

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:

Štajdohar, M., 2016. Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Brilly, M.): 115 str.

Datum arhiviranja: 27-07-2016

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:

Štajdohar, M., 2016. Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Brilly, M.): 115 pp.

Archiving Date: 27-07-2016

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



PODIPLOMSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidatka:

**MAJA ŠTAJDOHAR**

**VPLIV SONARAVNIH UKREPOV NA HIDROGRAM  
ODTOKA Z URBANIZIRANEGA PRISPEVNEGA  
OBMOČJA**

Magistrsko delo št.: 258

**EFFECTS OF SUSTAINABLE MEASURES ON RUNOFF  
HYDROGRAPH IN AN URBANIZED DRAINAGE AREA**

Graduation – Master Thesis No.: 258

**Mentorica:**

doc. dr. Mojca Šraj

**Somentor:**

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 12. 06. 2016

## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Spodaj podpisana študentka Maja Štajdohar, vpisna številka 26103690, avtorica pisnega zaključnega dela z naslovom: Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja

**IZJAVLJAM***1. Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobila soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani

Datum: 12. 7. 2016

Podpis študentke:

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.16 (043.2)
Avtor:	Maja Štajdohar, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
Mentor/mentorica:	doc. dr. Mojca Šraj
Somentor/somentorica:	prof. dr. Mitja Brilly
Naslov:	Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja.
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	115 str., 13 pregl., 26 sl., 36 en., 2 pril.
Ključne besede:	sonaravni ukrepi, površinski odtok, urbanizacija, ponikanje, zelene strehe

### Izvleček

Urbanizacija spremeni lastnosti prispevnega območja in vpliva na posamezne komponente hidrološkega kroga. Povečajo se volumni površinskega odtoka, padavinska voda odteče hitreje, posledično pa se povečajo tudi konice pretokov. Zaradi spremenjenega hidrološkega režima se poruši ustaljeni vzorec hidroloških sprememb in motenj, kar v končni fazi lahko vodi v degradacijo rečnih ekosistemov. Zato so razvili alternativni pristop k upravljanju s padavinskim odtokom, ki temelji na posnemanju osnovnih hidroloških mehanizmov s pomočjo sonaravnih ukrepov, ki površinski odtok zadržijo čim bližje mestu nastanka.

V nalogi smo s pomočjo hidrološkega modela preverili, za koliko lahko z različnimi sonaravnimi ukrepi in njihovimi kombinacijami, ki smo jih glede na veljavno zakonodajo, prostorske in tehnične omejitve predvideli na manjšem prispevnem območju v središču mesta Ljubljane, zmanjšamo volumne odtoka in konice pretokov v primeru padavinskih dogodkov z različnimi povratnimi dobami, oziroma v kolikšni meri lahko na ta način omilimo posledice urbanizacije na površinski odtok. Hidrološki model smo umerili s pomočjo podatkov o meritvah padavin in pretokov, ki smo jih izvedli v neposredni bližini obravnavanega območja oziroma na iztoku iz kanalizacijskega sistema.

Ugotovili smo, da lahko pri dogodkih s povratno dobo krajšo od enega leta s kombinacijo ponikalnih jaškov, cevnih ponikalnih jarkov in zelenih streh volumne odtoka in konice pretokov zmanjšamo do 45 %, medtem ko je pri dogodku s 100-letno povratno dobo zmanjšanje volumna odtoka le še 12 %, konice pretoka pa 10 %. Ugotovili smo, da so sonaravni ukrepi pri zmanjševanju volumnov odtoka in konic pretokov bolj učinkoviti v primeru manjših dogodkov s krajšo povratno dobo.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

UDC:	556.16 (043.2)
Author:	Maja Štajdohar, Water Manag. and Municipal Eng.
Supervisor:	Assist. prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Co-advisor:	Prof. Mitja Brilly, Ph.D.
Title:	Effects of sustainable measures on a runoff hydrograph in an urbanized drainage area.
Document type:	M. Sc. Thesis
Notes:	115 p., 13 tab., 26 fig., 36 eq., 2 ann.
Key words:	sustainable measures, runoff, urbanization, infiltration, green roof

**Abstract**

Urbanization changes characteristics of a drainage area and alters components of a natural hydrologic cycle. Runoff volumes increase, stormwater runs off more quickly and consequently peak flows become larger. Human alteration of the flow regime changes the natural pattern of hydrologic variation and disturbance, which may ultimately lead to river ecosystem degradation. For this reason an alternative stormwater management approach has been devised that mimics natural hydrologic functions by means of sustainable measures which manage rainfall where it falls.

This investigation uses a hydrological model to evaluate the effectiveness of different sustainable measures and their combinations in reducing runoff volumes and peak flows on a small drainage area which is representative for a wider city center of Ljubljana. We assumed these measures to be distributed across the drainage area having regard to the current legislation, spatial and technical constraints. The effects were studied for rainfall events of different return periods. Discharge measurements were made at the drainage area outflow and a rain gauge was situated in the vicinity of the study site.

In the case of events with a return period of 1 year or less, the runoff volumes and peak flows reduction was approximately 45 % in both cases, when simulating a combination of measures, involving infiltration shafts, pipe infiltration trench elements and green roofs. On the other hand, when simulating the same combination of sustainable measures for a 100 year event, the reduction of runoff volume and peak flow was only 12 % and 10 % respectively. We've arrived at a conclusion that sustainable measures are more effective in reducing runoff volumes and peak flows for smaller and more frequent rainfall events.

## ZAHVALA

Za vse strokovne napotke in ostalo pomoč ter veliko mero potrpežljivosti bi se iskreno zahvalila mentorici doc. dr. Mojci Šraj. Zahvala gre tudi somentorju prof. dr. Mitji Brillyu. Za začetno idejo za temo magistrske naloge sem hvaležna tudi pokojnemu prof. dr. Borisu Komparetu. Za vso pomoč in potrpežljivost pri izvajanju meritev bi se zahvalila viš. pred. mag. Andreju Vidmarju. Za izposojno merske opreme pa bi se zahvalila Katedri za splošno hidrotehniko.

Za vso podporo in pomoč pri izvajanju meritev ter pri posredovanju podatkov o kanalizacijskem sistemu se zahvaljujem podjetju JP VODOVOD-KANALIZACIJA d.o.o.. Za posredovanje podatkov pa bi se zahvalila tudi Geološkemu zavodu Slovenije.

Posebna zahvala gre hčerki Kaji, ki je veliko preveč večerov morala preživeti brez mamice. Za vso pomoč v času študija, takšno in drugačno, bi se zahvalila svojim staršema. Največjo zahvalo pa sem dolžna Borisu, ki mi je ves čas stal ob strani in me spodbujal. Še posebej bi se mu rada zahvalila za vso tehnično pomoč pri nastajanju magistrske naloge.

»Ta stran je namenoma prazna.«



## KAZALO VSEBINE

<b>Izjave</b>	<b>II</b>
<b>Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček</b>	<b>III</b>
<b>Bibliographic-documentalistic information and abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Zahvala</b>	<b>V</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Pregled literature	4
1.2 Delovna hipoteza in cilji naloge	8
<b>2 MERITVE IN METODE DE LA</b>	<b>9</b>
2.1 Izbor prispevnega območja	9
2.2 Opis obravnavanega območja	11
2.3 Meritve	16
2.3.1 Merska oprema	16
2.3.2 Lokacije in potek meritev	19
2.3.3 Konstrukcija pretočne krivulje	21
2.4 Izhodišča za izbor sonaravnih ukrepov in njihova umestitev v prostor	23
2.4.1 Zakonska izhodišča in omejitve za uporabo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom	23
2.4.2 Smernice za uporabo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom	24
2.4.3 Izbor in umestitev sonaravnih ukrepov v prostor	26
2.5 Izbrani sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom in dimenzioniranje	28
2.5.1 Ponikalni jaški in cevni ponikalni jarki	28
2.5.2 Zelene strehe	33
2.5.2.1 Izbira vrste in dimenzij zelenih streh na obravnavanem območju	35
2.6 Modeliranje odtoka	36
2.6.1 Metoda za izračun prestreženih padavin	38
2.6.2 Metoda za izračun padavinskih izgub	39
2.6.2.1 Koeficient <i>CN</i>	41
2.6.2.2 Določanje koeficientov <i>CN</i> za območja s sonaravnimi ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom	43
2.6.3 Metoda za izračun neposrednega odtoka	47
2.6.4 Metoda za izračun baznega odtoka	48

---

2.6.5	Meteorološki model	49
2.6.5.1	Sintetični nalivi	49
2.6.5.2	Evapotranspiracija	50
2.6.6	Umerjanje in preverjanje modela	50
2.7	Scenariji uporabe sonaravnih ukrepov in modeliranje	51
<b>3</b>	<b>REZULTATI</b>	<b>53</b>
3.1	Obdelava podatkov o padavinah in pretokih	53
3.2	Vhodni parametri za osnovni model	57
3.2.1	Parametri za izračun prestreženih padavin	57
3.2.2	Parametri za izračun padavinskih izgub s pomočjo metode SCS	58
3.2.3	Hidrogram enote	61
3.3	Umerjanje in preverjanje modela	63
3.3.1	Umerjanje	63
3.3.2	Preverjanje	67
3.4	Razporeditev, dimenzioniranje in modeliranje sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom	71
3.5	Rezultati modeliranja površinskega odtoka pri posameznih scenarijih uporabe sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom	76
<b>4</b>	<b>ANALIZA IN RAZPRAVA</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>94</b>
<b>6</b>	<b>POVZETEK</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>SUMMARY</b>	<b>99</b>
	<b>VIRI</b>	<b>102</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Deleži posameznih tipov površin na prispevnem območju.	12
Preglednica 2: Koeficienti $CN$ za urbanizirane površine (povzeto po USDA, 1986).	42
Preglednica 3: Povratne dobe za ekstremne padavine, postaja Ljubljana-Bežigrad (ARSO, 2009).	49
Preglednica 4: Referenčna evapotranspiracija $ET_0$ (ARSO, 2016) in povprečni faktor $k_c$ za jabolane (Pintar, 2006) za mesec februar, marec in maj.	58
Preglednica 5: Vrednosti koeficientov $CN$ za območja s ponikalnimi jaški (A-F) .	61
Preglednica 6: Kompozitna vrednost koeficienta $CN$ za prepustni del območja oziroma za del območja, kjer površinski odtok ni neposredno odveden v kanalizacijski sistem.	61
Preglednica 7: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.	63
Preglednica 8: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter $RMSE$ v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.	66
Preglednica 9: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.	67
Preglednica 10: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter $RMSE$ v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.	70
Preglednica 11: Deleži neprepustnih površin, ki jih pri posameznem scenariju odklopimo s kanalizacijskega sistema.	72
Preglednica 12: Volumni odtoka in konice pretokov pri posameznih scenarijih in dogodkih.	84
Preglednica 13: Odstopanja volumnov odtoka in konic pretokov pri posameznih scenarijih od volumnov odtoka in konic pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.	88

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Diagram $Q-h$ za obdobje od 22. 11. 2012 12:50 do 29. 3. 2013 23:40.	53
Grafikon 2:	Diagram $Q-h$ pri $h < 220$ mm in $h > 220$ mm in pripadajoči trendni črti.	54
Grafikon 3:	Diagram $1/cS_0-h$ pri $h < 220$ mm in $h > 220$ mm ter pripadajoči trendni črti.	55
Grafikon 4:	Histereza pri dogodku z dne 26. 12. 2012 od 14:15 do 22:30.	56
Grafikon 5:	Histereza pri dogodku z dne 18. 3. 2013 od 19:05 do 20:55.	56
Grafikon 6:	Diagram $CN-P$ za posamezna območja z obstoječimi ponikalnimi jaški (A-F).	60
Grafikon 7:	10-minutni hidrogram enote.	62
Grafikon 8:	S-krivulja.	62
Grafikon 9:	5-minutni hidrogram enote.	63
Grafikon 10:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 2. februarja 2013.	64
Grafikon 11:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 13. marca 2013.	65
Grafikon 12:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek od 6. maja do 7. maja 2013.	65
Grafikon 13:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 29. maja 2013.	66
Grafikon 14:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 10. marca 2013.	68
Grafikon 15:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 6. maja 2013.	68
Grafikon 16:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 21. maja 2013.	69
Grafikon 17:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 6. februarja 2013.	69
Grafikon 18:	Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 19. maja 2013.	70
Grafikon 19:	Diagrama $CN-P$ za površine s predvidenimi ponikalnimi jaški in cevnimi ponikalnimi jarki.	72
Grafikon 20:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 29. maja 2013.	76
Grafikon 21:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 19. maja 2013.	77
Grafikon 22:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 21. maja 2013.	77
Grafikon 23:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 6. februarja 2013.	78
Grafikon 24:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 6. maja 2013 zjutraj.	78

---

Grafikon 25:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku od 6. maja do 7. maja 2013.	79
Grafikon 26:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 10. marca 2013.	79
Grafikon 27:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 13. marca 2013.	80
Grafikon 28:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 2. februarja 2013.	80
Grafikon 29:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z 2-letno povratno dobo.	81
Grafikon 30:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 5-letno povratno dobo.	81
Grafikon 31:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z 10-letno povratno dobo.	82
Grafikon 32:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 25-letno povratno dobo.	82
Grafikon 33:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 50-letno povratno dobo.	83
Grafikon 34:	Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 100-letno povratno dobo.	83
Grafikon 35:	Volumni odtoka pri posameznih scenarijih in padavinskih dogodkih.	85
Grafikon 36:	Volumni odtoka pri posameznih scenarijih za šest sintetičnih neviht.	85
Grafikon 37:	Konice pretokov pri posameznih scenarijih in padavinskih dogodkih.	86
Grafikon 38:	Konice pretokov pri posameznih scenarijih za šest sintetičnih neviht.	86
Grafikon 39:	Odstopanja volumnov odtoka pri različnih scenarijih glede na volumne odtoka pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.	89
Grafikon 40:	Odstopanja konic pretokov pri različnih scenarijih glede na konice pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.	89

## KAZALO SLIK

Slika 1:	Razbremenilniki vzdolž reke Ljubljanice znotraj širšega mestnega središča Ljubljane (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	9
Slika 2:	Prispevna območja razbremenilnikov na stranskih vodih vzdolž reke Ljubljanice (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	10
Slika 3:	Izbrano prispevno območje za modeliranje površinskega odtoka in nadaljnje analize (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	11
Slika 4:	Pokrovnosti tal na prispevnem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	13
Slika 5:	Podzemne garaže na obravnavanem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	13
Slika 6:	Prispevne površine obstoječih ponikalnih jaškov (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	14
Slika 7:	Hidrogeološka sestava tal na obravnavanem prispevnem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	15
Slika 8:	Avtomatski dežemer Onset RG3-M (Onset Computer Corporation, 2016).	16
Slika 9:	Notranjost dežemera Onset RG3-M (prirejeno po Onset Computer Corporation, 2005-2012).	17
Slika 10:	Sistemske komponente merilnika Starflow (prirejeno po Unidata Pty Ltd, 2011).	17
Slika 11:	Primer histograma hitrosti za laminarni tok (Unidata Pty Ltd, 2011).	18
Slika 12:	Lokaciji izvajanja meritev padavin in pretokov (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	19
Slika 13:	Merilno mesto za meritve pretoka.	20
Slika 14:	Lokacija dežemera Onset RG3-M.	20
Slika 15:	Prečni prerez merskega profila. Dimenzije so v centimetrih.	21
Slika 16:	Ponikalna jaška tipa A in tipa B (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).	28
Slika 17:	Cevni ponikalni jarek (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).	29
Slika 18:	Efektivna širina ponikanja v primeru ponikalnega jarka (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).	32
Slika 19:	Tipične komponente zelene strehe (prirejeno po CIRIA, 2015).	34
Slika 20:	Primeri obnašanja zveze $CN(P)$ (prirejeno po Hawkins, 1993).	46

---

Slika 21:	Obstoječi ponikalni jaški in pripadajoče prispevne površine (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	59
Slika 22:	Scenarij 2: $DNP = 62,0 \%$ , $CN_{komp.} = 90$ (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	73
Slika 23:	Scenarij 3: $DNP = 63,7 \%$ , $CN_{komp.} = 91$ (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	74
Slika 24:	Scenarij 4: $DNP = 62,3 \%$ , $CN_{komp.} = 91$ (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	74
Slika 25:	Scenarij 5: $DNP = 50,6 \%$ , $CN_{komp.} = 91$ (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	75
Slika 26:	Scenarij 6: $DNP = 41,5 \%$ , $CN_{komp.} = 91$ (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).	75



## LIST OF TABLES

Table 1:	Percent area of each land cover type on a drainage area.	12
Table 2:	Runoff curve numbers for urban areas (adapted from USDA, 1986).	42
Table 3:	Return periods for extreme rainfall, Ljubljana-Bežigrad station (ARSO, 2009).	49
Table 4:	Reference evapotranspiration $ET_0$ (ARSO, 2016) and average crop coefficient for apple tree according to Pintar (2006) for February, March and May.	58
Table 5:	$CN$ values determined for areas with infiltration shafts installed (A-F).	61
Table 6:	Composite $CN$ for the pervious part of the catchment area.	61
Table 7:	Characteristics of the rainfall events used for model calibration.	63
Table 8:	Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and $RMSE$ for events used for model calibration.	66
Table 9:	Characteristics of the rainfall events used for model verification.	67
Table 10:	Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and $RMSE$ for events used for model verification.	70
Table 11:	Percent impervious area disconnected from sewer system for each scenario.	72
Table 12:	Runoff volumes and peak flows for each scenario and rainfall event.	84
Table 13:	Percent difference from the existing conditions on the drainage area for runoff volumes and peak flows for each scenario.	88

---

»Ta stran je namenoma prazna.«

## LIST OF GRAPHS

Graph 1:	$Q$ - $h$ diagram for the period from 22. 11. 2012 12:50 until 29. 3. 2013 23:40.	53
Graph 2:	$Q$ - $h$ diagram for $h < 220$ mm and $h > 220$ mm and corresponding trend lines.	54
Graph 3:	$1/cS_0$ - $h$ diagram for $h < 220$ mm and $h > 220$ mm and corresponding trend lines.	55
Graph 4:	Hysteretic stage-discharge relation for the event on 26. 12. 2012 from 14:15 until 22:30.	56
Graph 5:	Hysteretic stage-discharge relation for the event on 18. 3. 2013 from 19:05 until 20:55.	56
Graph 6:	Diagram $CN$ - $P$ for areas with infiltration shafts installed (A-F).	60
Graph 7:	10-minute unit hydrograph.	62
Graph 8:	S-curve.	62
Graph 9:	5-minute unit hydrograph.	63
Graph 10:	Observed and calculated hydrograph for the event on 2nd of February 2013.	64
Graph 11:	Observed and calculated hydrograph for the event on 13th of March 2013.	65
Graph 12:	Observed and calculated hydrograph for the event from 6th until 7th of May 2013.	65
Graph 13:	Observed and calculated hydrograph for the event on 29th of May 2013.	66
Graph 14:	Observed and calculated hydrograph for the event on 10th of March 2013.	68
Graph 15:	Observed and calculated hydrograph for the event on 6th of May 2013.	68
Graph 16:	Observed and calculated hydrograph for the event on 21st of May 2013.	69
Graph 17:	Observed and calculated hydrographs for the event on 6th of February 2013.	69
Graph 18:	Observed and calculated hydrograph for the event on 19th of May 2013.	70
Graph 19:	Diagrams $CN$ - $P$ for areas with proposed infiltration shafts and proposed pipe infiltration trenches.	72
Graph 20:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 29th of May 2013.	76
Graph 21:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 19th of May 2013.	77
Graph 22:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 21st of May 2013.	77
Graph 23:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 6th of February 2013.	78
Graph 24:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 6th of May 2013.	78
Graph 25:	Runoff hydrographs for each scenario for the event from 6th until 7th of May 2013.	79
Graph 26:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 10th of March 2013.	79

