

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Pasarič, A., 2016. Jekleni železniški mostovi v Sloveniji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Zgonc, B., somentorica Šemrov, D.): 71 str.

Datum arhiviranja: 23-08-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Pasarič, A., 2016. Jekleni železniški mostovi v Sloveniji. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Zgonc, B., co-supervisor Šemrov, D.): 71 pp.

Archiving Date: 23-08-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
PROMETNA SMER**

Kandidat:

ALJAŽ PASARIČ

JEKLENI ŽELEZNIŠKI MOSTOVI V SLOVENIJI

Diplomska naloga št.: 3482/PS

STEEL RAILWAY BRIDGES IN SLOVENIA

Graduation thesis No.: 3482/PS

Mentor:

prof. dr. Bogdan Zgonc

Somentorica:

asist. dr. Darja Šemrov

Ljubljana, 18. 08. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Aljaž Pasarič, vpisna številka 26105917, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom »JEKLENI ŽELEZNIŠKI MOSTOVI V SLOVENIJI«

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 18. avgust 2016

Aljaž Pasarič

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.21:625.1/.5(043.2)
- Avtor:** Aljaž Pasarič
- Mentor:** prof. dr. Bogdan Zgonc, univ. dipl. inž. grad.
- Somentor:** asist. dr. Darja Šemrov, univ. dipl. inž. grad.
- Naslov:** Jekleni železniški mostovi v Sloveniji
- Tip dokumenta:** Dipl. nal.–UNI
- Obseg in oprema:** 71 str., 4 pregl., 63 sl.
- Ključne besede:** jekleni most, spodnji ustroj, korozija, antikorozija, utrujanje, dotrajanost, vpliv okolja, konstrukcijski detajli

Povzetek:

V začetku diplomske naloge so opisani razvoj mostov, začetki jeklenih mostov v Sloveniji, sledi prikaz odstotka jeklenih železniških mostov v Sloveniji, razvrščen glede na tip konstrukcije, statični sistem in vrsto križanja.

V drugem delu naloge so predstavljene zahteve pravilnika o spodnjem ustroju za premostitvene objekte, posamezni elementi (tir, svetli profil, geometrija tlorisa, medtirna razdalja, pragovi, tirni stik, kretnice, izolirni stik, obremenilni preizkus in oznake na objektih) so opisani podrobneje.

Tretji del vsebuje povzetek Evrokoda 3, projektiranja jeklenih konstrukcij, obtežb in obtežnih primerov ter pomen konstrukcijskih detajlov na življenjsko dobo konstrukcije.

Sledi problematika jeklenih mostov – korozija, opisi korozije, vrste korozije, priprave jeklenih površin za antikorozijsko zaščito in pristopi v antikoroziji.

Večina jeklenih železniških mostov v Sloveniji je starih več kot 80 let in so s stališča stopnje korozije zelo slabi. Vzrok za to je tudi neredno vzdrževanje antikorozijske zaščite mostov oz. zanemarjanje tega področja vzdrževanja. Zato so v zadnjem delu naloge predstavljeni tudi vpliv korozije na utrujanje, izgube debelin nosilcev zaradi korozije in metode določanja izgub materiala zaradi korozije. Na podlagi dejstev, da je večina mostov že dosegla svojo projektirano življenjsko dobo, ter da so bili zelo slabo vzdrževani, lahko zaključimo, da so mostovi že dotrajani in potrebni resne obnove.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.21:625.1/.5(043.2)
Author:	Aljaž Pasarič
Supervisor:	Prof. Bogdan Zgonc, Ph. D.
Co-supervisor:	Darja Šemrov, Ph.D.
Title:	Steel railway bridges in Slovenia
Document type:	Graduation thesis – University studies
Scope and tools:	71 p., 4 tab., 63 fig.
Keywords:	steel bridge, substructure, corrosion, anti-corrosion, fatigue, wear out, impact of the environment, structural details

Abstract:

The introductory part of the thesis describes the development of bridges and the emergence of steel bridges in Slovenia. It discusses the proportion of steel bridges in Slovenia, their type of construction, static system and type of intersection.

The second part of the thesis discusses the requirements given in the rules on the substructure of bridging structures and provides a detailed overview of individual elements (track, clear profile, ground plan geometry, distance between track centres, sleepers, jointed track, switch, insulation joint, load testing, signs on constructions).

As for the third part, it contains a summary of Eurocode 3, the process of designing a steel construction as well as loads and load cases. It also points to the significance of structural details for the construction's life span.

Moreover, it touches on the issues of steel bridges – corrosion, descriptions and types of corrosion, preparation of steel surfaces for anti-corrosion protection, and approaches to tackling corrosion.

The majority of steel railway bridges in Slovenia are over 80 years old and in a very bad condition in terms of the level of corrosion. The situation is a result of infrequent maintenance of the anti-corrosion protection and even neglect of this aspect of maintenance. To this end, the final part of the thesis discusses how corrosion causes fatigue and decreases pylon thickness, and outlines the methods for determining the loss of material due to corrosion.

Considering the fact that the majority of the bridges have already exceeded their envisaged life span and that their maintenance was rather poor, it is clear that they are worn out and in need of thorough renovation.

ZAHVALA

Ob tej priložnosti bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Bogdanu Zgoncu in somentorici asist. dr. Darji Šemrov za vso pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Za vse strokovne nasvete s področja antikorozijske bi se rad zahvalil dr. Saši Skaletu.

Hkrati pa gre ta zahvala tudi mojim staršem, Katji, ter vsem ostalim prijateljem in sošolcem, ki so mi v času študija stali ob strani in me podpirali.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	X
KRATICE	XI
1 UVOD	1
1.1 Kratka zgodovina železniških mostov v Sloveniji	2
1.2 Klasifikacija mostov.....	4
1.2.1 Prednosti in slabosti jeklenih mostov	4
1.3 Železniški jekleni mostovi v Sloveniji	5
2 PRAVILNIK O SPODNJEM USTROJU IN NJEGOVE ZAHTEVE ZA PREMOSTITVENE OBJEKTE	8
2.1 Zahteve in določila posameznih elementov mostu	9
2.1.1 Tiri na mostovih.....	10
2.1.2 Svetli profil	10
2.1.3 Svetla višina objektov pod mostom	12
2.1.4 Medtirna razdalja na mostovih.....	12
2.1.5 Pragovi	12
2.1.6 Tirni stik.....	12
2.1.7 Kretnice.....	13
2.1.8 Izolirni stik	13
2.1.9 Zaščitni ukrepi pred nevarnostjo dotika vodov, ki so pod napetostjo.....	13
2.1.10 Obremenilni preizkus.....	13
2.1.11 Oznake na objektih	15
3 OSNOVE PROJEKTIRANJA JEKLENIH KONSTRUKCIJ.....	16
3.1 Evrokod 3.....	16
3.2 Projektiranje jeklenih železniških mostov.....	17
3.2.1 Zahteve varnosti in stabilnosti	17
3.2.2 Obtežbe, ki delujejo na železniški most.....	19
3.2.3 Kontrola vibracij in deformacij za železniške mostove	22
3.2.4 Ekonomičnost.....	23
3.2.5 Trajnost	23

3.2.6	Ekologija	23
3.2.7	Konstruktivski detajli	23
4	VZDRŽEVANJE PREMOSTITVENIH OBJEKTOV	29
4.1	Problematika jeklenih mostov - korozija.....	30
4.1.1	Korozijska izpostavljenost	35
4.2	Obvladovanje korozije – antikorozijska zaščita	38
4.2.1	Zgodovinski pregled sistemov zaščite za jeklene mostne konstrukcije	39
4.2.2	Tehnološki postopki izvedbe antikorozijske zaščite (AKZ)	40
4.2.3	Priprava jeklenih površin	40
4.2.4	Priprava materiala za nanašanje	44
4.2.5	Načini nanašanja premaznih materialov	44
4.2.6	Medslojni intervali in končno utrjevanje	45
4.2.7	Omejitve, povezane z izvajanjem antikorozijske zaščite	45
4.2.8	Sistemi antikorozijske zaščite	45
4.2.9	Kontrola kvalitete.....	46
5	STANJE JEKLENIH ŽELEZNIŠKIH MOSTOV V SLOVENIJI.....	48
5.1	Analiza stanja in rekonstrukcij jeklenih železniških mostov v Sloveniji.....	49
5.1.1	Analiza starosti.....	49
5.1.2	Analiza rekonstrukcije	49
5.2	Korozijsko utrujanje	52
5.2.1	Predikcija vpliva korozije na utrujanje	54
5.2.2	Ocena propadanja materiala po standardu	57
5.2.3	Meritev propada materiala na terenu	58
5.2.4	Korozija v konstrukcijskih detajlih	59
5.2.5	Korozija veznih sredstev	62
5.2.6	Vpliv prometa na dotrajanost.....	64
5.3	Ekološki problem stare antikorozijske zaščite	64
6	ZAKLJUČEK	67
VIRI		68

KAZALO SLIK

Slika 1: Gradnja mostu v Sydneyju leta 1925	1
Slika 2: Predalčni nosilec Howe.....	3
Slika 3: Najdaljši jekleni železniški most v Sloveniji	5
Slika 4: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na tip konstrukcije	6
Slika 5: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na statični sistem.....	6
Slika 6: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na križanje.....	7
Slika 7: Prikaz svetle razpetine mostu.....	8
Slika 8: Standardne tirnice	10
Slika 9: Normalni svetli profil za $R \geq 250$ m	11
Slika 10: Minimalni svetli profil za $R \geq 250$ m.....	11
Slika 11: Svetli profil za novogradnje GC	11
Slika 12: Primer obremenilnega preizkusa mostu.....	14
Slika 13: Obtežni primer 71	20
Slika 14: Obtežna primera SW/0 in SW/2	20
Slika 15: Ekscentričnost vertikalne obtežbe.....	21
Slika 16: Primeri spajanja jeklenih konstrukcij.....	24
Slika 17: Problematika dostopnosti dvojnih profilov.....	25
Slika 18: Zastajanje vode in umazanije, posledično sledi propad konstrukcije.	25
Slika 19: Preprečitev zadrževanja vode in umazanije.....	26
Slika 20: Način obdelave zvarov	26
Slika 21: Način obdelave robov	27
Slika 22: Primer obdelave spoja.....	27
Slika 23: Minimalni razmiki za potrebe vzdrževanja jeklenih konstrukcij.....	28
Slika 24: Pregled stanja jeklenega železniškega mostu.	29
Slika 25: Primer obnove železniškega mostu.....	30
Slika 26: Princip mokre korozije.....	31
Slika 27: Splošna korozija	32
Slika 28: Korozija v razpoki.....	33
Slika 29: Pojav jamičaste korozije	33
Slika 30: Anaerobna mikrobiološka korozija.....	34
Slika 31: Galvanska korozija.....	34
Slika 32: Vpliv okolja na stopnjo korozije.....	35
Slika 33: Stopnja korozije v odvisnosti od vlažnosti	36
Slika 34: Propad konstrukcije zaradi korozije v odvisnosti od časa	38
Slika 35: Stroški vzdrževanja konstrukcije v odvisnosti od stopnje korozije	39

Slika 36: Dejavniki antikorozijske zaščite	40
Slika 37: Odvisnost načina priprave površine od trajnosti antikorozijske zaščite.	42
Slika 38: Stanje dotrajane mostne konstrukcije.	48
Slika 39: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 1.	50
Slika 40: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 2.	50
Slika 41: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 3.	51
Slika 42: Pojav korozije v konstrukcijskem detajlu, zakrit z odpadlo barvo in umazanijo.	52
Slika 43: Načrtost profilov v konstrukcijskem detajlu 1.	53
Slika 44: Načrtost profilov v konstrukcijskem detajlu 2.	53
Slika 45: Izguba debeline profilov zaradi korozije v letih in različnih izpostavljenostih	55
Slika 46: Najbolj pogosta mesta korozije na nosilcih	55
Slika 47: Korozija na ravni površini nosilca, v zavetni legi.....	56
Slika 48: Izguba površine nosilca za posamezne izpostave v odvisnosti od časa.....	56
Slika 49: Izguba vztrajnostnega momenta za posamezne izpostave v odvisnosti od časa.....	57
Slika 50: Izguba vztrajnostnega momenta za posamezne izpostave v odvisnosti od časa.....	57
Slika 51: Merjenje izgube debeline profila na ravni zračni površini z elcometrom.....	58
Slika 52: Propad konstrukcije v vozlišču.	59
Slika 53: Konstrukcijski detajl dvojnih profilov, v katerih se zadržujeta voda in umazanija in ima za posledico nastanek špranjske korozije.....	60
Slika 54: Stanjšanje profila.	61
Slika 55: Pojav globinske korozije na nosilcih.	61
Slika 56: Razpad kovic zaradi povečane vsebnosti ogljika.....	62
Slika 57: Razpad kovice na mostni konstrukciji.	63
Slika 58: Korozija v stiku oz. razpoki skupaj s propadom kovic.....	63
Slika 59: Rast blagovnega prevoza na železniških progah v Sloveniji	64
Slika 60: Luščenje barve z mostne konstrukcije.	64
Slika 61: Vzorec propadle antikorozijske zaščite na mostni konstrukciji.....	65
Slika 62: Shematski prikaz števila slojev barve z vzorca na mostni konstrukciji.....	65
Slika 63: Shematski prikaz slojev barve in njihovih debelin z vzorca na mostni konstrukciji.....	66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Standardi za kontrolo vibracij in deformacij za železniške mostove	22
Preglednica 2: Minimalni razmiki za potrebe vzdrževanja jeklenih konstrukcij	28
Preglednica 3: Izguba materiala v različnih atmosferskih izpostavah.	37
Preglednica 4: Faktorja Ca in Cb v odvisnosti od korozijske izpostavljenosti za konstrukcijsko jeklo.	54

KRATICE

AKZ	Antikorozijska zaščita
NZT	Neprekinjeno zvarjen tir
SIST	Slovenski standard, ki ga je sprejel Slovenski inštitut za standardizacijo
SIST EN	Privzeti evropski standard

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Most je inženirski objekt za premagovanje naravnih in umetnih ovir. Namen mostov je omogočiti prehod ljudem in prevoznim sredstvom. Potreba za mostovi se pojavlja že od pradavnine, danes pa na globalni ravni predstavljajo pomembno vlogo gradbene infrastrukture.

Gradnja mostov je bila od nekdaj pa vse do danes področje gradbeništva. Razvoj mostov ni potekal brez zapletov, saj se je veliko konstrukcij porušilo ter veliko delavcev poškodovalo. Vsekakor pa so s tovrstnimi nesrečami in časom prišle tudi še kako potrebne izkušnje in spoznanje, da sta projektiranje in grajenje tovrstnih objektov zelo zahtevni področji.

Na začetku so se mostovi gradili za potrebe prehodov ljudi čez ovire, kasneje pa so se z razvojem železnice in prometa pričeli graditi daljši in zahtevnejši mostovi; prav tako se je skrajšal tudi čas gradnje. Sodobni pristopi, nove metode grajenja mostov in gospodarski napredek so omogočili, da so nekdanj neizvedljivi razponi in dimenzije mostov postali stvarnost (Radnić, 2004; Vukov, 1998).



Slika 1: Gradnja mostu v Sydneyju leta 1925 (Sydney living museum, 2016).

Mostovi morajo, kakor tudi vsi ostali gradbeni objekti, izpolnjevati pogoje funkcionalnosti, varnosti, trajnosti, ekonomičnosti, estetike in ekologije. Za uspešno reševanje tovrstnih zahtev je treba poznavanje širšega strokovnega področja, zato je pri večjih projektih skoraj nujno vključiti večje število strokovnjakov z različnih področij, saj so si zahteve nekaterih področji nasprotujoče in jih je možno rešiti le tako.

Problematika projektiranja in gradnje nosilnih konstrukcij je sestavni del gradnje mostov. Zato sta za zanesljivo, trajno in ekonomično gradnjo nujni poznavanje različnih področij in njihovo usklajevanje. Nekoč zelo dolgotrajen, zahteven in prevladujoč del projekta, tj. izračun nosilne konstrukcije, je danes s pomočjo napredka pri računskih metodah projektiranja nosilnih konstrukcij postal skoraj rutina. Z uporabo metode končnih elementov, numeričnimi metodami in zmogljivimi računalniki lahko zanesljive rezultate, podkrepjene z grafičnimi izrisi, dobimo v nepredstavljivo krajšem času kot nekoč. Čeprav je glavna naloga projektantov projektiranje konstrukcije, morajo poleg tega za optimalno rešitev poznati tudi mnogo drugih področij. Poznati morajo pravila in zahteve za gradnjo nosilnih konstrukcij, njenih posameznih sklopov in postopke izdelave konstrukcije.

Načelo ekonomičnosti je nedvomno ena izmed glavnih zahtev pri gradnji mostu, vendar ekonomičnosti nikakor ne moremo enačiti z najnižjo ceno. Nemalokrat se je že izkazalo, da najcenejše variante in rešitve za mostove, ki se uporabljajo, rezultirajo v velikih stroških vzdrževanja, kar pa vsekakor ni ekonomično. Stroški vzdrževanja so sestavni del cene mostu, zato se mora pri projektiranju pozornost nameniti tudi njihovi trajnosti, še posebej, kadar so mostovi izpostavljeni agresivnemu okolju in velikim obremenitvam.

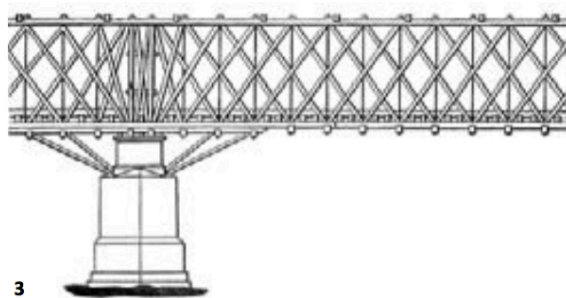
Z ekonomičnostjo povezujemo tudi hitrost gradnje mostu. Pod pojmom ekonomičnosti in hitrosti se nemalokrat skrivajo različne rešitve, za katere se kasneje izkaže, da le niso bile tako ekonomične in niti ne tako hitro končane, kot je bilo to na začetku predvideno. Tovrstne posledice se nato odražajo kot konstrukcije, ki delno ali v celoti ne izpolnjujejo vseh predpisanih zahtev funkcionalnosti, varnosti, trajnosti, ekonomičnosti, estetike in ekologije. Torej hitrost gradnje mostu ne sme vplivati na končno kvaliteto mostu, saj končanje del na rok in njihova slaba izvedba ne koristita nikomur.

Mostovi morajo biti, kot unikatne zgradbe, tudi primerno oblikovani. Pod tem pojmom se skrivajo različni dejavniki, ki vplivajo na končno vrednost in videz mostu. Nemalokrat so ravno oblikovne zahteve prevladujoče, še posebej pri mostovih v urbanem okolju. Oblikovna vrednost mostu je najprej odvisna od projektanta in njegovega smisla za estetiko ter arhitekturo, investitorjevih želja in znanja ter sposobnosti izvajalca del (Radnić, 2004; Vukov, 1998).

1.1 Kratka zgodovina železniških mostov v Sloveniji

S pojavom in uporabo železnic so se pričeli graditi in razvijati tudi železniški mostovi. Prvotni železniški mostovi na Slovenskem so bili zgrajeni iz kamna in opeke, pri daljših razpetinah pa je bil uporabljen tudi les. Zaradi lažje dostopnosti in cene lesa ter nepoznavanja obnašanja jeklenih konstrukcij so se jeklu na začetku izogibali. Inženir Long je leta 1839 patentiral predalčno leseno

konstrukcijo, ki je bila spodaj vzdolžno povezana, na vrhu pa so jo sestavljale poševne “deske oz. late” (Bogić, 2012). Za spoje je uporabil lesene kline, tako da je dobil kompakten okvir, boka mostu pa sta bila med seboj povezana s križnimi lesenimi vezmi. Tako so premostili razdalje do 45 metrov. Slabost takšne konstrukcije je, da so se leseni vezni elementi sčasoma zaradi tresljajev, ki so jih povzročali vlaki, razrahljali, kar je vplivalo na stabilnost in uporabnost mostu. Izboljšave konstrukcije je z železnimi palicami z navoji in maticami, ki so nadomestili vertikalne opornike, uvedel Howe (Slika 2). Z možnostjo privijanja matic je tako Howe ustvaril nekakšen prednapeti nosilec, s katerim je bilo možno premoščati večje razpone in prenašati večje obremenitve.



Slika 2: Predalčni nosilec Howe (Pottgiesser, 1985).

Prve resnejše zahteve po izgradnji mostov v Sloveniji so se pojavile pri gradnji t. i. južne železnice, ki je povezovala pristanišče v Trstu z Dunajem. Glavni projektant južne železnice, Carl von Ghega, je “sistem Howe” uporabil za večje razpetine in tako v Mariboru, kjer je Drava široka približno 190 m, zgradil trodelni most iz macesnovega lesa. Most so po dokončanju železnice do Celovca zamenjali s širšim jeklenim mostom (Bogić, 2012).

Med prve večje in resnejše mostove na Slovenskem lahko štejemo Borovniški viadukt, ki je nekaj časa sodil tudi med največje zidane železniške viadukte na svetu. Z izgradnjo Borovniškega viadukta se je dolžina trase južne železnice zelo skrajšala. Danes na Borovniški viadukt spominja le še spomeniško zaščiten steber, saj je bil viadukt med drugo svetovno vojno uničen.

Slovenija glede na velikost, poseljenost in razgibanost ni imela pogojev, da bi na njenem ozemlju postavili resnejše jeklene mostove. Lahko pa se pohvali z dejstvom, da je bil na njenih tleh postavljen eden prvih mostov s členki na svetu. Šlo je za litoželezni most prek Ljubljance, ki ga je projektiral inženir Johan Herman in tako tudi načrtoval smernice za nadaljnjo gradnjo mostov (Humar, 2012).

Prvi jekleni železniški mostovi so se na slovenskem pričeli številneje graditi konec 19. in na začetku 20. stoletja (most Ortnek, most Straža, most Kočevje, most Drava, most čez Savo Bohinjko ...), ki so

jim v različnih časovnih razmikih sledili še drugi. Zadnji jekleni mostovi so bili zgrajeni v 90. letih prejšnjega stoletja (most Stranje, most Rogatec, most Koper ...) (Po kreativni poti, 2015).

1.2 Klasifikacija mostov

Mostove lahko klasificiramo na različne načine, vendar se v večini primerov delijo na dva osnovna kriterija: vrste mostov in tipe mostov (Radnić in sod., 2004).

Vrste mostov lahko klasificiramo na več načinov, in sicer glede na namen, križanje, trajnost ... in jih kot takšne tudi razvrstimo v skupine. Mostovi glede na *namen* se delijo na cestne, železniške, mostove za pešce, mostove za kombinirani promet, akvadukte ... Mostove glede na vrste *križanja* delimo na križanja z vodotokom, na podvoze, za premoščanje inundacij in njihovih kombinacij. Pri *trajnosti* pa delimo mostove v grobem na začasne in trajne. Začasni mostovi se navadno gradijo oz. uporabijo pri nadomestnih gradnjah, sanacijah in poružitvah stalnih mostov (Radnić in sod., 2004).

Tipe mostov lahko klasificiramo glede na tip konstrukcije, statični sistem, vrsto uporabljenega materiala ... Glede na *tipe konstrukcij* jih delimo na branasti nosilec, painer nosilec, palična konstrukcija, palični nosilec, polnostenski nosilec, škatlasti nosilec ... Glede na *statične sisteme* jih delimo na prostoležeči nosilec, kontinuirani nosilec, prostoležeča konstrukcija, brana, prostoležeča plošča, prostoležeča sovprežna plošča, prostoležeči sovprežni nosilec. Glede na *vrsto uporabljenega materiala* pa jih delimo na: lesene, masivne (naravni kamen, opeka, nearmirani beton, klasičen armirani beton), kovinske (litoželezne, jeklene, aluminijaste) ter kombinirane (Radnić in sod., 2004; Po kreativni poti, 2015).

