

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:

Žagar, U., 2016. Določanje razvodnic na digitalnem modelu ceste za načrtovanje požiralnikov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M, somentorica Škapin Rugelj, M.): 64 str.

Datum arhiviranja: 14-03-2016

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:

Žagar, U., 2016. Določanje razvodnic na digitalnem modelu ceste za načrtovanje požiralnikov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Škapin Rugelj, M.): 64 pp.

Archiving Date: 14-03-2016

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 VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

UROŠ ŽAGAR

**DOLOČANJE RAZVODNIC NA DIGITALNEM
MODELU CESTE ZA NAČRTOVANJE POŽIRALNIKOV**

Diplomska naloga št.: 273/VKI

**ESTIMATION OF WATER DEVIDES ON DIGITAL
ROAD MODEL FOR ROAD INLET DESIGN**

Graduation thesis No.: 273/VKI

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Somentorica:

asist. dr. Marjeta Škapin Rugelj

Ljubljana, 24. 02. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Uroš Žagar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Določanje razvodnic na digitalnem modelu ceste za načrtovanje požiralnikov«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, februar 2016

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	628.2:625.7(043.2)
Avtor:	Uroš Žagar
Mentorica:	doc. dr. Mojca Šraj
Somentor:	asist. dr. Marjeta Škapin Rugelj, asist. dr. Mario Krzyk
Naslov:	Določanje razvodnic na digitalnem modelu ceste za načrtovanje požiralnikov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	64 str., 9 pregl., 40 sl., 53 en., 20 pril.
Ključne besede:	odvodnjavanje, razvodnica, cestni požiralnik, robnik, koritnica, prispevno območje, lokalni minimum, algoritem, programska rešitev

Izvleček

Diplomska naloga obravnava problematiko odvodnjavanja in načrtovanja cestnih požiralnikov. Učinkovito odvodnjavanje cest je bistvenega pomena za vzdrževanje nivoja uslug ceste ter zagotavljanje varnega cestnega prometa in njegovega nemotenega poteka.

V teoretičnem delu diplomske naloge so najprej predstavljene osnove modeliranja padavinskega odtoka z urbanih površin. Sledi teoretična obravnava odvodnjavanja cest, kjer poudarjamo pomen usklajenega načrtovanja horizontalnih elementov in vzdolžnega poteka ceste. V nadaljevanju je predstavljen sistem cestnih požiralnikov, ki s pomočjo cevovodov in/ali odprtih jarkov vodijo zbrano meteorno vodo do recipientov. Podrobneje so predstavljeni tipi cestnih požiralnikov in njihove osnovne lastnosti ter najpomembnejši dejavniki, ki jih upoštevamo pri njihovem načrtovanju.

V praktičnem delu diplomske naloge smo razvili lastno programsko rešitev za računanje položajev cestnih požiralnikov in določanje razvodnic med prispevnimi območji na digitalnem modelu ceste. Programske rešitve smo uporabili na primeru, na katerem smo prikazali potek načrtovanja ceste in odvodnjavanja s kombinacijo različnih obstoječih programskih rešitev in izmenjavo podatkov med njimi.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 628.2:625.7(043.2)
Author: Uroš Žagar
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, PhD.
Co-advisor: Assist. Marjeta Škapin Rugelj, Ph.D., Assist. Mario Krzyk, Ph.D.
Title: Estimation of water divides on digital road model for road inlet design
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 64 p., 9 tab., 40 f., 53 eq., 20 app.
Key words: drainage, drainage divide, inlet, curb, gutter, catchment area, local minimum, algorithm, software solution

Abstract:

The thesis deals with the road drainage design. Effective road drainage is essential to maintain the level of the road services as well as to ensure a safe road traffic.

The basics of rainfall-runoff modelling from urban areas are presented in the first part of the thesis, followed by the theoretical explanation of the road drainage to stress the importance of coordinated design of horizontal road elements in the line with longitudinal profile and vice versa. The following section presents a system of road inlets, which drains collected rain water through pipes and open ditches to the final recipients. The types of road inlets and their basic characteristics as well as the most important factors to be considered in their design are presented more detailed.

In the practical part of thesis we have developed a new software solution for calculating the positions of the road inlets and determining the drainage divides between the catchment areas, based on the digital road model. Software solution was applied for the practical case, showing the procedure of road design including drainage, with a combination of several software solutions and the data exchange between them.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki ste mi pomagali pri nastajanju diplomske naloge in mi stali ob strani v času študija.

Iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorjema, asist. dr. Marjeti Škapin Rugelj in asist. dr. Mariu Krzyku za pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se podjetju CGS plus d.o.o. za dostop do programske opreme.

Iskreno se zahvaljujem družini za podporo in pomoč tekom študija.

KAZALO SLIK

Slika 1: Hidrogram pri $td > tc$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)	5
Slika 2: Hidrogram pri $td = tc$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)	5
Slika 3: Hidrogram pri $td < tc$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)	6
Slika 4: Prečni, vzdolžni in rezultirajoči nagib (Podgoršek, 2006)	7
Slika 5: Tipični prerezi koritnice (prirejeno po Brown in sod., 2013)	13
Slika 6: Parametri koritnice (prirejeno po Charbeneau, 2014)	15
Slika 7: Parametri za določitev prečnega nagiba koritnice s trikotno obliko prereza	18
Slika 8: Cestni požiralnik v robniku (UDFCD, 2008)	24
Slika 9: Čas potovanja v koritnici (prirejeno po Charbeneau, 2014)	26
Slika 10: Analiza dotoka v požiralnik (prirejeno po Charbeneau, 2014)	26
Slika 11: Cestni Požiralnik v robniku (foto: Žagar, 2016)	28
Slika 12: Parametri požiralnika v robniku s poglobljenih vtokom (Brown in sod., 2013)	29
Slika 13: Cestni požiralnik z rešetkami in vtokom pod robnikom (UDFCD, 2008)	30
Slika 14: Kombiniran cestni požiralnik (UDFCD, 2008)	34
Slika 15: Kombiniran požiralnik (foto: Žagar, 2016)	35
Slika 16: Kombiniran požiralnik iz vtočne odprtine v robniku ter vzporednih rešetak pod robnikom (Brown in sod., 2013)	35
Slika 17: Linijski cestni požiralnik (UDFCD, 2008)	36
Slika 18: Linijski požiralnik v krožnem križišču (foto: Žagar, 2016)	37
Slika 19: Cestni požiralnik v robniku, postavljen v depresijski točki ob robniku (UDFCD, 2008).	37
Slika 20: Oblike vtočnega grla (prirejeno po Brown in sod., 2013)	39
Slika 21: Zamašitev požiralnika (foto: Žagar, 2016)	40
Slika 22: Tipične lokacije za postavitev požiralnikov	42
Slika 23: Kapaciteta požiralnika v odvisnosti od vzdolžnega nagiba koritnice	43
Slika 24: Kapacitete požiralnikov v odvisnosti od kapacitete koritnice in učinkovitosti požiralnikov ter koeficienta CN (prirejeno po Brown in sod., 2013)	45
Slika 25: LIDAR posnetek za območje celotne Slovenije (LIDAR, 2015)	49
Slika 26: Prikaz postopka iskanja lokalnih minimumov na TIN mreži	50
Slika 27: Prikaz postopka določitve para trikotnika s skupnim robom	51
Slika 28: Pozitivno orientirana trikotnika	53
Slika 29: Negativno orientirana trikotnika	53
Slika 30: Digitalni model obravnavanega terena	54
Slika 31: Izris osi ceste s programom Plateia	54

Slika 32: Pogovorno okno za izris osi ceste s tangentsnim poligonom	55
Slika 33: Pogovorno okno za izris osi ceste s tangentsnim poligonom	55
Slika 34: Določitev kategorije ceste	55
Slika 35: Pogovorno okno za izrise nivelete ceste z metodo najboljšega prileganja	56
Slika 36: Izris vzdolžnega prereza ceste s programom <i>Plateia</i>	57
Slika 37: Digitalni model projektirane ceste	57
Slika 38: Prikaz lokalnih minimumov in razvodnic na načrtu situacije ceste	58
Slika 39: Pogovorno okno za prenos črt vzdolž osi v vzdolžni prerez ceste	59
Slika 40: Detajlnjši prikaz lokalnih minimumov in razvodnic v vzdolžnem prerezu ceste	59

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Maksimalne vrednosti prečnega nagiba vozišča, glede na vzdolžni nagib, upoštevajoč maksimalni rezultirajoči nagib (TSC, 2010).	8
Preglednica 2: Jakost naliva glede na vrsto ceste, projektno hitrost in pogostost naliva (Pravilnik o projektiranju cest).....	10
Preglednica 3: Mejne debeline plasti vode za nastanek hidroplaninga pri različnih hitrostih vožnje (Podgoršek, 2006)	11
Preglednica 4: Površinski odtok po širini vozišča pri povprečni hitrosti vode v koritnici trikotne oblike (Brown in sod., 2013).....	21
Preglednica 5: Primerjava različnih tipov požiralnikov (Brown in sod., 2013).....	22
Preglednica 6: Empirični koeficienti za določitev hitrosti vode, ki pljuskne skozi vtočne rešetke (UDFCD, 2008).....	33
Preglednica 7: Parametri požiralnika, ki deluje po principu bočnega preliva	38
Preglednica 8: Parametri požiralnika, ki deluje po principu zožitve (povzeto po UDFCD, 2008) ..	39
Preglednica 9: Parametri požiralnika, ki deluje po principu zožitve.....	41

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 MODELIRANJE PADAVINSKEGA ODTOKA Z URBANIH POVRŠIN	2
2.1 Racionalna metoda.....	2
2.1.1 Uvod.....	2
2.1.2 Predpostavke	2
2.1.3 Racionalna enačba.....	2
2.2 Metode za izdelavo hidrograma odtoka	3
2.2.1 Izdelava hidrograma odtoka	3
2.2.2 Modificirana racionalna metoda	4
3 ODVODNJAVANJE CEST	7
3.1 Uvod.....	7
3.2 Nagibi vozišča	7
3.2.1 Prečni nagib vozišča.....	8
3.2.2 Vz dolžni nagib vozišča	9
3.2.3 Rezultirajoči nagib vozišča	10
3.3 Pogostost naliva	10
3.4 Hidroplaning	11
3.5 Robniki in koritnice	12
3.5.1 Kapaciteta koritnice	14
3.5.1.1 Izzardova enačba za izračun kapacitete koritnice	14
3.5.1.2 Enostavna koritnica z robnikom	16
3.5.1.3 Enostavna koritnica z enakomerno obliko prereza	16
3.5.1.4 Enostavna koritnica s sestavljeno obliko prereza	16
3.5.1.5 Koritnica v obliki plitvega jarka	17
3.5.1.6 Koritnica s trikotno obliko prečnega prereza	17
3.5.1.7 Koritnica s krožno obliko prečnega prereza	18
3.5.2 Primerjava kapacitet različnih tipov koritnic.....	18
3.5.3 Čas potovanja površinskega odtoka po koritnici	19
3.5.3.1 Čas koncentracije	19
3.5.3.2 Hitrostna metoda SCS TR-55	19
4 NAČRTOVANJE CESTNIH POŽIRALNIKOV	22
4.1 Tipi cestnih požiralnikov	22
4.2 Osnovne lastnosti cestnih požiralnikov	23
4.3 Cestni požiralnik v robniku.....	24
4.3.1 Dotok v požiralnik	24

4.3.2	Globina vode na vtoku v požiralnik	26
4.3.3	Vtočna odprtina požiralnika	27
4.3.4	Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika	28
4.3.4.1	Požiralnik s poglobljenim (depresijskim) vtokom	29
4.4	Cestni požiralnik z rešetkami in vtokom pod robnikom.....	30
4.4.1	Tipi vtočnih rešetak.....	30
4.4.2	Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika	31
4.5	Kombiniran cestni požiralnik	34
4.5.1	Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika	34
4.6	Linijski cestni požiralnik	36
4.6.1	Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika	36
4.7	Cestni požiralniki v depresijskih točkah na vozišču	37
4.8	Zamašitev požiralnikov	40
4.9	Pozicioniranje požiralnikov	41
4.9.1	Tipične lokacije za postavitev požiralnika	41
4.9.2	Določitev sprejemne kapacitete požiralnika	43
4.10	Primer izračuna širine površinskega odtoka in učinkovitosti požiralnika	45
5	ALGORITEM ZA DOLOČANJE RAZVODNIC NA DIGITALNEM MODELU CESTE	49
5.1	Uvod.....	49
5.2	Vhodni podatki.....	49
5.3	Opis algoritma	50
5.4	Prikaz uporabe algoritma na praktičnem primeru.....	54
6	ZAKLJUČKI.....	60
VIRI.....		62

1 UVOD

V današnji inženirski praksi se za pozicioniranje požiralnikov najpogosteje uporablja postopek, ki je iz mnogih stališč več kot sporen. Gre namreč za predpostavko, da je en požiralnik ne oziraje na konkretne pogoje odvodnjavanja, sposoben sprejeti meteorno vodo prispevne površine vozišča 400 m² (TSC, 2010).

Osnovni motiv za preučitev problematike pozicioniranja cestnih požiralnikov je trenutna slaba praksa na tem področju ter veliko povpraševanje po avtomatiziranih orodjih v računalniških programih za načrtovanje v infrastrukturi.

Eden izmed svetovno najbolj razširjenih računalniških programov za načrtovanje cest je program *Plateia*, ki ga razvijamo v podjetju CGS plus d.o.o. Bistvene prednosti programa so konstanti razvoj in izboljšave, podpora informacijskemu modeliranju zgradb v infrastrukturi (BIM – ang. *Building Information Modelling*), enostavna uporaba, hitra obdelava velike količine podatkov, visoka stopnja avtomatizacije z možnostjo popolnega nadzora nad načrtovanjem ter osveževanje podatkov.

Proces izdelava nove programske rešitve zahteva sodelovanje ekipe strokovnjakov različnih strok:

- prodajni inženirji raziščejo potrebe trga,
- gradbeni inženirji v celoti pripravijo algoritem (tehnično specifikacijo) in testirajo končni izdelek,
- računalniški programerji napišejo programsko kodo in jo integrirajo v različne platforme,
- grafični oblikovalci v sodelovanju z ostalo ekipo oblikujejo grafično podobo uporabniškega vmesnika.

Diplomska naloga je nastala na podlagi razgovorov z nekaterimi vodilnimi cestnimi projektanti v Sloveniji, ki jim je pri načrtovanju cest najbolj pomemben prihranek časa, glede na trenutni način dela. Pri tem so zelo pomembni tudi vhodni podatki, ki so potrebni za končni izdelek. Vhodni podatki morajo biti hitro in lahko (javno) dostopni.

Prvi del diplomske naloge je namenjen teoretični razlagi modeliranja padavinskega odtoka, odvodnjavanja s cest in samega načrtovanja cestnih požiralnikov. V praktičnem delu diplomske naloge pa je predstavljena programska rešitev, ki smo jo razvili za potrebe računanja lokalno najnižjih točk (lokalnih minimumov) in za določanje razvodnic med prispevnimi površinami na digitalnem modelu terena. Na osnovi algoritma smo napisali računalniški program, ki deluje na CAD oziroma BIM platformah. Računalniški program smo uporabili na konkretnem primeru, kar nam je odprlo številne nove poglede in izzive za nadaljnji razvoj.

2 MODELIRANJE PADAVINSKEGA ODTOKA Z URBANIH POVRŠIN

2.1 Racionalna metoda

2.1.1 Uvod

Ocene padavinskega odtoka ali odtoka s prispevnega območja so prvotno temeljile na praktičnih izkušnjah in presoji inženirjev. Trenutna praksa pa je taka, da se urbano prispevno območje, ki je predmet odvodnjavanja, razdeli na več približno enakovrednih podobmočij. Urbana prispevna območja lahko vsebujejo npr. stanovanjske, poslovne ali industrijske površine. Običajno vsebujejo pretežni delež utrjenih površin, kot so površine streh, ulice in ceste, ki so glavni odvodnik površinske vode z urbanih površin, s kratkim časom koncentracije in jasno določenimi tokovnimi potmi. Sledenje običajno potekajo po cestnih in uličnih jarkih ter kadunjastih jarkih (muldah) in koritnicah (Thompson in sod., 2003).

2.1.2 Predpostavke

Pri uporabi racionalne metode veljajo naslednje predpostavke (Mays, 2001):

- intenziteta padavin je po času konstantna;
- intenziteta padavin je konstantna po prostoru (po celotnem obravnavanem prispevnem območju);
- frekvenčni porazdelitvi padavinskega dogodka in maksimalnega pretoka imata enako varianco in različno srednjo vrednost;
- čas koncentracije porečja je konstanten in enostavno določljiv;
- ne glede na zelo variabilne (časovno in prostorsko pogojene) padavinske izgube, lahko zelo natančno ocenimo delež padavin, ki prispeva k površinskemu odtoku;
- koeficient odtoka je konstanten, ne glede na letni čas, količino ali intenziteto padavin.

2.1.3 Racionalna enačba

Racionalna metoda je najpogosteje uporabljena hidrološka metoda za določitev površinskega odtoka v urbanih okoljih, pogosto pa se uporablja tudi za določanje največjega odtoka z manjših ruralnih porečij (Brilly in Šraj, 2006). Uporablja se za oceno takojšnjega maksimalnega odtoka s prispevnega območja, pri čemer velja, da je maksimalni odtok odvisen od maksimalne intenzitete padavin in površine prispevnega območja. Sorazmernostna konstanta se imenuje koeficient odtoka (Thompson in sod., 2003).

Racionalno enačbo zapišemo kot:

$$Q = C_d k_o i A, \quad (1)$$

kjer je:

- Q največja (maksimalna) vrednost površinskega odtoka [m^3/s],
- k_o koeficient odtoka [brezdimenzijski],
- C_d dimenzijski korekcijski faktor [$1/360=0.00278$],

- i povprečna intenziteta padavin [mm/h],
 A površina prispevnega območja [ha].

2.2 Metode za izdelavo hidrograma odtoka

2.2.1 Izdelava hidrograma odtoka

S pomočjo racionalne metode lahko določimo konico pretoka, ne moremo pa izdelati celotnega hidrograma odtoka. S tem pa smo pri uporabi metod hidravličnega modeliranja ter pri načrtovanju sistemov za odvajanje meteorne vode omejeni na pogoje stalnega-enakomernega toka (Thompson in sod., 2003). Za preučevanje nestalnega toka in s tem povezane razpoložljive prostornine sistemov za odvajanje meteorne vode ter stroškovno učinkovito načrtovanje teh sistemov, pa moramo poznati hidrograme odtokov cestnih požiralnikov in podzemnih cevovodov (Thompson in sod., 2003).

Hidrogram odtoka prikazuje časovno spremembo pretoka na določeni lokaciji znotraj prispevnega območja. Hidrografske analize izvajamo, kadar je pomembno poznavanje tokovnih poti, kot na primer pri načrtovanju padavinskih zadrževalnikov, čistilnih naprav in črpalnih postaj (Thompson in sod., 2003).

Večina postopkov pri hidroloških napovedih temelji na konceptu hidrograma enote, ki ga je prvi predstavil Sherman (1932). Hidrogram enote (HE) je sestavljen iz ene enote debeline vodne plasti, enakomerno porazdeljene po prispevnem območju za določeno časovno obdobje (Brilly in Šraj, 2006).

Osnovna teorija temelji na predpostavki, da velja med površinskim odtokom in vhodnimi efektivnimi padavinami linearen odnos. To pomeni, da lahko odnos opišemo z linearno diferencialno enačbo, ali pa uporabimo načelo sorazmernosti in superpozicije (Thompson in sod., 2003).

Hidrogram enote lahko izdelamo na osnovi merjenih podatkov o padavinah in površinskem odtoku s prispevnega območja, ter ga običajno uporabimo za različne padavinske dogodke na istem prispevnem območju. Za nemerjena porečja pa lahko izdelamo sintetični hidrogram enote s pomočjo empiričnih metod, ki povezujejo konico pretoka hidrograma ter čas koncentracije celotnega porečja s prispevnim območjem ali z lastnostmi padavin (Thompson in sod., 2003; Golob, 2012).

Dobljeni hidrogram lahko prenesemo (transponiramo) na sosednja, hidrološko podobna prispevna območja, za katera imamo na voljo podatke o padavinah in površinskem odtoku. Vendar pa ima sintetični hidrogram enote določene omejitve, ki jih mora inženir oz. hidrolog upoštevati pri praktični uporabi. Obstaja veliko različnih metod izdelave sintetičnega hidrograma enote (npr. Clarkov HE, Snyderjev HE, Nashev HE, SCS HE) (Brilly in Šraj, 2006).

Metode za izdelavo sintetičnih hidrogramov enote, ki so predstavljene v številnih hidroloških učbenikih, so po navadi uporabne za relativno velika prispevna območja. Na primer

Snyderjeva metoda je primerna za prispevna območja velikosti od približno 26 do 26 000 km^2 (Thompson in sod., 2003).

Nekateri modeli za simuliranje meteornih voda, kot na primer XP ali Visual SWMM prav tako uporabljajo Snyderjevo in SCS metodo ter ostale metode hidrograma enote za potrebe načrtovanja odvodnjavanja cest s cestnimi požiralniki na lokalnih prispevnih območjih velikosti nekaj tisoč kvadratnih metrov. Načrtovalci in inženirji morajo biti pri uporabi teh metod posebej pazljivi. V naslednjem poglavju je podrobneje predstavljena modificirana racionalna metoda, ki je pogosto uporabna za izdelavo hidrogramov odtoka za cestne požiralnike (Thompson in sod., 2003).

2.2.2 Modificirana racionalna metoda

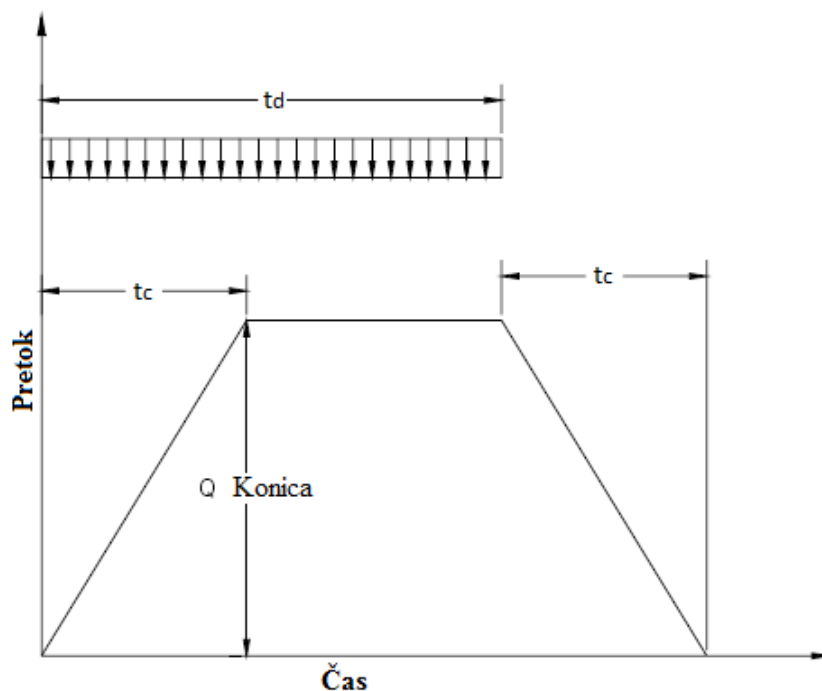
Modificirana racionalna metoda (MRM) je nadgradnja tradicionalne racionalne metode. S pomočjo MRM lahko izdelamo hidrogram odtoka in s tem dobimo volumen odtoka. Z izvorno racionalno metodo pa lahko izračunamo zgolj projektno konico pretoka. MRM je v zadnjih letih zelo široko uporabna hidrološka metoda v inženirski praksi. Uporablja se pri dimenzioniranju protipoplavnih in zadrževalnih objektov za določeno povratno dobo in vzporedno iztočno hitrost (Thompson in sod., 2003).

Modificirana racionalna metoda temelji na enakih predpostavkah kot izvorna racionalna metoda. Pomembna dodatna predpostavka pa je, da je trajanje naliva enako trajanju intenzitete padavin. To pomeni, da pri računu ne upoštevamo padavin in padavinskega odtoka, ki se pojavi pred ali po tem času (Thompson in sod., 2003; Gantar, 2014).

Prav tako velja predpostavka, da lahko hidrogram površinskega odtoka na urbanih območjih aproksimiramo bodisi z grafom trikotne ali trapezne oblike. Naraščajoči in padajoči del hidrograma sledi linearnemu odnosu med časom in površino določenega podpovodja, to pomeni, da so tudi pretoki linearno odvisni (Thompson in sod., 2003).

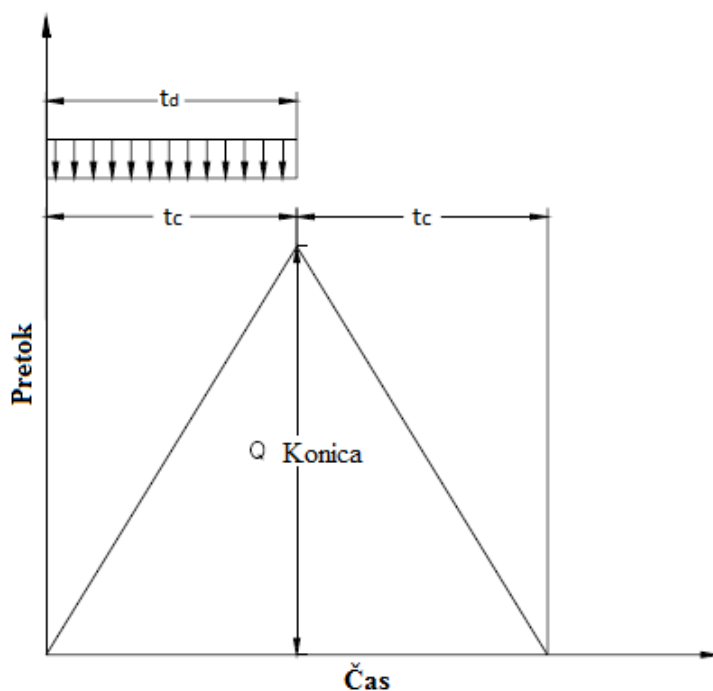
Z MRM lahko za določeno podpovodje razvijemo tri različne tipe hidrogramov odtoka. Oblika hidrograma je odvisna od časa trajanja naliva t_d , glede na čas koncentracije t_c . Čas koncentracije je čas, ki ga potrebuje voda, da odteče iz najbolj oddaljenega dela porečja, do iztočnega profila (Brilly in Šraj, 2006). Obstajajo naslednji trije tipi hidrogramov (Thompson in sod., 2003; Kestnar, 2012; Gantar, 2014):

- (1) Če je čas trajanja naliva t_d večji od časa koncentracije t_c , dobimo hidrogram trapezne oblike z enakomernim, vodoravnim maksimalnim pretokom, ki ga izračunamo z enačbo izvorne racionalne metode: $Q = C_d k_0 i A$. Naraščanje in padanje odtoka je linearno povezano s časom koncentracije t_c (slika 1).



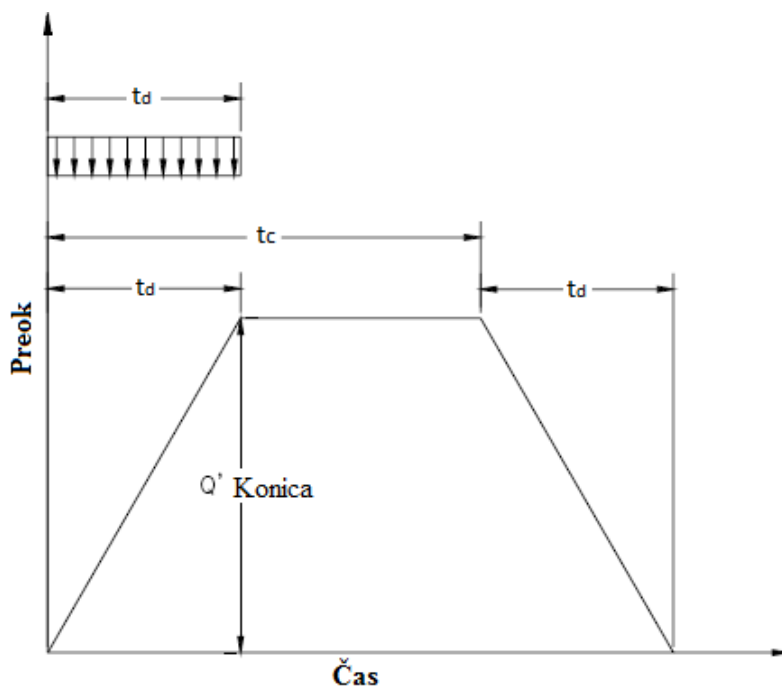
Slika 1: Hidrogram pri $t_d > t_c$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)

- (2) Če je čas trajanja naliva t_d enak času koncentracije t_c , dobimo hidrogram trikotne oblike. Graf linearno narašča do točke največjega pretoka $Q = C_d k_0 i A$, nato pa ponovno linearno pada proti $Q = 0$ (slika 2).



Slika 2: Hidrogram pri $t_d = t_c$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)

- (3) Če je čas trajanja naliva t_d manjši od časa koncentracije t_c , dobimo hidrogram trapezne oblike z enakomernim, vodoravnim največjim pretokom velikosti $Q'_p = C_d k_0 i A (t_d/t_c)$, ki traja od konca naliva do konca časa koncentracije t_c in je manjši od največjega pretoka Q iz prejšnjih dveh primerov. Čas naraščanje in padanje odtoka je enak vrednosti t_d , kot je razvidno na sliki 3.



Slika 3: Hidrogram pri $t_d < t_c$ (prirejeno po Thompson in sod., 2003)

Z metodo MRM lahko določimo časovno porazdeljen pretok, ki je potreben za napovedovanje dolvodnih poplav ali za določitev dimenzij zadrževalnikov. Pri tem pa moramo upoštevati omejitev, saj velikost prispevne površine ne sme biti večja od 80 000 do 120 000 m^2 (Thompson in sod., 2003).

3 ODVODNJAVANJE CEST

3.1 Uvod

Učinkovito odvodnjavanje cest je bistvenega pomena za vzdrževanje nivoja uslug ceste ter zagotavljanje varnega cestnega prometa in njegovega nemotenega poteka. Voda na cesti ovira promet, zmanjša odpornost vozil proti zdrs, poveča možnost nastanka hidroplaninga, omejuje vidljivost zaradi škropljenja in pršenja vode ter otežuje krmiljenje vozila. Poleg tega pa ima ustrezno odvodnjavanje tudi velik pomen pri zmanjševanju negativnih vplivov na okolje, predvsem na vode in tla (Brown in sod., 2013; TSC, 2010).

Cilje odvodnje padavinske vode s cest lahko razdelimo v naslednje skupine (TSC, 2010):

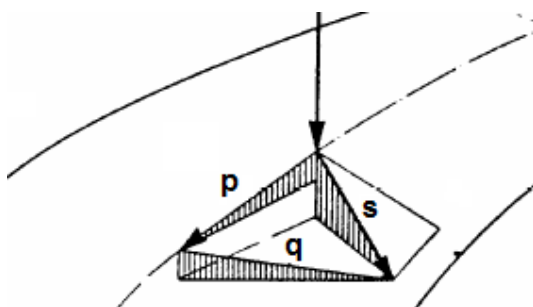
- (1) zagotavljanje varnosti in nemoteno odvijanje prometa,
- (2) zaščita ceste in cestnega telesa pred negativnimi vplivi vode,
- (3) zaščita vode in tal pred negativnimi vplivi s cest.

Pričujoče poglavje obravnava točkovno odvodnjavanje cest, torej odvajanje padavinskih voda s cest na lokacijah enega ali več izpustov. Predstavljen je sistem robnikov in koritnic, v naslednjem poglavju pa še sistem požiralnikov, ki s pomočjo cevovodov in/ali odprtih jarkov vodijo zbrano vodo do recipientov. Poglavje se začne z obravnavo problematike vijačenja cest in hidroplaninga, kar je tesno povezano z odvodnjavanjem.