---

Graph 27:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 13th of March 2013.	80
Graph 28:	Runoff hydrographs for each scenario for the event on 2nd of February 2013.	80
Graph 29:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 2-year return period.	81
Graph 30:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 5-year return period.	81
Graph 31:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 10-year return period.	82
Graph 32:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 25-year return period.	82
Graph 33:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 50-year return period.	83
Graph 34:	Runoff hydrographs for each scenario for the event with 100-year return period.	83
Graph 35:	Runoff volumes for each scenario for several rainfall events.	85
Graph 36:	Runoff volumes for each scenario for six synthetic storms.	85
Graph 37:	Peak flows for each scenario for several rainfall events.	86
Graph 38:	Peak flows for each scenario for six synthetic storms.	86
Graph 39:	Percent difference from the existing conditions for runoff volumes for each scenario.	89
Graph 40:	Percent difference from the existing conditions for peak flows for each scenario.	89

## LIST OF FIGURES

Figure 1:	Combined sewer overflows along Ljubljanica River in the wider city centre of Ljubljana (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	9
Figure 2:	Drainage areas of combined sewer overflows connected in parallel, situated along Ljubljanica River (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	10
Figure 3:	The drainage area chosen for runoff modelling and further analyses (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	11
Figure 4:	Land cover types on the catchment area (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	13
Figure 5:	Underground parking garages locations (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	13
Figure 6:	Drainage areas connected to existing infiltration shafts (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	14
Figure 7:	Hydrogeological structure of the catchment area under consideration (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	15
Figure 8:	RG3-M Data logging rain gauge (Onset Computer Corporation, 2016).	16
Figure 9:	Rain gauge internal view (adapted from Onset Computer Corporation, 2005-2012).	17
Figure 10:	Starflow system components (adapted from Unidata Pty Ltd, 2011).	17
Figure 11:	An example of velocity histogram in laminar regime (Unidata Pty Ltd, 2011).	18
Figure 12:	Flowmeter and rain gauge locations (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	19
Figure 13:	Discharge measurement site.	20
Figure 14:	Raingage Onset RG3-M location.	20
Figure 15:	Cross-section at the gauge site. Dimension units are centimeters.	21
Figure 16:	Infiltration shaft type A and type B (adapted from DWA-A-138E, 2005).	28
Figure 17:	Pipe-infiltration trench element (adapted from DWA-A-138E, 2005).	29
Figure 18:	Effective percolation width of the infiltration trench (adapted from DWA-A-138E, 2005).	32
Figure 19:	Typical extensive green roof components (adapted from CIRIA, 2015).	34
Figure 20:	Violent, standard and complacement behaviour of $CN(P)$ relationship (adapted from Hawkins, 1993).	46

---

Figure 21:	Existing infiltration shafts and contributing drainage areas (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	59
Figure 22:	Scenario 2: $PIA = 62,0 \%$ , $CN_{comp.} = 90$ (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	73
Figure 23:	Scenario 3: $PIA = 63,7 \%$ , $CN_{comp.} = 91$ (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	74
Figure 24:	Scenario 4: $PIA = 62,3 \%$ , $CN_{comp.} = 91$ (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	74
Figure 25:	Scenario 5: $PIA = 50,6 \%$ , $CN_{comp.} = 91$ (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	75
Figure 26:	Scenario 6: $PIA = 41,5 \%$ , $CN_{comp.} = 91$ (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).	75

## 1 UVOD

Človek že od nekdaj posega v naravo in jo spreminja, pri tem pa nemalokrat poruši njeno ravnovesje. Tak proces je tudi urbanizacija, ki spreminja lastnosti prispevnih območij potokov in rek ter vpliva na naravni hidrološki krog. Z urbanizacijo se bistveno zmanjša delež vegetacije in število nedreniranih depresij na prispevnem območju, objekti in prometna infrastruktura, ki so zgrajeni v tem procesu, pa povečajo delež neprepustnih površin. Zaradi manjšega deleža vegetacije se zmanjšata količina prestreženih padavin in evapotranspiracija, zaradi večjega deleža nepropustnih površin in zbivanja tal v času gradnje pa se zmanjša infiltracija padavinske vode v tla in bogatenje podtalnice. Ker je skladiščna kapaciteta prispevnega območja zaradi vseh omenjenih sprememb manjša, večina padavin z urbaniziranih površin odteče v obliki površinskega odtoka (Chow, 1964; Clark, 1999). Odvisno od deleža neprepustnih površin se lahko volumen površinskega odtoka po urbanizaciji porečja poveča za 2- do 16-krat (FISRWG, 1998). Pri tem je pomembno poudariti, da imajo neprepustne površine, ki so neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom za odvodnjavanje padavinske vode, bistveno večji vpliv na velikost površinskega odtoka kot neprepustne površine, pri katerih se površinski odtok pred vtokom v kanalizacijo prej razlije po zelenicah ali drugih neutrjenih površinah (Alley in Veenhuis, 1983; Booth, 1990, cit. po Holman-Dodds et al., 2003; Schueler, 1996). Skoraj vse padavine, ki padejo na neposredno povezane površine, odtečejo v obliki površinskega odtoka do iztočnega profila. Ugotovili so, da prekinjena neprepustna površina določene velikosti povzroči le 1/4 do 1/2 volumna površinskega odtoka, ki bi ga sicer povzročila enako velika neposredno povezana neprepustna površina (Schueler, 1996).

Površinski odtok z urbaniziranih površin odteče bistveno hitreje kot pred urbanizacijo prispevnega območja, saj so neprepustne površine precej bolj gladke od naravnih površin, poleg tega pa so na urbaniziranih območjih urejeni tudi jarki in kanali, ki bistveno zgoščijo mrežo odvodnikov na prispevnem območju in v katerih padavinska voda dosega večje hitrosti kot v naravnih odvodnikih (Hollis, 1975). Čas koncentracije oziroma čas, ki je potreben, da do iztočnega profila priteče padavinska voda iz najbolj oddaljene točke prispevnega območja (Brilly in Šraj, 2005), je tako krajši. Ker se povečajo volumni odtoka in skrajša čas koncentracije, so konice pretokov večje, krajši pa je tudi čas do nastopa konice pretoka (time to peak) oziroma čas zakasnitve (lag time) (Brilly, 2002; Huang et al., 2012). Čas do nastopa konice pretoka je čas od začetka naraščanja hidrograma odtoka do nastopa konice pretoka (Fang, 2005). Čas zakasnitve pa je čas med težiščem histograma efektivnih padavin in težiščem ali konico hidrograma odtoka (Fang, 2005). Konice pretokov s krajšimi povratnimi dobami se glede na stopnjo urbanizacije lahko povečajo za faktor 10 ali več, poplave s

100-letno povratno dobo pa se po urbanizaciji povodja z deležem neprepustnih površin večjim od 30 % lahko tudi podvojijo (Hollis, 1975). Zaradi hitrejšega stekanja vode s porečja in posledično krajšega časa koncentracije je stopnja naraščanja pretokov večja kot stopnja naraščanja volumnov odtoka (Viessman, 1977). Posledica hitrega porasta in upada neposrednega odtoka ter povečanega volumna površinskega odtoka in sorazmerno zmanjšanega baznega odtoka na urbaniziranih prispevnih površinah je tudi krajše trajanje visokih in daljše trajanje nizkih pretokov (Booth et al., 2001). Številne raziskave so tudi pokazale, da ima urbanizacija večji vpliv na poplave s krajšo povratno dobo (Hollis, 1975).

Človekovi posegi v naravno okolje, ki spreminjajo hidrološki režim reke, vplivajo na ustaljeni vzorec hidroloških sprememb in motenj. Porušijo namreč dinamično ravnovesje, ki vlada med pretokom reke in pretokom plavin (Dunne in Leopold, 1978, cit. po Poff et al., 1997). Pri tem se spremeni geomorfologija reke in poplavnih ravnin, s tem pa tudi življenjski prostor vodnih in obrežnih organizmov (Poff et al., 1997). Na ta način se spremeni dinamika življenjskega prostora, na katero prvotni organizmi rečnega ekosistema niso prilagojeni. Vzpostavitev novega dinamičnega ravnovesja, ki ustreza novemu hidrološkemu režimu, lahko traja več stoletij, v posameznih primerih pa se ta ne vzpostavi nikoli več (Petts, 1985, cit. po Poff et al., 1997). Ker so urbanizirane površine tudi vir številnih onesnažil, kot so na primer motorna olja in razni pesticidi, ki jih padavinska voda na svoji poti spira s tal, se na ta račun poslabša tudi kvaliteta površinskih odvodnikov, kar vodi v dodatno degradacijo vodnih ekosistemov (National Research Council, 2009).

V preteklosti so se na področju upravljanja s padavinsko vodo osredotočali predvsem na odpravljanje posledic povečanih konic pretokov. To je vključevalo gradnjo zadrževalnih bazenov, ki padavinsko vodo začasno zadržijo na prispevnem območju, nato pa jo postopoma spuščajo v končni odvodnik oziroma vodotok. Kmalu se je izkazalo, da taka rešitev ni učinkovita, saj se volumen površinskega odtoka na ta način ne zmanjša. Poleg tega lahko prihaja do sinergijskega učinka večjih zadrževalnikov na širšem prispevnem območju, kar privede do težav s poplavljanjem dolvodno (Coffman, 2000; Lakatos in Kropp, 1982, cit. po Holman-Dodds et al., 2003; McCuen, 1979, Ferguson, 1991, Traver in Chadderton, 1992, EPA, 2005d, cit. po National Research Council, 2009). Problem predstavlja tudi dejstvo, da so zadrževalni bazeni običajno dimenzionirani tako, da ne zadržijo odtokov, ki so posledica manjših in bolj pogostih neviht. Nizke odtoke odvajajo brez zakasnitve, da znotraj objektov ne bi prihajalo do zastajanja vode (National Research Council, 2009). S konvencionalnimi ukrepi torej ne moremo vzpostaviti prvotnega hidrološkega režima prispevnega območja, pa tudi nekatere druge težave, kot so na primer povišane temperature površinskega odtoka, ostajajo nerešene (Coffman, 2000).



Dandanes v večjih mestih, kjer je urejeno odvajanje padavinske vode z mešanim kanalizacijskim sistemom, veliko težavo predstavlja tudi prepogosto prelivanje mešanih odpadnih vod preko razbremenilnih objektov. Mešani kanalizacijski sistemi, ki odvajajo tako komunalno kot padavinsko odpadno vodo, so namreč dimenzionirani tako, da del razredčene odpadne vode preko razbremenilnih objektov odvajajo v površinski odvodnik. Pri tem je prelivni rob razbremenilnikov nameščen na taki višini, da je zaščita pred onesnaženjem odvodnika še zadostna (Kompore, 1991; Panjan, 2002). Ker pa so bili ti sistemi v večini primerov dimenzionirani in zgrajeni še v času, ko je bilo prispevno območje, s katerega so odvajali odpadno vodo bistveno manjše, so s priključevanjem vedno novih površin postali preobremenjeni. Razbremenjevanje mešane odpadne vode se tako pojavlja že pri bistveno manjših nalivih kot prej, zato zaščita vodotokov oziroma površinskih odvodnikov pred prekomernim onesnaženjem ni več zadostna, čistilne naprave pa so obremenjene bolj neenakomerno (Kompore, 1991; Panjan, 2002).

Zaradi omejitev konvencionalnega pristopa k upravljanju s padavinsko vodo in spoznanja, da ni mogoče sanirati morfologije strug in rečnega ekosistema brez odprave posledic, ki jih ima urbanizacija na hidrološki režim prispevnega območja, so začeli razvijati pristop k urejanju urbane odvodnje, ki temelji na posnemanju naravne hidrološke funkcije območja. Bistvo tega pristopa je posnemanje osnovnih hidroloških mehanizmov, kot so prestrezanje padavin, zadrževanje v depresijah, infiltracija in evapotranspiracija, s pomočjo ukrepov, ki so enakomerno razporejeni po prispevnem območju in ki površinski odtok zadržijo čim bližje mestu nastanka (Coffman, 2000; Dietz in Clausen, 2007; Holman-Dodds et al., 2003; Van Roon, 2007; Coffman et al., 2000, cit. po Williams in Wise, 2006). K tovrstnim rešitvam štejemo bioretenzijske površine in bioretenzijske jarke, zelene strehe, zasaditev dreves, bioinfiltracijske jarke, ponikalne jarke, ponikalne jaške, prepustne asfalte, cisterne za zbiranje deževnice idr. (Coffman, 2000; EPA, 2014; Low Impact Development (LID) Center, 2014; National Research Council, 2009; Van Roon, 2007). Cilj teh ukrepov je v čim večji meri ohranjati prvotne volumne odtokov in prvotno pogostost pojavljanja pretokov določene velikosti ter naravno stopnjo infiltracije (Coffman, 2000; Clausen J. C., 2007, cit. po National Research Council, 2009). V ZDA ta pristop imenujejo »Low Impact Development (LID)«, v Veliki Britaniji »Sustainable Urban Drainage System (SUDS)« in v Avstraliji »Water Sensitive Urban Design (WSUD)«. Pri nas se poseben izraz za to področje še ni uveljavil. V nadaljevanju bomo omenjeni pristop imenovali »sonaravno upravljanje s površinskim odtokom«, ukrepe, ki spadajo v ta koncept pa »sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom«.

Omenjeni ukrepi načeloma zavzamejo malo prostora, zato jih lahko integriramo tudi v obstoječo infrastrukturo znotraj obstoječih urbaniziranih območij (EPA, 2014). V kolikšni meri bodo sonaravni ukrepi za upravljanje s padavinsko vodo pripomogli k ponovni vzpostavitvi naravnega hidrološkega režima na prispevnem območju, v naprej ne moremo vedeti. Najbolj vprašljiv je učinek teh ukrepov na območjih z visoko stopnjo urbanizacije, kjer je zaradi pomanjkanja prostora, njihova uporaba lahko precej omejena (Coffman, 2000). Poleg tega je možnost uporabe sonaravnih ukrepov odvisna tudi od prepustnosti tal na obravnavanem območju in gladine podtalnice. Pogostokrat so ovira za sonaravne ukrepe lokalni predpisi, standardi in coniranje prostora, ki omejujejo uporabo inovativnih tehnik. Včasih oviro predstavlja tudi odziv širše javnosti na te ukrepe (strah pred preplavitvijo kleti, nestrinjanje z ožjimi voznimi pasovi in parkirnimi mesti ipd.) (EPA, 2000).

### 1.1 Pregled literature

V številnih raziskavah so potrdili, da so sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom pri zmanjševanju negativnih posledic urbanizacije na hidrologijo prispevnega območja bolj učinkoviti pri manjših in bolj pogostih nevihtah.

V raziskavi avtorjev Holman-Dodds et al. (2003) so med seboj primerjali hidrološke odzive izbranega prispevnega območja v primeru treh osnovnih scenarijev poselitve. V prvem scenariju so predpostavili, da obravnavano območje ni poseljeno, v drugem scenariju so predpostavili, da je območje poseljeno in da je odvajanje padavinskih vod urejeno s sonaravnim pristopom, ki temelji na preusmerjanju površinskega odtoka z neprepustnih površin na prepustne, pri tretjem scenariju pa so predpostavili, da je območje poseljeno in da je odvajanje padavinskih vod urejeno na tradicionalen način. S pomočjo hidrološkega modela so za posamezne scenarije izračunali površinski odtok pri dogodkih velikosti od 13 mm do velikosti, ki je značilna za 100-letno povratno dobo in trajanje 24 ur ter znaša 181 mm. Ugotovili so, da lahko s ponikanjem površinskega odtoka zmanjšamo vpliv urbanizacije na hidrologijo prispevnega območja in da je učinek ponikanja v tem primeru odvisen od velikosti padavinskega dogodka in od prepustnosti tal na obravnavanem območju. Ugotovili so, da so pri dogodkih s povratno dobo krajšo od dveh let in pri zmerni prepustnosti tal na obravnavanem območju volumni odtoka v primeru poselitve s sonaravnim upravljanjem s padavinskimi vodami podobni volumnom odtoka, ki so značilni za naravne razmere na prispevnem območju. V primeru dogodkov s povratno dobo daljšo od 10 let pa so volumni površinskega odtoka bolj podobni volumnom, ki so značilni za poselitev s tradicionalnim pristopom k odvajanju padavinskih vod, čeprav še vedno razmeroma manjši. V zvezi s konicami pretokov so avtorji ugotovili, da je pri sonaravnem

upravljanjem z uporabo sonaravnih ukrepov, v primeru nevihte z 2-letno povratno dobo, konice pretokov možno zmanjšati za 60 % glede na konice pretokov pri tradicionalnem tipu odvodnje, v primeru dogodka s 100-letno povratno dobo pa v tem pogledu ni mogoče doseči pomembnih učinkov.

Avtorji Brander et al. (2004), so preučevali vplive različnih kombinacij ukrepov za ponikanje padavinske vode v primeru 4 različnih tipov poselitve na obravnavanem območju, ki se med seboj razlikujejo po deležu in razporeditvi neprepustnih površin na območju. Pri vsakem predpostavljenem scenariju so simulirali površinski odtok za dogodek z 1- in 100-letno povratno dobo in trajanjem 24 ur ter za daljše nepretrgano časovno obdobje. Ugotovili so, da je ne glede na tip pozidave, v primeru razmeroma prepustnih tal, s pomočjo različnih ukrepov za ponikanje padavinske vode, površinski odtok možno zmanjšati vsaj za 85 %, če opazujemo daljše obdobje kontinuiranega niza padavin, v primeru dogodka s 100-letno povratno dobo, pa vsaj za 32 %.