1.2.1 Prednosti in slabosti jeklenih mostov

Jeklene konstrukcije, kot material, za izgradnjo mostov so v uporabi že vrsto let. Glavni prednosti konstrukcijskega jekla za gradnjo mostov v primerjavi z drugimi gradbenimi materiali sta njegova nosilnost in duktilnost, zato ga inženirji radi uporabljajo. Jekleni mostovi prenašajo namreč večje obremenitve na daljši razdalji, saj imajo pri enakih razponih v primerjavi z betonom manjšo lastno težo, posledično pa za to potrebujemo tudi manjše temeljenje. Velika prednost jeklenih mostov pred betonskimi je duktilnost, kar se še posebej pozna pri premagovanju seizmičnih in nezgodnih obremenitev. Veliko komponent jeklenega mostu se lahko izdelava v delavnici in sestavi na gradbišču, kar tudi vpliva na hitrost gradnje. Povezovanje posameznih elementov med seboj se lahko izvede na različne načine: zvari, zakovice, vijaki, prednapeti vijaki in čepi. V urbanih okoljih, kjer ni veliko manevrskega prostora in časa za gradnjo, se tako lahko jekleni most postavi z minimalnimi vplivi na skupnost. Prav tako je življenjska doba jeklenih mostov bistveno daljša od betonskih. Jeklene konstrukcije so zaradi tanjših, vitkejših in oblikam prilagodljivih jeklenih profilov tudi atraktivnejše in

estetsko bolj privlačne. Dobra lastnost jekla je tudi možnost recikliranja, ki je v današnjem času, ko stremimo k temu, da imamo čim manj odpadnih gradbenih materialov, velikega pomena. Vse naštetu pogosto rezultira v nižjih stroških gradnje in vzdrževanja jeklenih mostov (Pipinato in sod., 2016).

Seveda pa ima tudi jeklo slabosti in glavna izmed njih, korozija, je opisana v nadaljevanju naloge.

1.3 Železniški jekleni mostovi v Sloveniji

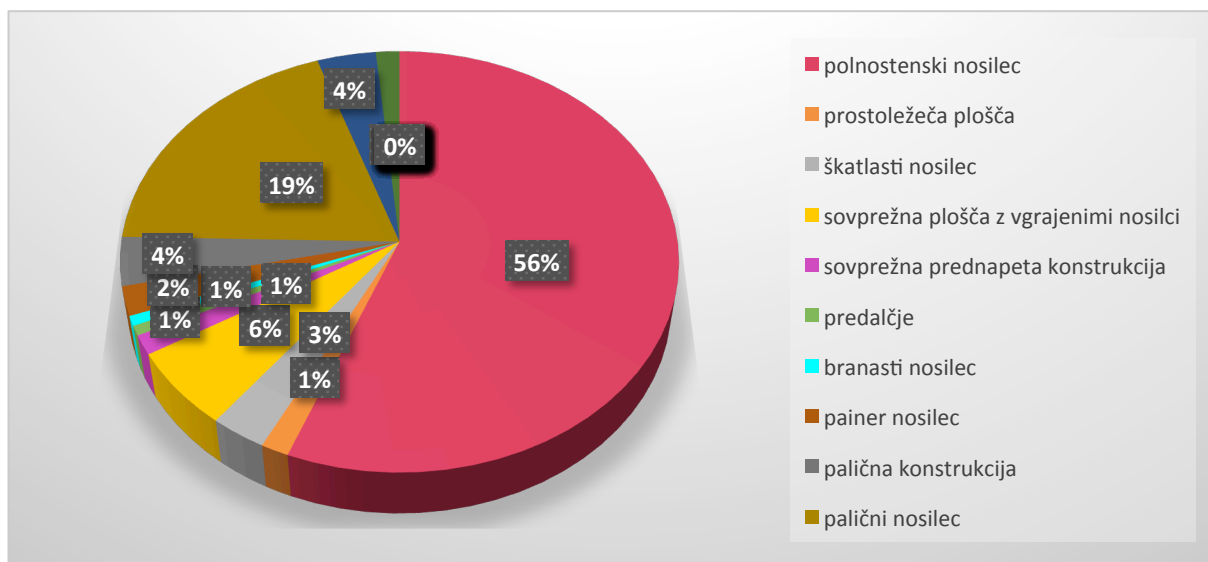
Število jeklenih železniških mostov v Sloveniji je 134, njihova povprečna dolžina pa znaša 37,14 m. Najkrajši jekleni most v Sloveniji je most čez cesto v Šoštanju, ki je na regionalni progi Šmartno ob Paki–Šoštanj in v dolžino meri le 5,5 m (Po kreativni poti, 2015).

Najdaljši slovenski jekleni železniški most je most čez Idrijco, ki je na regionalni progi Grahovo–Most na Soči in v dolžino meri 261,0 m (Slika 3). Zgrajen je bil leta 1905 in rekonstruiran leta 1985. Tip konstrukcije je palični nosilec, statični sistem pa prostoležeči nosilec (Po kreativni poti, 2015).

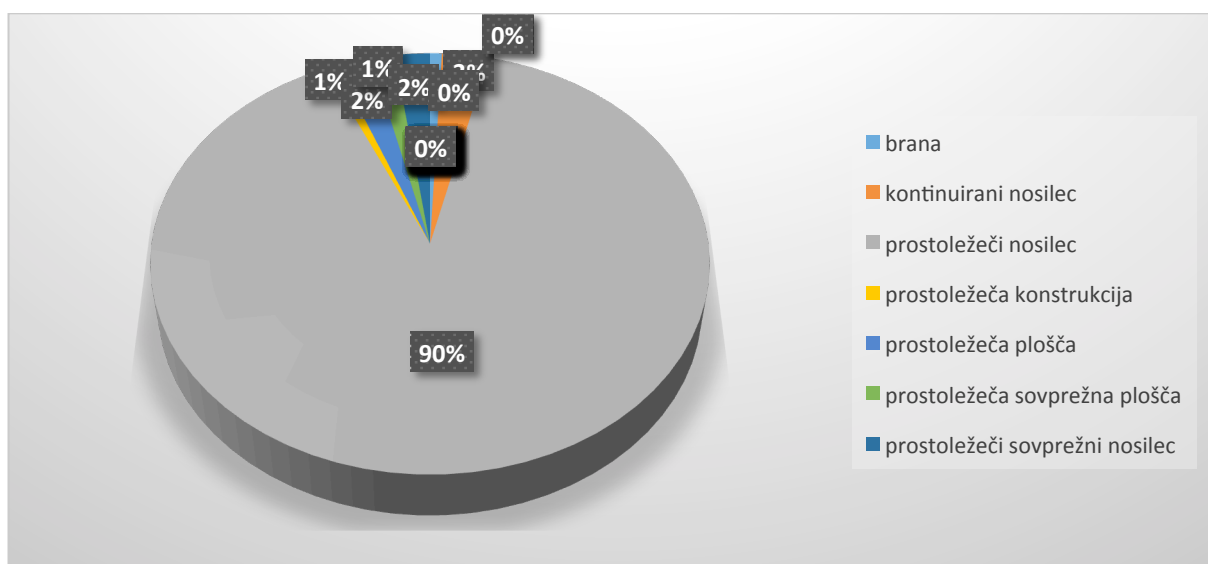


Slika 3: Najdaljši jekleni železniški most v Sloveniji (Po kreativni poti, 2015).

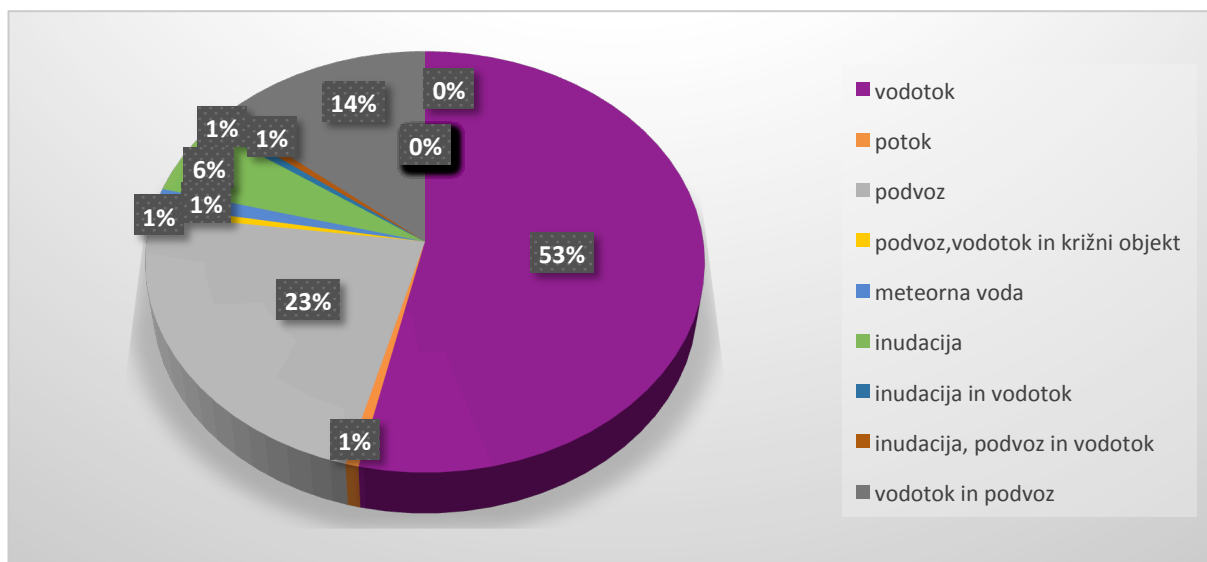
Na slikah v nadaljevanju (Slika 4, Slika 5, Slika 6) je prikazana pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na tip konstrukcije, statični sistem ter križanje. Glede na tip konstrukcije jeklenih mostov v Sloveniji je najpogostejši tip polnostenski nosilec, prostoležeči nosilec je najpogostejši statični sistem, najpogosteje most premošča vodotok (Po kreativni poti, 2015).



Slika 4: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na tip konstrukcije (Po kreativni poti, 2015).



Slika 5: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na statični sistem (Po kreativni poti, 2015).

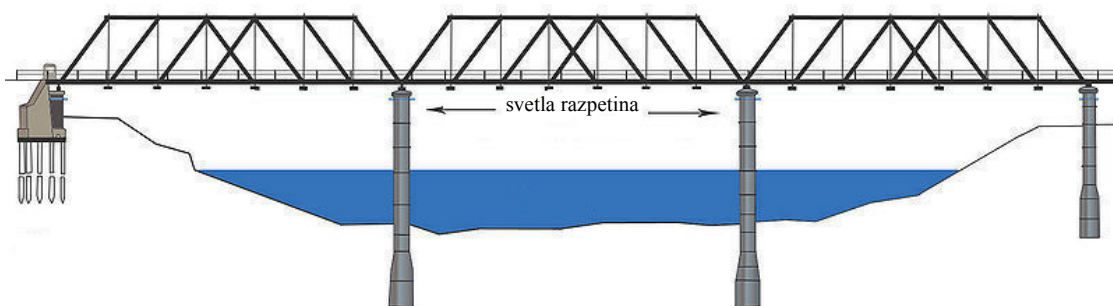


Slika 6: Pogostost jeklenih železniških mostov v Sloveniji glede na križanje (Po kreativni poti, 2015).

2 PRAVILNIK O SPODNJEM USTROJU IN NJEGOVE ZAHTEVE ZA PREMOSTITVENE OBJEKTE

Mostove razvrščamo v spodnji ustroj železniških prog in so kot takšni tudi obravnavani v Pravilniku o spodnjem ustroju železniških prog, v katerem so podane zahteve, definicije in naloge posameznih sklopov spodnjega ustroja. Spodnji ustroj je definiran kot del gradbeno infrastrukturnega podsistema, ki ga sestavljajo objekti (geotehnični, hidrotehnični), konstrukcije in oprema za potrebe železniškega prometa. Sestavni deli spodnjega ustroja so: zemeljski objekti (nasipi, useki, zaseki), umetni objekti (jarki, podporni zidovi, drenaže, pobočja, oporni zidovi, pobočja, na katerih ležijo zemeljski objekti, in območja progovnega pasu), predori, galerije, sistemi za odvodnjavanje in zaščito prog pred površinsko vodo, postajni objekti (klančine, tehtnice, peroni ...) in premostitveni objekti (mostovi, viadukti, inundacijski objekti, prepusti, podvozi in nadvozi, izvennivajska križanja železnic, podhodi, nadhodi) (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

Po Pravilniku o spodnjem ustroju železniških prog most definiramo kot gradbeni objekt, s katerimi premagujemo naravne in umetne ovire ter imajo skupno svetlo razpetino večjo od 5,0 m. Svetla razpetina je razmik med podpornimi stebri mostu; če je podpornih stebrov več, govorimo o skupni razpetini, ki jo dobimo kot vsoto vseh razpetin med podpornimi stebri (Slika 7). Prepusti so premostitveni objekti razpetine 1,0–5,0 m (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013; Radnić in sod., 2004).



Slika 7: Prikaz svetle razpetine mostu (Hampden bridge, 2016).

Železniški mostovi in prepusti morajo biti projektirani in konstruirani glede na vrsto proge in tako, da izpolnjujejo številne zahteve, kot so zahteve hitrosti ter nosilnosti na železniški progi, varen potek prometa, da se obteženo železniško vozilo lahko ustavi in stoji na njem, predpisani svetli profili, ustrezno odvodnjavanje, minimalni vplivi na okolico med gradnjo in uporabo, ustrezna vidljivost signalno varnostnih naprav, ukrepi pred nevarnostjo dotika vodov pod napetostjo in zaščito pred

udarci železniških vozil v konstrukcijo. Novogradnje na železniških progah morajo izpolnjevati tudi pogoje interoperabilnosti mednarodnega železniškega prometa. Pogoje (oblika, način izdelave, vzdrževanje in kakovost izvedbe spodnjega ustroja), ki jih mora železniški most izpolnjevati, postavijo njegovi upravljavci ali lastniki v skladu z veljavnimi predpisi in standardi s tega področja. Pomembno je, da se tovrstni pogoji zastavijo smiselno in realno, saj morajo mostovi kot prometni objekti tovrstne zahteve tudi optimalno izpolnjevati. Samo minimalno izpolnjevanje pogojev ima lahko za posledico zmanjšano uporabnost, varnost in trajnost objekta (Radnić in sod., 2004).

Pri novogradnjah, obnovah in vzdrževanju se poleg pravilnika o spodnjem ustroju upoštevajo še zahteve Zakona za varnost v železniškem prometu, Zakona o graditvi objektov, ratificiranih mednarodnih sporazumov, Slovenski standardi SIST, objave mednarodne železniške zveze, privzeti evropski standardi SIST EN ter tehnične specifikacije za interoperabilnost ter vse druge tehnične specifikacije, ki se nanašajo na spodnji ustroj. Konstrukcijski elementi premostitvenega objekta morajo biti projektirani skladno s standardi SIST EN 1991, jeklene konstrukcije pa skladno s SIST EN 1993-1 (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

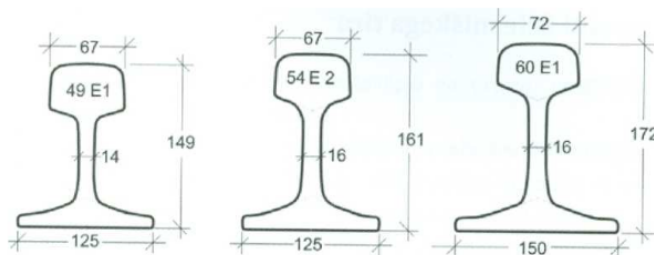
Pri tem je zelo pomembno, da se vsa spremljajoča dokumentacija o gradnji, jamstvu kvalitete, funkcionalnosti, servisiranju, obnovi in vzdrževanju arhivira in vodi v obliki, kot je bila pridobljena in mora biti dostopna za uporabo. Spodnji ustroj proge se šteje za urejenega takrat, kadar vsi njegovi sestavni deli in zahteve kot celota ustrezajo predpisom pravilnika, ki ureja spodnji ustroj železniških prog (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

2.1 Zahteve in določila posameznih elementov mostu

Za varno in normalno delovanje železniških mostov so potrebni vse elementi proge; nekateri izmed njih so natančneje opredeljeni v Pravilniku o spodnjem ustroju železniških prog in Pravilniku o zgornjem ustroju železniških prog, saj morajo kot takšni izpolnjevati določene zahteve. Pravilnik natančneje opisuje zahteve in določila za naslednje elemente mostov: tir, geometrijo tlorisa, svetli profil, svetlo višino objektov pod mostom, medtirno razdaljo, korito za tirno gredo, pragove, kretnice, opremo za elektrovleko, zaščito pred nevarnostjo dotika vodov pod napetostjo, odvodnjavanje, kablovode, oznake na objektih, obremenilne preizkuse, ki so na kratko predstavljeni v nadaljevanju (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010; Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

2.1.1 Tiri na mostovih

Tirnice vodijo tirna vozila in prenašajo njihove vertikalne ter horizontalne obremenitve na nosilna tla. Delimo jih glede na njihovo maso, sestavo in geometrijo oz. obliko (Slika 8) (Zgonc, 2012).

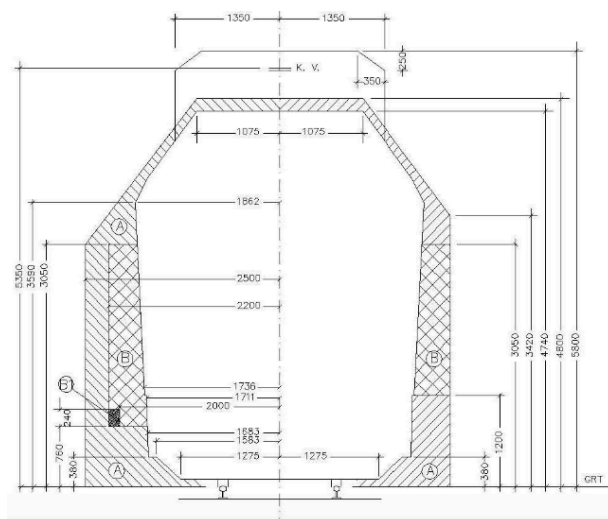


Slika 8: Standardne tirnice (Zgonc, 2012).

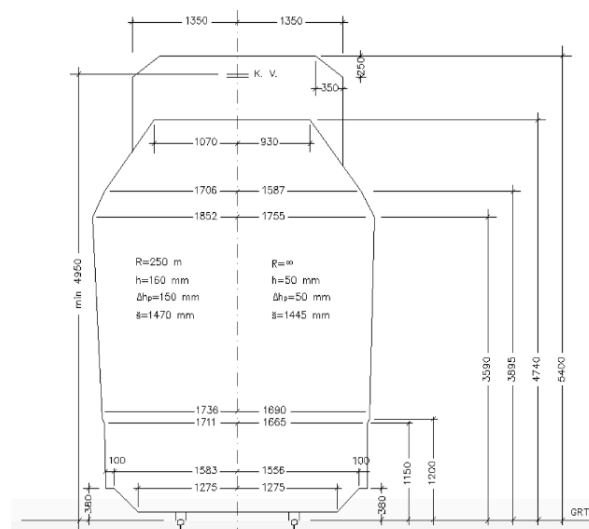
Geometrija tira na mostovih mora biti skladna s predpisi in zahtevami Pravilnika o zgornjem ustroju ter skladna s tehničnimi specifikacijami interoperabilnosti (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013; Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Zaradi nevarnosti iztirjenja se na mostu in pred njim vgradijo varnostne tirnice, lahko tudi varnostni kotnik na notranji strani tirnic. Gornja robova varnostne tirnice ali kotnika morata biti izenačena z gornjim robom tirnice (izjemoma je lahko kota varnostne tirnice nižja za največ 15 mm). Tovrstna zaščita pred iztirjenjem se uporabi v primerih, ko je objekt daljši od 5 m in v krivini s polmerom, manjšim od 500 m, kadar so objekti daljši od 5 m in ima proga vzdolžni nagib večji od 15 ‰, kadar je objekt daljši od 5 m in so priključne krivine z radijem, manjšim od 300 m, kadar je razdalja objekta med začetnim in končnim opornikom daljša od 20 m in kadar ima objekt, ne glede na dolžino, pri ločnih in paličnih konstrukcijah vozlišče spodaj. Varnostne tirnice podaljšujemo v odprto progo za 10 (most v premi) ali 20 (most v krivini) % dolžine mostu, nikakor pa jih ne smemo podaljšati za manj kot 3 in več kot 10 m (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

2.1.2 Svetli profil

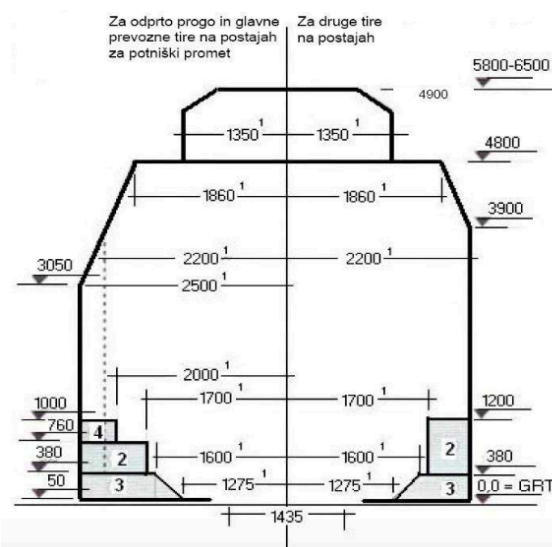
Profil je omejena na tir pravokotna ravnina, katere mejno črto določajo točke koordinatnega sistema s središčem v presečišču vertikalne osi tira z ravnino, ki jo tvorita zgornji površini tirnic. Delimo jih na profil vozila ali nakladalni profil in svetli profil proge. Svetli profili morajo ustrezati zahtevam pravilnika zgornjega ustroja železniških prog in vanj ne smejo segati deli proge, objektov, signalov, oznak ob progi in deli vseh ostalih predmetov ob progi. Če posamezni elementi konstrukcije mostu segajo v vozišče, mora biti njihova oddaljenost od osi krajnega tira polovico svetlega profila, vendar ta razdalja ne sme biti krajša od 2,50 m (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010). Na Sliki 9 je prikazan svetli profil, na Sliki 10 minimalni svetli profil ter na Sliki 11 svetli profil za novogradnje.



Slika 9: Normalni svetli profil za $R \geq 250$ m (Svetli in nakladni profil, 2013).



Slika 10: Minimalni svetli profil za $R \geq 250$ m (Svetli in nakladni profil, 2013).



Slika 11: Svetli profil za novogradnje GC (Svetli in nakladni profil, 2013).

2.1.3 Svetla višina objektov pod mostom

Svetla višina pod nadvozom mora upoštevati višino svetlega profila, povečanega za potrebno vgradnjo naprav voznega omrežja (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013). Kadar mostovi premoščajo reke oz. vodotoke, morajo omogočati njihovo plovnost in hkrati tudi omogočati prevoznost proge ob poplavih oz. naravnih nesrečah. Pri vodotokih, ki so plovni, moramo tako upoštevati najvišjo koto vode, ki ji moramo dodati tudi dimenzije plovnega profila. V primeru neplovnih vodotokov upoštevamo stoletno vodo in varnostno višino 1 m oz. 0,25 za konstrukcijo z ležišči.

