

TRIČLENKASTI LOČNI MOSTOVI: MATERIAL, RAZPON IN POLOŽAJ VOZIŠČA

THREE-HINGED ARCH BRIDGES: MATERIAL, SPAN, AND BRIDGE TYPE

doc. dr. Lara Slivnik, univ. dipl. inž. arh.

lara.slivnik@fa.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo,

Zoisova 12, 1000 Ljubljana

ZNANSTVENI ČLANEK

UDK 624.07:624.32(497.4)

Povzetek | Tričlenkaste ločne mostove gradijo že od leta 1865. V letu 2017 praznuje 150-letnico postavitve najstarejši še ohranjeni tričlenkasti ločni most, to je Hrdeckega most v Ljubljani. V članku so analizirani ločni mostovi s tričlenkastim konstrukcijskim sistemom. Zgodovinska analiza zajema 76 tričlenkastih ločnih mostov, od tega jih je 59 opisanih v bazi Structurae.net. Vsi obravnavani mostovi so prikazani v preglednici. Tričlenkasti mostovi so razporejeni glede na leto izgradnje (od leta 1865 do danes), glede na material (kovina, beton, les), razpon (od 17 metrov do 130 metrov) in na položaj voziščne konstrukcije glede na položaj loka (vozišče nad ločno konstrukcijo, delno spuščeno vozišče, spuščeno vozišče). Soodvisnost med časom gradnje in materialom, razponom ali položajem voziščne ploskve je opisana in grafično prikazana na časovnicah. V drugem delu prispevka so tričlenkasti mostovi analitično in grafično medsebojno primerjani glede na zadnje tri parametre. Najbolj pogost tričlenkasti ločni most je armiranobetonski, z razponom 60 metrov in z voziščno površino, ki je nad ločno konstrukcijo in je z njo povezana s stebri.

Ključne besede: členek, most, tričlenkasta konstrukcija, tričlenkasti lok, tročlenski lok, konstrukcijski sistem

Summary | Three-hinged arch bridges have been built since 1865. The oldest still in use three-hinged arched bridge is Hrdecky Bridge in Ljubljana and in 2017 we celebrate its 150th anniversary. The paper presents analyses of the arch bridges with three-hinged structural system. The analyses are based on an extensive historical overview including 76 of the most representative three-hinged arch bridges; 56 of them can be found on Structurae.net web page. All of them are shown in the table. The three-hinged arch bridges are classified according to the year of construction (from 1865 to present), material (metal, concrete, timber), span (from 17 meters to 130 meters), and the position of the deck relative to the position of the arch (upper deck, half-through and through). The interdependences between the year of construction and material, span or position of the deck relative to the position of the arch are described and shown in timesheets. In the second part of the paper the three-hinged arch bridges are compared analytically and with timesheets in relation to the last three parameters. The dominant type of the three-hinged arch bridge is open spandrel deck reinforced concrete arch bridge, with a span of 60 meters.

Key words: hinge, pin, three-hinged arch structure, structural system, three-pined arch

1 • UVOD

Razumevanje lastnosti novih gradbenih materialov lahko privede inženirje do povsem novih zasnov konstrukcijskih sistemov. V devetnajstem stoletju so za nov material v gradbeništvu uvedli železo. V konstrukciji so začeli vgrajevati členke in posledično

so nastali novi konstrukcijski sistemi: med drugim tudi dvočlenkasta in tričlenkasta konstrukcija. Sledila je gradnja dvočlenkastih in tričlenkastih ločnih mostov, narejenih z različnimi vrstami členkov, iz različnih materialov, različnih razponov in različnih položajev

voziščne površine glede na položaj nosilne ločne konstrukcije.

V pričujočem članku je bilo analiziranih 76 tričlenkastih ločnih mostov. Osnovni namen je potrditev teze, da je Hradskega most v Ljubljani eden izmed najstarejših mostov s tričlenkasto ločno konstrukcijo na svetu. Oktobra 2017 bo minilo 150 let, odkar so ga prvič postavili na mestu današnjega Čevljarskega mostu, pozneje so ga še dvakrat predstavili.

2 • TRIČLENKASTA KONSTRUKCIJA

Tričlenkasta konstrukcija ima lahko obliko tričlenkastega loka ali tričlenkastega okvirja. Obe obliki konstrukcije sta zelo enostavni za razumevanje delovanja sil in hkrati tudi preprosti za računanje. Običajno je tričlenkasti ločni konstrukcijski sistem simetrična konstrukcija, sestavljena iz dveh lokov in treh členkov: dva členka sta tik ob obeh krajnih oporah konstrukcije, tretji členek je v najvišji točki konstrukcije. Vsi trije členki omogočajo konstrukciji pomike in zasuke, ki nastanejo ob

temperaturnih spremembah, posedkov zaradi slabe nosilnosti tal ali erozijskega izpodjedanja, zaradi slabo izdelanih temeljev, krajnih opornikov ali vmesnih podpornikov in ob potresih (Slivnik, 2013). Vsak izmed obeh krajnih členkov ob obeh oporah je običajno nameščen ob stiku pete loka z oporo (oziroma s temeljem). Tretji členek je običajno postavljen v najvišjo točko konstrukcije, ki jo imenujemo teme loka oziroma teme konstrukcije. V terminološkem kotičku Gradbenega vest-

nika sta Kuhta in Brunčič (Kuhta, 2015) obravnavala problematiko rabe pridevnikov členski in členkasti. Ob tem sta poudarila, da v gradbeništvu besedi člen in členek nista sopomenki, gre namreč za dva različna pojma. Pridevnika dvočlenski in tročlenski sta zato v pomenu, v kakršnem se uporabljata, napačna. Namesto uveljavljene, a po logiki očitno napačne rabe pridevnika dvočlenski in tročlenski (včasih tudi tričlenski) predlagata rabo pridevnika dvočlenkasti ali tričlenkasti. Prav zato je tudi v pričujočem članku – namesto pridevnika tročlenski ali tričlenski – uporabljen pridevnik tričlenkasti: tričlenkasta konstrukcija in tričlenkasti most.

3 • TRIČLENKASTI LOČNI MOSTOVI

Internetna stran Structurae.net je podatkovna baza, v kateri so zbrane najpomembnejše konstrukcije z vsega sveta. Predstavljene so z osnovnimi podatki, nekatere tudi s fotografijami. Trenutno je v njej opisanih tudi 79 tričlenkastih mostov (Structurae.net, 2017). Poleg splošnih podatkov, med katere spadajo ime mostu, lokacija, leto dograditve in trenutna uporaba, so večinoma naštetih še: tip

mostu, tehnični podatki (dimenzije, materiali in cena), konstruktor, gradbeno podjetje, ki je konstrukcijo izdelalo, in literatura, iz katere so črpani podatki.

Zaradi pomanjkljivih podatkov, ki so bili potrebni za pričujočo primerjalno analizo, so bili nekateri tričlenkasti ločni mostovi iz baze Structurae.net izpuščeni. Hkrati so dodani nekateri predvsem starejši

tričlenkasti ločni mostovi. Ti so zbrani in delno opisani že v člankih ((Slivnik, 2013), (Slivnik, 2016)). V analizi seveda niso zajeti vsi tričlenkasti ločni mostovi, ki so bili kdaj zgrajeni, a sledimo lahko nekaterim smernicam razvoja.

V članku je torej zbranih več kot 70 tričlenkastih ločnih mostov. Analizirani so glede na material, iz katerega je most zgrajen, dolžino razpona mostu in položaj vozišča glede na glavno nosilno ločno konstrukcijo. Hkrati sledimo tudi zgodovinskemu razvoju tričlenkastih ločnih mostov.