Podobno raziskavo sta naredila avtorja Williams in Wise (2006), ki sta primerjala površinski odtok v primeru 4 različnih scenarijev na prispevnem območju, v katerih sta kombinirala tradicionalni tip poselitve in modernejši tip, s poudarkom na odprtem prostoru s tradicionalnim pristopom k upravljanju s površinskim odtokom in pristopom, ki temelji na ukrepih za ponikanje padavinske vode. Za vsako posamezno kombinacijo sta izračunala konice pretokov in volumne odtokov, ki nastanejo v primeru dogodkov z 2- in 25-letno povratno dobo ter trajanjem 24 ur, simulirala pa sta tudi daljše obdobje kontinuiranega niza padavin. Avtorja sta ugotovila, da je v primeru tradicionalnega tipa poselitve s tradicionalnim tipom odvajanja padavinskih vod in brez konvencionalnih ukrepov za zadrževanje padavinske vode volumen površinskega odtoka pri dogodku z 2-letno povratno dobo za 13,1 % večji, konica pretoka pa za 33,7 % večja, kot v primeru tradicionalnega tipa poselitve z upoštevanjem pristopa k urbani odvodnji, ki temelji na ponikanju padavinske vode. Pri dogodku s 25-letno povratno dobo sta ti dve razliki nekoliko manjši. Pri konicah pretokov razlika znaša 30,9 %, pri volumnih odtoka pa 6,3 %.

V raziskavi avtorjev Damodaram et al. (2010) so preučevali vpliv prepustnih asfaltov, zelenih streh, cistern za zbiranje deževnice in različnih kombinacij teh ukrepov, pa tudi vpliv zadrževalnika visokih vod na površinski odtok v primeru dogodkov z 2-, 10- in 100-letno povratno dobo (24 urno trajanje) in v primeru dveh manjših dogodkov s povratno dobo krajšo od enega leta. Predpostavili so, da prepustni asfalti zavzamejo 14 % celotnega območja, zelene strehe in cisterne za zbiranje deževnice pa so predvideli za vse strehe, ki zavzemajo 7 % celotnega območja. Avtorji so ugotovili, da so v primeru kombinacije prepustnih asfaltov in zelenih streh konice pretokov pri dogodkih s povratno dobo krajšo

od enega leta približno 40 % do 60 % manjše od konic pretokov pri obstoječem stanju. V primeru dogodka z 2-letno povratno dobo ta razlika znaša nekaj manj kot 25 %, v primeru dogodka z 10-letno povratno dobo približno 10 %, v primeru dogodka s 100-letno povratno dobo pa manj kot 3 %.

Avtorja Rose in Hodges (2010) sta omenjeno raziskavo nadgradila in preverila vpliv prej omenjenih ukrepov na konice pretokov in volumne odtokov za 77 padavinskih dogodkov, od katerih sta podrobneje analizirala 10 reprezentativnih dogodkov velikosti od 58 mm do 389 mm. Ugotovila sta, da se pri dogodkih, pri katerih pade manj kot 56 mm padavin, sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom pri zmanjševanju konic pretokov obnesejo bolje kot konvencionalni zadrževalnik visokih vod, pri večjih dogodkih pa je zadrževalnik v tem pogledu bolj učinkovit. Poleg tega ugotavljata, da pri največjih dveh dogodkih, kjer količina padavin znaša 180 mm oziroma 389 mm, sonaravni ukrepi na konice pretokov skoraj nimajo vpliva.

Avtorja Gilroy in McCuen (2009) sta preučevala vpliv cistern za zbiranje deževnice in bioretenzijskih površin na površinski odtok, ki sta jih predvidela v različnem številu in na različnih lokacijah znotraj obravnavanega prispevnega območja. Pri tem sta oblikovala tri scenarije, ki so se med seboj razlikovali glede na tip poselitve na obravnavanem območju in za katere je bil značilen določen delež neprepustnih površin. V prvem scenariju sta predvidela pozidavo, ki je tipična za naselje enodružinskih hiš, v drugem scenariju pozidavo v primeru tipične mestne četrti in v tretjem scenariju pozidavo, ki je tipična za območja s trgovinsko dejavnostjo. Ugotovila sta, da je z ustrezno kombinacijo sonaravnih ukrepov v primeru pozidave, ki je značilna za trgovinsko dejavnost in za katero je značilen 72 % delež neprepustnih površin, v primeru dogodka z 1-letno povratno dobo konico pretoka možno zmanjšati za 47 %, volumen odtoka pa za 73 % in da je v primeru dogodka z 2-letno povratno dobo konico pretoka pri tem scenariju možno zmanjšati za 15 %, volumen odtoka pa za 33 %.

Avtorji Jeon et al. (2010) so preučevali vpliv zelenih streh in prepustnih asfaltov na površinski odtok z obravnavanega območja s stanovanjskimi objekti, kjer delež neprepustnih površin znaša približno 72 %. Zelene strehe so predvideli na 14,5 % celotnega območja, prepustne asfalte pa na 37,5 % celotnega območja. Med drugim so preverjali vpliv omenjenih ukrepov na volumne odtoka in konice pretokov pri padavinah z 2- in 10-letno povratno dobo in trajanjem 24 ur. Ugotovili so, da je zaradi uporabe prepustnih asfaltov volumen odtoka v primeru nevihte z 2-letno povratno dobo manjši za 3,3 % glede na obstoječe stanje, zaradi zelenih streh za 2,3 %, zaradi kombinacije obojega pa za 6,1 %. Konice pretokov, ki so jih izračunali za različne scenarije uporabe sonaravnih ukrepov, se med posameznima

dogodkoma niso bistveno razlikovale. V povprečju so bile konice pretokov zaradi predvidenih prepustnih asfaltov manjše za 19 %, zaradi predvidenih zelenih streh za 8 %, zaradi kombinacije obojega pa za 27 %.

V raziskavi avtorjev Juan et al. (2013) so med drugim preučevali vpliv zelenih streh na hidrogram odtoka v primeru dogodkov s povratnimi dobami do 10 let. Ugotovili so, da zelene strehe zmanjšajo volumne odtoka in konice pretokov v povprečju za 20 %.

Avtorja Ellis in Viavattene (2013) sta preučevala vpliv infiltracijskih bazenov in zelenih streh na območjih stanovanjske oziroma industrijske soseke, ki se nahajata znotraj poplavnih območij. Ugotovila sta, da lahko v primeru stanovanjske soseke infiltracijski bazeni prelivanje mešanih odpadnih vod v površinske odvodnike pri dogodkih s povratno dobo manjšo od 30 let zmanjšajo tudi za 95 %, uporaba zelenih streh in prepustnih asfaltov na industrijskem območju pa za 57 %.

Poleg naštetih ugotovitev v zvezi z učinkom različnih sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom na konice pretokov in volumne odtokov, so zgoraj omenjeni avtorji prišli še do naslednjih zaključkov. Avtorji Holman-Dodds et al. (2003) in Brander et al. (2004) ugotavljajo, da so ukrepi za ponikanje padavinske vode bolj učinkoviti na prispevnih območjih, kjer je prepustnost tal razmeroma velika. Poleg prepustnosti tal na učinek ukrepov za ponikanje padavinske vode vpliva tudi predhodna vlažnost tal. Avtorja Williams in Wise (2006) sta prišla do zaključka, da je učinek ukrepov manjši, kadar je predhodna vlažnost tal nadpovprečna. Številni avtorji ugotavljajo, da je učinek sonaravnih ukrepov v primeru dogodkov z večjimi povratnimi dobami omejen in da je negativne učinke, ki jih ima urbanizacija na površinski odtok v tem primeru, potrebno uravnati tudi z drugimi strategijami za upravljanje s površinskim odtokom, kot je na primer konvencionalno zadrževanje padavinskih vod (Damodaram et al., 2010; Ellis in Viavattene, 2013; Holman-Dodds et al., 2003; Rose in Hodges, 2010; Williams in Wise 2006). Vendar pa avtorji Damodaram et al. (2010) navajajo, da kljub temu tudi v primeru večjih padavinskih dogodkov učinek sonaravnih ukrepov ni povsem zanemarljiv, saj vpliva na časovno razporeditev pretokov, ki je tako bolj podobna razporeditvi, ki je značilna za naravni hidrološki režim.

Večina avtorjev omenjenih raziskav ne poroča o vplivu sonaravnih ukrepov na spremembo časa do nastopa konice pretoka. Iz rezultatov avtorjev Damodaram et al. (2010) in Juan et al. (2013) je na primer razvidno, da se zaradi uporabe sonaravnih ukrepov čas do nastopa konice pretoka ne podaljša. Avtorji Hood et al. (2007), ki so med drugim preučevali čas zakasnitve v primeru hidrogramov odtoka

z območja s tradicionalnim tipom poselitve in z območja, na katerem so razporejeni različni sonaravni ukrepi za ponikanje in zadrževanje površinskega odtoka, so ugotovili, da so časi zakasnitve na območju s sonaravnimi ukrepi pri dogodkih, ki so manjši od 25,4 mm precej daljši kot na območju s tradicionalnim tipom poselitve, medtem ko pri večjih dogodkih tega niso opazili.

## 1.2 Delovna hipoteza in cilji naloge

Na podlagi predstavljene problematike smo oblikovali naslednji delovni hipotezi:

- Sonaravno upravljanje s padavinsko vodo v urbanem okolju zmanjša konice pretokov in volumne hidrogramov odtoka ter poveča čase do nastopa konice pretoka.
- Učinkovitost ukrepov je odvisna od povratne dobe padavinskega dogodka.

Prvi cilj naloge je preveriti, katere sonaravne ukrepe za upravljanje s padavinsko vodo in v kakšnem obsegu bi bilo glede na obstoječo zakonodajo, prostorske danosti in tehnične omejitve najbolj smiselno uporabiti na manjšem urbaniziranem prispevnem območju, ki je glede na tip pozidave reprezentativno za širše mestno središče Ljubljane. Drugi cilj naloge je s pomočjo hidrološkega modela, ki smo ga vzpostavili na podlagi prostorskih podatkov in meritev padavin in pretokov, preveriti, za koliko bi v primeru dogodkov z različnimi povratnimi dobami, z izbranimi ukrepi in njihovimi kombinacijami, lahko zmanjšali volumne odtoka in konice pretokov glede na obstoječe stanje na prispevnem območju ter vplivali na čase do nastopa konice pretoka oziroma v kolikšni meri je učinek ukrepov v tem pogledu odvisen od povratne dobe padavinskega dogodka. Cilj naloge je tudi preveriti, ali se naše ugotovitve ujemajo z ugotovitvami raziskav drugih avtorjev, ki so se že ukvarjali s podobno problematiko.

Rezultati naloge bodo med drugim uporabni pri nadaljnjem raziskovanju različnih možnosti za doseganje določenih okoljskih ciljev, kot so bogatenje podtalnice, zmanjševanje poplavne nevarnosti, zmanjševanje pogostosti prelivanja mešane odpadne vode v vodotoke oziroma zmanjševanje onesnaževanja površinskih vod, enakomernejše obremenjevanje čistilnih naprav, izboljšanje rečnega ekosistema in podobno.

## 2 MERITVE IN METODE DE LA

### 2.1 Izbor prispevnega območja

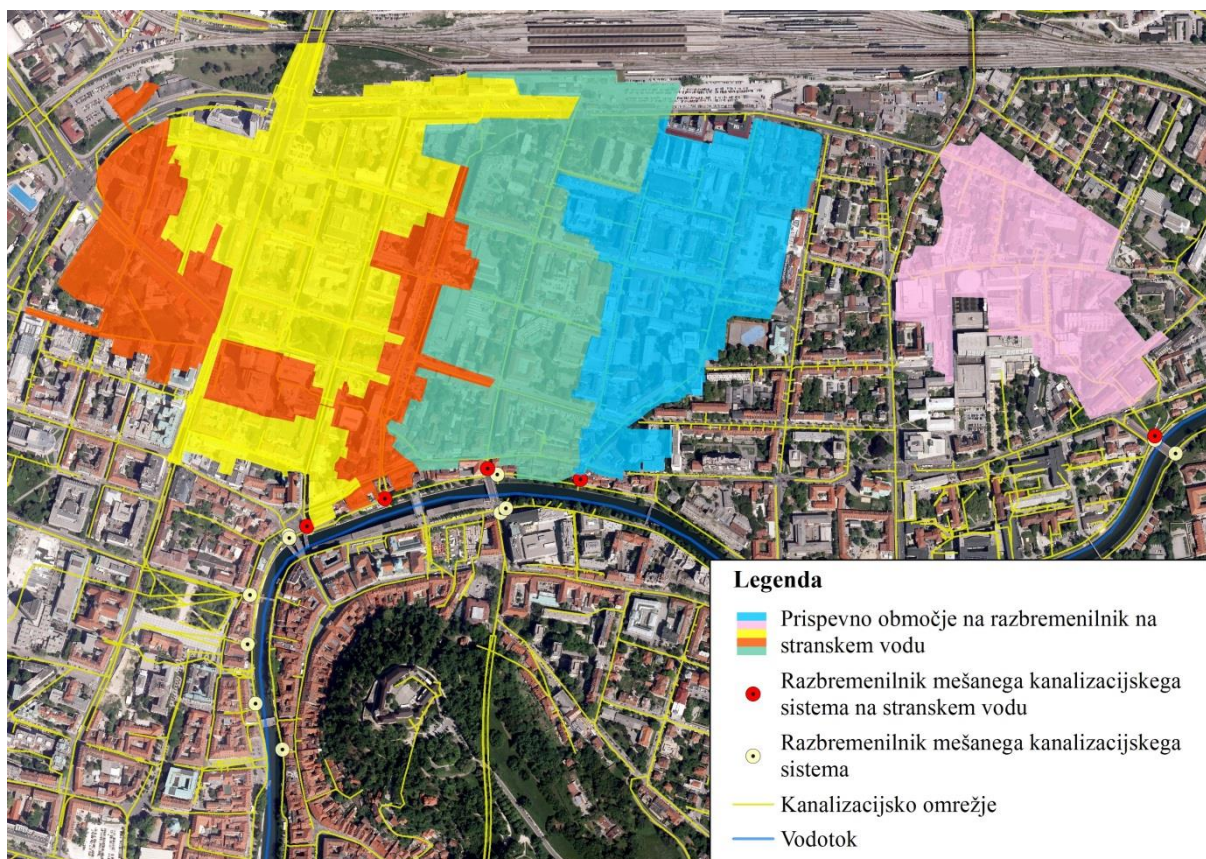
Na območju širšega mestnega središča Ljubljane je odvajanje padavinske vode urejeno z mešanim kanalizacijskim sistemom, ki odvaja tako komunalno, kot tudi padavinsko odpadno vodo. Pri takem sistemu se večji del mešane odpadne vode preliva preko razbremenilnih objektov v površinski odvodnik, preostali del pa odteka naprej po kanalizacijskem sistemu do čistilne naprave (Kolar, 1983). Ker je iztok površinskega odtoka s posameznih prispevnih območij na takih sistemih urejen torej preko razbremenilnikov, smo v prvem koraku identificirali vse razbremenilnike mešanega kanalizacijskega sistema, ki se nahajajo v širšem središču mesta Ljubljane (tj. od Prul do Vodmata). Ti so lahko nameščeni v stranskem vodu oziroma kanalu ali pa na glavnem zbiralniku (Panjan, 2002). Na sliki 1 so prikazani vsi razbremenilniki znotraj širšega središča mesta Ljubljane, ki se nahajajo vzdolž reke Ljubljanice. Z rdečo barvo so označeni razbremenilniki na stranskih vodih.



Slika 1: Razbremenilniki vzdolž reke Ljubljanice znotraj širšega mestnega središča Ljubljane (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 1: Combined sewer overflows along Ljubljanica River in the wider city centre of Ljubljana (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Razbremenilniki na glavnih zbiralnikih razbremenjujejo mešano odpadno vodo s širšega prispevnega območja, ki ga je težko natančno opredeliti, zato smo v nadaljevanju te izločili iz izbora. Izmed prispevnih območij razbremenilnikov na stranskih vodih smo za modeliranje površinskega odtoka in nadaljnje analize izbrali prispevno območje razbremenilnika R15 (slika 3). Raba tal na prispevnem območju razbremenilnika R12 na primer ni reprezentativna za mestno središče, saj večino območja zavzemajo bolnišnice. Bolnišnične zgradbe imajo običajno večje tlorise, kot jih imajo objekti, ki so sicer tipični za mestne predele (bloki, hoteli, ipd.). V primeru prispevnega območja razbremenilnika R17 bi bilo izvajanje meritev pretokov pred vtokom na razbremenilnik preveč težavno, saj je vstopni jašek v ta razbremenilnik sredi razmeroma prometne ceste. Prispevni območji razbremenilnikov R18 in R19 pa se med seboj prepletata, zato bi bilo določanje natančnih mej enega ali drugega prispevnega območja preveč težavno in zamudno.



Slika 2: Prispevna območja razbremenilnikov na stranskih vodih vzdolž reke Ljubljanice (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 2: Drainage areas of combined sewer overflows connected in parallel, situated along Ljubljanica River (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).



## 2.2 Opis obravnavanega območja

Obravnavano območje se nahaja v neposredni bližini ožjega mestnega središča Ljubljane. Lokacija je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Izbrano prispevno območje za modeliranje površinskega odtoka in nadaljnje analize (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 3: The drainage area chosen for runoff modelling and further analyses (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Na zahodni strani sega do objektov, ki se nahajajo zahodno od Kotnikove ulice in Vidovdanske ceste, na vzhodni strani pa do Maistrove ulice, parka ob ulici Tabor in objektov, ki stojijo vzhodno od Vidovdanske ceste. Na severni strani sega do Masarykove ulice, na jugu pa se zaključi pri razbremenilniku v Znamenjski ulici. Velikost prispevnega območja znaša 145519,7 m<sup>2</sup>.

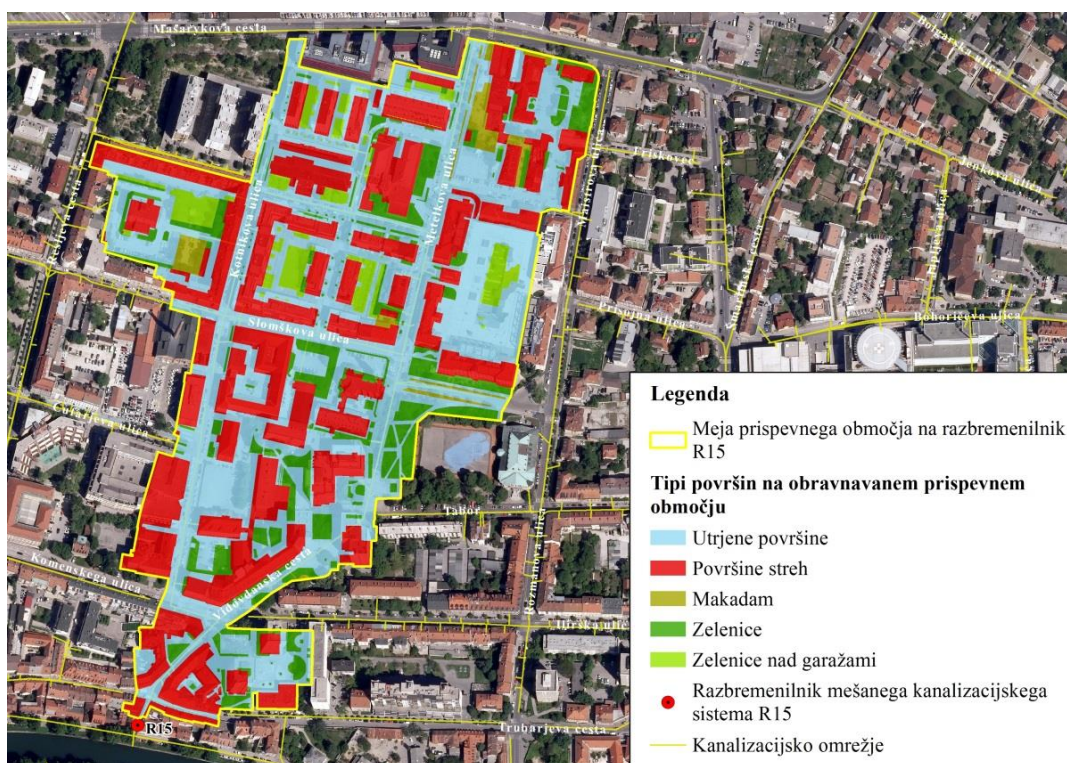
Na splošno je na obravnavanem območju precej raznolika pozidava, ki izhaja iz različnih zgodovinskih obdobj. Nekateri objekti datirajo že v leto 1800, najnovejši objekti pa so bili zgrajeni po letu 2000 (GURS, 2016). Za objekte zgrajene po letu 1990 je značilno, da imajo pod nivojem terena zgrajene podzemne garaže, katerih tlorisi segajo daleč izven gabaritov samega objekta (IBE d.d., 2003; LUZ d.d., 1999; LUZ d.d., 1996; Medvešček in Grmek, 2002; Progres Slovenj Gradec, 1990; Projektiva Gorica d.o.o., 1992; Projektivno konstrukcijski biro SGP Stavbenik Koper, 1983), strehe pa imajo ravne. Objekti, ki so bili zgrajeni pred letom 1990 in pripadajoče površine so zelo raznoliki. Nekaterim pripada več, drugim manj zelenih površin, ponekod pa je celotno zemljišče namenjeno parkiriščem. Strehe so večinoma poševne, vendar pa se vmes najdejo tudi stolpnice z ravnimi strehami.