3.2 Nagibi vozišča

Prostorsko sliko ceste predstavljajo združene projekcije, in sicer: situacija, vzdolžni prerez in prečni prerezi. Za optimalne konstrukcijske rešitve in hkrati tudi rešitve odvodnjavanja je potrebna medsebojna uskladitev vseh projekcij. To pomeni, da je potrebno konstruiranje situacijskih elementov ceste izdelati koordinirano glede na vzdolžni prerez in obratno (TSC, 2010).

Pravilo glede izbire mesta vijačenja pravi, da naj območje vijačenja ceste znotraj prečnega nagiba $\pm s_{min}$ ne sovпада z območjem vertikalne zaokrožitve nivelete znotraj vrednosti vzdolžnega nagiba $\pm q_{min}$ (TSC, 2010).



Slika 4: Prečni, vzdolžni in rezultirajoči nagib (Podgoršek, 2006)

Nagibi vozišča so pomembni za potek ceste v prostoru, kakovostno vozno dinamiko, odvodnjavanje in estetiko.

Ločimo 3 vrste nagibov (slika 4) (Podgoršek, 2006):

- (1) prečni nagib (s),
- (2) vzdolžni nagib (q) in
- (3) rezultirajoči nagib (q_{rez}).

Na podlagi izračunov in analiz so bile določene maksimalne vrednosti prečnega nagiba vozišča, glede na vzdolžni nagib upoštevajoč maksimalni rezultirajoči nagib (preglednica 1).

Preglednica 1: Maksimalne vrednosti prečnega nagiba vozišča, glede na vzdolžni nagib, upoštevajoč maksimalni rezultirajoči nagib (TSC, 2010).

Nagib nivelete q [%]	7.14	8.00	8.66	9.00	9.68
Max. prečni nagib s_{max} [%]	7.00	6.00	5.00	4.36	2.50

3.2.1 Prečni nagib vozišča

Prečni nagib vozišča ugodno vpliva na ublažitev centrifugalne sile v krivinah in na odtok vode z vozišča. Večji kot je prečni nagib, hitreje bo voda odtekla z vozišča in bolj bo ublažena centrifugalna sila. Minimalni prečni nagib asfaltne vozišča tako v naselju kot izven naselja znaša 2,5 % in je določen s stališča kakovostnega odvodnjavanja. Odstopanje od te vrednosti je dovoljeno le v območju vijačenja med nasprotnosmernima prečnima nagiboma. To je območje, ki je najbolj kritično prav s stališča odvodnjavanja. Dopustni maksimalni prečni nagib vozišča znaša v naselju 5.0 %, izven naselja pa 7.0 %. Prečni nagib ugodno vpliva na hitrost in dolžino odtoka vode z vozišča. S tem je debelina vodnega filma zelo majhna in ne predstavlja nevarnosti za hidroplaning (Podgoršek, 2006; Pravilnik o projektiranju cest, 17. člen).

Za kvalitetno odvodnjavanje vozišča upoštevamo naslednje minimalne prečne nagibe s_{min} (TSC, 2010):

- (1) 2.5 % za asfaltno vozišče,
- (2) 2.0 % za betonsko vozišče,
- (3) 4.0 % za gramozno vozišče.

Velikost maksimalnega prečnega nagiba vozišča s_{max} je odvisna od pogojev zdrsa mirujočega vozila na vozišču, vrste ceste (urbana, izvenurbana) in od rezultirajočega nagiba, pri čemer velja (TSC, 2010):

- (1) 7.0 % za ceste izven naselja in neobzidane ceste v naselju,
- (2) 5.0 % za urbane ceste in ulice,
- (3) 5.0 % za krajevne ceste (pri hitrostih ≥ 50 km/h do 7 %).

Navedene vrednosti prečnih nagibov so rezultat kompromisa med potrebnimi večjimi prečnimi nagibi za ustrezno odvodnjavanje vozišča ter relativno položnimi nagibi za zagotavljanje večje varnosti in udobnejšo vožnjo (Brown in sod., 2013).

Ameriška zvezna agencija za avtoceste - FHWA (*ang. Federal Highway Administration*) poudarja, da moramo pri izbiri prečnega nagiba poleg vrste ceste upoštevati tudi varno in udobno vožnjo. Raziskave FHWA so pokazale, da ima 2 % prečni nagib relativno majhen

vpliv na težavnost krmiljenja in stabilnost vozila. Uporaba večjih prečnih naklonov pri cestah s strešnim nagibom ni zaželeno. Na območjih intenzivnih padavin lahko za lažje odvodnjavanje uporabimo tudi večje prečne nagibe od 2 % (Brown in sod., 2013).

FHWA priporoča uporabo večjih prečnih nagibov na robnih pasovih večpasovnih cest (s tremi ali več pasovi) z enostranskim prečnim nagibom zaradi preprečevanja naraščanja vodne gladine. V primeru strešnega nagiba vozišča priporočajo na prvem voznem pasu od osi ceste prečni nagib 2 %, za vsak naslednji pas pa nagib povečamo za 0.5 do 1 %. Največji dopustni prečni nagib asfaltnega cestišča lahko znaša po priporočilih FHWA do 4 % (Brown in sod., 2013). FHWA podaja naslednje dodatne smernice glede določitve prečnega nagiba ceste (Brown in sod., 2013):

- (1) Notranje pasove ceste vijačimo z naklonom proti srednjemu ločilnemu pasu, če pogoji na terenu to dopuščajo;
- (2) Srednjega ločilnega pasu ne smemo odvodnjavati preko vozniških pasov;
- (3) Minimizarati moramo število in dolžino vodoravnih vozniških pasov (s prečnim nagibom $s = 0 \%$). Posebno pozornost je treba nameniti povečanju prečnih naklonov v konkavnih in konveksnih vertikalnih zaokrožitvah ter v prerezih z vodoravnim vzdolžnim naklonom;
- (4) Naklon bankine mora biti usmerjen tako, da voda odteka stran od vozniških pasov.

3.2.2 Vzdolžni nagib vozišča

Vzdolžni nagib vozišča je potreben za premagovanje višinskih razlik, pogojevanih z reliefnimi značilnostmi in za ustrezno vzdolžno odvodnjavanje. Vzdolžni nagibi so načeloma čim manjši, saj je pri tem najmanjša izguba energije. Edini pogoji so izvedba odvodnjavanja, vozna dinamika in estetsko vodenje roba vozišča pri vijačenju (Podgoršek, 2006).

Minimalni vzdolžni nagib nivelete q_{min} se določa v odvisnosti od pogojev odvodnjavanja. Pod pogojem, da prečni nagibi cestišča zagotavljajo zadostne pogoje odvodnjavanja, lahko predvidimo tudi horizontalno niveleto. Takšen primer je seveda možno realizirati le, ko je cesta v nasipu oziroma, če ni preprečeno odtekanje vode z vozišča. Nasprotno pa mora biti v primeru ceste v vkopu, kjer se odvodnjavanje vrši preko koritnic, kadunjastih jarkov (muld) in obcestnih jarkov. Vzdolžni nagib nivelete mora zagotoviti minimalne hidravlične pogoje za odtok vode (TSC, 2010).

Minimalni vzdolžni nagibi q_{min} , potrebni za učinkovito površinsko odvodnjavanje znašajo (TSC, 2010):

- (1) 0.2 % za cementno betonske površine,
- (2) 0.3 % za asfaltne površine,
- (3) 0.5 % za zatravljene površine.

FHWA podaja naslednje splošne smernice za določitev ustreznega vzdolžnega nagiba ceste (Brown in sod., 2013):

- (1) Upoštevanje minimalnega vzdolžnega nagiba je še posebej pomembno pri cestah z robniki, saj se voda zaradi večje višine robnika glede na vozišče, zadržuje ob njem. Kadar je na robu ceste zasajena vegetacija, lahko pride do odtekanja vode po vozišču tudi pri cestah brez robnika s položnim vzdolžnim nagibom.

- (2) Vzdolžni nagib koritnice ne sme biti manjši od 0.5 % na cestah z robnikom (abs. minimum znaša 0.3 %). Minimalen naklon lahko dosežemo tudi na pretežno ravnem terenu s posebnimi gradbenimi stroji.
- (3) V konkavnih vertikalnih zaokrožitvah zagotovimo ustrezno odvodnjavanje tako, da predvidimo konstanten 0.3 % minimalni naklon nivelete vsaj 15 m pred najnižjo točko zaokrožitve. Temu pogoju zadostimo, kadar je količnik dolžine vertikalne zaokrožitve (v metrih) ter algebrajske razlike gradientov (v odstotkih), manjši ali enak vrednosti 50. Slednje izrazimo z naslednjo enačbo:

$$K = L/(G_2 - G_1), \quad (2)$$

kjer je:

- K konstanta vertikalne zaokrožitve [m/%],
 L dolžina horizontalne zaokrožitve [m],
 G_i naklon (gradient) ceste [%].

3.2.3 Rezultirajoči nagib vozišča

Definicija rezultirajočega nagiba bolj ali manj definira kritična mesta, saj so le ta pogojena z velikostjo ali prečnega ali vzdolžnega nagiba vozišča (TSC, 2010).

Z izbiro prečnih in vzdolžnih nagibov ceste, ki se v končni fazi kažejo v obliki rezultirajočega nagiba, moramo zagotoviti čim hitrejši odtok padavinske vode k robu vozišča (TSC, 2010).

Rezultirajoči nagib je vektorska vsota prečnega in vzdolžnega nagiba in je še posebno pomemben zaradi odvodnjavanja, ker teče voda po vozišču po rezultirajočem nagibu, to je v smeri največjega nagiba in najkrajši poti. Izračuna se po naslednji enačbi (Podgoršek, 2006):

$$q_{rez} = \sqrt{q^2 + s^2}. \quad (3)$$

3.3 Pogostost naliva

Dimenzioniranje elementov odvodnjavanja ceste je odvisno od tega, kakšen naliv se upošteva v hidravličnem računu v skladu s preglednico 2, povzeto po 4. odstavku 43. člena Pravilnika o projektiranju cest.

Preglednica 2: Jakost naliva glede na vrsto ceste, projektno hitrost in pogostost naliva (Pravilnik o projektiranju cest)

Vrsta ceste	Projektna hitrost (km/h)	Pogostost naliva (let)	Jakost naliva (l/s/ha)
Daljinska	80 - 130	25	350
Povezovalna	60 - 90	10	220
Zbirna	40 - 70	5	170
Dostopna	40 - 60	1	130

3.4 Hidroplaning

Na mokrih vozni površinah se z naraščajočo hitrostjo vožnje trenje pnevmatike zmanjšuje. Z večanjem debeline vodnega filma na vozni površini se povečuje možnost nastanka hidroplaninga. Ko vozilo na cesti s pnevmatikami naleti na vodni film, se voda kanalizira skozi tekalne plasti pnevmatike ter skozi hrabe na vozišču. Hidroplaning nastopi takrat, ko sta prekoračeni drenažna kapaciteta tekalne plasti pnevmatike in hrap na vozišču. Tedaj začne debelina vode pred pnevmatiko naraščati, saj pride do kopičenja vode pred pnevmatiko (Brown in sod., 2013; Podgoršek, 2006).

Poglavitna vzroka za to sta gostota in viskoznost vode, ki ovirata odtekanje vode z naležne površine pnevmatike na vozni površini, ter količina vode, ki jo je treba odstraniti z naležne površine v enoti časa. Vsak element naležne površine pnevmatike, ki pride v območje naleganja na vozno površino, potrebuje določen čas, da prebije film vode in da prepotuje celotno območje naleganja. Čas, potreben za prebitje filma vode ni odvisen od hitrosti, pač pa od oblike pnevmatike, debeline in viskoznosti vmesnega vodnega filma vode ter hrapavosti vozne površine (Podgoršek, 2006).

Z naraščanjem debeline vodnega filma lahko pride do nastanka vodnega klina (ang. *water wedge*). Slednji povzroči hidrodinamično silo, ki lahko dvigne pnevmatiko in jo popolnoma loči od vozne površine. Posledica hidroplaninga je, da s pnevmatike na vozno površino ni mogoče prenašati nobenih drugih sil ali momentov, razen sile teže vozila. Ker je še tako majhen zavorni moment večji od pogonskega momenta, je posledica nastalega stanja in zaviranja praktično takojšnje blokiranje koles vozila. Voznik slej ko prej izgubi oblast nad vozilom (Podgoršek, 2006). Opisani pojav imenujemo polni dinamični hidroplaning. Zaradi majhne strižne odpornosti lahko pnevmatika izgubi vlečno sposobnost, voznik pa izgubi nadzor nad vozilom. Pogoji za nastanek hidroplaninga je zadostna debelina vodnega filma ($\geq 2 \text{ mm}$) in zadostna hitrost vožnje ($\geq 90 \text{ km/h}$). Kljub temu pa se lahko, odvisno od različnih kriterijev, hidroplaning pojavi tudi pri manjših hitrostih in manjših debelinah vodnega filma (preglednica 3) (Brown in sod., 2013).

Preglednica 3: Mejne debeline plasti vode za nastanek hidroplaninga pri različnih hitrostih vožnje (Podgoršek, 2006)

$v[\text{km/h}]$	$h_{vmax}[\text{mm}]$
60	8 – 12
80	5 – 8
100	3 – 6
120	2 – 5

Na območjih vijačenja pri minimalnih vzdolžnih nagibih je pogoj debeline vodnega filma izpolnjen že pri relativno nizkih intenzitetah padavin. Minimalni potreben horizontalni radij za nastanek hidroplaninga znaša ob upoštevanju pogojev $f_R = 0.7$ in $v = 90 \text{ km/h}$, približno 80 m. Parameter f_R pomeni drsno trenje v radialni smeri. Pod to vrednostjo horizontalnega radija nastanek hidroplaninga ni možen (Podgoršek, 2006).

Poleg debeline vodne plasti in hitrosti vozila, pa je hidroplaning odvisen tudi od geometrije ceste, globine profila pnevmatik, zračnega tlaka v pnevmatikah ter od stanja vozne površine.

Nastanek hidroplaninga lahko v problematičnih območjih omejimo z naslednjimi ukrepi (Brown in sod., 2013):

- (1) Načrtujemo tako geometrijo ceste, da zmanjšamo dolžino tokovne poti vode po vozišču. S tem preprečimo kopičenje vode in naraščanje vodne gladine.
- (2) Povečamo globino teksture (globina hrapavosti) asfaltne površine, z metodami kot je zarezovanje portlandskega cementnega betona. Povečanje strukture obrabne plasti asfaltne površine poveča drenažno zmogljivost ob stiku pnevmatike z vozno površino.
- (3) Uporabimo poseben tip drenažnega asfalta, ki je nekakšna kombinacija med drobirjem z bitumenskim mastiksom (SMA) in drenažnim asfaltom (PA) v smislu sestave zmesi kamnitih zrn (ang. *open graded asphaltic pavements*) (Bolčina, 2014). Naveden tip drenažnega asfalta izkazano zmanjšuje možnost nastanka hidroplaninga na vozni površini. Razlog je v sposobnosti vode, da se pod pritiskom pretaka med zrni asfaltne površine pod pnevmatikami. Slednje sprošča nastale hidrodinamične napetosti in zmanjšuje možnost nastanka hidroplaninga.
- (4) Uporabimo drenažne strukture vzdolž vozišča za zbiranje in odvajanje toka vode, ter zmanjšanje debeline vodnega filma in s tem možnost nastanka hidroplaninga.

3.5 Robniki in koritnice

Koritnica je konstrukcijski element prečnega prereza ceste, namenjen kontrolirani vzdolžni odvodnji. Uporabljamo jo pri sistemih odvodnjavanja avtocest, cest v vkopih, pogosto pa pri cestah v naseljih (TSC, 2010).

Položaj koritnice je praviloma ob robniku, tako da zajema vodo neposredno s cestišča ter brežin vkopov, iz hodnikov za pešce, kolesarskih stez in v nekaterih primerih tudi z zelenih površin. Tudi mejni vozni pas, ki delno ali v celoti poteka po koritnici, je lahko sestavni del koritnice (Brown in sod., 2013; TSC, 2010).

Ločimo med enostavno koritnico (ang. *conventional gutter*) in koritnico v obliki plitvega jarka (ang. *shallow swale gutter*), kot je prikazano na sliki 5. Enostavna koritnica ima običajno trikotno obliko prečnega prereza, kjer robnik predstavlja navpični krak trikotnika. Lahko ima bodisi enakomeren (oz. enojni), sestavljen (variira glede na prečni naklon ceste) ali parabolichen prečni prerez (slika 5.a). Koritnica v obliki plitvega jarka (slika 5.b) pa ima lahko trikotno ali pa krožno obliko prečnega prereza (Brown in sod., 2013).

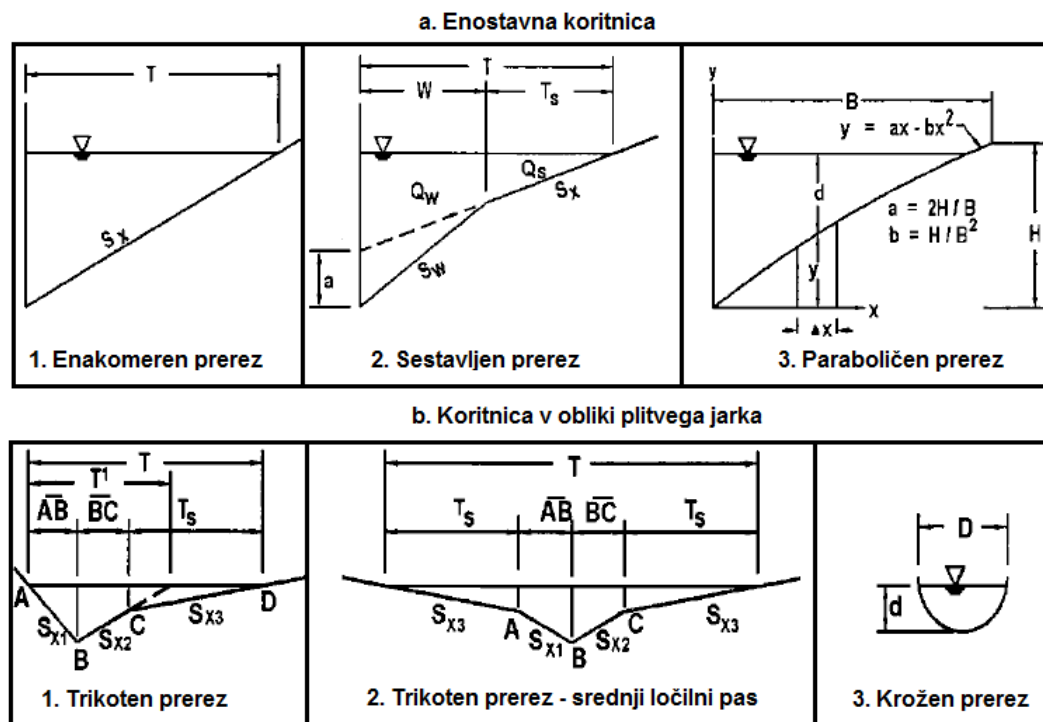
Koritnice so lahko izdelane iz prefabriciranih betonskih elementov, betonirane na mestu ali asfaltne s pripadajočim betonskim montažnim ali asfaltnim (redkeje) robnikom. Koritnica se oblikuje s poševno asfaltno, betonsko ali tlakovano površino širine 0,50 m ali 0,75 m z nagibom od 7,0 - 15,0 % proti robniku višine 12 cm (Pravilnik o projektiranju cest, 38. člen). Ob koritnici z robnikom se predvidi lovilna berma, ki zaščiti koritnico pred vdorom nečistoč iz brežin in s tem zagotovi učinkovito odvodnjavanje (TSC, 2010).

Robnike najpogosteje srečamo v naseljih, kjer uspešno združujejo funkcijo robnega elementa vozišča in hkrati elementa, ki omogoča kanaliziranje vode in s tem uspešno odvodnjavanje (TSC, 2010). Robniki opravljajo naslednje naloge (Brown in sod., 2013):

- zadržujejo vodo znotraj vozišča ter preprečujejo razlivanje na sosednje površine,
- preprečujejo nastanek erozije ceste v nasipu,

- razmejujejo vozne pasove,
- omogočajo ustrezen razvoj nepremičnin, ki mejijo na cesto.

Koritnica z robnikom tvori kanal trikotne oblike, ki mora prevajati površinski odtok brez oviranja prometa. Ob pojavu računskega pretoka pogosto pride do odtekanja vode ne le po širini koritnice, temveč tudi po pasovih za mirujoč promet, bankinah in vozišču (Brown in sod., 2013).



Slika 5: Tipični prerezi koritnice (prirejeno po Brown in sod., 2013)

Zelo pomemben pogoj pri načrtovanju cest je vezan na omejevanje širine površinskega odtoka vode prečno na vozišče (Brown in sod., 2013). Odtekačo vodo z brežin in drugih pobočij moramo pravočasno prestreči, da preprečimo odtekanje večje količine vode po vozišču in posledično odlaganje sedimentov in drugih naplavin. Vodo iz koritnic odvajamo do požiralnikov, ki morajo biti razporejeni tako, da zajamejo vso dotekajočo vodo. Ti so med seboj povezani z ustrezno cevno kanalizacijo, po kateri odvedemo vodo do izbranega recipienta, ali pa jo iz požiralnikov preko cestnih prepustov vodimo na nasprotno stran ceste v vzdolžne ali prečne jarke. Vodo iz koritnic lahko prav tako odvajamo na isti strani v obcestne jarke preko pobočnih kanalet ali tlakovanih jarkov (Brown in sod., 2013; TSC, 2010).

Namesto koritnice z robnikom lahko na zunanjem robu voznega pasu (kjer robniki niso nujni potrebni za usmerjanje prometa) predvidimo tudi plitev jarek, bankino ali drug podoben element tipskega prečnega prereza ceste. V primerjavi z navpičnim robnikom zagotavljata plitev jarek in bankina manjšo nevarnost za promet. Prav tako zagotavljata ustrezno hidravlično kapaciteto, ki ni odvisna od višine vodne gladine pri površinskem odtoku prečno po vozišču (Brown in sod., 2013).

Za preprečevanje odtekanja vode iz sredinskih ločilnih pasov po voznih pasovih moramo zagotoviti usmerjenost naklona ločilnih pasov in notranjih bankin v smeri proti sredinskemu zatravljenemu jarku (ang. *swale*). Taka zasnova je še posebej pomembna na avtocestah in hitrih cestah ter na cestah z več kot dvema voznima pasovoma v vsaki smeri vožnje (Brown in sod., 2013).

3.5.1 Kapaciteta koritnice

Pri načrtovanju odvodnavanja ceste moramo upoštevati številne dejavnike. Slediti moramo glavnemu cilju, ki je omejevanje odtekanja vode po širini vozišča (pri določeni povratni dobi padavin) v skladu z zakonskimi omejitvami. Med odtekanjem vode po koritnici navzdol, narašča tudi širina vodne gladine prečno na vozišče. V primeru neustrezne odvodnje, lahko začne voda ovirati promet in postane nevarna za promet, predvsem zaradi zmanjšanja odpornosti proti zdrsom, večje možnosti nastanka hidroplaninga, škropljenja vode itd. (UDFCD, 2008).

Številne težave pri odvodnjavanju cest izvirajo iz neupoštevanja omejene hidravlične sposobnosti tako koritnice kot tudi požiralnika. V mnogih primerih so koritnice neustrezno dimenzionirane, razdalje med požiralniki so prevelike, požiralniki pa niso sposobni sprejeti površinskega odtoka iz koritnice, ter jo po kanalizacijskem omrežju odvesti do recipienta. Pravilno hidravlično dimenzioniranje cestnih požiralnikov je zato bistvenega pomena pri načrtovanju odvodnjavanja cest (MSMA, 2012).

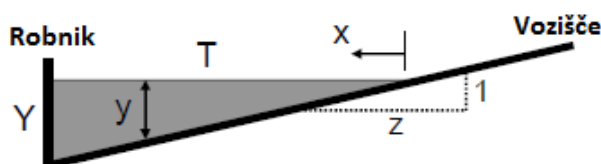
Kapaciteto koritnice moramo primerjati s površinskim odtokom s prispevnega območja, ki lahko obsega bodisi samo površino ceste ali tudi okoliški teren, na osnovi česar izračunamo razdaljo med požiralniki pri konstantnem vzdolžnem in prečnem nagibu koritnice. Za izračun kapacitete koritnice uporabljamo modificirano Manningovo enačbo. Modifikacija je potrebna zaradi hidravličnega radija iz osnovne Mannigove enačbe, ki ne opiše ustreznega prečnega prereza koritnice, zlasti kadar je širina vodne gladine pri površinskem odtoku prečno po vozišču precej večja od globine vode v koritnici (razmerje 40:1). Modificirana Manningova enačba ustrezno upošteva prirastek širine vodne gladine vzdolž prečnega prereza ceste (Brown in sod., 2013).

3.5.1.1 Izzardova enačba za izračun kapacitete koritnice

Pri izpeljavi Izzardove enačbe za izračun kapacitete koritnice uporabimo naslednje parametre (slika 6) (Charbeneau, 2014):

- vzdolžni nagib koritnice: q ,
- prečni nagib ceste: $s = 1/z = y/T$,
- površino prečnega prereza koritnice: $A = (Y T)/2 = sT^2/2$,
- omočen obod koritnice: $O = T(1 + q^2)^{0.5} + Ts$.

Posamezne spremenljivke v enačbah so predstavljene na slikah 5 in 6. Nato predpostavimo, da je prečni nagib ceste enak približno 2 % ($s \approx 0.02$), omočeni obod pa je enak: $O = 1.020 T$, kjer je T širina toka pri površinskem odtoku vode po cesti. Na podlagi tega lahko zapišemo, da je omočeni obod enak površini prečnega prereza koritnice: $O = T$ (slika 6).



Slika 6: Parametri koritnice (prirejeno po Charbeneau, 2014)

Manningova enačba za izračun hitrosti toka v koritnici se glasi (Charbeneau, 2014):

$$v = \frac{R^{2/3} q^{1/2}}{n_G}, \quad (4)$$

kjer je:

- R hidravlični radij [m]; $R = A/O$,
- A površina prečnega prereza koritnice [m^2],
- O omočen obod koritnice [m],
- q vzdolžni nagib koritnice [m/m],
- n_G koeficient hrapavosti po Manningu [$s m^{-1/3}$] (preglednice A.1, A.2 in A.3).

Pretok v koritnici je enak zmnožku površine prereza koritnice ter hitrosti toka v koritnici, kar v matematični obliki zapišemo z naslednjo integralno enačbo (Charbeneau, 2014):

$$Q_d = \int_0^T y v(x) dx = \int_0^T y \left(\frac{\phi}{n_G} R^{2/3} q^{1/2} \right) dx = \frac{\phi \sqrt{S_L}}{n_G} \int_0^T (s x)^{5/3} dx = \frac{3 \phi \sqrt{q}}{8 n_G s} Y^{8/3}. \quad (5)$$

Izzardova enačba za izračun kapacitete koritnice se tako glasi (Charbeneau, 2014):

$$Q_d = \frac{3 \phi}{8 n_G} S_x^{5/3} \sqrt{q} T^{8/3} = \frac{3 \phi}{8 n_G} S_x^{5/3} \sqrt{q} \left(\frac{Y}{s} \right)^{8/3} = \frac{3 \phi \sqrt{q}}{8 n_G s} Y^{8/3}, \quad (6)$$

Iz zgornje enačbe lahko izrazimo širino površinskega odtoka:

$$T = \left[\frac{8}{3} \frac{Q n}{s^{5/3} \sqrt{q}} \right]^{3/8}, \quad (7)$$

kjer je:

- ϕ faktor pretvorbe [$m^{1/3}/s$]; $\phi = 1 m^{1/3}/s$ za metrični sistem,
- P omočeni obod koritnice [m],
- Q_d kapaciteta koritnice [m^3/s],

T	širina površinskega odtoka vode prečno na vozišče [m],
s	prečni nagib ceste [%],
q	vzdolžni nagib koritnice [%],
Y	največja globina vode v koritnici [m].

Parametra T in Y sta običajno kriterija za določitev razdalj med požiralniki. Enačba (6) je grafično prikazana na grafikonu v prilogi B.1.

Največjo globino vode Y v koritnici zapišemo z naslednjo enačbo (Brown in sod., 2013):

$$Y = T s. \quad (8)$$

3.5.1.2 Enostavna koritnica z robnikom

Enostavna koritnica se začne na robu vozišča in je nagnjena proti robniku. Širina enostavne koritnice znaša med 0.5 in 0.7 m. Lahko ima enakomerno, sestavljeno ali parabolično obliko prečnega prereza, kot je prikazano na sliki 5. Prečni nagib enostavne koritnice je običajno enak prečnemu nagibu bankine ali voznega pasu ob koritnici. Koritnica s sestavljeno obliko prečnega prereza leži nižje od voznega pasu (v depresijski legi) in ima torej večji prečni nagib od sosednjega voznega pasu (Brown in sod., 2013).

3.5.1.3 Enostavna koritnica z enakomerno obliko prereza

Kapaciteto enostavne koritnice z enakomernim prečnim prerezom izračunamo po enačbi (6) ali pa jo določimo s pomočjo grafikona v prilogi B.1.

3.5.1.4 Enostavna koritnica s sestavljeno obliko prereza

Pri dimenzioniranju enostavne koritnice s sestavljenim prerezom moramo upoštevati pretok v poglobljenem delu koritnice. Kapaciteto koritnice lahko izračunamo z enačbama (9) in (10), pri čemer lahko neznane parametre odčitamo iz grafikona v prilogi B.2 ali pa z enačbo (11), ki je grafično predstavljena na grafikonu v prilogi B.3 (Brown in sod., 2013).

V prilogi B.3 je prikazan grafikon za načrtovanje koritnice s sestavljenim prerezom. Predpostavljeni sta širina poglobitve $W = 60 \text{ cm}$ in globina poglobitve $a = 50 \text{ mm}$. Globina poglobitve je določena s projekcijo enakomernega prečnega nagiba ceste na robnik. Za različne konfiguracije koritnice lahko razvijemo podobne grafikone (Brown in sod., 2013).

Razmerje kapacitete koritnice v določeni širini gladine (običajno se vzame širina rešetk) glede na skupno kapaciteto koritnice zapišemo kot (Brown in sod., 2013):

$$E_0 = 1 / \left\{ 1 + \frac{S_W/s}{\left[1 + \frac{S_W/s}{\frac{T}{W} - 1} \right]^{2.67} - 1} \right\}, \quad (9)$$

Kapaciteta poglobljenega dela koritnice je enaka:

$$Q_W = Q_d - Q_s, \quad (10)$$

torej lahko kapaciteto koritnice izračunamo z enačbo:

$$Q_d = Q_s / (1 - E_0), \quad (11)$$

kjer je:

- Q_W kapaciteta poglobljenega (depresijskega) dela koritnice [m^3/s],
- Q_d skupna kapaciteta koritnice [m^3/s],
- Q_s kapaciteta koritnice nad depresijskim območjem [m^3/s],
- E_0 razmerje kapacitete koritnice v določeni širini gladine (običajno se vzame širina rešetk) glede na skupno kapaciteto koritnice (Q_W/Q),
- S_W $s + a/W$.

3.5.1.5 Koritnica v obliki plitvega jarka

V določenih primerih moramo pri odvajanju vode s ceste v nasipu na zunanjem robu ceste predvideti robnik za varovanje brežine pred nastankom erozije. Kjer razmere na terenu to dopuščajo, lahko za odvajanje vode s ceste uporabimo tudi plitev jarek s krožnim ali trikotnim prerezom. Zagotoviti moramo ustrezne dimenzije prečnega prereza plitvega jarka za odvod vode do kanalizacijskega omrežja ali ustreznega recipienta (Brown in sod., 2013; TSC, 2010).

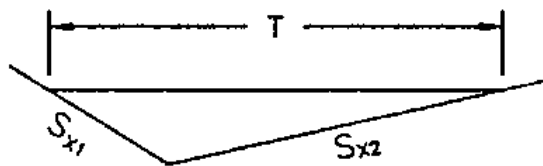
3.5.1.6 Koritnica s trikotno obliko prečnega prereza

Kapaciteto plitve koritnice s trikotno obliko prereza določimo s pomočjo nomograma v prilogi B.1. Prečni nagib koritnice S_X (slika 7) pa izračunamo po enačbi (Brown in sod., 2013):

$$S_X = (S_{x1} S_{x2}) / (S_{x1} + S_{x2}) \quad (12)$$

kjer je:

- S_{x1} prečni nagib leve stranice koritnice s trikotno obliko prečnega prereza [%],
- S_{x2} prečni nagib desne stranice koritnice s trikotno obliko prečnega prereza [%].



