za gradnjo, zato moramo postopek izvesti brez pomoči začasnih stebrov znotraj kanjona.

V zadnjih letih pa se gradi tudi s pomočjo serijske industrijske proizvodnje vse večjih elementov, ki se nato vgrajujejo s posebnimi napravami. Takšen primer je bil gradnja mosta preko soteske Northumberland v Kanadi, kjer so posamezni elementi mosta, ki so jih dvignili in nato montirali, dolgi 192,5m in težki 7800 ton.

Kljub mnogim prednostim škatlastega prereza, je njegova največja pomanjkljivost v višji izvedbeni ceni glede na prerez z vzdolžnimi nosilci in ploščast prerez.

2.2 Okvirni mostovi



Slika 13: Okvirni most

(vir: Mondorf E. Paul. Concrete bridges, str. 491)

Okvirni most dobimo, če zgornjo horizontalno nosilno konstrukcijo tega povežemo s spodnjo, nosilno konstrukcijo. Na spoju nosilcev s stebri dobimo velike napetosti, ki morajo biti izračunane z metodo končnih elementov. Takšne spoje je včasih v praksi težko izvesti in zato zahtevajo veliko natančnost detajlov. Za razliko od grednih konstrukcij dobimo v primeru vertikalne obtežbe v prekladni konstrukciji tudi vzdolžne sile.

2.2.1 Statični sistem okvirnih mostov

2.2.1.1 Tročlenski okvirji

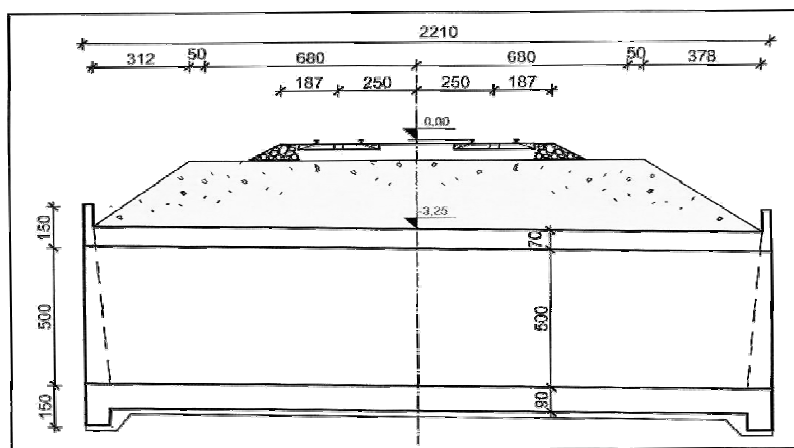
Tročlenski okvirji so statično določene konstrukcije, zato v njih nimamo dodatni sil zaradi temperaturnih sprememb in pomikov podpor. Členki so v podporah in v sredini razponskega sklopa. Prav sredinski členek pa je zaradi prekinitve kontinuirnosti konstrukcije največja pomanjkljivost tročlenskih okvirjev.

2.2.1.2 Dvočlenski okvirji

Dvočlenski okvirji so enkrat statično nedoločene konstrukcije, ki niso občutljive na posedanje temeljev. Prednost pred tročlenskimi okvirji je neprekinjenost voziščne konstrukcije. Stebra sta lahko vertikalna ali poševna. Okvirji s poševnimi stebri so zaradi dobre preglednosti zelo primerni za avtocestne nadvoze.

2.2.1.3 Zaprti okvirji

Zaprti okvirji se uporabljajo za razne podvoze in podhode v primeru visoke podzemne vode ter zelo slabo nosilnih tal. Spodnja slika prikazuje vzdolžni prerez zaprtega okvirja, ki služi kot podhvoz pod železniško progo. Takšni podhodi morajo biti zaščiteni tudi s hidroizolacijo. Za zaščito hidroizolacije zgornje horizontalne plošče se uporabi armiran beton, vertikalno hidroizolacijo pa lahko zaščitimo tudi z opeko.



Slika 14: Vzdolžni prerez zaprtega okvirja

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 250).

2.2.2 Okvirji s poševnimi stebri

Okvirji s poševnimi stebri glede na obliko predstavljajo konstrukcijo, ki jo uvrščamo vmes med gredne in ločne mostove. Takšni okvirji so zelo primerni za premoščanje rek, saj mosta zaradi poševnih stebrov ni potrebno temeljiti v reki, kjer so pogoji izvedbe bistveno težji. V

primeru premoščanja dolin, pa so poševni stebri, ki so lahko temeljeni v vertikalni steni ugodni, ker nam tako ni potrebno graditi visokih stebrov v globokih dolinah. Okvirje s poševnimi stebri se pogosto gradi tudi kot avtocestne nadvoze saj se tako lahko izognemo nosilnemu stebri v razdelilnem območju avtoceste in potencialnim nevarnostim udarca vozila v sredinski steber. Zelo so primerni tudi zaradi dobre preglednosti. Glede temeljenja veljajo podobne zahteve kot pri ločnih mostovih, saj se tudi v tem primeru v temeljnih tleh pojavijo poleg vertikalnih tudi horizontalne sile.

Ločni mostovi



Slika 15: Ločni most Predel
(lastna fotografija).

Že zelo dolgo je znano, da je lok ali obok zelo uporabna nosilna konstrukcija v gradbeništvu. Ločne mostove so poznali že stari Grki in za lok velja, da je najstarejši nosilni sistem za mostove. Služil je premoščanju rek in globokih dolin s strmimi pobočji in kompaktnim terenom, ki lahko sprejme sile iz pete loka. Lok in obok imata v ožjem smislu različen pomen.

Obok je ukrivljena plošča, lok pa predstavlja ukrivljen linijski element. V nadaljevanju bom uporabljal izraz lok.

Razlog za tako pogosto pojavljanje loka pri gradnji mostov je dejstvo, da se lahko vse obremenitve prenesejo v temeljna tla na ta način, da se v loku pojavljajo le tlačne napetosti. Zaradi tega, bi lahko rekli, da dobro oblikovani lok najbolje izkorišča lastnosti gradiva iz katerega je sestavljen. To je bilo že davno znano, zato so včasih ljudje iz več manjših kosov sestavili lok in na ta način so premostili tudi relativno velike razpone. Masovna in ekonomična uporaba montažnih armiranobetonskih prednapetih grednih sistemov iz sredine 20. stoletja je v veliki meri iz prakse izrinila ločne mostove predvsem zaradi cene odra ter opaža za loke in tudi zaradi daljšega časa gradnje ločnih objektov.

Pogoj, da se v loku pojavljajo le tlačne vzdolžne sile je ta, da mora biti tlačna linija skladna z osjo loka. V primeru, ko temu pogoju ni zadoščeno, dobimo v loku tudi upogibne momente. Na to, kakšne vrste napetosti bomo imeli v določenem prerezu najbolj vpliva oblika loka, zato se pri konstruiranju velika pozornost posveča izboru optimalne oblike. Ker je tlačna linija odvisna tudi od obtežbe, dobimo za različne kombinacije obtežbe različne tlačne linije. Zato je optimalno obliko loka veliko lažje določiti v primeru ko je spremenljiva obtežba veliko manjša od stalne obtežbe, saj takrat ovojnica tlačnih linij najmanj odstopa od tlačne linije, ki je posledica stalne obtežbe.

Drugo pomembno dejstvo pri loku je to, da se v podporah pojavljajo velike horizontalne sile in zato so potrebna dobro nosilna tla. V nekaterih primerih se te horizontalne sile lahko prevzame tudi z vezjo, ki povezuje pete loka. Vendar so takšne rešitve redke. Praviloma se tako kot vertikalne sile, tudi horizontalne sile v podporah prenašajo v nosilna tla. Ločne konstrukcije so zelo občutljive na pomike in zasuke, zato je potrebno veliko pozornosti posvetiti pravilnemu oblikovanju, dimenzioniranju in izvedbi temeljev. Včasih se zaradi oblikovnih razlogov gradijo zelo plitvi loki. Takšni loki pa so še bolj občutljivi na pomike, zato potrebujejo še večje temelje. Loki so lahko iz različnih materialov. Pogosto pa jih zaradi dejstva, da so v njih le tlačne napetosti gradimo iz cenejših materialov, ki imajo zadostno odpornost na tlačne napetosti. Tako lahko pogosto vidimo loke sestavljene iz naravnega ali umetnega kamna, iz betona ali iz armiranega betona... Obstajajo pa tudi kovinski loki in celo

loki iz lesa. Z današnjim postopkom gradnje je mogoče zgraditi ločni most z razponom med 50m in 300m, ki bo v terenu z določenimi konfiguracijami bolj ekonomičen, kot katerokoli druga nosilna konstrukcija. Ločni mostovi so predvsem primerni v kotlinah, v globokih kanjonih, v morskih ožinah...Poznamo pa tudi ločne mostove z razponom daljšim od 500m. Precejšen napredek v gradnji velikih ločnih mostov je bil dosežen zaradi sodobnega načina gradnje, brez ogromnih in dragih fiksnih gradbenih odrov. Predvsem prostokonzolna gradnja lokov velikih razponov je ponovno naredila ločne mostove konkurenčne. Razponi armiranobetonskih mostov so se zelo povečali tudi zaradi napredka v proučevanju plastičnih lastnosti betona. Konstrukcija nad lokom pri sodobnih ločnih mostovih je gredni sistem iz montažnih nosilcev ali pa konstrukcija, betonirana na platoju in kasneje premaknjena s postopkom narivanja. Ta način gradnje zmanjšuje ceno in čas gradnje ločnih mostov z večjimi razponi. V oblikovnem smislu imamo pri ločnih mostovih veliko variacij in zato je možno zgraditi zelo estetske ločne mostove, ki se lepo zlijejo z naravo. Veliko ločnih mostov ima voziščno konstrukcijo nad lokom. Voziščna konstrukcija je lahko tudi v višini pet ali pa nekje vmes med obema možnostma. Po vrsti nosilne konstrukcije so možne naslednje variante:

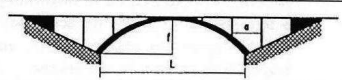
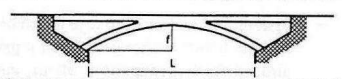
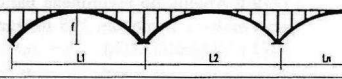
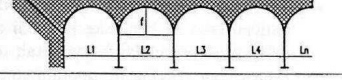
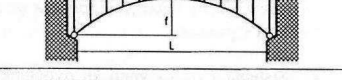
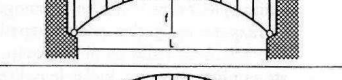


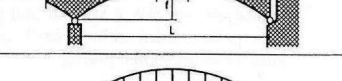

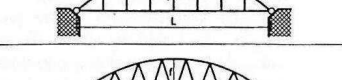
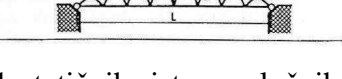
- zaobljene polne plošče v monolitni izvedbi ali sestavljene iz manjših kosov (vsi stari mostovi iz naravnega kamna ali opeke),
- zaobljene polne palice,
- rebrasti oboki,
- stenasti loki,
- škatlasti loki,
- sovprežni loki in
- rešetkasti loki.

2.2.3 Statični sistemi ločnih mostov

Raznolikost vrst in kombinacij statičnih sistemov ločnih mostov je posledica različnih oblik lokov ter zunanjih vplivov. Statične sisteme ločnih objektov lahko razdelimo v dve skupini. To sta enostavni in sestavljeni statični sistemi. Enostavni statični sistemi so tisti, kjer se osnovni prenos sil v glavnem razponu odvija s pomočjo loka. Ostali deli konstrukcije pa

imajo sekundarni pomen, predvsem prenesti obremenitve do loka. Med enostavne statične sisteme zato uvrščamo vpete, enočlenske, dvočlenske in tročlenske loke.

Sestavljeni statični sistemi so tisti, kjer pri osnovnem prenosu sil poleg loka sodeluje tudi voziščna konstrukcija ali katerikoli drugi sestavni del mostu. Sem uvrščamo gibke loke, loke z zategami, loke z vešalkami, rešetkaste loke in loke z vezmi.

ZAPOREDNA ŠTEVILKA	STATIČNI SISTEM	NAZIV STATIČNEGA SISTEMA PREMOSTITVENEGA OBJEKTA	MEJE RACIONALNIH RAZPONOV PREMOSTITVENIH OBJEKTOV (L v m)	
			ARMIRANI BETON	KONSTRUKCIJSKO JEKLO
1		VPETI LOK	40–300 (max L=390m MOST "KOK")	–
2		ELASTIČNO VPETI LOK	40–150	–
3		NEZ VPETIH LOKOV Z ALI BREZ ČLENKOV	60–150	100–200
4		NEZ VPETIH OBOJKOV NA VISOKIH STEBERH (STARI MADURTI)	20–50	–
5		DVOČLENKASTI LOK	80–200	100–400 (max L=518m ZDA 1977)
6		TROČLENKASTI LOK	60–120	100–200
7		VPETI LOK S SPUSZENIM VOZIŠČEM	80–200	–
8		DVOČLENKASTI LOK S SPUSZENIM VOZIŠČEM	80–200	100–250
9		DVOČLENKASTI ALI TROČLENKASTI LOKI Z ODM. (DOKI) Z ENO ALI VEČ RAZPETINAMI	40–100	–
10		GREDA OVAČANKA Z VITOM LOKOM "LANGEROVA GREDA"	–	80–200
11		LOK Z ZATEGO	–	80–200
12		LOK Z ZATEGO IN POSEBNIM OBEŠAJU "WELSENJOV LOK"	–	100–250

Slika 16: Pregled različnih statičnih sistemov ločnih objektov

(vir: Ministrstvo za promet in zveze. Smernice za projektiranje premostitvenih objektov, str 41).

2.2.3.1 Vpeti loki

Vpeti lok je iz izvedbenega in konstrukcijskega stališča najenostavnejši statični sistem. Ker je takšen lok brez prekinitev in členkov, se je uporabljal za klasične zidane mostove. Danes gradimo vpete loke v primeru masivnih ločnih mostov z daljšim razponom. Vpeti lok je trikrat statično nedoločen. Največja pomanjkljivost takšnega loka je izpostavljenost dodatnim napetostim zaradi temperaturnih sprememb. Takšna vrsta loka pride v poštev le v dobro nosilnih tleh. Z vidika izvedbe, pa so fiksno vpeti loki ugodni, saj jih je možno zgraditi s prostokonzolnim postopkom. Estetsko so prikladni tudi zaradi možnosti menjavanja višine in debeline vzdolž razpona. Običajno pa se takšen lok izvede s konstantnim prečnim prereзом vzdolž razpona ali s povečevanjem površine prereza od temena proti petam skladno s spremembo notranjih statičnih količin.

2.2.3.2 Enočlenski loki

Pri takšnemu loku imamo členek v temenu. Takšni loki se zelo redko uporabljajo kot nosilni sistem pri mostovih. Razlog za to je pojav upogibnih momentov, zaradi katerih je potrebno izvesti veliko dražje temeljenje. Enočlenski loki se uporabljajo le kot začasni sestav tekom gradnje. Kasneje se členek v temenu zapre in lok tako postane vpet, brez členka.

2.2.3.3 Dvočlenski loki

Dvočlenski lok je enkrat statično nedoločena konstrukcija, ki ima členka običajno v petah loka. Pogosto imajo spremenljivi prečni prerez. Prerez se spreminja od členkov proti temenu, kjer je prerez bolj obremenjen in zato tudi debelejši. Zaradi svoje karakteristične oblike pravimo takšnim lokom tudi srpasti loki. Seveda je lahko prerez tudi konstanten. Velika prednost dvočlenskih lokov je veliko manjša občutljivost na dodatne vplive, kot pri vpetih lokih. Dodatni vplivi so sprememba temperature, posedanje in sukanje pete. Pogosto se graditelji ravno zaradi teh vzrokov odločajo za dvočlenski lok. Sicer pa velja dvočlenski lok za osnovni sistem ločnih jeklenih mostov.

2.2.3.4 Tročlenski loki

Tročlenski lok predstavlja statično določeno konstrukcijo. Členki so ob podporah in v temenu. Iz določenega vidika je tročlenski lok ugodna rešitev, saj se v njem ne pojavljajo zgoraj omenjeni neugodni dodatni vplivi. Poleg tega je s pomočjo vstavljene hidravlične opreme možno regulirati napetosti. Tročlenski lok je relativno neobčutljiv na eventualno posedanje tal. Takšni loki so se pogosto uporabljali v začetku prejšnjega stoletja tam, kjer so bile slabe razmere za temeljenje. Sčasoma se je členek v temenu izkazal kot neugodna rešitev in zato so takšne loke kasneje opustili. Tročlenski loki so lahko zanimivih oblik, saj so bili prečni prerezi pogosto odebeljeni ob bokih in tanjši v bližini členkov.

2.2.3.5 Rešetkasti loki

Rešetkasti loki so se včasih uporabljali le za kovinske konstrukcije. V novejšem času pa so takšni loki primerni tudi za armiranobetonske mostove in posebej za sovprežne mostove. Pričakuje se, da bodo rešetkasti loki z nadaljnjim razvojem v prihodnosti primerni tudi za zelo velike razpone.

2.2.4 Oblika loka

Oblika loka ima zelo pomembno vlogo glede na statične in konstrukcijske parametre. Zaradi tega je potrebna podrobna analiza pred odločitvijo o obliki loka. Vsak lok ima štiri osnovne linije:

- intrados – linija spodnjega oziroma notranjega roba loka,
- ekstrados – linija zgornjega oziroma zunanjega roba loka,
- os loka – linija, ki poteka skozi središče loka in
- tlačno linijo (opornica loka) – linija, ki predstavlja prijemališča rezultat notranjih sil v vsakem prerezu

Te linije se izbere v odvisnosti od določenih zakonitosti, ki so lahko statične, oblikovne, konstrukcijske ali ekonomske. Pri tem pa so optimumi za vsako izmed linij različni, zato je potrebno v tem primeru težiti h kompromisom. Graditelji se včasih ne posvečajo vsem štirim faktorjem, temveč dajejo prednost enemu izmed njih. To pa je razlog, da se včasih odločijo za obliko loka, ki ni najbolj optimalna. V splošnem velja, da je statično optimalna oblika osi loka tista, kjer se os loka najbolj ujema z opornico loka.

Oblikovno optimalni odnosi vseh linij se zreducirajo na odnos vidnih linij intradosa in ekstradosa ter od njihove medsebojne skladnosti in ujemanja loka s terenom in z ostalimi deli konstrukcije.

Konstrukcijsko optimalne linije so tiste, ki omogočajo najenostavnejšo izvedbo in čim boljše delovanje nosilne konstrukcije. Z drugimi besedami to pomeni čim bolj standardizirane oblike konstantnega prečnega prereza, brez prekinitev in lomov.

Ekonomsko optimalna oblika je tista, ki zahteva najmanjši skupni strošek. Potrebno je analizirati strošek celotne konstrukcije, ne pa samo strošek loka. Včasih minimalni stroški loka povzročajo večje stroške ostalih delov mosta.

Na estetski izgled mostu najbolj vpliva linija intradosa. Ta linija ima lahko obliko različnih krivulj. Najbolj običajne so naslednje:

- krivulja krožnega segmenta. Taka krivulja je najpogostejša in najbolj enostavna,
- kvadratna parabola,
- elipsa (eliptični segmenti so primerni za plitve loke),
- hiperbola,
- obrnjena verižnica (za takšno krivuljo je bilo že davno znano, da je ena izmed statično najprimernejših, vendar pa zelo odstopa od estetskega optimuma) in
- sestavljene krivulje (takšne krivulje so lahko sestavljene iz več različnih segmentov krožnice z različnimi radiji).

2.3 Mostovi s poševnimi zategami



Slika 17: Most Rion-Antirion

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=75684>, datum 22.12.2009. Slikal: Inge Kanakaris-Wirtl).

Med vsemi nosilnimi konstrukcijami mostov je bil v zadnjih desetletjih dosežen najbolj intenziven razvoj ravno pri mostovih s poševnimi zategami. Ta razvoj se nanaša na oblikovne, konstrukcijske in izvedbene novosti. Posebej velik razvoj pa je bil dosežen glede maksimalnega razpona, ki ga lahko takšen objekt premosti. Danes se takšne vrste mostov gradi pretežno pri razponih med 300m in 1000m.

Mostovi s poševnimi zategami imajo 3 ključne nosilne sklope. To so nosilci voziščne konstrukcije, poševne zatege ter piloni. Takšni mostovi so se začeli intenzivno uporabljati šele v sredini prejšnjega stoletja. Razlog za vse pogostejšo uporabo pa je hitra in racionalna gradnja, v določenih okoliščinah gospodarsko najbolj sprejemljiva rešitev, dobra izkoriščenost sklopa gradiv in relativno enostavna izvedba, pri kateri ne potrebujemo dragih

gradbenih odrov. Zatege, ki so v drugih vrstah mostov samo začasni pripomočki med postopkom gradnje, so pri mostovih s poševnimi zategami tudi ključni del končnega sistema. Mostovi so lahko iz različnih materialov: jekleni, betonski ali sovprežni. Poznamo pa tudi primere manjših mostov za pešce z lesenimi vzdolžnimi nosilci in celo z lesenimi piloni. Zaradi izredno ugodnega razmerja med trdnostjo in lastno težo so bili v začetku takšni mostovi izključno iz jekla. V primeru največjih razponov je ta kriterij še vedno odločilen. V ravninskih predelih so mostovi s poševnimi zategami dominantni. Zelo so primerni za široke plovne reke. Zaradi velikih dimenzij, visokih pilonov in zaradi dejstva da močno izstopajo iz okolice je potrebno oblikovanju takšnih mostov posvetiti veliko pozornosti. Danes takšni mostovi veljajo za zelo moderne in oblikovno sprejemljive objekte, ki so lahko estetsko zelo prikladni in skladni z okolico. Vendar pa vedno ni bilo tako. V začetku njihovega obdobja so ljudje pogosto oporekali njihovemu estetskemu potencialu.