Pokrovnost tal smo določili na podlagi ortofoto posnetka (GURS, 2013) in terenskega ogleda, podatke pa smo obdelali s pomočjo programa ESRI ArcMap, ki je namenjen izdelavi različnih prostorskih analiz (ESRI, 2016). Na obravnavanem prispevnem območju smo identificirali 5 različnih vrst pokrovnosti tal oziroma tipov površin, in sicer utrjene površine, strehe, makadam, zelenice in zelenice nad podzemnimi garažami. Zelenice nad podzemnimi garažami smo posebej identificirali zato, ker na teh površinah ponikanje padavinskih vod ni možno. Deleži posameznih tipov površin so prikazani v preglednici 1, pokrovnost tal na prispevnem območju pa je prikazana na sliki 4. Lokacije podzemnih garaž so prikazane na sliki 5. Nekatere površine na obravnavanem območju imajo površinski odtok odveden v ponikalne jaške (slika 6). Njihova skupna površina znaša 15018,1 m<sup>2</sup>.

Preglednica 1: Deleži posameznih tipov površin na prispevnem območju.

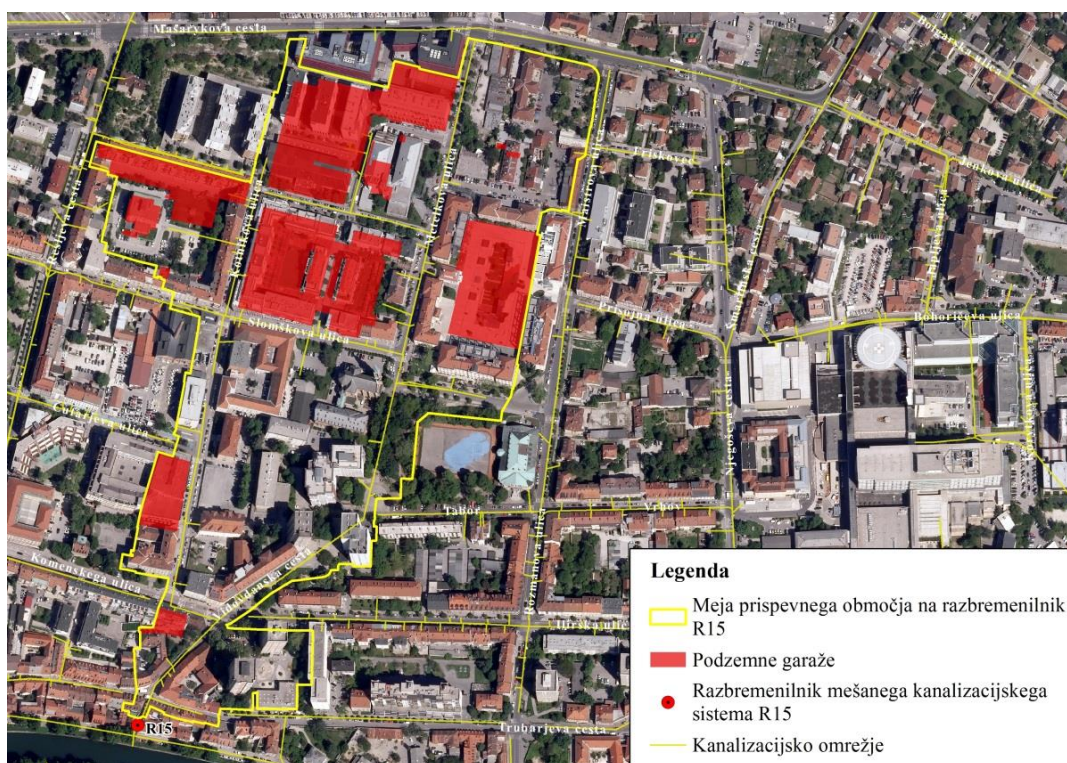
Table 1: Percent area of each land cover type on a drainage area.

	<b>Površina A [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Delež celotne površine [%]</b>
<b>Utrjene površine</b>	69142,8	47,5
<b>Strehe</b>	52631,5	36,2
<b>Makadam</b>	2842,1	2,0
<b>Zelenice</b>	15157,3	10,4
<b>Zelenice nad garažami</b>	5746,0	3,9
<b>Skupaj</b>	<b>145519,7</b>	<b>100,0</b>



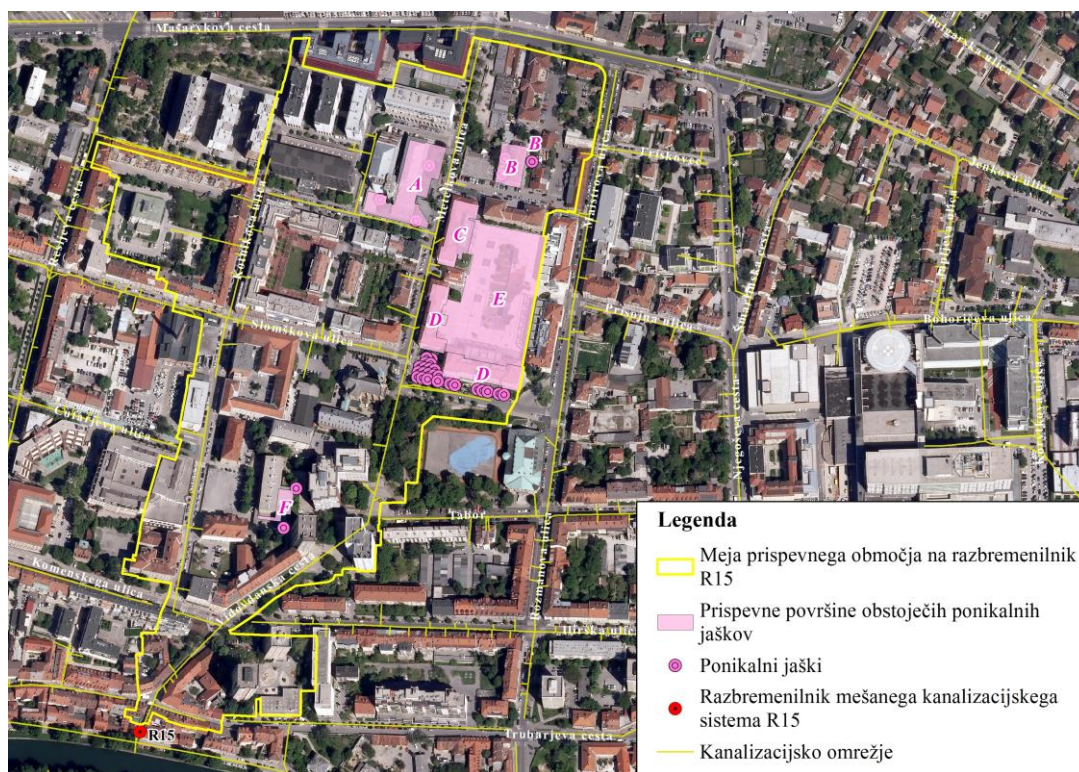
Slika 4: Pokrovnosti tal na prispevnem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 4: Land cover types on the catchment area (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).



Slika 5: Podzemne garaže na obravnavanem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

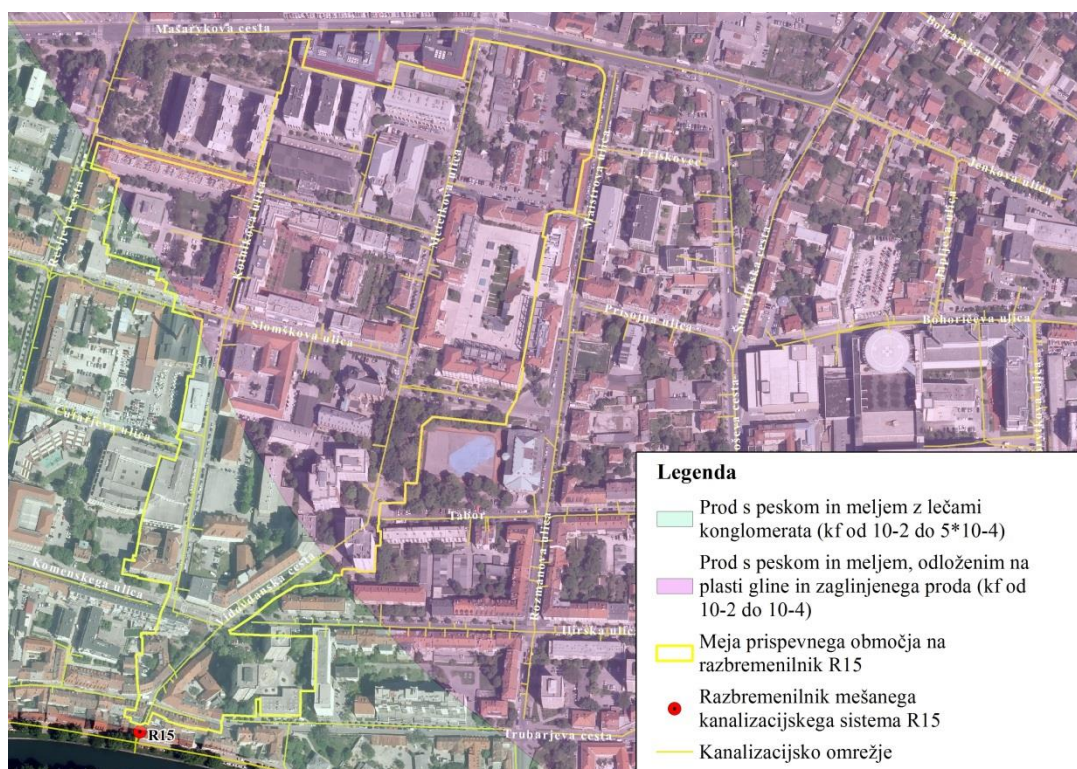
Figure 5: Underground parking garages locations (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).



Slika 6: Prispevne površine obstoječih ponikalnih jaškov (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 6: Drainage areas connected to existing infiltration shafts (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Na večjem delu prispevnega območja, ki se nahaja severno od linije, ki poteka od ploščadi pred hotelom Park z naslovom Tabor 9 do objekta z naslovom Resljeva cesta 34, se glede na hidrogeološko karto (GZL, 1997) nahaja prodni zasip Ljubljanskega polja, ki ga sestavlja savski prod s peskom in meljem, ki je odložen na plasti gline in zaglinjenega proda. Pod glinastimi plastmi je prodni vodonosnik Ljubljanskega polja. Taka tla so za vodo dobro prepustna, koeficient prepustnosti  $k$  znaša od  $1 \cdot 10^{-2}$  m/s do  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s (GZL, 1997). Južno od omenjene linije je glede na hidrogeološko karto prodni zasip Ljubljanskega polja (visoka savska terasa), ki ga sestavlja prod s peskom in meljem ter lečami konglomerata. Prod je prekrit z 0,3 m do 1,0 m debelo plastjo humusa in peščene gline. Taka tla so za vodo dobro prepustna, koeficient prepustnosti  $k$  znaša od  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s do  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s (GZL, 1997). Hidrogeološka sestava tal na obravnavanem območju je prikazana na sliki 7. Podtalnica se po znanih hidrogeoloških razmerah centra Ljubljane nahaja v starejšem savskem nanosu v globini 17 m do 23 m pod površino (GZL, 1992). Glede na Uredbo o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Uradni list RS št. 43/2015) se obravnavano območje nahaja na podobmočju z milejšim vodovarstvenim režimom z oznako IIIA.



Slika 7: Hidrogeološka sestava tal na obravnavanem prispevnem območju (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 7: Hydrogeological structure of the catchment area under consideration (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Glede na ugotovitve iz geotehničnih raziskav (GZL, 1990; GZL, 1992; IGGG, 1998; Prestor in Hoetzl, 2002), ki smo jih pridobili na Geološkem zavodu Slovenije, so tla na večjem delu prispevnega območja prekrita z umetnim nasipom. Na površju prevladujejo prodnopedščene zemljine (GP) in prodnopedščenomeljne zemljine (GM in GFs), na južnem delu pa najdemo še zaglinjen grušč, zaglinjeno prodnopedščeno zemljino in zaglinjeno prodnopedščeno zemljino s konglomeratom (GC), peščeno meljno zemljino do enakomerno granulirane drobne peske (SM-SU), zelo stisljiv melj s peskom sive barve (MH) ter ponekod tudi pusto glino.

Teren se spušča od severa proti jugu z blagim naklonom, ki znaša cca 2 ‰. Nekoliko strmeje se spusti le na območju južno od Trubarjeve ulice, ki pa predstavlja zanemarljivo majhen del prispevnega območja. Kota preliva razbremenilnika je približno 2 m nad običajno gladino Ljubljance, ki se nahaja na nadmorski višini 285,6 m in ki jo vzdržuje zapornica pri Ambroževem trgu (Hrast, 2007; JP VO-KA, 2013).

## 2.3 Meritve

### 2.3.1 Merska oprema

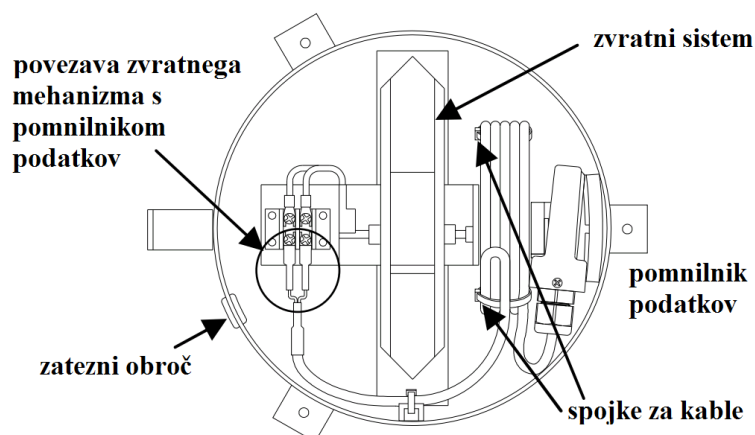
Padavine smo merili s pomočjo avtomatskega dežemera znamke Onset RG3-M, pretoke pa s pomočjo Dopplerjevega merilca pretočnih hitrosti, globine in temperature vode Starflow Unidata model 6526-21.

Bistveni komponenti, ki sestavljata avtomatski dežemer znamke Onset RG3-M, sta aluminijasta zbirna posoda z zvrtnim sistemom in zapisovalnik podatkov, ki beleži podatke o padavinah in temperaturi. Nad zbirno posodo je nameščen aluminijast obroč z lijakom, ki usmerja padavinsko vodo do zvrtnega mehanizma. Zvrat se zgodi, ko pade 0,2 mm padavin. Pri vsakem zvratu se sproži magnetno stikalo, ki je povezano z zapisovalnikom podatkov, ki zabeleži čas posameznega zvrata. Zvrnjena voda odteka nato skozi dno zbirne posode (UL FGG, 2016a). Zunanje ogrodje dežemera s pomnilnikom je prikazano na sliki 8, notranje komponente pa na sliki 9. Mersko mesto moramo izbrati tako, da v okolici ni prisotnih visokih objektov, ki bi lahko motili meritve. Na vetrovnih mestih je potrebno dežemer ustrezno zaščititi. Pri postavitvi dežemera moramo paziti, da je dno posode poravnano vodoravno. Kadar dežemer namestimo na drog, je potrebno paziti, da je drog vertikalno poravnani in da je dežemer nameščen nad višino droga. Natančnost dežemera Onset RG3-M je  $\pm 1,0 \%$ , časovna resolucija dežemera znaša 0,5 s, zapisovalnika podatkov pa 1 s. Časovna natančnost znaša  $\pm 1$  min na mesec pri temperaturi 25 °C (Onset Computer Corporation, 2005-2012).



Slika 8: Avtomatski dežemer Onset RG3-M (Onset Computer Corporation, 2016).

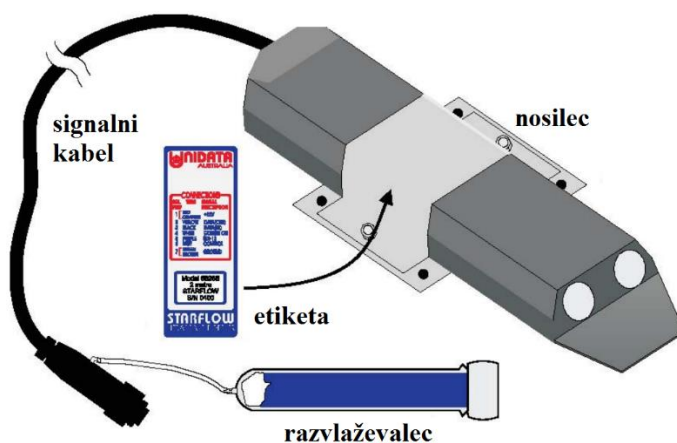
Figure 8: RG3-M Data logging rain gauge (Onset Computer Corporation, 2016).



Slika 9: Notranjost dežemera Onset RG3-M (prirejeno po Onset Computer Corporation, 2005-2012).

Figure 9: Rain gauge internal view (adapted from Onset Computer Corporation, 2005-2012).