Slika 7: Parametri za določitev prečnega nagiba koritnice s trikotno obliko prereza
(Brown in sod., 2013)

3.5.1.7 Koritnica s krožno obliko prečnega prereza

Kapaciteto koritnice s krožno obliko prereza izračunamo z naslednjo enačbo (Brown in sod., 2013):

$$(d/D) = K_u [(Q_d n)/(D^{2.67} q^{0.5})]^{0.488} \quad (13)$$

kjer je:

- d globina toka v jarku s krožnim prerezom [m],
- D premer krožnega prereza jarka [m],
- K_u konstanta [$K_u = 1.179$],
- Q_d kapaciteta koritnice [m^3/s],
- n_G koeficient hrapavosti po Manningu [$s m^{-1/3}$] (preglednice 16, 17 in 18),
- q vzdolžni nagib koritnice [%].

Enačba (13) je ponazorjena na grafikonu v prilogi B.4. Širina koritnice T_W je definirana z dolžino tetive krožnega loka, ki jo izračunamo z enačbo (Brown in sod., 2013):

$$T_W = 2 (r^2 - (r - d)^2)^{0.5}, \quad (14)$$

kjer je:

- T_W širina krožne koritnice v prečnem prerezu [m],
- r polmer krožne koritnice [m],
- d globina vode v koritnici [m].

3.5.2 Primerjava kapacitet različnih tipov koritnic

Raziskave ameriške agencije FHWA kažejo, da je kapaciteta koritnice s sestavljenim prerezom (pri konstantnih vrednostih ostalih parametrov) do 70 % večja kot pri koritnici z enakomernim prerezom (Brown in sod., 2013).

Največji vpliv na kapaciteto koritnice ima širina površinskega odtoka T , nekoliko manjši vpliv ima prečni nagib, najmanjši pa vzdolžni nagib koritnice. Iz grafikona v prilogi B.5 je razvidno, da je kapaciteta koritnice s sposobnostjo prevajanja površinskega odtoka širine $T = 3m$ dejansko 18.8-krat večja od kapacitete koritnice pri $T = 1m$, ter 3-krat večja od kapacitete koritnice pri $T = 2m$ (Brown in sod., 2013).

Pri primerjavi kapacitete koritnic z različnimi prečnimi nagibi ugotovimo, da ima koritnica s prečnim nagibom 4 % približno 10-krat večjo kapaciteto kot koritnica s prečnim nagibom 1 %. Zmanjšanje vzdolžnega nagiba iz $S = 0.04$ na $S = 0.02$, povzroči zmanjšanje kapacitete koritnice na 71 % začetne vrednosti (Brown in sod., 2013).

3.5.3 Čas potovanja površinskega odtoka po koritnici

3.5.3.1 Čas koncentracije

Čas koncentracije, ki ga označujemo s kratico T_t , je definiran kot čas, ki ga potrebuje vodni delec, da priteče iz hidravlično najbolj oddaljene točke porečja do iztoka (t.i. točka koncentracije) ali druge izbrane točke (Brilly in Šraj, 2006; Autodesk, 2013a). Dejavniki, ki vplivajo na čas koncentracije so predvsem: dolžina tokovne poti (os vodotoka) ter njen naklon in koeficient hrapavosti. V zgornjem toku pa na hitrost odtoka vpliva tudi intenziteta padavin (McCuen in sod., 2002).

V diplomski nalogi je predstavljena metoda SCS TR-55 za izračun časa koncentracije, pri kateri razdelimo glavno tokovno pot na posamezne odseke (segmente), nato pa za vsak odsek posebej izračunamo hitrost toka in čas potovanja. Čas koncentracije je enak vsoti časov potovanj po odsekih glavne tokovne poti (McCuen in sod., 2002).

Tokovno pot razdelimo na naslednje segmente oz. odseke (Brilly in Šraj, 2006, Autodesk, 2013a):

- ploskovni tok (ang. *sheet flow*),
- plitev koncentriran tok (ang. *shallow concentrated flow*) ter
- tok v naravnem vodotoku in umetnih kanalih (ang. *channel flow*).

Ploskovni tok nastopa v zgornjem delu porečja, zanj pa so značilne kratke razdalje in majhne globine toka (20 mm in manj). Topografija in značilnosti površja povzročijo, da se voda kmalu prične koncentrirati v žlebičih in kotanjah, kjer znaša globina vode nekje od 40 do 100 mm. Del vode lahko odteka tudi po ceveh ali majhnih potokih. Čas potovanja po teh segmentih računamo ločeno za vsak segment posebej. Hitrost toka v strugi ali umetnem kanalu pa se računa ob predpostavki, da je slednji zapolnjen do vrha (McCuen in sod., 2002).

3.5.3.2 Hitrostna metoda SCS TR-55

Čas potovanja površinskega odtoka po koritnici lahko izračunamo s hitrostno metodo (SCS TR-55), ki se v praksi uporablja za oceno časa potovanja ploskovnega toka, plitvega koncentriranega toka ter toka v naravnem vodotoku in umetnih koritih oz. kanalih. Glede na dolžino in hitrost toka ocenimo čas potovanja po naslednji enačbi (McCuen in sod., 2002):

$$T_t = \frac{L}{3600 v}, \quad (15)$$

kjer je:

T_t	čas potovanja [h],
L	dolžina toka [m],
v	hitost toka [m/s].

Po enačbi (15) izračunamo čas potovanja za glavno tokovno pot. Slednjo po navadi razdelimo na posamezne segmente z različnimi nakloni in pokrovnostjo tal, zato moramo enačbo (15) zapisati v taki obliki, da bomo lahko izračunali čas potovanja za vsak segment posebej. Ker je čas koncentracije enak vsoti časov potovanj po posameznih segmentih glavnega vodotoka, dobi enačba (20) naslednjo obliko (McCuen in sod., 2002):

$$t_C = \sum_{i=1}^k T_{t_i} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{L_i}{60v_i} \right), \quad (16)$$

kjer je:

k	število segmentov,
i	indeks, ki se nanaša na posamezen segment toka.

Hitrost toka je odvisna od tipa toka (ploskovni, plitev, tok v žlebičih in jarkih, tok v naravnem vodotoku in umetnih koritih oz. kanalih, tok v cevi) ter od hrapavosti (podlage) in naklona tokovne poti. Hitrostna metoda upošteva tudi indeks padavin, oziroma 2-letno 24-urno višino padavin. Razvite so bile številne metode za oceno hitrosti površinskega odtoka vode po posameznih segmentih tokovne poti (McCuen in sod., 2002).

Kadar lahko natančno določimo značilnosti in geometrijo koritnice z robnikom, lahko ob predpostavki zapolnjene koritnice izračunamo čas potovanja po koritnici poljubne oblike z Manningovo enačbo (4) tako, da dolžino koritnice delimo s hitrostjo vode v njej (Žagar, 2013). Čas potovanja pa izračunamo po enačbi (16).

Ustrezne vrednosti za koeficient hrapavosti n_G v Manningovi enačbi (4) najdemo v skoraj vsaki hidrološki in hidravlični literaturi. Preglednice v prilogah A.1, A.2 in A.3 prikazujejo nekaj teh vrednosti. Postopek za izbiro ustrezne vrednosti koeficienta n_G je podrobno opisan v priročniku za izbiro Manningovega koeficienta hrapavosti za naravne struge in poplavne ravnice, ki je dostopen na spletu (glej Arcement in Schneider, 1984). Na splošno pa velja, da pri istem tipu površine izberemo za ploskovni tok precej večji koeficient hrapavosti kot za tok v naravni ali umetni strugi (Žagar, 2013).

Hitrost toka v kanalu trikotne oblike pa izračunamo po modificirani Manningovi enačbi (Brown in sod., 2013):

$$v = (K_U/n_G) q^{0.5} s^{0.67} T^{0.67}, \quad (17)$$

kjer je:

K_U	konstanta [$K_U = 0.752$],
v	hitrost toka v kanalu trikotne oblike [m/s],

T	širina površinskega odtoka vode prečno na vozišče [m],
s	prečni nagib ceste [%],
q	vzdolžni nagib koritnice [%].

Hitrost toka se spreminja s pretokom, ki običajno narašča vzdolž tokovne poti koritnice, kar pomeni, da sta tako hitrost toka kot tudi pretok v koritnici prostorsko odvisni spremenljivki (Brown in sod., 2013). Pretok vzdolž koritnice narašča zaradi bočnega dotoka v koritnico q_n (ang. *lateral inflow*) s površin vozišča, ki je nagnjen proti robniku (Charbeneau, 2014).

Za oceno povprečne hitrosti toka v koritnici s trikotno obliko uporabimo preglednico 4 ter grafikon v prilogi B.6. Parametra T_1 in T_2 v preglednici 4 pomenita širino površinskega odtoka vode v prvem (gorvodnem) in zadnjem (dolvodnem) prerezu koritnice. Parameter T_a pomeni širino površinskega odtoka pri povprečni hitrosti toka. Grafikon v prilogi B.6 predstavlja grafično rešitev enačbe (17) za izračun hitrosti toka v kanalu trikotne oblike, pri znanem prečnem in vzdolžnem nagibu ter pri širini površinskega odtoka T (Brown in sod., 2013).

Preglednica 4: Površinski odtok po širini vozišča pri povprečni hitrosti vode v koritnici trikotne oblike (Brown in sod., 2013)

T_1/T_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
T_a/T_2	0.65	0.66	0.68	0.7	0.74	0.77	0.82	0.86	0.9

4 NAČRTOVANJE CESTNIH POŽIRALNIKOV

Glavna naloga cestnih požiralnikov je zbiranje presežka meteorne vode (oz. učinkovitih padavin) z vozišča in nadaljnje odvajanje vode po meteorni kanalizaciji v recipient. Cestni požiralniki so lahko izdelani bodisi iz litega železa, jekla, betona in/ali prefabriciranega betona (UDFCD, 2008).

Hidravlična kapaciteta cestnih požiralnikov je odvisna od geometrije požiralnika ter od kapacitete koritnice. Kapaciteta požiralnika določa največji možni delež zajema vode iz koritnice in s tem količino vode, ki lahko odteče v meteorno kanalizacijo. Napačno določena kapaciteta in lokacija požiralnika lahko povzroči preplavitev vozišča, kar povzroča številne nevarnosti za udeležence v prometu (Brown in sod., 2013).

Lokacijo cestnih požiralnikov določimo na osnovi geometrijskih elementov ceste. Požiralnike v splošnem postavljamo na vseh depresijskih točkah na vozišču (lokalni minimumi) in na ločilnih pasovih, ter na območju križiščih in prehodov za pešce. Drugod pa požiralnike postavimo na takšno medsebojno razdaljo, da širina površinskega odtoka vode prečno na vozišče T pri projektnem nalivu z določeno povratno dobo, ne preseže zakonsko določene mejne vrednosti (UDFCD, 2008).

4.1 Tipi cestnih požiralnikov

Cestne požiralnike za odvajanje površinskega odtoka s cest lahko razdelimo v naslednje štiri skupine (Brown in sod., 2013, TSC, 2010):

- cestni požiralniki z reščkami in vtokom pod robnikom (ang. *grate inlets*),
- cestni požiralniki v robniku (ang. *curb-opening inlets*),
- kombinirani cestni požiralniki (ang. *combination inlets*) in
- linijski cestni požiralniki (ang. *slotted drain inlet*).

Preglednica 5 prikazuje primerjavo med različnimi tipi požiralnikov v smislu uporabnosti, prednosti in slabosti.

Preglednica 5: Primerjava različnih tipov požiralnikov (Brown in sod., 2013)

Požiralnik	Uporabnost	Prednosti	Slabosti
Požiralnik z vtokom pod robnikom	Lokalna depresija in pri enakomernem nagibu koritnice (varno za kolesarje).	Primeren za širok razpon nagibov.	Zamašitve, z večanjem vzd. nagiba se zmogljivost manjša.
Požiralnik v robniku	Lokalna depresija in pri enakomernem nagibu koritnice (ni primeren za strme nagibe).	Redko se zamaši, varen za kolesarje.	Izguba zmogljivosti pri večjih nagibih.
Kombiniran požiralnik	Depresijska območja in pri enakomernem nagibu koritnice (varno za kolesarje).	Velika kapaciteta, redko se zamaši.	Višja cena.
Linijski požiralnik	Prestrezanje ploskovnega toka (glej Žagar, 2013).	Prestrezanje večje širine odtoka.	Dovzeten za zamašitev.

Izbiro požiralnika, tako oblike kot tudi položaj pogojuje več parametrov in sicer (TSC, 2010):

- količina vode, ki priteče do požiralnika,
- tip elementa odvodnjavanja po kateri priteče voda (koritnica, kadunjasti jarek, ..),
- vzdolžni nagib ceste,
- prečni nagib ceste,
- hrapavost ceste.

Ustreznost cestnih požiralnikov pri odvodnjavanju cest običajno presojava na osnovi dejanskega površinskega odtoka po širini vozišča.

4.2 Osnovne lastnosti cestnih požiralnikov

Najpomembnejši lastnosti cestnih požiralnikov sta hidravlična zmogljivost oz. sprejemna kapaciteta ter lokacija požiralnika. V primeru ceste z enakomernih vzdolžnim nagibom koritnice postavljamo požiralnike na enakomerne medsebojne razdalje, s čimer omejimo širino odtoka po vozišču. Velikost in tip požiralnika določimo na osnovi hidravlične (sprejemne) kapacitete požiralnika, pri čemer se moramo zavedati, da tudi pri majhni intenziteti naliva, požiralnik le redko prestreže celoten površinski odtok (UDFCD, 2008).

Sprejemna kapaciteta požiralnika Q_i (ang. *interception capacity*) je sposobnost požiralnika za prestrežanje površinskega odtoka ob upoštevanju določenih pogojev (Brown in sod., 2013).

Učinkovitost požiralnika E (ang. *efficiency*) pa pomeni odstotek prestreženega skupnega površinskega odtoka v danih pogojih. V matematični obliki jo zapišemo z naslednjo enačbo (Brown in sod., 2013):

$$E = Q_s / Q_d , \quad (18)$$

kjer je:

- E učinkovitost požiralnika [%],
- Q_d kapaciteta koritnice [m^3/s],
- Q_s prestrežen tok [m^3/s].

Učinkovitost požiralnika je odvisna od intenzitete naliva, od prečnega in vzdolžnega nagiba koritnice, od kapacitete koritnice, od hrapavosti površine koritnice, od kvalitetne izvedbe umestitve požiralnika v cestno telo in še od vrste drugih dejavnikov. V večini primerov se zgodi, da se nekaj vode, ki priteče do požiralnika (Q_d), prelije naprej v smeri največjega gradienta. Zapišemo lahko naslednjo enačbo (TSC, 2010; Brown in sod., 2013):

$$Q_p = Q_d - Q_i , \quad (19)$$

kjer je:

- Q_p količina prelite vode [m^3/s],
- Q_d kapaciteta koritnice [m^3/s],
- Q_i sprejemna kapaciteta požiralnika [m^3/s].

V splošnem velja, da se z večanjem pretoka povečuje sprejemna kapaciteta požiralnika, zmanjšuje pa se učinkovitost požiralnika. Dejavniki, ki vplivajo na kapaciteto koritnice, vplivajo tudi na sprejemno kapaciteto požiralnika (Brown in sod., 2013).

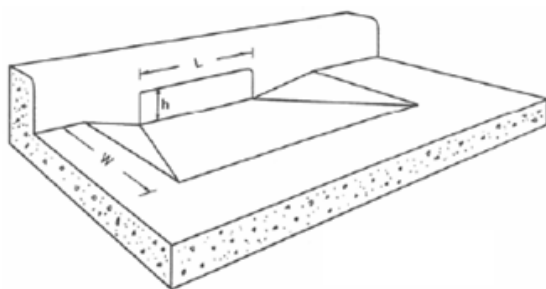
Raziskave FHWA so pokazale, da dosegajo največjo sprejemno kapaciteto požiralniki s poglobljenim vtokom v robniku in kombinirani požiralniki (Brown in sod., 2013).

4.3 Cestni požiralnik v robniku

Cestni požiralniki v robniku (slika 8) se najpogosteje uporabljajo na mestnih cestah in avtocestah. Običajno imajo poglobljen (depresijski) vtok, lahko pa so vgrajeni tudi v vbočen del robnika (Charbeneau, 2014). Tovrstni požiralniki so varni tudi za kolesarski promet (Brown in sod., 2013).

Učinkovitost požiralnika v robniku je odvisna od dolžine vtočne odprtine, največje globine vode v koritnici, prečnega nagiba ter vzdolžnega nagiba koritnice. Pri majhnem površinskem odtoku in veliki dolžini vtočne odprtine ter majhnem vzdolžnem nagibu koritnice je požiralnik teoretično sposoben presteči vso odtekajočo vodo. Dejansko pa je vgradnja požiralnika s tako dolgim vtokom ekonomsko neučinkovita. Zato je potrebno določiti učinkovitost požiralnika, kot razmerje med kapaciteto koritnice in presteženim tokom (UDFCD, 2008).

Uporaba požiralnika v robniku je priporočljiva v lokalnih depresijah (ang. *sump*) ter pri manjših vzdolžnih nagibih koritnice do 3 % (Brown in sod., 2013). V primerjavi z ostalimi tipi so taki požiralniki manj dovzetni za zamašitve s plavinami, predstavljajo pa tudi manj motenj za cestni promet. Na voznih pasovih z manjšimi vzdolžnimi nakloni in na lokacijah, kjer bi rešetke lahko ovirale pešce in kolesarje, so požiralniki v robniku ustrezna alternativa požiralnikom z rešetkami in vtokom pod robnikom (Brown in sod., 2013).



Slika 8: Cestni požiralnik v robniku (UDFCD, 2008)

V naslednjih podpoglavjih so predstavljeni najpomembnejši dejavniki, ki jih je potrebno upoštevati pri načrtovanju cestnih požiralnikov v robniku.

4.3.1 Dotok v požiralnik

Specifična energijska višina E na vtoku v požiralnik je enaka vsoti kinetične energije na dotoku ter globine vode v koritnici Y (Charbeneau, 2014):

$$E = Y + \frac{v_L^2}{2g}, \quad (20)$$

kjer je:

- E specifična energijska višina na vtoku [m],
- Y globina vode v koritnici [m],
- $\frac{v_L^2}{2g}$ kinetična energija na vtoku [m].

Globina vode v koritnici Y je odločilen parameter, ki vpliva na količino vode in režim vtoka v požiralnik. Zgornji (gorvodni) rob vtočne odprtine požiralnika deluje kot kontrolna točka višine vode na dotoku (parameter Y_{max} na sliki 9), zato na tem mestu govorimo o kritičnem dotoku (Charbeneau, 2014).

Enačba kritičnega dotoka (Charbeneau, 2014):

$$y_c = \left(\frac{2}{3}\right) Y, \quad (21)$$

kjer je:

- y_c kritična višina vode na zgornjem robu vtočne odprtine požiralnika [m],

torej je:

$$\frac{v_c^2}{2g} = \left(\frac{1}{3}\right) Y. \quad (22)$$

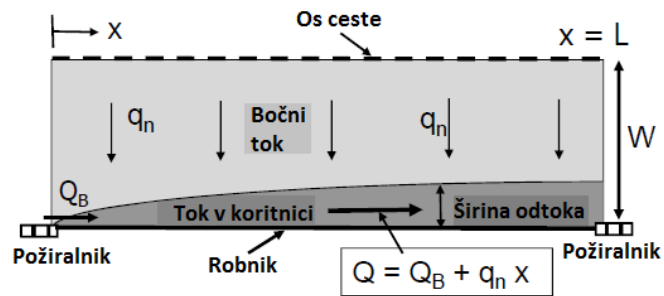
Enotski dotok v požiralnik, ki je odvisen od višine vtočne odprtine, zapišemo z enačbo:

$$q = y_c v_c = \left(\frac{2}{3} Y\right) \left(\sqrt{\frac{2gY}{3}}\right) = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} (Y)^{3/2}, \quad (23)$$

kjer je:

- v_c hitrost vode na zgornjem robu vtočne odprtine požiralnika [m/s],
- q enotski dotok v požiralnik [m^2/s],
- g gravitacijski pospešek [$g = 9.81 \text{ m/s}^2$].

Dotok v požiralnik je torej enak vsoti kapacitete koritnice ter zmnožku enotskega dotoka koritnice in dolžine koritnice, kot je prikazano na sliki 9.



Slika 9: Čas potovanja v koritnici (prirejeno po Charbeneau, 2014)

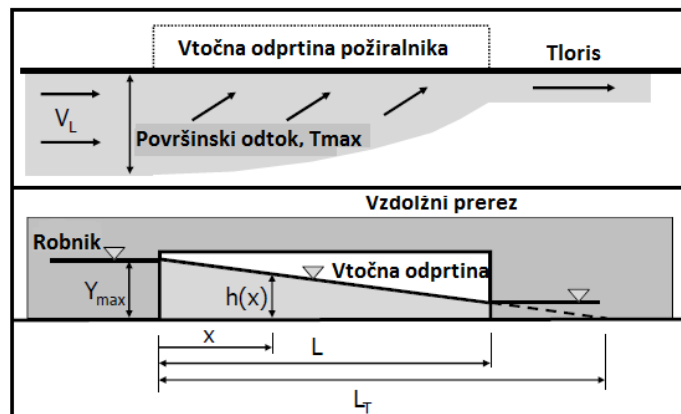
4.3.2 Globina vode na vtoku v požiralnik

Velja predpostavka, da se potek gladine spreminja linearno vzdolž vtočne odprtine požiralnika (slika 10). Torej lahko zapišemo naslednjo enačbo (Charbeneau, 2014):

$$Y = Y_{max} [1 - x/L_T], \quad (24)$$

kjer je:

- L_T teoretično potrebna dolžina vtočne odprtine požiralnika za popolno prestrežanje površinskega odtoka [m],
- Y višina vtočne odprtine požiralnika [m],
- Y_{max} maksimalna višina vode v začetni točki vtočne odprtine požiralnika [m].



Slika 10: Analiza dotoka v požiralnik (prirejeno po Charbeneau, 2014)

Glede na predpostavke o spremenljivi globini lahko zapišemo:

$$Q_{Cl} = \int_0^L y_c v_c dx = \int_0^L \left(\frac{2}{3}Y\right) \left(\sqrt{\frac{2gY}{3}}\right) dx = \frac{2}{3} \frac{2g}{3} Y_{max}^{3/2} \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L_T}\right)^{3/2} dx. \quad (25)$$

Po razvoju integrala dobimo:

$$Q_{CI} = \frac{4}{15} \sqrt{\frac{2g}{3}} Y_{max}^{3/2} L_T \left[1 - \left(1 - \frac{L}{L_T} \right)^{5/2} \right]. \quad (26)$$

Ob predpostavke, da je $L = L_T$, lahko požiralnik sprejme celoten dotok Q_A (Charbeneau, 2014):

$$Q_A = Q_{CI}(L_T) = \frac{4}{15} \sqrt{\frac{2g}{3}} Y_{max}^{3/2} L_T. \quad (27)$$

4.3.3 Vtočna odprtina požiralnika

Obstajajo različne dimenzije vtočnih odprtin v robniku. Maksimalna višina vtočne odprtine požiralnika se običajno giblje med 100 in 150 mm. Potrebno dolžino vtočne odprtine za popolno prestrežanje pretoka v koritnici z enakomernim prečnim nagibom izračunamo po naslednji enačbi (Brown in sod., 2013; Charbeneau, 2014):

$$L_T = \frac{15}{4} \sqrt{\frac{3}{2g}} \frac{Q_A}{Y_{max}^{3/2}} \quad (28)$$

Ob upoštevanju Izzardove enačbe za izračun Y_{max} :

$$Y_{max} = \left[\frac{8 n_G s Q_A}{3 \phi \sqrt{q}} \right]^{3/8}, \quad (29)$$

lahko zapišemo naslednjo enačbo:

$$L_T = \frac{15}{4} \sqrt{\frac{3}{2g}} \left(\frac{3 \phi}{8} \right)^{9/16} \left(\frac{1}{n_G s} \right)^{9/16} (q)^{9/32} (Q_A)^{7/16}, \quad (30)$$

ki jo za metrični sistem enot zapišemo v končni obliki:

$$L_T = K_u \left(\frac{1}{n_G s} \right)^{0.6} (q)^{0.3} (Q_A)^{0.42}, \quad (31)$$

kjer je:

- K_u konstanta [0.817],
- L_T dolžina vtočne odprtine, potrebna za 100 % prestrežanje toka v koritnici [m],
- Q_A skupen dotok v koritnico [m^3/s],
- s prečni nagib ceste [%],
- q vzdolžni nagib koritnice [%],

n_G koeficient hrapavosti po Manningu [$s m^{-1/3}$] (priloge A.1, A.2 in A.3).

4.3.4 Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika

Sprejemna kapaciteta požiralnika v robniku je odvisna od višine vode pri robniku ter od dolžine vtočne odprtine. Navedena parametra sta zaradi večje kapacitete koritnice, večja pri koritnicah s poglobljenim (depresijskim) vtokom v požiralnik ter pri konstantno poglobljenih koritnicah. To pomeni, da lahko na račun poglobljenega vtoka v požiralnik in na račun povečanja prečnega nagiba koritnice, povečamo globino vode v koritnici in s tem zmanjšamo odtok po širini vozišča (Brown in sod., 2013).

Požiralniki v robniku so v splošnem manj dovzetni za zamašitve. Zgornja nosilna plošča (ang. *top slab support*), ki pokriva vtočno odprtino v robniku (slika 11), lahko bistveno zmanjša sprejemno kapaciteto požiralnika. Eksperimenti so pokazali, da lahko nosilna plošča zmanjša učinkovitost požiralnika tudi za več kot 50 %. Kadar pa se ob nosilno ploščo zagostijo naplavine, se učinkovitost požiralnika lahko zmanjša tudi za 100 % (Brown in sod., 2013).



Slika 11: Cestni Požiralnik v robniku (foto: Žagar, 2016)

Pri krajših dolžinah vtočne odprtine, kjer velja $L < L_T$, lahko izračunamo učinkovitost požiralnika po naslednji enačbi (Brown in sod., 2013):

$$E = 1 - [1 - (L/L_T)]^{1.8} \quad (32)$$

kjer je:

- E učinkovitost požiralnika,
- L dolžina vtočne odprtine [m],
- L_T dolžina vtočne odprtine, potrebna za 100 % prestrežanje toka v koritnici [m].

Učinkovitost požiralnika lahko določimo tudi s pomočjo grafikona v prilogi B.7.

4.3.4.1 Požiralnik s poglobljenim (depresijskim) vtokom

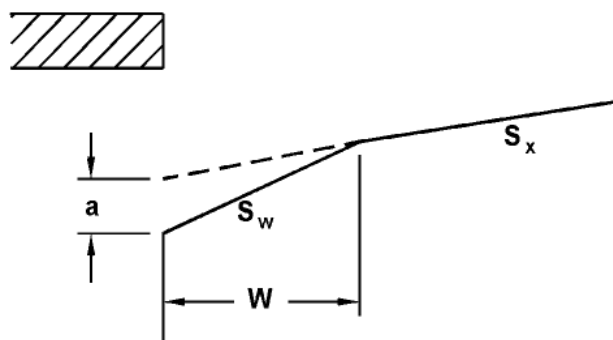
Pri obravnavi požiralnika s poglobljenim (depresijskim) vtokom v robniku, obravnavamo nov parameter, ki ga imenujemo ekvivalentni prečni nagib s_e . Koritnica z ekvivalentnim prečnim nagibom ima enako sprejemno kapaciteto, kot bi ga imela ista koritnica s sestavljenim prečnim nagibom. Ekvivalenten prečni nagib s_e izračunamo z naslednjo enačbo (Brown in sod., 2013):

$$s_e = s_x + s'_w E_0, \quad (33)$$

kjer je:

- s_x prečni nagib koritnice, merjeno glede na prečni nagib ceste [m/m],
- s'_w $a/[1000 W]$ [m],
- a globina depresijske cone [m],
- E_0 razmerje pretoka v depresijskem prerezu koritnice glede na celotni pretok v koritnici, določen z obliko prereza koritnice gorvodno od požiralnika.

Slika 12 prikazuje parametre požiralnika v robniku s poglobljenim (depresijskim) vtokom, ki so uporabljeni v enačbi (33).



Slika 12: Parametri požiralnika v robniku s poglobljenim vtokom (Brown in sod., 2013)

Potrebno dolžino vtočne odprtine poglobljenega požiralnika za popolno prestrezanje pretoka v koritnici, lahko bistveno zmanjšamo na račun povečanja prečnega nagiba s ter ekvivalentnega prečnega nagiba koritnice s_e , kar je razvidno tudi iz grafikona v prilogi B.8. Ekvivalenten prečni nagib s_e povečamo z uporabo konstantno ali lokalno poglobljeno koritnico (Brown in sod., 2013).

Z upoštevanjem ekvivalentnega prečnega nagiba s_e , lahko enačbo (31) zapišemo v naslednjo obliko:

$$L_T = K_T Q^{0.42} q^{0.3} [1/(n_G s_e)]^{0.6}, \quad (34)$$

kjer je:

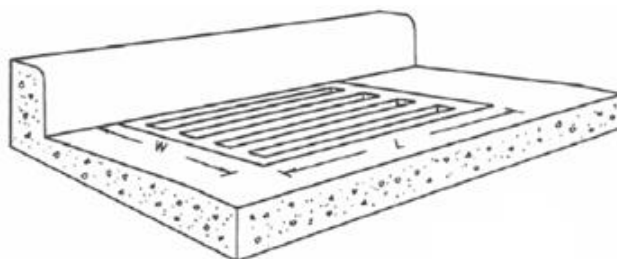
L_T	dolžina vtočne odprtine, potrebna za 100 % prestrezanje toka v koritnici [m],
K_T	konstanta [0.817],
s_e	ekvivalenten prečni nagib koritnice, ki ga izračunamo po enačbi 33 [%],
Q	dotok v koritnico [m^3/s],
q	vzdolžni nagib koritnice [%],
n_G	koeficient hrapavosti po Manningu [$s m^{-1/3}$] (preglednice 16, 17 in 18).

Enačba (34) in grafikon v prilogi B.8 se uporabljata tako pri obravnavi enojnega, kot sestavljenega prečnega nagiba koritnice s poglobljenim (depresijskim) vtokom v požiralnik (Brown in sod., 2013).

Primer določitve širine površinskega odtoka in učinkovitosti požiralnika je prikazan v poglavju 4.10.

4.4 Cestni požiralnik z rešetkami in vtokom pod robnikom

Cestni požiralniki z rešetkami in vtokom pod robnikom (slika 13) so primerni za velik razpon vzdolžnih nagibov koritnice. V splošnem se kapaciteta tovrstnega požiralnika zmanjšuje z večanjem vzdolžnega naklona koritnice, vendar v manjši meri kot pri požiralniku v robniku. Glavna prednost je v možnosti postavitve požiralnikov vzdolž tokovne poti vode. Največja pomanjkljivost pa je večja dovzetnost za zamašitve z nesnago in plavinami. Tovrstni požiralniki so primerni za uporabo na nevarnejših cestnih odsekih. Na območjih kolesarskega prometa je potrebno zagotoviti kolesarjem primerne in varne rešetke (Brown in sod., 2013).



Slika 13: Cestni požiralnik z rešetkami in vtokom pod robnikom (UDFCD, 2008)

4.4.1 Tipi vtočnih rešetk

Ameriška agencija FHWA je požiralnike z vtokom skozi rešetke razdelila v naslednje skupine (Brown in sod., 2013):

P-50	mrežast tip rešetk z medsebojnim razmikom 48 mm (priloga C.1);
P-50x100	mrežast tip rešetk z vzdolžnim razmikom med palicami 48 mm in prečnim razmikom 102 mm, ter s premerom palic 10 mm;

P-30	mrežast tip rešetk s medsebojnim razmikom 29 mm (priloga C.2);
<i>Curved Vane</i>	rešetke z vertikalno ukrivljenimi palicami, z vzdolžnim razmikom med palicami 83 mm in prečnim razmikom 102 mm (priloga C.3);
45°- 60 <i>Tilt Bar</i>	45° vertikalni nagib rešetk, vzdolžni razmik med palicami 57 mm in prečni razmik 102 mm (priloga C.4);
45°- 85 <i>Tilt Bar</i>	45° vertikalni nagib rešetk, vzdolžni razmik med palicami 83 mm in prečni razmikom 102 mm;
30°- 85 <i>Tilt Bar</i>	30° vertikalni nagib rešetk, vzdolžni razmik med palicami 83 mm in prečni razmikom 102 mm (priloga C.5);
<i>Reticuline</i>	rešetke v obliki satovja z vzdolžnimi nosilnimi palicami (priloga C.6).