2.1.4 Medtirna razdalja na mostovih

Če imamo na mostu več tirov, mora biti njihova medtirna razdalja skladna z določili in zahtevami Pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog. V Sloveniji na večini mostov potekajo eno- ali dvotirne proge; dimenzije medtirne razdalje za dvotirne proge so pri obstoječih progah normalno 4,00 m in minimalno 3,50 m, v primerih novogradnje pa je ta dimenzija 4,20 m (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

2.1.5 Pragovi

V Sloveniji se za pragove največkrat uporabi bukev, za mostovne pragove pa uporabimo hrast. Mostovni pragovi, kjer imamo odprto vozišče, morajo biti ostrorobi, imeti pravokotno oz. kvadratno obliko, razmik med njimi ne sme presegati 40 cm in morajo biti narejeni iz hrastovega neimpregniranega lesa. Dimenzije pragov na železniških mostovih se določijo skladno z zahtevami načrta, projektne dokumentacije in veljavnih predpisov (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

2.1.6 Tirni stik

Tirni stik je mesto, kjer se stikujeta dve tirnici. Ker se tirni stiki na mostovih ne smejo vgrajevati, uporabimo neprekinjeno zvarjeni tir (NZT). Ker se neprekinjeno zvarjeni tir obnaša drugače kot konstrukcija mostu, moramo že v fazi projekta določiti naslednje parametre: razlika v medsebojnem pomiku tira in mostu, vpliv na podpore mostu, način vgrajevanja, velikosti največjih dilatacij in velikosti napetosti. V kolikor ima neprekinjeno zvarjeni tir dodatne vplive na mostno konstrukcijo, se to pregleda, potrdi in izvede skladno s projektno dokumentacijo (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

2.1.7 Kretnice

Kretnice omogočajo neprekinjen prevoz tirnih vozil z enega na drug tir. Delimo jih na krivinske in navadne kretnice. Navadne so nenadvršane, glavni tir je v premi, odklonski pa v krožnem loku. Lahko so enojne, križiščne, dvojne ter kombinirane (dvojnih in kombiniranih kretnic v Sloveniji ni) (Zgonc, 2003). Kretnice se načeloma na mostove ne vgrajujejo, če obstaja za to potreba, pa mora biti ta tehnično in ekonomsko upravičena. Vsekakor se kretnice ne vgrajujejo na premičnih delih mostov (Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog, 2010).

2.1.8 Izolirni stik

Namen izolirnega stika je preprečevanje prevajanja električnega toka z ene na drugo tirnico. Lahko so nelepljeni in sestavljeni iz spoj, katerih materiali niso prevodni, ali pa so lepljeni. Lepljeni stiki so viseči stiki med dvema pragovoma, podprti stiki pa so nelepljeni. Na mostovih, kjer so pragovi neimpregnirani, se izolirni stik lahko vgradi izključno na impregniran prag in morajo imeti ustrezno upornost. Izolirne stike vgrajujemo v preme ali krivine z radijem, večjim od 250 m; če je radij manjši, je treba izolirne stike temu prilagoditi (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

2.1.9 Zaščitni ukrepi pred nevarnostjo dotika vodov, ki so pod napetostjo

Da se zaščitimo pred nevarnostjo vodov, ki so pod napetostjo (napajalni, kontaktni, obhodni vod ter nosilna vrv), se uporabi vertikalna stena. Stena višine 2 m se privijači na zunanjo stran ograje mostu, tako da je spodaj zapognjena, zgoraj pa ima tkano mrežo. Če imamo več vodov, se stena izvede za vse vode skupaj, kot neprekinjena celota. Morebitne špranje ali odprtine na progi ali hodniku morajo biti zapolnjene na vsaki strani voda v dolžini 1,60 m in tako preprečevati stik z daljšimi predmeti. Ograje, ki varujejo vode, morajo segati 2 m na vsako stran. Vse zaščitne ograje in stene morajo biti tudi ustrezno ozemljene (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

2.1.10 Obremenilni preizkus

Naloga železniškega mostu je, da vse obremenitve, tako lastne, koristne in nezgodne, prenaša na temeljna tla. Zato je pri vsaki novogradnji rekonstrukciji objekta, katerega razpon je večji od 10 m, treba opraviti obremenilni preizkus. Pri obremenilnem preizkusu so pomembni naslednji podatki: število vlečnih in drugih vozil, njihova bruto teža (pri izbiri lokomotiv načeloma izbiramo najtežje lokomotive, ki obratujejo na določeni progi in najneugodnejše vplivajo na konstrukcijo), stanje konstrukcije pred preizkusom in po njem, kateri elementi mostu se pregledujejo in kakšni so uporabljeni merilni instrumenti. Preizkus se deli na statični in dinamični del. *Statična obremenitev* upošteva, da vozilo na mostu stoji oz. se giblje brez tresljajev in udarcev do najvišje hitrosti 5 km/h,

dinamična obremenitev pa predvideva, da naj hitrost ne bo manjša od 10 km/h in se z vsakim novim preizkusom povečuje za 20 km/h, do maksimalne dovoljene hitrosti na tem delu proge.

Pri preizkusih je treba spremljati (Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja na progah JŽ, 1970):

Statična obremenitev:

- upogib glavnih, vzdolžnih in prečnih nosilcev,
- napetosti v elementih konstrukcije,
- deformacije stebrov,
- deformacije členkov,
- nagibe stebrov.

Dinamična obremenitev:

- upogib glavnih, vzdolžnih in prečnih nosilcev,
- napetosti v elementih konstrukcije,
- amplitude, pogostosti in periode vertikalnih in horizontalnih vibracij.

Vse meritve (napetosti in deformacije) merimo na mestih, kjer so v statičnem računu predvidene največje napetosti. Na Sliki 12 je prikazan primer obtežbe mostu.



Slika 12: Primer obremenilnega preizkusa mostu (Acrow, 2016).

Po opravljenem preizkusu se naredi poročilo (začasno ali končno), ki mora vsebovati naslednje podatke: namen preiskave, kratek opis konstrukcije in pogojev preizkusa, pogoje obremenitve in rezultat preiskave. Če most prestane obremenilni preizkus, se prevzame v uporabo (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013; Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja na progah JŽ, 1970).

2.1.11 Oznake na objektih

Mostovi, torej premostitveni objekti, daljši od 5 m, morajo biti tudi ustrezno označeni. Pod ustrezno označitev se šteje, da je na objektu vidna: stacionaža objekta, reperji, leto gradnje in leto obnove, izogibališča (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).

3 OSNOVE PROJEKTIRANJA JEKLENIH KONSTRUKCIJ

3.1 Evrokod 3

V Sloveniji se za projektiranje jeklenih konstrukcij uporablja Evrokod 3. Bistvena razlika v dimenzioniranju jeklenih konstrukcij po Evrokodu 3 in starih predpisih po JUS U.E7 – nosilnost in stabilnost jeklenih konstrukcij – je v tem, da so nekoč projektirali na dopustne napetosti, ki so bile pod mejo tečenja (zmanjšane za koeficient varnosti 1,5 pri osnovnih in koeficient varnosti 1,33 pri dodatnih obremenitvah) in računane po teoriji elastičnosti. Projektiranje jeklenih konstrukcij po Evrokodu 3 (SIST EN 1993-1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe ter SIST EN 1993-2: Mostovi) pa se izvaja po teoriji plastičnosti, torej dovoljuje plastifikacijo prečnega prereza konstrukcije skupaj z uporabo sodobnega verjetnostnega pristopa projektiranja (Domazet in sod., 2006). Pri verjetnostnem pristopu se vse količine štejejo kot slučajne spremenljivke, ki sledijo statičnim porazdelitvam (običajno Gaussovi porazdelitvi) in tako zajemajo nezanesljivost podatkov, kot so obtežbe, ki bodo v življenjski dobi konstrukcije delovale na njo, kot so nenatančni računski modeli ter kot odstopanja nominalne projektne nosilnosti konstrukcije ali njenih delov od dejanske nosilnosti zaradi spremenljivosti mehanskih lastnosti materiala in geometrije pri izvedeni konstrukciji (Beg, 1999).

Standard SIST EN 1993-1 predpisuje, da se konstrukcija uporablja samo za namene, ki so predvideni v projektu, da lahko jeklene konstrukcije projektira za to izšolan in izkušen kader ter da se izbere za to kvalificiran izvajalec del in ustrezen oz. kompetenten nadzora tako v fazi izdelave konstrukcije v delavnici kakor tudi v fazi montaže na gradbišču. Prav tako morajo biti skladno s standardom SIST EN 1993-1 izpolnjene zahteve, kot je ta, da se konstrukcija projektira tako, da služi svojemu namenu v svoji celotni življenjski dobi, pri čemer pa je treba upoštevati vidike ekonomičnosti, trajnosti, vzdrževanja in vsekakor tudi varnosti, saj mora biti le-ta sposobna prenesti vse obtežbe in zunanje vplive, ki jim je v času gradnje in uporabe izpostavljena. Tako tudi različni nezgodni dogodki ne smejo imeti vpliva na stabilnost dela konstrukcije ali celotne konstrukcije. Dotični standard narekuje tudi izbiro konstrukcijskega jekla, ki je odvisno od najnižje temperature, saj mora biti dovolj žilav, da ne pride do krhkega loma.

Vse tovrstne zahteve se lahko dosežejo z dobrim projektom, ustreznimi materiali, strokovnimi nadzori in rednim vzdrževanjem (Beg, 1999).

3.2 Projektiranje jeklenih železniških mostov

Železniški mostovi morajo izpolnjevati različne zahteve, npr.: varnost in stabilnost vseh delujočih obtežb, ekonomičnosti, trajnosti, ekologije in konstrukcijskih detajlov.

3.2.1 Zahteve varnosti in stabilnosti

Zahteve varnosti in stabilnosti so primarne zahteve, ki jih mora izpolnjevati vsak gradbeni objekt, zato je nujno, da se izpolnjujejo v celoti. Tovrstne zahteve se dokazujejo z upoštevanjem mejnih stanj. Mejna stanja konstrukcij lahko opišemo kot stanja, pri katerih konstrukcija zaradi prekoračitve obremenitve ne izpolnjuje več predpisanih zahtev.

Delimo jih na mejna stanja nosilnosti in mejna stanja uporabnosti.

Mejna stanja nosilnosti obravnavajo porušitve prereza, delno ali celotno porušitev objekta, pojav plastičnega mehanizma in izgube ravnotežja.

Kontrolo mejnih stanj nosilnosti izvajamo z izrazom (1):

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

kjer sta:

S_d ... računska vrednost notranje sile oz. momenta na osnovi zunanjih vplivov,
 R_d ... računska vrednost nosilnosti konstrukcije.

Računske vrednosti zunanjih vplivov se določijo z ustrezno kombinacijo vseh delujočih vplivov s projektnimi stanji in obtežnimi primeri (Beg, 1999).

Kombinacija vplivov za stalna in začasna projektna stanja se izračuna po enačbi (2) (Zupančič, 2009):

$$\sum G_{k,j} \times \gamma_{G,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum Q_{k,i} \times \gamma_{Q,i} \times \Psi_{0,i} \quad (2)$$

kombinacija za nezgodno stanje pa po enačbi (3):

$$\sum G_{k,j} + A_d + \Psi_{1,1} \times Q_{k,1} + \sum Q_{k,i} \times \Psi_{2,i} \quad (3)$$

kjer so:

$G_{k,j}$ karakteristična vrednost stalnih vplivov,
 $Q_{k,1}$ karakteristična vrednost vodilnega spremenljivega vpliva (z največjim vplivom na obravnavano mejno stanje),

- $Q_{k,i}$ karakteristična vrednost ostalih spremenljivih vplivov,
 A_d računska vrednost nezgodnega vpliva,
 γG_{j} delni varnostni faktor stalnega vpliva $G_{k,j}$ pri nezgodnem stanju,
 Ψ_0, Ψ_1, Ψ_2 koeficienti za račun reprezentativnih vrednosti zunanjih vplivov.

Kontrole v prerezih se naredijo skladno z zahtevami standarda SIST EN 1993-2 (jekleni mostovi), ki za mejno stanje nosilnosti predvideva kontrole vertikalnega in zdolžnega striga, tlačeni pasnic, interakcije striga in upogiba, vnosa koncentrirane sile v stojino, elastične upogibne nosilnosti ter kombinacijo vzdolžnega striga in prečnega upogiba.

Mejna stanja uporabnosti pa obravnavajo morebitne prekoračitve predpisanih vrednosti pomikov, vibracij in poškodb elementov.

Kontrolo mejnih stanj nosilnosti izvajamo z izrazom (4):

$$E_d \leq C_d, \quad (4)$$

kjer sta

C_d ... nominalna vrednost opazovane lastnosti (največji dovoljeni pomik ali upogibek),

E_d ... računska vrednost opazovane lastnosti na osnovi zunanjih vplivov.

Računske vrednosti zunanjih vplivov se določijo z ustrezno kombinacijo vseh delujočih vplivov s projektnimi stanji in obtežnimi primeri (Beg, 1999).

Upoštevamo naslednje kombinacijske primere (Zupančič, 2009):

- karakteristična kombinacija (5)

$$\sum G_{k,j} \times Q_{k,1} + \sum Q_{k,i} \times \Psi_{0,i}, \quad (5)$$

- pogosta kombinacija (6)

$$\sum G_{k,j} + \Psi_{1,i} \times Q_{k,1} + \sum Q_{k,i} \times \Psi_{2,i}, \quad (6)$$

- navidezna stalna kombinacija (7)

$$\sum G_{k,j} + \sum Q_{k,i} \times \Psi_{2,i}, \quad (7)$$

- redka obtežna kombinacija (8)

$$\sum G_{k,j} + \Psi_{1,inf} \times Q_{k,i} + \sum Q_{k,i} \times \Psi_{1,i}. \quad (8)$$

Kontrole z zahtevami standarda SIST EN 1993-2 (jekleni mostovi) za mejno stanje uporabnosti predvideva naslednje kontrole: normalnih napetosti v pasnici, strižne napetosti v stojini ter

Misessove napetosti.

Konstrukcije se dimenzionirajo na mejno stanje nosilnost, skupaj z izpolnjevanjem pogojev za mejno stanje uporabnosti (Radnić in sod., 2004).

Vrednosti parcialnih in kombinacijskih faktorjev za železnice dobimo s standardom SIST EN 1990 (osnove projektiranja konstrukcij), v preglednicah 2.3 in 2.4, dodatek A.

3.2.2 Obtežbe, ki delujejo na železniški most

V fazi projektiranja železniškega mostu moramo pri obtežbi mostu upoštevati njegovo lastno obtežbo, spremenljive obtežbe ter vplive na konstrukcijo med gradnjo, ki so opisani v nadaljevanju.

Lastna obtežba

Pod lastno težo železniškega mostu štejemo težo vseh delov prekladne in podporne konstrukcije, težo zgornjega ustroja proge (tirnice, pragove, gramozna greda ...) in težo vseh predmetov in opreme, ki so postavljeni na most. Lastna teža konstrukcije se določi skladno s standardom SIST EN 1991-1-1 (Vplivi na konstrukcije: Splošni vplivi, prostorninske teže, lastne teže, koristne obtežbe), v dodatku A, odvisna pa je od projektnih dimenzij in lastnosti materialov. Poda se kot obtežba na tekoči meter (SIST EN 1991-1-1, 2015a).

Spremenljiva obtežba

- *Temperatura*: Vplivi temperature so pomembni zaradi njihovih velikih razponov in občutljivosti jekla za visoko oz. nizko temperaturo, zato sta podatka najvišje oz. najnižje temperature osnova za določanje vplivov temperature. Podatki o temperaturah se določijo na podlagi temperaturne karte Slovenije ali preglednic z najvišjimi/najnižjimi temperaturami v posameznih krajih po Sloveniji. Podatki zajemajo povratno dobo 50 let, zato jih moramo za mostove (ki se projektirajo na 100 let) preračunati za obdobje 100 let. Toplotni vplivi se določijo s standardom SIST EN 1991-1-5 (Vplivi na konstrukcije: Splošni vplivi - Toplotni vplivi) (SIST EN 1991-1-1, 2015).

- *Veter*: Vplivi vetra na konstrukcije so najizraziteje vidni ob različnih vremenskih neprilikah oz. nevihtah. Takrat smo priča različnim poškodbam ali celo porušitvam konstrukcij. Veter je turbulenten in je kot tak zelo nepredvidljiv. S tega stališča je treba njegov vpliv resno in pravilno upoštevati pri projektiranju konstrukcij. Za določitev vpliva moramo poznati intenzitete vetrov na posameznih območjih, saj ga upoštevamo kot nepomični vpliv, kar pomeni, da moramo njegove vplive na konstrukcijo določiti vnaprej. Veter ima vpliv na most tako v fazi gradnje kot v fazi uporabe. Intenzitete vetrov za posamezna območja so podane za dobo 50 let, pri mostovih jih zato preračunamo na dobo 100 let. Za železniške mostove velja priporočilo, da njihova obremenitev (skupaj s prometom)

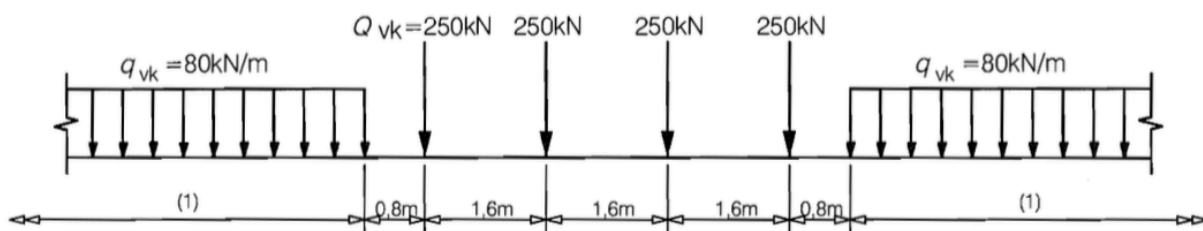
znaša 25 m/s. Vpliv vetra določimo s standardom SIST EN 1991-1-4 (Vplivi na konstrukcije: Splošni vplivi – Vplivi vetra) (SIST EN 1991-1-4: 2005).

- *Sneg*: Če je za posamezno geografsko območje določeno, da se zanj upošteva vpliv snega, se njegov vpliv določi s pomočjo s_n , ki so podane v standardu. V Sloveniji se sneg kot nezgodna kombinacija upošteva le v krajih, višjih od 1500 m. Vpliv snega določimo s standardom SIST EN 1991-1-3 (Vplivi na konstrukcije: Splošni vplivi – Obtežba snega) (SIST EN 1991-1-3:2004).

- *Obtežba s prometom*: Obtežbo tirnih vozil na mostu delimo na vertikalno in horizontalno obtežbo. Če most izpolnjuje pogoje za varnostne tirnice, se nezgodna kombinacija iztirjenja vlaka ne upošteva (EN 1991-2, 2003).

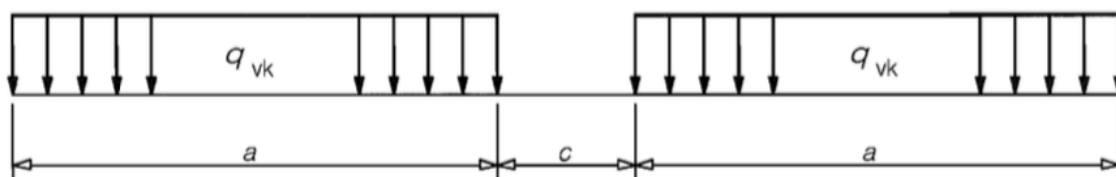
Vertikalna obtežba: Skladno z zahtevami mednarodne železniške zveze se morajo mostovi projektirati na obtežne obremenitve, predpisane s standardom EN 1991-2. V nadaljevanju so opisani obtežni primeri, in sicer primer 71, obtežna primera SW/0 ter SW/2 in obtežni primer "praznega vlaka".

Obtežni primer 71 predstavlja statični vpliv vertikalne obremenitve ob normalnem železniškem prometu (Slika 13).



Slika 13: Obtežni primer 71 (EN 1991-2, 2003).

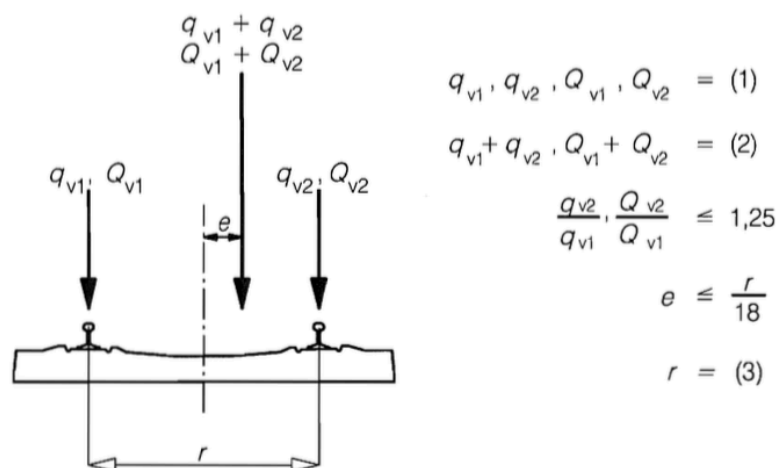
Obtežni primer SW/0 predstavlja statični vpliv vertikalne obtežbe ob normalnem železniškem prometu na kontinuiranih nosilcih (Slika 14). Obtežni primer SW/2 pa predstavlja statični vpliv vertikalne obtežbe pri težkem železniškem prometu. Karakteristične vrednosti obtežnih primerov SW/0 in SW/2 so podane v standardu EN 1991-2.



Slika 14: Obtežna primera SW/0 in SW/2 (EN 1991-2, 2003).

Obtežni primer “praznega vlaka” se uporabi v posebnih primerih oz. zahtevah. Obtežni primer predstavlja vertikalno zvezno porazdeljeno obtežbo s karakteristično vrednostjo 10,0 kN/m.

Ekscentričnost vertikalnih obtežb se uporabi samo z obtežnima primeroma 71 in SW/0 (Slika 15).



Slika 15: Ekscentričnost vertikalne obtežbe (EN 1991-2, 2003).

V primerih, da po progi poteka lažji oz. težji promet od normalnega, standard EN 1991-2 zahteva, da je treba karakteristične vrednosti obtežb z obtežnih modelov pomnožiti s faktorjem alfa (α). Faktor alfa (α) predpisuje Uredba komisije (EU) št. 1299/2014 v Preglednici 11 (EN 1991-2, 2003; Uredba komisije (EU) št.1299/2014).

Dinamični faktor \emptyset in resonance

Skladno s standardom EN 1991-2 moramo določiti tudi dinamični faktor \emptyset , vključno z resonanco. Inducirane statične obremenitve, deformacije in posledični pospeški mostu so lahko posledice:

- hitrosti prometa prek mostu in njegove mase,
- dolžine elementa in njegove deformacijske linije,
- vlaka, ki je natovorjen tako, da ima tovor enakomeren medsebojni razmik, kar lahko povzroči pojav resonance,
- mase mostu,
- lastne frekvence konstrukcije,
- števila osi, osne obremenitve, razmika med osmi,
- nepravilnosti na tirnici,
- nepravilnosti na kolesu.

Dinamični faktor je pomemben, saj ga množimo z dobljenim rezultatom analize konstrukcije.

Kriterij za izbiro statične oz. dinamične analize je opisan v točki 6.4.3 (splošna pravila oblikovanja) standarda 1991 – 2 (EN 1991-2, 2003).

Horizontalna obtežba: Standard za horizontalno obtežbo železniške proge predvideva upoštevanje pospeševalne, zaviralne, centrifugalne in bočne sile. Obtežbo pospeševalnih in zaviralnih sil upoštevamo kot enakomerno porazdeljeno obtežbo v vzdolžni smeri proge, katera deluje na gornjem robu tira. Obtežba centrifugalne in bočne sile pa deluje na sredini proge v višini gornjega roba tirnice in je orientirana prečno na os.

Določila in zahteve zaviralnih, pospeševalnih, centrifugalnih in bočnih sil opisuje standard EN 1991-2 v točkah 6.5.1, 6.5.2 in 6.5.3. Prav tako standard EN 1991-2 predvideva, da se vse omenjene sile množijo z enakim faktorjem alfa (α) kot pri obtežnih primerih.