Ultrazvočni merilnik Starflow 6526-21 meri pretočne hitrosti, globino in temperaturo vode. Meritve lahko izvajamo v kanalih, ceveh in manjših vodotokih ne glede na kvaliteto vode (Unidata Pty Ltd, 2011). Pričvrstimo ga na dno kanala oziroma struge vodotoka. Merilnik Starflow oddaja zvočni signal in sprejema odmev od različnih delcev in zračnih mehurčkov v vodnem toku, pretočne hitrosti pa nato določi na podlagi Dopplerjevega pojava. Globino vode naprava meri s senzorjem za statični tlak, ki je nameščen pod merilnikom. Tlak v bližini tlačnega senzorja je izenačen z atmosferskim tlakom s pomočjo oddušne cevi, ki do površja poteka skupaj s signalnim kablom (Unidata Pty Ltd, 2011). Na sliki 10 so prikazane sistemske komponente merilnika Starflow.

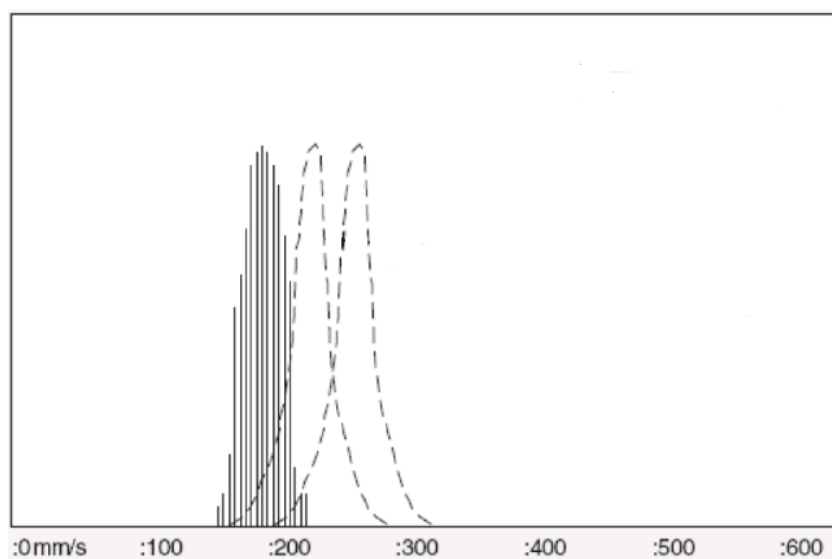


Slika 10: Sistemske komponente merilnika Starflow (prirejeno po Unidata Pty Ltd, 2011).

Figure 10: Starflow system components (adapted from Unidata Pty Ltd, 2011).

Glede na uporabnikove nastavitve merilnik Starflow na določen interval izmeri trenutne vrednosti posameznih količin (hitrost, globina in temperatura), nato pa za vsak časovni interval, ki je določen za

zapisovanje podatkov, v pomnilnik zapiše različne statistične vrednosti izmerjenih podatkov. Na ta način lahko beleži srednje, povprečne, minimalne in maksimalne vrednosti posameznih količin in pa število zabeleženih podatkov (Unidata Pty Ltd, 2011). Meritve hitrosti so odvisne od hitrosti potovanja zvoka v vodi, ta pa je po drugi strani odvisna od gostote vode. Na gostoto vode vplivajo pritisk, temperatura vode, slanost in vsebnost suspendiranih snovi. Od vseh naštetih dejavnikov ima največji vpliv temperatura, zato Starflow na podlagi podatkov o temperaturi vode, podatke o pretočnih hitrostih ustrezno korigira (UL FGG, 2016b). Glede na tehnične specifikacije merilnik Starflow meri hitrosti s točnostjo  $\pm 2\%$ , globino pa s točnostjo  $\pm 0,25\%$ . Podatke o hitrostih beleži z resolucijo 1 mm/s, globino z resolucijo 1 mm – 2 mm, odvisno od globine vode, temperaturo pa z resolucijo 0,1 °C (Unidata Pty Ltd, 2011). Sicer pa je točnost izmerjenih podatkov odvisna tudi od pretočnih lastnosti in od lastnosti prečnega prereza na izbranem merskem mestu. Za čim večjo točnost meritev mora biti na merskem mestu tok laminaren, prečni prerez mora biti stabilen, hitrosti morajo biti večje od 20 mm/s, suspendirane snovi pa morajo biti prisotne v zadostni meri. Poleg tega voda ne sme vsebovati prevelikega števila zračnih mehurčkov. Starflow lahko namestimo v kanalih, ki so širši od 75 mm in kjer globina vode znaša vsaj 25 mm (Unidata Pty Ltd, 2011). Kvaliteto signala lahko ocenimo s pomočjo histograma, pri katerem so na osi x nanizane vrednosti hitrosti, na osi y pa število, ki pove, kolikokrat je bila posamezna hitrost zaznana. Primer je prikazan na sliki 11. Ko se hitrost spreminja, se vrh histograma premika levo in desno po osi x. Idealen histogram je simetričen glede na največjo vrednost. Ožji kot je histogram, manjši je razpon zaznanih hitrosti. Običajno se razmerje med širino in višino histograma nahaja med 20 % in 50 % (Unidata Pty Ltd, 2011).



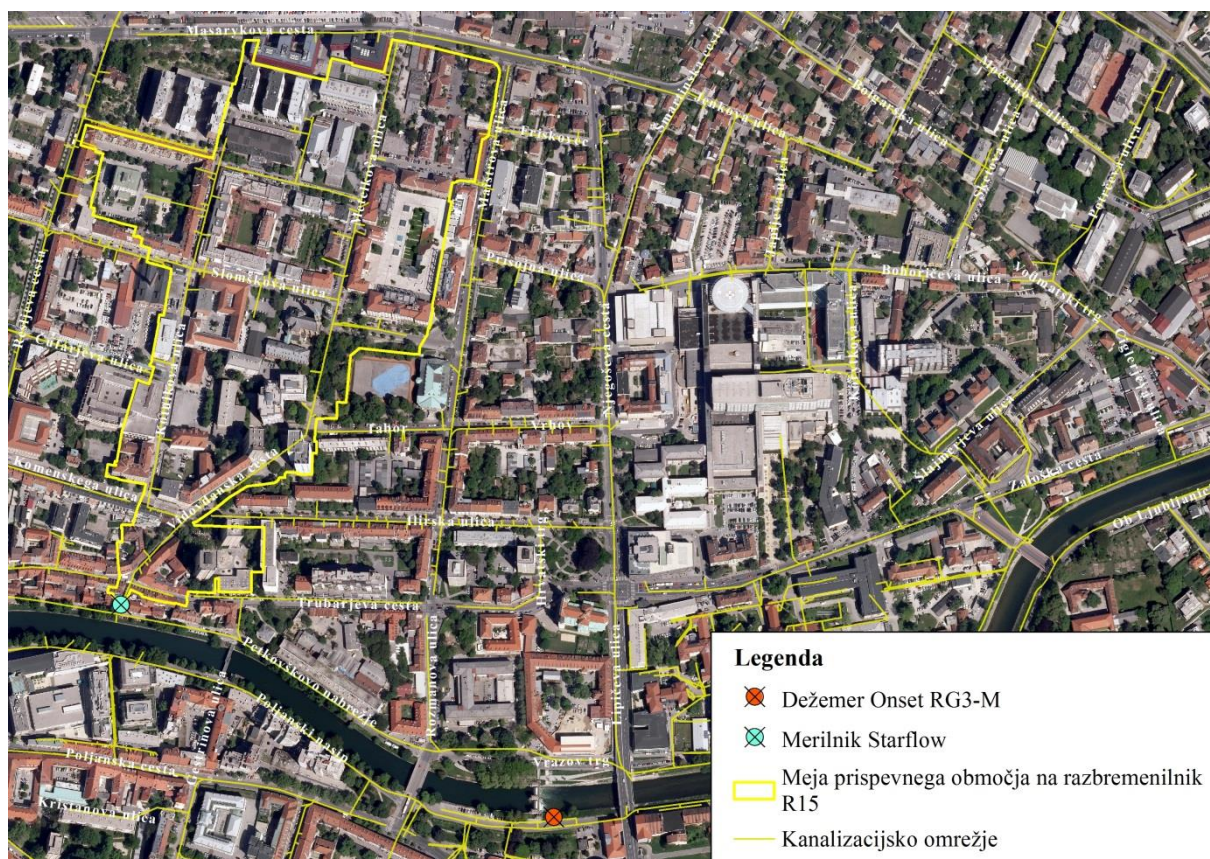
Slika 11: Primer histograma hitrosti za laminarni tok (Unidata Pty Ltd, 2011).

Figure 11: An example of velocity histogram in laminar regime (Unidata Pty Ltd, 2011).



### 2.3.2 Lokacije in potek meritev

Meritve padavin in pretokov smo izvajali v obdobju od 22. 11. 2012 12:50 do 5. 6. 2013 9:00. Na sliki 12 sta prikazani lokaciji meritev pretokov in padavin.



Slika 12: Lokaciji izvajanja meritev padavin in pretokov (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 12: Flowmeter and rain gauge locations (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Merilnik Starflow smo namestili v razbremenilnik v Znamenjski ulici nad Petkovškovim nabrežjem, kamor se steka mešana odpadna voda iz obravnavanega prispevnega območja. Namestili smo ga tik pred vtokom mešane odpadne vode v objekt razbremenilnika (slika 13). Vse lastnosti merskega mesta so ustrezale zahtevam proizvajalca. Dežemer Onset RG3-M smo namestili na desni breg reke Ljubljanice, približno 500 m dolvodno od razbremenilnika v Znamenjski ulici. Pričvrstili smo ga na drog, kot je prikazano na sliki 14.



Slika 13: Merilno mesto za meritve pretoka.

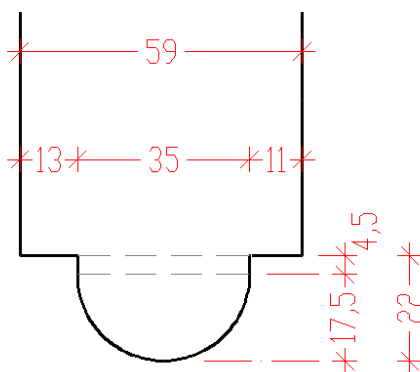
Figure 13: Discharge measurement site.



Slika 14: Lokacija dežemera Onset RG3-M.

Figure 14: Raingage Onset RG3-M location.

Prečni prerez vtoka v razbremenilnik je sestavljen iz dveh delov, kot je prikazano na sliki 15. Spodnji del prečnega prereza je polkrožne oblike, ki na višini 22 cm preide v pravokotno obliko.



Slika 15: Prečni prerez merskega profila. Dimenzije so v centimetrih.

Figure 15: Cross-section at the gauge site. Dimension units are centimeters.

Tok na merskem profilu je turbulenten. Povprečna vrednost Reynoldsovega števila, ki smo jo izračunali na podlagi podatkov o dimenzijah prečnega prereza, pretočnih hitrostih in temperaturah vode, znaša 24424,9. Kljub temu, da naj bi bil za čim večjo točnost meritev na merskem profilu tok laminaren, smo glede na razmerje širine in višine histograma merjenih hitrosti, ki smo ga preverili pred pričetkom meritev, ugotovili, da je kvaliteta signala zadovoljiva.

Interval beleženja trenutnih vrednosti smo nastavili na 15 sekund, zapisovanje minimalnih, maksimalnih in povprečnih vrednostih temperature, globine in hitrosti pa na 5 min, razen za obdobje od 14. 12. 10:23 do 19. 12. 2012 10:12, ko je zapisovanje potekalo na 1 min. Dne 29. 3. 2013 23:40 se je senzor hitrosti pokvaril, tako da podatkov o hitrostih od 29. 3. 2013 23:45 do konca meritev (tj. do 5. 6. 2013 9:00) ni na voljo. Poleg tega ni na voljo meritev za nekaj obdobji, ko merilnik ni deloval zaradi menjave baterije in za obdobje od 14. 2. 2013 3:25 do 14. 2. 2013 9:25, ko je zmanjkalo prostora v pomnilniku podatkov.

### 2.3.3 Konstrukcija pretočne krivulje

Za obdobje, ko merilnik hitrosti ni deloval, smo podatke o pretokih določili s pomočjo pretočne krivulje. »Pretočna krivulja je krivulja, ki kaže razmerje med vodostajem in pretokom na hidrometrični postaji« (Mikoš et al., 2002, str. 210) oziroma na izbranem merskem profilu. Omenjeno funkcijo zapišemo kot  $h=f(Q)$ . Konstruiramo jo s pomočjo podatkov sočasnih meritev gladin  $h$  in pretokov  $Q$ . Na voljo moramo imeti dovolj meritev, da zajamemo dovolj širok razpon vrednosti.

Pretočno krivuljo grafično prikažemo tako, da skozi razpršene vrednosti gladin na ordinati in pretokov na abscisi določimo trendno črto. Grafični prikaz omogoča vizualizacijo pretočne krivulje in ročno transformacijo gladin v pretoke. Lahko pa gladine transformiramo v pretoke tudi analitično s pomočjo algebraične zveze  $Q=f(h)$  (DHV, 1999). Tudi to določimo s pomočjo trendne črte, ki se prilega parom podatkov o gladinah in pretokih, le da pri tem podatke o gladinah nanizamo na absciso, podatke o pretokih pa na ordinato.

Pretočna krivulja je lahko sestavljena iz več segmentov. Število segmentov pretočne krivulje lahko določimo tako, da podatke o gladinah in pretokih prikažemo na grafu z dvojnimi logaritmičnim merilom. Podatki  $h-Q$  se na takem grafu načeloma prilegajo ravni črti. Na meji med posameznimi segmenti ta črta spremeni naklon oziroma se zlomi (DHV, 1999). Sicer pa lahko meje med posameznimi segmenti pretočne krivulje določimo tudi na podlagi analize prečnega prereza na merskem mestu. Meje se v tem primeru nahajajo pri tistih gladinah  $h$ , kjer se oblika prečnega prereza spremeni (DHV, 1999).

V času poplavnega vala je tok na merskem mestu nestalen (Petersen-Øverleir, 2006). Spremenljiv energijski padec, ki je posledica dinamičnih vztrajnostnih in tlačnih sil v tem primeru, vpliva na pojav histereze pri pretočni krivulji (Chow, 1959; Fread, 1975; Henderson, 1966; Jones, 1916 cit. po Dottori et al., 2009). Ta je bolj izrazita pri strugah oziroma kanalih z blagim naklonom (DHV, 1999). Različni avtorji so poskušali vpliv histereze, ki je značilna za zvezo med gladinami in pretoki, opisati na različne načine. Nekatere metode temeljijo na empiričnih prilagoditvah pretočne krivulje, ki so določene na podlagi eksperimentalnih podatkov, obstajajo pa tudi številne metode, pri katerih je vpliv histereze opisan s pomočjo enačb, ki so izpeljane iz osnovne ali poenostavljene dinamične enačbe. Ena takih enačb, ki je v literaturi tudi daleč najbolj znana, je Jonesova enačba (Jones, 1916). Omenjeni avtor je pri izpeljavi te enačbe uporabil Chezy-jevo enačbo za določitev energijskega padca in geometrično analizo za določitev naklona vodne gladine na podlagi površinske hitrosti in velikosti spremembe nivoja vodne gladine na merskem mestu (Dottori et al., 2009). Enačba se glasi (DHV, 1999):

$$Q_m = Q_r \sqrt{\left(1 + \frac{1}{cS_0} \frac{dh}{dt}\right)} \quad (1)$$

$Q_m$  ... merjeni pretok oziroma korigirani pretok,

$Q_r$  ... ocenjen pretok pri stalnem toku, določen iz pretočne krivulje,

$c$  ... hitrost širjenja valov oziroma površinska hitrost,

$S_0$  ... energijski padec,

$dh/dt$  ... razmerje med spremembo gladine na začetku in koncu posamezne meritve in trajanjem meritve (+ za naraščanje, - za upadanje), v primeru kontinuiranih meritev pomeni člen  $dh/dt$  spremembo gladine v posameznem intervalu beleženja podatkov.

Če enačbo (1) preuredimo, dobimo:

$$\frac{1}{cS_0} = \frac{(Q_m/Q_r)^2 - 1}{dh/dt} \quad (2)$$

Tako dobljene vrednosti faktorjev  $1/cS_0$  se prilegajo paraboli:

$$\frac{1}{cS_0} = a + bh + ch^2 \quad (3)$$

Enačbo (3) določimo s pomočjo trendne črte, ki se prilega parom podatkov na diagramu  $1/cS_0-h$ . S pomočjo te enačbe lahko nato za vsako poljubno gladino  $h$  določimo korekcijski faktor ( $1/cS_0$ ) (DHV, 1999). Podatke o pretokih  $Q_r$ , ki jih določimo na podlagi pretočne krivulje oziroma zveze  $Q=f(h)$ , korigiramo tako, da korekcijski faktor ( $1/cS_0$ ) vstavimo v enačbo (1), pri čemer  $Q_m$  v tem primeru predstavlja korigiran pretok  $Q_{kor}$ .

## 2.4 Izhodišča za izbor sonaravnih ukrepov in njihova umestitev v prostor

### 2.4.1 Zakonska izhodišča in omejitve za uporabo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom

Krovni zakon, ki pri nas ureja varstvo, urejanje in rabo vode je Zakon o vodah (Uradni list RS št. 67/2002, 57/2008, 57/2012, 100/2013, 40/2014, 56/2015), ki v 92. členu navaja, da je za ukrepe za zmanjševanje odtoka padavinskih voda z urbanih površin v ureditvenih območjih naselij zadolžena lokalna skupnost. V zvezi s tem je v Izvedbenem prostorskem načrtu (IPN) Mestne občine Ljubljana (Uradni list RS št. 78/2010) v 7. odstavku 38. člena navedeno, da je pri gradnji objektov potrebno zagotoviti ponikanje čim večjega dela padavinske vode s pozidanih in tlakovanih površin. Na območjih, kjer ponikanje zaradi značilnosti tal ni možno, pa je čim večji delež padavinske vode pred odvodom v kanalizacijsko omrežje potrebno začasno zadržati na lokaciji.

Zakon o vodah (Uradni list RS št. 67/2002, 57/2008, 57/2012, 100/2013, 40/2014, 56/2015) ureja tudi varstvo podtalnice, ki je namenjena za oskrbo s pitno vodo. V 74. členu navaja, da mora vlada določiti vodovarstveno območje, »da se zavaruje vodno telo, ki se uporablja za odvzem ali je namenjeno za javno oskrbo s pitno vodo pred onesnaževanjem ali drugimi vrstami obremenjevanja, ki bi lahko vplivalo na zdravstveno ustreznost voda ali na njeno količino«. V aktu, ki je sprejet v ta namen, morajo biti med drugim določene meje vodovarstvenega območja in meje notranjih območij ter ukrepi, prepovedi in omejitve na teh območjih oziroma vodovarstveni režim. Za zaščito vodnega telesa Ljubljanskega polja je Vlada RS izdala Uredbo o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Uradni list RS št. 43/2015). V prilogi 3 te uredbe so za vsako notranje vodovarstveno območje navedene prepovedi, omejitve in podrobnejši pogoji. Za vodovarstveno območje z oznako IIIA je iztok padavinske vode s streh možno ponikati brez posebnih zahtev, v primeru utrjenih površin pa je iztok padavinske vode pred ponikanjem potrebno obdelati v lovilcu olj in za gradnjo ponikalnih objektov s strani pristojnih institucij pridobiti vodno soglasje. Poleg tega morajo biti vsi dotoki na ponikalne objekte skladni z Uredbo o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS št. 64/2012, 64/2014, 98/2015). Omenjena uredba določa mejne vrednosti emisije snovi in toplote in njihovo vrednotenje ter ukrepe za preprečevanje in zmanjševanje emisije snovi in toplote, kakor tudi pogoje za odvajanje odpadnih voda in obveznosti v zvezi s tem.