2.3.1 Dispozicija in statični sistemi

Najbolj pogosta oblika mostov s poševnimi zategami je simetrična, z izrazitim središčnim razponom ter z dvema manjšima stranskima razponoma. Taka oblika mostu ima dva pilona, ki s pomočjo poševnih zateg nosita vzdolžno nosilno konstrukcijo.

Druga vrsta je nesimetrična konstrukcija z enim pilonom, z enim izrazitim razponom ter z druge strani z enim veliko manjšim bočnim razponom (do $0,5 l$)ⁱ. Takšne konstrukcije so običajno posledica prometnih, ambientalnih ali oblikovnih zahtev. Uporablja se tudi oblika z enim pilonom in z dvema simetričnima razponoma. Konstruktorji se odločajo za obliko mostu z le enim pilonom samo v primeru, ko imajo za to upravičene razloge.

Tretja vrsta pa je dispozicija z več enakimi dominantnimi središčnimi razponi ter z dvema manjšima robnima razponoma.

Iz statičnega vidika so mostovi s poševnimi zategami večkrat statično nedoločene konstrukcije. V vsaki kombinaciji obtežbe, mora biti vsaka zatega sposobna prevzeti

ⁱ l je dolžina večjega razpona

obremenitev, ki bi se lahko pojavila. Iz tega stališča lahko posamezno zatego smatramo kot palico, ki prenaša določeno silo.

2.3.1.1 Nosilci z obešenimi mizami

Pri tem gre za rešitev, kjer voziščna konstrukcija visi na zategah, ki so vpete v relativno nizke pilone. Takšne mostove so gradili v petdesetih in šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Sistem je razvil R. Morandi in ga tudi uporabil na več različnih mostovih. Eden od njih je tudi most Maracaibo v Venezueli. Kljub temu da veljajo danes takšni mostovi za estetsko manj primerne, pa so iz določenega vidika zelo pomembni, saj so omogočili veliko industrializacijo ter povečali hitrost gradnje. Poleg tega, lahko rečemo, da so ti mostovi predhodniki današnjih mostov s poševnimi zategami. Pomanjkljivost takšnih mostov pa so številne prekinitve voziščne konstrukcije na mestu členkov. Običajno sta v vsakem polju po dva členka.



Slika 18: Most Maracaibo

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=13575>, datum 15.12.2009. Slikal: Carlos Añez).

2.3.1.2 Konzolno viseči nosilci

Vzdolžni nosilci so tudi v tem primeru čvrsto povezani s pilonom, na sredini razpona pa so členkasto povezani s sosednjim simetričnim delom. Za razliko od zgornjega statičnega sistema, imamo v tem primeru v vsakem polju namesto dva, le en členek, preko katerega se prenašajo le prečne sile in sistem deluje kot konzolno gredni. V primeru, da so zatege

postavljene na večjih razmakih, nosilec deluje kot kontinuirni na elastičnih podporah. Če pa so zatege gosto postavljene, celotni sistem obravnavamo kot konzolo, kjer vzdolžni nosilec predstavlja tlačni pas, zatege pa natezni pas.

2.3.1.3 Kontinuirni viseči nosilci

To je najpogosteje uporabljen statični sistem pri mostovih s poševnimi zategami. Velika prednost je izvedba nosilca brez prekinitev saj je zato vožnja bolj prijetna. Možna je tudi prerazporeditev notranjih sil. Tudi vzdrževanje je lažje, ker taka konstrukcija nima dilatacij in je zato bolj trajna.

2.3.1.4 »Extradosed« mostovi



Slika 19: Puhov most na Ptuj

(vir: <http://www.izs.si/index.php?id=879>. Datum 19.01.2010).

Na pogled so »extradosed« mostovi zelo podobni mostovom s poševnimi zategami. Razlika je v tem, da imajo »extradosed« mostovi tudi do trikrat nižje pilone. Posledica tega je, da so kabli bolj položni in zato konstrukcija ne visi na kablih, ampak kabli le napenjajo prekladno konstrukcijo, ki pa mora zato imeti večjo togost. Najbolj primerni so za razpone med 100m in 200m. Kabli so bolj izkoriščeni, kot klasični poševni kabli, saj niso izpostavljeni vibracijam in upogibom pri sidriščih. Prehod skozi pilon se običajno izvede z deviatorskimi sedli.

Takšni mostovi so najbolj razširjeni na Japonskem, konstrukcijski sistem pa je še v razvoju. Tudi v Sloveniji imamo takšen most in sicer Puhov most na Ptuju, ki je bil končan leta 2007.

2.3.2 Oblike nosilne konstrukcije

Oblika nosilne konstrukcije mostu v pogledu je razen od števila in razporeditve pilonov, ter odnosa med razponi zelo odvisna tudi od razporeditve zateg. Zatege so zelo pomemben faktor tudi zaradi dejstva, da znatno vplivajo na skupno ceno mostu.

Potrebno je razlikovati med konstrukcijami z gosto in z redko postavljenimi zategami. Vse zatege so lahko vpete le na vrhu pilona, od tam pa se širijo proti svojim prijemališčem v vzdolžnem nosilcu. V tem primeru predstavlja težavo sidranje velikega števila zateg na majhnem prostoru na vrhu pilonov.

Poznamo pa tudi konstrukcije s paralelnimi zategami, ki so sidrane na različnih višinah iz obeh strani pilonov. Na ta način je tudi povečana stabilnost pilona, saj se obtežba porazdeljuje po vsej višini pilona. V tem primeru je tudi izvedba lažja. Od zgornjega načina se takšna oblika razlikuje tudi po tem, da zaradi bolj horizontalne lege zateg povzroča večje tlačne sile v vzdolžnem nosilcu.



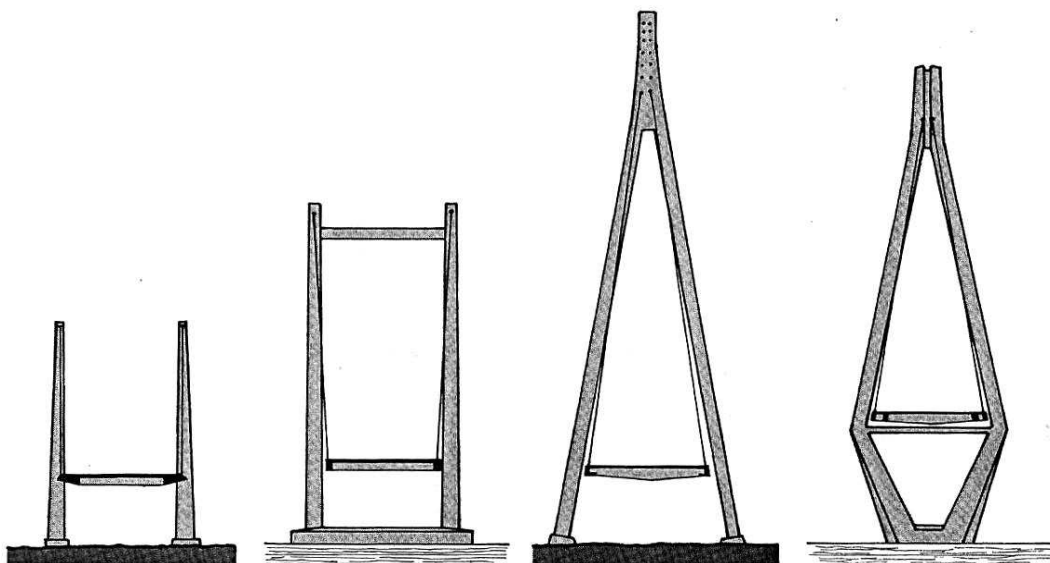
Slika 20 in slika 21: Pahljačasta oblika zateg vpetih na vrhu pilona in vzporedne zatege (vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=151815> in <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=56082>, datum 20.12.2009. Slikal: Nicolas Janberg, René Beideler).

V fazi razvoja mostov s poševnimi zategami so se graditelji odločali za primere z manjšim številom zateg, kjer so bili razmaki med njimi od 30m do 70m. Danes pa se gradijo predvsem mostovi z zategami, ki so razmaknjene med 5m in 15m v primeru betonskih vzdolžnih nosilcev. V primeru jeklenih nosilcev pa so razmaki med 10m in 20m. Zaradi gostejših zateg imamo enostavnejšo montažo, boljše aerodinamične lastnosti ter lažje vzdrževanje v primeru potrebe po zamenjavi posamezne zatege. V prečnem prerezu so zatege lahko speljane v:

- eni vertikalni ravnini, ki je običajno v osi mosta. Pri tem imamo dve ločeni prometni površini, kot na primer pri dveh smereh avtoceste. Takrat so zatege in piloni postavljeni v dovolj širok vmesni zaščitni pas, zato mora imeti voziščna konstrukcija zadostno torzijsko odpornost.

- dveh ravninah na robovih prečnega prereza mosta, kar je iz statičnega stališča tudi ugodneje.

2.3.3 Oblike pilona



Slika 22: Različne oblike pilona

(vir: Fritz Leonhardt. Brucken, str. 51).

Najstarejši mostovi s poševnimi zategami so imeli masivne, zidane pilone. Danes so piloni večinoma iz jekla ali iz betona. Oblika pilona je odvisna od dispozicije in vrste objekta ter od prizadevanja po estetski obliki. Višina pilona vpliva na osne in prečne sile v vzdolžnem nosilcu ter na skupne stroške mostu. Večinoma so piloni vertikalni. Poznamo pa primere s piloni, ki so nagnjeni. V primeru, ko so zatege v eni ravnini, so praviloma tudi piloni enodelni. Če pa imamo zatege v dveh ravninah, so piloni razčlenjeni in sestavljeni iz različnih oblik.



Slika 23: Nový Most v Bratislavi - nagnjen pylon

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=83836>, datum 28.12.2009. Slikal: Nicolas Janberg).

2.3.4 Zatege

Zaradi tehnološkega razvoja in izpopolnitev lastnosti zateg je bil dosežen hiter in obsežen razvoj takšnih vrst mostov. Zatege so iz visokovrednega jekla saj morajo imeti izredne lastnosti. Najpomembnejše lastnosti so modul elastičnosti, natezna trdnost, odpornost na utrujanje, možnost protikorozijske zaščite ter detajl spojev in sidranja. Danes je možno na tržišču najti tudi industrializirane detajle.

2.4 Viseči mostovi



Slika 24: Viseči most Akashi Kaikyo ima najdaljši razpon med stebri-1991m

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=96474>, datum 10.12.2009. Slikal: Niels Jakob Darger).

Tako kot ločne, tudi viseče mostove uvrščamo v primarne nosilne konstrukcije. Jeklena, natezno obremenjena vrvi iz visokovrednega jekla, ki visi med dvema pilonoma je najpomembnejši nosilni del visečih mostov. Na ta način se premoščajo največji možni razponi. Podajnost visečih mostov je relativno velika. Navadno se graditelji odločajo za viseče mostove z razponom med 1000m in 2000m. Primerni pa so tudi ko je razpon med stebri 300m ali več. V določenih okoliščinah so uporabni tudi pri manjših razponih, saj je gradnja relativno enostavna in včasih tudi ekonomsko sprejemljiva. Ravno zaradi tega se včasih uporabljajo tudi kot mostovi za pešce z razponom med 50m in 300m. Veliki viseči mostovi z razponom 1000m in več so ogromne nosilne konstrukcije, ki imajo v prečnem prerezu več istovrstnih ali raznovrstnih prometnih tokov. Pogosto se takšni mostovi gradijo v dveh nadstropjih. To ima ugodne učinke tudi zaradi povečanja togosti vzdolžnega nosilnega sistema. V takšnem primeru imamo lahko 6 ali celo 8 vozniških pasov v zgornjem predelu, v spodnjem predelu pa železnico ter še nekaj vozniških pasov namenjenih za težki promet. Za estetski izgled mostu je zelo pomembno razmerje dimenzij. Višje kot leži voziščna

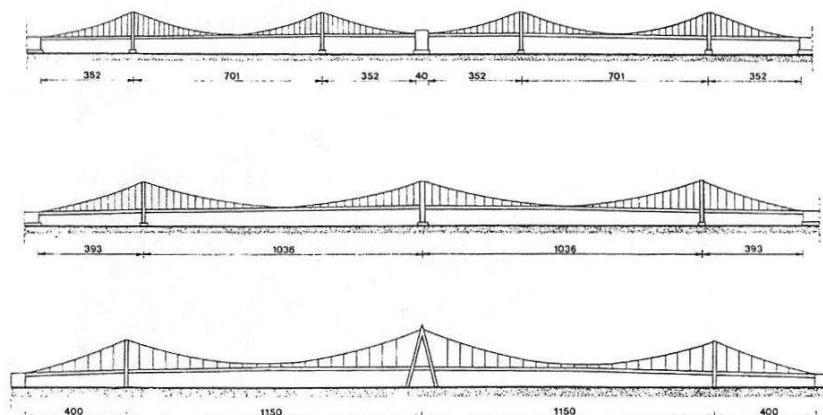
konstrukcija mostu nad vodo, daljši naj bo razpon. Cilj je, da voziščna konstrukcija izgleda vitka. Masivni bloki, kjer je zasidrana obešena vrv ne smejo preveč izstopati. Kljub temu pa morajo dati vtis, da prenašajo velike obremenitve. Za viseče mostove velja, da je tudi celotna horizontalna konstrukcija iz jekla. V primeru večjih razponov so to ekonomsko najdražje konstrukcije. V Republiki Sloveniji večjih visečih mostov nimamo, saj jih niti ne potrebujemo, zato jim ne bom posvečal večje pozornosti.

2.4.1 Konstruktivske posebnosti visečih mostov

Nosilni sistem visečih mostov sestavljajo:

- obešena vrv,
- piloni,
- vzdolžna voziščna konstrukcija,
- vešalke in
- sidrani bloki.

Vsak izmed naštetih elementov je lahko izveden v različnih variantah, ki so odvisne od statičnega sistema, dispozicije in dimenzij. Najpogostejša je dispozicija s tremi razponi, z izrazitim sredinskim razponom. Pri tem ima vrv nad sredinskim razponom obliko verižnice, nad robnima razponoma pa se poševno ali pa zaobljeno vodi do sidrišča. Možne so tudi dispozicije z le enim razponom ali pa z večjim številom enakovrednih razponov preko katerih je vrv kontinuirno speljana tako, da tvori več verižnic.



Slika 25: Različne variante izvedbe visečega mosta

(vir: Jure Radič. Mostovi, str. 242).

Vrv je lahko sidrana v del mosta ali pa v sidrni blok. Pri manjših razponih je možno vrv sidrati v vzdolžni nosilec. Pri večjih razponih pa to zaradi velikih sil ni možno, zato se v takšnem primeru vrv sidra v masivne bloke.

Vzdolžni nosilec je lahko neprekinjen preko več polj ali pa ima prekinitve na mestih, kjer so piloni. Pri visečih mostovih se uporabljajo vzdolžni nosilci z nespremenljivo višino. Večina mostov ima v prečnem prerezu dve vzporedni vrvi, ki s pomočjo vešalk nosijo voziščno konstrukcijo. Poznamo pa tudi primere s tremi ali štirimi vzporednimi vrvmi. Pri manjših mostovih so možne različne kombinacije, tudi takšne z le eno vrvjo ter s poševnimi vešalkami. Piloni so lahko fiksno ali pa členkasto povezani s temeljem. Najprej so uporabljali zidane pilone. Za tem so gradili jeklene in armiranobetonske pilone, ki so postajali sčasoma vedno vitkejši.

Kljub temu, da se z visečimi mostovi tudi danes dosegajo največji razponi, se graditelji vedno redkeje odločajo zanje. Razlog za to je predvsem visoka cena. Zaradi ekonomskih razlogov pa se gradi veliko več mostov s poševnimi zategami, ki so v nekaj desetletjih doživeli velik razvoj.

3 TEHNOLOGIJA GRADNJE MOSTOV

Pot od dobro zamišljenega projekta do njegove uresničitve je dolga in komplicirana. Zelo pomembno je, da imajo projektanti (konstruktor) in graditelji mostov v vseh fazah gradnje na umu ne le končno stanje, temveč tudi vse faze nastanka. To je zelo pomembno pri objektih, kjer se elementi ali celi sklopi večkrat ponavljajo, saj se lahko z racionalizacijo gradnje veliko prihrani. Vzporedno z razvojem konstrukcijskih sistemov je potekal tudi razvoj postopkov gradnje. Poznamo več različnih načinov ali metod gradnje. V začetku je gradnja potekala brez kakršne koli opreme, le s pomočjo človeške moči. Z razvojem opreme so se večale tudi dimenzije mostov. S pojavom betona se je prvič pojavila potreba po opažu. V današnjih časih pa se je spet pojavila potreba po gradnji mostov iz večjega števila manjših elementov (prefabricirani elementi). Cilj razvoja postopkov gradnje mostov pa je skrajšati čas gradnje, znižati ceno in narediti gradnjo čim bolj neodvisno od morfologije, zasedenosti terena in meteoroloških pogojev. Večinoma prevladujejo armiranobetonski in prednapeti mostovi v obliki grede ali okvirja, zato je povsem razumljivo, da je za te konstrukcijske sisteme in materiale razvitih in uporabljenih največ tehnologij gradnje. Večino teh tehnologij pa je možno uporabiti tudi za mostov s poševnimi zategami in za gradnjo horizontalnih konstrukcij nad loki. Načine in postopke gradnje lahko razvrstimo po več različnih kriterijih.

Glede na proizvodnjo elementov mostov ločimo:

- monolitna gradnjo (gradnja vsakega elementa na njegovem končnem mestu) in
- montažna gradnjo (elementi so predhodno izdelani).

Glede na gradbeni oder poznamo naslednje izvedbe:

- gradnjo na nepomičnem gradbenem odru, ki je lahko naslonjen na podpore ali pa je podprt s tal,
- gradnjo na pomičnem gradbenem odru in
- prosto gradnjo brez gradbenega odra.

Glede na položaj konstrukcije v času gradnje v odnosu na končno stanje razlikujemo:

- gradnja na mestu,
- vzdolžno in prečno potiskanje (narivanje) in
- vertikalno ali horizontalno obračanje.

Posamezni postopek lahko uvrstimo v več zgoraj naštetih skupin. Na primer s prostim konzolnim postopkom lahko gradimo monolitne ali pa montažne mostove.

Gradbeni odri so lahko nosilni ali delovni. Nosilni gradbeni odri so lahko takšni, da morajo nositi celoten sklop, dokler le ta ni sposoben prevzeti obremenitev lastne teže in drugih vplivov. Lahko pa prenašajo le del sklopa, ki se kasneje aktivira in prevzame obtežbo sosednjega sklopa ali drugih delov konstrukcije. V nekaterih primerih lahko jeklen gradbeni oder postane armatura bodočemu nosilcu. Včasih pa nosilne gradbene odre nadomeščajo sestavni deli končne konstrukcije (zatege in piloni)

Velika prednost je tudi, če most poteka nad morjem ali nad drugimi plovnimi vodotoki, saj lahko s pomočjo plovil enostavno dostavimo do gradbišča tudi težke elemente, katerih kraj proizvodnje se lahko nahaja tudi daleč stran. Takšen transport je tudi bolj ekonomičen. To pa dokazuje, da mora graditelj izkoristiti vse potenciale okolja za izbor racionalnega postopka gradnje.

Iz konstrukcijskega vidika mora biti vsaka faza dobro načrtovana in analizirana. To velja tako za konstrukcijo in njene dele, kakor tudi za gradbeni oder. Potrebno je upoštevati, da lahko med gradnjo nastopijo zelo neugodne obtežbe in da so takrat lahko smeri notranjih statičnih količin tudi nasprotne glede na končno stanje. Lep primer za to je gradnja loka s prostim konzolnim postopkom ali pa izvedba potiskanja vzdolžnega horizontalnega nosilca.

V zadnjih desetletjih se je tehnologija razvila tako, da končni deli konstrukcije med gradnjo služijo tudi kot pripomočki. Na način gradnje pa zelo vpliva tudi oprema za gradnjo, ki je na nekem območju dostopna.