4 • ANALIZA TRIČLENKASTIH LOČNIH MOSTOV

Že prof. dr. Milenko Pržulj v knjigi Mostovi (Pržulj, 2015) ugotavlja, da je delitev mostov težavno in nevhvaležno opravilo, vendar se razdelitve loti z namenom, da doseže preglednost pri proučevanju mostov. Mostove deli glede na namen, vrsto ovire, ki jo most premošča, statični sistem nosilne konstrukcije, položaj vozišča glede na glavne nosilce prekladne konstrukcije, položaj osi mostu glede na osi opor, obliko osi prometnice na mostu, možnost premikanja prekladne konstrukcije glede na opore, uporabno dobo

mostu, material, iz katerega so mostovi zgrajeni, postopke gradnje prekladne konstrukcije in dolžino mostu.

Ob upoštevanju podatkov, ki so zbrani v bazi Structurae.net, in ob njihovi združitvi z delitvijo prof. Pržulja lahko statični sistem nosilne konstrukcije ločnih mostov s tričlenkastim lokom smiselno analiziramo po naslednjih treh parametrih: material, razpon in položaj vozišča s podtipom.

V preglednici 1 so prikazani vsi analizirani tričlenkasti ločni mostovi (znak * pomeni,

da most ni opisan v bazi Structurae.net). V prvem stolpcu je ime mostu v originalnem jeziku (le imeni japonskega in ruskega mostu sta bili prečrkovani v slovenski jezik). Sledi leto dograditve mostu (za pomišljajem je leto porušitve mostu, za podpičjem je leto prestatitve mostu na drugo lokacijo). V tretjem stolpcu so opisani gradbeni materiali: železo (kovano železo, lito železo) oziroma jeklo, različne vrste betona (nearmirani beton, Melanov patent betona, armirani beton, kamen ali prednapeti beton) oziroma kamna ter les (lamelirani lepljeni les). Četrty stolpec predstavlja razpon tričlenkastega loka med oporama, razdalja je merjena v metrih (znak

× pomeni, da je most sestavljen iz več enakih zaporednih lokov, znak + pomeni, da so razponi zaporednih lokov različni. V zadnjem stolpcu je definiran položaj vozišča glede na

položaj ločne konstrukcije (nadločna konstrukcija (N), delno spuščena konstrukcija (DS) ali spuščena konstrukcija (S)), za podtip je pri nadločni konstrukciji navedena vrsta

povezave (paličje, zaprta povezava, steber, obok, škatla (H-box), diagonalni stebri, prečna stena oblike X, vzdolžna stena, brez povezave).

IME MOSTU V ORIGINALNEM JEZIKU	DOGRADITEV	MATERIAL	RAZPON (m)	POLOŽAJ VOZIŠČA in PODTIP
Unterspre-Brücke (D)*	1865–1887	kovano železo	5 × 17	N: paličje
Hradeckega most (Mrtvaški most) (SLO)	1867; 1932; 2011	lito železo	30,4	N: paličje
(Tegetthoffbrücke) Kleine Ungarbrücke (A)*	1872; 1898	železo	(34,5) 26	N: paličje
Munderkingen Donaubrücke (D)	1893–1945	nearmirani beton	50	N: zaprta povezava
Panther Hollow Bridge (USA)	1896	jeklo	109,8	N: paličje
Schwimmschulbrücke (A)*	1898–1959	beton: patent Melan	42,2	N: zaprta povezava
Stauffacherbrücke (CH)*	1899	nearmirani beton	39,6	N: zaprta povezava
Franzensbrücke (A)	1899–1945	jeklo	53	N: paličje
Pont Alexandre-III (F)	1900	jeklo	107,5	N: steber
Pont Camille-de-Hogues (F)*	1900	armirani beton	40 + 50 + 40	N: steber
Zmajski most (SLO)	1901	beton: patent Melan	33,34	N: obok
Zuoz Brücke (CH)	1901	armirani beton	38	N: škatla (H-box)
Luitpoldbrücke (D)	1901	kamen	63	N: zaprta povezava
Max-Joseph-Brücke (D)	1902	kamen	63	N: zaprta povezava
Confederate Avenue Bridge (USA)	1903–1997	jeklo	82,35	N: paličje
Pont de Fragnée (B)	1904	jeklo	53 + 57 + 53	N: steber
Viaduc d'Austerlitz (F)*	1904	jeklo	120 med členkoma	DS
Isarbrücke Grünwald (D)	1904–ca.1998	armirani beton	2 × 70	N: steber
Neckarbrücke (D)	1905–1945	armirani beton	5 × 40	N: obok
Wallstrassenbrücke (D)	1905–1945	nearmirani beton	57	N: steber
Rheinbrücke, Tavanasa (CH)	1906–1927	armirani beton	51	N: škatla (H-box)
Illerbrücken Kempten (3 bridges) (D)	1906	nearmirani beton	64,5	N: zaprta povezava
Marienbrücke (A)*	1909–1945	jeklo	53,6	N: steber
Pont d'Amélie-les-Bains (F)	1909	armirani beton	46	N: steber
Neckareisenbahnbrücke, Tübingen (D)	1910	armirani beton	2 × 45	N: zaprta povezava
Sitterviadukt (CH)	1910	kamen	25	N: zaprta povezava
Pont du Veudre (F)	1910–1944	armirani beton	64 + 72 + 64	N: diagonalni stebri
Malmskillnadsbron (S)	1911	armirani beton	24	N: zaprta povezava
Pont de la Roche-Bernard (F)	1911–1944	jeklo	112 med členkoma	DS
Pont Neuf de Montauban (F)	1912	armirani beton	53 + 56	N: steber
Pont de Monéteau (F)	1913	jeklo	62 med členkoma	DS
Viaduto Santa Ifigênia (Brazilija)	1913	jeklo	3 × 75	N: steber
Viaduc de Caroual (F)	1914	armirani beton	45	N: steber; lok kot paličje
Kanalbrücke, Minden (D)	1914	armirani beton	6 × 36,5	N: zaprta povezava
Fairfax Bridge (USA)	1921	jeklo	73,2	N: steber
Pont Guillermaux (CH)	1921	armirani beton	27,6	N: obok
Horotiu Bridge (NZ)	1921	armirani beton	38,4	DS
40th Street Bridge, Pittsburgh (USA)	1924	jeklo	3 × 109,7	N: obok
Pont de Kerlosquer (F)	1924	armirani beton	26	N: steber
Pont de Persan-Beaumont (F)	1924–1940	armirani beton	50	S
Pont de la D50 sur l'Artuby (F)	1927	armirani beton	107	N: steber
Wearmouth Bridge (UK)	1929	jeklo	114	DS
Petriforbrücke (D)	1929–2003	armirani beton	29	N: zaprta povezava
Salginatobelbrücke (CH)	1930	armirani beton	90	N: steber
Pont de Renory (B)*	1930	armirani beton	?	N: obok
Felseggbrücke (CH)	1932	armirani beton	72	N: steber
Rossgabenbrücke (CH)	1932	armirani beton	82	N: steber