#### **2.4.2 Smernice za uporabo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom**

Ker ima glede na IPN Mestne občine Ljubljana ponikanje prednost pred ukrepi, ki temeljijo na zadrževanju padavinske vode, smo najprej preverili, kakšne so torej možnosti za ponikanje padavinskih vod na obravnavanem območju. Pri tem smo se oprli na nemški standard DWA-A-138E, ki obravnava načrtovanje, gradnjo in obratovanje ponikalnih objektov in naprav. Izdalo ga je nemško strokovno združenje za vodo, odpadno vodo in odpadke (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.). Gre za politično in ekonomsko neodvisno zvezo, v katero so vključeni strokovnjaki iz občin, univerz, inženirske stroke in industrije. Čeprav DWA-A-138E standard nima obvezne veljave, ga uporabljajo tako v Nemčiji kot v nekaterih drugih evropskih državah, saj evropski standard za to področje ne obstaja (Valenčič, 2010). V standardu DWA-A-138E je obravnavanih več ukrepov za ponikanje padavinske vode. Standard v grobem ločuje med nadzemnimi in podzemnimi ukrepi za upravljanje s padavinsko vodo. K nadzemnim ukrepom spadajo plitvi ponikalni bazeni, plitvi ponikalni jarki, s prodom zasuti ponikalni jarki, k podzemnim ukrepom pa cevni ponikalni jarki in ponikalni jaški.

Glede ponikanja padavinskih vod so omejitve v luči zaščite podzemne vode izven vodovarstvenih pasov vodnih virov podane tudi v standardu DWA-A-138E. V ta namen so različni tipi površin razvrščeni glede na potencialno nevarnost, ki jo padavinska voda, ki odteka z njih, predstavlja za podzemno vodo. Glede na to nevarnost je v standardu nato opredeljeno, katere ukrepe za ponikanje padavinske vode lahko v posameznem primeru uporabimo. Velja načelo, da imajo nadzemni objekti vedno prednost pred podzemnimi objekti ne glede na tip prispevne površine.

Ponikanje s ponikalnimi jaški brez predhodnega čiščenja padavinske vode je na primer dovoljeno samo za površinske odtoke z zelenih streh, zelenic in streh, ki niso premazane s kovinskimi premazi ter teras na stanovanjskih območjih. Če odtok predhodno očistimo, pa lahko v ponikalne jaške odvajamo tudi padavinsko vodo s streh s kovinskimi premazi. Izjemoma lahko v te objekte odvajamo še padavinsko vodo s kolesarskih prog in pohodnih površin na stanovanjskih območjih, ki se nahajajo izven vplivnega območja cest in območja umirjenega prometa. Površinski odtok, ki nastane na omenjenih površinah je mogoče odvajati tudi v cevne ponikalne jarke. Poleg tega je v cevne ponikalne jarke izjemoma možno odvajati tudi površinski odtok z manj obremenjenih parkirnih površin in cest, vzletnih in pristajalnih stez ter streh na komercialnih in industrijskih območjih. Površinski odtok z bolj onesnaženih površin, kot so na primer zelo obremenjene ceste in parkirišča, ceste in utrjene površine na območjih z visoko stopnjo onesnaženja, pa lahko odvajamo samo v nadzemne objekte za ponikanje. Odtok s posebnih površin, kot so na primer parkirne površine za tovornjake za prevoz težkega tovora in površine za razvrščanje letalskega prometa ni mogoče ponikati v nobenem primeru.

Omejitveni dejavnik za ponikanje padavinske vode je tudi prepustnost zemljine. Standard DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005) navaja, da mora za ponikanje padavinske vode koeficient prepustnosti zemljine znašati med  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s in  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Kadar je prepustnost tal večja od  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s, voda skozi zemeljske plasti namreč pronica tako hitro, da se s pomočjo fizikalno-kemičnih in bioloških procesov, ki se odvijajo na poti do podtalnice, ne more očistiti v zadostni meri. Kadar je prepustnost tal manjša od  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s, pa se padavinska voda lahko zadržuje v ponikalnih objektih tako dolgo, da se vzpostavijo anaerobne razmere, ki negativno vplivajo na prepustnost zemljine (DWA-A-138E, 2005).

Potrebno je preveriti tudi, kje se nahaja gladina podtalnice in ali je zemljina na obravnavanem območju homogena. V primerih, kjer se izmenjujejo plasti bolj in manj prepustne zemljine, se lahko po deževnih obdobjih v plasteh, ki imajo večjo prepustnost, zadržuje voda. Če se na takem območju nahaja objekt za ponikanje padavinske vode, lahko prihaja do preplavitev tega objekta. Omenjena težava je lahko še bolj izrazita v primeru nagnjenega terena. Previdnost je v primeru nagnjenega terena

potrebna tudi sicer, saj ponikanje padavinske vode lahko sproži zemeljske plazove. Preveriti je potrebno tudi, ali je na območju, kjer želimo padavinsko vodo ponikati, zemljina neoporečna (DWA-A-138E, 2005).

Standard DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005) določa tudi, kakšen mora biti zadosten odmik ponikalnih objektov od obstoječih objektov oziroma stavb, da ne bi prišlo do poškodb. Pri tem je potrebno upoštevati globino kleti stavb in preveriti, če je klet hidroizolirana. Kadar je klet hidroizolirana, glede odnikov ni nobenih omejitev, v nasprotnem primeru pa je objekt za ponikanje potrebno namestiti vsaj na tako razdaljo od stavbe, ki je enaka produktu globine gradbene jame in varnostnega faktorja, ki znaša 1,5. Pomembno je tudi, da se objekti za ponikanje padavinske vode nahajajo čim bližje mestu, kjer površinski odtok nastane, da so drenažne cevi lahko čim krajše. Objekte za ponikanje padavinske vode moramo tudi ustrezno zavarovati. Z različnimi ukrepi je potrebno preprečiti vožnjo preko teh objektov in parkiranje na njih (DWA-A-138E, 2005).

Na nekaterih območjih zaradi omejitev, ki so podane v standardu DWA-A-138E ponikanje ni možno, zato smo s pomočjo priročnika za sonaravno upravljanje s površinskim odtokom, ki ga je izdala neodvisna zveza za raziskovanje in informiranje na področju gradbeništva in industrije (Construction Industry Research and Information Association – CIRIA) (CIRIA, 2015) preverili še druge možnosti za uporabo sonaravnih ukrepov. Pri tem smo uporabili smernice za urbana območja. V takih primerih je potrebno preveriti:

- ali je možna namestitev zelenih streh (naklon strehe  $< 1:3$ ),
- ali je možna uporaba cistern za zbiranje deževnice,
- ali je neprepustne površine možno zamenjati s prepustnimi,
- ali je možna uporaba majhnih retenzijskih površin ali vodnih elementov,
- ali je možna zasaditev dreves.

### **2.4.3 Izbor in umestitev sonaravnih ukrepov v prostor**

V nadaljevanju smo preverili, kakšne so možnosti za ponikanje padavinske vode na obravnavanem območju. Pri tem smo za vsak posamezen objekt oziroma stavbo in za vsako utrjeno površino glede na omejitve, ki so podane v standardu DWA-A-138E preverili, koliko prostora za ponikanje padavinske vode je na pripadajočem zemljišču na voljo. Načeloma so površine na obravnavanem območju, ki so primerne za vgradnjo ponikalnih objektov, precej omejene. Pri objektih, kjer je ponikanje padavinske vode s streh možno, je pri več kot 95 % primerov možno le ponikanje s ponikalnimi jaški, ki



zavzamejo najmanj prostora. Zato smo zaradi enostavnejšega pristopa k modeliranju, ta ukrep predvideli za vse strehe, kjer je ponikanje možno.

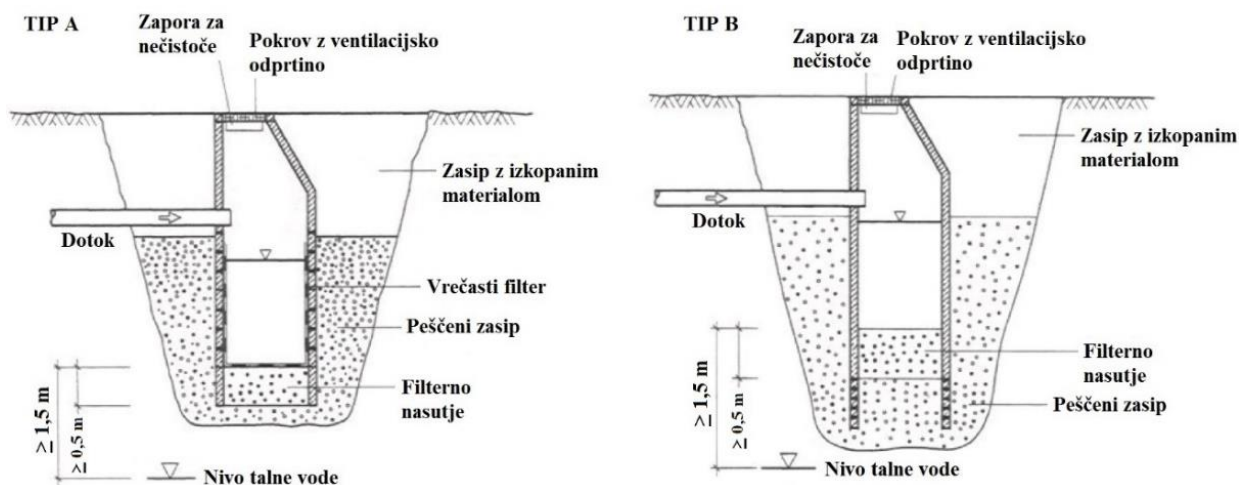
Glede na zahtevo Uredbe o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Ur. l. RS 43/15), da je na vodovarstvenih območjih VVO IIIA pred iztokom padavinske vode z utrjenih površin v ponikanje potrebno namestiti lovilec olj, in glede na nabor objektov, ki jih obravnava standard DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005), je ponikanje padavinske vode s teh površin na obravnavanem območju možno le s pomočjo cevnih ponikalnih jarkov ali ponikalnih jaškov, saj se ti objekti nahajajo pod koto terena. Glede na to, da je pri vseh utrjenih površinah, kjer je ponikanje padavinskih vod možno, dovolj prostora za namestitev cevnih ponikalnih jarkov, smo se odločili, da bomo za ponikanje padavinske vode z utrjenih površin v vseh primerih uporabili ta ukrep, saj ponikanje v tem primeru poteka bližje površini tal kot pri ponikalnih jaških. Poleg tega v primeru parkirišč in povoznih površin ponikanje padavinske vode s ponikalnimi jaški glede na standard DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005) sploh ni dovoljeno.

Na območjih, kjer zaradi prostorskih omejitev ponikanje ni možno, smo nato preverili, kakšne so druge možnosti za uporabo sonaravnih ukrepov. Ugotovili smo, da bi bile zelene strehe edini smiseln ukrep, s katerim bi lahko dosegli opazne učinke na površinski odtok. Uporaba cistern za zbiranje deževnice ni smiselna, saj je na obravnavanem območju razmeroma malo zelenic, ki bi prišle v poštev za zalivanje, za druge namene pa bi bila uporaba deževnice malo verjetna. Nadomestitev neprepustnih utrjenih površin s prepustnimi ni dovoljena, saj v tem primeru padavinske vode ni mogoče obdelati v lovilcu olj, kot zahteva Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja (Uradni list RS št. 43/2015). Na predelih, kjer bi potencialno lahko uporabili manjše bioretenzijske površine, kamor bi odvedli površinski odtok s sosednjih neprepustnih površin, so v glavnem že predvideni objekti za ponikanje padavinske vode, ki so pri zmanjševanju volumna površinskega odtoka in konic pretokov načeloma bolj učinkoviti. Tudi za zasaditev dreves na obravnavanem območju ni veliko priložnosti. Na območjih zelenih pasov ob cestah so v večini primerov drevesa že zasajena. Nekaj možnosti je na parkiriščih, vendar zanemarljivo malo, če predpostavimo, da dimenzij parkirnih mest in njihovega števila ne bomo spreminjali.

## 2.5 Izbrani sonaravni ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom in dimenzioniranje

### 2.5.1 Ponikalni jaški in cevni ponikalni jarki

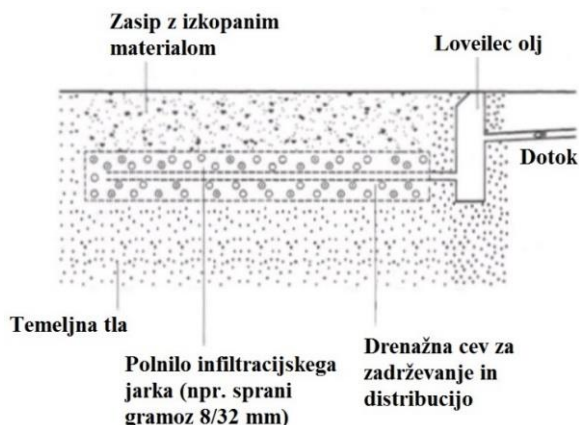
Glede na standard DWA-A-138E ločimo dva tipa ponikalnih jaškov, tip A in tip B. Za tip A je značilno, da so v betonskih obročih nad filtrskim slojem narejene izstopne odprtine skozi katere pronica voda v okoliško zemljinu. V jašek je potrebno obesiti vrečo iz filtrske tkanine, v kateri se odlagajo suspendirani delci. Vrečast filter je potrebno redno čistiti in po potrebi zamenjati. Za razliko od jaška tipa A so pri jašku tipa B prečne odprtine nameščene v betonski cevi pod filtrskim slojem, ki se nahaja na dnu betonske cevi. Suspendirani delci se v tem primeru nabirajo na površini filtrskega sloja, zato je ta sloj filtra potrebno redno kontrolirati in ga po potrebi zamenjati. Za oba tipa velja, da mora biti zgornji rob filtrskega sloja odmaknjen od najvišje gladine podtalnice vsaj 1,5 m (DWA-A-138E, 2005). Oba tipa jaška sta prikazana na sliki 16.



Slika 16: Ponikalna jaška tipa A in tipa B (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).

Figure 16: Infiltration shaft type A and type B (adapted from DWA-A-138E, 2005).

Pri ponikanju padavinske vode s cevnimi ponikalnimi jarki površinski odtok vodimo v perforirano cev, ki je obdana s prodom ali kakšnim drugim materialom ter zasuta z zemljinu. Skladiščno kapaciteto v tem primeru predstavljajo volumen cevi, praznine v prodru ter pore v zemljini, ki je nasuta do površja. Če je potrebno, gorvodno od cevnega jarka namestimo usedalnik ali lovilec olj. Na koncu jarka lahko zaradi lažjega vzdrževanja namestimo jašek za spiranje.



Slika 17: Cevni ponikalni jarek (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).

Figure 17: Pipe-infiltration trench element (adapted from DWA-A-138E, 2005).

Postopek dimenzioniranja objektov za ponikanje padavinske vode, ki je opisan v nadaljevanju, je povzet po standardu DWA-A-138E (DWA-A-138E, 2005). Glede na omenjeni standard, je objekte za ponikanje padavinske vode potrebno dimenzionirati na naliv s 5-letno povratno dobo. Glavni parameter, ki ga moramo določiti pri dimenzioniranju, je skladiščni volumen objekta. Določimo ga s pomočjo kontinuitetne enačbe:

$$V = (Q_{in} - Q_P) \cdot D \cdot 60 \cdot f_S \cdot f_R \quad (4)$$

$Q_{in}$  ... dotok na objekt za ponikanje padavinske vode [ $m^3/s$ ],

$Q_P$  ... stopnja infiltracije [ $m^3/s$ ],

$V$  ... potrebna zadrževalna prostornina [ $m^3$ ],

$D$  ... trajanje naliva [min],

$f_S$  ... faktor potopitve glede na standard DWA-A 117E, znaša med 1,1 in 1,2,

$f_R$  ... redukcijski faktor glede na standard DWA-A 117E, ki za ponikalne objekte znaša 1.

Dotok na ponikalno napravo  $Q_{in}$  določimo po enačbi:

$$Q_{in} = 10^{-7} \cdot r_{D(n)} \cdot A_{imp} \quad (5)$$

$Q_{in}$  ... dotok na objekt za ponikanje padavinske vode [ $m^3/s$ ],

$r_{D(n)}$  ... intenziteta naliva trajanja  $D$  s pogostostjo  $n$  [ $l/s/ha$ ],

$A_{imp}$  ... neprepustna površina [ $m^2$ ].

$A_{imp}$  določimo po enačbi:

$$A_{imp} = \Sigma(A_{C,i} \cdot \psi_{m,i}) \quad (6)$$

$A_{C,i}$  ... posamezna prispevna površina na ponikalno napravo [ $m^2$ ],

$\psi_{m,i}$  ... koeficient odtoka, ki zanaša za strehe od 0,9 do 1,0 za zelenice pa 0,1 (vrednosti za ostale tipe površin v standardu DWA-A-138E so podane v tabeli 2 (DWA-A-138E, 2005)).

Za izračun stopnje infiltracije  $Q_p$  uporabimo Darcyjev zakon. In sicer velja:

$$v_f = k_f \cdot I_{hy} \quad (7)$$

$v_f$  ... stopnja infiltracije pri zasičeni zemljini [m/s],

$k_f$  ... koeficient hidravlične prevodnosti pri zasičeni zemljini [m/s],

$I_{hy}$  ... hidravlični gradient [m/m].

Koeficient hidravlične prevodnosti  $k_f$  je v primeru, da je zemljina zasičena z vodo, večji kot pri nezasičeni zemljini. Privzamemo lahko, da velja:

$$k_{f,u} = \frac{k_f}{2} \quad (8)$$

$k_{f,u}$  ... koeficient hidravlične prevodnosti pri nezasičeni zemljini [m/s].

Za izračun stopnje infiltracije pri nezasičeni zemljini lahko zapišemo enačbo:

$$v_{f,u} = k_{f,u} \cdot I_{hy} \quad (9)$$

$v_{f,u}$  ... stopnja infiltracije pri nezasičeni zemljini [m/s].

Če predpostavimo, da je infiltracija padavinske vode preko sten objekta za ponikanje v primerjavi z infiltracijo preko dna objekta zanemarljivo majhna, lahko hidravlični gradient  $I_{hy}$  določimo po enačbi:

$$I_{hy} = \frac{h_s + z/2}{h_s} \quad (10)$$

- $I_{hy}$  ... hidravlični gradient [m/m],  
 $h_S$  ... razdalja med dnom ponikalnega objekta in gladino podtalnice [m],  
 $z$  ... globina uskladiščene padavinske vode v ponikalnem objektu [m].