Skladno s standardom SIST EN 1991-2 za določitev *kombinacije vertikalnih in horizontalnih obtežb* uporabimo preglednico na strani 120, kjer moramo izbrati najbolj neugodne kombinacije obeh obtežb na konstrukcijo.

- Vplivi na konstrukcijo med gradnjo

Med gradnjo mostu se na gradbišču in na konstrukciji uporablja veliko orodij in strojev, nastaja dosti odpadnega materiala, prav tako pa je na delovišču veliko ljudi in vsi ti faktorji se obravnavajo kot gradbena obtežba, ki ima vpliv na konstrukcijo med gradnjo. Skupaj z njo moramo med gradnjo predvidevati potresne in nezgodne dogodke. Vse zahteve in primeri vplivov na konstrukcijo med gradnjo so opisani v standardu SIST EN 1991-1-6.

3.2.3 Kontrola vibracij in deformacij za železniške mostove

Kontrole deformacij in vibracij so obvezne za vse jeklene železniške mostove. Zahteve in poteke kontrol povzemajo standardi, navedeni v Preglednici 1.

Preglednica 1: Standardi za kontrolo vibracij in deformacij za železniške mostove

	standard
Kontrola vibracij	SIST EN 1990
	SIST EN 1991-2
	SIST EN 1993-2
Kontrola deformacij	SIST EN 1990
	SIST EN 1993-2

3.2.4 Ekonomičnost

Pri projektiranju mostov moramo upoštevati, da je strošek njegove realizacije čim manjši. Stroški gradnje in materiala so povezani, zato si je treba prizadevati, da se stroški materiala in delovne sile minimalizirajo. S tem ni mišljeno, da se varčuje material ali kvaliteta materiala, saj ima to za posledico nižjo kvaliteto gradnje. Prav tako ima lahko prekomerno vztrajanje pri stroškovni ekonomičnosti med gradnjo vplive kasneje, ko je na konstrukciji treba izvesti prva vzdrževalna dela in se ta zaradi konstrukcijskih detajlov, ki so posledica poenostavitev zaradi ekonomičnosti, težko izvajajo, ali pa, ko se vzdrževalna dela prične že po nekaj letih uporabe, saj se je varčevalo pri kvaliteti izvedbe del ali materialu. Torej o ekonomičnosti govorimo takrat, ko se analizirajo vsi stroški, tako stroški gradnje kot uporabe in tudi vzdrževanja (Radnić in sod., 2004).

3.2.5 Trajnost

Trajnost mostu je definirana kot sposobnost mostu, da izpolnjuje zahtevano stopnjo varnosti in uporabnosti v nekem časovnem obdobju. Trajnost mostov se določa s predpisi. V Sloveniji se trajni jekleni mostovi projektirajo s standardom SIST EN 1993-2 na življenjsko dobo 100 let.

3.2.6 Ekologija

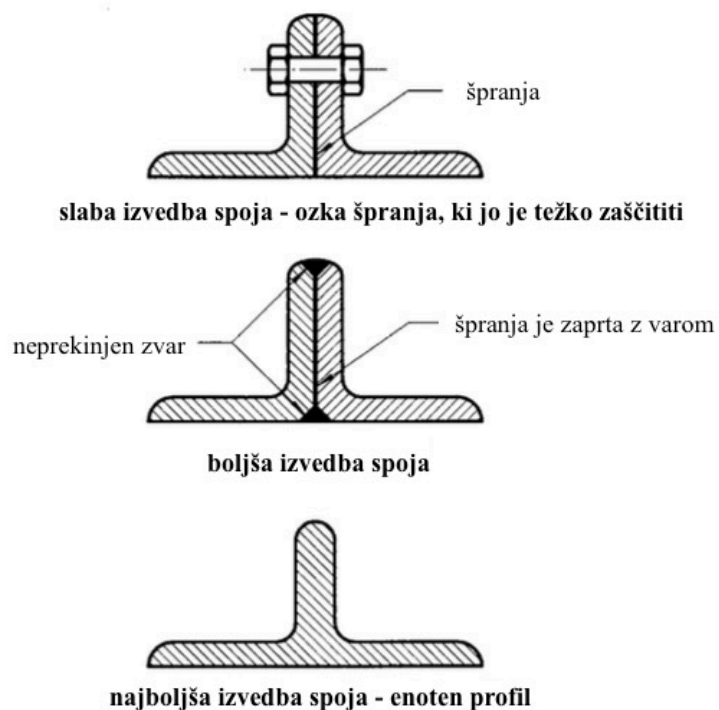
Pri izgradnji mostu posegamo v naravo, zato si moramo prizadevati, da med njegovo gradnjo ta vpliv na okolje minimaliziramo. Tovrstni vplivi se lahko minimalizirajo s primerno organizacijo gradbišča in primerno tehnologijo izgradnje mostu. Po končani gradnji pa se okolica sanira in povrne v prvotno stanje (Radnić in sod., 2004).

3.2.7 Konstrukcijski detajli

Oblika konstrukcije naj bi bila enostavna kot le lahko, saj enostavne oblike zagotavljajo nižje stroške izvedbe, lažjo montažo konstrukcije, lažje preglede in lažje vzdrževanje konstrukcije. Zato ima lahko vztrajanje le pri računsko optimalnih oblikah konstrukcije brez upoštevanja optimalnih in pravilno rešenih detajlov negativen vpliv na celoten videz mostu, vsekakor pa na njegovo življenjsko dobo. Torej moramo pri projektiranju nameniti pozornost tudi tovrstnim detajlom.

Stikom konstrukcijskih elementov oz. ozkim razpokam se pri jeklenih konstrukcijah skoraj ne moremo izogniti. Konstrukcija je namreč vedno sestavljena iz več delov, saj bi kot monoliten element bila preveč toga in v večini primerov skoraj neprimerna za gradnjo. Pri stikovanju teh elementov se uporabljajo vijaki, zakovice in točkovno varjenje (Slika 16). Tovrstni spoji niso vodotesni in se v njih skupaj z umazanijo zadržuje tudi voda. Ker imajo korozijski produkti večji volumen od jekla, nabreknejo, rezultat tega pa je pojav razpok in ostalih deformacij v takšnih spojih. Tovrstnim pojavom

se lahko izognemo na več načinov, in sicer tako, da se spoji ne vijačijo, ampak se varijo, ali pa, da se pri spojih naredijo večji razmiki, da so ti dostopni in lažji za vzdrževanje (ISO 12944-3, 1998; Kjersnsmo in sod., 2003). Na Sliki 17 je prikazana problematika dostopnosti dvojnih profilov, Slika 18 pa prikazuje zastajanje vode in umazanije, ki ji posledično sledi propad konstrukcije.



Slika 16: Primeri spajanja jeklenih konstrukcij (ISO 12944-3,1998).

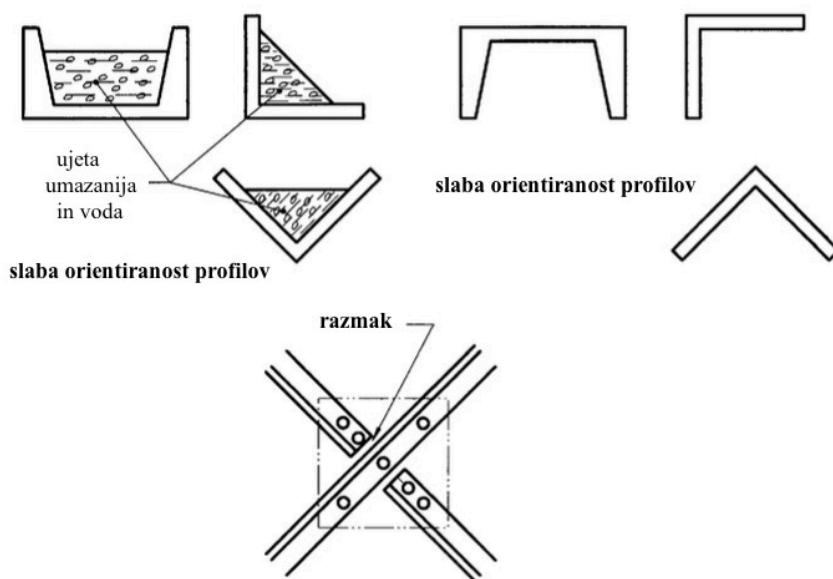


Slika 17: Problematika dostopnosti dvojnih profilov.

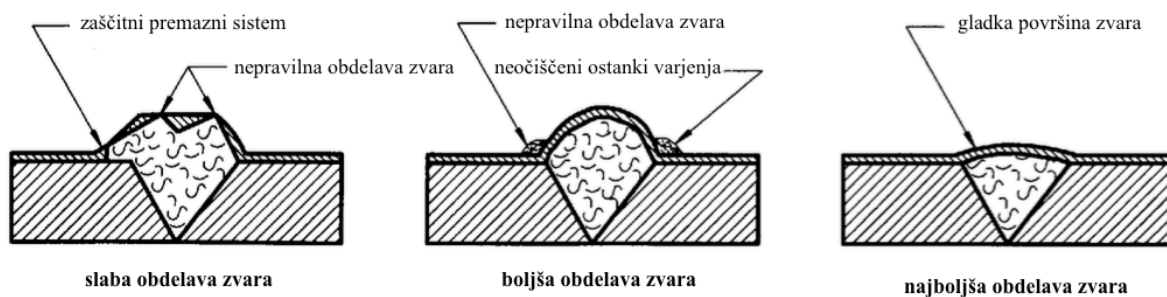


Slika 18: Zastajanje vode in umazanije, posledično sledi propad konstrukcije.

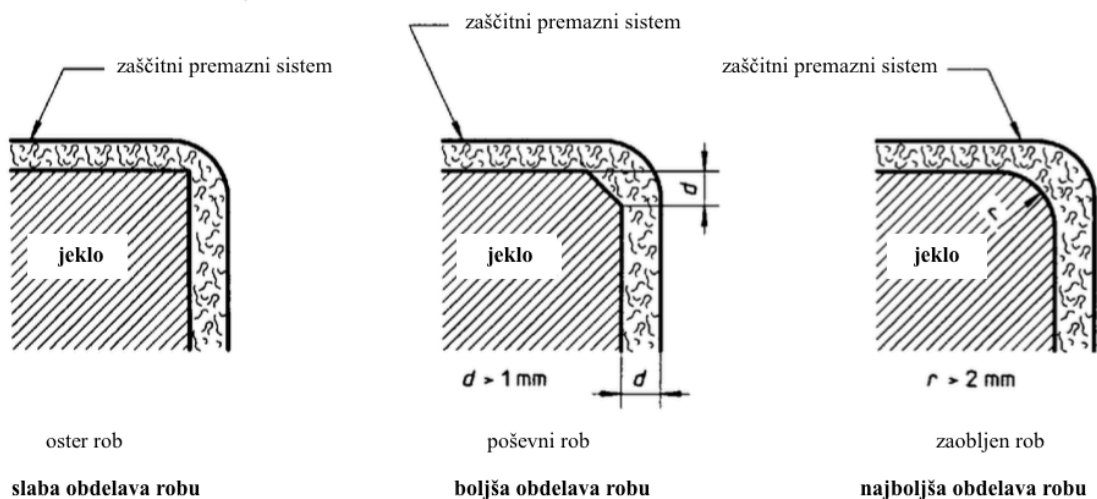
Pri projektiranju mostu moramo paziti predvsem na pravilno orientiranost profilov (Slika 19), obdelavo zvarov in robov (Slika 20 in Slika 21) ter pravilne obdelave spoja (Slika 22) (ISO 12944-3, 1998; Kjersnsmo in sod., 2003).



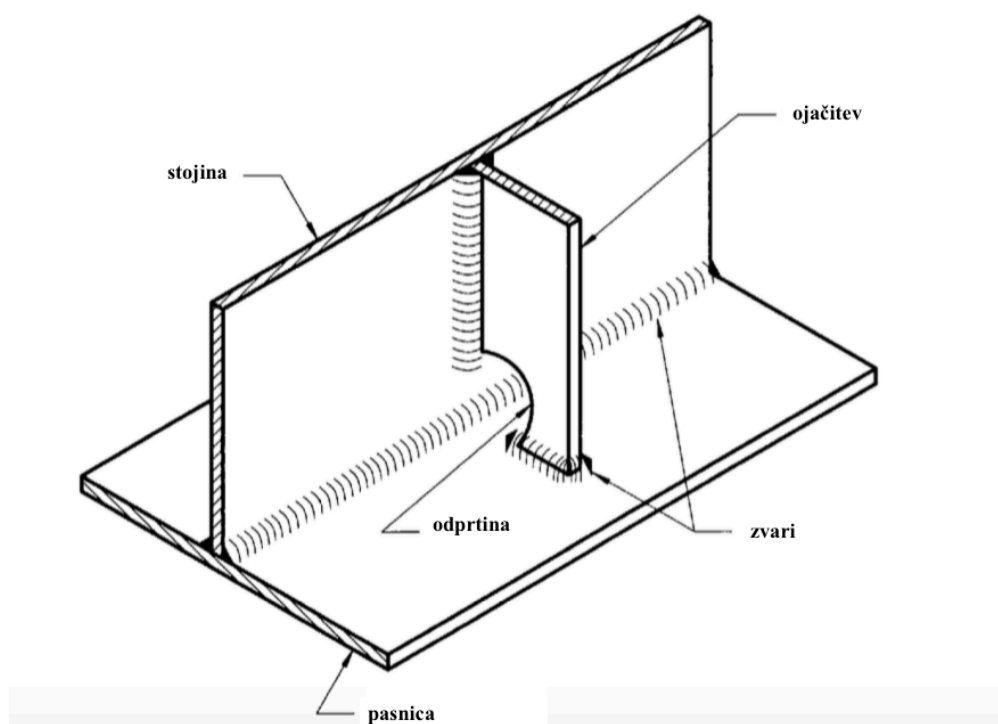
Slika 19: Preprečitev zadrževanja vode in umazanije (ISO 12944 -3, 1998).



Slika 20: Način obdelave zvarov (ISO 12944-3, 1998).



Slika 21: Način obdelave robov (ISO 12944-3, 1998).



Slika 22: Primer obdelave spoja (ISO 12944 -3, 1998).

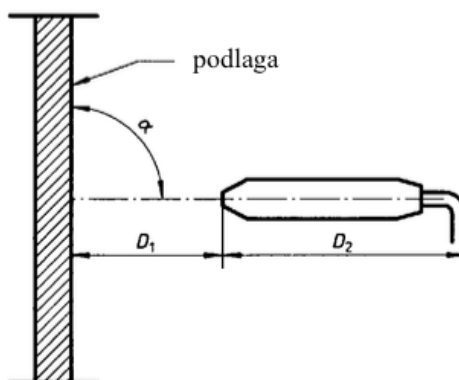
Žal se te zahteve, čeprav so normativno zahtevane, pri projektiranju jeklenih konstrukcij v večini primerov ne uporabljajo. Verjetno zato, ker običajno povečajo skupno maso jeklene konstrukcije ter zahtevajo večji obseg del pri izvedbi konstrukcijskih detajlov in pri končni obdelavi jeklenih konstrukcij (npr. brušenje ostrih robov do radija 2 mm, odstranitev varilnih solz ...).

Prav tako je dejstvo, da je bila velika večina mostnih konstrukcij zgrajena pred letom 2005 in se zahteve ISO 12944-3 pri njihovem konstruiranju in gradnji verjetno še niso upoštevale.

Ker sta obnova in vzdrževanje jeklenih konstrukcij pomembna, standard ISO 12944-3 prav tako predvideva minimalne razmike za potrebe vzdrževanje jeklenih konstrukcij, ki so prikazani v Preglednici 2 in na Sliki 23.

Preglednica 2: Minimalni razmiki za potrebe vzdrževanja jeklenih konstrukcij (ISO 12944-3, 1998).

Operacija	Dolžina orodja (D_2) mm	Razdalja med orodjem in podlago (D_1) mm	Kot operacije (stopinje)
Peskanje	800	200 do 400	60 do 90
Strojno čiščenje - brušenje	100 do 150	0	-
Ročno čiščenje - krtačenje	100	0	0 do 30
Metalizacija	300	150 do 200	90
Barvanje:			
- z brizganjem	200 do 300	200 do 300	90
- s čopičem	200	0	45 do 90
- z valjčkom	200	0	10 do 90



- α kot med orodjem in podlago
 D_1 oddaljenost orodja od podlage
 D_2 dolžina orodja

Slika 23: Minimalni razmiki za potrebe vzdrževanja jeklenih konstrukcij (ISO 12944-3, 1998).

4 VZDRŽEVANJE PREMOSTITVENIH OBJEKTOV

Vloga premostitvenih objektov je v železniškem sistemu zelo velika, zato za njihovo nemoteno delovanje oz. varno uporabo veljajo posebne zahteve pregledov in vzdrževalnih del. Tovrstne zahteve v Sloveniji določa Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog. Skladno s tem pravilnikom se morajo premostitveni objekti redno pregledovati, vzdrževati in obnavljati ter tako minimalizirati verjetnost pojava različnih poškodb, ki bi lahko posledično zmanjšale varnost in funkcionalnost proge. Zato pravilnik deli tovrstna dela na preglede (redni, glavni, izredni), redna vzdrževanja in obnove (manjša popravila in obnove).

Redni pregledi premostitvenih objektov se opravljajo enkrat letno. Takrat se celotna konstrukcija in njeni posamezni deli pregledajo in primerjajo s stanjem prejšnjega pregleda, prav tako se opravijo potrebne meritve deformacij na objektu. Če se ugotovijo odstopanja, se predlagajo dodatni pregledi. Pogostost in vsebina glavnih ter izrednih pregledov se opravita skladno z navodili za obratovanje in vzdrževanje.



Slika 24: Pregled stanja jeklenega železniškega mostu (Harcon, 2016).

Pri rednem vzdrževanju se vzdržujejo in opravljajo naslednje osnovne stvari: čiščenje objekta in okolice objekta, čiščenje opreme na objektu, čiščenje ležišč objekta, čiščenje naplavin na objektu in s podpornih stebrov objekta, vzdrževanje drenažnih sistemov oz. odvodnjavanja vode z objekta. Pri pojavu manjših poškodb se te v pravilniku uvrstijo v manjša popravila in kot takšna tudi odpravijo. Med manjša popravila sodijo: obnova tirne grede, popravki antikorozijske zaščite mostu, sanacije betonov na podpornih stebrih, pregled in menjave vijakov, obnove hidroizolacij in drenažnih sistemov.

Kadar upravljavec z manjšimi popravili ne more več vzdrževati zadostnega nivoja varnosti in uporabnosti, sledijo obnove. Po pravilniku v to skupino sodijo: celotna obnova zgornjega ustroja, menjave konstrukcijskih elementov, obnove podpornih stebrov, obnova in zamenjava ležišč, celovita obnova antikorozijske zaščite in sanacije betonskih površin.

Ker gre v primeru obnov za večje posege v objekt, moramo pred obnovo pripraviti vso potrebno dokumentacijo, ki zajema vse potrebne preiskave in poročila za to obnovitveno delo, na primer: geotehnične, meteorološke, hidrološke in seizmološke preiskave. Naštete preiskave lahko opravijo le za to usposobljene institucije (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013).



Slika 25: Primer obnove železniškega mostu (Most na Savi, 2016).

4.1 Problematika jeklenih mostov – korozija

Problematika jeklenih mostov se odraža predvsem v njihovi korozijski izpostavljenosti, saj je elementarno železo, ki je glavna sestavina ogljikovih jekel, nestabilno. Zato ga v naravi, v rudah, najdemo v oksidiranem stanju. Glavnina energije se pri proizvodnji jekla porabi za redukcijo in rafinacijo železa, ki ga moramo nato tudi ustrezno antikorozijsko zaščititi, saj se lahko sicer takoj v spontanem procesu korozije spremeni nazaj v oksidirano stanje. Železu zato dodajamo legirne elemente, s katerimi v osnovi opredelimo lastnosti jekla.

Legirni elementi so mangan, nikelj, krom, silicij, vanadij, volfram. Najpogosteje pa se železu dodaja ogljik, in sicer v povprečju 2 %, vendar se ta količina spreminja glede na zahtevane lastnosti jekla.

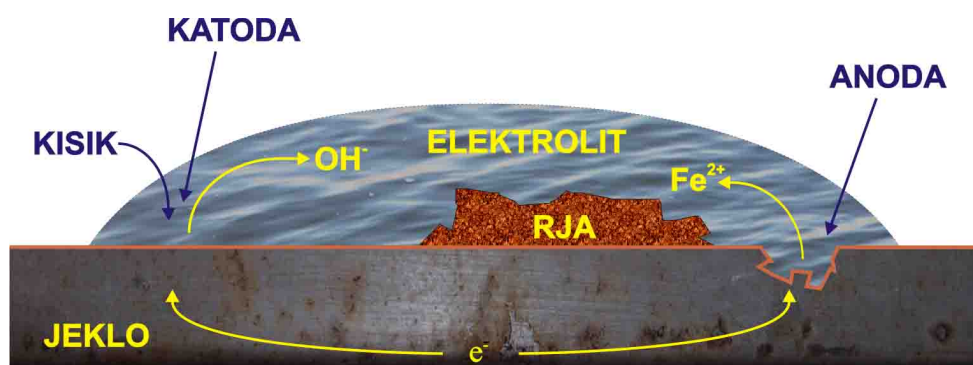
Glavne skupine glede na vsebnost ogljika so:

- nizka vsebnost ogljika: mehka jekla (vsebnost ogljika manj kot 0,3 %),
- srednja vsebnost ogljika: jekla z večjo trdnostjo (vsebnost ogljika med 0,3 in 0,6 %),
- visoka vsebnost ogljika: pojavljajo se problemi pri varjenju (vsebnost ogljika med 0,6 in 0,99 %),
- zelo visoka vsebnost ogljika: uporabljajo se predvsem za orodja, vzmeti (vsebnost ogljika med 1 in 2 %),
- vsebnost ogljika v jeklu med 2 in 4 % - govorimo o litem železu.

Vsebnost ogljika vpliva predvsem na lastnosti, kot so trdnost, duktilnost, krhkost in primernost za varjenje. Prav tako se odpornost proti koroziji veča z vsebnostjo ogljika (Kjersnsmo in sod., 2003).

V prvem delu življenjske dobe mostu korozija običajno nima pomembnega vpliva na njegovo funkcionalnost, saj antikorozijska zaščita uspešno preprečuje razvoj korozije. Kasneje, ob iztekanju življenjske dobe antikorozijske zaščite, pa prične korozija napredovati. Pojavljati se pričnejo korozijske poškodbe (mehurjenje, luščenje barve, rjavi madeži ...), ki so v večini primerov posledica splošne korozije. Z dokončnim propadom antikorozijske zaščite se pričnejo pojavljati tudi druge oblike korozije, ki povzročajo dodatno oslabitev konstrukcije.

Poglobljeno razumevanje korozije zahteva obsežno poznavanje kemije, elektrokemije in fizikalno-matematične teorije. Vendar lahko za osnovno razumevanje korozijo primerjamo s kratko sklenjeno baterijo, kjer na elektronegativnem polu poteka raztapljanje (oksidacija) železa, na pozitivnem polu pa raztapljanje (redukcija) kisika. Zaradi omejene hitrosti raztapljanja železa in kisika sta praktično oba pola na istem električnem potencialu, ki mu lahko rečemo tudi korozijski potencial. Med njima praktično ni nobene napetosti, istočasno pa med njima teče znaten električni tok, ki ga imenujemo tudi korozijski tok (Slika 26) (Kjersnsmo in sod., 2003).



NEZAŠČITENO JEKLO

Slika 26: Princip mokre korozije (Skale, 2009).

V strokovni literaturi zasledimo več kot 350 oblik korozije. Vendar pa lahko vse tipe korozije združimo v tri osnovne oblike (Evert, 1997; Kjersnsmo in sod., 2003).