IME MOSTU V ORIGINALNEM JEZIKU	DOGRADITEV	MATERIAL	RAZPON (m)	POLOŽAJ VOZIŠČA in PODTIP
Universitätsbrücke (A)	1932	armirani beton	45	N: zaprta povezava
Adolf-Hitler-Brücke (D)	1934–1944	armirani beton	107	N: zaprta povezava
Ling Bridge (Kitajska)	1936	jeklo	97,6	S
Pont de Vessy (CH)	1937	armirani beton	56	N: prečna stena oblike X
Simmebrücke Garstätt (CH)	1939	armirani beton	32	N: vzdolžna stena
Rosenbergbrücke (D)	1939–1945	armirani beton	60	?
Gruberjeva brv (Streliška brv) (SLO)*	1939	armirani beton	35	N: zaprta povezava
Brücke im Zuge, Churerstrasse (CH)	1940	armirani beton	?	N: brez povezave
Ponte Lussia, Vagli (I)	1953	armirani beton	70	N: steber
Modrow Road Bridge (USA)	1958	jeklo	61	N: steber
Averserrheinbrücke Letziwald (CH)	1959	armirani beton	66,5	N: steber
Puente Sal-si-puedes (Ekvador)	1960	jeklo	130	N: steber
Pont de la Grande Côte (F)	1960	prednapeti beton	101	N: zaprta povezava
Pennine Way Footbridge (GB)	1965	prednapeti beton	67,1	N: brez povezave
Keystone Wye Interchange (USA)	1968	lamelirani lepljeni les	47,2	N: steber
Ernst-Müller-Brücke (D)	1987–2008	lamelirani lepljeni les	44,5	S
Eagle River Timber Bridge (USA)*	1990	lamelirani lepljeni les	23; 24	N: steber
most Hiraoka(J)	1993	lamelirani lepljeni les	45	N: steber
Wennerbrücke (A)*	1993	lamelirani lepljeni les	45	N: steber
Klockarbergsleden Bro (S)	1994	lamelirani lepljeni les	35	N: steber
Margretelund Bro (S)*	1994	lamelirani lepljeni les	35	N: steber
Ponte Bonatti (I)*	2001	lamelirani lepljeni les	67	S
Robert 'Bob'C.Beach Bridge (USA)*	2003	lamelirani lepljeni les	43	S
Wildbrücke Wilmshagen (D)	2004	lamelirani lepljeni les	27,6	N: zaprta povezava
Wildbrücke Wiesenhagen (D)	2012	lamelirani lepljeni les	32	N: zaprta povezava
Riški železniški most (RU)	?	armirani beton	120	N: brez povezave
Herkimer Military Road (USA)	?	lamelirani lepljeni les	27	N: steber
Puente peatonal Cangas de Onís (E)	?	lamelirani lepljeni les	28	S
Puente peatonal A Pontenova (E)	?	lamelirani lepljeni les	40	S

Preglednica 1 • Analizirani tričlenkasti ločni mostovi

Analiziranih je bilo 76 tričlenkastih ločnih mostov. Od tega jih je bilo 8 (11 %) dokončanih pred letom 1900, 47 (62 %) med letoma 1900 in 1950, 17 (22 %) po letu 1950, za 4 (5 %) mostove ni podatka o letu izgradnje. Iz železa oziroma jekla je narejenih 19 (25 %) analiziranih mostov, 43 (57 %) jih je iz betona oziroma kamna, 14 (18 %) iz lameliranega lepljenega lesa. Analizirani mostovi imajo dolžino razpona od 17 metrov do 130 metrov, za dva (3 %) izmed njih ni podatka o razponu. Voziščno ploskev nad ločno konstrukcijo ima 63 (83 %) analiziranih mostov, 5 (7 %) jih ima delno spuščeno vozišče, 7 (9 %) spuščeno vozišče, za en (1 %) most ni podatka.

4.1 Materiali, iz katerih so zgrajeni tričlenkasti mostovi

Za nosilno konstrukcijo tričlenkastih ločnih mostov se v grobi razdelitvi uporabljajo tri glavne vrste gradbenih materialov: železo oziroma pozneje jeklo, različne vrste betona oziroma kamen in les.

Prvi znani tričlenkasti most je bil narejen iz kovanega železa. Po iznajdbi izboljšanih postopkov so začeli izdelovati tričlenkaste mostove iz železovih zlitin: litega železa in različnih vrst jekel. Okoli leta 1900 so začeli uporabljati nove masivne materiale: nearmirani beton, obdelani kamen in različne vrste armiranega betona. V sredini dvajsetega stoletja so izdelovali tričlenkaste ločne mostove tudi iz prednapetega armiranega betona. Največ tričlenkastih ločnih mostov v zadnjih tridesetih letih je bilo narejenih iz lepljenega lameliranega lesa.

Na sliki 1 sta prikazana čas izgradnje tričlenkastih ločnih mostov in uporaba različnih gradiv. Na vodoravni osi je prikazano leto dograditve mostu, na navpični osi so materiali.

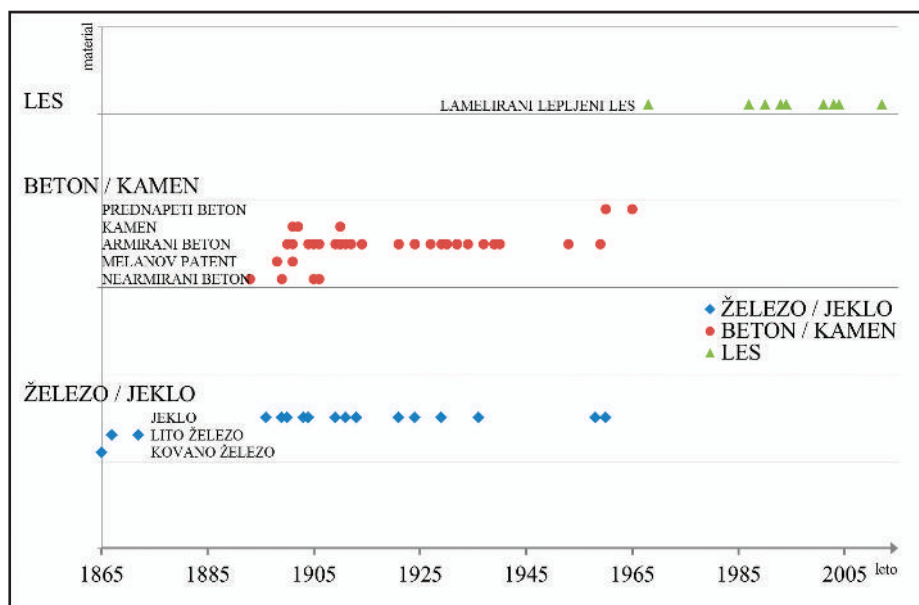
Iz analize časovnice uporabe različnih gradbenih materialov je lepo razviden trend uporabe vseh treh glavnih gradiv. Iz virov (Köpcke, 1861) vemo, da je tričlenkasto konstrukcijo prvi teoretično opisal nemški inženir Claus

Köpcke (1831–1911) leta 1861. V praksi je tričlenkasto ločno konstrukcijo prvi uporabil še en nemški inženir, Johann Wilhelm Schwedler (1823–1894), ki je leta 1865 načrtoval železniški most iz kovanega železa čez reko Spree (Unterspree-Brücke) v Berlinu. Najstarejši še ohranjeni tričlenkasti ločni most je Hradeckega most v Ljubljani, ki je v uporabi od leta 1867, narejen iz litega železa in postavljen na tretji lokaciji. Pred prelomom v dvajseto stoletje se je tehnika vlivanja železovih zlitin močno izboljšala. Prvim tričlenkastim ločnim mostovom, ki so bili narejeni iz kovanega ali litega železa, so sledili bolj nosilni mostovi, narejeni iz različnih jeklenih zlitin. V Združenih državah Amerike so leta 1896 zgradili Panther Hollow Bridge, na Dunaju Franzensbrücke (1899) ter v Parizu Pont Alexandre-III (1900) in Viaduc d'Austerlitz (1904). Po letu 1950 so zgradili vsaj še Modrow Road Bridge v Združenih državah Amerike (1958) in Puente Sal-si-puedes v Ekvadorju (1960). Skupno je v časovnici materialov (slika 1) prikazanih 19