3.1 Monolitna gradnja

Monolitna gradnja predstavlja gradnjo nosilnega sklopa na gradbenem odru, ki se ga odstrani ali pomakne takrat, ko sta konstrukcija ali posamezni nosilec sposobna prenesti obremenitve, katerim je podvržen. Takšen klasičen postopek gradnje je danes najbolj razširjen in je primeren tudi za največje mostove. Zaradi razvoja tehnologije, prizadevanja za bolj ekonomično gradnjo, zaradi možnosti večkratne uporabe gradbenega odra in zaradi segmentne gradnje, uporabljamo danes poleg fiksnih tudi pomične gradbene odre. Pomikajo se lahko po tleh, s pomočjo plovila ali pa tako da se opirajo na predhodno dokončane dele objekta. V nekaterih primerih monolitne zgradbe je izdelava gradbenega odra bolj komplicirana in zahteva več znanja od izdelave samega mostu. To velja predvsem za mostove z večjim razponom, ki potekajo preko vodotokov, globokih kanjonov ali preko nedostopnih dolin.

3.1.1 Izvedba na nepomičnem gradbenem odru



Slika 26: Nepomični oder, ki se opira na stebre
(lastna fotografija).

Izvedba z odri, ki so podprti stal, je najstarejši način gradnje mostov. Odri so jekleni ali leseni, sestavljeni iz več različnih manjših elementov, ki so primerni za večkratno uporabo. Za

gradnjo mostov z velikimi razponi jih skoraj ne uporabljamo več. V primeru, da so standardizirani, lahko sestavimo skupaj ne le posamezne elemente, ampak tudi večje sklope. Nepomični odri, ki so podprti s tal, so najbolj uporabni pri monolitnih mostovih z manjšimi razponi, nad dobro dostopnim terenom. Največja prednost takšnega postopka je, da omogoča izvedbo najrazličnejših vrst in oblik nosilne konstrukcije armiranobetonskih mostov. Zelo pomemben je tudi pravilen vrstni red gradnje. V primeru ločnih mostov gradnja ne poteka od ene do druge pete mostu, saj bi zaradi neenakomerne obtežbe tako dobili deformirano konstrukcijo. Betoniranje mora potekati po sektorjih, po predpisanem zaporedju. Na ta način oder čim bolj enakomerno obtežimo. Zaradi deformiranja odra, ki je posledica obtežbe, je potrebno izvesti nadvišanje, da bi konstrukcija na koncu imela želeno obliko na želeni niveleti. Vnaprej je potrebno tudi definirati način ločevanja opaža in odra od konstrukcije. Ločitev lahko poteka tako, da spustimo opaž ali pa tako, da dvignemo konstrukcijo.

Nepomični gradbeni odri imajo lahko veliko število ali pa le nekaj podpor. Odri, ki so podprti na več mestih so primerni za gredne in nižje ločne mostove. V primeru lesenega gradbenega odra, stebre zabijemo v tla kot pilote. Lahko pa so tudi postavljeni na betonski opori. Odri, ki imajo manj podpor, pa so večinoma jekleni in so uporabni v primeru razgibanih tal pri mostovih z različnimi razponi ter z različnimi višinami.



Slika 27: Podpiranje mostu s tal

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=75464>, datum 06.01.2010. Slikal: Jacques Mossot).

V Republiki Sloveniji uporabljamo nepomične gradbene odre za majhne mostove in predvsem za nadvoze in podvoze, kjer so zaradi dolžine objekta ostali postopki nerentabilni. Pri tem pogosto odra ne podpiramo s tal, ampak uporabimo jeklene palične nosilce, ki so podprti na stebrih. Na jeklene nosilce se namesti opaž z upoštevanim nadvišanjem. Betoniranje na nepomičnem odru je racionalno za razpetine od 5m do 30m. Projekt odra in opaža navadno izdelava izvajalec, pregledata in potrdira pa ga projektant in nadzorni organ še pred pričetkom postavljanja armature. Taka tehnologija gradnje je pogosto kombinirana tudi z ostalimi tehnologijami na večjih mostovih. Tako je bilo tudi pri gradnji črnokalskega viadukta, kjer je bil glavni razponski sklop narejen po tehnologiji prostokonzolne gradnje, medtem ko so bili manjši, stranski razponi na koprski strani zgrajeni z nepomičnim odrom, ki se je opiral na stebre. Kakor za druge tehnologije, velja tudi pri ti dejstvo, da je načrt betoniranja dober, če predvideva čim manj delovnih spojev, posebno v ravnini voziščne plošče. Največja prednost takšnega postopka pa je, da nima omejitev glede oblike in dimenzije prečnega prereza ter geometrije zgornje konstrukcije. Vendar pa komplicirana geometrija bistveno poviša ceno odra in opaža.

Pri gradnji mostu s pomočjo nepomičnega odra sem tudi sam sodeloval leta 2008, ko sem opravljal praktično usposabljanje. Most je bil dolg okrog 100m. Postopek gradnje pa je bil klasičen. Najprej je bila postavljena jeklena palična konstrukcija, ki je bila podprta na stebrih. Nato so tesarji nanjo položili opažne Doka elemente z upoštevanjem nadvišanja. Pravilnost nadvišanja je sproti spremljal geodet. Za tem se je pričelo vstavljati in vezati armaturo. Po celi dolžini so vstavili tudi rebraste cevi za prednapete kable. Nato je sledilo betoniranje. Betoniralo in vibriralo se je neprekinjeno in sicer 22 ur, pri tem pa je bilo vgrajenih 860m³ betona. Most je imel poln prerez s stranskima konzolama. Sledilo je razopažanje in vstavljanje kablov v rebraste cevi. Pri tem se je sproti tudi negovalo beton. Ko je beton dosegel zadostno trdnost, so kable prednapeli in cevi zainjicirali s cementno maso.



Slika 28: Vežanje armature
(lastna fotografija).

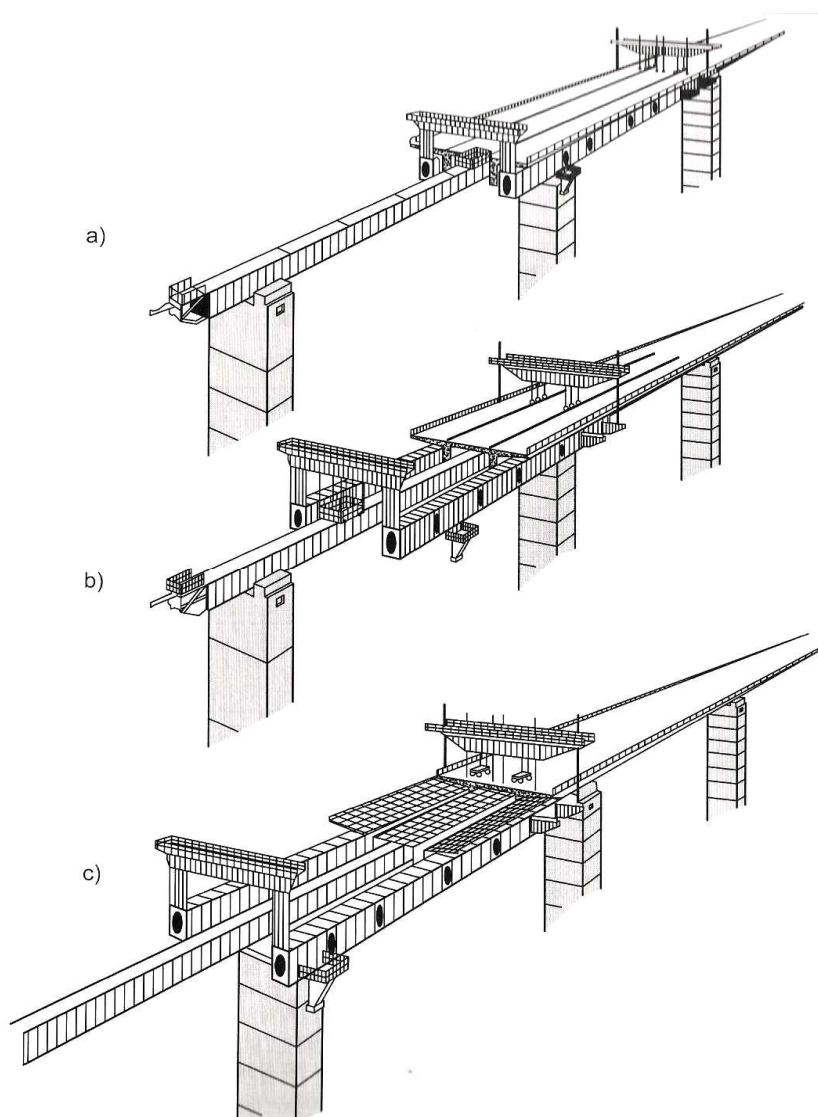
3.1.2 Izvedba na pomičnem gradbenem odru

Že davno so si graditelji prizadevali za čim cenejšo gradnjo. Zato so tudi poizkušali elemente odra čim večkrat izkoristiti. Tako so pri gradnji mostov z več razponi oder razstavili in ga pri gradnji v naslednjem polju ponovno sestavili. Še bolj ekonomično je, če oder pomikamo brez razstavljanja. Takšni odri so primerni predvsem za gradnjo mostov z večjim številom razponov. Pomični odri omogočajo premike v vzdolžni in prečni smeri konstrukcije. Premike omogočajo kolesnice in tračnice, ki so s tem namenom postavljene na tla. V kolikor je možno, pa pomike omogočajo tudi plovila, ki podpirajo gradbeni oder.

Pri gradnji daljših mostov z razgibano konfiguracijo terena postane uporaba klasičnih gradbenih odrov neekonomična. V takšnem primeru je bolj ekonomično uporabiti oder, ki se pomika iz polja v polje. Takšen oder, ki je zelo primeren za ploščaste in rebraste kontinuirne konstrukcije z razponi od 30m do 50m in celotno dolžino mostu več kot 300m, se postavi na predhodno izvedene stebre. Izdelavo ene dolžine imenujemo korak ali faza. Pri tem je približno 0,8 *l* v enem polju, 0,20 *l* pa previs v naslednjem polju. To pa zato, ker želimo posamezne dele spajati ne mestu, kjer so upogibni momenti minimalni. Nosilni elementi pomičnega odra so ponavadi vsaj 1,5 krat daljši od dolžine polja. Po betoniranju enega polja

in prednapenjanju se oder pomakne v naslednje polje. Velika prednost tega postopka je neodvisnost gradnje od konfiguracije terena. Jeklen oder mora biti poleg lastne teže sposoben prenašati tudi težo svežega betona. Ko beton doseže predpisano trdnost, sledi prednapenjanje in nato se oder pomakne v sosednje polje. Relativno večja teža odra in delo pri transportu, montaži in demontaži so razlogi, da ta tehnologija ni racionalna za krajše objekte. Gradnja enega polja navadno traja okrog 10 dni, kar omogoča napredovanje za približno 100m mesečno. To pa je relativno hitra gradnja. Prednost takšne tehnologije gradnje je minimalno število delovnih spojev, pa še ti so pri ničelnih točkah momentnih diagramov. Sestavni deli omenjenega jeklenega gradbenega odra, ki ima majhno maso so:

- dva zunanja nosilca ter en sredinski nosilec, ki služi za premikanje odra,
- sprednji prečni okvir, ki povezuje zunanje nosilce,
- sprednji voziček, ki s pomočjo prečnega okvirja pripelje zunanje nosilce po sredinskem nosilcu,
- zadnji pomični voziček s prečnim nosilcem, ki ima ob strani vešalke in
- dve konzoli z ležišči, s pomočjo katerih se preko utorov v stebrih obtežba prenese iz zunanjih nosilcev na stebre.



Slika 29: Pomični gradbeni oder

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 172)

Vzdolžni oder ima lastno tehnično in atestno dokumentacijo, ki jo je potrebno pregledati pri vsaki uporabi. Obvezen je tudi pregled in atestiranje opreme pred uporabo, kar onemogoča, da bi posledice poškodb vplivale na stabilnost. Takšna izvedba je zelo primerna za gredne mostove z rebrastim prerezom, ker je postavitvev opaža, ki se pomika vzporedno z odrom zelo enostavna. Enostavna je tudi postavitvev armature in samo betoniranje. Celoten postopek je zato ekonomičen. V primeru škatlastega prereza je pomikanje opaža bolj zamudno, saj imamo več težav s pomikanjem notranjega opaža. Zato v takšnem primeru pogosto uporabimo postopek z narivanjem ali prostokonzolni postopek, ki sta opisana v nadaljevanju.

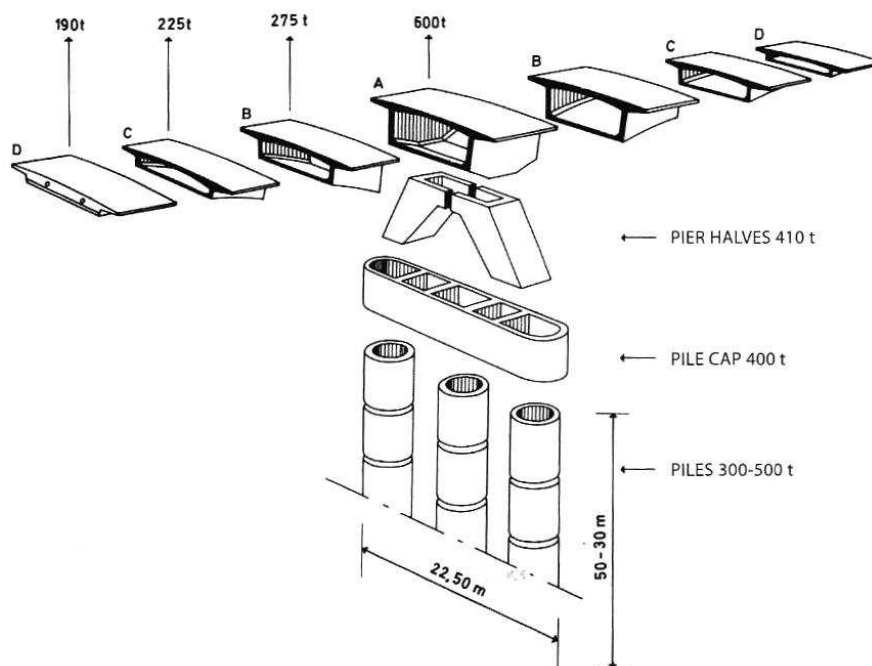
Opisan postopek je le en izmed postopkov s pomičnim odrom. Poznamo tudi druge postopke, ki pa imajo podoben princip delovanja.

3.2 Montažna gradnja

Gradnja iz predhodno pripravljenih elementov se je najprej razvila pri jeklenih mostovih. Kasneje so takšni postopki prišli v uporabo tudi pri masivnih mostovih. Danes lahko opazimo, da pri gradnji mostov na gradbišču dela manj delavcev kot v preteklosti. Delovna sila je včasih predstavljala relativno majhen strošek v primerjavi s celotnimi stroški mosta. Danes pa postaja vse dražja, zato se gradbena stroka vse bolj nagiba k načinu gradnje, kjer se na gradbišču potrebuje čim manj delavcev. Zaradi tega je montažna gradnja zelo dobrodošla. Nekateri primeri so celo takšni, da se določeni rutinski mostovi standardizirajo do takšne mere, da jih je možno enostavno sestaviti iz predhodno pripravljenih sestavnih delov za katere se niti ni vedelo kje bodo vgrajeni.

Prednost montažne gradnje je, da se lahko deli nosilcev ali pa celotni nosilci izdelajo v tovarni, kjer so pogoji izdelave praviloma veliko boljši kot na gradbišču. Zaradi boljših pogojev, je tudi kvaliteta boljša. Takšni deli se izdelajo serijsko, neodvisno od dinamike dela na gradbišču, kar zelo pospeši celotno gradnjo, saj se mnogi procesi odvijajo hkrati, kar pa na gradbišču ni možno. Element, ki je serijsko proizveden v tovarni, je tudi mnogo cenejši od enakega elementa proizvedenega na gradbišču. Dodatna prednost montažne pred monolitno gradnjo je tudi v tem, da včasih gradbenega odra sploh ne potrebujemo, oziroma je le ta neznamen. To je hkrati lahko tudi pomanjkljivost, saj moramo v tem primeru imeti posebno opremo za dvigovanje in vgradnjo elementov, kar lahko predstavlja velik strošek. Montažni način gradnje je zelo primeren za nadvoze preko avtocest. Kljub temu, da montažna gradnja poteka zelo hitro, pa je z vidika trajnosti konstrukcije bolj primeren polmontažni način z betoniranjem plošče na licu mesta.

Največja pomanjkljivost montažne gradnje pa so stroški transporta. Stroški prevoza so posebej veliki, ko imamo opravka s težkimi elementi večjih dimenzij, ki zahtevajo tudi izredni prevoz. Veliko ceneje in enostavneje je, če je možen prevoz s plovili.



Slika 30: Razčlenjenost na posamezne montažne elemente
(vir: Mondorf E. Paul. Concrete bridges, str. 409).

3.2.1 Vgradnja montažnih elementov

Kot je že bilo rečeno, so lahko montažni elementi izdelani predhodno v tovarnah oziroma neposredno na gradbišču. V primeru, ko so elementi izdelani na gradbišču, se proizvodnja najpogosteje organizira na trasi prometnice, neposredno za opornikom. Na ta način je za vgradnjo potreben le še horizontalni pomik. Elementi se v takšnem primeru izdelajo s pomočjo lesenega ali kovinskega opaža, ki se ga lahko večkrat uporabi.

Proizvodnja neposredno na gradbišču je zaradi terenskih pogojev lahko tudi pod traso mosta. V takšnem primeru je element potrebno le še dvigniti do mesta vgradnje. Najpogosteje se to stori z avto-dvigali ali s plovnimi dvigali. Avto-dvigala se lahko premikajo tudi po že

dokončanem odseku mostu in iz tega položaja postavijo nosilce, ki so bili proizvedeni na trasi mostu ali pod njo, na predvideno mesto.

Največjo nosilnost pa imajo plovna dvigala (tudi do več tisoč ton), zato omogočajo tudi montažo celotnega razpanskega sklopa naenkrat. S tem se zelo zmanjša čas vgradnje. Zaradi hitrejše gradnje je takšen postopek iz ekonomskega stališča dobrodošel. Prednost je tudi to, da so gradbeni elementi celoviti, zato je število spojev in podvrženost k napakam minimalna.

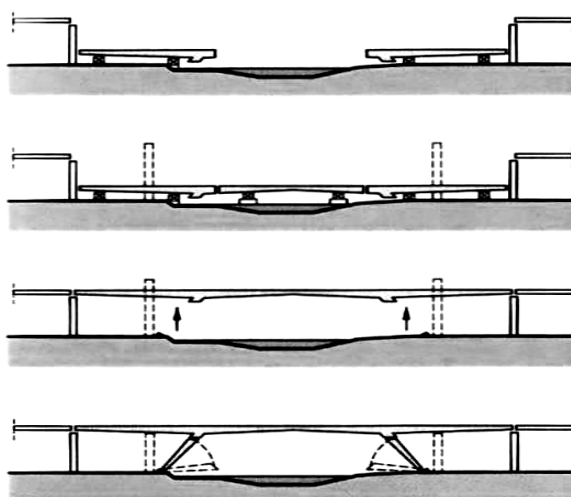
Iz Francije pa prihaja tehnologija izdelave zgornjih konstrukcij mostov iz industrijsko izvedenih armiranobetonskih segmentov, ki se jih pri gradnji spaja in prednapenja. Posamezni segmenti so dolgi do 3m in visoki do 6m. Višina je lahko tudi spremenljiva. Taka tehnologija je ekonomična za mostove, ki so daljši kot 500m, z razponi do 120m. Zaželeni so mostovi v premi z nagibom nivelete do 4%. V primeru, da most ne poteka v premi, postane izvedba in tudi izdelava segmentov komplicirana. Prednost takšnega postopka pa je v tem, da je proizvodnja segmentov neodvisna od vremenskih vplivov, saj poteka v zaprtem prostoru. Segmente je mogoče montirati s prostokonzolno gradnjo, s pomočjo pomičnega ali nepomičnega odra. Poznamo 2 tipa segmentov. Segmenti z mokrim stikom in segmenti s kontaktnim prilegajočim stikom. Postopek z mokrim stikom je manj zahteven glede dimenzijskih natančnosti. Pomanjkljivosti postopka pa so v pridrževanju segmenta tako dolgo, da spoj otrdi, kar pa zmanjšuje hitrost gradnje. Danes se v glavnem uporabljajo segmenti s prilegajočimi kontaktnimi stiki z nazobčanimi dotikajočimi se površinami in s premazi z epoksi lepilom. Zahtevnost postopka, kvaliteta in trajnost mostov je najbolj odvisna ravno od kvalitete stikov med segmenti. Uporaba tehnologije segmentne gradnje zahteva višji tehnični nivo in izkušnost projektantov, izvajalcev, nadzornikov. V Republiki Sloveniji segmentna gradnja še ni zaživela.



Slika 31: Montaža segmentov

(vir: <http://www.mtc.ca.gov/news/photos/img/7532D049.jpg>, datum: 14.01.2010).

Zelo enostavna in rutinska je lahko tudi montažna gradnja okvirnih mostov. Ko so elementi pripravljeni za vgradnjo, je potrebno vzdolžno horizontalno nosilno konstrukcijo le še dvigniti in začasno podpreti. Seveda pa se lahko montažno okvirne objekte gradi tudi po drugih postopkih.



Slika 32: Enostavni montažni postopek gradnje okvirnih mostov

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 265).