Splošna ali uniformna korozija

Splošna korozija povzroči enakomerne izgube jekla prek celotne korozijsko obremenjene površine (Slika 27). Njeno hitrost običajno izražamo z izgubljeno debelino jekla v časovni enoti (npr. mm/leto ali $\mu\text{m}/\text{leto}$). Povezana je z vsemi korozijskimi obremenitvami in se običajno najprej pojavi na propadajoči antikorozijski zaščiti. S tehničnega vidika tovrstna korozija ni problematična, saj se lahko življenjska doba konstrukcije v posameznih izpostavah dobro predvidi (Evert, 1997; Kjersnsmo in sod., 2003).



Slika 27: Splošna korozija (Skale, 2016).

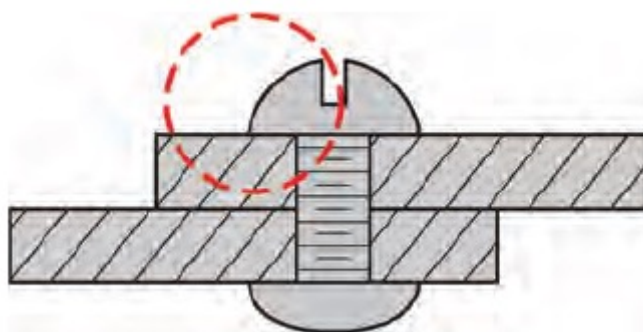
Koncentracijska ali stacionarna korozija

Koncentracijska korozija je posledica električne napetosti, ki se običajno vzpostavi zaradi razlik v koncentracijah kisika na izpostavljenih površinah. Na površinah z nizko koncentracijo kisika poteka raztapljanje jekla, na površinah z visoko koncentracijo kisika pa poteka raztapljanje kisika. Koncentracijska korozija se pojavlja v številnih pojavnih oblikah.

Najpogostejše pojavnne oblike so (Evert, 1997; Kjersnsmo in sod., 2003):

- **Špranjska korozija:** ozke špranje oz. razpoke, ki so izpostavljene tekočini, najpogosteje vodi, ki vsebuje raztopine, dajejo dovolj prostora, da tekočina vstopa vanje, hkrati pa so tako ozke, da v njih tudi obstane oz. stagnira. V takšnih primerih se lahko pojavi špranjska korozija. Gonilna sila te korozije je razlika v vsebnosti kisika zunaj in znotraj špranje. Najbolj izrazita korozija se pojavlja na površinah, ki so pasivne, npr. nerjaveče jeklo, aluminij in jeklo, v pretežno alkalnem

okolju. Špranjska korozija je najpogostejša na spojih (prekrivanju elementov), pod zakovicami (Slika 28), glavami vijakov in prekritji, npr: na površini, prekriti z umazanijo in peskom.



Slika 28: Korozija v razpoki (NACE, 2012).

- **Jamičasta korozija:** je vrsta korozije, za katero so značilni lokalizirani “napadi” na kovino. “Napadi” tovrstne korozije se kažejo v obliki jamic (Slika 29). Jamičasta korozija lahko povzroča obsežne poškodbe – premeri teh jamic so sicer relativno majhni, vendar so globoki. Prav tako so lahko te jamice prekrite s korozijskimi produkti in jih je zato težje odkriti.



Slika 29: Pojav jamičaste korozije (Skale, 2016).

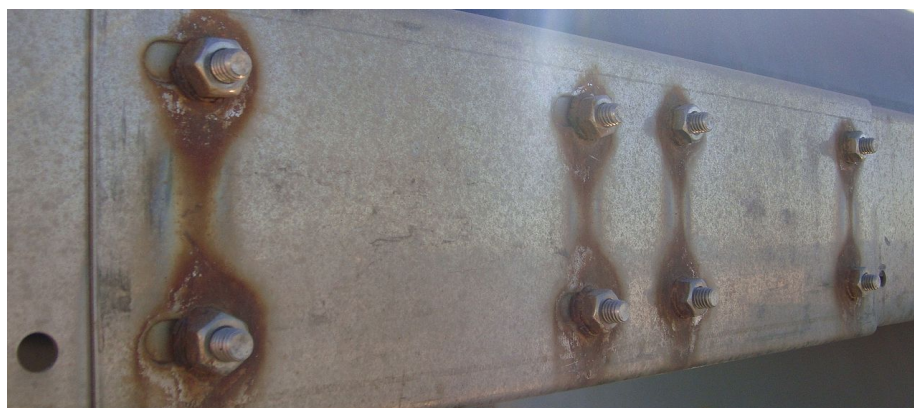
- **Mikrobiološka korozija:** je splošno priznana oblika korozije, ki jo povzročajo bakterije (Shreir in sod., 2000). Biološkega dela mehanizma še ne razumemo v celoti. Najpogostejše so anaerobne bakterije, ki namesto kisika v metabolizmu uporabljajo žveplo in namesto vode tvorijo vodikov sulfid, ki z železovimi ioni tvori železov sulfid. Ta lahko povzroči hitro jamičasto korozijo s hitrostjo penetracije tudi več kot 1 mm/leto (Slika 30) (Uhlig, 1948). Tovrstna korozija lokalno oslabi konstrukcijske elemente, zato je tudi glavni povzročitelj loma oz. pokanja. Pri zaščitenih

površinah se pojavi proti koncu življenjske dobe, ko premazni film v veliki meri več ne predstavlja ustrezne antikorozijske zaščite (Evert, 1997; Kjersnsmo in sod., 2003).



Slika 30: Anaerobna mikrobiološka korozija (Skale, 2016).

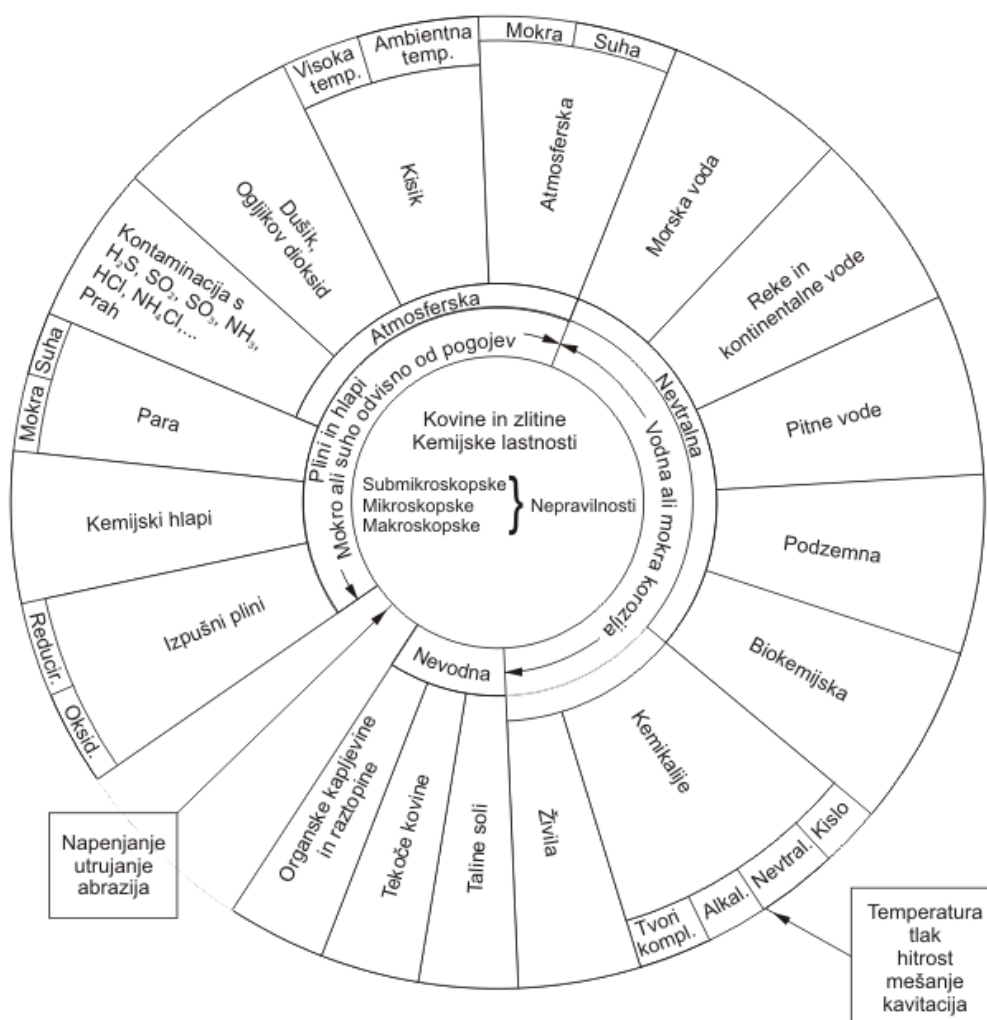
Galvanska ali bimetalna korozija: je ena najnevarnejših korozijskih oblik (Kjersnsmo in sod., 2003). Galvanska korozija je posledica stika kovin z različnimi elektrokemijskimi dinamičnimi potenciali. Korozija se prične na manj plemenitem (bolj elektronegativnem) materialu. Odvisno od razmerja površin obeh kovin pa se manifestira v obliki enakomernega propadanja manj žlahtne kovine ali pa v pojavu lokalnih korozijskih defektov. Gonilna sila galvanske korozije je razlika potencialov obeh materialov, na njeno hitrost pa močno vplivata agresivnost korozijske obremenitve oz. izpostave in razmerje med anodnimi in katodnimi površinami. Galvanska korozija se lahko prepreči oz. zmanjša z uporabo materialov za varjenje, ki so bolj plemeniti kot osnovni material, z izbiro pravih materialov, izolacijo materialov med seboj, uporabo premazov in s preprečevanjem nalaganja ionov plemenitejše kovine na površju (Kjersnsmo in sod., 2003; Shreir in sod., 2000). Prikazana je na Sliki 31.



Slika 31: Galvanska korozija (Galvanic corrosion, 2016).

4.1.1 Korozijska izpostavljenost

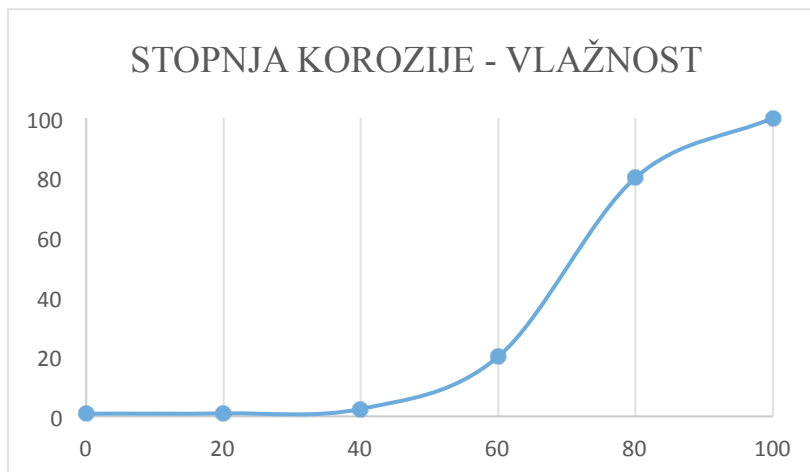
Korozija jekla, izpostavljenega atmosferi, zemlji ali vodi, je precej v skladu z zdravorazumskimi pričakovanji. Tako jeklo relativno hitreje korodira v vroči ali morski vodi kot pa v mrzli oz. sladki vodi. Podobno velja tudi pri atmosferskih izpostavah, kjer je hitrost korozije v suhem podnebju bistveno manjša kot pa v vlažni atmosferi. Na Sliki 32 je prikazan vpliv okolja na stopnjo korozije.



Slika 32: Vpliv okolja na stopnjo korozije (Shreir in sod., 2000).

Korozija v atmosferi: atmosferska korozija je eden najpogostejših pojavov korozije, saj se mu skoraj ni mogoče izogniti. Natančneje bi lahko to obliko korozije definirali kot elektrokemični proces, saj za delovanje potrebuje elektrolit. Glede na količino prisotnega elektrolita jo delimo še na mokro in suho atmosfersko korozijo (Evert, 1997; Kjersnsmo in sod., 2003).

Korozija kovin se prične pojavljati pri relativni vlažnosti 60–70 %, intenzivneje pri sekundarni kritični vlažnosti 80 %. Na Sliki 33 je prikazana stopnja korozije v odvisnosti od vlage.



Slika 33: Stopnja korozije v odvisnosti od vlažnosti (Kjersnsmo in sod., 2003).

Atmosferska korozija je diskontinuiran proces, kjer je čas, ko je površina omočena z vodo oziroma elektrolitom, odločilnega pomena. Pomembno vlogo na agresivnost korozije imajo tudi atmosferske nečistoče, kot so žvepovi in dušikovi oksidi, prisotnost kloridnih ionov, amonijaka in vodikovega sulfida (Shreir in sod., 2000).

Ločimo 5 območij atmosferske izpostavljenosti, in sicer (Kjersnsmo in sod., 2003):

- **Korozijska izpostavljenost C1 – zelo nizka:** večinoma so to zaprti prostori, kjer so konstantni klimatski pogoji s čistim zrakom – pisarne, trgovine, šole, hoteli ...
- **Korozijska izpostavljenost C2 – nizka:** okolja z nižjo stopnjo onesnaženja – podeželje, neogrevane stavbe z možnostjo pojava kondenza (depoji, športne hale ...). V Sloveniji bi lahko za takšna območja vzeli npr. mariborsko Pohorje, Soriško planino ...
- **Korozijska izpostavljenost C3 – srednja:** najpogosteje uporabljena stopnja izpostavljenosti; to so območja, kjer je onesnaženost z SO₂ (žveplov dioksid) srednja oz. zmerna. Sem spadajo vsa manjša mesta, proizvodni obrati. V Sloveniji so takšna mesta manjši kraji, kjer industrija ni razvita.
- **Korozijska izpostavljenost C4 – velika:** območja, ker je izpostavljenost SO₂ velika in je posledično tudi stopnja korozije visoka. Sem sodijo vsa večja mesta, območja ob avtocestah, kemičnih industrijah, območja bližje morju (kjer je slanost zmerna).
- **Korozijska izpostavljenost C5 – zelo velika:** območja, kjer je izpostavljenost žveplovemu dioksidu in soli zelo velika. To območje delimo na industrijsko **C5-I**, kjer so vsi kemični obrati, območja z visoko stopnjo vlage, veliki onesnaževalci, ter na **C5-M**, kamor spadajo vsi objekti, ki so neposredno ob morju ali v njem (naftne ploščadi) in na območju plimovanja.

V Preglednici 3 je predstavljena izguba materiala, ki jo predvideva standard ISO 12944-2 v različnih atmosferskih izpostavah.

Preglednica 3: Izguba materiala v različnih atmosferskih izpostavah (ISO 12944-2: 1998).

ATMOSFERSKE IZPOSTAVE						
Kategorije korozije	Izguba mase na enoto površine/debeline (v prvem letu izpostave)				Primeri tipičnih izpostav zmernem klimatske območju (informativno)	
	Navadna jekla		Cink		Zunanje	Notranje
	Izguba mase g/m ²	Izguba debeline µm	Izguba mase g/m ²	Izguba debeline µm		
C1 zelo nizka	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Ogrevane zgradbe s čisto atmosfero, npr. pisarne, trgovine, šole ...
C2 nizka	> 10–200	> 1,3–25	> 0,7–5	> 0,1–0,7	Atmosfera z nizko onesnaženostjo – podeželje	Neogrevane zgradbe, kjer lahko pride do kondenzacije; npr. skladišča, hale
C3 srednja	> 200–400	> 25–50	> 5–15	> 0,7–2,1	Urbane in industrijske atmosfere, zmerno onesnažene s SO ₂ , obmorske izpostave z nizko slanostjo	Proizvodni prostori z visoko vlago in nekaj onesnaženja; npr. proizvodnje hrane, pivovarne, pralnice ...
C4 visoka	> 400–650	> 50–80	> 15–30	> 2,1–4,2	Industrijska in obmorska območja z zmerno slanostjo	Kemijski obrati, bazeni, obalne ladje, ladjedelnice
C5-I zelo visoka (industrijska)	> 650–1500	> 80–200	> 30–60	> 4,2–8,4	Industrijska območja z visoko vlago in agresivno atmosfero	Zgradbe s skoraj stalno kondenzacijo in visoko onesnaženostjo
C5-M zelo visoka (morska)	> 650–1500	> 80–200	> 30–60	> 4,2–8,4	Obalna in morska področja z visoko slanostjo	Zgradbe s skoraj stalno kondenzacijo in visoko onesnaženostjo
IZPOSTAVE PRI POTOPITVI V VODO ALI PRI V ZEMLJO VKOPANIH POVRŠINAH						
Kategorije korozije	Okolje(Izpostava)			Primeri tipičnih izpostav in struktur/oprem		
Im 1	Sladka voda			Obrati na rekah, hidroelektrarne ...		
Im 2	Morska in delno slana voda			Pristaniški objekti, kot so zapornice, jezovi, pomoli in nasip ...		
Im 3	Zemlja			Vkopani rezervoarji, temelji in cevovodi		

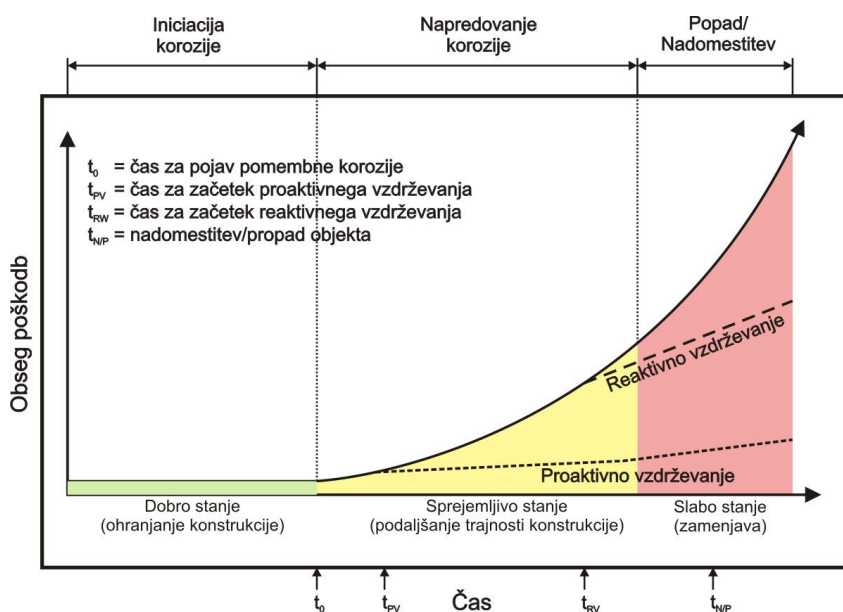
Korozija v vodi: ločimo glede na tip vode: sladka ali slana. Pojavi korozije v vodi so odvisni od temperature, pH-vrednosti, vsebnosti kisika in soli v vodi. Tovrstno izpostavljenost kategoriziramo kot Im 1 in Im. *Sladka voda – Im 1:* ločimo dva tipa sladke vode – mehko in trdo, razlika med njima je v vsebnosti kalcijevih in magnezijevih soli. Kadar je koncentracija teh soli velika, se bo pričel izločati kalcijev karbonat, ki zmanjša stopnjo korozije. Mehka voda pa ima manjšo vsebnost kalcija, zato je tudi bolj korozijska. Tipični primeri objektov: obrati na rekah, hidroelektrarne ... *Morska voda – Im 2:* morska oz. slana voda ima konstantno sestavo in korozivnost. Vsebnost soli je v povprečju 3,5 % in pH 8,1. Zaradi vsebnosti kloridov se lahko pričakuje relativno visoka korozijska stopnja jeklenih konstrukcij, ki jo do določene mere prav tako znižujeta kalcijeva in magnezijeva sol, saj tvorijo nekakšne zaščitne plasti. To pride do izraza v kombinaciji s katodno zaščito, kjer se zaradi kalcijevih in magnezijevih soli na površini in zaradi formacije hidroksidov, ki zvišajo pH, dobi nižja stopnja korozije. Korozija je odvisna od vsebnosti kisika, zato je območje plimovanja (t. i. *splash zone*), kjer je voda najbolj "bogata" s kisikom in kjer se neprestano spirajo zaščitne plasti kalcijevih in magnezijevih soli, najbolj na udaru. Tipični primeri objektov: pristanišča, jezovi, zapornice, pomoli ... (Kjersnsmo in sod., 2013).

Korozija v zemlji: konstrukcije, ki so v celoti ali delno vkopane v zemljo, so prav tako izpostavljene koroziji. Stopnja korozije je v največji meri odvisna od vlažnosti, vsebnosti soli in kisika, pH-vrednosti, vrste zemlje ... in je lahko tudi zelo agresivna. Zato je, da bi se izognili tovrstni koroziji, pomembno, da sta zagotovljeni dobra drenaža in ustrezna zaščita (debeloslojni premazi katrana oz. gume). Tipični primeri: podzemni rezervoarji in cevovodi ... (Kjersnsmo in sod., 2013).

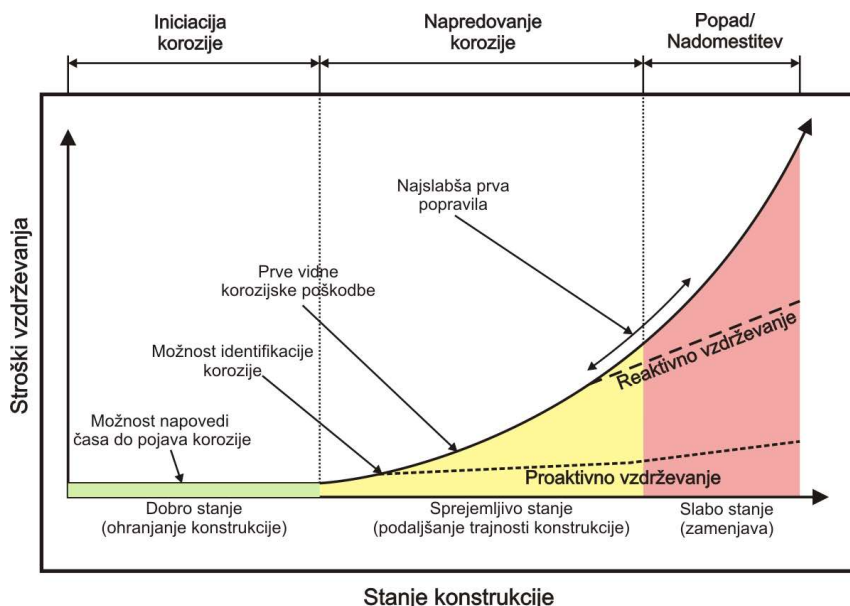
4.2 Obvladovanje korozije – antikorozijska zaščita

Obseg korozijskih poškodb se s časom pospešeno povečuje. Če imamo prvo leto 2 % obseg poškodb, jih lahko naslednje leto pričakujemo od 1,5- do 2-krat več. Torej skupno 5–6 % odstotkov po dveh letih (Slika 34). Zato lahko z ustreznim spremljanjem stanja in smotrnim načrtovanjem vzdrževalnih aktivnosti bistveno znižamo stroške korozije (Slika 35). Če se k sanaciji ne pristopi pravočasno, lahko stroški te presežejo strošek investicije nadomestne oz. novogradnje objekta (NACE, 2012).

Najbolj uveljavljen pristop k obvladovanju korozije je antikorozijska zaščita s premazi – barvo. Uveljavljene so tudi različne oblike katodne zaščite (aktivna katodna zaščita, vroče pocinkanje, metalizacija ...). V zadnjem času pa se pojavlja tudi alternativna uporaba pasiviranih jekel, ki ne zahtevajo antikorozijske zaščite.



Slika 34: Propad konstrukcije zaradi korozije v odvisnosti od časa (NACE, 2012).