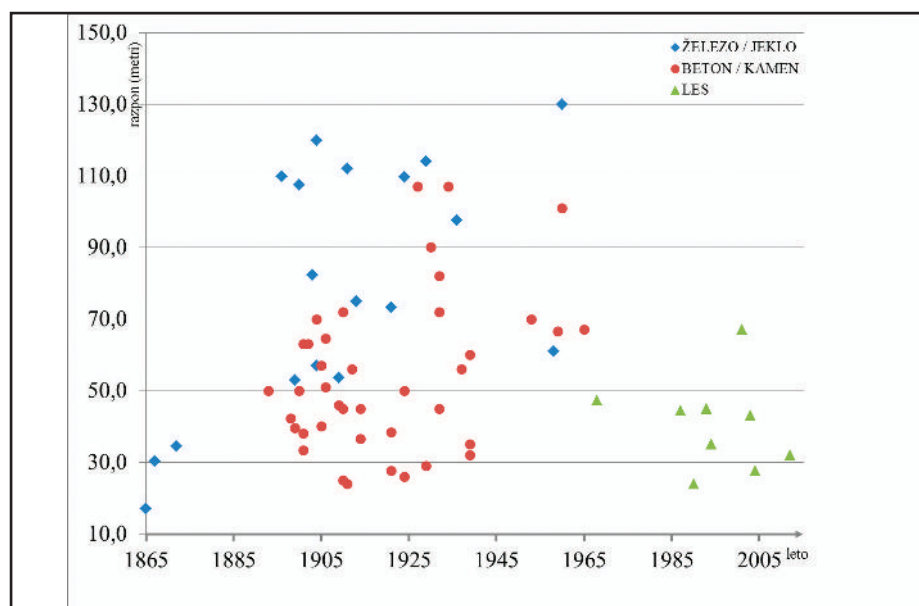
(27 %) mostov iz železa oziroma jekla.

Osnovno idejo za vpeljavo členkov v zidane konstrukcije je prvi teoretično opisal Francoz Jules Dupuit (1804–1866). Delo so izdali šele posthumno (Dupuit, 1870). Na največji odmev uporabe v praksi je njegova ideja naletela v Nemčiji, kjer so uporabili členke najprej pri grednih in visečih mostovih. Pionir je bil že omenjeni Claus Köpcke. Tudi prve ločne tričlenkaste masivne mostove so zgradili v Nemčiji. Za gradnjo mostu čez Donavo (Donaubrücke) v nemškem Munderkingenu so leta 1893 uporabili beton, ki je bil brez armature. Ob prelomu stoletja so skoraj hkrati trije mladi inženirji, Avstrijec Josef Melan (1854–1941) (Schwimmschulbrücke, 1898), Francoz François Hennebique (1842–1921) (Pont Camille-de-Hogues, 1900) in Švicar Robert Maillart (1872–1940) (Zuoz Brücke, 1901), zgradili tričlenkaste ločne mostove z različnimi sistemi armiranja. V Nemčiji, točneje v Münchnu, so še pred prvo svetovno vojno zgradili vsaj dva tričlenkasta ločna mostova iz kamna, to sta Luitpoldbrücke (1901) in Max-Joseph-Brücke (1902). Prvič so prednapeti armirani beton za tričlenkaste ločne mostove uporabili v francoski Provansi (Pont de la Grande Côte) leta 1960. Na sliki 1 je prikazanih 42 (58 %) mostov iz različnih vrst betona oziroma kamna, največ je bilo zgrajenih v prvi polovici dvajsetega stoletja.

Prvi tričlenkasti ločni most iz lameliranega lepljenega lesa, Keystone Wye Interchange, so postavili v Združenih državah Amerike leta 1968. Proti koncu dvajsetega stoletja so zgradili največ tričlenkastih ločnih mostov prav iz lameliranega lepljenega lesa. Most za pešce Ernst-Müller-Brücke (1987) v zeleni okolici Hückeswagena v Nemčiji se je zaradi slabega vzdrževanja lesa podrli leta 2008. Nam najbližji tričlenkasti ločni most iz lameliranega lepljenega lesa je Wennerbrücke (1993) v mestu St. Georgen ob Muri na avstrijskem Štajerskem. V Nemčiji so za prehod divjadi čez avtoceste zgradili vsaj dva tričlenkasta ločna mostova iz lameliranega lepljenega lesa: Wildbrücke Wilmshagen (2004) in Wildbrücke Wiesenhausen (2012). V časovnici materialov je prikazanih 11 (15 %) mostov iz lameliranega lepljenega lesa. Skupno je v časovnici uporabe materialov (slika 1) prikazanih 72 tričlenkastih ločnih mostov. Najstarejši so tričlenkasti ločni mostovi iz različnih zlitin železa oziroma jekla. Betonske mostove s tričlenkasto ločno konstrukcijo so gradili predvsem v prvi polovici dvajsetega stoletja. Danes se največ takšnih mostov gradi iz lameliranega lepljenega lesa.



Slika 1 • Časovnica uporabe materialov.



Slika 2 • Časovnica razponov.

4.2 Razponi tričlenkastih mostov

Dolžine razponov tričlenkastega loka so dokaj raznolike in segajo od 17 metrov do 130 metrov. Najstarejša tričlenkasta ločna konstrukcija (Unterspre-Brücke) je imela hkrati tudi najkrajši razpon: le 17 metrov. Najdaljši izmed analiziranih mostov je Puente Sal-sipuedes v Ekvadorju, kjer je celotna dolžina mostu 186 metrov, tričlenkasti lok pa je krajši in meri okoli 130 metrov. Sledi mu Viaduc d'Austerlitz v Parizu s 120 metri razpona med krajnjima členkoma. Tričlenkasta ločna konstrukcija se torej uporablja za manjše

in srednje velike mostove, najbolj običajna dolžina je od 30 do 70 metrov.

Na sliki 2 so prikazani razponi tričlenkastih ločnih mostov, označena so tudi različna gradiva (železo/jeklo, beton/kamen in les). Na vodoravni osi je prikazano leto dograditve mostu, na navpični osi je razpon (v metrih). Časovnica razponov je morda manj očitna, a tudi tu lahko zasledimo nekatere zakonitosti. Razpon prvega tričlenkastega ločnega mostu (Unterspre-Brücke, 1865) je s 17 metri je najkrajši med vsemi. Most Kleine Ungarbrücke (1872) na Dunaju so postavili leta 1898 na

novo lokacijo in ga skrajšali s 34,5 metra na 26 metrov. Z izboljšavo materiala so postajali tudi razponi vse daljši. Jekleni mostovi so že okoli leta 1900 dosegali razpon okoli 110 metrov: Panther Hollow Bridge (1896) s 109,8 metra, Pont Alexandre-III (1900) s 107,5 metra in Pont de la Roche-Bernard (1911) s 112 metri. Najdaljša jeklena tričlenkasta ločna mostova sta Viaduc d'Austerlitz (1904) v Parizu s 120 metri razpona med krajnjima členkoma (in 140 metri razpona med podporama) ter Puente Sal-si-puedes (1960) z razponom med krajnjima členkoma 130 metrov in celotno dolžino mostu 187 metrov. V časovnici razponov je prikazanih 19 (27 %) mostov iz železa oziroma jekla, povprečni razpon mostov je 81,7 metra.