3.2.2 Polmontažni postopki

Pri montažnih mostovih pride lahko zaradi veliko različnih spojev do težav glede funkcionalnosti in trajnosti. Zato se gredne mostove z razponom do 40m pogosto izvede s polmontažnimi postopki. Polmontažni postopek izgleda tako, da se glavni nosilec izvede z montažnim postopkom, voziščno ploščo nad njim pa v monolitni izvedbi. Na ta način gradnja še vedno poteka hitro in enostavno. Z betoniranjem voziščne plošče pa se ustvari zadostna monolitnost celotne konstrukcije.

Na tržišču je veliko različnih vrst in oblik prečnih prereзов prednapetih nosilcev za polmontažno gradnjo. Najbolj pogosto pa se uporabljajo klasični I prerezi, I prerezi s širšo zgornjo pasnico, T prerezi in V prerezi. Prerezi so tudi standardizirani. Pri nas se pogosto uporabljajo različni I in T prerezi, ki so oblikovani tako, da se jim zgornje pasnice skoraj dotikajo. V takšnem primeru se nad njimi brez dodatnega opaža izvede voziščna plošča. Prečne nosilce se zaradi boljše razporeditve obtežbe vstavi le nad podporami. Če pa je med vzdolžnimi nosilci tudi razmak, se ga prekrije z montažnimi ploščami, ki služijo tudi kot izgubljen opaž monolitni voziščni plošči. Izkušnje kažejo, da je zaradi trajnosti dobro, da je voziščna plošča debela vsaj 20cm.

3.2.2.1 T nosilci

Nosilci s T prerezom in z zgornjim pasom širokim od 1m do 2m so enostavni za izdelavo in montažo. T nosilci omogočajo betoniranje voziščne plošče in krajnih prečnikov brez odra in opaža. S sovprežnostjo montažnega in monolitnega dela prereza ustvarijo enoten sovprežni prerez za prevzem prometne obtežbe in dodatne stalne obtežbe. Na trgu se uporabljajo nosilci, ki imajo dolžino do 25m in so že prednapeti. Nosilce večjih dolžin pa je možno naknadno prednapeti s kabli. Z vgrajevanjem potrebne vzdolžne mehke armature je možno doseči tudi kontinuirnost za prometno obtežbo. Najbolj kvalitetna izvedba je, če je prečnik monolitno povezan z vzdolžnimi nosilci. Montažni T nosilci so racionalni za mostove dolge do 200m, kot tudi za manjše mostove z le 1 razpetino. Sovprežna povezava montažnih nosilcev in

voziščne plošče je omogočena z mozniki po celotni dolžini in širini nosilcev. Mozniki so sestavni del armature nosilca. Po takšni tehnologiji gradnje je bil grajen viadukt Podmežakla 4

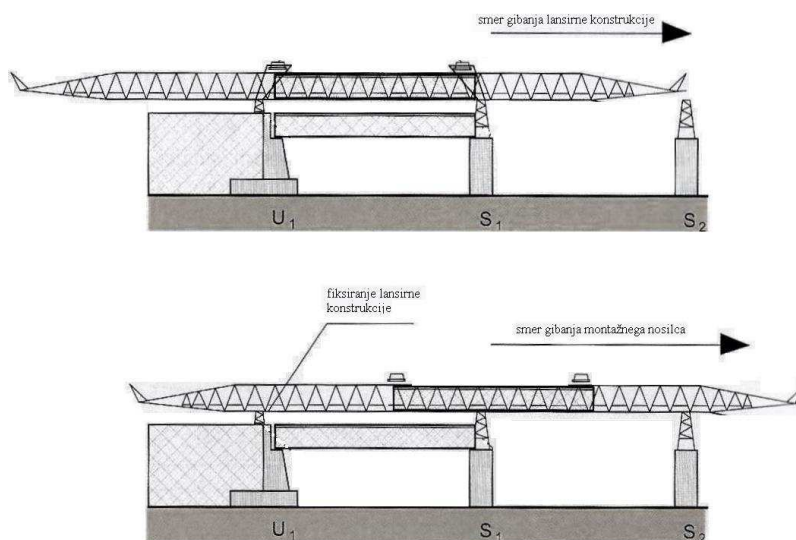


Slika 33: Monolitna povezava prečnika s T nosilci

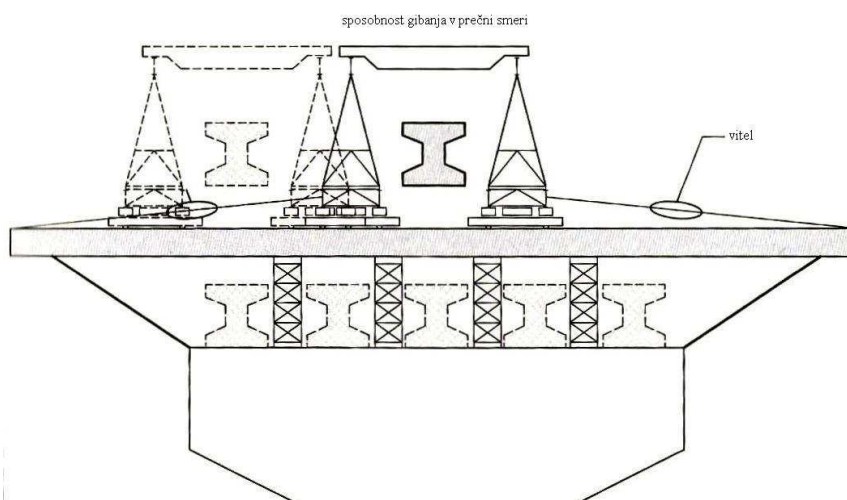
(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=8637>, datum 09.01.2010. Slikal: Nicolas Janberg).

3.2.2.2 I nosilci

Tehnologija izdelave zgornjih konstrukcij iz prednapetih I nosilcev dolžine od 25m do 40m je bila v mnogih državah najbolj razširjena tehnologija v 2. polovici prejšnjega stoletja. I nosilce so montirali s pomočjo samohodnih jeklenih rešetkastih lansirnih konstrukcij. Lansirno konstrukcijo sestavljata 2 paralelna prostorska trikotna palična nosilca z dolžino, ki je večja od dveh razpetin. Konstrukcija je samohodna vzdolž mostu in nasipa, kjer prevzame nosilec. Racionalna je za dolžine mostov od 150m do 600m. Montaža je hitra in enostavna ter zelo uporabna v primeru zahtevne konfiguracije terena. Zaradi lažje vgradnje takšni palični nosilci omogočajo tudi prečne pomike. Najbolj so uporabni v primeru montažnih in polmontažnih grednih mostov. Lansirna konstrukcija deluje tako, da ko se pomika, element miruje. Ko pa se pomika element, lansirna konstrukcija miruje. To dosežemo s pomočjo vitla. Ko lansirno konstrukcijo premaknemo na ustrezno mesto jo fiksiramo in tako omogočimo, da se lahko vzdolž nje, do mesta vgradnje prenese še montažni nosilec. Montažne nosilce se lahko vgrajuje tudi le s pomočjo kablov. Pomanjkljivost takšnega postopka je manjša nosilnost, zato ga uporabljamo le v primeru manjših elementov.



Slika 34: Lansirni rešetkasti nosilec je zelo uporaben pri montažni gradnji
(vir: Jure Radič. Masivni mostovi, str. 174).



Slika 35: Rešetkasti nosilec mora omogočiti gibanje tudi v prečni smeri saj se le tako lahko
vzporedno namesti več montažnih nosilcev
(vir: Jure Radič. Masivni mostovi, str. 175).

Vendar pa v obdobju, ko se je veliko mostov zgradilo s pomočjo I nosilcev, nad podporami niso vzpostavljali kontinuirnosti konstrukcije. Elemente so povezovali z dilatacijami. Prečne prekinitve in nezveznosti nad podporami so mesta največjih poškodb, poleg tega pa je na teh

mestih tudi vožnja manj udobna. Korozija slabo zaščitene kablov, korozija armature pod tankimi zaščitnimi sloji in propad betona so povzročali velike poškodbe in narekovali nujnost sanacije mostov. Danes teh problemov ni več, saj se izdelujejo sodobnejši prerezi, ki imajo manj nosilcev, nad katerimi se betonira debelejša voziščna plošča z minimalno debelino 23cm in prečniki, ki so široki več kot 1m. »Prefabricirani nosilci in voziščna plošča s prečnikom se povežejo, monolitizirajo in kontinuirajo v enotni sovprežni prerez. S takšnimi nosilci se doseže razpone do 40m. Tako kot pri T nosilcih, tudi pri I nosilcih zagotovimo sovprežno povezavo montažnih nosilcev in voziščne plošče z mozni« (Ministrstvo za promet in zveze. 1997. Smernice za projektiranje premostitvenih cestnih objektov. Ljubljana, str. 83).

3.3 Prostokonzolna gradnja

Prostokonzolna gradnja je način gradnje brez velikega gradbenega odra, kjer napredovanje gradnje poteka konzolno od podpor proti sredini razpona. To je zelo racionalen postopek. Uporablja se za gredne, ločne in za mostove s poševnimi zategami. Takšen postopek je primeren tako za monolitno, montažno ter kombinirano gradnjo. Uporablja se v glavnem za visoke mostove z daljšimi razponi. Lastnost tega postopka je, da gradnja poteka od stebrov proti koncu konzole in da mora vsak krajši odsek prevzeti obremenitev naslednjega odseka ter odra in opaža. Po betoniranju ali montaži odseka se le ta s prednapenjanjem poveže s predhodno izdelanim odsekom in nato se pomični oder in opaž premakneta naprej. Konzolni postopek gradnje izključuje uporabo klasičnega gradbenega odra in ga uporabljamo v primerih:

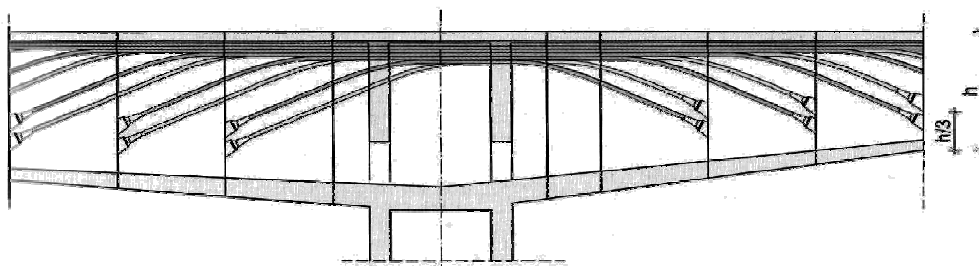
- ko so vodne prepreke globoke ali široke,
- ko imamo opravka s hitrimi tokovi in nevarnostjo pojava visoke vode,
- ko so stebri relativno visoki ali
- ko obstaja potreba po prostem odvijanju prometa pod mostom tekom gradnje.

Gradbeni odri oziroma začasni nosilci so pri konzolni gradnji praviloma veliko krajši od dolžine premoščene razpona. Pričvrstijo se na predhodno zgrajeni del konstrukcije in se nato skladno z napredovanjem gradnje korak za korakom postopoma pomikajo proti

sredini razpona. Takšni gradbeni odri morajo biti čim lažji. Pri monolitni gradnji prenašajo opaž in sektor konstrukcije, ki se betonira. Pri montažni gradnji pa ti začasni nosilci služijo za prijemanje prefabrikata in kot delovna ploščad. Navadno poteka gradnja od stebrov simetrično na obe strani, tako da v stebru dobimo čim manjši upogibni moment. Največji prednosti prostokonzolne gradnje sta:

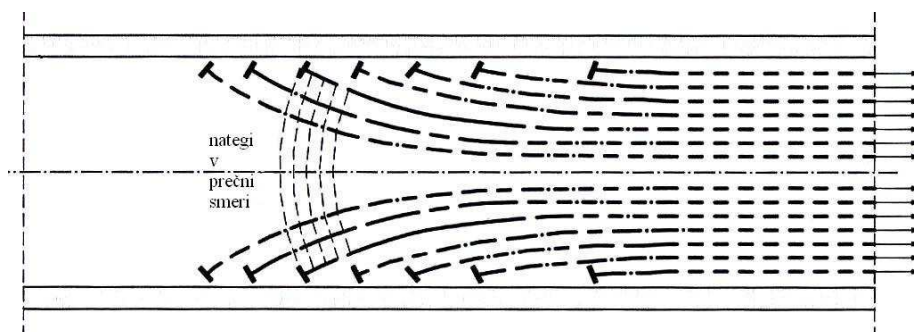
- velik prihranek pri gradbenem odru. To še posebej velja v primeru gradnje nad morjem, rekami ali globokimi kanjoni. V takšnih primerih bi bil fiksni oder zelo drag in pogosto neizvedljiv,
- omogočanje neoviranega prometa pod mostom. To še posebej pride do izraza pri pomembnih plovniških poteh.

Na koncu vsakega segmenta je tekom izvedbe potrebno sidrati minimalno 2 kabla. Ti kabli se nahajajo v hrbtih škatlastih prerezo in se jih najprej prednapne. Kabli se sidrajo čim nižje in na ta način je vertikalna komponenta sile prednapenjanja večja in zmanjšuje prečne sile v konstrukciji, ki so posledica lastne teže.



Slika 36: Kabli posameznih segmentov

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 223).



Slika 37: Potek kablov v spodnji plošči

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 224).

Kable v polju napnemo, ko je most že zgrajen. Ti kabli, ki se nahajajo v spodnji plošči, se postopoma dvigajo proti rebro in sidrajo v njegovi bližini. To pa v spodnji plošči povzroča dodatne natege v prečni smeri.

V osemdesetih letih 20. stoletja se je začel uporabljati tudi postopek konzolne gradnje, kjer imamo poleg klasičnega prednapenjanja kot dopolnilo še zunanje prednapenjanje. Zunanji kabli se namestijo naknadno, po spajanju konzol in prevzemajo pozitivne momente. Običajno potekajo v notranjosti škatlastega prereza iz zgornjega v spodnji pas, kjer so čvrsto pritrjeni. Prednosti zunanje prednapenjanja so predvsem:

- manjše izgube sile zaradi trenja kot pri klasičnem prednapenjanju,
- betoniranje je olajšano, saj nimamo zaščitnih cevi znotraj prereza,
- injektiranje kablov je olajšano in se tudi lažje kontrolira in
- možnost lažje sanacije takšnih mostov.

Največja pomanjkljivost pa je ta, da so stroški kablov pri zunanjem prednapenjanju veliko večji kot pri klasičnem načinu.

3.3.1 Monolitna prostokonzolna gradnja grednih mostov



Slika 38: S prostokonzolno gradnjo se je gradil tudi črnokalski viadukt
(vir: Dars d.d. Viadukti in mostovi na slovenskih cestah, str. 123).

Za gradnjo grednih mostov z velikimi in največjimi razponi, ki premoščajo visoke vodne ali težko dostopne suhe ovire je to postopek, ki se najbolj pogosto uporablja. Po betoniranju stebrov sledi betoniranje baznih delov nad stebri, ki so dolgi do 10m. Bazne dele je mogoče narediti skupaj s stebri, v togi povezavi ali pa z ležišči in začasnim sidranjem. Za tem je potrebno na vsako stran konzole namestiti voziček, ki mora biti sposoben prenašati posamezni odsek vse dokler beton ne doseže zadostne trdnosti, da se ga prednapne. Betoniranje odsekov, oziroma segmentov poteka simetrično na obeh straneh stebra. Gradnja lahko poteka tudi v slabem vremenu, saj je možno voziček tudi zapreti in po potrebi ogrevati. Opaž se pomika naprej s pomočjo vozička, ki je pritrjen na predhodni odsek mostu. Posamezni odseki so dolgi od 3 do 5m. Na takšen način gradnja napreduje simetrično vse do veznega segmenta v sredini razpona. Tukaj pa ima konstruktor dve možnosti. Najpogosteje se v veznem delu prednapne in spoji obe konzoli. Na ta način se ustvari kontinuiranost in konstrukcija ne deluje več kot konzola. Lahko pa se konstruktor odloči tudi za členkast spoj. V tem primeru se na sredini naredi dilatacijo, preko katere se upogibni momenti ne prenašajo in tako se leva in desna konstrukcija še naprej obnašata kot konzoli. Za členkast spoj so se konstruktorji pogosto odločali ob uvedbi prostokonzolne gradnje, medtem ko se danes odločajo za kontinuirni spoj. V primeru večjega razpona si lahko pomagamo s pomožnimi nosilci.

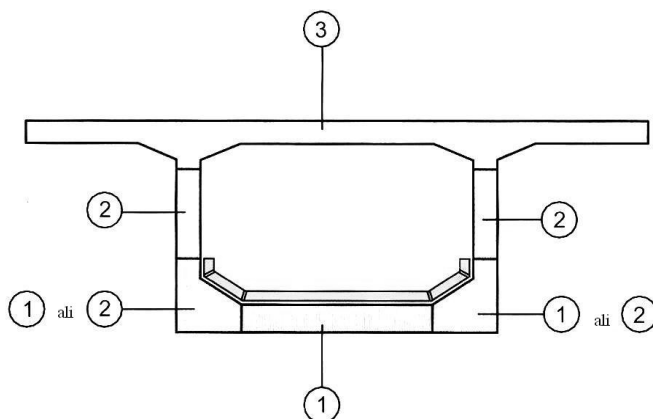
Gradnja enega takta običajno traja 1 teden. Uporaba štirih vozičkov pri daljših mostovih omogoča napredovanje do 80m na mesec in tako postane ta metoda tudi zelo hitra.

Preglednica 1: Primer delovnih aktivnosti za gradnjo enega takta v sedmih dneh po prostokonzolni tehnologiji.

Dan v tednu	Delovne aktivnosti
Ponedeljek	<ul style="list-style-type: none">- Prednapenjanje segmenta, ki je bil betoniran prejšnji teden- Pomikanje odra z zunanjim opažem v nov položaj- Polaganje armature spodnje plošče
Torek	<ul style="list-style-type: none">- Pomikanje in nameščanje notranjega opaža- Polaganje spodnje armature voziščne plošče in zaščitnih cevi kablov za vzdolžno in prečno prednapenjanje
Sreda	<ul style="list-style-type: none">- Polaganje zgornje armature voziščne plošče
Četrtek	<ul style="list-style-type: none">- Betoniranje
Petek	<ul style="list-style-type: none">- Vstavljanje kablov za prednapenjanje
Sobota	<ul style="list-style-type: none">- Nega betona
Nedelja	<ul style="list-style-type: none">- Nega betona

Betonirani odseki ali segmenti so lahko enakih dolžin ali pa nesimetrični. Pri nesimetričnih izvedbi so odseki, ki so bližje stebru krajši. Ključna faza pri prostokonzolni gradnji pa je pravilno nadvišanje konstrukcije v času gradnje, da se dobi željeno niveleto. Pri računu nadvišanja je potrebno pravilno upoštevati vplive krčenja in lezenja betona, relaksacije jekla, temperature in staranje betona. Zaradi omenjenih vplivov je potrebno veliko pozornosti posvetiti kontroli kvalitete materiala pred vgradnjo in tekom gradnje. Pri napenjanju kablov gre običajno za kombinacijo krajših in daljših kablov znotraj in deloma izven prereza. Kabli, ki se nahajajo izven prereza, služijo za prometno obtežbo in jih je mogoče naknadno montirati in prednapeti.

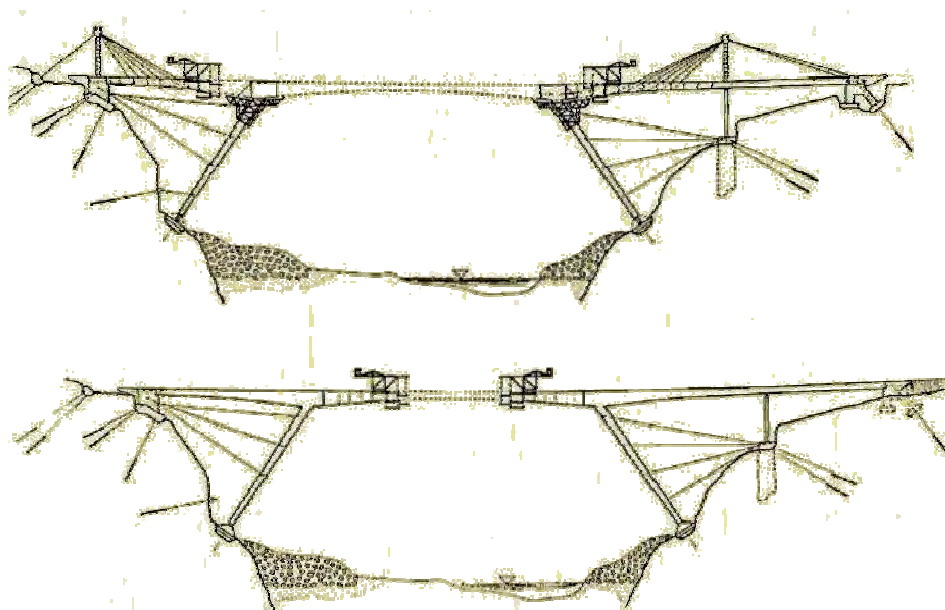
Zaželeno je, da je zgornja konstrukcija v premi ali pa v krivini s konstantnim in čim večjim polmerom v odvisnosti od razpetine. Niveleta naj ne bi imela večjega nagiba kot 4%. »Najbolj primerne so simetrične konveksne nivelete, pri katerih je teme vertikalne nivelete v sredini mostu« (Ministrstvo za promet in zveze. 1997. Smernice za projektiranje premostitvenih cestnih objektov. Ljubljana, str.80.)