4.4.2 Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika

Sprejemna kapaciteta požiralnika z rešetkami je odvisna od količine vode, ki odteče skozi rešetke, od velikosti in razporeditev rešetk ter od hitrosti toka v koritnici. Učinkovitost požiralnika pa je poleg zgornjih dejavnikov, odvisna tudi od skupnega pretoka v koritnici (Brown in sod., 2013).

Vtok v požiralnik poteka pri plitvem zajezenem toku po principu bočnega preliva, pri višjih gladinah pa po principu vtoka skozi zožitev (ang. *orifice*). Pri vmesnih gladinah prihaja do prehoda med obema režimoma vtoka. Kapaciteta požiralnika se lahko pri določeni višini vodne gladine precej zmanjša zaradi odlaganja plavin na rešetkah. S tem pa se zmanjša tudi efektivni obseg in čista vtočna površina požiralnika (Brown in sod., 2013).

Za določitev sprejemne kapacitete cestnega požiralnika z vtokom pod robnikom razdelimo površinski tok na čelni tok (ang. *frontal flow*) in stranski tok (ang. *side flow*), kot je to prikazani na sliki 8. Čelni tok je definiran kot del površinskega odtoka v širini rešetk. Del toka izven širine rešetk pa imenujemo bočni tok. Čelni tok izrazimo z naslednjo enačbo (UDFCD, 2008):

$$Q_w = Q[1 - (1 - (W/T))]^{2.67} , \quad (35)$$

kjer je:

Q_w	čelni dotok (v širini rešetk) [m^3/s],
Q	skupni površinski odtok [m^3/s],
W	širina vtočnih rešetk [m],
T	skupna širina otekajoče vode [m].

Razmerje med čelnim tokom in skupnim pretokom v koritnici označimo z E_0 in zapišemo z enačbo:

$$E_0 = \frac{Q_w}{Q} = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67}, \quad (36)$$

kjer je:

- Q skupen pretok v koritnici [m^3/s],
- Q_w pretok v širini vtočnih rešetk W [m^3/s],
- W širina poglobljenega dela koritnice ali rešetk (prečno na vozišče) [m],
- T skupno razlivanje vode [m].

Razmerje med bočnim tokom Q_s in skupnim tokom v koritnici Q pa izrazimo z enačbo:

$$Q_s/Q = 1 - (Q_w/Q) = 1 - E_0, \quad (37)$$

Pri tem je treba opozoriti, da je širina rešetk v splošnem enaka širini koritnice ali kadunjastega jarka (mulde). Po definiciji velja:

$$Q_s = Q - Q_w, \quad (38)$$

kjer je:

- Q_s stranski dotok (tok izven širine rešetk) [m^3/s].

Razmerje med čelnim tokom, ki odteče v požiralnik in celotnim čelnim tokom, označimo z R_f in izrazimo z enačbo (UDFCD, 2008):

$$R_f = \frac{Q_{wi}}{Q_w} = 1.0 - K_U(v - v_0) \quad \text{za } v \geq v_0, \text{ sicer velja } R_f = 1.0, \quad (39)$$

kjer je:

- K_U konstanta [0.295],
- Q_{wi} čelni tok, ki odteče v požiralnik [m^3/s],
- v hitrost toka vode po koritnici ali muldi [m/s],
- v_0 hitrost vode, ki pljuskne skozi rešetke [m/s].

Pri enačbi (39), ki je grafično prikazana na grafikonu v prilogi B.9, moramo upoštevati dolžino rešetk, obliko palic in hitrost toka v koritnici, pri kateri voda pljuskne skozi rešetke (Brown in sod., 2013).

Hitrost vode, ki pljuskne skozi rešetke (ang. *splash-over velocity*) je definirana kot minimalna hitrost, ki požene že manjši del odtekajoče vode skozi rešetke. Odvisna je od dolžne in tipa rešetk. Izračunamo pa jo z empirično enačbo (UDFCD, 2008):

$$v_0 = \alpha + \beta L_e + \gamma L_e^2 + \eta L_e^3, \quad (40)$$

kjer je:

- v_0 hitrost vode, ki pljuske skozi rešetke [m/s],
 L_e efektivna (koristna) dolžina vtočne rešetke [m],
 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ konstante iz preglednice 6 [-].

Preglednica 6: Empirični koeficienti za določitev hitrosti vode, ki pljuske skozi vtočne rešetke (UDFCD, 2008)

Tipi vt. rešetak	α	β	γ	η
P-50	2.22	4.03	0.65	0.06
P-30	1.76	3.12	0.45	0.03
Vertikalno ukrivljene	0.3	4.85	1.31	0.15
45°-60	0.99	2.64	0.36	0.03
P-50x100	0.74	2.44	0.27	0.02
30°-85	0.51	2.34	0.2	0.01
Satovje	0.28	2.28	0.18	0.01

Razmerje med prestreženim bočnim tokom, proti celotnemu bočnemu toku, označimo z R_s in izrazimo z enačbo (UDFCD, 2008):

$$R_s = \frac{1}{1 + \frac{0.15v^{1.8}}{s_x L^{2.3}}}, \quad (41)$$

kjer je:

- v hitrost vode v koritnici [m/s],
 L dolžina vtočne rešetke [m],
 s_x prečni nagib koritnice, merjeno glede na prečni nagib ceste [m/m].

Enačbo (41) lahko rešimo tudi grafično s pomočjo grafikona v prilogi B.10.

Učinkovitost požiralnika z vtokom skozi rešetke pod robnikom določimo po naslednji enačbi (UDFCD, 2008):

$$E = R_f \left(\frac{Q_w}{Q} \right) + R_s \left(\frac{Q_s}{Q} \right). \quad (42)$$

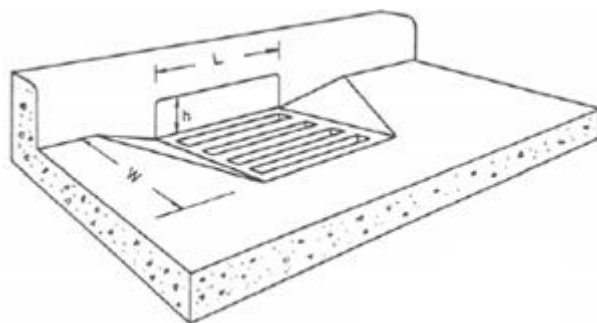
Prvi člen na desni strani enačbe predstavlja razmerje med prestreženim čelnim tokom pri celotnem toku v koritnici, drugi člen pa razmerje prestreženega bočnega toka proti celotnemu bočnemu toku. Drugi člen je zanemarljiv pri visokih hitrostih in kratkih rešetkah (Brown in sod., 2013).

Sprejemna kapaciteta požiralnika z rešetkami Q_i je enaka zmnožku učinkovitosti požiralnika E in skupnega pretoka v koritnici Q , kar zapišemo z naslednjo enačbo:

$$Q_i = E Q. \quad (43)$$

4.5 Kombiniran cestni požiralnik

Kombiniran cestni požiralnik (slika 14) združuje prednosti obeh predhodno obravnavanih tipov požiralnikov, kar se odraža predvsem v večji sprejemni kapaciteti. Kadar se vtok v robniku začne pred rešetkami, tedaj požiralnik prestreza odplaknjene plavine v začetni fazi nevihtnega odtoka. V konkavnih vertikalnih zaokrožitvah pa se na obeh koncih rešetek priporoča podaljšan vtok v robniku (Brown in sod., 2013).



Slika 14: Kombiniran cestni požiralnik (UDFCD, 2008)

4.5.1 Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika

Sprejemna kapaciteta kombiniranega požiralnika (slika 15), ki sestoji iz vtočne odprtine v robniku ter enako dolgih rešetek pod robnikom, ni nič večja od sprejemne kapacitete požiralnika z rešetkami. Razlog je v zanemarljivi kapaciteti vtoka v robniku (Brown in sod., 2013).

Cestni požiralnik s podaljšano vtočno odprtino v robniku (slika 16) prestreže plavine, preden bi te lahko zamašile rešetke (ang. *sweeper inlet*) in preusmerile odtok stran od rešetek. Sprejemna kapaciteta takega požiralnika je enaka vsoti kapacitete požiralnika v robniku in požiralnika z vtokom pod robnikom, kar lahko zapišemo z enačbo (44). To pomeni manjši odtok po širini vozišča T in manjšo debelino vodnega filma.

$$Q_i = 0.67 A_g (2 g d)^{0.5} + 0.67 h L (2 g d_0)^{0.5}, \quad (44)$$

kjer je:

- A_g prosta vtočna površina [m^2],
- g gravitacijski pospešek [$g = 9.81 m/s^2$],
- d povprečna globina vzdolž rešetek [m],
- h višina vtočne odprtine [m],
- L dolžina vtočne odprtine [m],
- d_0 efektivna debelina vodne plasti pri toku skozi zožitev na sredini vtočne odprtine [m].



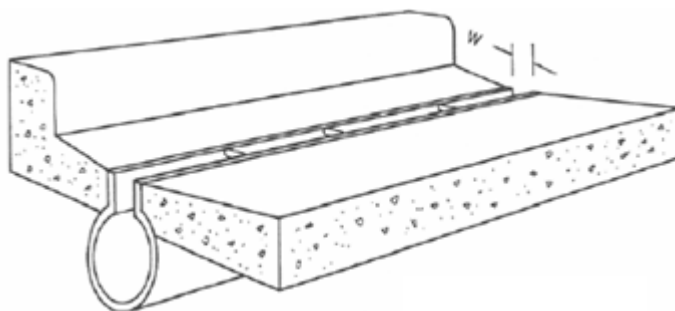
Slika 15: Kombiniran požiralnik (foto: Žagar, 2016)



Slika 16: Kombiniran požiralnik iz vtočne odprtine v robniku ter vzporednih rešetk pod robnikom (Brown in sod., 2013)

4.6 Linijski cestni požiralnik

Linijske cestne požiralnike (slika 17) uporabljamo za prestrezanje ploskovnega toka na mestih, kjer voda ne sme površinsko odtekat po vozišču. Njihova glavna prednost je sposobnost prestrezanja vode na večjem območju. Vendar pa so linijski požiralniki zelo dovzetni za zamašitve, zato niso primerni za uporabo na lokacijah, kjer se lahko pojavljajo večje količine sedimentov ali naplavin. Najpogostejši problem je odlaganje naplavin v cevi. Vendar struktura tega požiralnika omogoča čiščenje cevi z vodnim curkom pod visokim tlakom (Brown in sod., 2013). Linijski požiralniki imajo enako hidravlično kapaciteto kot cestni požiralniki v robniku z enakim naklonom in brez dotoka naplavin (Brown in sod., 2013).



Slika 17: Linijski cestni požiralnik (UDFCD, 2008)

4.6.1 Sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika

Vtok v linijski požiralnik deluje v splošnem po principu bočnega preliva, torej kot odzemni ali razbremenilni objekt. Sprejemna kapaciteta požiralnika je odvisna od višine vodne gladine in dolžine požiralnika, učinkovitost požiralnika pa še od skupnega pretoka v koritnici (Brown in sod., 2013).

Linijski požiralniki so zelo učinkoviti pri odvodnjavanju cest, hkrati pa omogočajo razne možnosti pri umeščanju v prostor. Lahko jih uporabimo v kombinaciji z robnikom ali brez robnika, poleg tega pa predstavljajo zelo majhno motnjo za promet. Tipičen linijski požiralnik je prikazan na sliki 18 (Brown in sod., 2013).

Linijski požiralnik deluje pri prestrezanju površinskega odtoka po principu bočnega preliva in je zaradi prečnega naklona vozišča podvržen bočnemu pospešku (centrifugalna sila). Zato lahko potrebno dolžino linijskih požiralnikov s širino $\geq 45 \text{ mm}$ za popolno prestrezanje odtoka uporabimo enačbo (31) ali grafikon v prilogi B.8.

Učinkovitost linijskega požiralnika lahko pri projektni dolžini vtočne odprtine, izračunamo po enačbi (32) ali s pomočjo grafikona v prilogi B.7.



Slika 18: Linijski požiralnik v krožnem križišču (foto: Žagar, 2016)

4.7 Cestni požiralniki v depresijskih točkah na vozišču

Kadar meteorna voda s prispevnega območja priteče v točko, ki leži nižje od vseh sosednjih točk (lokalni minimum), se v tej točki zadržuje in ne odteka naprej. Niz točk z nižjo višino od okoliškega reliefa predstavlja depresijo (Žagar, 2013).

V depresijskih točkah na vozišču (slika 19) moramo predvideti požiralnik take kapacitete in učinkovitosti, da lahko sprejme celoten površinski dotok in ga po meteorni kanalizaciji odvede v recipient. Če meteorna voda nosi s seboj tudi plavine, lahko pride do zamašitve požiralnika, kar povzroči zastajanje vode na vozišču. Pri določitvi kapacitete požiralnika v depresijah moramo upoštevati tudi možnost zamašitve vtoka. Zaradi večje dovzetnosti za zamašitve s plavinami, v tem primeru ni priporočljiva uporaba požiralnikov z rešetkami ter linijskih požiralnikov. Bolj primerni so požiralniki v robniku in predvsem kombinirani požiralniki (Brown in sod., 2013; UDFCD, 2008).



Slika 19: Cestni požiralnik v robniku, postavljen v depresijski točki ob robniku (UDFCD, 2008)

Pri plitvih globinah toka v depresijskih območjih deluje požiralnik po principu bočnega preliva, torej kot odzemni ali razbremenilni objekt. Z naraščanjem globine vode pa prične požiralnik delovati po principu vtoka skozi zožitev. Hidravlično zmogljivost požiralnika v robniku, požiralnika z rešetkami in vtokom pod robnikom ter linijskega požiralnika, ki deluje po principu bočnega preliva, izrazimo z naslednjo enačbo (UDFCD, 2008):

$$Q_i = C_w L_w d^{1.5}, \quad (45)$$

kjer je:

- Q_i sprejemna kapaciteta požiralnika [m^3/s],
 C_w pretočni koeficient pri bočnem prelivu,
 L_w dolžina bočnega preliva [m],
 d globina vode [m].

Vrednosti parametrov C_w in L_w so za oba režima vtoka v požiralnik predstavljene v preglednici 7. Požiralnik v robniku deluje po principu bočnega preliva do tedaj, ko je globina vode na vtoku enaka višini vtočne odprtine ($d \leq h$). Pri vmesnih globinah prihaja do prehoda iz toka skozi bočni preliv do toka skozi zožitev. Požiralnik v robniku s poglobljenim vtokom deluje po principu bočnega preliva do tedaj, ko je višina vtočne odprtine manjša ali enaka vsoti višine vtočne odprtine in višine poglobitve oz. depresije ($d \leq h + a$). Linijski požiralnik lahko do globine vode 60 mm obravnavamo kot bočni preliv, neodvisno od širine vtočnih odprtin. Pri globinah nad 120 mm pa deluje požiralnik po principu vtoka skozi zožitev (Brown in sod., 2013).

Preglednica 7: Parametri požiralnika, ki deluje po principu bočnega preliva
(povzeto po UDFCD, 2008)

Tip požiralnika	C_w	L_w	Bočni preliv	Pomen parametrov
Požiralnik z rešetkami	1.66	$L + 2W$	$d \leq \frac{k_0 A_0}{k_w L_w}$	$L = \text{dolžina požiralnika [m]}$ $W = \text{širina požiralnika [m]}$ $A_0 = \text{prosta vtočna površina [m}^2\text{]}$
Požiralnik v robniku	1.60	L	$d \leq h$	$L = \text{dolžina vtočne odprtine [m]}$ $h = \text{višina vtočne odprtine [m]}$
Poglobljen vtok v požiralnik v robniku	1.25	$L + 1.8W$	$d \leq h + a$	$W = \text{širina poglobitve [m]}$ $a = \text{višina poglobitve [m]}$ $d = TS_x$
Linijski požiralnik	1.40	L	$d < 60 \text{ mm}$	$L = \text{dolžina požiralnika [m]}$ $d = \text{višina vode pri robniku [m]}$

Hidravlično zmogljivost požiralnika, ki deluje po principu vtoka skozi zožitev izrazimo z naslednjo enačbo:

$$Q_i = C_0 A_0 (2 g d_0)^{0.5}, \quad (46)$$

kjer je:

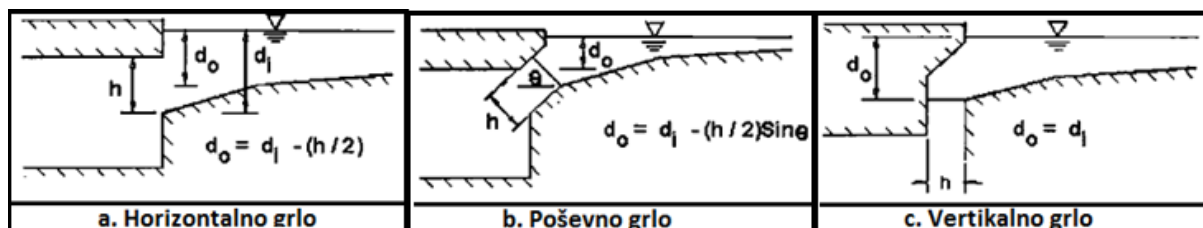
- Q_i sprejemna kapaciteta požiralnika [m^3/s],
- C_0 pretočni koeficient pri odtekanju vode v odprtino,
- A_0 površina odprtine [m^2],
- d karakteristična globina toka [m], kot je definirana v preglednici 7,
- g gravitacijski pospešek [$g = 9.81 m/s^2$].

Vrednosti parametrov C_0 in A_0 so prikazane v preglednici 8.

Preglednica 8: Parametri požiralnika, ki deluje po principu zožitve (povzeto po UDFCD, 2008)

Tip požiralnika	C_0	A_0	Tok skozi zožitev	Pomen parametrov
Požiralnik z reškami	0.67	Prosta vtočna površina	$d > \frac{k_0 A_0}{k_w L_w}$	$d = \text{globina vode nad reškami [m]}$
Požiralnik v robniku (poglobljen ali nepogl., horizontalno grlo)	0.67	$h \times L$	$d_i > 1.4 h$	$d = d_i - (h/2)$ $d_i = \text{višina vode pri vtočni odprtini}$ $h = \text{višina vtočne odprtine [m]}$
Linijski požiralnik	0.8	$L \times W$	$d > 1.4 h$	$L = \text{dolžina požiralnika [m]}$ $W = \text{širina požiralnika [m]}$ $d = \text{višina vode nad požiralnikom}$

Parametra d_0 in d_i , ki nastopata pri požiralniku v robniku, privzemata vertikalno vtočno grlo požiralnika. Oblika vtočnega grla vpliva na efektivno višino vode pri zožitvi na vtoku ter na razdaljo ($d_i - h/2$), kot je prikazano na sliki 20. Premajhna višina vtočnega grla (parameter h) lahko povzroči zmanjšanje kapacitete požiralnika v robniku ter pojav režima vtoka skozi zožitev že pri manjših višinah vode od vtočne odprtine robnika (Brown in sod., 2013).



Slika 20: Oblike vtočnega grla (prirejeno po Brown in sod., 2013)

Pri požiralniku z reškami in vtokom pod robnikom srečamo parameter proste vtočne odprtine (A_0). Eksperimenti so pokazali, da je prosta vtočna površina požiralnika s ploščatimi reškami (npr. rešetke tipa P-50x100 in P-30) enaka skupni površini rešetak, od katere odštejemo površino vzdolžnih in prečnih palic. Požiralnik z ukrivljenimi palicami daje približno 10 % boljše rezultate. Projicirana površina palic na horizontalno ravnino zavzema pri ukrivljenih rešetkah 68 % skupne vtočne površine, neto vtočna površina tako zavzema približno tretjino celotne vtočne površine.

Pri nagnjenih rešetkah zavzema neto vtočna površina pri 30 ° naklonu približno 34 % skupne vtočne površine, pri 45 ° naklonu pa 0 % skupne vtočne površine. To pa seveda ne pomeni, da imajo požiralniki nično kapaciteto. Požiralniki z ukrivljenimi ali nagnjenimi rešetkami niso priporočljivi za uporabo v konkavnih vertikalnih zaokrožitvah, kjer bi lahko prišlo do toka skozi zožitev (Brown in sod., 2013).

4.8 Zamašitev požiralnikov

Cestni požiralniki so pogosto podvrženi zamašitvam (slika 21). Določitev faktorja zamašitve je odvisna od količine plavin in smeti na ulici. Med nalivom se v cestne požiralnike pogosto odlagajo plavine, ki jih odplakne in s seboj odnaša prvi val površinskega (nevihtnega) odtoka. Pri načrtovanju odvodnjavanja cest se predpostavi 50 % zamašitev samostojnega cestnega požiralnika z rešetkami in 10 % zamašitev samostojnega cestnega požiralnika v robniku. Običajno je potrebno večje število (niz) cestnih požiralnikov za zbiranje in odvajanje meteornih vod s cest. Ker je transport plavin pri nevihtnem dogodku v večji meri povezan s prvim valom površinskega odtoka, ki spere onesnaženje s cest, se faktor zamašitve niza požiralnika manjša z večanjem dolžine vtočne odprtine. Pri tem se faktor zamašitve ne spreminja linearno s spreminjanjem velikosti vtočne odprtine, saj bi dobili pretirane velikosti vtočnih odprtin. Niz šestih zaporednih požiralnikov s faktorjem zamašitve, manjšim od 50 %, deluje enako kot niz treh zaporednih požiralnikov (UDFCD, 2008).

To pomeni, da požiralnik nikdar ne doseže 100 % zasetja, saj bi v tem primeru morali imeti pretirano dolge vtočne odprtine (UDFCD, 2008).



Slika 21: Zamašitev požiralnika (foto: Žagar, 2016)

Na osnovi koncepta prvega vala, je upadanje faktorja zamašitve glede na dolžino vtočne odprtine opisano z naslednjo enačbo (Guo, 2000):

$$C = \frac{1}{N} (C_0 + eC_0 + e^2C_0 + e^3C_0 + \dots + e^{N-1}C_0) = \frac{C_0}{N} \sum_{i=1}^{i=N} e^{i-1} = \frac{K C_0}{N}, \quad (47)$$

kjer je:

- C faktor zamašitve niza požiralnikov,
- C_0 faktor zamašitve posameznega požiralnika,
- e 0.5 za cestni požiralnik z vtokom pod robnikom, 0.25 za cestni požiralnik v robniku,
- N število požiralnikov,
- K faktor zamašitve iz preglednice 9 [-].

Preglednica 9: Parametri požiralnika, ki deluje po principu zožitve
(povzeto po UDFCD, 2008)

število rešetk požiralnika	faktor zamašitve		
	izkustveno	teoretično	
		za $e=0.5$	za $e=0.25$
1	0.5	0.500	0.500
2	0.35	0.375	0.313
3	0.24	0.250	0.208
4	0.15	0.188	0.156

4.9 Pozicioniranje požiralnikov

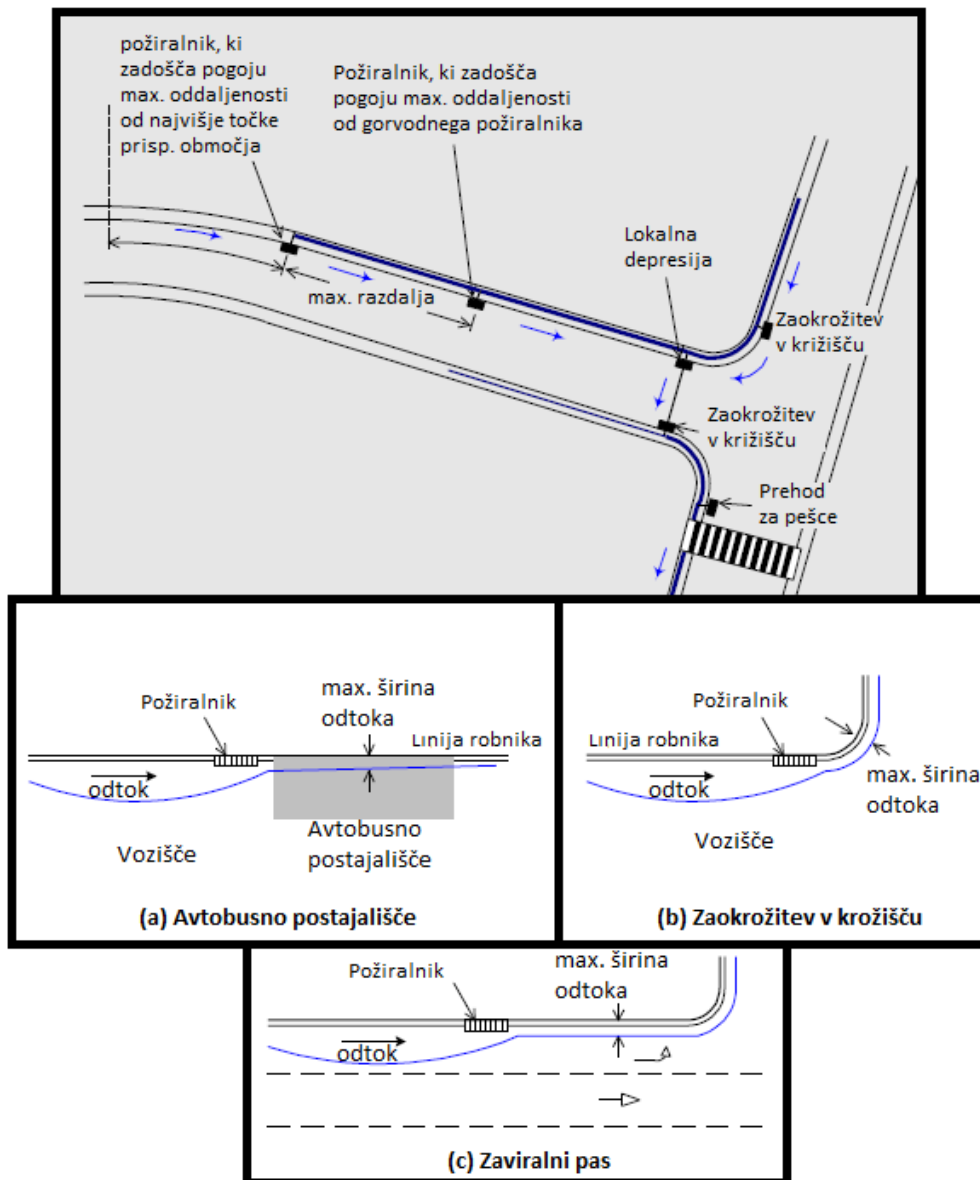
4.9.1 Tipične lokacije za postavitev požiralnika

Obstajajo določene kritične lokacije, kjer so ne glede na velikost prispevnega območja, cestni požiralniki nujno potrebni (slika 22). Najprej umestimo požiralnike na kritične lokacije, nato upoštevamo še ostale parametre, kot so površinski odtok, kapacitete koritnice, širina odtoka po vozišču, kapaciteta požiralnikov, količina prelite vode itd.

Požiralnike moramo nujno predvideti na naslednjih lokacijah (Brown in sod., 2013):

- na vseh lokalnih depresijskih točkah (lokalni minimumi),
- tik pred srednjimi ločilnimi pasovi,
- tik pred točko spremembe prečnega nagiba ceste (točka vijačenja),
- tik pred preходом za pešce, *taxi* in avtobusnim postajališčem, ter na vseh lokacijah, s kjer bi se lahko voda odtekala na vozne pasove,
- v začetni (tangentski) točki zaokrožitve v križišču (gledano v smeri toka vode), tako, da širina odtoka prečno na vozišče pri projektnem naliveu z določeno povratno dobo ne preseže zakonsko določenih mejnih vrednosti;
- tik pred cestnim otokom na območju cestnega priključka stranske ceste na glavno cesto (ang. *ramp gores*),
- tik pred uvozom na most, za preprečitev odtekanja vode na vozno površino mostu,
- neposredno za izvozom z mostu, za prestrežanje odtoka vode iz vozne površine mostu,
- v končni točki jarka ali kanala pri cesti v vkopu,
- tik pred križiščem stranske ceste z glavno cesto.

Poleg zgoraj navedenih območij je potrebno z jarki ali požiralniki prestreči vodo, ki s pobočij odteka proti vozišču. Slednje velja za ceste v vkopu, stranske ceste ter ostale asfaltirane površine vzdolž cest. Ceste z robniki in požiralniki niso učinkovite pri prestrezanju tuje vode (Brown in sod., 2013).



Slika 22: Tipične lokacije za postavitev požiralnikov

Cestnih požiralnikov ne postavljamo vzdolž krožnega loka na zaokrožitve v križišču, zaradi ogrožanja prometne varnosti. Pa tudi sama konstrukcija jaška je v krožnem loku precej bolj kompleksna kot v ravnem odseku ceste – t.j. geometrijski element prema (Brown in sod., 2013).

Lokacije cestnih požiralnikov so pogojene tudi z (MSMA, 2012):

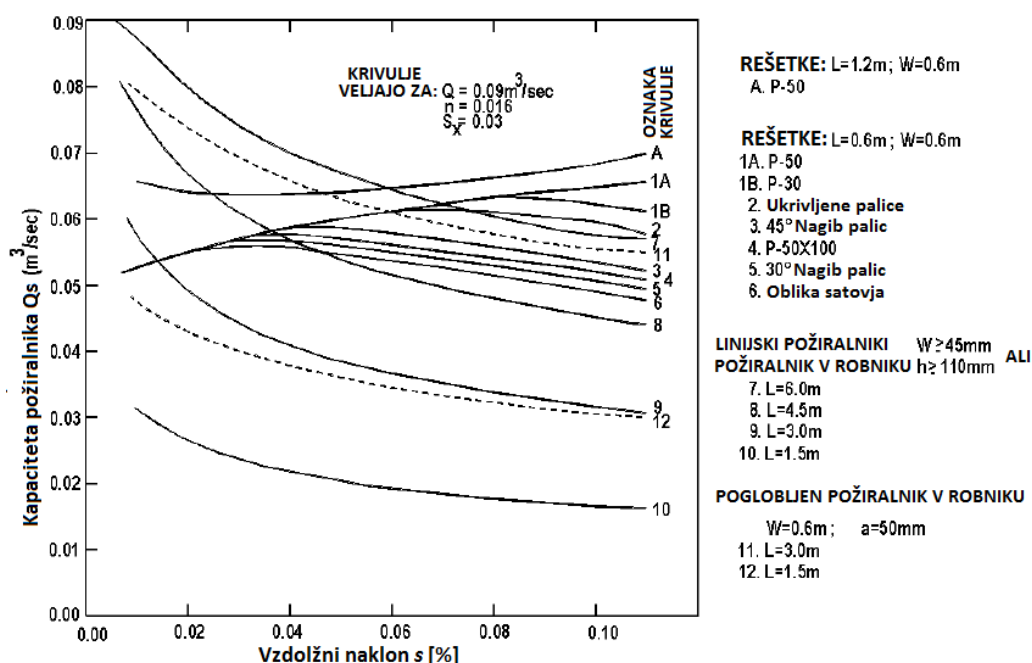
- lokacijami drugih komunalnih vodov;
- položajem dovoznih poti (ang. *driveways*);

- vijačenjem ceste, kar povzroča odtekanje vode po vozišču;
- dostopnostjo požiralnikov za vzdrževanje in čiščenje,
- potrebe po omejitvi višine gladine vode na nižjem robu glavne ceste pod višino cestnega priključka, merjeno v točki priključka stranske ceste na glavno cesto.