Analizirani betonski tričlenkasti ločni mostovi merijo v dolžino od 24 metrov (Malmskillnadsbron, 1911) do 107 metrov (Pont de la D50 sur l'Artuby, 1927, in Adolf-Hitler-Brücke, 1934). Najstarejši izmed analiziranih nearmiranih betonskih mostov (Munderkingen Donaubrücke, 1893) je imel razpon 50 metrov. Münchenska kamnita mostova Luitpoldbrücke (1901) in Max-Joseph-Brücke (1902) imata oba razpon po 63 metrov. Švicarski inženir Robert Maillart je tričlenkaste armiranobetonske konstrukcije v času med obema svetovnjima vojnoma privedel do popolnosti. Njegov most čez reko Salgine v Švici (Salginatobelbrücke, 1930) z razponom 90 metrov zaradi svoje vitkosti in estetske arhitekturne vpetosti v prostor danes velja za vrhunec gradnje tričlenkastih ločnih mostov. Most iz prednapetega betona Pont de la Grande Côte (1960) ima razpon 101 meter. Najdaljši most iz armiranega betona je Riški železniški most z razponom 120 metrov, a v časovnici razponov ni prikazan, saj ni znano leto njegove dograditve. Skupno je na sliki 2 prikazanih 40 (57 %) mostov iz betona oziroma kamna, povprečni razpon teh mostov je 55,8 metra.

Dolžina analiziranih razponov tričlenkastih ločnih mostov iz lameliranega lepljenega lesa je od 22 metrov (Eagle River Timber Bridge, 1990) do 67 metrov (Ponte Bonatti, 2001). Najstarejši tričlenkasti ločni most iz lameliranega lepljenega lesa (Keystone Wye Interchange Bridge, 1968) ima razpon 47,2 metra. Skupno je v časovnici razponov prikazanih 11 (16 %) mostov iz lameliranega lepljenega lesa, njihov povprečni razpon je 40,5 metra. V časovnici razponov (slika 2) je skupno prikazanih 70 tričlenkastih ločnih mostov, povprečni razpon mostov v vseh treh materialih je 60,4 metra. Med analiziranimi razponi ni daljšega od 130 metrov. Analiza vseh treh

materialov pokaže, da so jekleno konstrukcijo uporabili za najdaljše razpone, leseno pa le za krajše razpone. Tričlenkasta ločna konstrukcija se torej uporablja samo za manjše in srednje razpone, od 17 do 130 metrov.

4.3 Položaj voziščne konstrukcije glede na tričlenkasto ločno konstrukcijo (s podtipi)

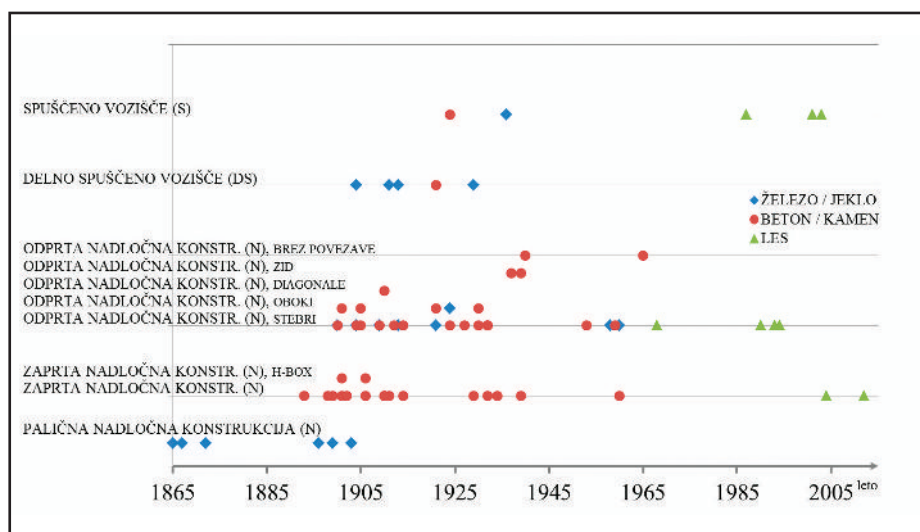
Pri tričlenkastih ločnih mostovih je najbolj običajna voziščna konstrukcija, ki poteka tik nad ločno konstrukcijo in se z njo tangентno stika samo v vrhnjem členu, ki je v temenu loka. Voziščna konstrukcija nad lokom (nadločna konstrukcija) je lahko z lokom povezana različno. Vmesni prostor med lokom in voziščem je lahko povezan s paličjem, s stebri, z oboki ali z diagonalami, lahko je popolnoma odprt, tako sta lok in vozišče brez povezave, lahko pa je prostor popolnoma zaprt, torej napolnjen z materialom. Poznamo še dve drugi različici položaja voziščne ploskve. Pri obeh je voziščna ploskev spuščena tik ob oba spodnja členka. Pri prvi različici sta spodnja členka odmaknjena od opor in sta običajno na prvi četrtini loka; temelji morajo biti zato zelo masivni in trdni. Gre za tričlenkasti lok z delno spuščeni voziščem. Pri drugi različici oba spodnja členka ostaneta tik ob oporah, tod poteka tudi voziščna ploskev. Takšen podtip imenujemo tričlenkasti lok s spuščeni voziščem. Na sliki 3 so prikazani čas izgradnje tričlenkastih ločnih mostov in različni položaji voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo. Na vodoravni osi je prikazano leto dograditve mostu, na navpični osi so različni položaji ločne konstrukcije glede na voziščno ploskev. Nadločna konstrukcija je več tipov. Palična nadločna konstrukcija je

med njimi najstarejša. Zaprta nadločna konstrukcija ima dva podtipa: zaprta konstrukcija, ki je napolnjena z materialom, in škatlasta konstrukcija. Odprta nadločna konstrukcija se deli na pet podtipov: povezava s stebri, oboki, diagonalami, zidom ali pa oba dela med seboj nista povezana.

Iz časovnice položaja voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo lahko vidimo, da so najprej gradili ločne konstrukcije z voziščno ploskvijo nad lokom samim, torej tako, da se vozišče tangентno dotika loka. Prve tričlenkaste ločne konstrukcije so bile narejene kot paličja iz železa (Unterspre-Brücke, 1865, Hrdeckega most, 1867, in Kleine Ungarbrücke, 1872), a se ne uporabljajo že več kot 100 let. V časovnici položaja voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo je prikazanih 6 (8 %) mostov s palično nadločno konstrukcijo.

Prva zaprta oziroma polna nadločna konstrukcija je hkrati tudi prva konstrukcija, ki ni bila narejena iz kovine. Inženir Karl von Leibbrand je načrtoval betonski most čez reko Donavo (Donaubrücke, 1893) v Munderkingenu brez armature. Mostova čez reko Inn v Zuožu (1901) in čez Ren v Tavanasi (1906) je inženir Robert Maillart načrtoval kot zaprto nadločno konstrukcijo z votlo škatlo (H-box). Zaprte nadločne konstrukcije gradijo še danes, med analiziranimi primeri sta tudi leseni ločni konstrukciji za prehod živali čez avtocesto v Nemčiji (Wilmshagen, 2004, in Wiesenhausen, 2012). Analiziranih je 19 (27 %) mostov z zaprto nadločno konstrukcijo.