Slika 39: Faze betoniranja škatlastega prereza

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 208).

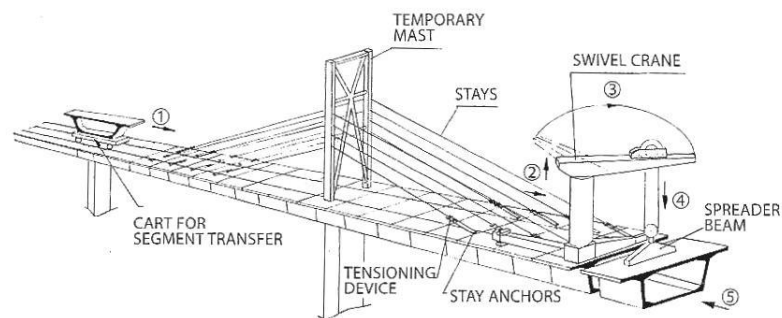
Tudi okvirne mostove je smiselno graditi po monolitno konzolnem načinu gradnje. Največja prednost pred montažnim postopkom je v monolitnem spoju stebra in vzdolžnega nosilca. Okvirne objekte se lahko gradi tudi po segmentnem postopku brez gradbenega odra, vendar je v tem primeru potrebno že narejeni del objekta začasno podpirati vse dokler se ne ustvari okvirno delovanje. Če ima okvirni sistem poševne stebre, je tudi njih potrebno podpirati, dokler se ne ustvari okvirni sistem.



Slika 40: Začasno podpiranje mostu

(vir: Troyano Leonardo Fernandez. Bridge engineering, str. 456).

3.3.2 Montažna konzolna gradnja grednih mostov



Slika 41: Segmentna gradnja

(vir: Mondorf E. Paul. Concrete bridges, str. 397).

Za razliko od monolitne gradnje, poteka montažna gradnja grednih mostov veliko hitreje. Pri monolitni gradnji se ponavadi naredi en odsek tedensko. Pri montažni gradnji pa se lahko vgradi tudi po več predhodno pripravljenih odsekov dnevno. Neprepustnost spoja med dvema segmentoma se doseže z epoksidnimi lepili. Posamezni odseki pa začnejo delovati kot celovita konstrukcija po prednapenjanju. Nov odsek se prednapne čim se ga postavi v končni položaj. Zaradi pogostega prednapenjanja imamo v tem pogledu večje stroške kot pri monolitni gradnji, vendar pa prihranimo pri času gradnje. Pri konzolni gradnji si včasih pomagamo tudi z:

- začasnimi piloni. To pride v poštev pri dolgih konzolah, ko želimo zmanjšati upogibne momente. Preko teh pilonov se konzola prenaša z zategami,

- začasnimi vzdolžnimi nosilci nad objektom. Uporabni so, ko se dostavlja vnaprej izdelan element po že končanem delu objekta. Takrat začasni nosilec prime element in ga prenese do mesta vgradnje.

Prednosti montažne pred monolitno konzolno gradnjo so:

- boljša kakovost betona, saj se odseke lahko predhodno betonira v delavnici z boljšimi pogoji,
- zmanjšajo se dolgotrajne deformacije na mostu, saj so odseki v trenutku nastopa obtežbe že dosegli zadostno starost in trdnost,
- hitrost gradnje z možnostjo montaže tudi po več odsekov dnevno.

Danes so zelo razviti načini spajanja montažnih odsekov med seboj. Včasih pa so s tem imeli velike probleme, saj so spoje premazovali le z malto. To pa je povzročalo težave, saj so spoji najbolj občutljivi deli montažnih mostov. Malta pa ni zagotavljala popolne vodotesnosti in je zato voda lahko našla pot do prednapetih kablov. Poleg tega se na spojih tudi napetosti neenakomerno porazdeljujejo. Zato je po prednapenjanju potrebno zagotoviti neprekinjenost materiala. Omenjeni problemi pa so bili rešeni, ko so odseke med seboj začeli lepiti s polimernim lepilom na osnovi epoksidnih smol. Lepilo ne prepušča vode ter dobro prenaša različne vrste napetosti.

Elementi z ozkimi špranjami se morajo lepo prilegati. Za boljši prenos sil imajo elementi na enem koncu zob, na drugem pa utor. Kljub temu je relativno zahtevno zagotoviti dobro naleganje, saj so elementi lahko spremenljivih višin in hkrati izvedeni v krivini.

Kljub mnogim prednostim montažne gradnje nekateri graditelji ravno zaradi spojev še vedno gojijo nezaupanje do tega postopka in se raje odločajo za monolitno gradnjo. Slabost montažne gradnje je tudi v tem, ker se porabi približno 30% več kablov za prednapenjanje. Danes se dolge mostove majhnih ali srednjih razponov s tipičnimi prečnimi prerezi pogosto gradi z montažno konzolno gradnjo. Velike mostove z nestandardnimi prečnimi prerezi in z velikimi razponi pa v glavnem gradimo v monolitni izvedbi.

3.3.3 Monolitna konzolna gradnja ločnih mostov



Slika 42: Podpiranje loka s pomočjo zateg in začasnega pilona

(vir:http://www.doka.com/doka/en_global/references/constructionmethods/bridgeconstruction/archbridges/projectdatas/pages/03492/index.php, datum 11.01.2010).

Včasih so bili armiranobetonski ločni mostovi zaradi zelo dragega gradbenega odra skorajda nekonkurenčni ostalim konstrukcijskim sistemom. To je veljalo dokler se ni začel uporabljati konzolni postopek tudi za gradnjo loka. Pri tem postopku je jekleni pomični konzolni oder fiksiran na predhodno betoniranem odseku loka. Na odru je opaž za betoniranje naslednjega odseka loka. Po končanem betoniranju je potrebno počakati, da beton pridobi zadostno trdnost, nato se konzolni oder premakne v nov položaj, kjer se ga prime z novimi zategami. Z zategami pridržujemo tudi že dokončan del loka. Po gradnji stebrov sledi gradnja horizontalne konstrukcije, ki lahko poteka tudi po postopku narivanja.

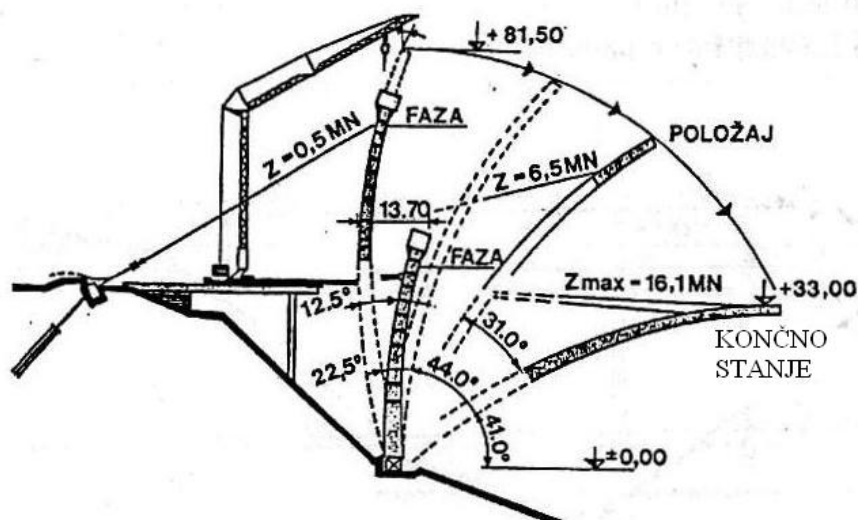
Celotna konstrukcija je lahko izvedena bolj racionalno in hitreje, če pričnemo z gradnjo vzdolžne horizontalne konstrukcije vzporedno z gradnjo loka. Tako se celotni sklop gradi hkrati in pogosto imamo pri takšnem postopku tudi manj dodatnih del.

3.3.4 Obračanje pollokov

Ločne mostove lahko gradimo tudi tako, da se polovico loka betonira v pokončnem položaju nad petami loka. Po betoniranju pa pollok obrnemo proti temenu v končni položaj. Postopek poteka po fazah in je primeren le za loke, ki imajo razpon manjši kot 200m.

Najprej se izvedeta peti loka, v kateri bo pollok v začetku členkasto vpet. Za tem sledi betoniranje pollokov v pokončnem položaju do približno četrtiline njegovega razpona. Pri betoniranju si pomagamo s pomičnim opažem. Pollok pa stoji pokončno, ker ga pridržujemo s pomočjo zateg.

V drugi fazi pollok zasukamo za določen kot z namenom, da bi potekalo tudi betoniranje druge polovice v optimalnem položaju. Na ta način tudi najbolj zmanjšamo vpliv ekscentrične obremenitve zaradi vertikalne obtežbe.



Slika 43: Faze betoniranja in obračanja polloka

(vir: Jure Radić. Mostovi, str. 380).

V tretji fazi spustimo pollok v končni položaj. To storimo s pomočjo kablov in hidravlične opreme, ki je zasidrana v tleh. V ti fazi so natezne sile v zategah največje. Ko je pollok v

končnem položaju se ga v temenu spoji z drugim, simetričnim delom. Členkaste pete se zapolnijo z betonom, tako da postane lok togo vpet. Prednosti takšne gradnje so:

- enostavno betoniranje v pokončnem položaju,
- enostavno pomikanje opaža omogoča hitro izvedbo in
- manj sider in zateg kot pri konzolni gradnji ter krajši čas njihove uporabe.

Slabosti pa sta:

- postopek je zaradi pokončnega betoniranja primeren le za mostove z razponom manjšim od 200m in
- dodatni stroški za začasni členek v peti.

3.3.5 Prostokonzolna gradnja mostov s poševnimi zategami

Pri konzolni gradnji mostov s poševnimi zategami potrebujemo minimalno število dodatnih oziroma začasnih pripomočkov. Pogosto lahko vse obremenitve prenašamo s pomočjo zateg, ki so sestavni del končne konstrukcije. Prav zaradi dejstva, da se tekom gradnje lahko koristijo deli končne konstrukcije, je ta postopek hiter, enostaven in racionalen.

Najprej se zgradi spodnja konstrukcija in pilon, šele za tem pa začnemo s prostokonzolno gradnjo prekladne konstrukcije, ki se začne ob pilonu in nato poteka simetrično v obeh smereh. Običajno so edina pomagala le dvigala, s pomočjo katerih se v primeru montažne gradnje elemente prenese do mesta vgradnje. Ko konzolni odsek doseže določeno dolžino, se montirajo in aktivirajo zatege. Na ta način se simetrično napreduje proti sredini razpona.

Pogosta je kombinacija prostokonzolne gradnje v osrednjem razponu z gradnjo na začasnih oporah v bočnih razponih. V tem primeru se na začasnih oporah izvede celotna konstrukcija v bočnih razponih, zatege pa se tako na tem, kakor tudi nad osrednjim razponom vgrajujejo skladno z napredkom konzolne gradnje v osrednjem razponu.

3.4 Gradnja s pomočjo narivanja in vzdolžnega vlečenja



Slika 44: Med postopkom narivanja je na prekladno konstrukcijo pričvrščen jeklen kljun
(vir: Dars d.d. Viadukti in mostovi na slovenskih cestah, str. XI)

Razvoj tehnologije raznih pripomočkov za gradnjo, predvsem hidravličnih batov in dvigal je omogočil, da se lahko deli mosta izdelujejo na določenem, za gradnjo bolj primernem mestu in se nato, ko so končani premestijo v končni položaj na konstrukciji. Na ta način se poskušamo izogniti oviranju prometa pod objektom in dragim gradbenim odrom.

Tehnologija s pomočjo narivanja je postala v drugi polovici 20. stoletja zelo uporabna, saj je v tistem obdobju rasla cena delovne sile. Zato so se konstruktorji raje kot za gradnjo s pomočjo gradbenega odra, kjer sodeluje veliko število ljudi odločali za gradnjo s pomočjo narivanja, ki zahteva manj delovne sile. Z razvojem teflona in podobnih materialov, ki omogočajo drsenje z majhnim koeficientom trenja, je bil ta postopek še dodatno olajšan. Danes so najbolj racionalni razponi za tako gradnjo med 25m in 50m, pri dolžinah mostov od 150m do 400m.

Hitrost gradnje je odvisna od dolžine delov, ki se v enem kosu betonirajo in znaša od 50m do slabih 200m mesečno.

Metoda je takšna, da se na posebno urejenem prostoru za opornikom betonirajo odseki vzdolžne nosilne konstrukcije, ki jih nato potiskamo ali tudi vlečemo preko predhodno zgrajenih stebrov, dokler celoten sklop ni končan. Prednosti takšnega postopka so naslednje:

- ker se betonira na mestu, je gradnja monolitna in zato imamo malo spojev,
- betoniranje se odvija v dobrih tovarniških pogojih, saj se za opornikom naredi pokrita delavnica, kjer je betonirani element zaščiten pred neugodnimi klimatskimi razmerami,
- betonirana se vedno z istim opazem tako, da se enaka dela večkrat ponovijo v taktih,
- ne potrebujemo gradbenega odra in dodatnih podpor,
- glede na to, da se celotna prekladna konstrukcija izvaja v višini nivelete, ni potrebe po dviganju in spuščanju težkih delov konstrukcije. Zaradi tega tudi ni potrebna uporaba dragih dvigalk z veliko nosilnostjo.

-



Slika 45: Narivanje poteka s pomočjo hidravličnih batov.

(vir: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=145619>, datum: 13.01.2010. Slikal: Jacques Mossot).

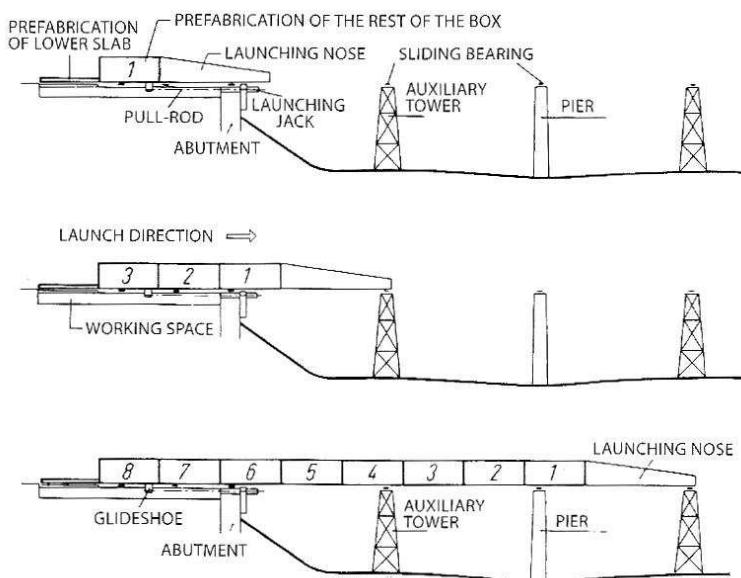
V začetku se je ta postopek uporabljal le za gradnjo jeklenih mostov. Z razvojem prednapetega betona pa je postal postopek primeren tudi za betonske mostove. V Evropi je bila ta tehnologija gradnje prvič uporabljena v Avstriji, leta 1965. Danes je ta postopek zelo razširjen za gradnjo dolgih kontinuirnih betonskih prednapetih mostov s skupno dolžino do 2000m. Gradnja se izvede s pomočjo naslednje tehnološke opreme:

- delavnica: ploščad z odrom in opažem ter s hidravlično opremo za spuščanje odra in opaža,
- hidravlične opreme z jeklenimi ploščami in nosilci za narivanje,
- jeklene konzolne konstrukcije – kljuna,
- naprave za pridrževanje glavne konstrukcije,
- začasnih drsnih ležišč na stebrih s teflonskimi vložki,
- bočnih hidravličnih vodil in
- opreme za prednapenjanje segmentov in glavne prekladne konstrukcije.

Proizvodni plato za betoniranje je podprt z močnimi betonskimi temelji in mora biti nedeformabilen in prilagojen geometriji nosilnih konstrukcij. Proizvodni plato se montira za oporniki mostov, običajno na strani, ki je višja. »Vrh opornika je konstruiran tako, da je prilagojen dimenzijam in funkciji opreme za narivanje, celoten opornik pa je potrebno preveriti tudi na vplive, ki nastopijo pri montaži in ga, če je potrebno tudi ojačati«(Ministrstvo za promet in zveze. 1997. Smernice za projektiranje premostitvenih cestnih objektov. Ljubljana, str 81.).

Postopek gradnje poteka na sledeči način. Za opornikom se na platoju betonira odsek vzdolžnega nosilca, ki je praviloma krajši kot 60m. Zato je za opornikom potrebno zagotoviti dovolj prostora ter zadostno nosilnost tal. Pogosto so takšni odseki dolgi med 10m in 30m. Ko beton pridobi potrebno trdnost se ga centrično prednapne. Nato prednapeti del, ki leži na teflonskih ležiščih potisnemo naprej s pomočjo hidravličnih batov in tako pridobimo prostor za izdelavo identičnega dela, za katerega uporabimo isti opaž. Vsa oprema (opaž, skladišča, oprema za potiskanje...) za izvedbo odseka je vedno na istem mestu, in sicer za opornikom. Zaradi tega so stroški proizvodnje in transporta manjši. Vsak naslednji betoniran odsek je narejen tako, da se dotika čela predhodno betoniranega odseka. Polno monolitnost dosežemo tako, da dva odseka povežemo z armaturo, ki poteka skozi režo oziroma ozko delovno

odprtino. S stališča projektiranja je idealno, da je reža segmenta, ki je posledica spoja dveh odsekov, postavljena v ničelnih točkah momentnega diagrama. Takšen postopek se ponavadi ponavlja v tedenskih taktih. Ko z vzdolžno konstrukcijo pridemo do naslednjega opornika, se zaradi projektne obtežbe prednapne še ostale kable. Ker je konzolni del med postopkom gradnje zelo obremenjen, si v primeru daljših konzol pomagamo tudi z začasnimi stebri in tako nosilec razbremenimo. Na prednji del konstrukcije priključimo tudi jeklen kljun z namenom, da bi zmanjšali upogibne momente betonske konzole v fazi potiskanja. Dolžina kljuna je običajno 0,4 – 0,6 dolžine razpona. Jeklen kljun je prostorska rešetkasta ali polnostenska konstrukcija spremenljive višine, ki jo sestavljata dva paralelna nosilca. Na višjem delu je povezan z nosilno betonsko konstrukcijo z visokovrednimi vijaki ali sidri. Na nižjem delu kljuna so sani ali pa dvigalke za reguliranje naleganja na podpore. Največja pomanjkljivost tega postopka je ta, da se med samim potiskanjem v istih prerezih izmenično pojavljajo tako pozitivni, kot tudi negativni upogibni momenti. To pa zato, ker se na primer prerez, ki bo imel končni položaj v sredini polja, med samim postopkom potiskanja večkrat pojavi tudi nad podporami, kjer so negativni momenti največji, saj med samim narivanjem do končnega položaja prehaja horizontalna konstrukcija skozi različne statične sisteme, od konzole in prostoležečega nosilca, do kontinuirnega nosilca. Zaradi tega je potrebno za prevzem statičnih vplivov v fazi gradnje horizontalno konstrukcijo tudi dodatno centrično prednapet s kabli, ki v celoti pokrivajo vplive lastne teže konstrukcije.

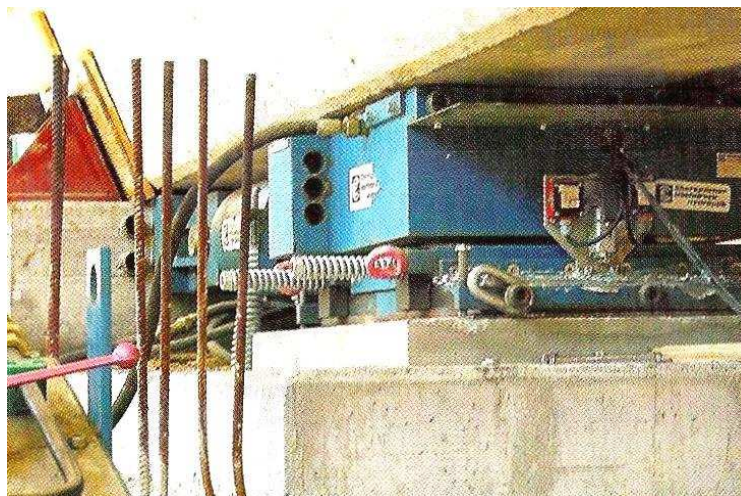


Slika 46: Postopek narivanja

(vir: Mondorf E. Paul. Concrete bridges, str. 278).