4.9.2 Določitev sprejemne kapacitete požiralnika

Sprejemno kapaciteto požiralnika določimo iz empiričnih povezav med parametri za izbrani tip požiralnika. Za eksperimentalno določitev sprejemne kapacitete in učinkovitosti požiralnikov so v Ameriški agenciji FHWA določili ključne konstantne parametre ter raziskali vpliv spremenljivih parametrov, ki vplivajo na sprejemno kapaciteto požiralnikov.

Slika 23 prikazuje primerjavo kapacitet različnih tipov požiralnikov, pri konstantnem pretoku v koritnici $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$, ter konstantnem prečnem nagibu koritnice 3 % in spremenljivem vzdolžnem nagibu koritnice 0 – 10 %. Sklepi na podlagi teh eksperimentov ne veljajo nujno za druge vrednosti pretokov ali prečnih nagibov, vendar pa je možno priti do določenih ugotovitev, ki veljajo tudi za drugačne robne pogoje (Brown in sod., 2013).



Slika 23: Kapaciteta požiralnika v odvisnosti od vzdolžnega nagiba koritnice
(prirejeno po Brown in sod., 2013)

Slika 23 prikazuje vpliv globine vode ob robniku v koritnici ter vpliv velikosti vtočne odprtine požiralnika na sprejemno kapaciteto in učinkovitost požiralnika v robniku. Tako linijski požiralniki kot požiralniki v robniku izgubljajo sprejemno kapaciteto in učinkovitost z večanjem vzdolžnega nagiba koritnice. Razlog je v tem, da se pri naraščajoči hitrosti toka zmanjšuje širina odtoka po vozišču in globina vode v koritnici. Prav tako lahko na podlagi raziskav sklepamo, da se z večanjem prečnega nagiba koritnice povečujeta sprejemna kapaciteta in učinkovitost požiralnika v robniku. Nadalje lahko ugotovimo, da se z večanjem pretoka povečuje sprejemna kapaciteta, zmanjšuje pa se učinkovitost požiralnika. Opazimo

tudi podobno sprejemno kapaciteto linijskih požiralnikov, požiralnikov z dolgim vtokom v robniku ter požiralnikov z vtokom pod robnikom (Brown in sod., 2013).

Vpliv globine v koritnici je prikazan s primerjavo sprejemne kapacitete in učinkovitosti požiralnika v koritnici s poglobljenim (depresijskim) in nepoglobljenim vtokom. Eksperimenti so pokazali, da je sprejemna kapaciteta požiralnika z 1.5 m veliko poglobitvijo vtoka približno 67 % večja od požiralnika z nepoglobljenim vtokom. Pri tem je predpostavljen 2 % vzdolžni nagib, 3 % prečni nagib in pretok v koritnici $0.085 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri 8 % vzdolžnem nagibu pa je sprejemna kapaciteta požiralnika v robniku s poglobljenim vtokom celo za 79 % večja od sprejemne kapacitete požiralnika v robniku z nepoglobljenim vtokom (Brown in sod., 2013).

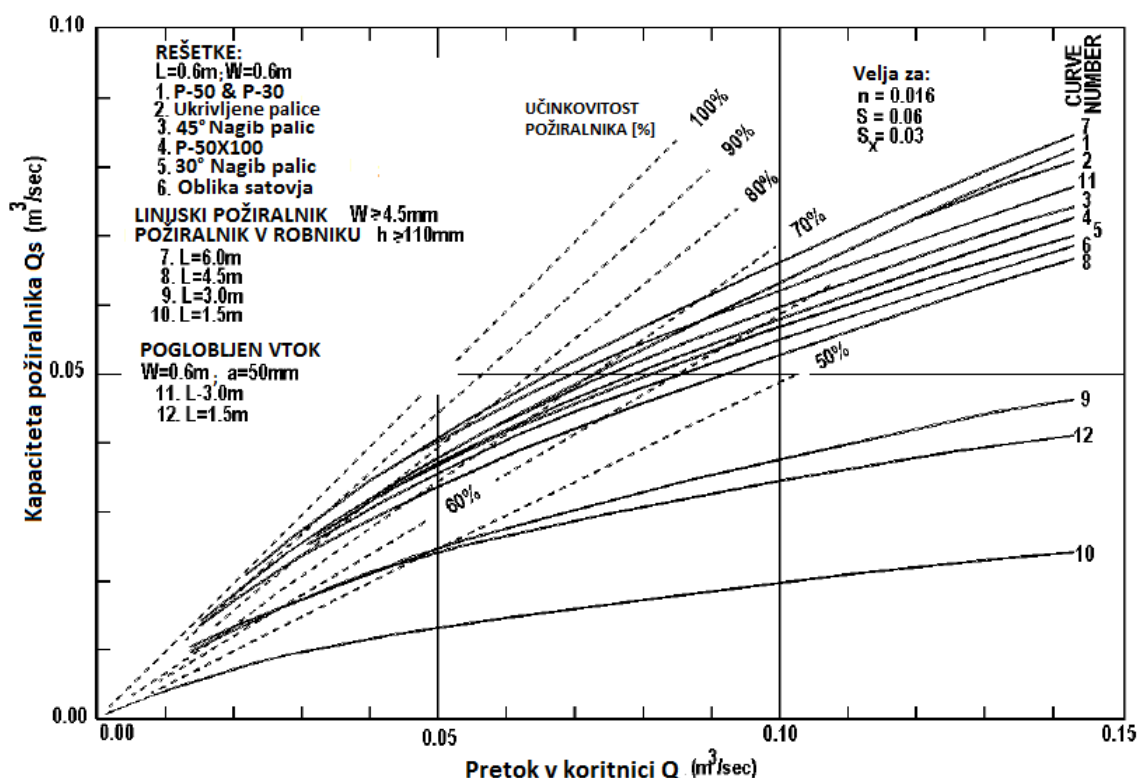
Pri nizkih hitrostih toka vode lahko požiralnik prestreže ves čelni tok (ang. *frontal flow*), t.j. tok v območju širine rešetak požiralnika, ter le majhen del bočnega toka (ang. *side flow*) izven širine rešetak. Z naraščanjem vzdolžnega nagiba pa začne voda pri določeni hitrosti, ki je odvisna od konfiguracije rešetak, preskakovati rešetke oz. pljuskati čez rešetke. Na sliki 23 so razvidne manjše vrednosti sprejemne kapacitete in učinkovitosti požiralnika vse do velikosti vzdolžnega naklona koritnice, pri kateri začne voda pljuskati čez rešetke. Pri manj učinkovitih požiralnikih se pljuskanje čez rešetke pojavi pri vrednosti vzdolžnega naklona, kjer začne krivulja sprejemne kapacitete odstopati od krivulj učinkovitejših požiralnikov. Požiralniki s skupno velikostjo vtočne odprtine z rešetkami $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ imajo pri pretoku v koritnici $0.085 \text{ m}^3/\text{s}$, prečnem nagibu 3 % in vzdolžnem nagibu 2 %, enako učinkovitost in sprejemno kapaciteto. Pri rešetkah v obliki satovja (ang. *reticuline grate*) pride do pljuskanja čez rešetke pri večjih vzdolžnih nagibih od 2 %, posledično pa je sprejemna kapaciteta manjša. Pri 6 % vzdolžnem nagibu doseže odtok tako hitrost, da pride do pljuskanja čez rešetke pri vseh rešetkah, razen pri rešetkah z vertikalno ukrivljenimi palicami (ang. *curved vane*) ter pri mrežastih rešetkah tipa P-30 in P-50. Iz krivulj učinkovitosti požiralnikov je mogoče sklepati, da so tako mrežaste rešetke kot rešetke z vertikalno ukrivljenimi palicami učinkovitejše pri višjih hitrostih toka, najmanj učinkovite pri teh pogojih pa so rešetke v obliki satovja. Vsi tipi rešetak deluje približno enako pri nizkih hitrostih toka. Dejstvo pa je, da so nekateri tipi rešetak, kot npr. rešetke v obliki satovja, bolj dovzetne za zamašitev s plavinami kot drugi tipi rešetak, kot npr. mrežaste vzporedne rešetke (Brown in sod., 2013).

Kapaciteta in učinkovitost požiralnika z vtokom skozi rešetke se povečuje z naraščanjem vzdolžnega naklona koritnice ob pogoju, da ne pride do pljuskanja vode čez rešetke. Razlog je v tem, ker z večanjem odtočne hitrosti narašča količina čelnega dotoka, ki ga lahko požiralnik v celoti prestreže ob pogoju, da se ne pojavi pljuskanje čez rešetke (Brown in sod., 2013).

Za nadaljnje študije in primerjavo sprejemne kapacitete in učinkovitosti požiralnika lahko uporabimo grafikon na sliki 24. Grafikon med drugim prikazuje, da se pljuskanje čez rešetke pri vtočnih rešetkah v obliki satovja pojavi že pri pretoku $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri tem so upoštevane vrednosti Manningovega koef. trenja $n_G = 0.016$, vzdolžni nagib $q = 6 \%$ in prečni nagib $s = 3 \%$. Prav tako je razvidno, da se sprejemna kapaciteta vseh tipov požiralnikov z večanjem pretoka povečuje, učinkovitost požiralnika pa se zmanjšuje (Brown in sod., 2013).

Pri eksperimentih, na podlagi katerih sta nastala grafikona na slikah 23 in 24 ni upoštevan vpliv naplavin na zamašitev požiralnikov. Vsi tipi požiralnikov so bolj ali manj podvrženi

zamašitvam. Poskusi simuliranja zamašitve požiralnikov v laboratoriju pa dejansko niso bili uspešni. Uspeli pa so dokazati vpliv razmika med rešetkami na zamašitve požiralnikov. Vtočni požiralniki z večjim razmikom med vzdolžnimi rešetkami, učinkoviteje prenašajo naplavine. Problemi z zamašitvami požiralnikov so večinoma prostorsko pogojeni, saj se količina plavin bistveno razlikuje med kraji. Ponekod se spopadajo z majhno količino naplavin, drugod pa z večjimi količinami. Ker delna zamašitev požiralnikov na klancu redko povzroča večje težave, ni priporočljivo upoštevati zmanjšane kapacitete požiralnikov zaradi zamašitev. Razen v primeru lokacij, kjer izkušnje na terenu kažejo, da je to korekcijo smiselno upoštevati (Brown in sod., 2013).



Slika 24: Kapacitete požiralnikov v odvisnosti od kapacitete koritnice in učinkovitosti požiralnikov ter koeficienta CN (prirejeno po Brown in sod., 2013)

4.10 Primer izračuna širine površinskega odtoka in učinkovitosti požiralnika

Zaradi lažjega razumevanja je v nadaljevanju predstavljen primer izračuna širine površinskega odtoka in učinkovitosti požiralnika.

Podane imamo naslednje dimenzije cestnega požiralnika v robniku:

$$q = 0.010 \text{ m/m} \quad Q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$s = 0.020 \text{ m/m} \quad n_G = 0.016$$

Izračunati moramo:

- (1) Sprejemno kapaciteto Q_i požiralnika v robniku s 3 m dolgo vtočno odprtino.
- (2) Sprejemno kapaciteto Q_i konstantno poglobljenega požiralnika v robniku s 3 m dolgo vtočno odprtino, ter z globino depresijske cone $a = 25 \text{ mm}$ in širino depresijske cone $W = 0.6 \text{ m}$.

- (1) Izračun sprejemne kapacitete Q_i požiralnika v robniku s 3 m dolgo vtočno odprtino.

V prvem koraku določimo dolžino vtočne odprtine L_T , potrebne za popolno prestrezanje odtoka z enačbo (34) ali s pomočjo grafikona v prilogi B.8.

$$L_T = K_u Q^{0.42} q^{0.3} [1/(n_G s)]^{0.6}$$

$$L_T = 0.817 \times (0.05)^{0.42} \times (0.01)^{0.3} [1/(0.016 \times 0.02)]^{0.6}$$

$$L_T = 7.29 \text{ m}$$

V drugem koraku izračunamo učinkovitosti požiralnika z enačbo (32) ali grafom v prilogi B.7.

$$\frac{L}{L_T} = \frac{3}{7.29} = 0.41$$

$$E = 1 - (1 - L/L_T)^{1.8}$$

$$E = 1 - (1 - 0.41)^{1.8}$$

$$E = 0.61$$

V zadnjem koraku izračunamo še sprejemno kapaciteto požiralnika:

$$Q_i = E Q$$

$$Q_i = (0.61) (0.05)$$

$$Q_i = 0.031 \text{ m}^3/\text{s}$$

- (2) Izračun sprejemne kapacitete Q_i konstantno poglobljenega požiralnika v robniku s 3 m dolgo vtočno odprtino.

V prvem koraku izračunamo razmerje W/T . Najprej predpostavimo, da je $Q_i = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Q_b = Q - Q_i = 0.05 - 0.018$$

$$Q_b = 0.032 \text{ m}^3/\text{s}$$

Razmerje čelnega toka proti skupnemu toku v koritnici označimo z E in zapišemo s spodnjo enačbo, ki velja pri enakomernem prečnem nagibu.

$$E = Q_b/Q$$

$$E = 0.032/0.05$$

$$E = 0.64$$

Sledi izračun prečnega nagiba koritnice v depresijskem območju koritnice S_w .

$$S_w = s + a/W$$

$$S_w = 0.02 + (25/1000)/0.6$$

$$S_w = 0.062$$

$$\frac{S_w}{s} = \frac{0.062}{0.02} = 3.1$$

Nato s pomočjo grafikona v prilogi B.2 določimo parameter T_s , na podlagi katerega nato izračunamo pretok Q_s .

$$W/T = 0.24$$

$$T = W/(W/T)$$

$$T = 0.6/0.24$$

$$T = 2.5 \text{ m}$$

$$T_s = T - W$$

$$T_s = 2.5 - 0.6$$

$$T_s = 1.9 \text{ m}$$

Uporabimo enačbo (6) ali grafikon v prilogi B.1 za določitev Q_s :

$$Q_s = \frac{3}{8} \frac{\phi}{n_G} S_x^{5/3} \sqrt{q} T^{8/3}$$

$$Q_s = \{(0.376/0.016)\} \times 0.02^{5/3} \times \sqrt{0.01} \times 1.9^{8/3}$$

$$Q_s = 0.019 \text{ m}^3/\text{s} .$$

Izračunana vrednost Q_s je enaka predpostavljeni vrednosti.

V drugem koraku določimo učinkovitost požiralnika v robniku. Najprej izračunamo ekvivalenten prečni nagib po enačbi (33).

$$S_e = s + S'_w E_0 = s + (a/W)E_0$$

$$S_e = 0.02 + [(25/1000)/0.6] \times 0.64$$

$$S_e = 0.047$$

Z upoštevanjem ekvivalentnega prečnega nagiba, izračunamo dolžino vtočne odprtine, potrebno za 100% prestrezanje odtoka iz koritnice po enačbi (34):

$$L_T = K_T Q^{0.42} q^{0.3} [1/(n_G S_e)]^{0.6}$$

$$L_T = 0.817 \times 0.05^{0.42} \times 0.01^{0.3} \times [1/(0.016 \times 0.047)]^{0.6}$$

$$L_T = 4.37 \text{ m}.$$

Na podlagi razmerja L/L_T :

$$\frac{L}{L_T} = \frac{3}{4.37} = 0.69,$$

izračunamo učinkovitost požiralnika po enačbi (32):

$$E = 1 - (1 - L/L_T)^{1.8}$$

$$E = 1 - (1 - 0.69)^{1.8}$$

$$E = 0.88 .$$

Korak 3: Izračun dotoka v požiralnik z uporabo enačbe (43):

$$Q_i = Q \times E$$

$$Q_i = 0.05 \times 0.88$$

$$Q_i = 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$$

Depresijski požiralnik z robniku prestreže torej 1.5-krat več vode kot običajen požiralnik v robniku.

5 ALGORITEM ZA DOLOČANJE RAZVODNIC NA DIGITALNEM MODELU CESTE

5.1 Uvod

V praktičnem delu diplomske naloge smo razvili algoritem za določanje lokalnih minimumov in določanje razvodnic na TIN modelu ceste. Na ta način določimo vse lokalno najnižje točke na vozišču, kjer je potrebno predvideti cestne požiralnike in prispevne površine, s katerih voda odteka v posamezen požiralnik.

Programsko koda algoritma smo napisali v razvojnem okolju Višal Studio v programskem jeziku C++. Najbolje deluje v kombinaciji s programom *Plateia* za načrtovanje cest ter *Autodesk* programi *AutoCAD*, *AutoCAD Map 3D* in *AutoCAD Civil 3D*, deluje tudi v kombinaciji s programom *BricsCAD*.

5.2 Vhodni podatki

Programska koda deluje na osnovi vhodnega digitalnega modela reliefa (DMR), ki je upodobljen z mrežo nepravilnih trikotnikov (TIN). V splošnem je vhodni podatek poljuben DMR, izdelan s programom *Plateia* ali *AutoCAD Civil 3D*. Najboljše rezultate dobimo, kadar za vhodni podatek uporabimo digitalni model ceste, ki je konstruiran bodisi s programom *Plateia* ali *AutoCAD Civil 3D*, ali pa uporabimo geodetske posnetke robov ceste v 3D prostoru.

Vhodni podatki o obstoječem reliefu ali obstoječih utrjenih površinah so lahko zapisani v številnih oblikah in formatih. Običajno so to tekstovne datoteke poljubnih formatov, LIDAR podatki o oblakih točk reliefa ter geodetski posnetki v obliki CAD elementov v DWG formatu. LIDAR podatki o oblakih točk so za območje celotne Slovenije brezplačno dostopni prek spletnem porta eVode (glej LIDAR, 2015).



Slika 25: LIDAR posnetek za območje celotne Slovenije (LIDAR, 2015)

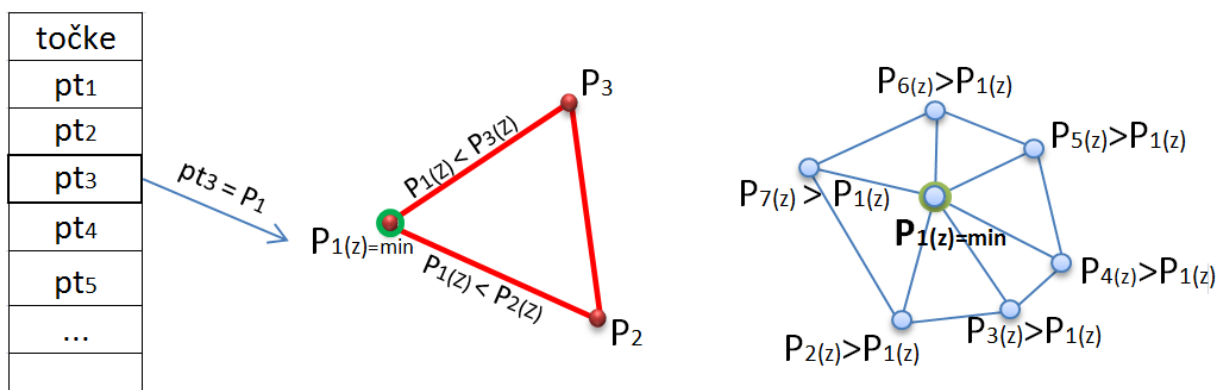
5.3 Opis algoritma

Algoritem ima dve glavni nalogi, poiskati lokalne minimume in določiti razvodnice med sosednjimi prispevnimi površinami na osnovi digitalnega modela ceste (v matematičnem pogledu je to TIN mreža).

Algoritem sestavlja 5 zank. V prvi zanki pripravimo podatke za izračun lokalnih minimumov, ki se izvede v drugi zanki. V tretji in četrti zanki pripravimo urejeno strukturo podatkov, da lahko v peti zanki določimo robove trikotnikov, ki predstavljajo razvodnice med sosednjimi prispevnimi površinami.

V prvi zanki poiščemo vse različne točke iz obravnavane TIN mreže in jih dodamo v seznam točk *pts* (ang. array).

V drugi zanki iščemo lokalne minimume. To so lokalno najnižje točke na vozišču, kjer je potrebno predvideti cestne požiralnike. Za vsako točko iz seznama točk *pts* preverimo, če je njena višina manjša od vseh sosednjih točk, povezanih v TIN mrežo. To naredimo tako, da za vsako točko poiščemo vse ostale trikotnike, ki jim pripada ta točka in preverimo višine oglišč teh trikotnikov. Točka predstavlja lokalni minimum tedaj, ko je njena višina nižja od višine oglišč sosednjih trikotnikov (slika 26).



Slika 26: Prikaz postopka iskanja lokalnih minimumov na TIN mreži

V tretji zanki poiščemo vse različne robove *j* v obravnavani TIN mreži in jih zapišemo v seznam robov *edg*. Prvi rob prvega trikotnika TIN mreže določata točki P_{11} in P_{12} , drugi rob določata točki P_{21} in P_{22} , tretji rob pa točki P_{31} in P_{32} . Končne točke robov trikotnikov v TIN mreži označimo kot pare točk *pt1* in *pt2*, kjer je *pt1* vedno prva točka roba, *pt2* pa druga točka roba.

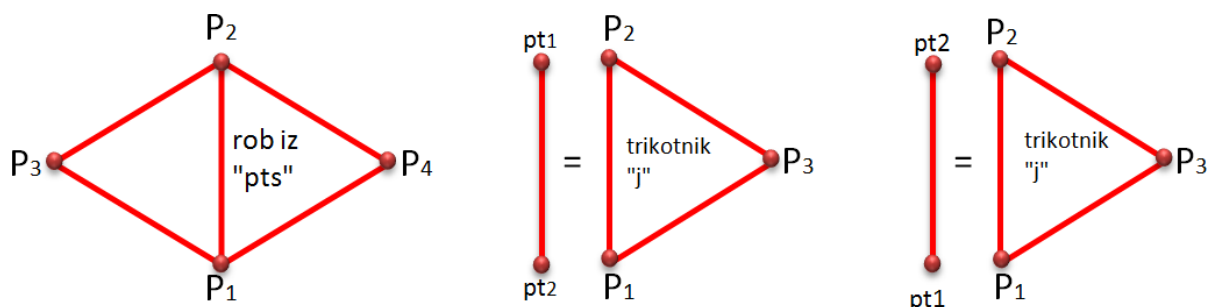
Seznam robov je na začetku zanke prazen. Robove dodajamo v seznam tako, da za vsak par točk *pt1* in *pt2* preverimo, če že obstaja v seznamu robov *edg*, sicer ga dodamo v seznam. Rob *j* dodamo v seznam *edg* tedaj, če se XYZ koordinate obeh končnih točk *pt1* in *pt2* tega roba ne ujemajo z nobenim ob parov točk, ki že obstaja v seznamu robov. Tako dobimo urejeno strukturo robov, ki jo določajo pari točk:

$$[P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}, P_{31}, P_{32}, \dots], \quad (48)$$

kjer je:

- P_{11} prva točka prvega roba,
- P_{12} druga točka prvega roba itd.

V četrti zanki določimo pare trikotnikov, ki imajo skupen rob. Pare točk iz seznama vseh različnih robov edg primerjamo z robovi trikotnikov v TIN mreži. Trikotnika i in $i + 1$ v TIN mreži pripadata istemu robu j iz seznama robov edg , če se koordinate para $pt1$ in $pt2$, ki določata rob »j« ujemajo s po dvema oglišči obeh trikotnikov v TIN mreži. Torej, če se koordinate para točk $pt1$ in $pt2$ na robu j ujemajo s koordinatami dveh oglišč sosednjih trikotnikov, tedaj točki $pt1$ in $pt2$ določata skupen rob j sosednjih trikotnikov i in $i + 1$. Preveriti moramo dve možnosti: rob med točkama $pt1$ in $pt2$ se lahko ujema z ogliščema trikotnika P_1 in P_2 v zapisanem vrstnem redu, ali pa v obratnem vrstnem redu, kot kaže slika 27. Če za nek rob iz seznama edg ne najdemo dveh trikotnikov, potem rob predstavlja zunanjo mejo TIN mreže. Točki P_3 in P_4 na spodnji sliki sta preostali oglišči para trikotnikov, ki ju prav tako potrebujemo v nadaljnjem izračunu.



Slika 27: Prikaz postopka določitve para trikotnika s skupnim robom

V peti zanki določamo razvodnice med prispevnimi območji na TIN mreži tako, da izračunamo vektorski produkt med normalo in skupnim robom sosednjih trikotnikov.

Naj bodo točke P_1 , P_2 in P_3 oglišča prvega trikotnika v paru:

$$\begin{aligned} P_1 &= (P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}), \\ P_2 &= (P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}), \\ P_3 &= (P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}). \end{aligned}$$

Točke P_1 , P_2 in P_4 pa oglišča drugega trikotnika v paru:

$$\begin{aligned} P_1 &= (P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}), \\ P_2 &= (P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}), \\ P_4 &= (P_{4x}, P_{4y}, P_{4z}). \end{aligned}$$

Najprej izračunamo vektorski produkt $\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}$:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ P_{2x} - P_{1x} & P_{2y} - P_{1y} & P_{2z} - P_{1z} \\ P_{3x} - P_{1x} & P_{3y} - P_{1y} & P_{3z} - P_{1z} \end{vmatrix} = \\ &= ((P_{2y} - P_{1y}) * (P_{3z} - P_{1z}) - (P_{3y} - P_{1y}) * (P_{2z} - P_{1z}))\vec{i} \\ &- ((P_{2x} - P_{1x}) * (P_{3z} - P_{1z}) - (P_{3x} - P_{1x}) * (P_{2z} - P_{1z}))\vec{j} \\ &+ ((P_{2x} - P_{1x}) * (P_{3y} - P_{1y}) - (P_{3x} - P_{1x}) * (P_{2y} - P_{1y}))\vec{k}. \end{aligned} \quad (49)$$

Če je zadnja koordinata vektorja pozitivna, potem je trikotnik pozitivno orientiran. V primeru pozitivne orientacije definiramo normalo trikotnika z enačbo:

$$\vec{n}_1 = \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}, \quad (50)$$

drugače pa z enačbo:

$$\vec{n}_1 = -\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}. \quad (51)$$

Izračunamo še vektorski produkt $\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_4}$ in na enak način kot pri prvem trikotniku določimo njegovo normalo \vec{n}_2 .

V zadnjem koraku izračunamo zadnji koordinati vektorskih produktov in vektorja $\overrightarrow{P_1P_2}$, ki predstavlja skupni rob para sosednjih trikotnikov, z normalama \vec{n}_1 in \vec{n}_2 po naslednji enačbi:

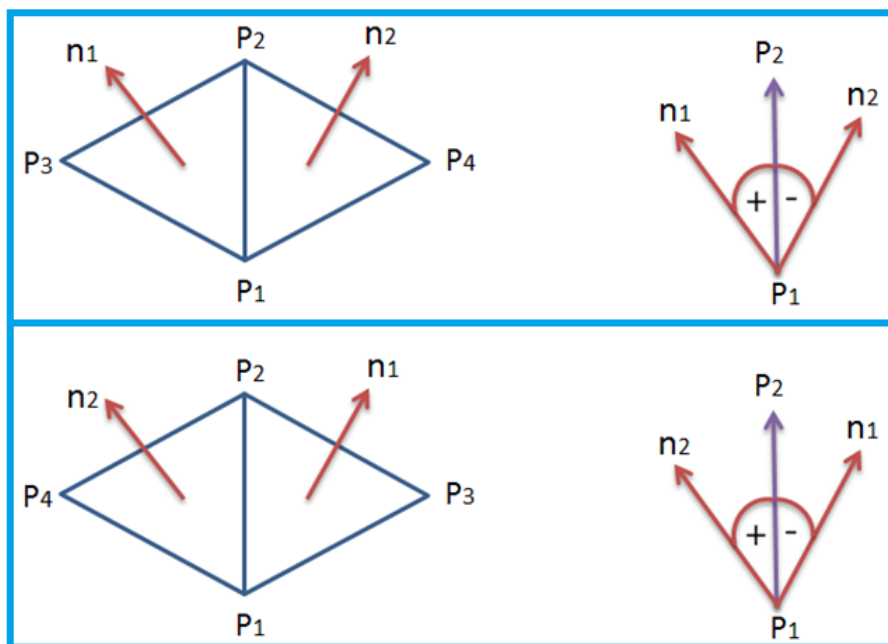
$$\begin{aligned} ((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_1)_3 &= \\ &= (P_{2x} - P_{1x}) * n_{1y} - (P_{2y} - P_{1y}) * n_{1x}, \end{aligned} \quad (52)$$

in

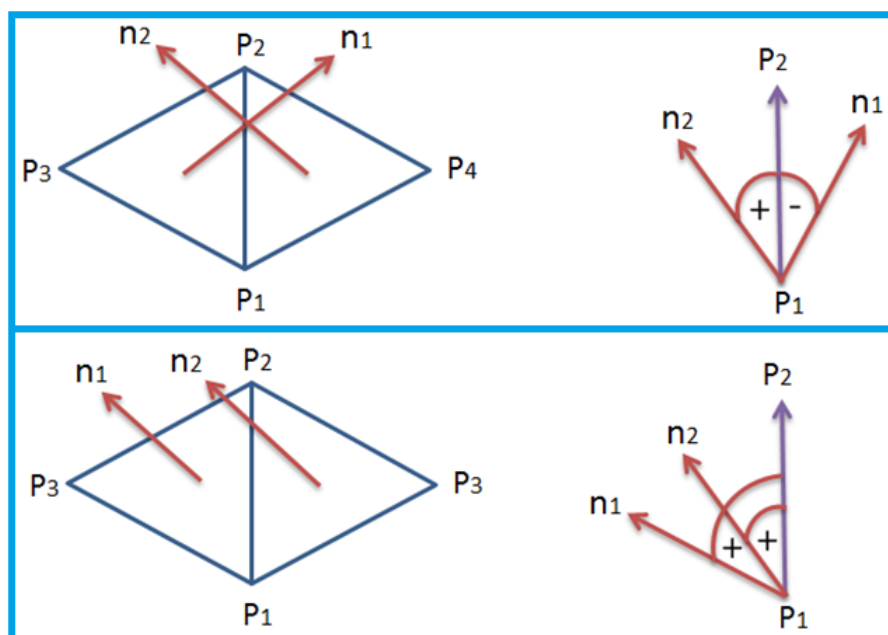
$$\begin{aligned} ((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_2)_3 &= \\ &= (P_{2x} - P_{1x}) * n_{2y} - (P_{2y} - P_{1y}) * n_{2x}. \end{aligned} \quad (53)$$

Če je vektorski produkt $\overrightarrow{P_1P_2P_3}$ pozitivno orientiran, torej velja: $((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_1)_3 > 0$ in če velja $((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_2)_3 < 0$, potem predstavlja skupni rob sosednjih trikotnikov (vektor $\overrightarrow{P_1P_2}$) razvodnico med sosednjima prispevnima površinama (slika 28). Kadar pa oglišče P_4 pripada levemu trikotniku, oglišče P_3 pa desnemu, tedaj je skupni rob sosednjih trikotnikov (vektor $\overrightarrow{P_1P_2}$) razvodnica, če je $((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_1)_3 < 0$ in $((\overrightarrow{P_1P_2}) \times \vec{n}_2)_3 > 0$.

Na sliki 29 sta prikazana primera negativno orientiranih trikotnikov, ki ne predstavljata razvodnice med sosednjima trikotnikoma.