Največ se gradijo odprte nadločne konstrukcije, pri tem sta lok in voziščna ploskev med seboj lahko povezana na več načinov. Najbolj pogosta povezava med ločno konstrukcijo in



Slika 3 • Časovnica položaja voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo.

voziščno ploskvijo so stebri. Prva dva izmed analiziranih mostov s takšno konstrukcijo sta armiranobetonski most Camille-de-Hogues (1900) v Châtelleraultu, ki ga je načrtoval François Hennebique, in jekleni most Alexandre-III (1900) v Parizu. Inženir Josef Melan je pri Zmajskem mostu (1901) v Ljubljani povezal betonsko ločno konstrukcijo in voziščno ploškev z oboki, inženir Eugène Freyssinet je pri mostu pri Veudre (1910) uporabil diagonalne stebre. Inženir Robert Maillart je načrtoval kar nekaj inovacij v tričlenkastih ločnih mostovih: most v Vessju (1937) ima prečne stene v obliki črke X, most v Garstattu (1939) ima vzdolžne stene, železniški most čez Churerstrasse (1940) pri Altendorfu je brez povezave. V časovnici položaja voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo je analiziranih 36 (51 %) mostov z odprto nadločno konstrukcijo.

Delno spuščeno vozišče pomeni, da vozišče seka lok v dveh členih, ki pa v tem primeru nista ob mostnih oporah. Najzgodnejši je pariški Viaduc d'Austerlitz iz leta 1904, sledita mu dva jeklena tričlenkasta mostova v Franciji (Pont de la Roche-Bernard, 1911, in Pont de Monéteau, 1913), nato betonski z Nove Zelandije (Horotiu Bridge, 1921) in angleški Wearmouth Bridge (1929), ki je narejen iz jekla. Analiziranih je pet (7 %) primerov delno spuščene vozišča.

Tudi popolnoma spuščeno vozišče seka lok v dveh točkah, ti sta v členih tik ob oporah. Najstarejša izmed analiziranih primerov sta armiranobetonski most Pont de Persan-Beaumont (1924) in most Ling (1936) v Ningbu na Kitajskem. Konstrukcije s popolnoma spuščeno voziščem gradijo še danes. Novejša primera sta narejena iz

lameliranega lepljenega lesa: Ponte Bonatti (2001) in Robert 'Bob' C. Beach Bridge (2003). Analiziranih je pet (7 %) primerov, dva primera iz preglednice 1 sta v časovnici izpuščena zaradi pomanjkanja podatka o letu gradnje.

Na časovnici položaja voziščne ploskve glede na ločno konstrukcijo (slika 3) je prikazanih 71 tričlenkastih ločnih mostov, od tega jih ima 61 nadločno konstrukcijo, 5 delno spuščeno vozišče in 5 spuščeno vozišče. Med analiziranimi mostovi ni takšnega s palično nadločno konstrukcijo, ki bi bil zgrajen po letu 1903, in ne primera z delno spuščeno voziščem, zgrajenim po letu 1929. Danes še vedno gradijo tričlenkaste ločne mostove z zaprto nadločno konstrukcijo, odprto nadločno konstrukcijo s stebri in s popolnoma spuščeno voziščem.

5 • REZULTATI ANALIZE TRIČLENKASTIH LOČNIH MOSTOV

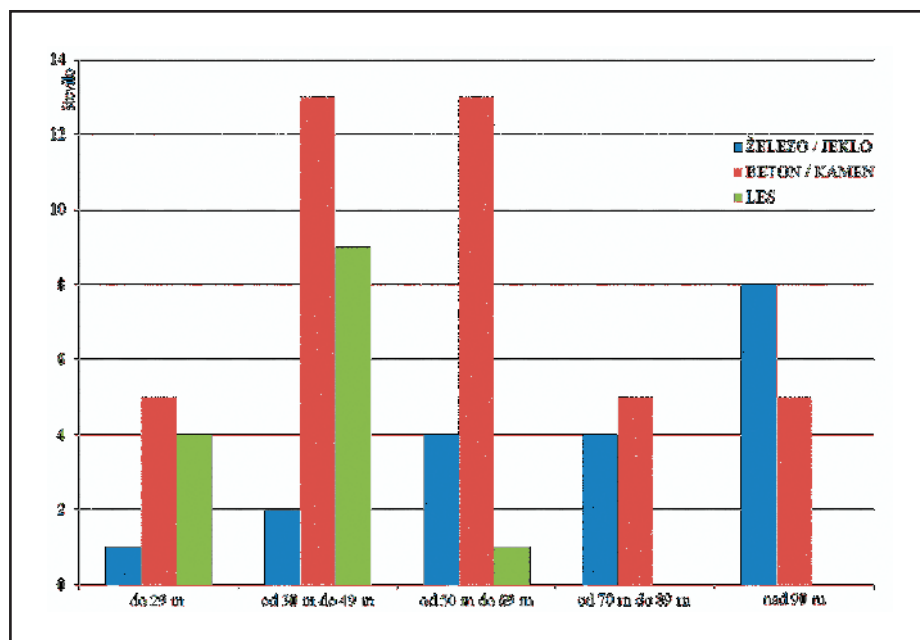
Rezultati analize tričlenkastih ločnih mostov so razporejeni v tri skupine in prikazani s slikami. Na sliki 4 so primerjane pogostosti mostov v odvisnosti od razpona in materiala, na sliki 5 so primerjane pogostosti mostov v odvisnosti od položaja voziščne površine in razpona, na sliki 6 pa so primerjane pogostosti mostov v odvisnosti od materiala in položaja voziščne površine.

5.1 Pogostost mostov v odvisnosti od razpona in materiala

Na sliki 4 je prikazanih 74 tričlenkastih ločnih mostov, analiziranih glede na razpon in material. Razpon je razdeljen na pet kategorij: do 29 metrov, od 30 do 49 metrov, od 50 do 69 metrov, od 70 do 89 metrov in nad 90 metrov. Materiali so razdeljeni v tri kategorije: železo oziroma jeklo, beton oziroma kamen in les. Opazimo lahko, da so razponi železnih oz. jeklenih in betonskih oz. kamnitih mostov vseh dolžin: od najkrajših pa do 130 metrov. Razponi tričlenkastih ločnih mostov iz lepljenega lameliranega lesa so krajši, saj mostu z razponom nad 70 metri ni med analiziranimi primeri. Številčno je največ mostov z razponom od 30 do 49 metrov, skupaj 24. Sledi 18 mostov z razponom med 50 in 69 metri. Izstopa tudi število betonskih oziroma kamnitih mostov z razponom od 30 do 69 metrov, v obeh kategorijah je skupaj 25 tričlenkastih ločnih mostov iz betona oziroma kamna. Primerjava pogostosti mostov v odvisnosti od razpona in materiala je bila narejena na

74 tričlenkastih ločnih mostovih, od tega je 19 (26 %) železnih oziroma jeklenih, 41 (55 %) betonskih oziroma kamnitih in 14 (19 %) lesenih. Mostovi iz železa oziroma jekla so vseh dimenzij, od najkrajšega s 17 metri do najdaljšega s 130 metri. Betonski oziroma kamniti mostovi so dimenzij od 24 metrov do 120 metrov. Mostovi iz lepljenega lameliranega lesa imajo razpon od 23 metrov do 64 metrov.

Krajših od 30 metrov je 10 (14 %) tričlenkastih ločnih mostov. Največ mostov, 24 (32 %), ima razpon od 30 do 49 metrov; od tega je dvanajst mostov betonskih in devet iz lepljenega lesa. Razpon med 50 in 69 metri ima 18 (24 %) mostov, med njimi je številčno največ mostov iz betona in kamna, kar trinajst. Devet (12 %) mostov ima razpon od 70 do 89 metrov, od tega so štiri iz jekla, pet je betonskih, lesenega ni nobenega. Daljših od 90 metrov je 13 (18 %) mostov, od tega je osem jeklenih in šest betonskih, lesenega ni. V tej kategoriji je zajetih tudi pet tričlenkastih ločnih mostov z razponom, ki je daljši od 110



Slika 4 • Število mostov glede na razpon in material.

metrov: štirje mostovi so jekleni, le eden je betonski.