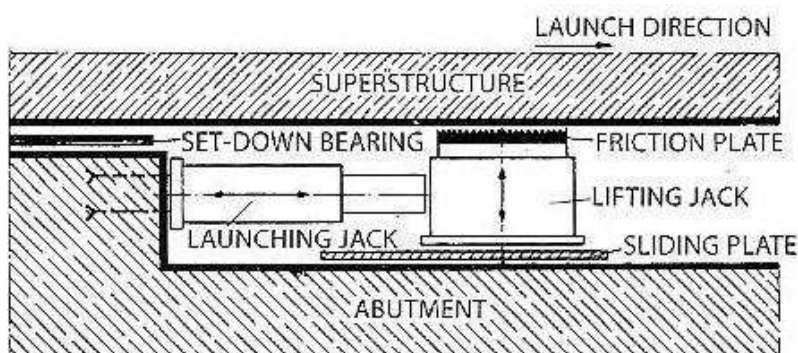
Prekladna konstrukcija je nosilec konstantne višine škatlastega prereza. Za vzdolžno potiskanje je primeren tudi rebasti prerez z dvema rebroma. Opre mostu so na vrhu opremljene s posebnim sistemom za drsenje konstrukcije. Ponavadi so to začasna drsna ležišča ali pa drsne površine na končnih ležiščih. Naprave za potiskanje so nameščene pri oporniku. Hitrost pomikanja pa je okoli 5m/h in je odvisna od vrste hidravlične opreme. Najhitrejši postopek narivanja je postopek s horizontalnimi in z vertikalnimi bati.

Horizontalni bati so čvrsto pritrjene na spodnjo konstrukcijo. Postopek pomikanja pa poteka tako, da se najprej aktivira vertikalni bati, ki dvigne vzdolžni nosilec. Za tem horizontalni potisni bati začnejo pomikati vertikalne bate po drsni ploskvi in na ta način se sklop pomika naprej. Nato vertikalni bati spustijo prekladno konstrukcijo in takrat se horizontalni bati vrnejo v začetni položaj. Takšni cikli se ponavljajo, dokler ni prekladna konstrukcija v končnem položaju. Horizontalni bati imajo navadno dolžino hod okrog 2m.



Slika 47: Hidravlična naprava za narivanje

(vir: Dars d.d. Viadukti in mostovi na slovenskih cestah, str. 146).



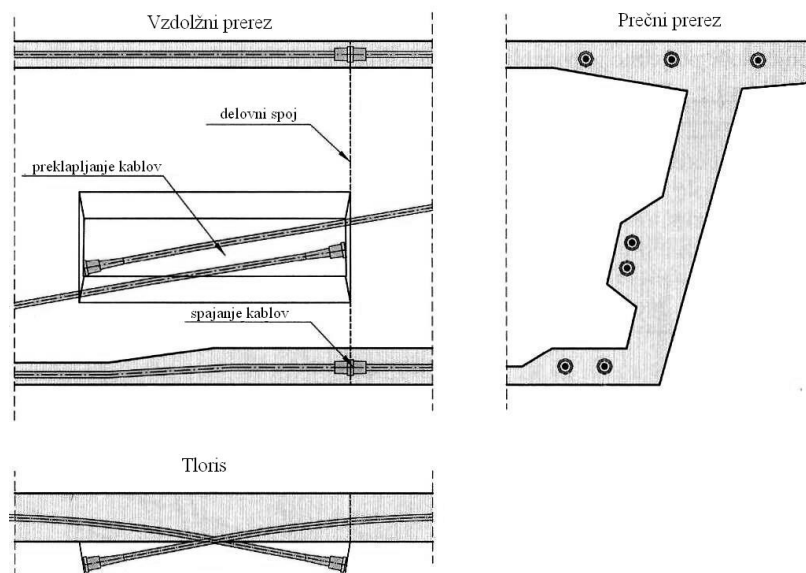
Slika 48: Princip delovanja hidravličnih batov

(vir: Mondorf E. Paul. Concrete bridges, str. 290).

Najbolj pogosto je sistem horizontalnega potiskanja vgrajen le pri oporniku. Posledica tega je, da so stebri mosta zaradi trenja obremenjeni s horizontalno silo, kar povzroča upogibne momente ob vpetju stebra. V takšnem primeru mora biti zagotovljena stabilnost stebrov. Stabilnost se lahko zagotovi z ustreznim oblikovanjem ali z začasnim pridržanjem stebra. Pridržanje stebrov se lahko izvede s pomočjo poševnih ali horizontalnih zateg. Pri večjih mostovih je primerno horizontalno pridržanje. V tem primeru natezno obremenjena zatega prevzame horizontalno silo, ki deluje na steber. Pridržati je potrebno vrh vsakega stebra, saj bi v nasprotnem primeru bile deformacije stebrov kumulativne in zato prevelike.

Kot je bilo že omenjeno, je potrebno tekom postopka narivanja razponski sklop centrično prednapeti in sicer s kablji, ki se jih položi v zgornjo in spodnjo ploščo škatlastega prereza. Ta način postavitve kablov se ne ujema z ovojnico upogibnih momentov, ki jih je potrebno na koncu prevzeti. S centričnim prednapenjanjem se prevzemajo pozitivni in negativni upogibni momenti, ki se pojavljajo v konstrukciji med samim potiskanjem. Ti kabli so manjših dimenzij, saj sta debelini spodnje in zgornje plošče tudi relativno majhnih dimenzij.

Ko pa se razponski sklop potisne v končni položaj, se napnejo tudi kontinuirni kabli, katerih položaj je pogojen z ovojnico upogibnih momentov končane konstrukcije. Kabli so večjih dimenzij in se jih lahko napne z obeh strani.



Slika 49: Kabli ustrezajo ovojnicam upogibnih momentov

(vir: Jure Radić. Masivni mostovi, str. 228).

Pri postopku narivanja je skupna količina kablov za prednapenjanje za 40 do 60% večja kot pri mostovih, ki so zgrajeni s pomočjo gradbenega odra. Vzrok za to je dvojno prednapenjanje (centrično in kontinuitetno). To predstavlja dodatne stroške. Kljub temu pa je ta metoda še vedno bolj ekonomična kot metode z gradbenim odrom. Ekonomičnost gradnje leži v zmanjšanem številu delovne sile, izvajanju del v vseh vremenskih pogojih in izdelavi daljših odsekov, ki omogočajo hiter časovni potek gradnje. Teža in cena opreme je odvisna od

dolžine odseka, ki se betonira v enem kosu in od razpetine. Za razpetine nad 40m se lahko razmisli o smotrnosti uporabe začasnih podpor v sredinah razponov v primerjavi s povečano potrebo po kablji za prednapenjanje. Kljub vsem prednostim ima gradnja s pomočjo narivanja, ki zagotavlja veliko kvaliteto konstrukcije in delovno ekonomičnost tudi določene omejitve, kot so:

- geometrija osi mora biti taka, da poteka v premi ali pa ima v tlorisnem radiju konstantno ukrivljenost. Prostorska ukrivljenost osi z dvema radijema sicer teoretično ni izvedljiva, vendar v kolikor računi dopuščajo, se lahko zasnovna konstrukcija v manjši meri prilagaja obliki z majhnimi vsiljenimi obremenitvami. Pogoj za to je relativno blaga zakrivljenost glede na togost konstrukcije. Takšen primer imamo v Republiki Sloveniji na mostu čez Muro,
- ekonomske dolžine razponov so omejene z zgornjo in s spodnjo mejo,
- razmerje med višino konstrukcije in velikostjo razponov se giblje med 1/12 in 1/15.
- odstopanje od enakomernih razponov povzroča velike probleme pri zasnovi in izvedbi,
- prerez mora imeti konstantno višino.

Omeniti je potrebno še inovativno tehnologijo narivanja, ki je bila uporabljena pri gradnji viadukta Lešnica. Izvajalec se je zaradi časovne stiske in velikih stroškov odločil spremeniti tehnologijo gradnje. Tako se je objekt namesto s prostokonzolno gradnjo gradil s postopkom narivanja. Objekt ima 3 razpone, vendar je sredinski dolg 72,5m, kar je preveč za uporabo tehnologije postopnega narivanja. Postavitev začasne, več kot 50 metrske podpore v sredini glavnega razpona pa bi bila predraga in preveč tvegana poteza. Zato so se konstruktorji odločili za inovativno rešitev. To je bilo simetrično konzolno narivanje izza obeh opornikov. Rešitev je inovativna zato, ker je narivanje potekalo brez jeklenega kljuna, konzoli pa sta se spojili z veznim segmentom v sredini glavnega razpona. Da bi zmanjšali težo konzolnega dela armiranobetonske konstrukcije je bil prerez na tem mestu brez voziščne plošče. Tudi prednapenjanje v času gradnje se je razlikovalo od tistega, pri klasičnem postopnem narivanju, saj so poleg centričnih kablov napenjali še konzolne kable v zgornji plošči. Na koncu se je z veznima segmentoma zagotovilo še kontinuirnost celotnega viadukta.

Razlika med potiskanjem in vlečenjem je samo v metodologiji pomikanja nosilca. Potiska se s hidravličnimi bati, vlečenje pa poteka na drugem koncu nosilca s pomočjo posebnih vitlov in kablov.

4 PREGLED NEKATERIH OBSTOJEČIH MOSTOV IN PROBLEMOV PRI GRADNJI

4.1 Most čez Muro



Slika 50: Most čez Muro

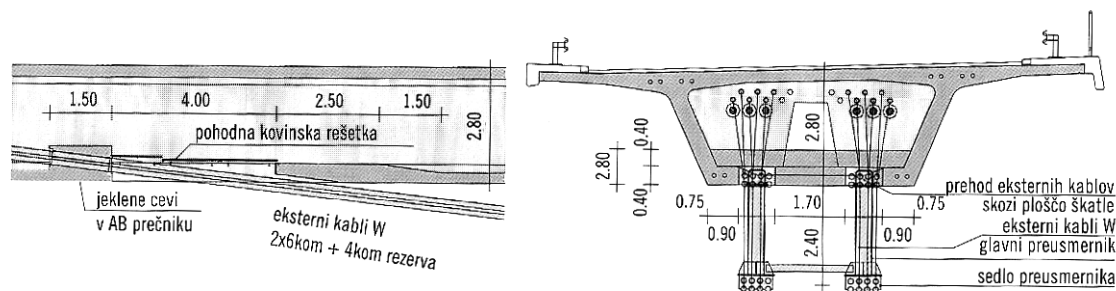
(vir: <http://www.dywidag-systems.com/references/details/article/mura-bridge-slovenia.html>, datum: 08.02.2010).

Most čez Muro je z 833m najdaljši slovenski most. Sestavljen je iz dveh ločenih objektov skupne širine 28m in poteka zvezno skozi 20 razponov. Posamezni razponi so dolgi 40m. V reki Muri ni nobenega stebra in tam je tudi najdaljši razpon z dolžino 80m. Most je bil grajen po tehnologiji postopnega narivanja, celotna gradnja pa je trajala 3 leta. V zadnji tretjini potiskanja, so prekladno konstrukcijo iz druge strani tudi vlekli s pomočjo kablov. Trasa je bila umeščena v prostor tako, da je omogočala izdelavo zgornje konstrukcije s pomočjo narivanja. To pa je zahtevalo veliko natančnost saj ima most po celotni dolžini konstantno ukrivljenost. Večji del mostu ima razpone dolge 40m. Za takšne razpone so se konstruktorji odločili, ker so se izkazali kot najbolj ekonomični za tehnologijo narivanja, saj je za gradnjo zadostoval škatlasti prerez konstantne višine 2,80m, ki med gradnjo ni potreboval vmesnih podpor. Pri glavnem 80 metrskem razponu se je projektant odločil za vstavljanje prednapete zatege izpod trapeznega prereza, ki za stalno težo deluje kot podpora. V tem delu in ob

sosejnjima 50m razponoma, je bil most med gradnjo tudi začasno podprt. Na razponu 80m so obremenitve, deformacije in napetosti uravnavane s pomočjo kablov izven betonskega prereza, ki so preko jeklenega distančnika z višino 2,40m speljani izven prekladne konstrukcije. »Zasnova s prednapeto zatego je zelo zahteven in relativno drag koncept, zato je redko uporabljen v praksi. V tem primeru pa je uporaba te zasnove na kratki dolžini objekta (samo v najdaljšem razponu) omogočila ekonomično izvedbo na preostalem mnogo večjem delu.« (Markelj V. 2003. Most čez Muro – zasnova objekta. Saje F. in Lopatič J. Zbornik 25. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, Kulturni center, 23.-24. oktober 2003. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 48).

Vsak segment se je še pred pričetkom samega narivanja centrično napelo s 15 kabli za prevzem stalne obtežbe v času gradnje. Vsak kabel s silo 2800kN. Omenjeni kabli so bili dolgi 40m ter kontinuirani z nepomično spojko skozi celotno dolžino. Za prevzem koristne obtežbe pa sta bila uporabljena 2 tipa poligonalnih eksternih kablov. Prvi potekajo v notranjosti škatle po plastičnih ceveh, kjer so kabli zaščiteni tudi s cementnim injektiranjem. V najdaljšem razponu (80m) pa potekajo kabli izven prereza. Ti kabli so zaščiteni z mastjo, dvojno plastiko in vmesnim cementnim injektiranjem. Ker so vodeni preko distančnika višine 2,40m izven prereza, postane prerez na tem mestu zaradi povečane ročice notranjih sil bolj nosilen.

Zaradi preboja spodnje plošče z zunanjimi kabli, je bil škatlasti prerez precej oslabljen. To pa predstavlja nevarnost v fazi narivanja. Problem oslabitve škatlastega prereza pri preboju spodnje plošče zaradi prehoda kablov izven konstrukcije, so rešili tako, da so v oslabljeni del vgradili jekleno konstrukcijo iz treh jeklenih profilov, pločevine in sider. Po končanem potiskanju je bila jeklena konstrukcija delno odstranjena.



Slika 51: potek zunanjih kablov

(vir: DARS d.d. Viadukti in mostovi na slovenskih avtocestah, str. 111).

4.1.1 Potek gradnje

Gradnja mostu čez Muro je bila tehnično zelo zahtevna, saj se je celotna 830m dolga prekladna konstrukcija, ki ima enakomerni horizontalni radij narivala z le z eno hidravlično opremo, kar je posebnost, ki še ni bila uporabljena. Poleg rekordne dolžine, je tudi masa prekladne konstrukcije (16.000 ton), ki se je potiskala iz enega mesta do sedaj največja v Republiki Sloveniji in ena izmed največjih v Evropi. Zaradi zahtevnosti gradnje je bilo najprej potrebno izpopolniti teoretično in operativno znanje tehnologov, ki so vodili projekt ter praktično izuriti ekipo, ki je projekt izvajala, saj se s tako gradnjo pri nas še nismo srečali. Potrebno je bilo pridobiti certifikate, dovoljenja in ostalo tehnično dokumentacijo za uporabo opreme in postopkov gradnje.

Vsak teden je bil izdelan in narinjen en betonski segment dolžine 20m. Kasneje, ko se je začelo narivati drugi most, sta bila v enem tednu narinjena 2 segmenta. Skupno je bilo 86 taktov, ki so bili izvedeni v skladu s terminskim planom.

Vsi elementi mostu so bili pred vsako naslednjo fazo preverjeni tudi geometrijsko, za kar je bil izdelan tudi poseben elaborat geodetskih meritev. Ves čas potiskanja se je izvajala geodetska kontrola smeri prekladne konstrukcije, ki se je usmerjala z bočnimi vodili na stebrih. Toleranca smeri je bila le 3mm. »Za doseg tedenskega takta je bilo potrebno uvesti posebne ukrepe. V poletnem času je bilo zaradi preprečitve segrevanja betona uvedeno nočno

delo z betoniranjem v zgodnjih jutranjih urah, s pričetkom ob treh ponoči. Pozimi je bila potrebna toplotna zaščita konstrukcije in gretje notranjosti konstrukcije z močnimi grelnimi telesi.« (Žiberna M., Kotnik R., Kristan D... 2003. kak smu delali »moust prejk Mujre. Saje F. in Lopatič J. Zbornik 25. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, Kulturni center, 23.-24. oktober 2003. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 66).

Narivanje je bilo opravljeno z dvižno-potisno hidravlično opremo, ki je imela dvižno kapaciteto 15.700 kN in potisno kapaciteto 6.080 kN. Za redukcijo dolžine betonske konzole je bil uporabljen jekleni narivni kljun dolžine 24m in teže 660kN, ki je bil pritrjen na čelo betonske preklade. Narivanje 20m dolgega segmenta je v povprečju trajalo 2,5 ure.

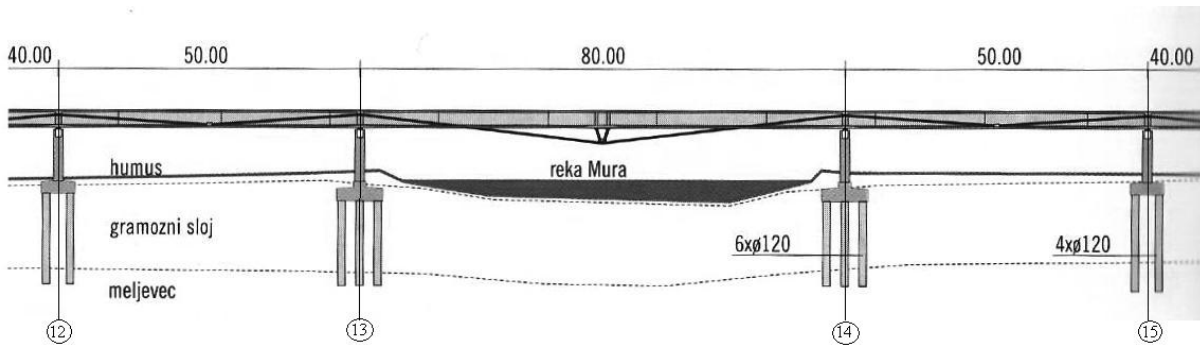
Konstrukcija je drsela po začasnih ležiščih na katerih so bile položene drsne plošče, ki so bile premazane s posebno silikonsko mastjo in so tako zagotavljale izredno majhen koeficient trenja. Med izvedbo narivanja so sproti merili sile dviga in potiskanja in jih primerjali z računskimi vrednostmi ter tako sproti spremljali do kje bo lahko konstrukcija potisnjena ter kdaj bo potrebno pričeti še z vleko. Za usmerjanje konstrukcije med potovanjem so bila izdelana bočna vodila, ki so bila pritrjena na stebrih. Na vrhu vodilnih konzol so bile drsne plošče, podobne tistim na ležiščih.

Nosilna konstrukcija opaža je bila sprojektirana kot brana iz profilov HEB, ki je bila na glavnih vzdolžnih nosilcih podprta z 10 hidravličnimi dvigalkami, ki so dvignile opaž v položaj za betoniranje. Po doseženi zadostni trdnosti betona so opaž spustili za 4cm, beton centrično prednapeli, ga porinili naprej, nato pa je sledilo betoniranje novega segmenta. Vsako postavitve je preveril in prevzel geometer.

Ko je bila konstrukcija že v končnem položaju je bilo potrebno še poligonalno prednapenjanje in odstranitev začasnih pomožnih podpor. Postopek odstranitve pomožnih podpor in napenjanja zunanjih kablov v glavnem 80 metrskem razponu je hkraten proces, ki zajema naslednje faze:

- analizo stanja konstrukcije pred odstranitvijo začasnih podpor,
- napenjanje eksternih kablov med osmi 12 in 15,
- dvig konstrukcije na začasnih podporah 12 in 15 ter odstranitev teh podpor,

- začasni dvig konstrukcije na pomožnih podporah v glavnem razponu,
- napenjanje kablov med osmi 13 in 14 v glavnem razponu in
- odstranitev začasnih podpor v glavnem razponu.



Slika 52: Sredinski razpon je premoščen s pomočjo zunanjih zateg
(vir: Viadukti in mostovi na slovenskih avtocestah. DARS d.d. str. 108).

Pri gradnji je še največ težav povzročalo vreme. Gradbišče je bilo dvakrat poplavljeno. Poleg tega pa je objekt lociran na območju, za katerega so značilne mrzle zime in vroča poletja. V zimskem obdobju je bilo potrebno zagotoviti pravilno sestavo betona prilagojenega za zimsko betoniranje, predgrevanje kontaktnih površin, ki so bile podhlajene, toplotno zaščitno elementov po vgraditvi svežega betona in stalno kontrolo merjenja temperature površin. V poletnem obdobju je bilo potrebno vgrajeni beton zaščititi pred predgretjem.

4.2 Viadukt Črni Kal



Slika 53: Viadukt Črni kal slikan iz koprške strani
(lastna fotografija).

Monolitno grajeni viadukt Črni Kal predstavlja najzahtevnejši premostitveni objekt, ki se je gradil v okviru gradnje avtocestnega omrežja v Republiki Sloveniji. Celotna dolžina viadukta je 1065m. Dolžina največjih razponov je 140m, višine stebrov pa do 87,5m. Skupaj z zgornjo konstrukcijo znaša celotna višina 95m. Iz ljubljanske smeri se je do vključno 6. stebra, pri prehodu globljega dela doline v dolžini 778m objekt gradil s prostokonzolno gradnjo. Na tem delu so tudi največji razponi in najvišji stebri. Od tu naprej pa je gradnja potekala na jeklenem nepomičnem gradbenem odru. Zahtevnost gradnje je bila toliko večja zaradi višine stebrov, zahtevnega temeljenja globokih vodnjakov, prostokonzolne gradnje ob močnih sunkih burje, dolžine razponov in zaradi pravilnega projektiranja in izvedbe nadvišanj.