Če predpostavimo, da je globina uskladiščene vode v objektu glede na razdaljo med dnom ponikalnega objekta in gladino podtalnice zanemarljivo majhna, lahko privzamemo, da je hidravlični gradient  $I_{hy}$  enak 1. Enačba za izračun stopnje infiltracije  $Q_p$  se v tem primeru glasi:

$$Q_p = v_{f,u} \cdot A_p = \frac{k_f}{2} \cdot A_p \quad (11)$$

- $Q_p$  ... stopnja infiltracije [m<sup>3</sup>/s],  
 $A_p$  ... ponikalna površina [m<sup>2</sup>],  
 $k_f$  ... koeficient hidravlične prevodnosti zasičene zemljine [m/s].

Trajanje  $D$ , ki nastopa v enačbi (4), je potrebno določiti iterativno. Merodajno je tisto trajanje  $D$ , pri katerem je potrebna zadrževalna prostornina objekta  $V$  največja. Ponikalno površino  $A_p$  moramo izračunati za vsak tip ponikalnega objekta posebej. Ta je v primeru ponikalnega jaška enaka:

$$A_p = \pi \cdot \frac{d_e^2}{4} + \pi \cdot d_e \cdot \frac{z}{2} \quad (12)$$

- $A_p$  ... ponikalna površina [m<sup>2</sup>],  
 $d_e$  ... zunanji premer jaška [m],  
 $z$  ... maksimalna višina vode v jašku [m].

Zadrževalni volumen pa lahko izrazimo z enačbo:

$$V = \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot z \quad (13)$$

- $d_i$  ... notranji premer jaška [m].

Če v enačbo (4) vstavimo enačbi (12) in (13), dobimo izraz za maksimalno višino vode v jašku  $z$ :

$$z = \frac{\left( A_{imp} \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - \frac{\pi \cdot d_e^2 \cdot k_f}{4} \right)}{\frac{d_i^2 \cdot \pi}{4 \cdot D \cdot 60 \cdot f_S} + \frac{d_e \cdot \pi \cdot k_f}{4}} \quad (14)$$

Pri dimenzioniranju ponikalnega jaška izberemo premer jaška, zadrževalno višino pa izračunamo za nalive z različnim trajanjem. Merodajen je naliv s tistim trajanjem, pri katerem dobimo največjo vrednost višine  $z$ .

V primeru cevnih ponikalnih jarkov je ponikalna površina  $A_p$  enaka produktu dolžine ponikalnega jarka  $l_{PJ}$  in efektivne širine ponikanja  $b_{PJ,P}$ , ki jo izračunamo s pomočjo enačbe:

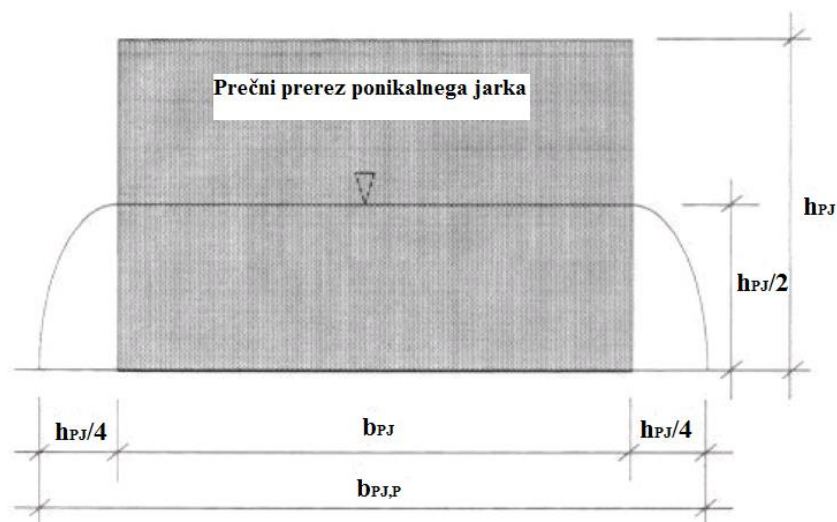
$$b_{PJ,P} = b_{PJ} + \frac{2 \cdot h_{PJ}}{4} = b_{PJ} + \frac{h_{PJ}}{2} \quad (15)$$

$b_{PJ,P}$  ... efektivna ponikalna širina cevnega ponikalnega jarka [m],

$b_{PJ}$  ... širina cevnega ponikalnega jarka [m],

$h_{PJ}$  ... višina cevnega ponikalnega jarka [m].

Pomen parametrov v enačbi (15) je prikazan na sliki 18.



Slika 18: Efektivna širina ponikanja v primeru ponikalnega jarka (prirejeno po DWA-A-138E, 2005).

Figure 18: Effective percolation width of the infiltration trench (adapted from DWA-A-138E, 2005).

Površino ponikanja lahko torej izračunamo po enačbi:

$$A_p = b_{PJ,P} \cdot l_{PJ} = \left( b_{PJ} + \frac{h_{PJ}}{2} \right) \cdot l_{PJ} \quad (16)$$

Ob upoštevanju enačb (4), (15) in (16) lahko zapišemo enačbo za izračun volumna cevnega ponikalnega jarka  $V_{PJ}$ :

$$V_{PJ} = \left[ A_{imp} \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - \left( b_{PJ} + \frac{h_{PJ}}{2} \right) \cdot l_{PJ} \cdot \frac{k_f}{2} \right] \cdot D \cdot 60 \cdot f_S \quad (17)$$

Po drugi strani lahko volumen cevnega ponikalnega jarka zapišemo tudi kot:

$$V_{PJ} = b_{PJ} \cdot h_{PJ} \cdot l_{PJ} \cdot s_{cpj} \quad (18)$$

$s_{cpj}$  ... skladiščni koeficient cevnega ponikalnega jarka, ki določa efektivni del prečnega prereza, tj. prečni prerez perforirane cevi in prečni prerez por v nasutem materialu.

Če predpostavimo, da je debelina perforirane cevi zanemarljiva, lahko enačbo za skladiščni koeficient zapišemo kot:

$$s_{CPJ} = \frac{s_{PJ}}{b_{PJ} \cdot h_{PJ}} \cdot \left[ b_{PJ} \cdot h_{PJ} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left( \frac{1}{s_{PJ}} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

Enačbi (17) in (18) združimo in dolžino cevnega ponikalnega jarka  $l_{CPJ}$  izrazimo kot:

$$l_{CPJ} = \frac{A_{imp} \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)}}{\frac{b_{PJ} \cdot h_{PJ} \cdot s_{CPJ}}{D \cdot 60 \cdot f_S} + \left( b_{PJ} + \frac{h_{PJ}}{2} \right) \cdot \frac{k_f}{2}} \quad (20)$$

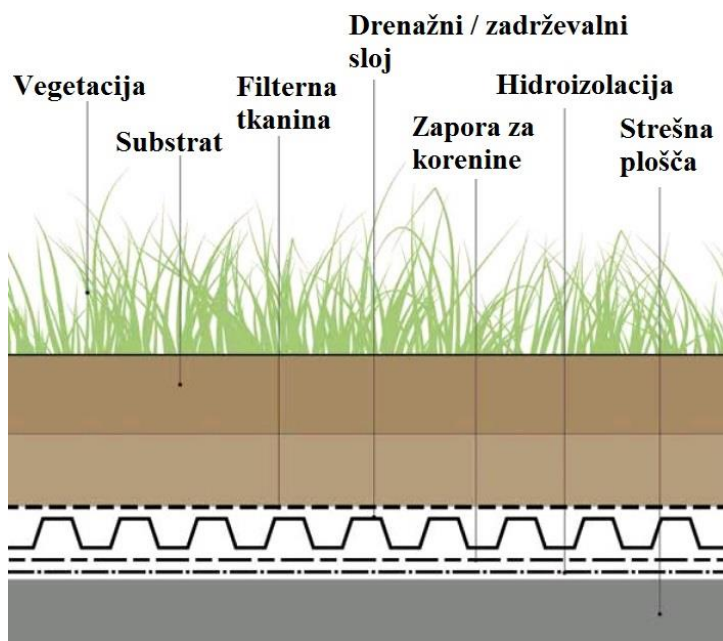
$l_{CJ,P}$  ... dolžina cevnega ponikalnega jarka [m],

Dolžino cevnega ponikalnega jarka  $l_{CPJ}$  izračunamo za nalive z različnim trajanjem. Merodajen je tisti naliv, pri katerem dobimo najdaljšo dolžino  $l_{CPJ}$ .

## 2.5.2 Zelene strehe

Zelene strehe so strehe objektov prekrte s plastmi iz različnih materialov, ki omogočajo uspevanje določene vrste vegetacije in zagotavljajo ustrezno skladiščenje in odvajanje padavinske vode. Ena izmed plasti je substrat za rast rastlin, pod katero se nahaja drenažni sloj, ki odvaja odvečno padavinsko vodo. Ta je lahko dimenzioniran tako, da padavinsko vodo v določeni meri tudi zadrži.

Med drenažnim slojem in substratom je filtrna tkanina, ki preprečuje vstop finim delcem v drenažni sloj. Pod drenažnim slojem se nahaja hidroizolacija in pa material, ki koreninam preprečuje, da bi hidroizolacijo poškodovale. Rastlinska združba, ki uspeva na zelenih strehah, mora biti prilagojena na daljša sušna obdobja in visoke temperature, tolerirati pa mora tudi krajša obdobja preplavitve (CIRIA, 2015; Low Impact Development Center, Inc., 2014). Tipične komponente zelene strehe so prikazane na sliki 19.



Slika 19: Tipične komponente zelene strehe (prirejeno po CIRIA, 2015).

Figure 19: Typical extensive green roof components (adapted from CIRIA, 2015).

V grobem zelene strehe delimo na ekstenzivne in intenzivne ter semi-intenzivne zelene strehe (CIRIA, 2015). Za ekstenzivne zelene strehe je značilna majhna debelina substrata, ki se giblje med 20 mm in 150 mm in enostavna rastlinska združba. Ker so lahke, jih lahko uredimo tudi na obstoječih objektih. Ekstenzivne zelene strehe so primerne za ravne strehe in strehe z naklonom do 1:3. Praviloma so dostopne samo za vzdrževanje. Vzdrževanje je enostavno in poceni. Za intenzivne strehe pa je po drugi strani značilna večja debelina substrata, ki znaša več kot 150 mm. Na takih strehah je urejena bolj kompleksna zasaditev, ki jo sestavljajo različne trave, grmovnice in tudi drevesa. Poleg tega na takih strehah lahko skladiščimo padavinsko vodo za zalivanje ali pa oblikujemo vodne površine. Predstavljajo precej veliko obtežbo in so zahtevne za vzdrževanje. Pri semi-intenzivnih strehah debelina substrata znaša med 100 mm do 200 mm. Pri njih se prepletajo lastnosti ekstenzivnih in intenzivnih zelenih streh (CIRIA, 2015).



Namestitev zelenih streh na obstoječe objekte običajno ni težavna, če je nosilnost strehe zadostna in je mogoča namestitev ustrezne hidroizolacije. Če nosilnost ne zadostuje, je streho potrebno prej ojačati. Da bi bila obtežba, ki jo predstavlja zelena streha, čim manjša, je substrat običajno sestavljen iz lahkih mešanic organskih in anorganskih materialov (CIRIA, 2015).

Del padavin, ki prispejo na zeleno streho, prestreže vegetacija, del jih izhlapi v ozračje, del pa se infiltrira v substrat za rast rastlin ali pa potuje naprej do drenažnega sloja. Hidravlična prevodnost zelenih streh je običajno dovolj velika, da je stopnja infiltracije večja od intenzitete padavin tudi v primeru zelo intenzivnih dogodkov (Beattie and Berghage, 2004; Villarreal and Bengtsson, 2005, cit. po Martin, 2008; Miller, 2003). Maksimalno skladiščno kapaciteto zelenih streh zagotavljajo skladiščna kapaciteta vegetacije, skladiščna kapaciteta substrata za rast rastlin in skladiščna kapaciteta drenažnega sloja, pri čemer največji del skladiščne kapacitete zagotavlja substrat (Martin, 2008). Zelene strehe običajno zadržijo večino padavin s kratko povratno dobo, v primeru večjih dogodkov pa se obnašajo bolj ali manj kot običajne strehe. Učinkovitost streh se spreminja z letnim časom. V naših klimatskih razmerah je največja poleti, ko je stopnja evapotranspiracije najvišja. Skladiščna kapaciteta zelene strehe je zelo odvisna tudi od predhodne vlažnosti. V hladnejšem in bolj mokrem obdobju je lahko tudi ves čas zapolnjena (Martin, 2008; CIRIA, 2015).

### **2.5.2.1 Izbira vrste in dimenzij zelenih streh na obravnavanem območju**

Podatkov o nosilnosti streh na obravnavanem območju nismo imeli na voljo, zato smo predpostavili, da bomo v vseh primerih, kjer je naklon strehe manjši od 1:3, uporabili ekstenzivne zelene strehe z najmanjšo debelino substrata, ki je glede na smernice v priročniku za sonaravno upravljanje s padavinsko vodo (CIRIA, 2015) še priporočljiva. Ta debelina znaša 80 mm in še omogoča zasaditev dovolj raznolike rastlinske združbe (CIRIA, 2015). Poleg tega nekatere raziskave v Nemčiji kažejo na to, da je načrtovanje zelenih streh z debelino substrata 80 mm najbolj ekonomično (EPA, 2000). Skladiščno kapaciteto zelenih streh z 80 mm substrata smo določili na podlagi ugotovitev nekaterih raziskav, ki so opisane v nadaljevanju.

Paudel (2009) v svojem delu povzema izsledke številnih raziskav in ugotavlja, da se pri zelenih strehah z debelino substrata od 30 mm do 100 mm, skladiščna kapaciteta giblje med 5 mm in 40 mm. V svoji raziskavi, v kateri je s pomočjo enostavnega bilančnega modela in podatkov o padavinah in površinskih odtokih z zelene strehe določal učinkovitost zelene strehe z debelino substrata 100 mm, ugotavlja, da znaša maksimalna skladiščna kapaciteta take strehe 16,5 mm. Podobne rezultate sta v

svoji raziskavi dobila tudi avtorja Liu in Minor (2005), ki ugotavljata, da s streh z lahkim substratom debeline 75 mm in 100 mm pri dogodkih, ki so manjši od 15 mm, ne pride do odtoka, če pred tem vsaj 6 dni ni deževalo. Moran et al. (2003) v svoji raziskavi, v kateri so merili padavine in pretoke z dveh zelenih streh (ena z blagim naklonom 3 % in druga ravna) z debelino substrata 51 mm in 102 mm, ugotavljajo, da lahko omenjeni strehi v povprečju uskladiščita 12,7 mm padavin. V drugi raziskavi (VanWoert, 2005, cit. po Paudel, 2009), kjer so preučevali zelene strehe s substratom, narejenim iz mešanice ekspaniranega skrilavca, peska in komposta, ugotavljajo, da ima v primeru debeline substrata 40 mm taka zelena streha skladiščno kapaciteto 7,5 mm, v primeru debeline substrata 55 mm kapaciteto 10 mm in v primeru debeline substrata 80 mm kapaciteto 15 mm. Fassman-Beck in Simcock (2013) v podobni raziskavi ugotavljata, da je maksimalna skladiščna kapaciteta streh s 100 mm do 150 mm debelim substratom enaka 20 mm. Če povzamemo ugotovitve vseh zgoraj omenjenih raziskav, lahko zaključimo, da maksimalna skladiščna kapaciteta zelenih streh z debelino substrata 80 mm znaša približno 15 mm.

## 2.6 Modeliranje odtoka

Izbira ustreznega programskega orodja za analizo vpliva sonaravnih ukrepov na hidrologijo prispevnega območja je odvisna od lastnosti prispevnega območja, kompleksnosti hidrološke analize, ki jo izvajamo, izkušenj, ki jih imamo s posameznimi modeli in od tega kako podrobno želimo problem analizirati. Nekateri modeli uporabljajo poenostavljene metode za oceno hidroloških spremenljivk, drugi pa omogočajo podrobno predstavitev hidroloških procesov (Prince George's County, 1999). Glede na cilje, ki smo jih zastavili v nalogi in glede na prej naštetje kriterije, smo za modeliranje odtoka z obravnavanega prispevnega območja izbrali programsko orodje HEC-HMS (USACE, 2015a).

Programsko orodje HEC-HMS so razvili na hidrološkem inženirskem centru (Hydrologic Engineering Center – HEC), ki deluje pod okriljem ameriške vojske (US Army Corps of Engineers). Prvo različico, ki se je imenovala HEC-1 in je bila razvita za DOS okolje, so predstavili že leta 1968 (Brilly, 1993). Novo in posodobljeno verzijo programa, ki se imenuje HEC-HMS in je prilagojena za delo v programskem okolju Windows, pa leta 1998. Zadnja različica 4.1 je izšla julija 2015. Program omogoča simulacijo odtoka na razvejanih (dendritičnih) sistemih prispevnih območjih. Uporaben je na različnih geografskih območjih in za različne tipe analiz. S programom HEC-HMS lahko preučujemo poplavne razmere na obsežnih prispevnih območjih ali pa odtok z manjših urbaniziranih območij (USACE, 2015b).

Program sestavljajo tri osnovne komponente oziroma modeli. To so model prispevnega območja, meteorološki model in kontrolni model. V modelu prispevnega območja je potrebno opredeliti posamezne komponente prispevnega območja (podpovodja, odseki, vozlišča, rezervoarji, preusmeritve, izvori in ponori) ter izbrati metode za izračun volumna površinskega odtoka, neposrednega odtoka, baznega odtoka in toka v strugi vodotoka.

V novejših verzijah programa HEC-HMS sta dodani tudi možnosti modeliranja prestreženih padavin (Canopy Method) in površinskega nabiranja v depresijah (Surface Method). Za modeliranje prestreženih padavin sta na voljo naslednji metodi:

- dinamična metoda, ki upošteva spreminjanje faktorja rastlin v času,
- enostavna in enostavna mrežna metoda.

Za modeliranje površinskega nabiranja vode v depresijah sta na voljo enostavna in enostavna mrežna metoda.

Za izračun padavinskih izgub so v programu HEC-HMS na voljo naslednje metode (Feldman, 2000):

- metoda začetnih in enakomernih izgub,
- metoda deficita in enakomernih izgub,
- metoda SCS oziroma mrežna metoda SCS,
- metoda Green-Ampta,
- metoda stalnega računa vlažnosti zemljine (Soil Moisture Accounting – SMA) oziroma mrežna metoda stalnega računa vlažnosti zemljine (Gridded SMA).

Volumen površinskega odtoka program izračunava tako, da padavinske izgube odšteje od vseh padavin, ki so padle na prispevno območje. Program HEC-HMS loči dva tipa površin, in sicer neposredno povezane neprepustne površine in prepustne površine. Vse padavine, ki prispejo na neposredno povezane neprepustne površine, odtečejo v obliki neposrednega odtoka. Na takih površinah model ne izračunava izgub. Neposredno povezane neprepustne površine so na primer tiste površine, ki imajo površinski odtok odveden neposredno v kanalizacijski sistem. Delež neposredno povezanih neprepustnih površin je potrebno podati v modelu za izračun padavinskih izgub.