Slika 35: Stroški vzdrževanja konstrukcije v odvisnosti od stopnje korozije (NACE, 2012).

4.2.1 Zgodovinski pregled sistemov zaščite za jeklene mostne konstrukcije

Do prve svetovne vojne so bili praktično edini materiali, ki so bili na voljo za antikorozijsko zaščito, naravnega izvora (laneno olje, bitumen, asfalt). Trajnost jeklenih konstrukcij se je zagotavljala predvsem z ustreznim predimenzioniranjem elementov in tako se jeklene mostne konstrukcije do konca druge svetovne vojne sploh niso antikorozijsko zaščitile. V prvem desetletju po drugi svetovni vojni pa smo bili priča (tudi zaradi propadajoče infrastrukture, zgrajene v času vojne) uveljavitve antikorozijske zaščite z oljnimi premazi in zgodnjim kratkooljnimi kvalitetami alkidnih premazov. V sredini 50. let prejšnjega stoletja so se pojavili klorkavčukovi premazi (za agresivne, predvsem kislinske obremenitve), kmalu so jim v 60. letih sledili alkidi (ti so postopoma nadomestili oljne premaze), katranski premazi (za v vodo potopljene površine), prve oblike epoksi premazov in nato v 70. letih še silikatni, poliuretanski in akrilni premazi. Glavni antikorozijski pigment je do začetka 80. let prejšnjega stoletja ostal svinčeni minij, po tem pa je bil zaradi izredne strupenosti opuščen. V zadnjih 30 letih smo priča pospešenemu razvoju antikorozijskih premazov. Uveljavila so se številna nova veziva (enokomponentni poliuretani, aspartati, polisiloksani, poliurea ...), polnila in aditivi.

Peskanje mostnih jeklenih konstrukcij se prične uveljavljati šele v 70. letih prejšnjega stoletja z uveljavitvijo pasivnih katodnih zaščit (s cinkom bogatih temeljev) in sodobnih dvokomponentnih kvalitetnih materialov (epoksi, poliester ...), ki slabše močijo površino. Peskanje kot glavne oblike priprave jeklenih mostnih konstrukcij se je v globalnem smislu pričelo uveljavljati v drugi polovici 80. let. V zadnjih 20 letih smo priča razvoju številnih novih načinov priprave površin. Najpomembnejši sta bili ultravisoko tlačno pranje z vodo (angl. *water jetting*) in strojno čiščenje površin do bele kovine.

Obe metodi predstavljata dobrodošli alternativni za peskanje. Vendar pa peskanje ostaja še vedno glavna in najkvalitetnejša oblika priprave površin v sodobnih dolgoročnih sistemih zaščite jeklenih mostnih konstrukcij (Forsgren, 2006).

4.2.2 Tehnološki postopki izvedbe antikorozijske zaščite (AKZ)

Uspešno obvladovanje korozije z antikorozijskimi premazi zahteva celovito razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na izvedbo in kasnejšo življenjsko dobo antikorozijske zaščite. Ta je definirana kot časovno obdobje, v katerem antikorozijska zaščita prepreči razvoj korozijskih fenomenov na objektu (Kjersnsmo in sod., 2013). V jedru vsake specifikacije AKZ je sistem zaščite, ki opredeli zahteve kvalitete za pripravo površin in število, kvaliteto in debelino suhega filma premazov. Na Sliki 36 so prikazani vsi dejavniki AKZ.



Slika 36: Dejavniki antikorozijske zaščite (Skale, 2016).

4.2.3 Priprava jeklenih površin

Priprava jeklenih površin pred nanosom zaščitnih premazov – barv je ena izmed najpomembnejših faz pri izvedbi antikorozijske zaščite, saj čista, suha in ustrezno hrapava površina zagotovi najboljšo trajnost premaznega sistema. Metode za pripravo površine lahko v grobem razdelimo v tri skupine, in sicer na razmaščevanje, odstranjevanje umazanij in drugih nečistoč ter na odstranjevanje rje, “škaje

oz. cundra” oz. drugih sprijetih snovi s površino ter na kemična obdelavo površin s pasivatorji. Dejavniki, na katere moramo biti pri tem pozorni, so: obdelava nepravilnosti, prisotnost škaje oz. cundra, stopnja rje, prisotnost površinskih kontaminacij (olja, prah, soli ...) in hrapavost površine.

Pod pojmom kontaminacije razumemo različno umazanijo oz. nečistoče, ki so na površini. Večinoma ima kontaminacija zelo slabo oprijemljivost s površino in je higroskopična. Če gre za olja in masti, imajo ti tudi visoko površinsko napetost; glavni problem kontaminacije je torej slaba oprijemljivost. Delimo jo v dve skupini: vidna (kondenzacija, prah, olja, masti, rja, škaja oz. cunder) in nevidna kontaminacija (soli) (Kjersnsmo in sod., 2013). Ker lahko pri pripravi površin uporabimo tudi več načinov, je treba za pravilno določitev tehnologije poznati naslednje stvari: ali imamo opravka s staro oz. novo površino, kakšna je zahtevana oz. zelena priprava površine, razpoložljiva oprema in kader, premazni sistem, stroške ter veljavne zakone (saj je npr. nekje peskanje tudi prepovedano).

Pripravo površin opisuje standard ISO 8501. Ta zajema pregled in vrednotenje začetnega stanja površine, različne načine in stopnje priprave površine in slike za primerjavo.

Poznamo več načinov priprave površin, in sicer ročno, s plamenom, s peskanjem in vodnim curkom, ki so opisani v nadaljevanju.

Ročna priprava površin: je enostavna, uporabna na težko dostopnih mestih in relativno poceni. S pravilno uporabo in ustrezno opremo se lahko doseže takšna pripravljena površina, da je primerljiva peskanju. Vsekakor pa takšna priprava ni primerna za večje površine, saj je produktivnost s takšno opremo nizka in posledično tudi dražja (Kjersnsmo in sod., 2013). Ločimo dve stopnji ročnih priprav površin:

- St 2: temeljito ročno oz. mehansko čiščenje površine; če se pogleda brez povečave, mora biti površina čista vseh vidnih olj, masti, umazanij, slabo oprijete rje, slabo oprijete škaje oz. cundra in slabo oprijetih premazov,
- St 3: priprava površine kot pri St 2, vendar bolj temeljita. Površina mora imeti kovinski sijaj.

Potrebna oprema za izvedbo ročne priprave površin so žična krtača, strgalo, brusni papir, igelna pištola, brusilke z različnimi brusilnimi diski (ISO 8501, 1998).

Priprava površine s plamenom: se redko uporablja. Z njo se lahko odstranijo nečistoče, stari premazi, cunder oz. škaja, hrapavosti površine pa s tem ne dosežemo. Če se očiščena površina pogleda brez povečave, mora biti očiščene vseh nečistoč, škaje oz. cundra, starih premazov. Vsi ostali ostanki se lahko vidijo le kot različno obarvana površina (Kjersnsmo in sod., 2013).

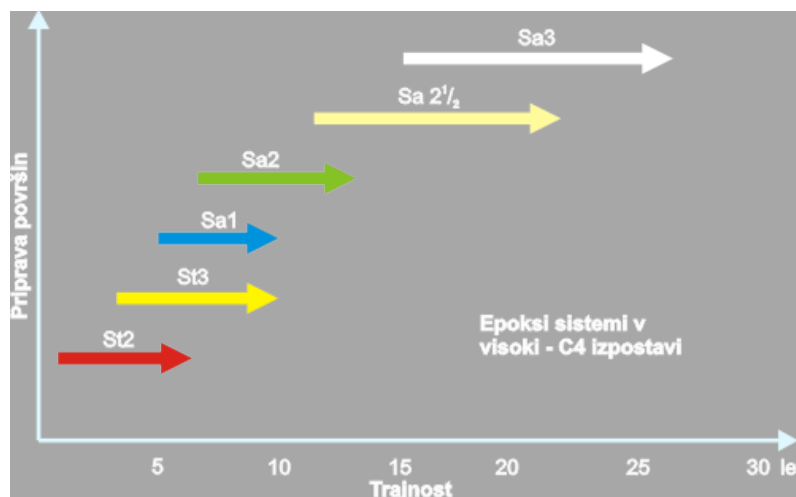
Priprava površine s peskanjem: je najkvalitetnejša priprava površine in za nekatere vrste premaznih sistemov tudi izredno zahtevana (cinkove barve, delavniški temelj). Lahko se izvaja tako na terenu kot

v delavnici. S pomočjo komprimiranega zraka udari abraziv z veliko hitrostjo (300 km/h in 7 barov pri standardni šobi; 700 km/h in 7 barov pri venturi šobi) ob površino ter tako odstrani rjo, škajo oz. cunder, stare premaze ... Bistvena prednost peskanja pred ostalimi pripravami površine je predvsem v tem, da se s tem postopkom dobi ustrezna hrapavost. Za hrapavost lahko izbiramo med različnimi mediji oz. abrazivi, kot so kremenčev pesek, jekleni sekanec, bakrova žindra, jeklene kroglice, sekana žica ... V glavnem delimo abrazivne materiale na kovinske in nekovinske ter na obliko profila, ki ga naredijo – ostrorobi abraziv in "šibre" oz. kroglice. Med vsemi naštetimi materiali je kremenčev pesek najpogosteje uporabljen material, saj daje površina, pripravljena z njim, najboljši kovinski sijaj, material pa kot odpad ni sporen (Kjersnsmo in sod., 2013).

Ločimo med štirimi stopnjami priprave površin s peskanjem (ISO 8501, 1998):

- Sa 1: pranje s peskom; gledano s prostim očesom mora biti površina čista vseh nečistoč, vidnih olj in masti, slabo oprijete rje, slabo oprijete škaje oz. cundra in starih premazov.
- Sa 2: temeljita priprava površine s peskanjem; gledano s prostim očesom mora biti površina čista vseh nečistoč, vidnih olj in masti, slabo oprijete rje, slabo oprijete škaje oz. cundra in starih premazov. Preostala kontaminacija mora biti čvrsto pritrjena.
- Sa 2,5: zelo temeljita priprava površine s peskanjem; gledano s prostim očesom mora biti površina čista vseh nečistoč, vidnih olj in masti, slabo oprijete rje, slabo oprijete škaje oz. cundra in starih premazov. Vsa preostala kontaminacija je lahko vidna le v obliki drobnih madežev v obliki pik ali črt.
- Sa 3: (zelo temeljita priprava površine s peskanjem) gledano s prostim očesom mora biti površina čista vseh nečistoč, vidnih olj in masti, slabo oprijete rje, slabo oprijete škaje oz. cundra in starih premazov. Površina mora imeti enotno kovinsko barvo.

Slika 37 prikazuje odvisnost načina priprave površine od trajnosti antikorozijske zaščite.



Slika 37: Odvisnost načina priprave površine od trajnosti antikorozijske zaščite (Skale, 2016).

Hrapavost površine je zelo pomembna za oprijemljivost premaznega sistema. Če želimo, da imamo dobro oprijemljivost barve s podlago, mora biti hrapavost skladna z zahtevami in navodili proizvajalca barv. Najpogosteje se hrapavost giblje od 20 do 30 μm (kremečev pesek) pa do 60 do 80 μm (bakrena žindra, jekleni sekanec ...). Hrapavost površine je definirana kot srednja vrednost med maksimalno višino in globino profila na referenčni površini. Njeno natančno meritev opisuje standard ISO 8503, kjer so tudi natančno opisani postopki meritve hrapavosti z določenimi instrumenti (ISO comparator, Replica tape, Analogni merilec) (ISO 8501-1, 2007; ISO 8503-2, 2012; Kjersnsmo in sod., 2013).

Priprava površine z vodnim curkom: je metoda priprave površine, ki je dokaj nova in se v praksi šele uveljavlja. Razvila se je predvsem kot alternativa peskanju, saj se pri peskanju ustvari veliko odpadnega materiala, prahu in tudi hrupa. Pri pripravi površine z vodo so okoljski vplivi minimalni, zmanjša se hrup, odstranijo se vse nečistoče, stari premazi, olja in maščobe ter soli, ki se s peskanjem ne odstranijo. Ima pa ta metoda, kakor vse druge, tudi slabosti, kot so pojav rje, hrapavost površine, oprema je lahko nerodna za težje dostopna mesta, potrebna je čista (pitna) voda, problematična je uporaba v bližini električnih napeljav oz. vodov, pri večjih pritiskih je delo s takšno opremo zelo fizično naporno. Priprava površine z vodnim curkom je lahko alternativa peskanju pri pritisku od 1600 barov (Kjersnsmo in sod., 2013).

Pripravo površine z vodo delimo v tri skupine:

- Wa 1: če se pogleda s prostim očesom, mora biti površina čista vseh nečistoč, olj in masti, slabo oprijete rje in slabo oprijetih premazov. Vsa preostala kontaminacija mora biti naključno razpršena in čvrsto oprijeta.
- Wa 2: če se pogleda s prostim očesom, mora biti površina čista vseh nečistoč, olj in masti, slabo oprijete rje in slabo oprijetih premazov. Vsa preostala kontaminacija mora biti naključno razpršena v obliki dobro oprijetih premazov in čvrsto oprijetih sledi rje.
- Wa 2,5: če se pogleda s prostim očesom, mora biti površina čista vseh nečistoč, olj in masti, slabo oprijete rje in prejšnjih premazov (razen manjših sledi). Razbarvanost površine je dovoljena tam, kjer prvotni premaz ni bil poškodovan, prav tako se mora odstraniti vsa siva/črna razbarvanost zaradi korozije.

Prav tako razlikujemo med tremi razredi visokotlačnega pranja:

- LPWC (nizkotlačno čiščenje z vodo): pritisk do 340 barov,
- HPWC (visokotlačno čiščenje z vodo): pritisk od 340 do 680 barov,
- HPWJ (visokotlačno pranje z vodo): pritisk med 680 in 2100 barov,
- UHPWJ (ultra visokotlačno pranje z vodo): pritisk nad 2100 barov.

4.2.4 Priprava materiala za nanašanje

Pri pripravi materiala za nanašanje je treba dosledno spoštovati zahteve, ki so opredeljene v tehničnih informacijah (razmerje mešanja, trajnost zmesi, reakcijski čas, obseg redčenja, vrsta razredčila ...). Antikorozijski premazni materiali so močno napolnjeni s polnili, zato je treba vsako komponento po odprtju posod najprej temeljito ločeno razmešati. Če je treba, se doda komponenta B v komponento A (vedno dodajamo tisto komponento, ki ima nižjo viskoznost). Pri razmerju mešanja je treba strogo spoštovati, da se zagotovi pravilno utrjevanje premazov. Za zagotavljanje aplikativnosti uporabljamo razredčila, ki jih specificira proizvajalec materiala. Obseg redčenja naj bo čim manjši, saj se z zniževanjem viskoznosti znižuje tudi debelina nanosa premaza. Prevelike količine razredčila namreč bistveno povečajo poroznost filma, kar ima za posledico skrajšano življenjsko dobo premaza. Pri mešanju si pomagamo z uporabo električnih ali pnevmatskih mešal. Hitrost mešanja je treba prilagoditi viskoznosti materiala tako, da ne pride do pretiranega vključevanja zraka v premazni sistem. Pri pripravi količine materiala naj ta ne presega potrebne količine za čas izvajanja del (ISO 12944-7, 1998).

4.2.5 Načini nanašanja premaznih materialov

Načine nanašanja je treba prilagoditi obsegu, tipu podlage ter pogojem nanašanja, zato je pomembno dosledno spoštovati tehnične informacije. V splošnem naj se ročne metode (čopiči in valjčki) uporabijo za zaščito manjših zaključenih površin (do ca. 50 m²), pri večjih površinah se ročne metode uporabijo pri izvedbi popravil, pri vzdrževanju, za prednamaz robov, za težko dostopna mesta, drobne konstrukcije in ostale površine, ki odstopajo od priporočil ISO 12944-3. Čopiči naj bodo s primernih materialov in ploščati. Radiator čopiči se lahko uporabijo samo za čiščenje/razmaščevanje opreme in prednamaze nedostopnih površin (npr. zadnji rob pasnic).

Kadar so površine širše od 10 cm, lahko uporabimo tudi valjčke, ki morajo biti kratkodlaki in iz naravnih materialov (volna, krzno). Kvaliteta (odpornost proti topilom in razredčilom) čopičev in valjčkov mora biti primerna za specificirane premazne materiale. Če so površine večje od 50 m² in nam pogoji to omogočajo, se površine lahko zaščitijo tudi z brizganjem (angl. *airless*). Pri tem je treba kot brizganja prilagoditi dimenzijam konstrukcijskih elementov, ostali parametri brizganja (tip črpalke, velikost šobe, tlak barve) pa morajo zadostovati vsaj minimalnim zahtevam v tehničnih informacijah oziroma potrebnemu premeru in dolžini visokotlačnih *airless* cevi (ISO 12944-2, 1998; Kjersnsmo in sod., 2013).

4.2.6 Medslojni intervali in končno utrjevanje

Na hitrost utrjevanja dvokomponentnih premaznih materialov ima bistven vpliv temperatura, zato je pri izvedbi antikorozijske zaščite treba dosledno spoštovati čase o uporabnosti zmesi, medslojnih intervalih in sušenju ter jim prilagoditi organizacijo in dinamiko svojega izvajanja (ISO 12944-2, 1998).

4.2.7 Omejitve, povezane z izvajanjem antikorozijske zaščite

Z izvajanjem površinske zaščite se lahko prične:

- ko so jasno opredeljene površine, ki so predmet zaščite in površine, ki se ne barvajo,
- ko so jasne vse aktivnosti, povezane z aplikacijo premaznih materialov (priprava, nanašanje, varnostni ukrepi),
- ko so bile izvedene vse predvidene/zahtevane kontrolne aktivnosti,
- če se z izvajanjem nikogar ne ogroža.

Če navedeni pogoji niso izpolnjeni ali pa v primeru dvoma, se dela ne smejo pričeti (Kjersnsmo in sod., 2013).

4.2.8 Sistemi antikorozijske zaščite

Ker pravilno pripravljena površina, pravilna priprava materialov in pravilne aplikacije teh materialov same po sebi ne rezultirajo v dolgi življenjski dobi in kvalitetni izvedbi antikorozijske zaščite, je zelo pomembna tudi pravilna izbira sistema antikorozijske zaščite. Zato so v nadaljevanju predstavljeni trije primeri sistemov antikorozijske zaščite jeklenih mostnih konstrukcij glede na trajnost:

1. Trajni (nad 25 let) sistem zaščite:

- peskanje površin do stopnje Sa 3 po ISO 8501-1,
- metalizacija s cinkom ali aluminijem v debelini 100–150 µm,
- epoksi poliuretanski sistem zaščite v debelini, odvisno od atmosferske obremenitve (160–320 µm).

ali

- peskanje površin do stopnje Sa 2,5 po ISO 8501-1,
- enkratni nanos cink-silikatnega premaza v debelini suhega filma 75 µm,
- siloksanski sistem zaščite v debelini odvisno do atmosferske obremenitve (200–400 µm).

2. Dolgoročni (15–25 let) sistem zaščite:

- peskanje površin do stopnje Sa 2,5 po ISO 8501-1,
- temeljni premazi, bogati s cinkom (50–75 µm) – odvisno od atmosferske obremenitve,
- epoksi poliuretanski ali enokomponentni poliuretanski sistemi zaščite v debelini odvisno od

atmosferske obremenitve (200–320 μm).

3. Standardni (10–20 let) sistem zaščite:

- peskanje površin do stopnje Sa 2,5 po ISO 8501-1 ali visokotlačno vodno pranje do stopnje Wa 2–2,5 po ISO 8501-4,
- epoksi poliuretanski, enokomponentni poliuretanski, aspartatni sistemi zaščite v debelini odvisno od atmosferske obremenitve (160–280 μm).

4.2.9 Kontrola kvalitete

Kontrola kvalitete površinske zaščite se izvaja v skladu z ISO 12944-7. Z izvedenimi kontrolnimi aktivnostmi je treba dokazati skladnost izvedene antikorozijske zaščite z zahtevami specifikacije, kar v splošnem pomeni, da se poleg kontrole kvalitete, spremljajo naslednji dejavniki:

vhodna in fazna kontrola materialov (zagotavljanje sledljivost materialov), spremljanje klimatskih pogojev, pregled primernosti za izvajanje, pregledi priprave površin, pregledi posameznih slojev premazov in končna kontrola (Kjersnsmo in sod., 2013).

Spremljanje klimatskih pogojev: obvladovanje in spremljanje klimatskih pogojev je osnova za kvalitetno izvedbo antikorozijske zaščite. V osnovi morajo biti med izvajanjem in v prvi fazi utrjevanja (do prašno suhih premazov) zagotovljeni naslednji pogoji (ASTM E337, 2007; ISO 8502-4, 1993):

- temperatura rosišča mora biti vsaj 3 °C nad temperaturo jeklene podlage,
- relativna vlažnost ne sme presežati 80 % (nad 80 % lahko pride do kapilarne kondenzacije vlage),
- jeklene površine morajo biti suhe,
- temperatura jeklene podlage mora biti primerna za nanos in utrjevanja premaznih materialov v skladu z navodili dobavitelja premaznih materialov (običajno min. 10 °C),
- temperatura premaznega materiala mora biti primerna za pripravo in nanašanje v skladu z navodili dobavitelja premaznih materialov (običajno min. 10 °C).

Pregled priprave površin: vse pripravljene jeklene površine je pred nanosom premaznega sistema treba pregledati. Kontrola priprave površin zajema verifikacijo (ISO 8501-1, 2007; ISO 8503-2, 2012):

- dosežene stopnje priprave površin na podlagi primerjave z vizualnim standardom ISO 8501-1,
- dosežene hrapavosti opeskane površine v skladu z ISO 8503-2.

Kontrola delovnih faz: kontrola delovnih faz zajema kontrolne metode, s katerimi se dokazuje doseganje zahtev v projektni dokumentaciji na podlagi specifikacij načrta kontrole. Pri kontrolnih metodah, ki temeljijo na meritvah (npr. meritve debeline suhega filma), je treba zagotoviti točnost –

pravilnost izmerjenih vednosti, preciznost – nezanesljivost pri določitvi povprečnih vrednosti ter obnovljivost – objektivnost meritev (Kjersnsmo in sod., 2013).

Meritve debeline suhega filma: meritve debeline suhega filma se izvedejo z nedestruktivnimi merilniki na principu magnetne indukcije. Merilniki se neposredno pred meritvijo kalibrirajo na merilnem območju s kalibracijskimi folijami. Upoštevati je treba korekcijo hrapavosti skladno s standardom ISO 19840:2004. Če se meritve izvajajo hkrati z večjim številom merilnikov, je treba vse merilnike kalibrirati na istem nizu kalibracijskih folij.

Za dokazovanje kvalitetne izvedbe AKZ je treba dokazati:

- interval zanesljivosti (μ) povprečne debeline novonanesenega premaza sistema mora pokriti specificirano debelino premaza,
- minimalno izmerjeno mesto (povprečje vsaj treh meritev na površini, ne večji od 1 dm²) ne sme biti nižje od 80 % specificirane debeline.

Meritve debeline suhega filma se izvajajo v skladu s standardi ISO 2178, ISO 12944-7 in ISO 19840.

Ugotavljanje adhezije: Za zagotavljanje primerne kvalitete premaznega sistema je treba zagotoviti primerno kohezijo (notranjo trdnost premazov) in adhezijo (oprijem na podlago in med premazi). Premazni sistem mora torej vzdržati silo 2 N/mm² (»Pul1-off test«, ISO 4624). Kot alternativna metoda za ugotavljanje adhezije se lahko uporablja ASTM D 3359 – »X-cut« test, po katerem mora premazni sistem izkazovati adhezijo minimalno 5A. V primeru dvoma o ustreznosti adhezije se izvede »Pul1-off test« po ISO 4624.