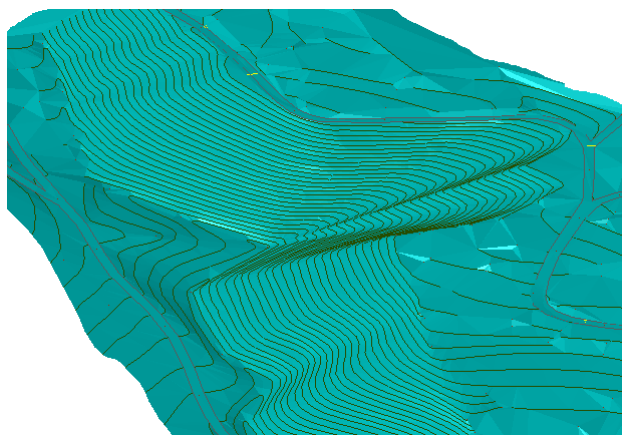
Slika 28: Pozitivno orientirana trikotnika



Slika 29: Negativno orientirana trikotnika

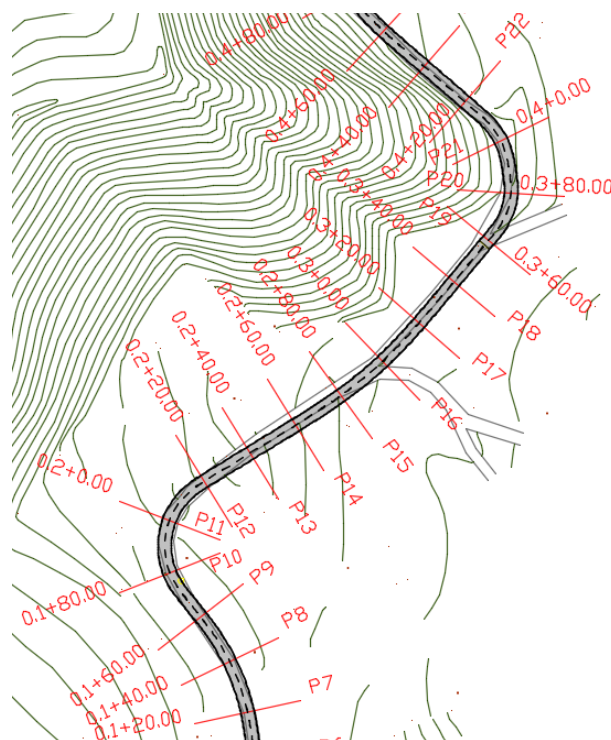
5.4 Prikaz uporabe algoritma na praktičnem primeru

Za praktični prikaz delovanja algoritma smo uporabili obstoječ geodetski posnetek lokalne ceste v Sloveniji. Geodetski posnetek vsebuje relief opisan z geodetskimi točkami in plastnicami, robovi cest pa so podani s 3D poligonskimi črtami. Na osnovi teh podatkov smo najprej s programom *AutoCAD Civil 3D* izdelali digitalni model obstoječega terena (slika 30) po metodah, ki so podrobneje opisane v (Žagar, 2013).



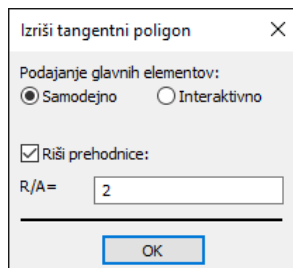
Slika 30: Digitalni model obravnavanega terena

Na poljubno izbranem odseku ceste smo s programom *Plateia* izrisali os ceste tako, da poteka čimbolj po sredi med posnetimi robovi obstoječe ceste (slika 31).



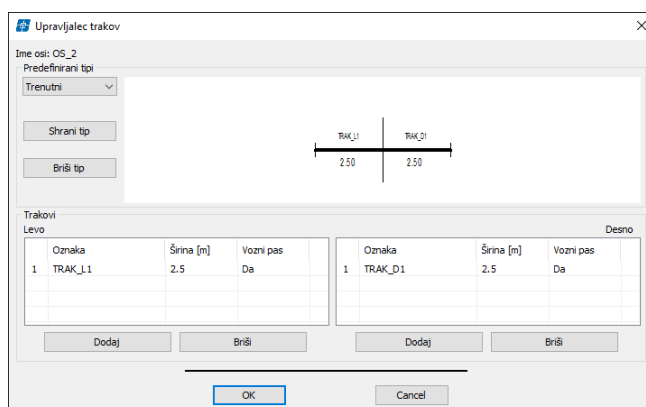
Slika 31: Izris osi ceste s programom Plateia

Os ceste smo izrisali s tangentnim poligonom (slika 32), s katerim lahko opišemo poljubno kombinacijo glavnih elementov ceste. Program *Plateia* v vsakem vozlišču tangentnega poligona izriše največji možen krožni lok ob upoštevanju razmerja $R/A = 2$, to je razmerje med radijem krožnega loka R in parametrom prehodnice A .



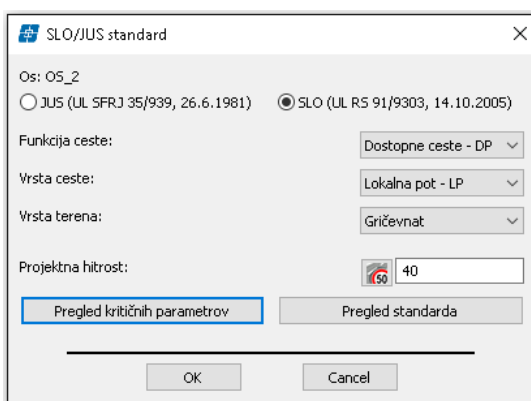
Slika 32: Pogovorno okno za izris osi ceste s tangentnim poligonom

Vozišču določimo po 1 vozni pas širine 2,5m levo in desno od osi ceste (slika 33).



Slika 33: Pogovorno okno za izris osi ceste s tangentnim poligonom

Glede na geodetski posnetek naj bo funkcija ceste dostopna cesta - DP, vrsta ceste naj bo lokalna pot – LP, teren pa je gričevnat (slika 34).



Slika 34: Določitev kategorije ceste

Na podlagi funkcije in vrste ceste smo na podlagi Pravilnika o projektiranju cest (UL RS 91/9303, 14.10.2005) določili računsko oz. projektno hitrost, ki v našem primeru znaša 40 km/h.

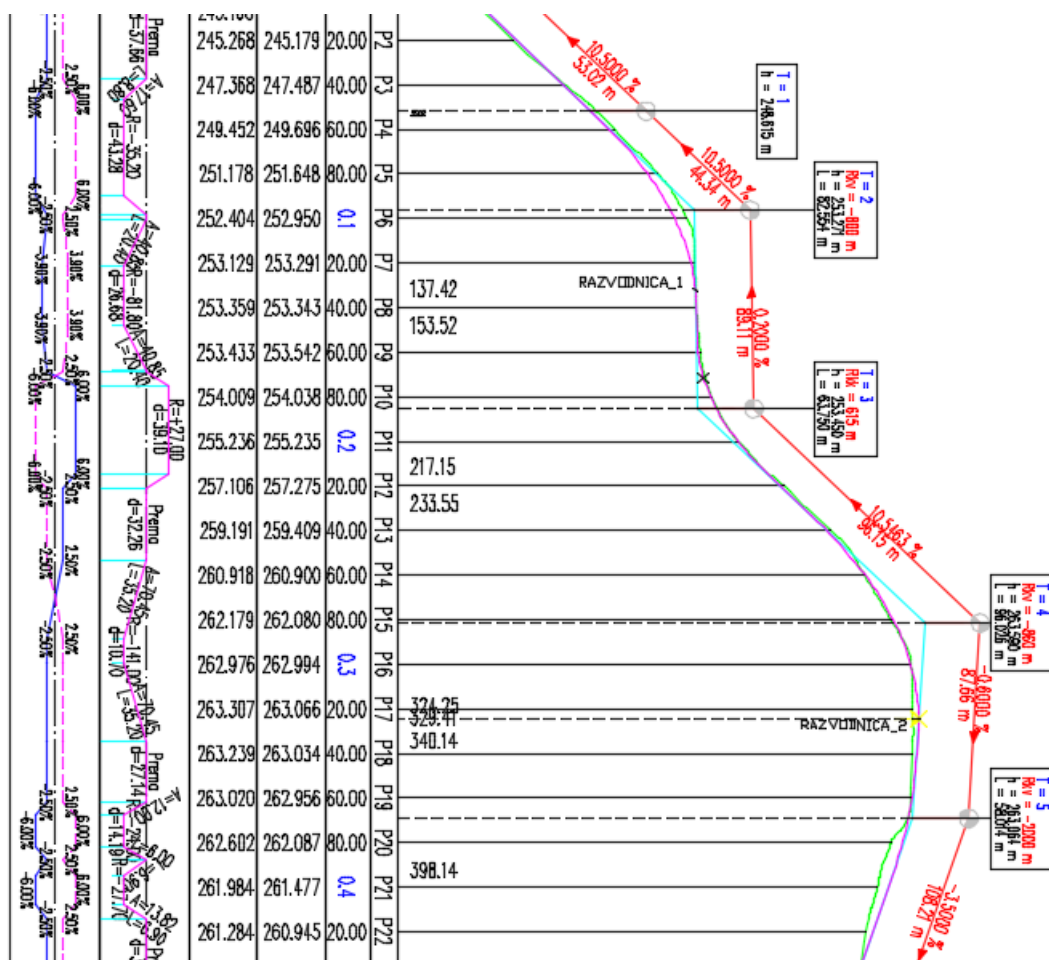
Projektirano os ceste smo v naslednjem koraku projicirali na model terena in dobili vzdolžni potek terenske črte pod niveleto ceste. Ker gre za obstoječo cesto, smo niveleto izrisali z metodo najboljšega prileganja (slika 35) tako, da se niveleta kar najbolje prilega poteku terenske črte. Vhodni podatek za izračun nivelete je poleg terenske črte še največji dopustni polmer (rubrika *Največji polmer* na sliki 35). Program večjih zaokrožitev od podane vrednosti parametra *Največji polmer* ne bo upošteval in bo na njihovem mestu krožni lok nadomestil s najbolje prilegajočo se tangento.



Slika 35: Pogovorno okno za izrise nivelete ceste z metodo najboljšega prileganja

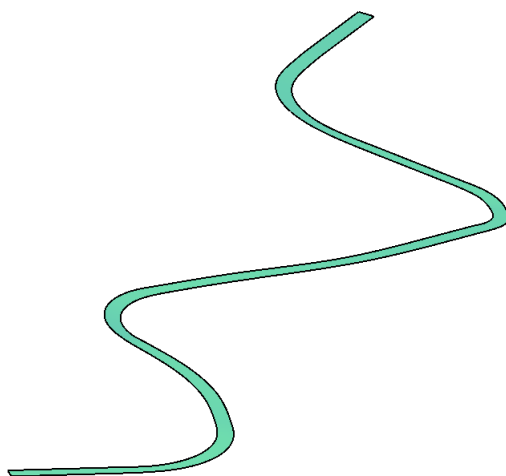
Ker pa moramo zagotoviti prevoznost ceste in zadostiti določenim omejitvam, kot sta minimalna konveksna vertikalna zaokrožitev nivelete, ki znaša $R_{min, konv} = 800\text{ m}$ in minimalna konkavna vertikalna zaokrožitev, ki znaša $R_{min, konk} = 600\text{ m}$, smo niveleto ceste z metodami ročnega urejanja prilagodili tem omejitvam. Na sliki 36 je prikazan vzdolžni prerez obravnavane ceste.

Nato smo na podlagi horizontalnih elementov ceste in računske hitrosti izračunali še prečne nagibe ceste.



Slika 36: Izris vzdolžnega prereza ceste s programom *Plateia*

Niveleta ceste in prečni nagib predstavljajo osnovo za izris 3D nivelete in robov ceste s *Plateio*, ki jih potrebujemo za izdelavo digitalnega modela ceste (slika 37).

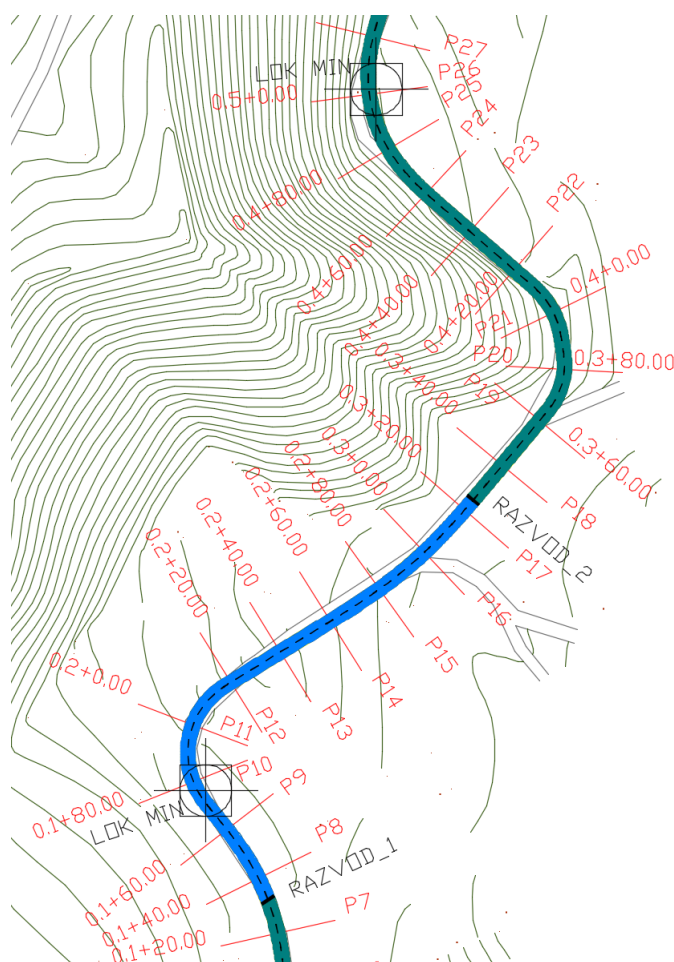


Slika 37: Digitalni model projektirane ceste

Digitalni model ceste pa je vhodni podatek za naš program, s pomočjo katerega določimo lokalne minimume in razvodnice.

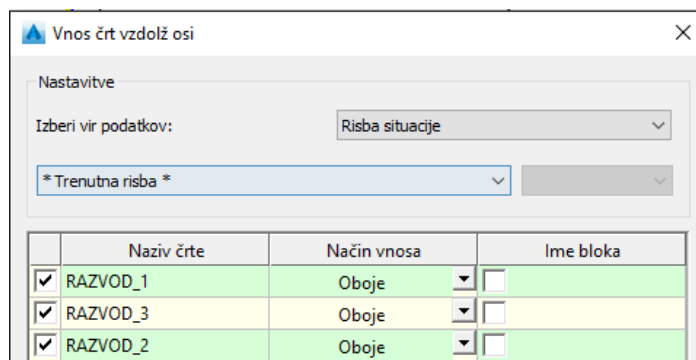
Program najprej poišče lokalne minimume, torej vse lokalno najnižje ležeče točke na cesti in jih označi s prečrtanim krogom. Nato določi še razvodnice med prispevnimi površinami, ki so v našem primeru označene z odebeljenimi temnimi črtami in potekajo prečno na os ceste.

Razvodnice so v geometrijskem smislu 3D polilinije. Kot končni rezultat dobimo 4 prispevna območja, s katerih voda odteka v lokalno najnižje ležeče točke (slika 38). Prvo prispevno območje poteka po trasi ceste od profila P1 do razvodnice RAZVOD_1, drugo prispevno območje omejujeta razvodnici RAZVOD_1 in RAZVOD_2, tretje prispevno območje omejujeta razvodnici RAZVOD_2 in RAZVOD_3, četrto prispevno območje pa se začne z razvodnico RAZVOD_3, konča pa se v zadnjem profilu P32 (slika 38).



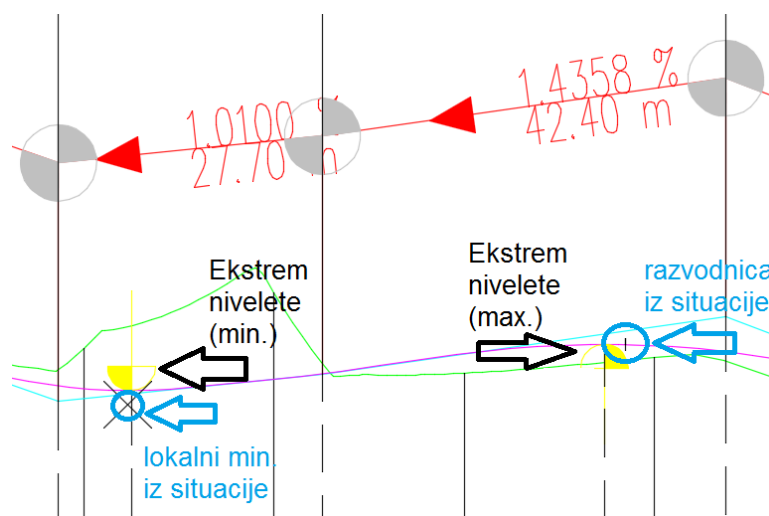
Slika 38: Prikaz lokalnih minimumov in razvodnic na načrtu situacije ceste

Pravilnost rezultatov preverimo tako, da dobljene lokalne minimume in razvodnice iz situacijskega načrta ceste prenesemo v načrt vzdolžnega prereza in preverimo, če se po stacionaži in višini ujemajo z ekstremi nivelete. To lahko storimo s skupino ukazov v programu *Plateia*. Na sliki 39 je prikazano pogovorno okno ukaza za prenos črt – razvodnic iz načrta situacije ceste v vzdolžni prerez ceste.



Slika 39: Pogovorno okno za prenos črt vzdolž osi v vzdolžni prerez ceste

Na sliki 40 je podrobneje prikazan odsek vzdolžnega prereza ceste na območju med profiloma P25 in P28. Z rumeno puščico (polovica je rumeno obarvana) so označene ekstremne točke nivelete, z modro barvo pa so obkroženi rezultati izračuna z našim algoritmom. Ugotovimo lahko, da se lokalni minimum in razvodnica, ki smo ji izračunali z našim programom, ujemata z ekstremi nivelete.



Slika 40: Detajlniji prikaz lokalnih minimumov in razvodnic v vzdolžnem prerezu ceste

6 ZAKLJUČKI

Učinkovito odvodnjavanje cest je bistvenega pomena za vzdrževanje nivoja uslug ceste ter zagotavljanje varnega cestnega prometa in njegovega nemotenega poteka. Za optimalno odvodnjavanje je potrebno načrtovati situacijske elemente ceste koordinirano glede na vzdolžni prerez in obratno.

Kontrolirani vzdolžni odvodnji ceste so namenjeni robniki in koritnice. S pravilnim načrtovanjem koritnic lahko učinkovito nadzorujemo odtekanje vode po vozišču. V primeru neustrezne odvodnje ceste lahko začne voda ovirati promet in postane nevarna. Vodo iz koritnic odvajamo do požiralnikov, ki morajo biti razporejeni tako, da zajamejo vso dotekajočo vodo. Ti so med seboj povezani z ustrezno cevno kanalizacijo, po kateri odvedemo vodo do izbranega recipienta.

Lokacije cestnih požiralnikov določimo na osnovi geometrijskih elementov ceste. Požiralnike postavljamo na vseh depresijskih točkah na vozišču (lokalni minimumi) ter na območju križišč, avtobusnih postajališč in prehodov za pešce. Drugje pa požiralnike postavimo na takšno medsebojno razdaljo, da širina površinskega odtoka vode prečno na vozišče ne preseže kritične vrednosti, ki trenutno v Sloveniji še ni zakonsko določena. Najpomembnejše lastnosti cestnih požiralnikov so sprejemna kapaciteta, učinkovitost in lokacija požiralnika. Nanje vplivajo številni dejavniki, ki jih moramo upoštevati pri načrtovanju požiralnikov in so podrobno predstavljene v tej diplomski nalogi.

V praktičnem delu diplomske naloge smo prikazali potek načrtovanja odvodnjavanja ceste, ki vključuje kombinacijo več programskih rešitev ter izmenjavo podatkov med njimi. DMR smo izdelali s programom *AutoCAD Civil 3D*, cesto pa smo načrtovali s programom *Plateia*. Nobeden od teh programov ne vsebuje ustrezne rešitve za računanje položajev cestnih požiralnikov in določanje razvodnic med prispevnimi območji, zato smo razvili novo programsko rešitev in jo uporabili na praktičnem primeru.

Tekom razvoja programske rešitve smo testirali različne kriterije za določanje razvodnic med sosednjimi trikotniki TIN mreže. V diplomski nalogi predstavljena rešitev se je izkazala za najboljšo in hkrati najhitrejšo. Število trikotnikov v TIN mreži namreč nima velikega vpliva na hitrost izračuna, kar omogoča uporabo programa tudi na oblakih več milijonov točk. Velik vpliv na končni izračun pa ima kakovost vhodnih podatkov. Večja kot je gostota posnetih geodetskih točk ter njihova horizontalna in višinska natančnost, bolj natančni so izračuni razvodnic med prispevnimi območji. Programsko rešitev lahko uporabimo za načrtovanje odvodnjavanja vseh utrjenih površin, kot so na primer ceste, parkirišča, garažne hiše in počivališča.

V algoritmu nastopajo tudi določene omejitve. Računanje razvodnic se izvaja samo po robovih trikotnikov vhodne TIN mreže. Posledice se v praksi kažejo tako, da v določenih primerih ne dobimo sklenjenih poligonskih črt okoli prispevnih območij. Program namreč ne interpolira vrednosti višin na poljubnih lokacijah znotraj trikotnikov TIN mreže. Prav tako ne obravnava posebej vodoravnih trikotnikov, kjer imajo vsa tri vozlišča enako višino. V takih primerih si pomagamo z orodji za izboljšavo ploskve DMR, ki pa zahtevajo nekaj ročnega dela (glej Žagar, 2013).

Eden od izzivov za nadaljnji razvoj algoritma je torej določitev sklenjenih poligonskih črt okoli prispevnih območij z interpolacijo višinskih točk na poljubnih lokacijah, ne glede na natančnost posnetih geodetskih točk. Poleg lokalnih minimumov na digitalnem modelu ceste bi bilo smiselno s programsko rešitvijo določiti še ostale točk za postavitev cestnih požiralnikov na območju križišč, prehodov za pešce in avtobusnih postajališč. Pri načrtovanju cest s *Plateio* lahko te lokacije hitro določimo, saj ima program vgrajene objekte, kot so zaokrožitve v križišču (t.i. traktrise), zebre in avtobusna postajališča.

VIRI

Arcement, G.J., Schneider, V.R. 1984. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey Water-supply Paper 2339, Metric Version: 67 str.

<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf> (Pridobljeno 14. 11. 2015.)

Autodesk. 2013a. AutoCAD 2013 Civil 3D User's Guide.

http://docs.autodesk.com/CIV3D/2013/ENU/index.html?url=filesCUG/topichead_0.htm,topicNumber=CUGd30e15115 (Pridobljeno 12. 11. 2015.)

Autodesk. 2013b. Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2013. User's Guide.

http://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk_storm_and_sanitary_analysis_2013.pdf
(Pridobljeno 13. 11. 2015.)

Brown, S., A., Schall, J., D., Morris, J., L. 2013. Urban Drainage Design Manual, Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition: 478 str.

<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/10009/10009.pdf>
(Pridobljeno 12. 11. 2015.)

Brilly, M., Šraj, M., 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

California Department of Transportation (CADOT). 2012. Highway Design Manual. Chapter 810 – Hydrology: 761 str.

http://www.dot.ca.gov/hq/oppd/hdm/HDM_050712.pdf (Pridobljeno 13. 11. 2015.)

CGS. 2015. Situacija - Uporabniški priročnik Plateia 2015, Ferrovia 2015, Aquaterra 2015. CGS Plus d.o.o., Ljubljana: 189 str.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. Singapur, McGraw-Hill Book Company: 572 str.

Charbeneau, R.J. 2014. Urban Drainage Systems.

<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/ce365kspr14/visual/urbandrainage.pdf>
(Pridobljeno 20. 11. 2015.)

Gantar, M. 2014. Metode zmanjševanja padavinskega odtoka v urbanem okolju. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Gantar): 77 str.

Golob, A. 2012. Analiza časovnih parametrov hidrograma za izbrana porečja. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Golob): 86 str.

Guo, J. C. Y. 1999. Detention Basin Sizing for Small Urban Catchments. *Journal of Water Resources Planning and Management* 125, 6: 380–384.

Guo, J. C. Y. 2000. Design of Grate Inlets with a Colgging Factor. *Journal of Water Resources Planning and Management* 4, 3: 181-186.

Iowa Department of Natural Resources (DNR). 2009. Iowa Stormwater Management Manual. Part 2C-3 - Time of Concentration.

<http://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/water/stormwater/manual/stormwatermanual.pdf>
(Pridobljeno 12. 11. 2015.)

Kestnar, K. 2012. Določanje največjih pretokov na nemerjenih porečjih. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kestnar): 50 str.

Mays, L. M. 2001. Stormwater collection systems design handbook. McGraw-Hill Companies, Inc: 1017 str.

McCuen, R. H., Johnson, P. A., Ragan, R. M. 2002. Highway Hydrology: 426 str.
<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013248.pdf> (Pridobljeno 13. 11. 2015.)

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Acta hydrotehnica* 20, 32. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 326 str.

Podobnikar, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Podobnikar): 348 str.

Petkovšek, G. 2001. Analiza razlik med metodami avtomatskega določanja razvodnic na primeru povodja Rokave. *Acta hydrotehnica* 19, 30: 45-63.
<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a30-gp.pdf> (Pridobljeno 12. 11. 2015.)

Podgoršek, M. 2006. Raziskava povezave med hidroplaningom in nezgodami na mestih zastajanja padavinske vode na vozišču zaradi vijačenja.
<http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T2-Podgorsek.pdf> (Pridobljeno 10. 11. 2015.)

Pravilnik o projektiranju cest. Uradni list RS, št. 91/2005, 26/2006, 109/2010 - ZCes-1.

Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Rak): 104 str.

Spletni brezplačni dostop do podatkov laserskega skeniranja (LIDAR). 2015. Ljubljana, MOP.
http://www.mop.gov.si/nc/si/medijsko_sredisce/novica/article/12029/5960/
(Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Thompson, B. D. 2006. The Rational Method, Civil Engineering Department, Texas Tech University: 7 str.

Thompson, B. D., Xing, F., Gharty-Chhetri, O.B. 2003. Synthesis of TxDOT storm drain design. Center for Multidisciplinary Research in Transportation. Department of Civil Engineering, Texas Tech University: 157 str.

TSC 03.200. 2003. Temeljni pogoji za določanje cestnih elementov v odvisnosti od voznodinamičnih pogojev, ekonomike cest, prometne obremenitve in prometne varnosti ter preglednosti (predlog): 55 str.

http://www.fg.uni-mb.si/promet/gradiva/Cestna%20infrastruktura/TSC-03-200_predlog.doc

(Pridobljeno 22. 11. 2015.)

TSC 03.300. 2003. Geometrijski elementi cestne osi in vozšča (predlog): 67 str.

http://www.fpp.uni-lj.si/mma_bin.php?id=2011111911211989 (Pridobljeno 23. 11. 2015.)

TSC 03.380. 2010. Tehnična specifikacija za javne ceste – odvodnjavanje cest (delovni osnutek): 107 str.

Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). 2008. Urban Storm Drainage Criteria Manual (Volume 1): 1316 str.

<http://www.udfcd.org/downloads/pdf/critmanual/UDFCD%20Criteria%20Manual%20Vol%201.%202%20&%203.pdf> (Pridobljeno 24. 11. 2015.)

Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). 2016. Urban Storm Drainage Criteria Manual (Volume 1): 386 str.

<http://udfcd.org/wp-content/uploads/uploads/vol1%20criteria%20manual/USDCM%20Volume%201%202016.pdf>
(Pridobljeno 3. 1. 2016.)

Urban Stormwater Management Manual (MSMA). 2012. Department of Irrigation and Drainage Malaysia : 32.str

<http://www.water.gov.my/images/stories/BSMA/Ch%2024%20-%20Stormwater%20Inlets.pdf>
(Pridobljeno 4. 1. 2016.)

Žagar, U. 2013. Simuliranje površinskega toka vode s programom Autocad Civil 3D. Seminarska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba U. Žagar): 137 str.

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Vrednosti n_G za naravne vodotoke in umetna rečna korita.....	A1
A.1 Vrednosti n_G za naravne vodotoke (povzeto po Rak, 2006; Autodesk, 2013b)	A2
A.2 Vrednosti n_G za umetno preoblikovana rečna korita	A3
A.3 Vrednosti n_G za izkopana in očiščena rečna korita	A4
PRILOGA B: GRAFIKONI ZA DOLOČITEV PARAMETROV KORITNIC.....	B1
B.1 Tok v koritnici s trikotno obliko	B2
B.2 Razmerje čelnega toka proti skupnemu odtoku v koritnici	B3
B.3 Pretočnost v koritnici s sestavljenim prerezom	B4
B.4 Pretočnost v kanalu s krožno obliko	B5
B.5 Vpliv širine odtoka ter prečnega in vzdolžnega naklona na kapaciteto koritnice	B6
B.6 Hitrost toka v koritnici s trikotno obliko	B7
B.7 Učinkovitost požiralnika v robniku in linijskega požiralnika	B8
B.8 Potrebna dolžina požiralnika za popolno prestrezanje površinskega odtoka	B9
B.9 Učinkovitost požiralnika pod robnikom za prestrezanje čelnega toka	B10
B.10 Učinkovitost požiralnika pod robnikom za prestrezanje bočnega toka	B11
B.11 Sprejemna kapaciteta linijskega požiralnika v konkavni vertikalni zaokrožitvi	B12
PRILOGA C: DETAJLI VTOČNIH REŠETK.....	C1
C.1 Detajl vtočne rešetke tipa P-50	C2
C.2 Detajl vtočne rešetke tipa P-30	C3
C.3 Detajl vtočne rešetke z vertikalno ukrivljenimi palicami	C4
C.4 Detajl vtočne rešetke tipa 45°- 60	C5
C.5 Detajl vtočne rešetke tipa 30°- 85	C6
C.6 Detajl vtočne rešetke v obliki satovja	C7

PRILOGA A: Vrednosti n_G za naravne vodotoke in za umetno preoblikovana rečna korita

A.1 Vrednosti n_G za naravne vodotoke (povzeto po Rak, 2006; Autodesk, 2013b)

VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimum	Običajno	Maksimalno
1. Naravni vodotoki			
Rečno korito			
a. Čisto, ravno, polno in brez tolmunov	0.025	0.03	0.033
b. Enako, kot zgoraj, s kamenjem in zarast	0.03	0.035	0.04
c. Vijugast, čist kanal s tolmoni in prodom	0.033	0.04	0.045
d. Enako, kot "c" s kamenjem in pleveli	0.035	0.045	0.05
e. Enako, kot "d" z manjšim padcem in nižjo gladino	0.04	0.048	0.055
f. Podobno kot "d" z večjo količino kamenja	0.045	0.05	0.06
g. Počasni ravni del, z večjo količino pleveli in tolmunov	0.05	0.07	0.08
h. Korito močnejše poraščeno s plevelom in z globokimi tolmoni oziroma gosteje zaraščene poplavne poti	0.075	0.1	0.15
i. Gorski vodotok (strme brežin, brez zarasti) s peščenim ali prodnatim dnom	0.03	0.04	0.05
j. Enako kot "i" z večjimi skalami v koritu	0.04	0.05	0.07
2. Poplavne površine			
Travniki brez grmičevja			
a. Nizka pokošena trava	0.025	0.03	0.035
b. Visoka trava	0.03	0.035	0.05
Obdelovalne površine			
a. Brez rastlinja	0.02	0.03	0.04
b. Zreli, v vrstah gojeni pridelki	0.025	0.035	0.45
c. Zreli, po vsej površini gojeni pridelki	0.03	0.04	0.05
Grmičevje			
a. Posamezni grmi, goste pleveli	0.035	0.05	0.07
b. Redko grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.035	0.05	0.06
c. Redko grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.04	0.06	0.08
d. Srednje gosto grmičevje in drevje brez listja (pozimi)	0.045	0.7	0.11
e. Srednje gosto grmičevje in drevje z listjem (poleti)	0.07	0.1	0.16
Drevje			
a. Čistina z drevesnimi štori in brez mladik	0.03	0.04	0.08
b. Čistina z drevesnimi štori in gostimi mladikami	0.05	0.06	0.12
c. Gostejši gozdovi z malo podrtimi drevesi, podrasti z gladino pod krošnjami dreves	0.08	0.1	0.16
d. Enako kot c., le da nivo vode sega do krošenj	0.1	0.12	0.16
e. Gost gozd z listjem (poleti)	0.11	0.15	0.2

A.2 Vrednosti n_G za umetno preoblikovana rečna korita
(povzeto po Rak, 2006; Autodesk, 2013b)