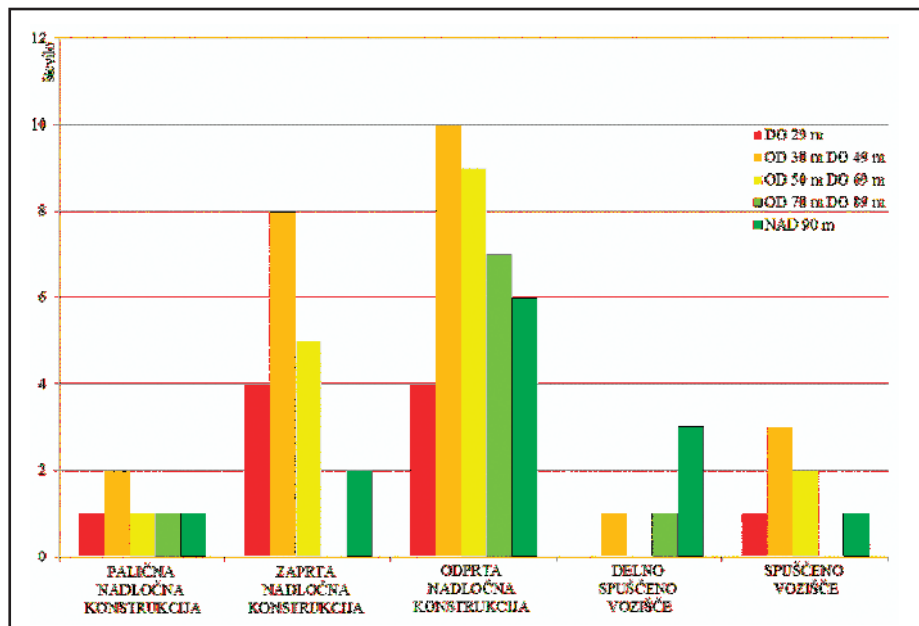
5.2 Pogostost mostov v odvisnosti od položaja voziščne površine in razpona

Slika 5 prikazuje 73 tričlenkastih ločnih mostov, analiziranih glede položaj voziščne površine in na razpon. Prikazanih je pet kategorij položaja voziščne površine glede na ločno mostno konstrukcijo: nadločna konstrukcija (ki je razdeljena na palično nadločno konstrukcijo, na zaprto nadločno konstrukcijo in na odprto nadločno konstrukcijo), delno spuščeno vozišče in spuščeno vozišče. Tudi razpon je razdeljen na pet skupin: do 29 metrov, sledijo tri kategorije po 20 metrov in nad 90 metrov.

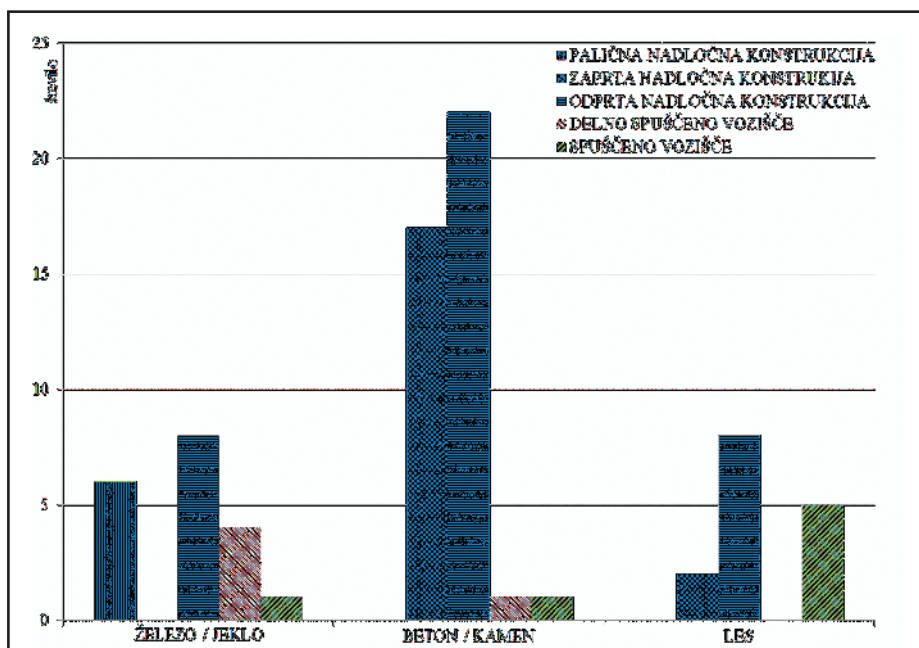
S slike ugotovimo, da v vseh razponih številčno prevladujejo mostovi z voziščno površino z odprto nadločno konstrukcijo, skupaj jih je 36. 19 je mostov z zaprto nadločno konstrukcijo, a med njimi ni nobenega, ki bi imel razpon med 70 in 89 metri. Le šest je mostov s palično nadločno konstrukcijo, a analizirani primeri zastopajo vse razpone. Pomembno je poudariti, da je med analiziranimi primeri le pet mostov z delno spuščanim voziščem, a od tega so kar trije v območju največjega razpona, torej več kot 90 metrov. Med obravnavanimi primeri je sedem spuščanih vozišč, med njimi ni nobenega z razponom med 70 in 89 metri. Za natančnejšo analizo bi bilo treba pridobiti večje število tričlenkastih mostov z delno spuščanim in spuščanim voziščem.

Primerjava pogostosti mostov v odvisnosti položaja voziščne površine od razpona je bila narejena na 73 tričlenkastih ločnih mostovih. Krajših od 30 metrov je 10 (14 %) tričlenkastih ločnih mostov. Največ mostov, 24 (33 %), ima razpon od 30 do 49 metrov; od tega je 20 mostov z nadločno konstrukcijo (skupaj so štete palična, zaprta in odprta nadločna konstrukcija). Razpon med 50 in 69 metri ima 17 (23 %) mostov, med njimi je 15 mostov z nadločno konstrukcijo, mostu z delno spuščanim voziščem v tej kategoriji ni. Devet (12 %) mostov ima razpon od 70 do 89 metrov, od tega jih je osem z nadločno konstrukcijo, mostu s spuščanim voziščem ni med njimi. Daljših od 90 metrov je 13 (18 %) mostov, od tega je devet mostov z voziščem nad ločno konstrukcijo, trije mostovi z delno spuščanim voziščem in en most s popolnoma spuščanim voziščem.

Skupno je mostov, ki imajo nadločno konstrukcijo, kar 61 (83 %), od tega ima 6 (8 %) mostov palično nadločno konstrukcijo, 19 (26 %) mostov zaprto nadločno konstrukcijo in 36



Slika 5 • Število mostov glede na razpon in material.



Slika 6 • Število mostov glede na material in položaj voziščne površine.

(49 %) odprto nadločno konstrukcijo. Mostov z delno spuščanim voziščem je 5 (7 %), mostov s popolnoma spuščanim voziščem pa 7 (10 %).

5.3 Pogostost mostov v odvisnosti od materiala in položaja voziščne površine

Na sliki 6 je predstavljenih 75 tričlenkastih ločnih mostov, analiziranih glede na material in položaj voziščne ploskve. Prikazani so trije materiali, železo oziroma jeklo, beton oziroma kamen in les, ter več možnosti

položaja voziščne površine. Tudi tu je položaj voziščne površine razdeljen na tri skupine: nadločna konstrukcija s tremi podskupinami, delno spuščeno vozišče in spuščeno vozišče. Zaznamo lahko, da je odprta nadločna konstrukcija prevladujoča v vseh treh materialih, skupaj je več kot polovica takšnih mostov. Palično nadločno konstrukcijo so izdelovali izključno iz železa oziroma jekla. Samo odprto nadločno konstrukcijo so naredili v vseh treh materialih. Med analiziranimi primeri ni delno spuščene vozišča, narejenega v lesu.