Končna kontrola: končne meritve debeline suhega filma se izvedejo na primerno (ca. 24 ur po nanosu zadnjega premaza – odvisno od klimatskih pogojev) mehansko utrjenih površinah. V vsakem primeru je treba meritve debelin opraviti pred potekom medstojnih intervalov, da je mogoče eventualna odstopanja brez predhodne aktivacije površin odpraviti z dodatnimi nanosi.

Kriteriji sprejemljivosti so:

- Interval zanesljivosti povprečne debeline novonanesenega premaznega materiala leži na specificirani debelini. Na površinah ni bilo izmerjeno mesto (povprečje vsaj treh meritev na površini, ne večji od 1 dm²) pod 80 % specificirane debeline.
- Na površini ne smejo biti neprebarvana in porozna mesta.
- Adhezija min. 2 N/mm² po ISO 4624, 5A po ASTM D 3359.

5 STANJE JEKLENIH ŽELEZNIŠKIH MOSTOV V SLOVENIJI

Večina jeklenih železniških mostov v Sloveniji je stara več kot 80 let in so s stališča stopnje korozije zelo slabi. Vzrok za to je tudi neredno vzdrževanje antikorozijske zaščite mostov oz. zanemarjanje tega področja vzdrževanja. V Sloveniji imamo še vedno številne mostove, ki so bili nazadnje antikorozijsko obnovljeni pred 25 in več leti. Prav tako so ti mostovi projektirani glede na način in zahteve takratnega časa, te pa se s trendom naraščanja tovora in teže vlakov bistveno razlikujejo od današnjih. Posledično so ti mostovi tudi funkcionalno zastareli.



Slika 38: Stanje dotrajane mostne konstrukcije.

5.1 Analiza stanja in rekonstrukcij jeklenih železniških mostov v Sloveniji

Podatke za analizo starosti in analizo rekonstrukcij jeklenih železniških mostov v Sloveniji sem dobil v bazi jeklenih železniških mostov na spletni strani <http://pokreativnipoti.fgg.uni-lj.si>. Podatki o mostovih so bili zbrani z namenom informiranja upravljavca, zato jih nisem dodatno preverjal. Baza je nastala leta 2015 in vsebuje podatke o 130 izbranih jeklenih železniških mostovih v Sloveniji. Tabela vseh jeklenih železniških mostov v Sloveniji s podatki je v PRILOGI A. Izhodiščni podatki, ki sem jih uporabil, so bili: tip proge, leto izgradnje, leto rekonstrukcije in dolžina mostov.

5.1.1 Analiza starosti

V povprečju so jekleni železniški mostovi stari 83 let.

Najstarejši mostovi krepko presegajo življenjsko dobo 100 let, saj so bili zgrajeni davnega leta 1860 (Most Ptuj, Most Ptuj inundacija in most Rogoznica), medtem ko je odstotek mostov, starejših od 100 let, prav tako velik in znaša 46 % (oz. 60 mostov). Najnovejši jekleni železniški most je bil leta 2001 zgrajen čez cesto v Laškem.

Mostov, izgrajenih na regionalnih progah, je 62 % (oz. 81 mostov) in so v povprečju stari 94 let, mostov, izgrajenih na glavnih progah, pa je 38 % (oz. 49 mostov) in so v povprečju stari 64 let.

5.1.2 Analiza rekonstrukcije

Mostov, katerih projektna življenjska doba je že presežena (torej so starejši od 100 let) in so bili rekonstruirani, je 45 od 60 mostov oz. 35 % vseh jeklenih železniških mostov. Mostov, katerih projektna življenjska doba je že presežena (torej so starejši od 100 let) in še niso bili rekonstruirani, je 15 od 60 oz. 12 % vseh jeklenih železniških mostov.

Povprečna starost mostov, ki še niso doživeli rekonstrukcije, znaša 65 let, njihov odstotek znaša 54 % (oz. 70 mostov). Od tega jih je 54 % (38 mostov) izgrajenih na regionalnih progah, katerih povprečna starost je 71 let, ter 46 % (32 mostov) na glavnih progah, katerih povprečna starost je 59 let.

V povprečju so jekleni železniški mostovi rekonstruirajo na 41 let, vendar so pri tem tudi velika odstopanja; na primer najdaljša doba od izgradnje do rekonstrukcije znaša 130 let (mostovi pri Ptuju), most čez Boračevski potok, ki je bil zgrajen leta 1890, pa še ni bil rekonstruiran.

Iz analize je tako razvidno, da je večina mostov že dosegla svojo projektirano življenjsko dobo in da so intervali vzdrževanja dolgi, zato lahko posledično rečemo, da so mostovi že dotrajani. Slika 39, Slika 40 ter Slika 41 prikazujejo dotrajano stanje mostne konstrukcije jeklenega mostu.



Slika 39: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 1.



Slika 40: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 2.



Slika 41: Stanje dotrajane mostne konstrukcije – detajl 3.

Kadar govorimo o dotrajnosti jeklenih mostov, se moramo zavedati, da mostovi niso dotrajani samo zaradi mehanskih obremenitev in utrujanja, ampak so izpostavljeni tudi atmosferskim vplivom, oz. povedano drugače, material se s časom degradira, kar je posledica korozije. Zato lahko v tem primeru govorimo tudi o korozijskem utrujanju. Slika 42 prikazuje pojav korozije v konstrukcijskem detajlu, ki je zakrit z odpadlo barvo in umazanijo.



Slika 42: Pojav korozije v konstrukcijskem detajlu, zakrit z odpadlo barvo in umazanijo.

5.2 Korozijsko utrujanje

Korozijsko utrujanje je pojav, ko korozija in utrujanje materiala delujeta hkrati, in je kot tak veliko bolj nevaren kot korozija ali utrujanje posamezno. Še posebej moramo biti na tovrsten pojav pozorni na progah, kjer poteka veliko prometa (Zhang in sod., 2014). Po nekaterih ocenah lahko korozija v zmernih izpostavljenostih zmanjša odpornost materiala proti utrujanju do 60 %, v agresivnejših izpostavah pa 70 % in več (Stephens in sod., 2000). Slika 43 in Slika 44 prikazujeta načetost profilov v konstrukcijskih detajlih.



Slika 43: Načrtost profilov v konstrukcijskem detajlu 1.



Slika 44: Načrtost profilov v konstrukcijskem detajlu 2.

Ker so meritve za vsak most na terenu zamudne in dolgotrajne, so se pričele razvijati različne eksperimentalne analize, s katerimi bi se ocenila preostala življenjska doba mostu. Tako je danes možno napovedati preostalo življenjsko dobo mostu s stališča utrujanja materiala in preostalo življenjsko dobo mostu v primeru korozijskega utrujanja. Ker utrujanje materiala mostov zaradi obremenitev prometa ni tema diplomske naloge, mu ne bom posvečal večje pozornosti, v nadaljevanju pa bi predstavil le parameter, potreben za določitev globine korozije po eni izmed poenostavljenih eksperimentalnih analiz. Natančne eksperimentalne analize so zelo zahtevne, saj potrebujejo veliko vhodnih parametrov in posledično tudi multidisciplinaren pristop.

5.2.1 Predikcija vpliva korozije na utrujanje

Če bi določevali vpliv korozije na utrujanje po eni izmed poenostavljenih metod, ki jo je natančneje opisal Zhang (2014), bi zanj potrebovali naslednje parametre:

- korozijsko izpostavljenost (C1, C2, C3, C4, C5 M-I), s katero dobimo faktorja C_a in C_b za konstrukcijsko jeklo (Preglednica 4),
- čas izpostave v letih in
- predvideno življenjsko dobo antikorozijske zaščite, ki v tem primeru znaša od 10 do 15 let (Albrecht in sod., 1984; Stephens in sod., 2000; Zhang in sod., 2014).

Preglednica 4: Faktorja C_a in C_b v odvisnosti od korozijske izpostavljenosti za konstrukcijsko jeklo (Zhang in sod., 2014).

Izpostavljenost	C_a	C_b
podeželje (C1, C2)	34,0	0,65
urbana središča (C3, C4)	80,2	0,59
industrija, morsko okolje (C5 I – C5 M)	70,6	0,79

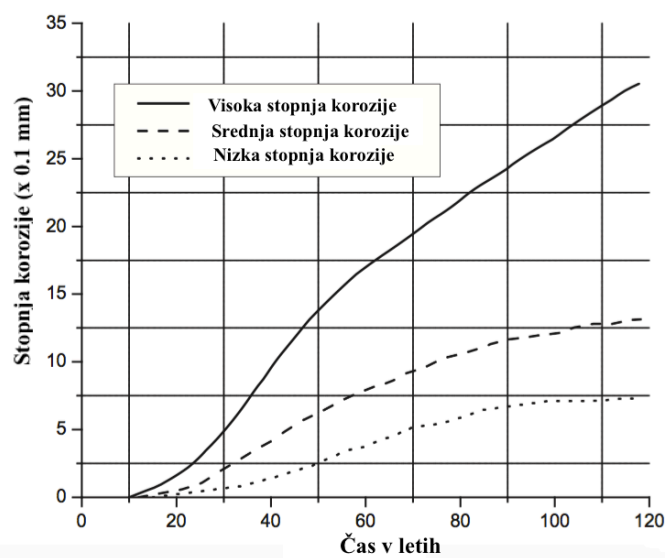
S pomočjo spodnje formule (9) nato izračunamo povprečno korozijsko penetracijo (R), izraženo v μm na leto (Zhang in sod., 2014):

$$R = C_a t^{C_b} \quad (9)$$

kjer so:

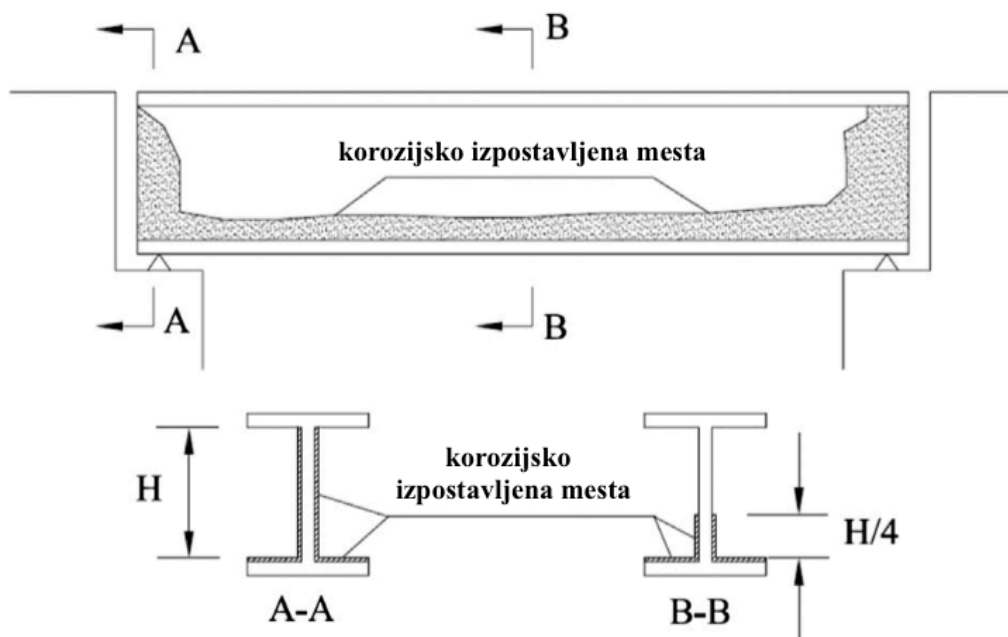
- R ... korozijska penetracija
- C_a ... empirično podan faktor
- C_b ... empirično podan faktor
- T ... čas v letih

Dobljene rezultate lahko za vsako korozijsko izpostavo tudi grafično prikažemo (Slika 45).



Slika 45: Izguba debeline profilov zaradi korozije v letih in različnih izpostavljenostih (Nowak in sod., 2000).

Zhang (2014) v članku prav tako predvideva najbolj korozijsko izpostavljena mesta na nosilcih. Kakor je razvidno s Slike 46 in Slike 47, so to zgornje površine pasnic, kjer se zadržuje voda, in stojine na mestih, kjer ni dovolj zračenja in se posledično tam zadržuje vlaga (Kayser in sod., 1989a, 1989b; Zhang in sod., 2014).

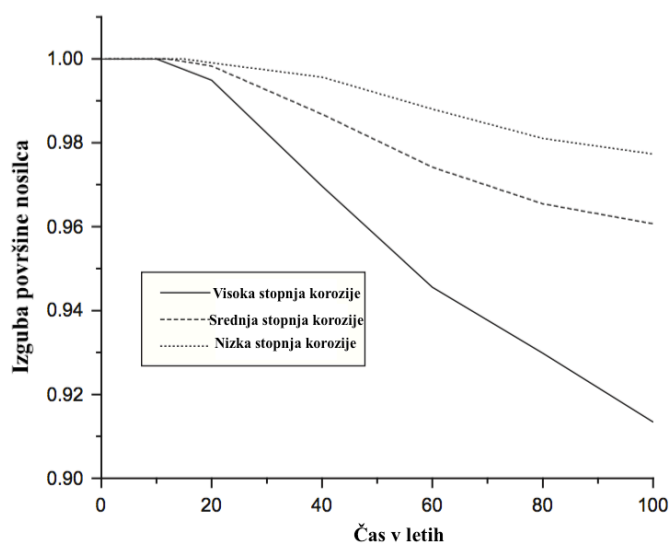


Slika 46: Najbolj pogosta mesta korozije na nosilcih (Kayser in sod., 1989a).

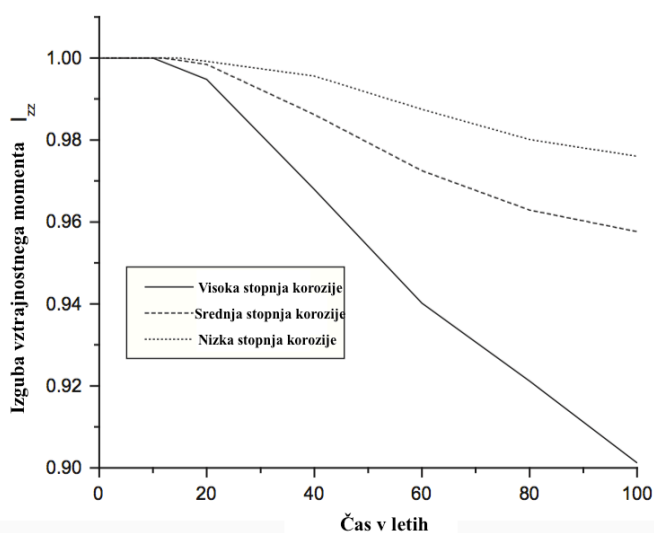


Slika 47: Korozija na ravni površini nosilca, v zavetni legi.

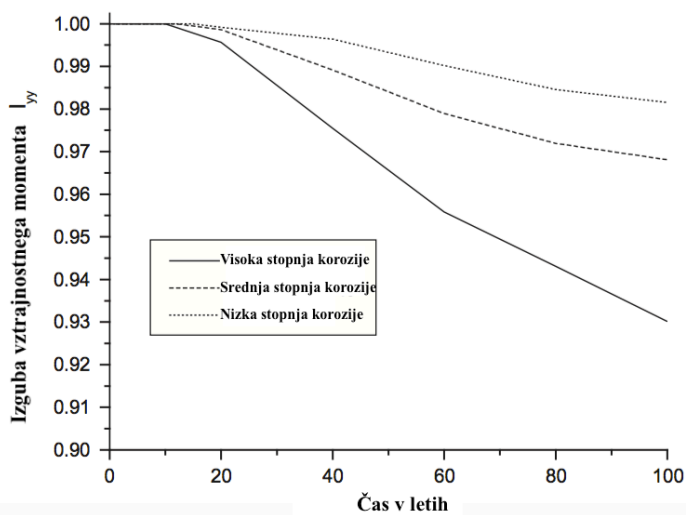
Skladno s stopnjo korozije na jeklenih mostovih (Slika 45) in tipičnimi lokacijami korozije na nosilcih (Slika 46) lahko tudi določimo izgubo površine in zmanjšan vztrajnostni moment profila (Slika 48, Slika 49, Slika 50) (Kayser in sod., 1989a; Zhang in sod., 2014).



Slika 48: Izguba površine nosilca za posamezne izpostave v odvisnosti od časa (Kayzer in sod., 1989a).



Slika 49: Izguba vztrajnostnega momenta za posamezne izpostave v odvisnosti od časa (Kayzer in sod., 1989a).



Slika 50: Izguba vztrajnostnega momenta za posamezne izpostave v odvisnosti od časa (Kayzer in sod., 1989a).

S to metodo bi tako lahko določili povprečno globino korozije v letih v različnih korozijskih izpostavitvah.

5.2.2 Ocena propadanja materiala po standardu

Podobno bi lahko dobili grobo oceno o propadanju materiala in vplivu korozije na utrujanje tudi z upoštevanjem standarda ISO 12944-2 in Preglednice 3 o izgubah materiala na letni ravni za posamezno korozijsko izpostavljenost. Če upoštevamo, da so večinoma premostitveni objekti v križanju z vodo ali cesto, je njihova izpostavljenost razreda C4, ter da se na posameznih lokacijah mostu zaradi mikroklima in konstrukcijskih detajlov ta izpostavljenost še bistveno poveča, lahko

pridemo do zaključka, da so minimalne izgube materiala na letni ravni 50 μm , na določenih mestih pa veliko več.

Zaradi specifičnosti detajlov na vsakem mostu posebej in dejstva, da se korozija oz. globina korozije ne stopnjuje linearno, ampak eksponentno, tovrstnih metod ne moremo uporabljati sistematsko in posploševati vseh mostov ter so kot takšne nenatančne. Zato jih lahko kvečjemu uporabimo za napoved hitrosti splošne korozije. Bolj prikladne in zanesljive so meritve na terenu, saj tako dobimo realno stanje vsakega mostu posebej.

5.2.3 Meritev propada materiala na terenu

Ena izmed najbolj natančnih metod ocene propada materiala je merjenje na terenu s pomočjo ultrazvočnega merilca, ki je prikazan na Sliki 51. Postopek meritve je določen s standardom ASTM E797. Uporabljen je elcometer 204.



Slika 51: Merjenje izgube debeline profila na ravni zračni površini z elcometrom.

5.2.4 Korozija v konstrukcijskih detajlih

Po podatkih o zadnjih rekonstrukcijah na jeklenih mostovih v Sloveniji je jasno, da smo na večini mostov rok izvedbe rekonstrukcije že davno presegli. Zaradi odpovedi antikorozijske zaščite se poleg splošne oblike korozije pričnejo pojavljati tudi vse ostale oblike korozije. Najagresivnejše oblike korozije z največjimi globinami na leto se pričenjajo pojavljati v konstrukcijskih detajlih, kjer se zadržujeta voda in umazanija, ki nudi odlične pogoje za razvoj korozije (Slika 52, Slika 53, Slika 54 in Slika 55).



Slika 52: Propad konstrukcije v vozlišču.



Slika 53: Konstrukcijski detajl dvojnih profilov, v katerih se zadržujeta voda in umazanija in ima za posledico nastanek špranjske korozije.



Slika 54: Stanjšanje profila.



Slika 55: Pojav globinske korozije na nosilcih.

5.2.5 Korozija veznih sredstev

Ker so mostovi starejšega datuma večinoma vsi kovičeni, igra stanje zakovic pomemben vpliv na stabilnost mostu, saj so le-te pogosto lokacija pospešene korozije zaradi razvoja korozije v razpoki, galvanske korozije ali povečane vsebnosti ogljika. Korozija v razpoki lokalno zmanjša preseke zakovice, galvanska korozija s selektivnim razstapljanjem manj žlahtne kovine zmanjša presek zakovice ali pa zmanjša stik med kovico in jeklenimi elementi. Povečana vsebnost ogljika v kovicah zmanjša korozijsko odpornost kovice v primerjavi s konstrukcijo. To povzroči hudo obliko lokalne galvanske korozije, ki privede do razpada kovice (Heinemeyer in sod., 2011; Liu in sod., 2012). Slika 56, Slika 57 in Slika 58 prikazujejo razpade zakovic.



Slika 56: Razpad kovic zaradi povečane vsebnosti ogljika.



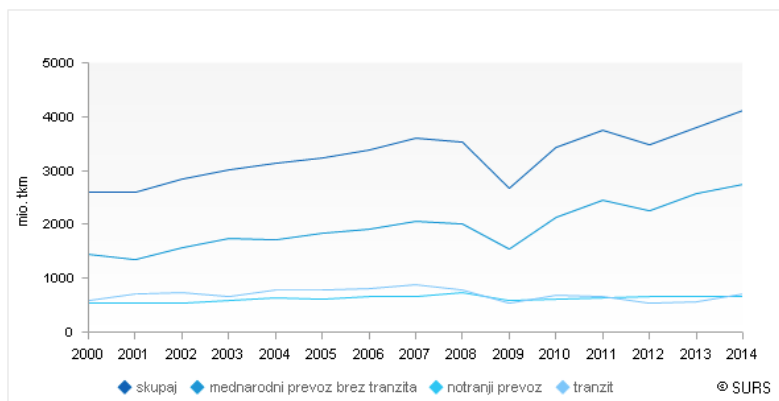
Slika 57: Razpad kovice na mostni konstrukciji.



Slika 58: Korozija v stiku oz. razpoki skupaj s propadom kovic.

5.2.6 Vpliv prometa na dotrajanost

Zmanjšano nosilnost oz. zanesljivost konstrukcij mostov zaradi utrujanja dodatno postavita pod vprašaj še dejstvi o rasti blagovnega prevoza na železniških progah statističnega urada Republike Slovenije (Slika 59) in Uredba Evropskega parlamenta št. 1315/2013 o smernicah Unije za razvoj vseevropskega prometnega omrežja, v kateri se predvideva povečanje osnih obremenitev, dolžin vlakov in njihove hitrosti. Ker to ni tema moje diplomske naloge, je ne bom podrobneje obravnaval.



Slika 59: Rast blagovnega prevoza na železniških progah v Sloveniji (Statistični urad RS, 2014).

5.3 Ekološki problem stare antikorozijske zaščite

Pri tovrstnih obnovah antikorozijske zaščite kasnejšega datuma se tudi poraja vprašanje ekologije, saj je obstoječa antikorozijska zaščita v večini primerov opravljena z materiali, ki so okolju, posledično pa tudi zdravju škodljivi. Na veliko mostovih se je obnova antikorozijske zaščite opravila z barvami na osnovi svinca – svinčev minij. Količino tega svinca lahko na malo večjem mostu merimo v nekaj sto kilogramih oz. lahko tudi v tonah (odvisno od dimenzij mostu, števila slojev barve in njihovih debelin (Slika 60, Slika 61, Slika 62 in Slika 63).

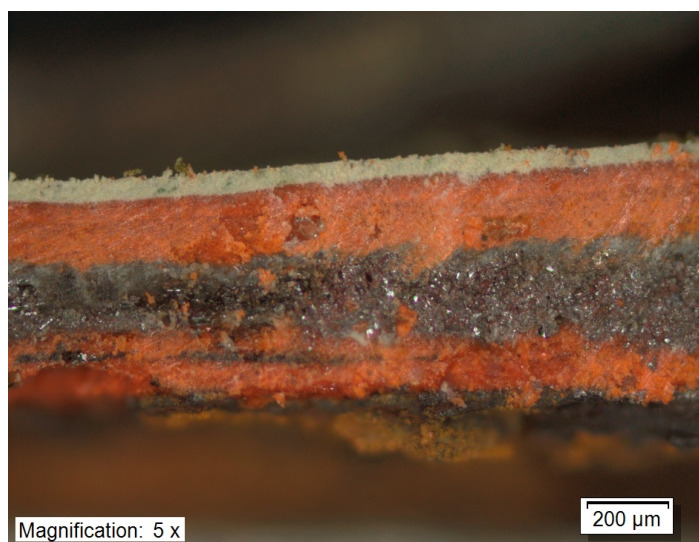


Slika 60: Luščenje barve z mostne konstrukcije.