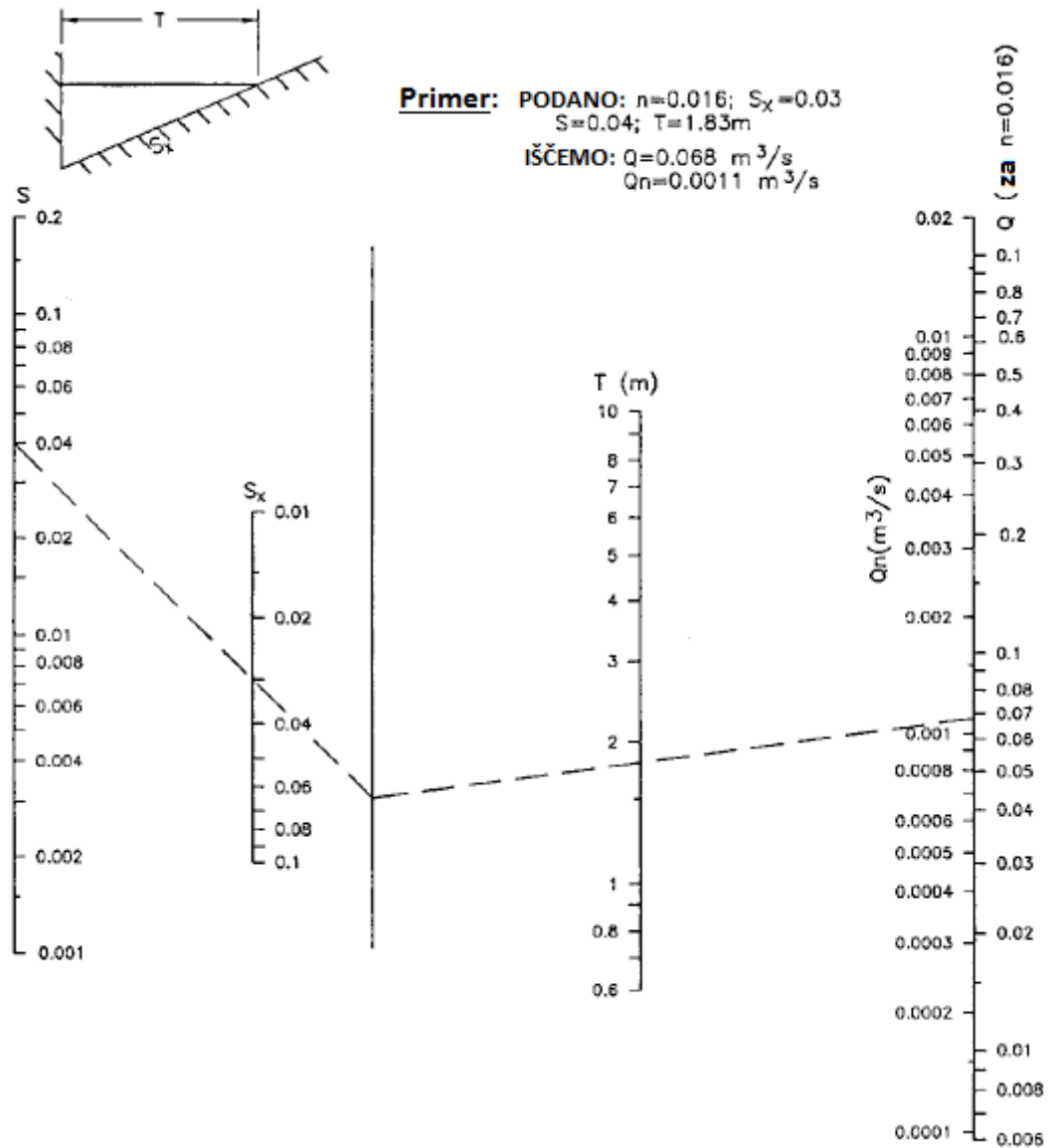
VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimum	Običajno	Maksimalno
3. Obložena ali grajena rečna korita (delitev glede na vrsto uporabljenega materiala)			
Beton			
a. Zglajen in ometan beton	0.011	0.013	0.015
b. Ometan	0.013	0.015	0.016
c. Ometan s peskom na dnu	0.015	0.017	0.02
d. Nedokončan	0.014	0.017	0.02
e. Brizgan beton, gladek	0.016	0.019	0.023
f. Brizgan beton, valovit	0.018	0.022	0.025
g. Beton na izkopani dobri skali	0.17	0.02	-
h. Beton na izkopani slabi skali	0.022	0.027	-
Dno iz betona, brežine..			
a. prevlečene z obdelanim kamnom v malti	0.015	0.017	0.02
b. prevlečene z neobdelanim kamnom v malti	0.017	0.02	0.024
c. zidane z gruščem v cementu in malti	0.016	0.02	0.024
d. zidane z gruščem v cementu	0.02	0.025	0.03
e. zidane z suhim gruščem ali odpadnim kamenjem	0.02	0.03	0.35
Prodnato dno, brežine..			
a. iz opaženega betona	0.017	0.2	0.25
b. iz neobdelanega kamna v malti	0.02	0.023	0.026
c. suhega grušča ali odpadnega kamenja	0.023	0.033	0.036
Opeka			
a. glajena	0.011	0.011	0.015
b. glajena v cementni malti	0.012	0.015	0.018
Kovina			
a. Gladka kovinska površina	0.011	0.012	0.014
b. Valovita pločevina	0.021	0.025	0.03
Asfalt			
a. Gladek	0.013	0.013	
b. Grob	0.016	0.016	
Rastlinska obloga			
	0.03		0.5
Tesan kamen			
	0.013	0.015	0.017
Cement			
a. Čista površina	0.01	0.012	0.013
b. Ometana površina	0.011	0.013	0.015
Les			
a. Raven ne vzdrževan	0.01	0.12	0.014
b. Raven, smoljen	0.011	0.013	0.015
c. Opaž z deskami	0.012	0.015	0.018
d. Opaž z deskami, prekrit	0.01	0.014	0.017

A.3 Vrednosti n_G za izkopana in očiščena rečna korita
(povzeto po Rak, 2006; Autodesk, 2013b)

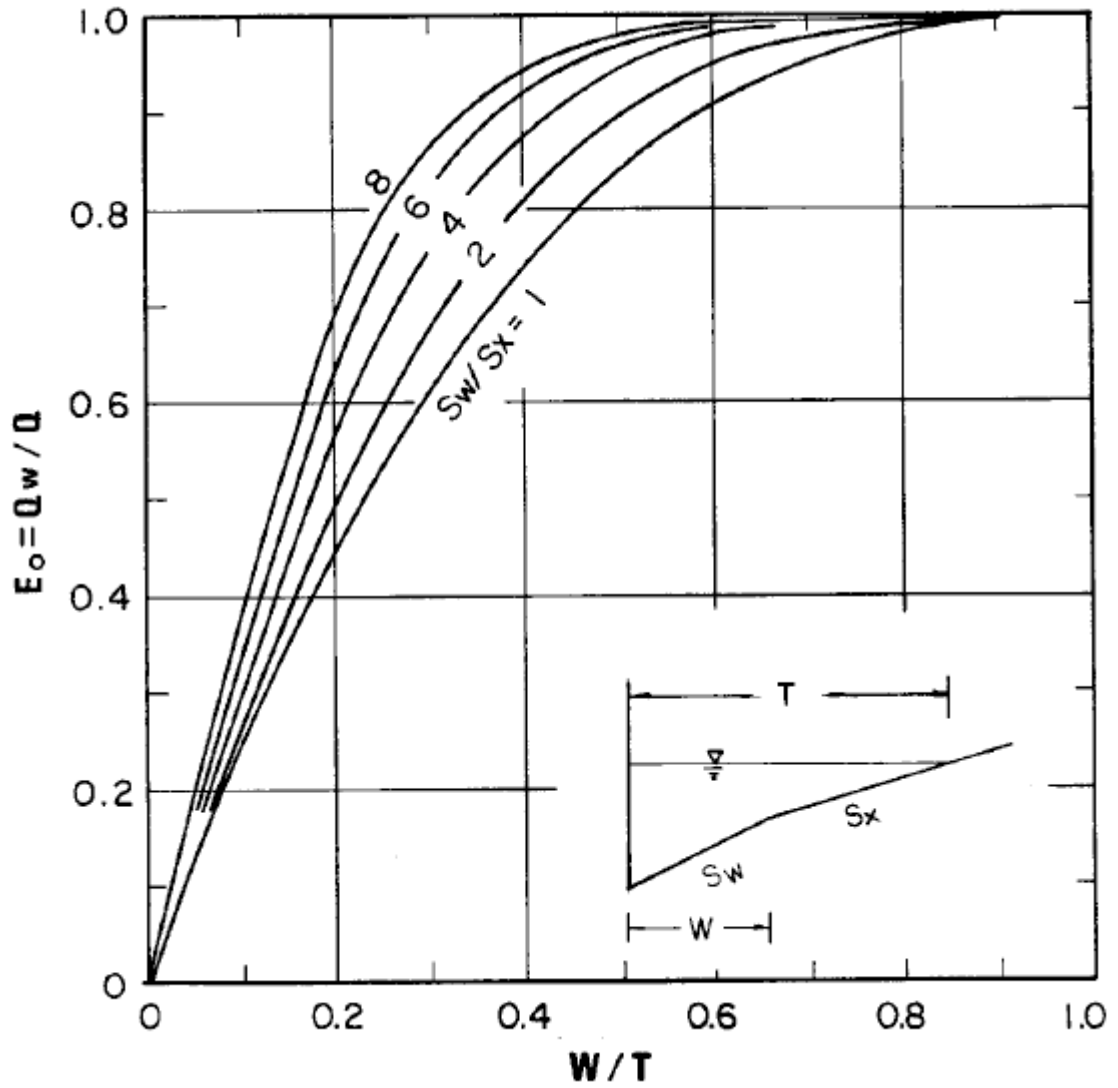
VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimum	Običajno	Maksimalno
3. Izkopani in očiščenega naravna korita			
Zbita, poravnana zemljina			
a. Čista, pred kratkim končana	0.016	0.018	0.02
b. Čista, po preperevanju	0.018	0.022	0.025
c. Prod, zbita področja, čist	0.022	0.025	0.03
d. Nizka trava, malo pleveli	0.022	0.027	0.033
Vijugast in iz zemljine			
a. Brez rastlinja	0.023	0.025	0.03
b. trava, nekaj pleveli	0.025	0.03	0.033
c. Gosti plevel ali gosto vodno rastje v globokih kanalih	0.03	0.035	0.04
d. Zemeljsko dno in kamnite brežine	0.028	0.03	0.035
e. Kamnito dno in z plevelom zarasle brežine	0.025	0.035	0.04
f. Tlakovano dno in čiste brežine	0.03	0.04	0.05
Izkopana ali očiščena korita			
a. Brez vegetacije	0.025	0.028	0.033
b. Redko grmičevje na brežinah	0.035	0.05	0.06
Skalnato korito			
a. Gladko in nespremenljivo ostenje	0.035	0.035	0.04
b. Nazobčano in nepravilno ostenje	0.035	0.04	0.05
Ne vzdrževani kanali, poraščena z pleveli in grmičevjem			
a. Čisto dno, grmičevje na brežinah	0.04	0.05	0.08
b. Enako kot "a", grmičevje do gladine vode	0.045	0.07	0.11
c. Goste pleveli do gladine vode	0.05	0.08	0.05
d. Gosto grmičevje, visok nivo vode	0.08	0.1	0.14

PRILOGA B: GRAFIKONI ZA DOLOČITEV PARAMETROV KORITNIC
(prirejeno po Brown in sod., 2013)

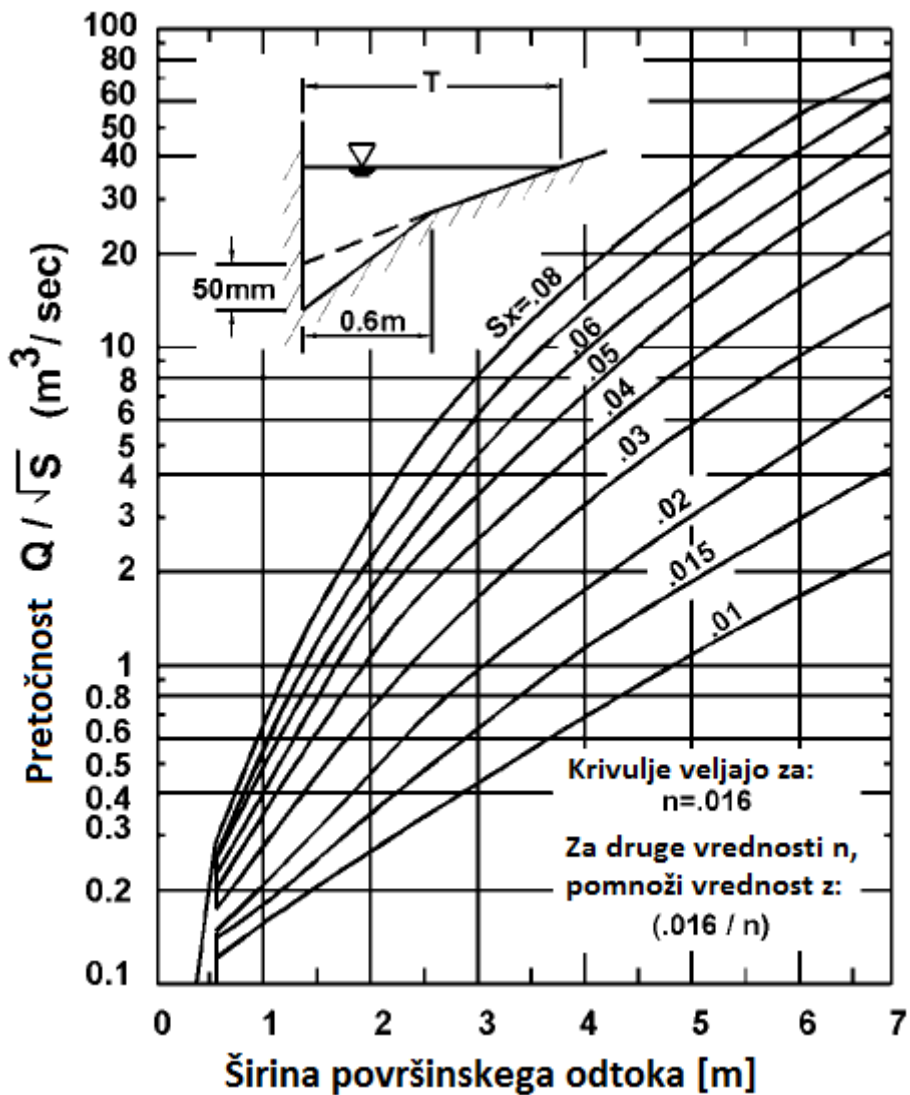
B.1 Tok v koritnici s trikotno obliko



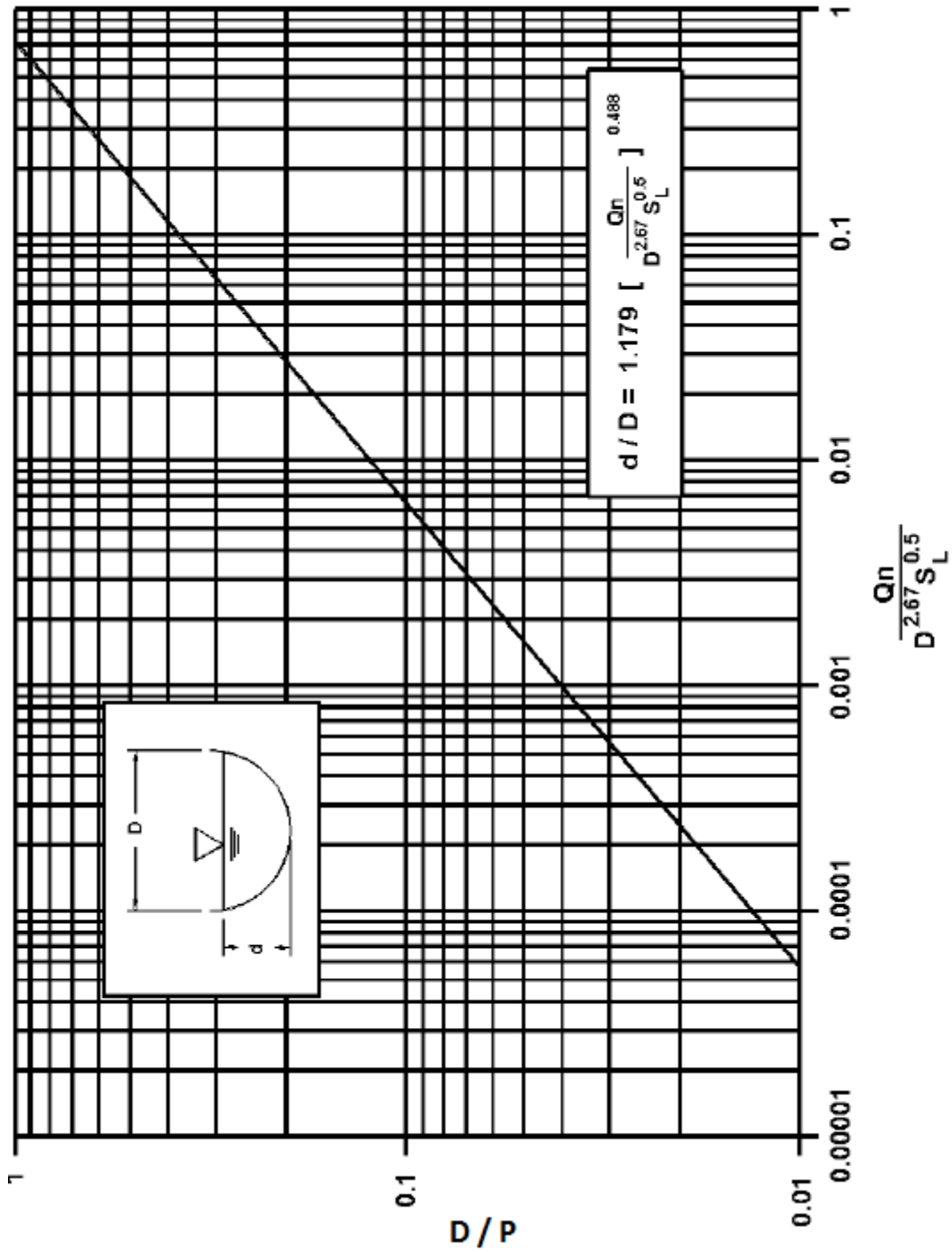
B.2 Razmerje čelnega toka proti skupnemu odtoku v koritnici



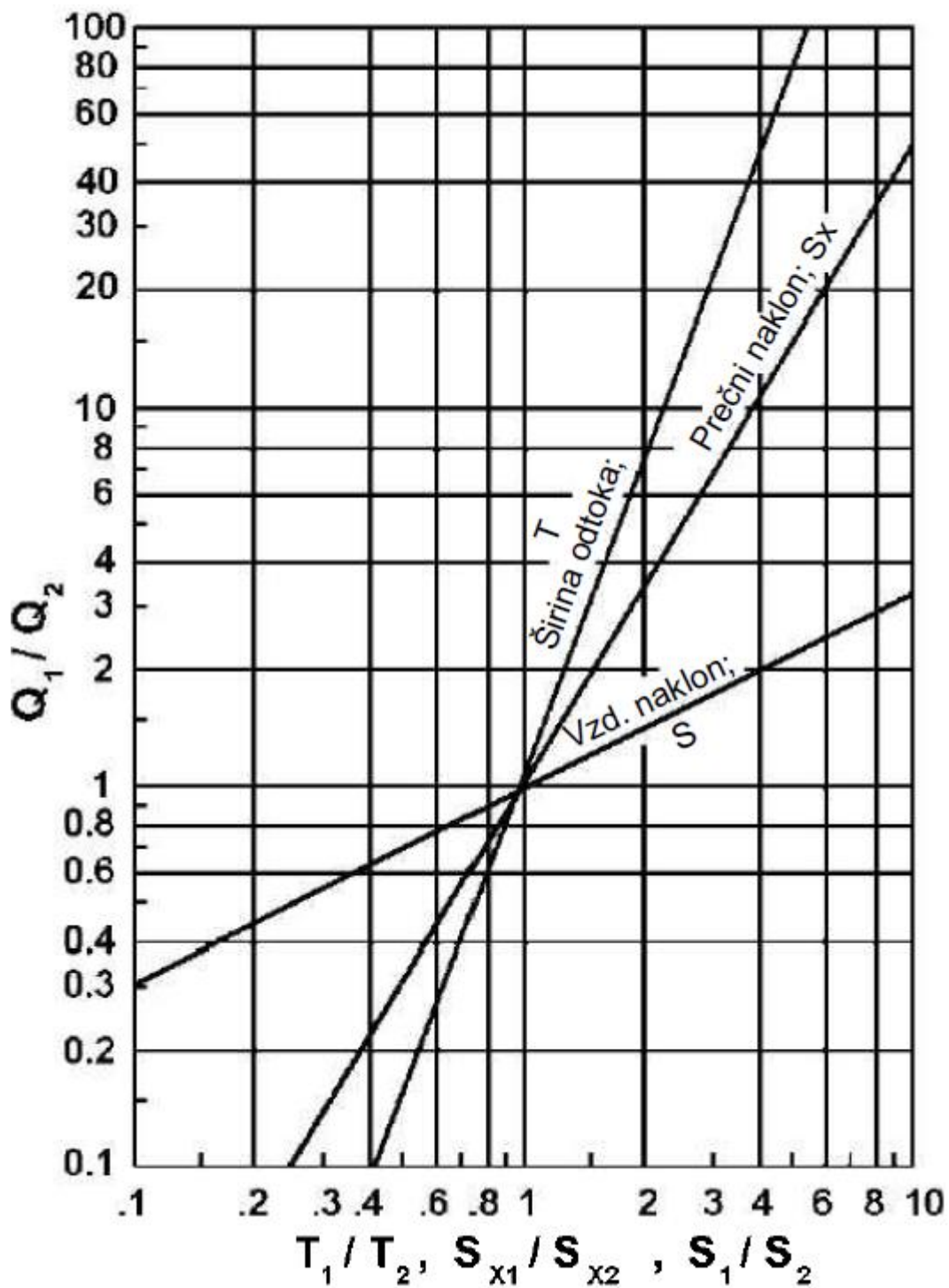
B.3 Pretočnost v koritnici s sestavljenim prerezom



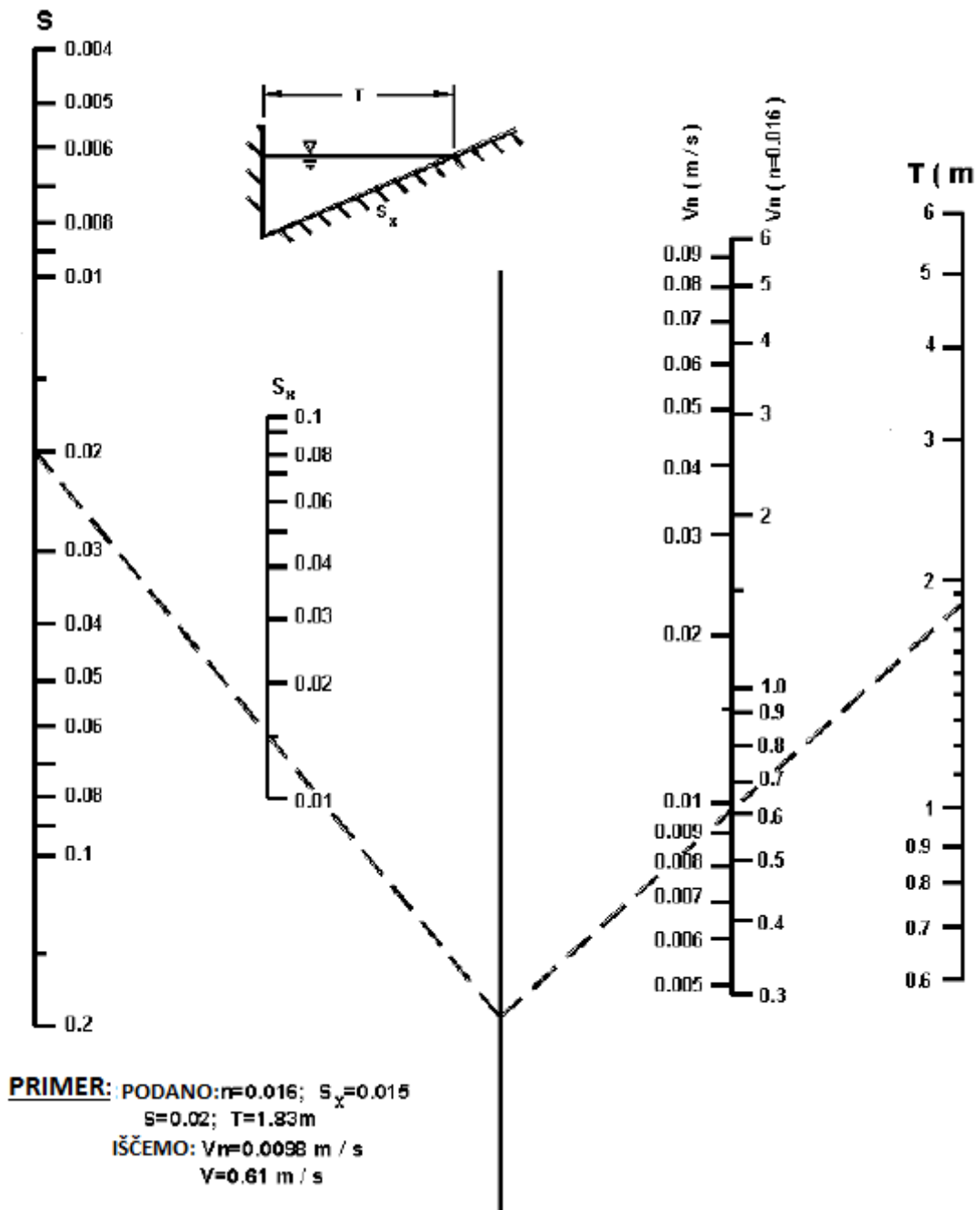
B.4 Pretočnost v kanalu s krožno obliko



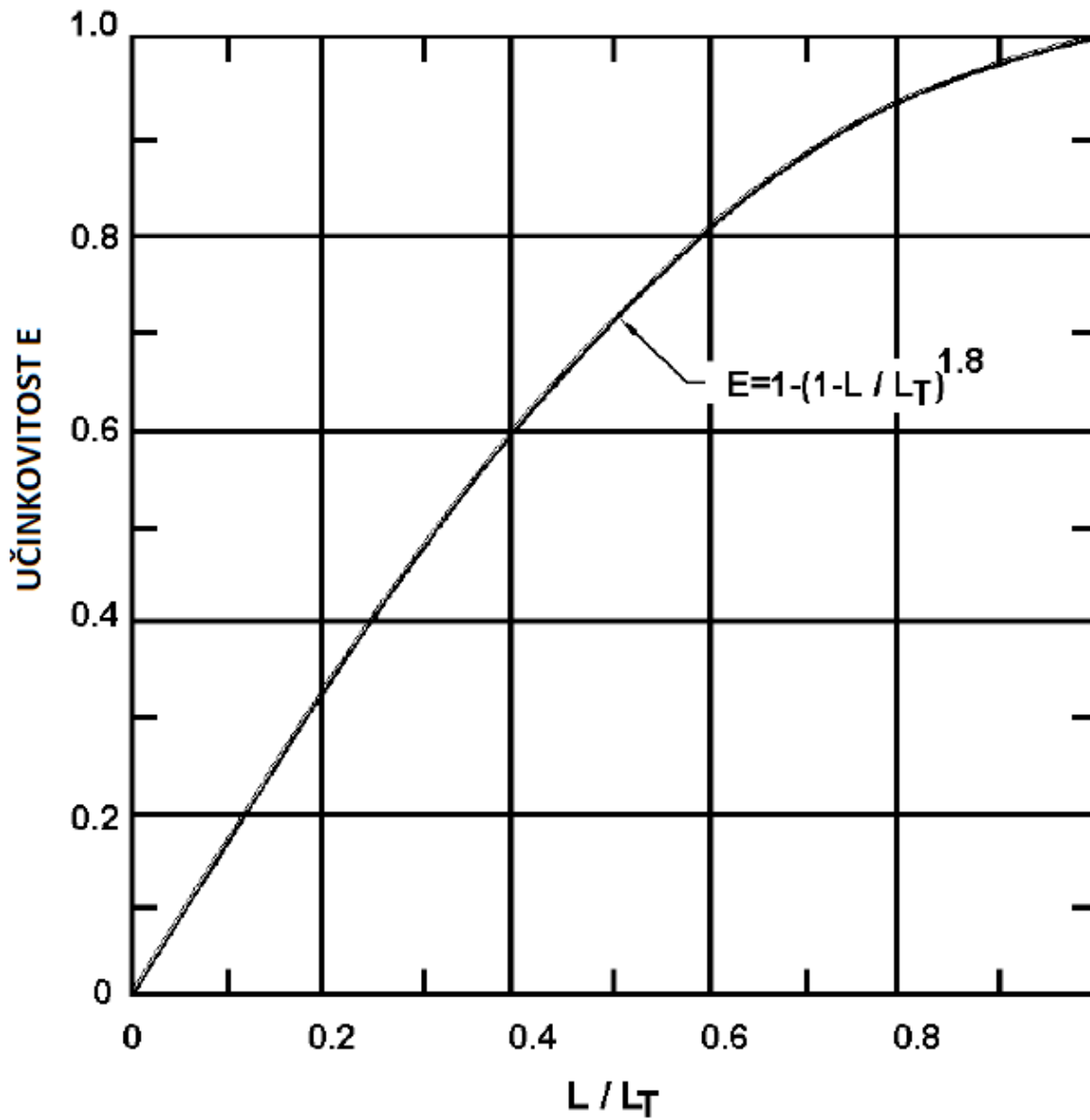
B.5 Vpliv širine odtoka ter prečnega in vzdolžnega naklona na kapaciteto koritnice



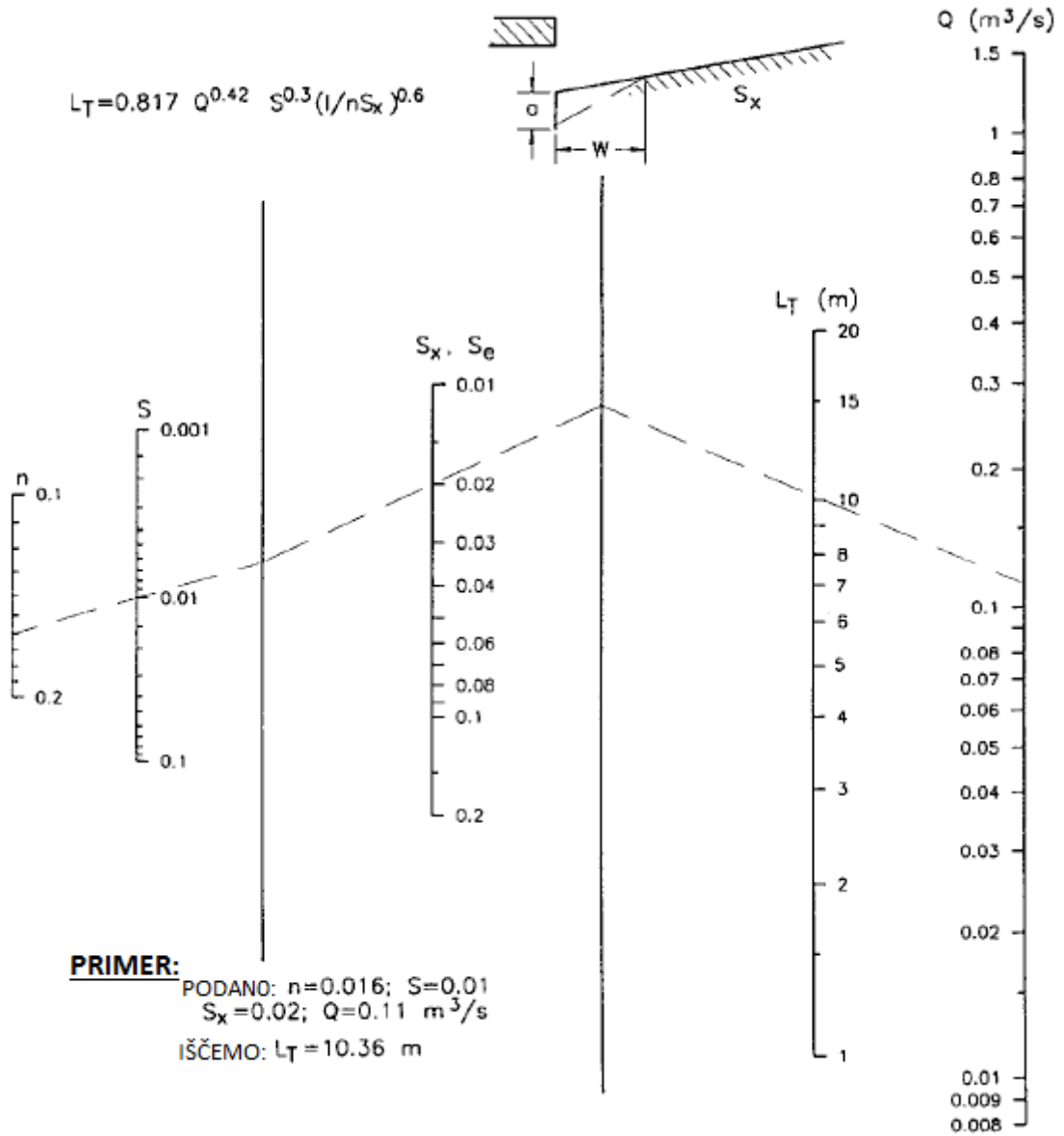
B.6 Hitrost toka v koritnici s trikotno obliko