Vpeti stebri so sidrani v vodnjakih globine do 21m. Za gradnjo visokih stebrov so uporabili samoplezajoči opaž z nosilnimi odri. Gledano iz ljubljanske smeri se je gradnja od 7. stebra

naprej izvajala s klasičnim opažem. Viadukt je sestavljen iz dveh ločenih konstrukcij, ki sta v dolinskem delu podprti z visokimi stebri Y oblike, na pobočnem nižjem delu pa s stebri, ki so ločeni med seboj. Razen 1. stebra, so vsi visoki stebri, ki so temeljeni na vodnjakih, elastično vpeti v voziščno konstrukcijo, na ostalih podporah pa je voziščna konstrukcija povezana s stebri preko prečno nepomičnih drsnih ležišč. Viadukt je v glavnem globoko temeljen. Plitvo sta temeljena samo opornik na ljubljanski strani in prvi steber, ki je temeljen na masivnem bloku zabetoniranem v apnenec. Visoki vpeti krakasti stebri so temeljeni na vodnjakih elipsastega tlorisa z dimenzijami glavnih osi od 12m do 14,5m in globine od 15m do 21m. Ostali stebri pa so temeljeni na uvertanih pilotih globine do 10,7m.

Obe ločeni voziščni konstrukciji prednapetega škatlastega prereza s spremenljivo višino potekata neprekinjeno preko 12 polj. V polju je najmanjša višina prereza 3,5m, nad podporami pa največja višina 7,5m. Dilatacije so samo na obeh krajnih opornikih in omogočata pomike do 72 cm. Vzdolžne sile se prenašajo preko visokih prednapetih stebrov, ki so elastično vpeti v škatlasti voziščni konstrukciji. Prečna obtežba (veter, potres) pa se prenaša preko vseh podpor. S tako zasnovano konstrukcijo je zagotovljena vertikalna in horizontalna stabilnost tako v fazi gradnje kot v fazi uporabe.

Močni in sunkoviti vetrovi so oteževali izvedbo prostokonzolne gradnje ter spajanje konzolnih miz sosednjih podpor. Za nemoteno izvedbo del je bilo zaradi dušenja horizontalnih vibracij potrebno izvesti dodatno pridrževanje vsakega masivnega stebra krakaste oblike s štirimi kabli. Kable so zgoraj sidrali v bazne segmente, spodaj pa v zgornje plošče vodnjakov sosednjih stebrov. Tik pred vezavo voziščnih konstrukcij so bili kabli za stabilizacijo stebrov odstranjeni.

Prostokonzolna gradnja je potekala s pomočjo jeklenih vozičkov z nosilnimi odri in opaži, s pomočjo katerih se je izvajalo betoniranje segmentov simetrično na os podpore. Voziščne konstrukcije so se lahko povezale šele, ko so bili kraki enojnega stebra polno obremenjeni (centrično obremenjen steber). Segmenti, ki so se izdelovali s pomočjo štirih parov opažnih vozičkov so bili dolžine od 4m do 5m. Gradnja je potekala po vnaprej določenem protokolu:

- med posamezno podporo so vedno najprej zgradili levo, zunanjo voziščno konstrukcijo,

- po premaknitvi vozička je sledila gradnja desne, notranje voziščne konstrukcije,
- po dokončanju konzolne mize sta se obe konstrukciji vezali istočasno z veznima segmentoma na že izvedeno konzolno mizo sosednje podpore. Tik pred vezavo voziščnih konstrukcij so bili kabli za stabilizacijo stebrov odstranjeni,
- med izvedbo veznih segmentov sta bili konzolni mizi, ki sta se vezali, dodatno fiksirani z jeklenimi škatlastimi profili, ki so preprečevali horizontalne pomike med konzolnima mizama.



Slika 54: Potek konzolne gradnje Črnokalskega viadukta

(vir:<http://www.kraskizidar.si/en/default.asp?id=980>, datum 09.02.2010).

Za vsako konzolno mizo je bil izdelan projekt nadvišanj in to za levo in desno konstrukcijo posebej. Ker se je najprej zgradila leva, zunanja voziščna konstrukcija in nato še notranja konstrukcija, sta se liniji potrebnega nadvišanja, ob upoštevanju reologije (različne starosti betonov), za notranjo in zunanjo konstrukcijo razlikovali. Med samo gradnjo so bila nadvišanja in deformacije sproti kontrolirane. Ugotovljeno je bilo, da ni prihajalo do večjih odstopanj med dejansko izvršenimi in z računom določenimi pomiki.

Zaradi zahtevnosti projekta je bilo potrebno veliko pozornosti posvetiti vgrajenim materialom in postopkom gradnje. Dostavljeni so bili vsi atesti, certifikati, potrebna dokazila in poročila o vgrajenih materialih in o kontroli izvedenih del. Kontrola vgrajenih materialov se je izvajala tudi sproti. Tudi opremo za prednapenjanje je bilo potrebno pošiljati na periodične preglede in nadzoru dostavljati poročila o kalibracijah. Pozimi so se dela pri izvedbi prostokonzolne gradnje celo ustavila, dokler ni bila dosežena s predpisi zahtevana temperatura betonske konstrukcije + 5 stopinj celzija. Izkop globokih vodnjakov je potekal ob navzočnosti geomehanika, ki ni prevzel temeljnih tal samo na dnu gradbene jame, pač pa se je pregledovala kvaliteta hribine za vsaka 2m posebej. Nadzor je bil prisoten pri vseh pomembnejših delih, kot na primer pri betoniranju, polaganju armature, pri izvedbi napenjanja in injektiranja kablov...Skupno je bilo prednapetih kar 996 kablov. Služba za varstvo pri delu je bila dobro organizirana in tako je bil objekt predan v uporabo brez smrtnih žrtev.

4.3 Ločni most Predel



Slika 55: Ločni most Predel
(lastna fotografija).

Armiranobetonski monolitni ločni most se nahaja v Triglavskem narodnem parku na cesti preko prelaza Predel. Dolžina mostu je 128m, širina 9,8m, razpon loka pa 87m. Višina od dna soteske do vrha loka je 60m. Gradnja mostu je bila zaradi izredno zahtevnega in težko dostopnega terena zelo težka. Most namreč leži na potresnem območju. »Gradnja loka je prvič v Sloveniji potekala po tehnologiji prostokonzolne gradnje ločnega mostu s pomočjo poševnih zateg preko dveh začasnih armiranobetonskih pilonov.« (Ipavec B., Likar I., Kobal P...2009. Ločni most Predel. Saje F. Lopatič J. Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 8.-9. oktober 2009. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 31). Most je sestavljen iz loka s spremenljivim prerezom, vertikalnih stebrov, voziščne plošče konstantnega prereza in masivnih krajnih opornikov. Lok je temeljen na dobro nosilnih dolomitnih tleh in je togo vpet v masivne temelje. Voziščna plošča je debela 0,70m.

4.3.1 Tehnologija gradnje loka



Začasno pridrževanje loka s pomočjo zateg in začasnega pilona

(vir: <http://www.primorje.si/index.php?vie=cnt&id=2008122411125210&lng=slo>, datum:03.02.2010).

Najprej so se gradnje hoteli lotiti s pomočjo klasičnega opaža, podprtega s palično podkonstrukcijo brez vmesnih podpor. Kasneje pa so se zaradi zahtevnega in težko dostopnega terena, velikih stroškov in novih izkušenj odločili za prostokonzolno gradnjo s

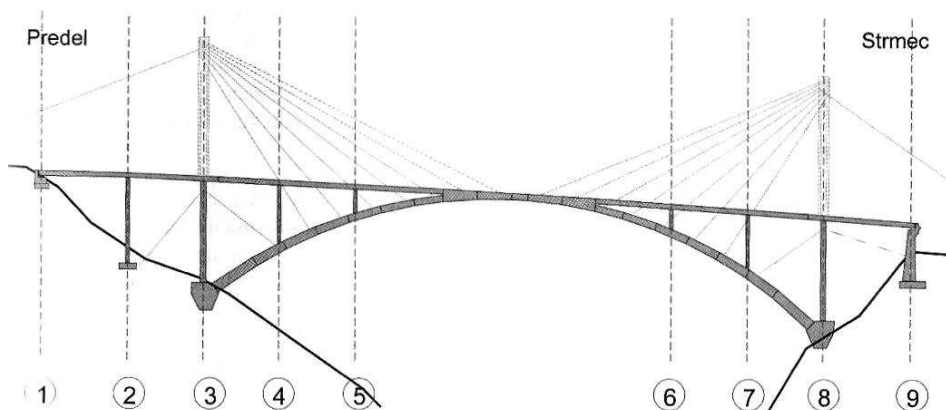
pomočjo poševnih zateg preko dveh začasnih armiranobetonskih pilonov. Zaradi spremembe tehnologije gradnje ločne konstrukcije, je bilo potrebno ponovno projektiranje loka. Poleg tega je bilo potrebno dimenzionirati tudičasne elemente za potrebo gradnje loka (armiranobetonska pilona, jekleni kabli za prednapenjanje, jekleni elementi za potrebe napenjanja in sidranja kablov, armiranobetonski sidrni bloki z geotehničnimi sidri), ki jih v začetku niso nameravali uporabiti.

V času gradnje je bila ločna konstrukcija obešena na 2 začasna pilona v katera so se vpenjali kabli. Spodnji del (15m) pilona je bil izveden s škatlastim prečnim prerezom z debelinami stene 20cm. Zgornji del (5,4m) pa s polnim prečnim prerezom. V glavi pilona so bila izvedena sidrišča kablov loka in sidrišči protikablov. Za prenos obtežbe protikablov v teren je bilo potrebno pri izbrani tehnologiji izvedbe loka izvesti časna sidrišča, pri tem pa zagotoviti ustrezne svetle profile in odmike, saj so bile lokacije sidrišč ob cesti, ki je bila v času gradnje prevozna. Sidrišča glavnih kablov so bila projektirana kot armiranobetonski bloki, katerih stabilnost je bila zagotovljena z aktivnimi geotehničnimi sidri. Za pritrditev in nameščanje zateg je bilo potrebno dimenzionirati in izdelati jeklene elemente za sidranja, ki so služili za vpenjanje začasnih kablov v lok in v sidrne bloke ter so istočasno omogočali korekcijo linije zgrajenega dela loka.

Pri gradnji loka je bil v veliko pomoč premični palični voziček. Nosilno konstrukcijo premičnega vozička so sestavljali štiri palični nosilci, dolžine 18m, ki so bili postavljeni na medsebojni razdalji 1,25m. Voziček se je premikal naprej s pomočjo hidravličnih cilindrov in tirnic na zunanjem delu vozička. Na zgornjem pasu vozička je bil postavljen opaž, na spodnjem pasu pa delovni plato. Zaradi velikega naklona v začetnih fazah (35°) in konsistence betona, je bil potreben tudi zgornji opaž. Pred vsako fazo betoniranja loka je bilo potrebno izvesti tudi nadvišanje. Ker je bil opaž zaprt, je vgrajevanje betona potekalo z betonsko črpalko skozi odprtine na vrhu opaža.

4.3.2 Gradnja mostu

Po pripravljalnih delih se je bilo najprej treba lotiti gradnje temeljev loka in stebrov ter konstrukcijskih elementov, ki so morali biti zgrajeni preden se je lahko začela gradnja loka. Tako sta morala biti hitro končani voziščni plošči med osema 1 in 3 ter 8 in 9, saj sta predstavljali osnovo za gradnjo dveh armiranobetonskih pilonov za pridrževanje loka. Poleg tega sta voziščni plošči omogočali postavitev dveh manjših žerjavov. Zaradi zahtevnega terena ni bilo mogoče postaviti večjega žerjava. Posledica tega je bila, da z žerjavoma ni bilo pokrito celotno območje mostu in so zato morali gradbeni material na sredinski del dostavljati ročno.



Slika 56: Prostokonzolna gradnja loka s pomočjo poševnih zateg

(vir: Ipavec B., Likar I., Kobal P...Ločni most Predel. Saje F. Lopatič J. Zbornik 31.

zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 33).

Vzporedno z gradnjo pilonov je potekalo tudi sestavljanje nosilne konstrukcije premičnega vozička. »Konstrukcija premičnega vozička je z vsemi opaži in hidravličnimi mehanizmi tehtala 25 ton. Zaradi izredne teže, je bilo potrebno konstrukcijo vozička sestaviti iz dveh ločenih zaporednih delov.« (Ipavec B., Likar I., Kobal P...2009. Ločni most Predel. Saje F. Lopatič J. Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 8.-9. oktober 2009. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 36). Premični

voziček je bil v fazi betoniranja na sprednji strani pritrjen z nateznimi palicami na predhodno izdelanem ločnem segmentu, na zadnji strani pa se je opiral na že izveden lok.

Tehnološko je bila gradnja armiranobetonskega loka zelo zahtevna in je zahtevala veliko natančnost. Lok se je gradil v tedenskih taktih simetrično iz dveh strani. Na vsaki strani se je izvedlo 9 faz. 10. fazo pa je predstavljal vezni segment med obema deloma loka. Med gradnjo loka so se ves čas, v vseh fazah gradnje opravljale meritve. Kontrolirati je bilo potrebno geometrijo loka, velikost sil v kablji, vertikalne pomike loka, horizontalne pomike pylonov in stebrov. Rezultate meritev so pošiljali odgovornemu projektantu, ki je pozorno spremljal stanje med posameznimi fazami gradnje loka.

Po gradnji loka je sledila demontaža kablov in pylonov, nato pa še gradnja preostalega dela voziščne plošče. Demontaža pylonov je potekala tako, da so pylon postopoma rezali na manjše segmente, ki so jih s pomočjo avtodvigala in žerjava demontirali.

Voziščna plošča je bila zabetonirana v enem kosu. V celoten objekt se je med gradnjo vgradilo približno 2000m^3 betona in 420 ton armature.

4.4 Vzpostavitev nosilnosti za primer izrednih obremenitev

S problemom nosilnosti mostov pri izrednih transportih smo se v Sloveniji srečali leta 1999 pri prevozu uparjalnikov za nuklearno elektrarno iz Kopra v Krško. Celotna masa uparjalnikov in vlačilcev je bila preko 700 ton. Vsak uparjalnik je bil dolg 20m, celotna transportna kompozicija pa skupaj 70m. Uparjalnika ste bila naslonjena na 2 prikolici s po 12 osmi in s po 16 kolesi v vsaki osi. Vsaka prikolica je bila dolga 15m. Za preprečitev trajnih deformacij so projektanti uporabili različne načine, da bi zagotovili ustrezno nosilnost in togost mostov.

Najprej pa je bilo potrebno preveriti dimenzije mostov in podhodov, nato geološke stabilnosti podpornih konstrukcij zaradi nevarnosti plazov in na koncu še obremenitve, ki jim bodo

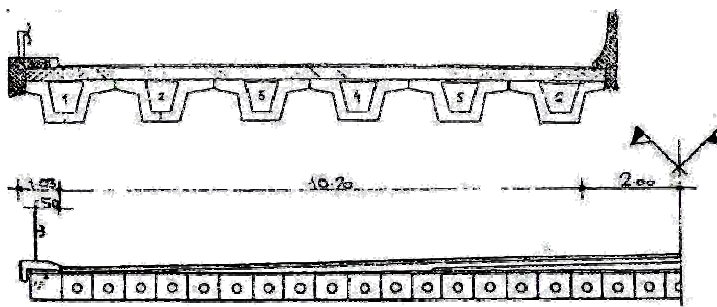
mostovi podvrženi. Za vsako kritično situacijo je bila izdelana simulacija na podlagi katere je bilo mogoče ugotoviti ali je potrebno izvesti prilagoditev mosta.

Vsak most, ki se je nahajal na trasi je bil pregledan in zanj je bila izdelana tudi statična analiza. Rezultat analize je pokazal, da je možnost prevoza zelo odvisna od zasnove nosilne konstrukcije. Kot zelo ugodne rešitve so se izkazali naslednji prečni prerezi:

- polne plošče,
- enocelične škatle,
- polni široki trapezni nosilci z manjšo medsebojno razdaljo in
- visoki I nosilci z močnimi prečnimi povezavami.

Kot neugodne zasnove prečnih prerezov pa so se izkazale konstrukcije s slabo prečno povezavo. Sem spadajo montažne konstrukcije, ki ne zagotavljajo raznosa sil na sosednje elemente:

- vitki votli trapezni nosilci manjših višin in
- sestavljene konstrukcije iz ožjih montažnih elementov s slabo prečno povezavo.



Slika 57: Neugodne zasnove prečnih prerezov

(vir: Berkopec A.2000. Usposobitev transportne poti in premostitvenih objektov za prevoz uparjalnikov iz Luke Koper v NEK. Saje F. Lopatič J. Zbornik 22. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 53).

Mostovom, ki niso imeli zadostne nosilnosti je bilo potrebno z dodatnimi deli zagotoviti boljšo nosilnost, ki naj ne bi bila le začasna. Način zagotovitve ustrezne nosilnosti, pa je bil odvisen od višine stroškov, možnosti izvedbe in od časa izvedbe. Večinoma so z deli ojačali elemente mostov, v nekaterih primerih pa so mostove le dodatno podprli s tal.

- Nekateri mostovi so bili ojačani s karbonskimi lamelami. To je način ojačitve, ki se ga v praksi vedno bolj pogosto uporablja. Karbonske lamele imajo zelo majhno težo in veliko natezno trdnost. Z njimi so ojačali nosilce in plošče tako, da so zagotovili ustrezen stik med betonom in lamelami.
- V nekaterih primerih pa so ojačali ali na novo zgradili prečnike in tako se je obtežba bolj enakomerno porazdelila med vzdolžne nosilce.
- V primeru večje oddaljenosti med stebri je bilo potrebno izvesti dodatne stebre.
- V nekatere ležiščne grede nad stebri so zvrtili luknje in jih dodatno prednapeli, ostale pa so ojačali s karbonskimi lamelami
- Stara dotrajana ležišča so zamenjali z novimi elastomernimi in ponekod vgradili še dodatna ležišča, ki nimajo v neobremenjenem stanju nobene funkcije, saj so odmaknjena od prekladne konstrukcije.

Na vseh mostovih, ki so imeli razpon med stebri daljši kot 15m, so se v času izredne obtežbe izvajale meritve posedkov in povosov. V splošnem so bile velikosti deformacij v skladu s predhodnimi izračuni, v večini primerov pa veliko manjše.

5 IZBIRA KONSTRUKCIJSKEGA SISTEMA IN TEHNOLOGIJE GRADNJE V ODVISNOSTI OD OKOLJSKIH RAZMER

5.1 Dejavniki, ki vplivajo na odločitev o izbiri konstrukcijskega sistema

Pri enakih vhodnih podatkih in enakih pogojih je možno narediti več različnih, vendar uspešnih kombinacij mostov. Projektant ima na začetku dve skupini vhodnih podatkov, ki vplivajo na izbiro konstrukcijskega sistema in tehnologije gradnje:

- podatke o terenu in prepreki, ki jo je potrebno premostiti (kanjon, morska ožina, obstoječa prometnica...) ter
- podatke o prometnici (linija nivelete, prosti profil...).

Na odločitev projektanta vplivajo izkušnje in okoliščine kot so:

- omejitev glede najmanjšega možnega srednjega razpona,
- razpoložljiva višina med prostim profilom in niveleto ter celotna dolžina mostu,
- geološko-geomehanske lastnosti tal in omejitve glede temeljenja,
- podatki iz podlog za projektiranje (urbanistično-prostorski pogoji, oblikovanje, stalni in začasni vodotoki, meteorološki podatki, seizmičnost),
- razpoložljivost gradiva ter informacije o aktualnih cenah in nabavi osnovnih nosilnih materialov in opreme,
- vrsta prometnice (avtocesta, magistralna cesta, pot za pešce, železnica...),
- informacije o možnostih potencialnih izvajalcev, roki in čas gradnje,
- posebne zahteve glede ekologije,
- možnost organizacije gradbišča ter
- lastne izkušnje in informacije iz literature.

V praksi se vplive okolja zajame z različnimi podlogami, kot so:

- prometne podloge,
- geodetske podloge,
- geološko-geomehanske podloge in
- hidrološke podloge.

Glede na zgornje podatke se projektant odloči za vrsto konstrukcije, za število in dispozicijo razponov, za obliko linij konstrukcije in za gradivo nosilne konstrukcije. Včasih so tudi glede na vse zgoraj pridobljene podatke možnosti še vedno raznolike. Posledica tega je, da na določenem problemu različni avtorji ponudijo različne rešitve. Včasih tudi isti projektant ponudi več različnih variant z različnimi konstrukcijskimi sistemi. Pri velikih in pomembnih mostovih je obvezno izdelati vsaj dve varianti projekta ali pa pridobiti rešitve s pomočjo javnega natečaja. Dobro in pravilno projektirana nosilna konstrukcija mostu, je običajno skladno in logično oblikovana. Glede na konstrukcijsko pravilno ponujene rešitve se investitorji v praksi navadno odločijo za ekonomsko najbolj ugodno izbiro. Torej je isto nalogo možno rešiti na različne načine. Najboljša možna rešitev je rezultat inženirske presoje, katere predpogoj so znanje, izkušnje in pravi občutek.