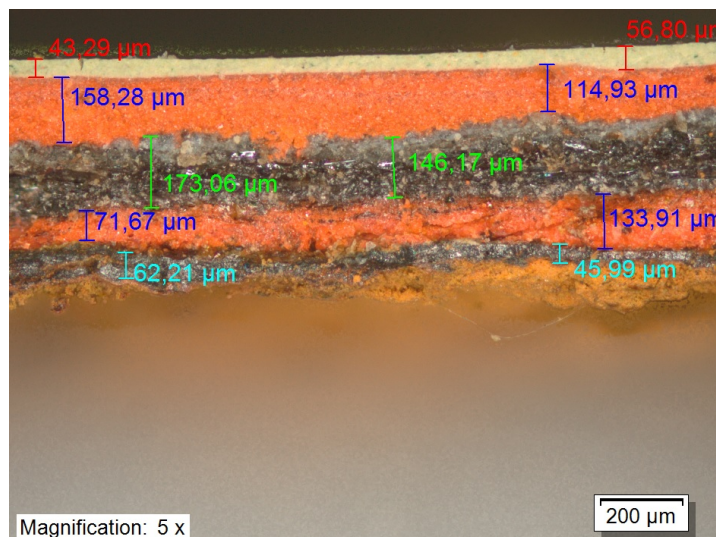


Slika 61: Vzorec propadle antikorozijske zaščite na mostni konstrukciji.

Vzorec odpadle barve se lahko pregleda tudi pod mikroskopom, kjer se natančno določijo število slojev in njihove debeline.



Slika 62: Shematski prikaz števila slojev barve z vzorca na mostni konstrukciji.



Slika 63: Shematski prikaz slojev barve in njihovih debelin z vzorca na mostni konstrukciji.

Torej na takšnih mostovih vsa ta dotrajana in propadla barva odpada oz. se lušči s konstrukcije ter pada na zemljo ali v vodotok. Vsi mostovi ne potekajo skozi urbana ali industrijska območja, kjer ta odpad barve ne predstavlja večje škode, nekateri mostovi potekajo tudi skozi neokrnjeno naravo, naravovarstvena območja in narodne parke (Triglavski narodni park) in so kot takšni ekološko nesprejemljivi, hkrati pa tudi s svojim videzom kazijo celotno podobo. Prav tako lahko ima nepravilna resnejša obnova takšnega mostu resen vpliv na okolico, saj se lahko pri takšni obnovi porabi od 30 do 40 kg abraziva na m^2 , ki pomešan z barvo predstavlja nevaren odpad, ki ga je treba v celoti zajeti in odpeljati z delovišča. Torej takšna obnova zahteva tudi resen pristop z ekološkega vidika.

6 ZAKLJUČEK

Kot je razvidno iz diplomske naloge, je stanje jeklenih železniških mostov v Sloveniji takšno, da v večini primerov ne izpolnjuje zahtev Uredbe Evropskega parlamenta o razvoju vseevropskega prometnega omrežja, nekateri izmed njih pa skorajda ne osnovnih zahtev, kot sta varnost in uporabnost.

Zato v sklopu diplomske naloge obravnavam osnovne zahteve pravilnika o spodnjem ustroju za premostitvene objekte, osnovne zahteve oz. osnove projektiranja jeklenih mostov in po mojem mnenju glavni vzrok dotrajanosti železniških mostov – korozijo, ki skupaj z obremenitvami prometa igra neznano spremenljivko v enačbi življenjske dobe mostu.

Od leta 2005 je v veljavi “Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov”, ki za projektiranje jeklenih konstrukcij uveljavlja obvezno uporabo Eurokodov 3, za antikorozijsko zaščito uporabo serije standardov ISO 12944, za preglede jeklenih konstrukcij pa je v veljavi še vedno pravilnik SFRJ št. 6/65, ki je začel veljati leta 1965. Ali so njegove zahteve veljavne in ali ustrezajo današnjim pogojem prometa ter pogojem vseevropskega prometnega omrežja, ni tema naloge, ampak sem vseeno mnenja, da je potreben konkretne prenove. Prav tako menim, da bi se na področju stanja mostov moralo nekaj spremeniti, saj so mostovi, ki so bili nekoč predimenzionirani, danes ob težjih lokomotivah in vagonih poddimenzionirani in dotrajani. Tudi metode utrujanja niso natančne, saj so podatki o prometu, težah tovora in preobremenitvah mostu netočne ter ne upoštevajo korozije in stanja zakovic, so pa vsekakor zelo dober kazalnik kritičnih mest na konstrukciji in vsesplošnega alarmantnega stanja na železniški infrastrukturi.

Če želimo, da nas glavne prometne povezave ne zaobidejo, da smo konkurenčni pri prevozu blaga in da izpolnilmo zahteve Uredbe Evropskega parlamenta št. 1315/2013 o smernicah Unije za razvoj vseevropskega prometnega omrežja, je treba k resni sanaciji pristopiti čim prej.

VIRI

Acrow. 2016. Long Span Rail Bridge Case History. Dostopno na: <http://acrow.com/acrow-case-study/long-span-rail-bridge-allows-for-innovative-structure-replacement/> (3. 8. 2016)

Albrecht, P., Naeemi, A. H. 1984. Performance of weathering steel in bridges. National cooperative highway research program. Report 272.

Bogić, M. 2012. Železniški mostovi v Sloveniji: Arhitektov bilten 42: 195–196.

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1–35 str.

Domazet, Ž., Krstulović-Opara, L. 2006. Podloge za predavanja iz metalnih konstrukcija i konstruiranja. Split, Sveučilište u Splitu.

Evert D. D. During. 1997. Corrosion atlas: a collection of illustrated case histories. Amsterdam, Elsevier.

Forsgren, A. 2006. Corrosion control through organic coatings, CRC Press: 184 str.

Galvanic corrosion. Wikipedia. 2016. Dostopno na:
https://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_corrosion (Pridobljeno 16. 5. 2016)

Hampden Bridge. Wikipedia. 2016. Dostopno na:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/65/Hampden_Bridge_Wagga_design.jpg/800px-Hampden_Bridge_Wagga_design.jpg (Pridobljeno 31. 7. 2016)

Harcon. 2016. Bridge rigging. Dostopno na: <http://www.harconcorp.com/bridge-rigging.asp> (Pridobljeno 31. 7. 2016)

Heinemeyer, C., Feldmann, M. 2011. The influence of rivet corrosion on the durability of riveted connections. Steel Construction, Vol. 4, Iss. 3, str. 188–192.

Humar, G. 2012. Kratek sprehod skozi zgodovino gradnje mostov na ozemlju današnje Slovenije. Arhitektov bilten 42: 195–196.

Kayser, J. R., Nowak, A. S. 1989a. Reliability of corroded steel girder bridges. Structural Safety, 1989a; 6(1): 53–63.

Kayser, J. R. 1989b. The effects of corrosion on the reliability of steel girder bridge. Ann Arbor, MI: University of Michigan.

Kjersnsmo, D., Kleven, K., Scheie, J. 2003. Corrosion Protection. Inspector's book of reference. Denmark, Boarding A/S. 3. izdaja, 476 str.

Liu, Z. Y., Chen, J. Q., Liang, W., Hu, M. 2012. Influence of Carbon Content on Corrosion Resistance Performance of Weathering Steel", Advanced Materials Research, Vol. 580: 465–468.

Most na Savi. 2016. Pružne građevine. Dostopno na:
<http://www.prg.hr/reference/most-sava-zeleni/> (Pridobljeno 31. 7. 2016)

Nowak, A. S., Thoft-Christensen, P. 2000. International contribution to the highways agency's bridge related research. Bridge rehabilitation in the UK: review of the current programme and preparing for the next, London, UK.

Pipinato, A., De Miranda, M. 2016. Innovative Bridge Design Handbook. Chapter 10 - Steel and composite bridges. Butterworth-Heinemann: 47–271.

Pierre, R. R. 2000. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill, New York: 1140 str.

Po kreativni poti. 2015. Železniški mostovi. Dostopno na:
www.pokreativnipoti.fgg.uni-lj.si (Pridobljeno 5. 4. 2016)

Pottgießer, H. 1985. Eisenbahnbrücken aus zwei Jahrhunderten, Birkhäuser Verlag, Basel – Boston – Stuttgart.

Radnić, J., Harapin, A., Šunjić, G. 2004. Mostovi: odabrana poglavja. Mostar, Građevinski Fakultet.

Shreir, L. L., Jarman, R. A., Burstein, G.T. 2000. Corrosion, 3rdEd. Butterworth-Heinemann.

Skale, S. 2009. Izvajanja protikorozijske zaščite na hidromehanski opremi (predavanje), SKALA, Saša Skale s.p., Fala.

Skale, S. 2016. Sodobni pristopi v protikorozijski zaščiti. Osebna komunikacija - osebni arhiv (10. 5. 2016)

Slovenske železnice – Infrastruktura, d.o.o. 2015, Program omrežja 2016: 29–30 str. Dostopno na:
http://www.slo-zeleznice.si/images/infrastruktura/Program_omrezja_2016/Program_omrezja_2016_2.pdf (Pridobljeno 27. 6. 2016)

Svetli in nakladni profil. 2013. Slovenske železnice-Infrastruktura d.o.o. Priloga ¾: 8 str. Dostopno na:
http://slo-zeleznice.si/images/infrastruktura/pdf/PO_2015_4_Priloga_3_4_Svetli_in_nakladalni_profil.compressed.pdf (Pridobljeno 27. 6. 2016)

Statistični urad Republike Slovenije. 2014. Dostopno na:
<http://www.stat.si/StatWeb/prikazi-novico?id=5332&idp=22&headerbar=19> (Pridobljeno 26. 7. 2016)

Stephens, R. I., Ratemi, A., Stephens, R. R., et al. 2000. Metal fatigue in engineering. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons.

Sydney living museum. 2016. Bridging Sydney. Dostopno na:
<http://sydneylivingmuseums.com.au/stories/bridging-sydney> (Pridobljeno 31. 7. 2016)

Uhlig, H. H. 1948: Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, Inc., New York, 24th Print.

Vukov, A. 1998. Uvod u metalne konstrukcije. Fakultet građevinskih znanosti, Sveučilište u Splitu, Split.

Zgonc, B. 1996. Železnice I. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 225 str.

Zgonc, B. 2003. Železniški promet. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet: 216 str.

Zgonc, B. 2012. Železniška infrastruktura. Portorož, Fakulteta za pomorstvo in promet: 22 str.

Zhang, H. 2014. Corrosion fatigue effects on life estimation of deteriorated bridges under vehicle impacts. *Engineering Structures* 71(7): 128–136.

Zupančič, P. 2010. Projekt sovprežnega železniškega mostu. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Zupančič).

Pravilniki, standardi, tehnične specifikacije

ASTM E797: 1996. Standard practice for Measuring Thickness by manual ultrasonic Pulse-Echo Contact Method. United States, ASTM.

ASTM-E337: 2007. Complete Document History Standard Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures). United States, ASTM.

ASTM D3359 – 02. 2002. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. United States, ASTM.

EN 1991 – 2:2003. Eurocode 1: Actions on structure – Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels, CEN.

ISO 2178:2016. Non-magnetic coatings on magnetic substrates -- Measurement of coating thickness -- Magnetic method. Geneva, ISO.

ISO 4624:2002. Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion. Geneva, ISO.

ISO 4628-1: 2012. Barve in laki – Ovrednotenje propadanja premazov – Ugotavljanje obsega velikosti poškodb ter intenzitete enakomernih sprememb videza. Ljubljana, ISO.

ISO 8501-1: 2007. Priprava jeklenih podlag pred nanašanjem barv in sorodnih proizvodov - Vizualno ocenjevanje čistosti površine - 1. del: Stopnje korodiranosti in stopnje priprave nezaščitenih jeklenih podlag ter jeklenih podlag po popolni odstranitvi starih premazov. Ljubljana, ISO.

ISO 8502-4:1993. Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Tests for the assessment of surface cleanliness -- Part 4: Guidance on the estimation of the probability of condensation prior to paint application. Geneva, ISO.

ISO 8503-2:2012. Priprava jeklenih podlag pred nanašanjem barvnih in sorodnih premazov - Površinske hrapave značilnosti peskanih jeklenih podlag - 2. del: Metoda za ocenjevanje stopnje hrapavosti površin, peskanih z abrazivom - Primerjalni postopek. Ljubljana, ISO.

ISO 12944-2:1998. Paints and varnishes – Corrosion of steel structures by protective paint systems, Part 2: Classification of environments. Geneva, ISO.

ISO 12944-3:1998. Paints and varnishes – Design consideration, Part 3: Design considerations. Geneva, ISO

ISO 12944-7: 1998. Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 7: Execution and supervision of paint work. Genova, ISO.

ISO 19840: 2004. Paints and varnishes -- Corrosion protection of steel structures by protective paint systems -- Measurement of, and acceptance criteria for, the thickness of dry films on rough surfaces. Geneva, ISO.

NACE. 2012. Corrosion Control Plan for Bridges. Houston, NACE.

NACE 6A192/SSPC-TR 3. 2000. Dehumidification and Temperature Control During Surface

Pravilnik o tehničnih predpisih za vzdrževanje jeklenih konstrukcij med eksploatacijo pri jeklenih nosilnih konstrukcijah. Uradni list SFRJ, št. 6/65.

Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog: Uradni list RS št. 93/2013: 1091–1148

Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja na progah JŽ. 1970. Jugoslovanske železnice SJŽ št. 1981/69.

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog: Uradni list RS št. 92/2010: 13803–13868

SIST EN 1990: 2004. Evrokod 0: Osnove projektiranja konstrukcij. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1991-1-1: 2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo

SIST EN 1991-1-1: 2005a. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1. del: Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1991-1-3:2004 - Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije - 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega. Slovenija, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1991-1-4: 2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1991-1-6: 2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-6. del: Splošni vplivi – Vplivi med gradnjo. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 1993-1-10:2005. Eurocode 3: Material toughness and through – thickness properties. Brussels, CEN.

SIST EN 1993-2:2007. Projektiranje jeklenih konstrukcij – 2. del: Mostovi. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

Uredba (EU) št. 1315/2013 evropskega parlamenta in sveta z dne 11. decembra 2013 o smernicah Unije za razvoj vseevropskega prometnega omrežja in razveljavitvi Sklepa št. 661/2010/EU: UL L 348, str. 1.

Uredba Komisije (EU) št. 1299/2014 z dne 18. novembra 2014 o tehničnih specifikacijah za interoperabilnost v zvezi s podsistemom „infrastruktura“ železniškega sistema v Evropski uniji. L 356/1.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: Preglednica jeklenih železniških mostov v Sloveniji

Preglednica: Jekleni železniški mostovi v Sloveniji

Most	T i p p r o g e	Odsek	Gra d- nja	Rekonst rukcija	dolžin a
Most čez Voglajno	g	538+024,00	1989		15,9
Most čez Ložnico	r	2+810,00	1993		14,35
Most čez Pako (Žalec–Polzela)	r	16+930,00	1975		13,2
Most čez Pako (Šmartno ob Paki–Šoštanj)	r	30+561,00	1969		26
Most čez cesto v Šoštanju (Šmartno ob Paki–Šoštanj)	r	30+561,00	1969		5,5
Most čez Pako (Šoštanj–Velenje)	r	36+220,00	1993		17,87
Most Rogatec	r	33+799,00	1990		4,9
Most Rogaška	r	37+382,00	1991		6
Most čez potok v Rogatcu	r	35+382,00	1903	1961	5,6
Most Stranje 2	r	43+267,00	1991		4,95
Most Stranje 3	r	45+734,00	1991		4,55
Most Stranje 4	r	47+969,00	1989		5,95
Most čez Savinjo (Laško–Celje)	g	522+446,00	1967		106,8
Most čez Savinjo v Laškem (Laško–Rimske Toplice)	g	516+010,00	1968		109,8
Most čez Savinjo pri Laškem, smer Laško	g	516+010,00	1968		109,8
Most čez Pako 2	r	28+452,00	1970		47
Most čez Pako 1	r	28+228,00	1970		48
Most čez Voglajno	g	538+711,00	1989		12,25
Most Stranje 1	r	42+294,00	1989		9,3

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most čez Savinjo, Tremerje, smer Celje	g	522+446,00	1967		106,8
Most čez odvod meteorne vode, Celje	r	16+340,00	1954		9,85
Most Stranje 5	r	48+589,00	1989		9,9
Most Stranje 6	r	50+125,00	1991		6,9
Most čez Slomščico	g	544+425,00	1971		11,6
Most čez cesto v Laškem	g	517+963,00	2001		13,3
Most čez mestno cesto v Celju	g	527+093,00	1972		6,25
Most čez cesto Sevnica – Blanca	g	478+315,00	1986	1998	10
Most čez Ljubljano, Zalog	g	557+225,00	1949	1994	79,2
Most čez Savo, Kresnice, smer Litija	g	538+019,00	1964		155
Most čez Savo, Sevnica	r	1+000,00	1938	1981	153
Most čez Krko	r	77+647,00	1914	1991	96
Most čez Savo, Kresnice, smer Kresnice	g	538+019,00	1964	1999	155
Most čez Savo, Črnuče	r	4+919,00	1906		151
Most Šmartinska	g	565+199,00	1985		11,7
Most Mavelščica	g	576+848,00	1956		9,55
Most Plaznica	g	602+984,00	1950		9,1
Most Lipnica	g	604+643,00	1954		14,95
Most Jesenščica	g	631+658,00	1915		18,8
Most Dunajska cesta	g	566+200,00	1962	1988	41

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most Celovška cesta	g	566+696,00	1962	1998	39
Most Jesenščica	r	0+398,00	1991		18,7 5
Most Porčeva cesta	r	546+565,00	1993		16,4
Most čez Savo, Naklo	r	1+220,00	1907	1992	172
Most čez Završnico	g	623+109,00	1947	1995	37
Most Gostinica 1, smer Zalog	g	552+897,00	1977		10,2 5
Most čez Soro	g	579+113,00	1951		45,5
Most Belca	r	12+597,9	1905	1960	15
Most cesta Bled-Bohinj	r	14+504,00	1905	1983	7
Most Bled, lokalna pot	r	18+686,08	1905	1983	10
Most Belca hudournik	r	28+350,85	1905	1985	18,1
Most čez Savo Bohinjko 3	r	27+189,93	1905	1961, 1987	52
Most čez Savo, Bled	r	0+821,33	1905	1998	71,8
Most čez Savo Bohinjko 1	r	20+018,00	1905	1955	60
Most čez Savo Bohinjko 2	r	18+620,15	1905	1955	60
Most Bled jezero, pot	r	11+580,45	1905	1960	6
Most potok Bistrica	r	18+992,00	/		14
Most Mirna 3	r	22+805,00	1961		12
Most Podlomščica	r	1+637,00	1893		7
Most Ortnek	r	15+380,00	1893		8

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most Kočevje	r	43+389,00	1893		10
Most Straža, potok	r	4+208,00	1894		10
Most Temenica 4	r	4+654,00	1894		10
Most Črnomelj, cesta	r	71+011,00	1914	1946	6
Most v Metliki	r	29+563,00	1914	1953	28
Most Temenica	r	94+734,00	1894		10
Most Temenica 2	r	102+230,00	1908	1917, 1931	10
Most Temenica 3	r	104+894,00	1894		8
Most Višnjica	r	117+496,00	1894		7
Most Grosupeljščica	r	130+833,00	1894	1984	7
Most Ljubljana, Rakovnik	r	152+135,00	1893	1972, 1992	35
Most Mirna	r	13+318,00	1908		17
Most Mirna 2	r	13+496,00	1908		16
Most čez Mežo, Slovenj Gradec	r	64+088,00	1863	1962	95,4
Most čez potok Radoljna	r	25+284,00	1863	1966	48,7
Most čez Dravo	g	17+205,00	1951	1997	245, 4
Most Drava	g	593+196,00	1893		167, 06
Most Bistrica potok	r	8+537,00	1893	1961	12,8
Most potok Velka	r	34+840,00	1892	1967	30,7 3
Most Otiški vrh	r	1+637,00	1919		41,6
Most Ptuj	g	16+497,00	1860	1990	28,0 5

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most Ptuj – inundacija	g	16+820,00	1860	1990	65,4 2
Most Rogoznica	g	19+678,00	1860	1966, 1993	12,2
Most Sejanica	g	34+573,00	1949		9,4
Most Pušenjski potok	g	41+866,00	1956		9,2
Most Pavlovski potok	g	4+182,00	1924		7,05
Most Ljutomer potok	g	6+657,00	1924		5,9
Most Ščavnica 1	g	19+787,00	1924		22,9
Most Ščavnica 2	g	20+332,00	1924	1948, 2007	22,9
Most Murska Sobota, inundacija	g	31+800,00	1924		9,3
Most Boračevski potok	r	16+889,00	1890		9,1
Most Lendava, inundacija	r	17+604,00	1936		43,3
Most Črnc	r	22+364,00	/		10,2 5
Most čez Mežo, Ravne	r	69+093,00	1892	1971	41,5
Most čez Muro	g	28+565,00		1953	174, 28
Most čez potok Rečica	r	18+661,00	1862	1964	50,7
Most Studenci, mestna cesta, smer Maribor	r	1+264,00	1901	1965	11,8
Most Studenci, mestna cesta, smer Prevalje	r	1+264,00	1901	1965	11,8
Most Bistrica, lokalna cesta	g	16+962,00	1967		7
Most Kušljanov Graben, smer Preserje	g	578+420,62	1988		22,3 4
Most Prestranek cesta	g	639+590,00	1925		6,85
Most Preserje, inundacija 2	g	579+942,00	1987	1991	15,5 1

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most Preserje, inundacija	g	579+942,00	1987	1991	29,5 2
Most čez plaz v Hrastovljah	g	9+948,00	1956	1967	39,9 3
Most Gradiščica, smer Ljubljana	g	570+807,28	1953		30,5
Most Gradiščica, smer Brezovica	g	570+807,28	1953		30,5
Most Bistrica	g	16+757,00	1930		12,4
Most Koper, lokalna cesta	g	27+350,00	1994		6
Most čez Ljubljanico	g	579+942,00	/	1996	61
Most Kušljanov Graben, smer Brezovica	g	578+420,62	1988		22,3 4
Most čez Bačo	r	45+584,14	1905		61,0 6
Most Bača, Železniki smer Grahovo	r	34+890,03	1905	1949, 1983	13
Most Bača, Železniki smer Podbrdo	r	34+890,03	1905	1949, 1983	13
Most čez Vipavo 2	r	101+911,46	1905	1959, 1981	50
Most Bača, Grahovo 3	r	42+996,96	1905	1959, 1985	25,6
Most potok, Grahovo	r	44+396,00	1905	1985	137, 7
Most Bača, Most na Soči 1	r	52+898,47	1905	1988	33,7
Most, Most na Soči, lokalna cesta	r	56+159,99	1905	1961	7
Most Ajba, Anhovo	r	67+318,06	1905	1959	13,1
Most Anhovo, hudournik	r	57+851,52	1905	1965	12
Most Nova Gorica, cesta	r	76+803,5	1905	1959, 1985	7
Most Solkan	r	87+847,68	1905	1963, 1985	12,3
Most Lijak	r	96+623,46	1925		22

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice

Most Vogersček	r	96+657,8	1905	1948	7
Most Dornberg	r	100+973,22	1905	1961, 1985	8
Most Štanjel, cesta	r	110+511,2	1950	1983	7
Most Bača, grahovo 2	r	42+736,22	1905	1948	25
Most Belca, grahovo	r	42+437,28	1905	1952	25,6
Most čez Idrijco	r	55+065,18	1905	1985	261
Most čez Vipavo 1	r	100+519,59	1925		52,4
Most čez Vipavo 3	r	103+097,94	1905	1955, 1986	51,5

r - regionalna proga

g - glavna proga