Številčno je največ tričlenkastih ločnih mostov iz betona oziroma kamna, skupaj 41.

Primerjava števila mostov glede na material in položaj voziščne površine je bila narejena na 75 tričlenkastih ločnih mostovih, od tega jih ima 63 (84 %) vozišče nad ločno konstrukcijo, 5 (7 %) delno spuščeno vozišče in 7 (9 %)

popolnoma spuščeno vozišče. Če pogledamo še natančneje, vidimo, da ima 6 (8 %) mostov palično nadločno konstrukcijo, 19 (25 %) zaprto nadločno konstrukcijo in 38 (51 %) odprto nadločno konstrukcijo.

Mostove s palično nadločno konstrukcijo so gradili le iz železa oziroma jekla, zaprto

nadločno konstrukcijo pa le iz betona oziroma kamna in lesa. Le dva primera, ko je voziščna površina nad odprto ločno konstrukcijo, in če je vozišče spuščeno, so zgradili v vseh treh materialih. Med analiziranimi primeri ni delno spuščena vozišča, ki bi ga naredili v lesu.

6 • ZAKLJUČEK

Tričlenkasta ločna konstrukcija pravimo konstrukciji, ki je sestavljena iz dveh lokov in treh členkov. Dva členska sta običajno ob obeh podporah konstrukcije, tretji članek je v temenu konstrukcije in povezuje oba loka. Vsi trije členki skrbijo za gibkost konstrukcije, ki je pomembna zaradi manjše občutljivosti za morebitne pomike. Pomiki nastanejo ob temperaturnih nihanjih konstrukcije (raztezki in skrčki konstrukcije), zaradi slabe nosilnosti tal ali erozijskega izpodjedanja, zaradi slabo izdelanih temeljev, krajnih opornikov ali vmesnih podpornikov in ob potresih.

Razvoj tričlenkaste konstrukcije se je začel s teoretičnimi izhodišči, ki jih je postavil nemški inženir Claus Köpcke leta 1861 in nadaljeval s prvimi zgrajenimi tričlenkastimi ločnimi mostovi leta 1865, narejenimi kot paličje iz kovanega železa po načrtih Johanna Wilhelma Schwedlerja v Berlinu (Unterspre-Brücke). Le dve leti pozneje v Ljubljani postavijo litoželezni most Hrdeckega z razponom 30 metrov. Izmed vseh analiziranih tričlenkastih ločnih mostov je torej najstarejši še ohranjeni tričlenkasti most prav Hrdeckega most v Ljubljani. Oktobra 2017 bo minilo 150 let, odkar so ga prvič postavili na mestu današnjega Čevljarskega mostu, leta 1932 so ga prestavili prvič, na sedanji lokaciji je od leta 2011.

Sledila je gradnja tričlenkastih ločnih mostov, narejenih kot paličje iz litiga železa ali

različnih jeklenih zlitin. Od prvega, najkrajšega razpona 17 metrov (Unterspre-Brücke) so inženirji še pred prelomom v 20. stoletje presegli mejo 100 metrov razpona z mostom Panther Hollow Bridge (109,8 metra).

Okoli leta 1900 so v mostogradnji začeli uporabljati tudi nove masivne materiale: leta 1893 so zgradili prvi tričlenkasti ločni most iz nearmiranega betona (Donaubrücke) in hkrati preizkušali tri različne patentne sisteme armiranja betona. Po patentu armiranja s sistemom Melan je bil zgrajen Schwimmschulbrücke (1898), po patentu Hennebique Pont Camille-de-Hogues (1900) in po patentu Maillet Zuoz Brücke (1901). Vsi so imeli razpone med 35 in 50 metri in nadločno konstrukcijo zaprtega ali odprtega tipa.

V Parizu so leta 1904 zgradili prvi tričlenkasti ločni most z delno spuščeno voziščem, jekleni Viaduc d'Austerlitz, ki je s celotno dolžino razpona med krajnima členkoma 120 metrov (in 140 metrov med podporama) postavil takratni rekord v razponu tričlenkastih ločnih mostov. Do danes ga je presegel le leta 1960 zgrajeni jekleni most Puente Sal-sipedes s 130 metri razpona loka.

Med analiziranimi tričlenkastimi ločnimi mostovi je bilo do druge svetovne vojne zgrajenih več kot 50 mostov, a med vojno so jih porušili kar deset, tudi najstarejšega izmed analiziranih mostov s popolnoma

spuščeno voziščem, Pont de Persan-Beaumont (porušen l. 1940). Gradnja tričlenkastih ločnih mostov se je po drugi svetovni vojni močno zmanjšala. Most Pont de la Grande Côte (1960) z razponom 101 meter je prvi primer gradnje iz prednapetega armiranega betona. Naslednji mejnik je Keystone Wye Interchange (1968), prvi tričlenkasti ločni most iz lameliranega lepljenega lesa. Najdaljši izmed mostov iz lameliranega lepljenega lesa je tričlenkasti most s spuščeno voziščem, Ponte Bonatti (2001), ki z 72 metri razpona leži v krajinskem parku pri mestu Barberino del Mugello v Toskani. Analiza kaže na močno prevlado tričlenkastih ločnih mostov iz lameliranega lepljenega lesa v zadnjih tridesetih letih, njihov povprečni razpon je 38 metrov. Vsi mostovi iz lameliranega lepljenega lesa so prefabricirani in prepeljani na lokacijo gradnje, zato so omejeni v svojem razponu. Njihova velika prednost je, da je vsak ločni razpon sestavljen iz dveh delov, ki jih s členkom sestavijo šele na gradbišču samem. Ti mostovi imajo tri različne podtipove povezave voziščne ploskve s tričlenkasto ločno konstrukcijo. Prvi podtip je povezava nadločne konstrukcije in voziščne ploskve s stebri, drugi podtip je zaprta povezava konstrukcije z voziščem, tretji podtip je popolnoma spuščeno vozišče.

Analiza 76 tričlenkastih ločnih mostov glede na tri kriterije pokaže, da je najbolj pogost tričlenkasti ločni armiranobetonski most z odprto nadločno voziščno konstrukcijo in z razponom 60,4 metra.

7 • LITERATURA

Dupuit, J., *Traité de l'équilibre des voutes et de la constructions des ponts en maçonnerie*, Paris, Dunod, 1870.

Köpcke, C., Über die Konstruktion einer steifen Hängebrücke, *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins Hannover* 7, 231–261, 1861.

Kuhta, M., Brunčič, A., Člen(ski) in členk(ast)i, *Gradbeni vestnik*, 64, 10, 239–241, 2015.

Pržulj, M., *Mostovi: zasnova, projektiranje, konstruiranje, zanesljivost, gradnja, gospodarjenje, obnova*. Beletrina, Ljubljana, 2015.

Slivnik, L., Three-hinged structures in a historical perspective. V: Cruz, P.J.S. (ur.), *Structures and architecture: concepts, applications and challenges*, London, CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema book, 1088–1095, 2013.

Slivnik, L., History and classification of three-hinged arch bridges. V: Biliszczuk, J. (ur.), *ARCH 2016: arch bridges in culture*, 8th International Conference on Arch Bridges, Wrocław, Poland, October 5-7 2016, Wrocław, DWE, 187–198, 2016.

Structurae.net, <https://structurae.net/structures/bridges-and-viaducts/three-hinged-arch-bridges/list>, pridobljeno 15. 1. 2017.