Včasih se konstrukcijski sistem izbere tudi na podlagi postopka gradnje, ki je primeren za določen teren. Na izbiro konstrukcijskega sistema vplivata tudi kraj in čas, v katerem se most gradi. Za današnji čas lahko rečemo, da so zelo moderni mostovi s poševnimi zategami. Še vedno pa ima cena največji vpliv na izbiro. Domači projektanti se običajno odločijo za gredne in okvirne konstrukcijske sisteme. Redkeje se odločijo za ločne mostove, zelo redko za mostove s poševnimi zategami in skoraj nikoli za viseče mostove.

Na skupno dolžino mostu in na razporeditev podpor vpliva odnos med profilom terena, linijo nivelete in prostim profilom. Pogosto se naredi analiza do katere mere se še izplača graditi nasip in kje ga prekiniti in nadomestiti z mostom. Iz izkušenj vemo, da pri določeni višini nivelete postane nasip dražji od mosta. Tako lahko analiziramo ceno za 1m mostu v primerjavi s ceno za 1m nasipa in tako določimo krajne točke objekta, s tem pa tudi skupno dolžino.

5.1.1 Dispozicija in dolžina razponov

Po določitvi konstrukcijskega in statičnega sistema, je na vrsti študijsko delo, na podlagi katerega se sprejme odločitev o velikosti posameznih razponov, njihovem medsebojnem razmerju in celotni dolžini mostu. Zahteve glede velikosti razponov pod katerimi se odvija promet (cestni, železniški, plovni) se razlikujejo glede na zahteve pri mostovih, ki potekajo preko suhih dolin. Prvi predpogoj, ki ga je potrebno zadovoljiti, se nanaša na prosti profil, ki mora biti projektiran tako, da zagotavlja pretok vode tudi v najbolj neugodnih situacijah. To nam daje tudi omejitve za najmanjše možne razpone. V nekaterih primerih je prepreko možno premostiti tudi z le enim razponom (manjši nadvozi, mostovi nad manjšimi vodotoki).

Pogosto pa je prepreka dosti večja od zahtevanega prostega profila. Takrat je potrebno najti optimalno dispozicijo in velikosti razponov. Na to vpliva več dejavnikov:

- zahtevana velikost in razporeditev prostih profilov,
- pogoji temeljenja,
- karakteristike gradbenih materialov,
- predvideni način gradnje,
- vplivi okolja in ambienta,
- estetske zahteve in
- možnost vzdrževanja.

Pri daljših grednih mostovih je uporabna analiza primerjave različnih razponov, z namenom najti najboljšo rešitev glede velikosti razpona v odvisnosti od količine porabljenega materiala za stebre in za prekladno konstrukcijo. Ta način nas pripelje do ekonomsko najugodnejše rešitve.

Pri ločnih mostovih pa se išče najbolj ugodno razmerje, med dolžino razpona in obliko loka, pri kateri dobimo najmanjše sile in je zato potrebno vgraditi tudi manj materiala za prevzem obremenitev. Taka optimizacija pa je merodajna le, če se upošteva tudi skupni strošek zgornje konstrukcije. Tako pridemo z ekonomskega stališča do optimalne rešitve izbranega sistema. V splošnem pa velja, da kjer so tla dobro nosilna, so cenejši krajši razponi. Kjer pa so tla slabše

nosilna, oziroma so pogoji temeljenja težji (relativno globoki temelji, prisotnost vode), so bolj primerni večji, včasih tudi zelo veliki razponi.

5.1.2 Glavni nosilni sistem

Včasih je topografija terena takšna, da so nekateri nosilni sistemi veliko bolj primerni od ostalih. Takšen primer so kanjoni na dobro nosilnih skalnatih tleh, ki so idealni za ločne mostove. V primeru, ko je potrebno premostiti razpone, ki so daljši od 1000m, se uporabi viseče mostove, kateri danes dosegajo razpone tudi do 2000m. Pri razponih med 200m in 900m, se graditelji pogosto odločajo za mostove s poševnimi zategami. Če razpon ni daljši kot 500m in so pogoji temeljenja dobri, so ločni mostovi konkurenčni mostovom s poševnimi zategami. Gredni konstrukcijski sistemi, ki jih je največ, pa so zaradi enostavnosti izdelave primerni za manjše razpone. Zelo primerni so tudi za zelo dolge mostove in za mostove v krivinah. Nezamenljivi pa so pri prepletanju prometnic.

Statični sistem je najprej odvisen od vrste objekta, nato pa še od ostalih dejavnikov kot so način gradnje, nosilnost tal, pričakovani enakomerni in diferenčni posedki. Pri ločnih in visečih mostovih je zelo pomembno tudi ali se v tla prenašajo poleg vertikalnih tudi horizontalne sile. V primeru slabše nosilnih tal in prisotnosti velikih horizontalnih sil, se naredi lok z vezjo, ki prevzema horizontalne sile.

5.2 Primerjave tehnologij gradnje

Vsaka od opisanih tehnologij ima svoje prednosti in slabosti. Za vsako lahko tudi rečemo, da v določenih okoliščinah predstavlja optimalno izbiro, zato je odločitev o tem s kakšno tehnologijo se bo gradilo, potrebno sprejeti na podlagi analiz z upoštevanjem čim več dejavnikov. Izbira tehnologije je zelo odvisna tudi od izvajalca del, njegovih izkušenj, usposobljenosti in opreme.

5.2.1 Manjši mostovi

Za manjše mostove je najprimernejša gradnja z nepomičnim odrom ali montažna, oziroma polmontažna gradnja. Izvajalec se v tem primeru odloči na podlagi stroškov, ki jih bo imel z določeno tehnologijo in na podlagi časa, ki ga ima na razpolago za gradnjo. V primeru odvijanja prometa pod mostom, je zaradi hitrosti gradnje bolj primerna montažna gradnja. V tem primeru imamo tudi prosti profil pod mostom, saj ne potrebujemo gradbenega odra. Prednost montažne in polmontažne gradnje pred gradnjo na nepomičnem gradbenem odru, je v tem, da zahteva manj delovne sile. Betoniranje poteka v bistveno boljših pogojih, saj je neodvisno od zunanjih vplivov. Poleg tega je dolžina odseka proizvedenega v tovarni, zaradi rutinskega dela, cenejša od enake dolžine, ki jo betoniramo na gradbišču. Montažna gradnja je ob dobro izurjenih izvajalcih tudi zelo enostavna. Največja prednost montažne in polmontažne gradnje pred ostalimi, pa je hiter potek gradnje, saj ne pozna izgubljanja časa z opažem, armaturo in sušenjem betona.

Prednost gradnje na nepomičnem odru pred montažno in polmontažno gradnjo pa je v tem, da omogoča izvedbo najrazličnejših vrst in oblik armiranobetonskih mostov, saj nima omejitev glede oblike prečnega prereza in geometrije celotne konstrukcije. Možno je tudi betoniranje celotne konstrukcije hkrati in tako se izognemo velikim težavam s stiki. Gradnja prednapetih armiranobetonskih mostov s pomočjo nepomičnega odra je lahko racionalna tudi za mostove z dolžinami do 150m. Vendar ob pogoju, da so razponi krajši kot 30m. To še posebej velja v primeru, če ima most zahtevno geometrijo. Pri montažni gradnji imamo opravka z veliko višjimi transportnimi stroški elementov. Stroški so še veliko večji v primeru večjih in težjih elementov, za katere je potreben izredni prevoz. Pri montažni in polmontažni gradnji je veliko več pozornosti potrebno posvetiti stikom in detajlom, saj v največji meri bistveno vplivajo na kvaliteto konstrukcije. Stiki elementov zahtevajo tudi več vzdrževanja, saj se tu najbolj pogosto pojavljajo poškodbe, ki zmanjšujejo trajnost objekta.

5.2.2 Večji mostovi

Večji mostovi so najpogosteje grajeni s prostokonzolnim postopkom. Poleg prostokonzolne gradnje je primerna še gradnja s pomočjo pomičnega odra ter gradnja s postopnim narivanjem. Ravno pri slednji je bil v zadnjih desetletjih dosežen največji napredek tako v tujini, kot tudi v Sloveniji. Za vse tri metode pa velja, da omogočajo relativno hitro gradnjo, ki je neodvisna od konfiguracije terena. Ravno te 3 metode so omogočile razvoj visokih grednih mostov z daljšimi razponi, kjer gradnja z nepomičnim odrom sploh ne pride v poštev. Metodi gradnje na pomičnem odru in s postopnim narivanjem sta primerni za razpone dolge do 50m oziroma 60m. Prostokonzolna gradnja pa omogoča gradnjo grednih mostov z najdaljšimi razponi. Značilnost prostokonzolne gradnje in gradnje z narivanjem je škatlast prerez. Pri gradnji na pomičnem odru pa je premikanje notranjega opaža preveč zamudno, zato se pogosto uporabi ploščast prerez ali prerez z vzdolžnimi nosilci. Prednost gradnje na pomičnem odru pred gradnjo na nepomičnem odru je, da se lahko elemente odra večkrat izkoristi in zato gradnja poteka veliko hitreje. Pomanjkljivost gradnje s pomočjo pomičnega odra pa je angažiranje velikega števila delavcev in mehanizacije.

Prostokonzolna gradnja in gradnja z narivanjem imata veliko skupnih značilnosti. Za oba načina gradnje velja, da ne potrebujeta velikih in masivnih gradbenih odrov. Vedno lahko uporabljamo isti opaž. Prav tako je pri obeh metodah most najbolj obremenjen in ranljiv ravno v času gradnje. Ponavljajo se istovrstna dela. Pod mostom je omogočen neoviran promet v času gradnje. Ni potrebe po dviganju in spuščanju težkih delov konstrukcije, zato ne potrebujemo dvigal z veliko nosilnostjo.

Prednosti gradnje z narivanjem pred prostokonzolno gradnjo so v tem, da v primeru narivanja potrebujemo še manj delovne sile. Zaradi gradnje daljših odsekov, poteka gradnja hitro in ima malo spojev. Betoniranje pa poteka v dobrih pogojih, saj se za opornikom lahko naredi pokrito delavnico.

Prednosti prostokonzolne gradnje pred gradnjo z narivanjem pa so sledeče. S prostokonzolno gradnjo lahko dosegamo tudi do trikrat večje razpone ter je primerna za gradnjo vseh vrst

konstrukcijskih sistemov. Prostokonzolna montažna gradnja je najhitrejša metoda gradnje, vendar jo v Sloveniji ne uporabljamo. Z uporabo 4 vozičkov hkrati postane tudi prostokonzolna monolitna gradnja zelo hitra. Pri gradnji z narivanjem potrebujemočasne stebre ali pilone že pri razponih, ki so daljši od 40m. Poleg tega so pri omenjeni metodi zaradi sile trenja stebri obremenjeni z upogibnim momentom, medtem ko se pri konzolni gradnji poskušamo približati centričnim obremenitvam stebrov. Med postopkom narivanja je vsak prerez obremenjen tako s pozitivnim, kot tudi z negativnim upogibnim momentom, zato je potrebno segment centrično prednapeti še pred pričetkom narivanja. Pri tehnologiji narivanja je tudi poraba kablov največja, geometrija osi mora potekati v premi ali pa imeti konstantno zakrivljenost, prerez pa mora imeti konstantno višino. Poleg tega povzroča odstopanje od enakomernih razponov velike težave pri zasnovi in izvedbi.

Slabša lastnost prostokonzolne gradnje je ta, da imamo zaradi gradnje krajših odsekov tudi veliko spojev. Temu je potrebno posvetiti še posebej veliko pozornosti v primeru montažne gradnje. Zaradi krajših odsekov je tudi veliko sprotnega prednapenjanja. V primeru večjih razponov, si moramo tudi tu pomagati z začasnim podpiranjem ali z začasnimi piloni. Zelo natančno mora biti projektirano in izvedeno nadvišanje, kjer je potrebno upoštevati veliko vplivov.

5.2.3 Izbira tehnologije gradnje

Tehnologija gradnje zgornje konstrukcije je razen od materiala, odvisna predvsem od dolžine razponov, višine in dolžine celotnega mostu, geometrije ceste, vrste prečnega prereza in od morfologije terena. V splošnem pa velja, da je pri izbiri sodobnih tehnologij gradnje večjih mostov, upoštevati razpoložljivo opremo potencialnih izvajalcev ter razmere na trgu. Nemogoče je trditi, da je določena tehnologija gradnje najboljša, oziroma najslabša. Vsaka je v določenih okoliščinah lahko najboljša in obratno. Pomembno je, da se izbere takšna tehnologija, s katero bo možno zgraditi projektiran objekt, ki bo funkcionalen, trajen in varen. Pri tem pa je pomembno, da je gradnja cenovno in po možnosti tudi časovno ugodna.

5.3 Zanesljivost in življenjska doba mostov

Življenjska doba je čas v katerem most v dopustnih mejah ohranja svoje osnovne projektirane lastnosti kot so nosilnost, uporabnost in funkcionalnost. Zanesljivost mostov se zmanjšuje v času uporabe kot posledica pričakovanih in naključnih pojavov, od katerih so najpomembnejši kvaliteta vgrajenih materialov, vplivi vzdrževanja, vplivi prometne obtežbe in vplivi okolja.

Udeleženci, ki vplivajo na zanesljivost objektov so:

- Naročnik s:
 - o projektno nalogo,
 - o pripravo podlog,
 - o izbiro projektanta in izvajalca,
 - o revizijo projektov ter
 - o realno ceno in realnim rokom gradnje.

- Projektant s:
 - o pravilno zasnovo,
 - o pravilno statično analizo,
 - o izbiro materialov,
 - o rešitvami detajlov,
 - o izbiro opreme in
 - o projektom vzdrževanja.

- Izvajalec s:
 - o kadri z ustrezno prakso,
 - o sodobno opremo in tehnologijo,
 - o pripravo in organizacijo,
 - o interno kontrolo ter
 - o sprotno, natančno in dosledno izdelavo projekta izvedenih del.

- Nadzor s:
 - o kadri z ustrezno prakso,

- kontrolo vgrajenih materialov,
- kontrolo opreme in tehnologije,
- kontrola pogojev gradnje ter
- dimenzijsko kontrolo

Zaradi boljšega znanja o materialih, predvsem o betonu, se povečuje trajnost objektov. Raziskave morajo nakazati model, ki je uporaben za izračun življenjske dobe armiranobetonske konstrukcije kot sestavnega dela projektne dokumentacije. Za cestne mostove je mogoče realno zahtevati in uresničiti življenjsko dobo vsaj 80 let. Pri večjih cestnih objektih in na pomembnejših strateških odsekih lahko država upravičeno zahteva življenjsko dobo 120 let in tudi več. Življenjska doba se praviloma nanaša na nosilno, zgornjo konstrukcijo cestnih objektov, deloma pa tudi na stebre v odvisnosti od statičnega sistema in konstrukcijske zasnove objekta. Življenjska doba opornikov in masivnih stebrov je od 130 do 150 let. Življenjska doba opreme mostov pa je veliko krajša, le od 20 do 25 let. Vzdrževanje je zelo pomembno, saj pravočasna zamenjava in rekonstrukcija opreme vpliva tudi na življenjsko dobo nosilne konstrukcije. Sistem vzdrževanja mostov obsega:

- pravočasne preglede,
- redno vzdrževanje in preprečitev potencialnih poškodb ter
- pravočasne in kvalitetne sanacije ter rekonstrukcije.

Letno je potrebno predvideti zadostno vsoto denarja za redno vzdrževanje in sanacije. Lahko bi rekli, da je zanesljivost objektov odvisna od varnosti in trajnosti cestnih objektov.

Varnost konstrukcij je zagotovljena z dokazom nosilnosti in uporabnosti po teoriji mejnih stanj in s kontrolo utrujanja.

Uporabnost konstrukcije je dokazana z izpolnjevanjem pogoja glede omejitve deformacij, vibracij in razpok. Na uporabnost vpliva tudi kakovost gradbenih materialov.

Utrujanje je pomembna lastnost pri jeklenih, sovprežnih, armiranobetonskih in pri prednapetih konstrukcijah. Povečuje se z zmanjševanjem lastne teže glede na koristno

obtežbo, s povečevanjem deformacij in vibracij ter z nastankom razpok. Z dokazom varnosti proti utrujanju je potrebno pokazati, da utrujanje nima škodljivega vpliva na nosilnost.

5.4 Zaključek

Pri analizi in pregledu obstoječih mostov v Republiki Sloveniji sem ugotovil, da je daleč najbolj pogosto izbran gredni konstrukcijski sistem. Razlogov za to je več. Dejstvo je, da nam okoljske razmere omogočajo s takšnim konstrukcijskim sistemom premostiti skoraj vse ovire. Pri tem pa bi pogosto bila uporaba drugih konstrukcijskih sistemov v stroškovnem smislu manj primerna. Dodaten razlog za izbiro grednih konstrukcijskih sistemov je ta, da imamo s takšnimi mostovi že veliko izkušenj. Poleg tega pa so slovenski projektanti in izvajalska podjetja s strokovnega stališča na svetovnem trgu pri gradnji grednih mostov povsem konkurenčni. Z vidika konstrukcijskega sistema, bi zaradi vpetosti podpor v prekladno konstrukcijo, lahko veliko večjih grednih mostov v Sloveniji uvrstili tudi med okvirne mostove. Vendar pa imamo pogosto opravka s kombinacijo vpetih in pomičnih podpor.

Zaradi ugodnih vozni lastnosti in najmanj problemov z vzdrževanjem, se danes večinoma gradi kontinuirne horizontalne nosilne konstrukcije, ki imajo dilatacije le nad krajnima opornikoma.

Prevladujoči tehnologiji gradnje pa sta monolitna prostokonzolna gradnja in gradnja s pomočjo narivanja. Konstruktor se odloči za posamezno tehnologijo predvsem na podlagi cene, znanja, izkušenj, potrebe po prostem profilu in geometrije mostu. Podpiranja s tal se za daljše objekte, razen v izjemnih okoliščinah, skoraj ne uporablja več. Še vedno pa je primerno za manjše mostove.

Kljub omenjenim razlogom pa so včasih tudi pri nas bolj primerni ločni oziroma premostitveni objekti s poševnimi zategami. Poleg že omenjenega ločnega mostu Predel, je potrebno izpostaviti še projektantsko in izvedbeno zahtevni Puhov most s poševnimi zategami, ki poteka čez Dravo na Ptuj, ki je zasnovan po sistemu »extradosed bridge«, kar je

vmesna stopnja med grednimi mostovi in mostovi s poševnimi zategami. Omenjena primera potrjujeta, da mostogradnja v Sloveniji uspešno sledi evropskemu in svetovnemu razvoju.

VIRI

Radić Jure. 2002. Mostovi. Zagreb, Dom i svijet: 550 str.

Šram Stanko. 2002. Gradnja mostova. Zagreb, Golden marketing: 351 str.

Saje Franc. Masivni objekti, mostovi (skripta). Ljubljana.

Leonhardt Fritz. 1994. Brucken: Asthetik u. Gestaltung. Stuttgart, Deutche Verlags-Anstalt: 307 str.

Smernice za projektiranje premostitvenih cestnih objektov. 1997. Ministrstvo za promet in zveze...Ljubljana.

Troyano Leonardo Fernandez. 2003. Bridge engineering. London, Thomas Telford publishing: 775 str.

Radić Jure, Mandić Ana, Puž Goran. 2005. Konstruiranje mostova. Zagreb, sveučilište u Zagrebu: 664 str.

Radić Jure. 2007. Masivni mostovi. Zagreb, sveučilište u Zagrebu: 552 str.

Mondorf E. Paul 2006. Concrete bridges. New York, Taylor & Francis: 968 str.

DARS d.d. 2004. Viadukti in mostovi na slovenskih avtocestah. Celje, DARS d.d.: 164 str.

Berkopec A. 2000. Usposobitev transportne poti in premostitvenih objektov za prevoz uparjalnikov iz Luke Koper v NEK. V: Saje F. Lopatič J. (ur.). Zbornik 22. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled 19.-20. oktober 2000. Ljubljana. Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 49-57.

Markelj V. 2001. Projekt mosta s poševnimi zategami čez kanal Formin. V: Saje F. in Lopatič J. (ur.). Zbornik 23. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 18-19. oktober 2001. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 55-63.

Markelj V. 2003. Most čez Muro – zasnova objekta. V: Saje F. in Lopatič J. (ur.). Zbornik 25. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 23.-24. oktober 2003. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 45-54.

Žiberna M., Kotnik R., Kristan D... 2003. kak smu delali »moust prejk Mujre«. V: Saje F. in Lopatič J. (ur.). Zbornik 25. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, Kulturni center, 23.-24. oktober 2003. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 36-69.

Rožič D. in Markelj V. 2009. ICE - neodvisna inženirska kontrola na primeru mostu preko Save v Beogradu. V: Saje F. in Lopatič J. (ur.). Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 8.-9. Oktober 2009. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 41-49.

Ipavec B., Likar I., Kobal P...2009. Ločni most Predel. V:Saje F. Lopatič J. (ur.). Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Rogaška Slatina, 8.-9. oktober 2009. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 31-40.