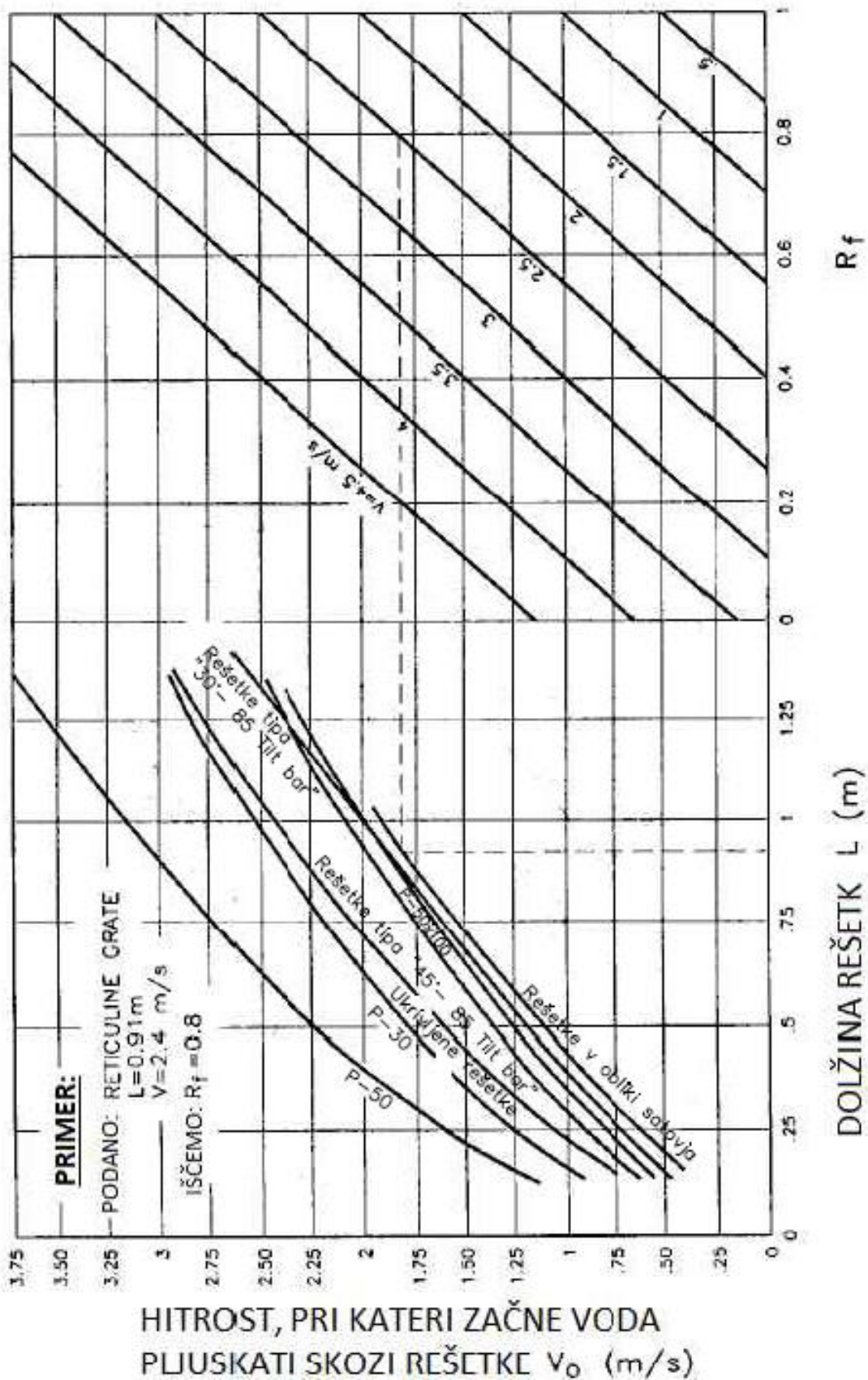
B.7 Učinkovitost požiralnika v robniku in linijskega požiralnika



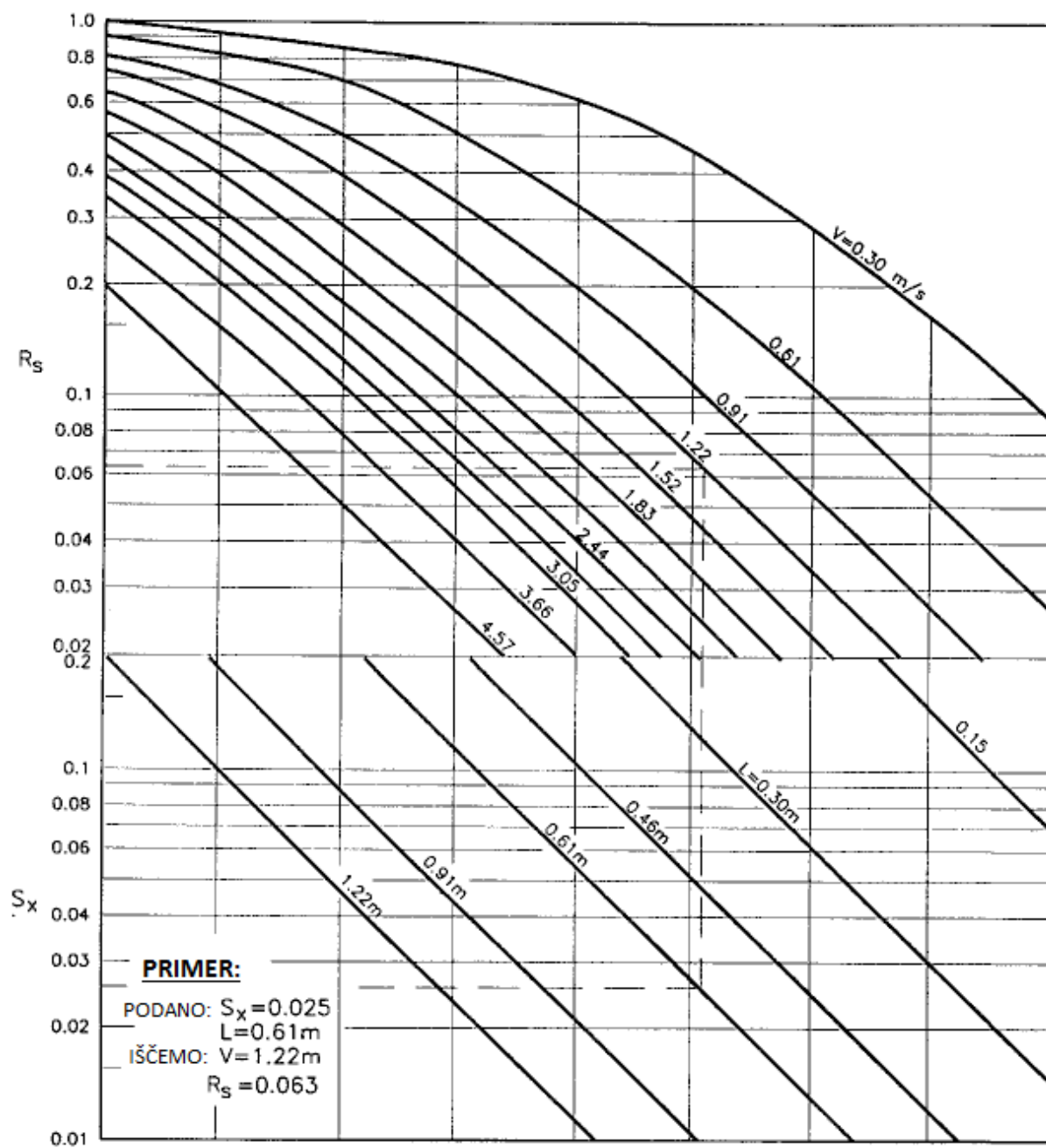
B.8 Potrebna dolžina požiralnika za popolno prestrezanje površinskega odtoka



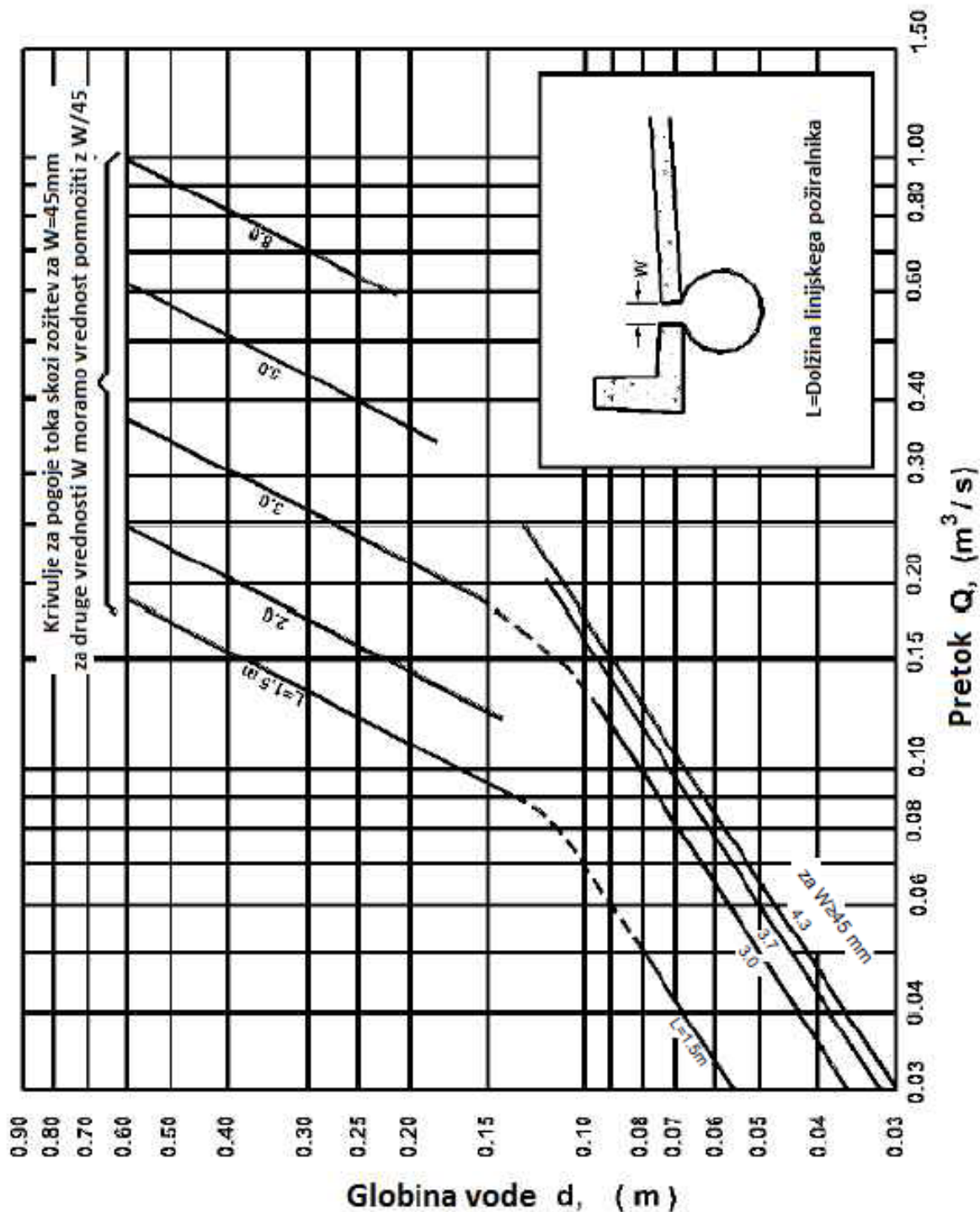
B.9 Učinkovitost požiralnika pod robnikom za prestrezanje čelnega toka



B.10 Učinkovitost požiralnika pod robnikom za prestrazanje bočnega toka

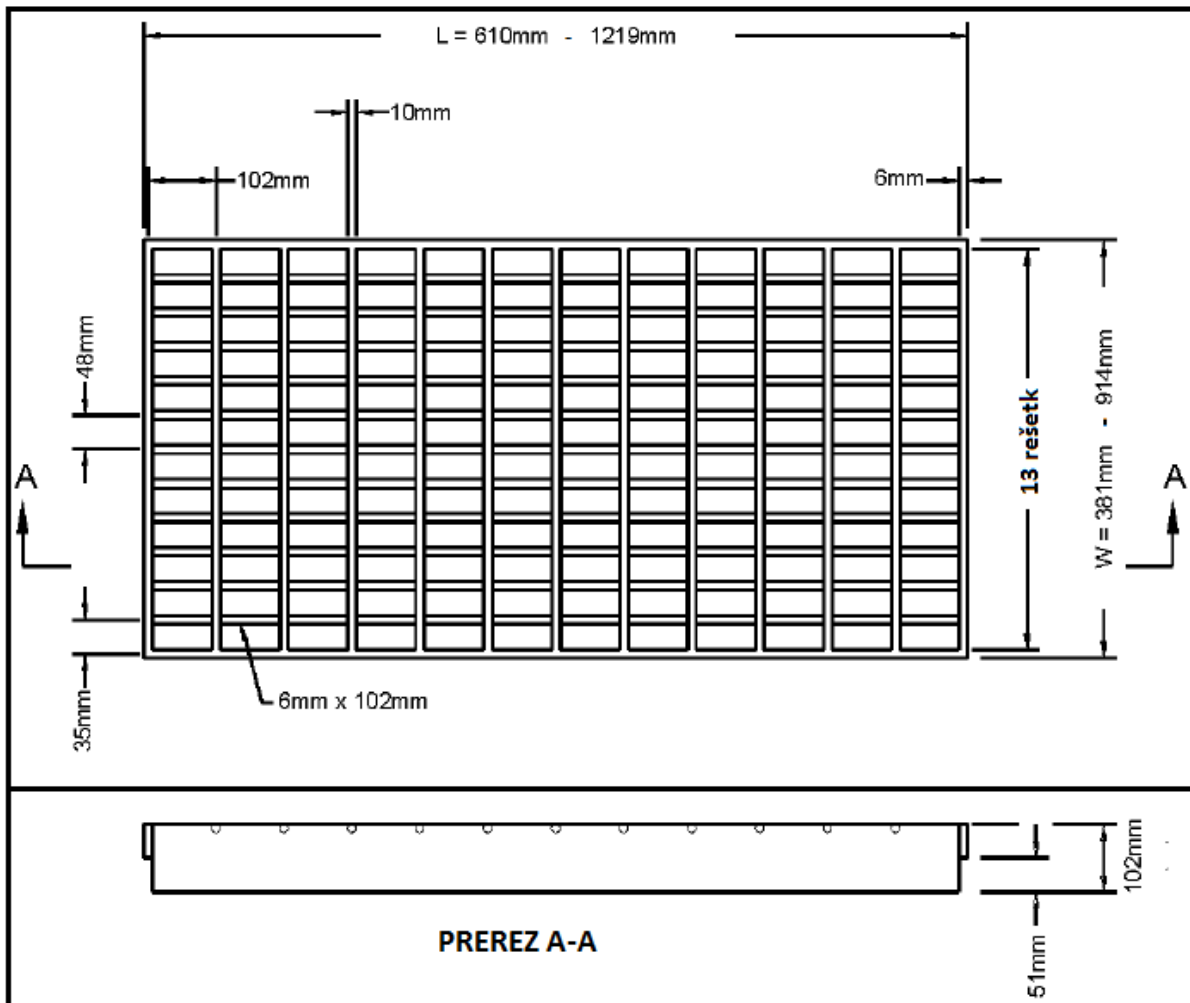


B.11 Sprejemna kapaciteta linijskega požiralnika v konkavni vertikalni zaokrožitvi

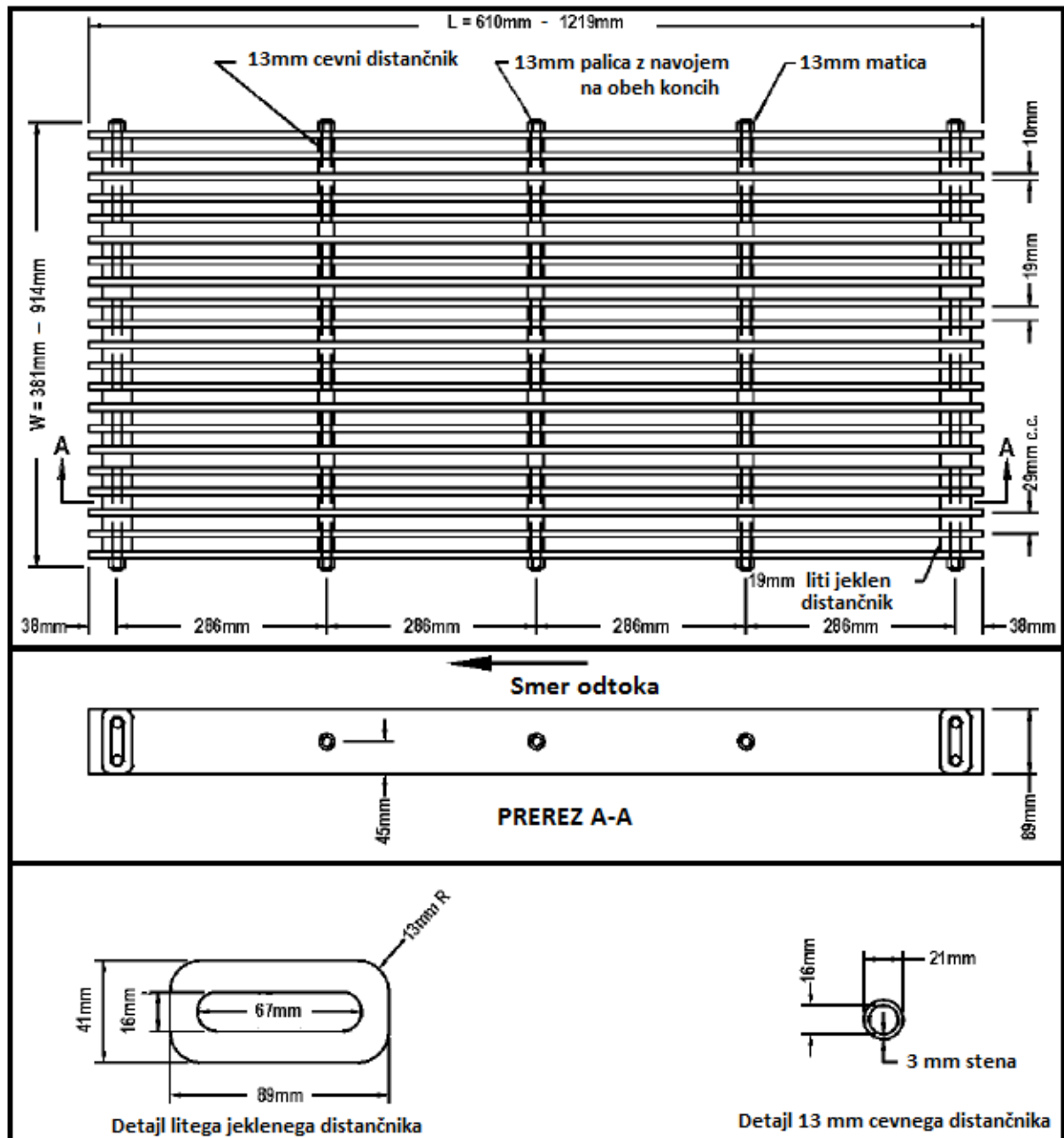


PRILOGA C: DETAJLI VTOČNIH REŠETK (prirejeno po Brown in sod., 2013)

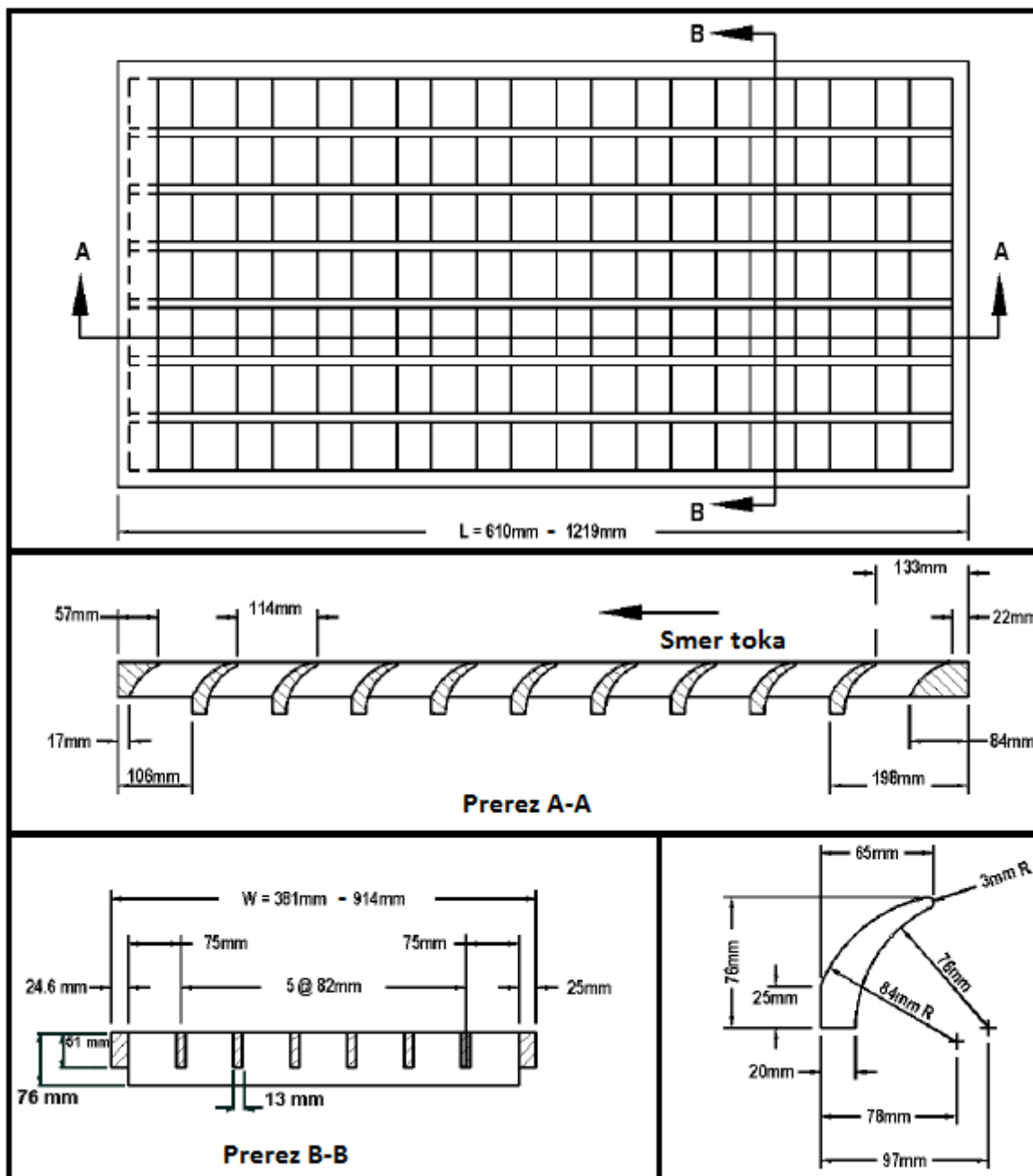
C.1 Detajl vtočne rešetke tipa P-50



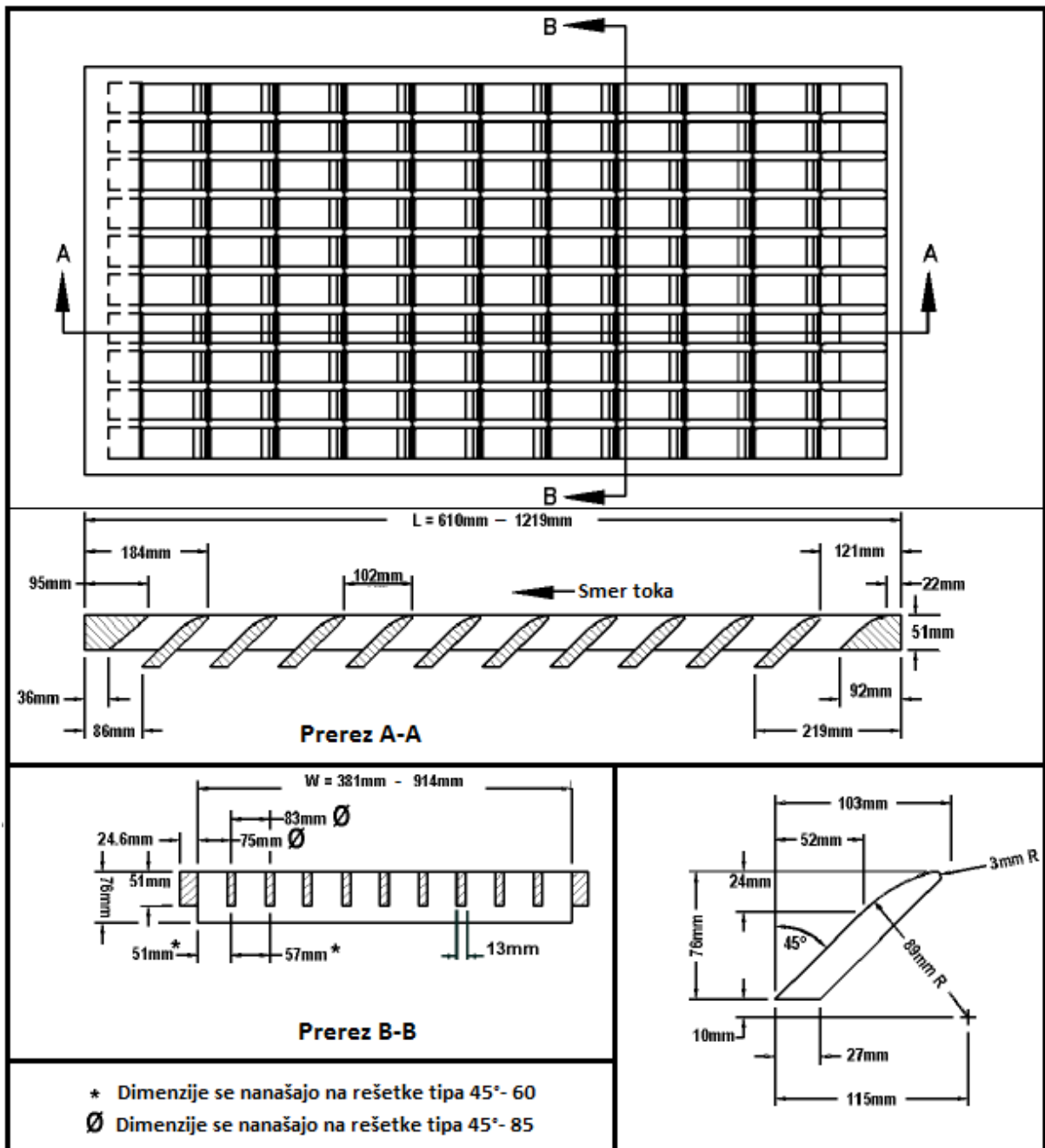
C.2 Detajl vtočne rešetke tipa P-30



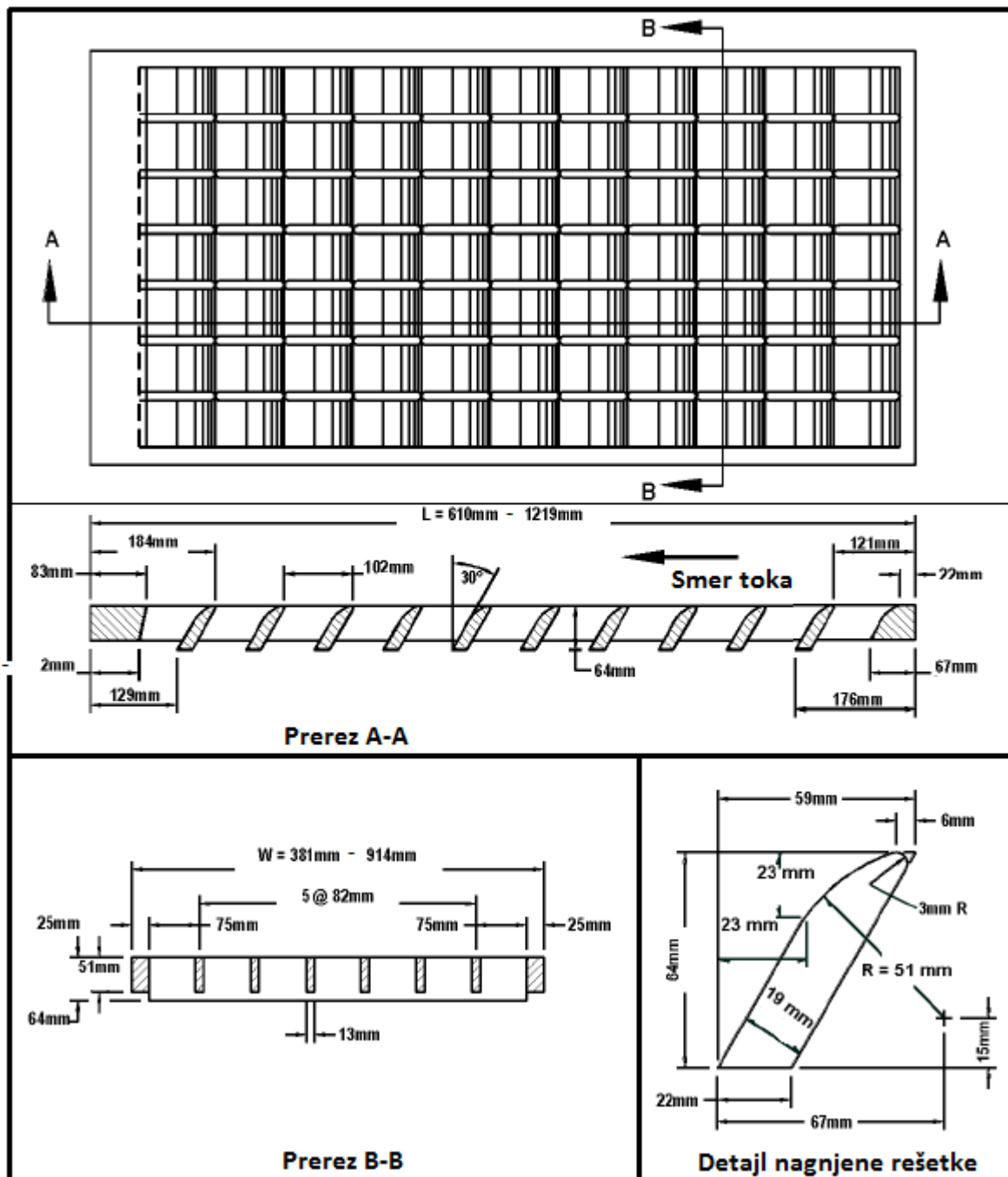
C.3 Detajl vtočne rešetke z vertikalno ukrivljenimi palicami



C.4 Detajl vtočne rešetke tipa 45° - 60



C.5 Detajl vtočne rešetke tipa 30° - 85



C.6 Detajl vtočne rešetke v obliki satovja