Metode za izračun neposrednega odtoka pretvorijo efektivne padavine v točkovni odtok. Za to so na voljo štiri empirične metode hidrograma enote in ena konceptualna metoda. Metode hidrograma enote, ki so vključene v program HEC-HMS, so (Feldman, 2000):

- uporabniško določen hidrogram enote,

- Snyderjev hidrogram enote,
- SCS hidrogram enote,
- Clarkov hidrogram enote,
- modificiran Clarkov model,

od konceptualnih metod pa je v program HEC-HMS vključena metoda kinematičnih valov.

»Bazni odtok je del pretoka vode, ki doteka v strugo v daljših obdobjih brez padavin ali brez taljenja snežne odeje« (Mikoš et al., 2002, str. 32). Za izračun baznega odtoka so v programu na voljo (Feldman, 2000):

- metoda konstantnega mesečnega baznega odtoka,
- eksponentna recesijska metoda,
- metoda linearne rezervoarja, ki se uporablja v povezavi z modelom stalnega računa vlažnosti zemljine (SMA).

Program HEC-HMS vsebuje tudi več metod za propagacijo vala v strugi vodotoka (zakasnitvena metoda, Muskingumova metoda, modificirana plus metoda, metoda kinematičnih valov, Muskingum Cunge-ova metoda).

### 2.6.1 Metoda za izračun prestreženih padavin

Za izračun vpliva vegetacije na odtok s prispevnega območja smo uporabili t. i. enostavno metodo prestrezanja (Simple Canopy Method), ki simulira prestrezanje padavin in evapotranspiracijo. Metoda predpostavlja, da vegetacija zadrži vse padavine, dokler skladiščna kapaciteta ni zapolnjena. Ko je skladiščna kapaciteta vegetacije enkrat zapolnjena, pa vse nadaljnje padavine prispejo bodisi v površinske depresije bodisi do tal. Evapotranspiracijo model izračunava v obdobju med dvema padavinskima dogodkoma. Padavinska voda se izgublja v ozračje najprej na račun skladiščne kapacitete vegetacije, šele nato na račun padavinske vode, uskladiščene v površinskih depresijah ali v tleh (USACE, 2015b).

Pri tej metodi je potrebno podati delež skladiščne kapacitete vegetacije, ki je na začetku simulacije zapolnjen z vodo, maksimalno količino vode oziroma efektivno debelino vodne plasti (v mm), ki jo vegetacija lahko zadrži in faktor rastlin  $k_c$  ter izbrati metodo, po kateri bo program izračunaval količino vode, ki se iz zemljine izgublja v ozračje. V ta namen je mogoče izbirati med enostavno in tenzijsko metodo. Izbrali smo enostavno metodo, ki predpostavlja, da se voda iz zemljine izgublja v

ozračje s stopnjo potencialne evapotranspiracije (USACE, 2015b). Potencialna evapostranspiracija je produkt referenčne evapotranspiracije  $ET_0$  in faktorja rastlin  $k_c$ . Predstavlja količino vode, ki jo rastlina potrebuje za nemoten razvoj (Pintar, 2006) oziroma količino vode, ki se izgubi v ozračje na račun talnega izhlapevanja in rastlinske transpiracije na določenem območju in v določenem časovnem obdobju, izražamo pa jo z višino (Mikoš et al., 2002).  $ET_0$  program HEC-HMS izračunava v meteorološkem modelu,  $k_c$  pa moramo načeloma podati v modelu za izračun prestreženih padavin.

## 2.6.2 Metoda za izračun padavinskih izgub

Za izračun padavinskih izgub smo izbrali metodo SCS, saj je za izvajanje hidroloških analiz na področju sonaravnega upravljanja s padavinsko vodo med raziskovalci zelo razširjena. V ta namen jo priporočajo tudi na Oddelku za naravne vire okrožja Prince Georges County v zvezni državi Maryland (ZDA), kjer so v začetku 90-tih let postavili temelje sonaravnega upravljanja s padavinsko vodo (LID) in v sodelovanju z Agencijo za zaščito okolja iz ZDA (Environmental Protection Agency – EPA) vzpostavili smernice za to področje (Coffman, 2000; Sample et al., 2001). Po teh smernicah se zgledujejo številni priročniki za upravljanje s padavinsko vodo v ZDA in po svetu. Vpliv sonaravnih ukrepov na zmanjšanje volumna odtoka so s pomočjo metode SCS-CN preučevali tudi številni avtorji (Ahiablame et al., 2012; Ahiablame et al., 2013; Brander et al., 2004; Carter in Jackson, 2007; Damodaram et al., 2010; Getter et al., 2007; Holman-Dodds et al., 2003; Jeon et al., 2010; Juan et al., 2013; Khendun et al., 2009; Liu et al., 2015; Perez-Pedini et al., 2005; Rose in Hodges, 2010; Sin et al., 2014; Yoo et al., 2013).

Metodo SCS so razvili v Službi za zaščito naravnih virov, na oddelku za kmetijstvo ZDA (US Department of Agriculture – USDA, Natural Resources Conservation Service – NRCS), ki se je večasih imenoval Služba za zaščito zemljine (Soil Conservation Service – SCS) (Ahiablame et al., 2012). Koncept SCS metode predpostavlja, da je kvocient med globino vode, ki je zadržana na prispevnem območju  $F_a$  in potencialnim maksimalnim skladiščnim volumnom  $S$  enak kvocientu med neposrednim odtokom  $P_e$  (efektivne padavine) in potencialnim odtokom oziroma razliko med padavinami  $P$  in začetnimi izgubami  $I_a$  (Chow et al., 1988, cit. po Sample et al., 2001). To zapišemo kot:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (21)$$

Z uporabo načela kontinuitete, lahko zgornjo enačbo zapišemo kot (USDA, 1986):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (22)$$

$Q$  ... površinski odtok [mm],

$P$  ... padavine [mm],

$S$  ... maksimalna potencialna retenzija povodja potem, ko se prične površinski odtok [mm],

$I_a$  ... začetne izgube [mm].

Začetne izgube so enake količini padavin, ki pade na prispevno območje preden se začne površinski odtok. K začetnim izgubam štejemo vse padavine, ki se bodisi zadržijo v površinskih depresijah bodisi jih prestreže vegetacija in padavine, ki v procesu evapotranspiracije izhlapijo v ozračje ali pa poniknejo v tla. Čeprav je parameter  $I_a$  zelo spremenljive narave, ga v splošnem lahko povežemo z lastnostmi zemljine in pokrovnostjo tal. Glede na raziskave, ki so potekale na številnih manjših kmetijskih prispevnih območjih, je bila za določitev začetnih izgub  $I_a$  podana naslednja empirična enačba:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (23)$$

Če enačbo (23) vstavimo v enačbo (22), dobimo:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (24)$$

Potencialna maksimalna retenzija je z lastnostmi zemljine in rabo tal povezana preko koeficienta  $CN$ :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (25)$$

Uporaba metode SCS-CN je v svetu zelo razširjena. Raziskovalci jo uporabljajo za modeliranje površinskega odtoka v najrazličnejših okoljih. Čeprav gre za razmeroma enostavno metodo, ki temelji le na enem parametru, pa v splošnem daje vsaj tako dobre rezultate kot bolj kompleksni hidrološki modeli (Lastra et al., 2008, cit. po Suriya in Mudgal, 2012). Prednost metode je tudi v tem, da je razpon vrednosti koeficienta  $CN$  razmeroma majhen in se v praksi giblje med 40 in 98. Sicer pa ima metoda SCS tudi nekatere pomanjkljivosti (Ponce in Hawkins, 1996):

- Razvili so jo na podlagi raziskav, ki so potekale na manjših kmetijskih prispevnih območjih v ZDA, zato je pri uporabi te metode na drugih območjih potrebna previdnost.

- Vrednosti koeficientov  $CN$  opisujejo povprečne odtočne razmere na prispevnem območju, zato se metoda SCS najbolj obnese v primeru manjših območij.
- Metoda ne upošteva intenzitete padavinskega dogodka.
- Zveza  $I_a = \lambda S = 0,2S$  je bila določena na podlagi podatkov, ki so bili pridobljeni na kmetijskih območjih. Koeficient začetnih izgub pa  $\lambda$  bi sicer lahko opredelili tudi kot regionalni parameter, ki odraža regionalne geološke in podnebne vplive in je načeloma odvisen od lokacije prispevnega območja.
- S pomočjo metode SCS ne moremo izračunati površinskega odtoka, ki je posledica tajanja snežne odeje, in odtoka z zamrznjenih tal.
- Pri padavinah, manjših od 13 mm, je metoda SCS manj zanesljiva.
- Uporabimo jo lahko samo za izračun površinskega odtoka, ne pa tudi za izračun podpovršinskega odtoka ali odtoka, ki nastane zaradi visoke podtalnice.

### 2.6.2.1 Koeficient $CN$

Koeficient  $CN$  lahko zavzame vrednosti od 1 do 100. Določimo ga lahko na različne načine. Najpogostejši način določanja  $CN$  je uporaba preglednic, ki so objavljene v dokumentu z naslovom Technical Report 55 (USDA, 1986). Glavni faktorji, ki določajo koeficient  $CN$ , so hidrološka skupina zemljine, pokrovnost ali raba tal, način obdelave tal, hidrološki pogoji in predhodna vlažnost tal (USDA, 1986). Poznamo 4 vrste hidroloških skupin zemljin, ki se med seboj razlikujejo glede na minimalno stopnjo infiltracije, ki nastopi, ko so tla zasičena z vodo (in sicer A, B, C, D). Vrsto pokrovnosti tal lahko določamo na različne načine, na primer s terenskimi ogledi, ortofoto posnetki in kartami rabe tal. Način obdelave tal (oranje, terasiranje pa tudi kolobarjenje) se nanaša predvsem na kmetijske površine in pri urbaniziranih površinah ne igra nobene vloge. Hidrološki pogoji nam povedo, kako pokrovnost in obdelava tal vplivata na infiltracijo padavinske vode in površinski odtok. Dobri hidrološki pogoji pomenijo, da je odtočni potencial pri določeni hidrološki skupini zemljin, pokrovnosti in obdelavi tal, nizek. Koeficient  $CN$  je odvisen tudi od predhodnih pretočnih razmer na območju. Vrednosti koeficienta  $CN$ , ki so podane v preglednici 2 veljajo za povprečne odtočne razmere na prispevnem območju (USDA, 1986).

Preglednica 2: Koeficienti *CN* za urbanizirane površine (povzeto po USDA, 1986).

Table 2: Runoff curve numbers for urban areas (adapted from USDA, 1986).

Raba tal	% neprep. površin	Vrednosti <i>CN</i> glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
<b><i>Odperte površine (parki, nasadi, golf igrišča, pokopališča itd.)</i></b>					
slabi pogoji (pokritost s travo < 50 %)		68	79	86	89
povprečni pogoji (pokritost s travo 50 % do 75 %)		49	69	79	84
dobri pogoji (pokritost s travo > 75 %)		39	61	74	80
<b><i>Neprepustne površine</i></b>					
tlakovane površine, strehe, ceste		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z robniki in kanaliziranimi odtoki		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z odprtimi kanali		83	89	92	93
makadamske ceste (pesek)		76	85	89	91
neobdelane poti (zemlja)		72	82	87	89
<b><i>Urbana območja</i></b>					
komercialna in poslovna območja	85	89	92	94	95
industrijska območja	72	81	88	91	93
<b><i>Stanovanjske površine</i></b>					
povprečna velikost parcele do 500 m <sup>2</sup>	65	77	85	90	92
povprečna velikost parcele 1000 m <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
povprečna velikost parcele do 1300 m <sup>2</sup>	30	57	72	81	86
povprečna velikost parcele do 2000 m <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
povprečna velikost parcele do 4000 m <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
povprečna velikost parcele do 8000 m <sup>2</sup>	12	46	65	77	82

Na urbaniziranih območjih je lahko zemljina zelo spremenjena, zato je pri določanju hidrološke skupine potrebno biti še posebej pozoren. Raziskav na tem področju ni veliko. Običajno avtorji v primeru zemljin, ki so bile podvržene kompaktiranju, hidrološko skupino povečajo za en razred ali pa predpostavijo, da zemljina spada v hidrološko skupino D. Prvi pristop so svoj čas priporočali v dokumentu USDA-NRCS iz leta 1975 (OCSCD, 2001), vendar so ta priporočila, zaradi pomanjkanja podatkov, kasneje umaknili (OCSCD, 2001; Woodward, 2008, cit. po Woltemade, 2010). Smiselnost drugega pristopa pa so potrdili nekateri avtorji v svojih raziskavah (Lim et al., 2006; OCSCD, 2001).

Kadar je na prispevnem območju prisotnih več vrst rabe tal ali tipov zemljin, lahko kompozitni *CN* izračunamo po enačbi (Feldman, 2000):

$$CN_{kompozitni} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (26)$$



- $CN_{kompozitni}$  ... kompozitna vrednost koeficienta  $CN$  na prispevnem območju,  
 $CN_i$  ... koeficient  $CN$  na delu prispevnega območja  $i$ , ki ima enotno rabo tal in enotni tip zemljine,  
 $A_i$  ... površina dela prispevnega območja, ki ima enotno rabo tal in enotni tip zemljine [ $m^2$ ].

Neposredno povezanih neprepustnih površin ne smemo upoštevati pri izračunu kompozitne vrednosti koeficienta  $CN$  (USACE, 2015b).

### **2.6.2.2 Določanje koeficientov $CN$ za območja s sonaravnimi ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom**

Vrednosti koeficientov  $CN$  za območja s sonaravnimi ukrepi za upravljanje s površinskim odtokom v dokumentu Technical Report 55 niso podane. Za določitev koeficientov  $CN$  so avtorji posameznih raziskav v takih primerih uporabili različne metode. Nekateri (Ahiablame et al., 2012; Ahiablame et al., 2013; Damodaram et al., 2010; Juan et al., 2013; Liu et al., 2015; Rose in Hodges, 2010) so povzeli vrednosti, ki so jih v svojih raziskavah podali drugi avtorji, določeni avtorji pa svoje izbire sploh niso utemeljili (Sample et al., 2001). Nekateri avtorji (Carter in Jackson, 2007; Getter et al., 2007) so vrednosti koeficientov  $CN$  pridobili na podlagi meritev. Avtorji Damodaram et al. (2010) so vrednost koeficienta  $CN$  za prepustne asfalte določili tako, da so parameter  $S$  v enačbi (25) izenačili s prostornino por oziroma efektivno skladiščno kapaciteto prepustnega tlakovanja. To metodo so povzeli po priročniku za program HydroCAD (HydroCAD Software Solutions LLC., 2011), ki navaja, da je tak način določevanja koeficienta  $CN$  primeren tudi za zelene strehe. Vrednost koeficienta  $CN$  za strehe, ki imajo površinski odtok odveden v cisterne za zbiranje deževnice, pa so določili tako, da so parameter  $I_a$  iz enačbe (22) izenačili z volumnom cisterne na enoto površine. Podoben pristop za določitev vrednosti koeficienta  $CN$  za prepustne asfalte in strehe, ki so priključene na cisterne za zbiranje deževnice, so izbrali tudi avtorji Khendun et al. (2009). Ti so parameter  $I_a$  izenačili z višino padavin, ki je značilna za nevihto, na katero so dimenzionirani sistemi prepustnega tlakovanja oziroma cisterne za zbiranje deževnice, nato pa koeficient  $CN$  izračunali s pomočjo enačb (23) in (25). Povsem drugačen pristop so uporabili avtorji Yoo et al. (2013), ki so s pomočjo modificirane racionalne metode za namišljeno okroglo prispevno območje najprej določili hidrograme odtoka za različne povratne dobe in trajanja padavin. Na podlagi tako dobljenih hidrogramov so določili volumno površinskega odtoka od katerih so odšteli volumen izbranega objekta za skladiščenje padavinske vode. Spremembo koeficienta  $CN$  zaradi implementacije objekta za skladiščenje padavinske vode so določili

s pomočjo enačb (23), (24) in (25). Rezultat te raziskave je diagram, ki prikazuje zmanjšanje koeficienta  $CN$  v odvisnosti od skladiščnega volumna objekta za upravljanje s padavinsko vodo, povratne dobe in trajanja padavin ter od koeficienta odtoka s prispevnega območja. To metodo so na konkretnem primeru uporabili avtorji Sin et al. (2014), ki so določali koeficient  $CN$  za prispevno območje, ki ima površinski odtok odveden v infiltracijski kolektor oziroma infiltracijski jarek. Skladiščno kapaciteto omenjenih dveh objektov so določili s pomočjo programa SEEP/W, ki s pomočjo metode končnih elementov analizira porazdelitev pritiskov in gibanje vode v poroznem mediju, upošteva pa lahko tako zasičeno kot nezasičeno stanje.

Koeficient  $CN$  za območja z objekti za ponikanje padavinske vode lahko določimo tudi s pomočjo enačbe, ki jo je Hawkins (1973) prvotno podal za določitev maksimalne potencialne retenzije povodja  $S$ :

$$S = 5 \cdot [P + 2 \cdot Q - (4 \cdot Q^2 + 5 \cdot P \cdot Q)^{1/2}] \quad (27)$$

$P, Q$  ... izmerjene padavine [mm] in pripadajoči izmerjeni pretoki [mm]; ( $0 < Q < P$ ),

$S$  ... maksimalna potencialna retenzija povodja [mm].

Če enačbo (25) združimo z enačbo (27) dobimo izraz za izračun koeficienta  $CN$  (MDE, 1983):

$$CN = \frac{25400}{5 \cdot (P + 2 \cdot Q - \sqrt{4 \cdot Q^2 + 5 \cdot P \cdot Q}) + 254} \quad (28)$$

Enačbo (28) za modeliranje vpliva objektov za ponikanje padavinske vode na površinski odtok uporablja tudi program za hidrološko modeliranje TR-20 (MDE, 1983), v ta namen pa jo priporočajo tudi številni priročniki za upravljanje s padavinsko vodo iz ZDA oziroma nekateri drugi avtorji (Comprehensive Environmental Inc., 2012; MDE, 2012; State of Delaware, 2015; Whitters & Ravenel, 2006; Whitters & Ravenel, 2012; Zomorodi, 2015). Glede na priročnik za modeliranje objektov za ponikanje padavinske vode s pomočjo programa TR-20 (MDE, 1983) je pri uporabi enačbe (28) za določitev koeficienta  $CN$  za prispevna območja z objekti za ponikanje parameter  $Q$  potrebno interpretirati kot razliko med višino površinskega odtoka s prispevnega območja objekta  $Q_{dot,pon}$  [mm] pri izbranem nalivu  $P$  in višino površinskega odtoka  $Q_{skl}$  [mm], ki ga objekt za ponikanje lahko uskladišči. Enačba za izračun parametra  $Q$  se torej glasi:

$$Q = Q_{dot.pon} - Q_{skl} \quad (29)$$

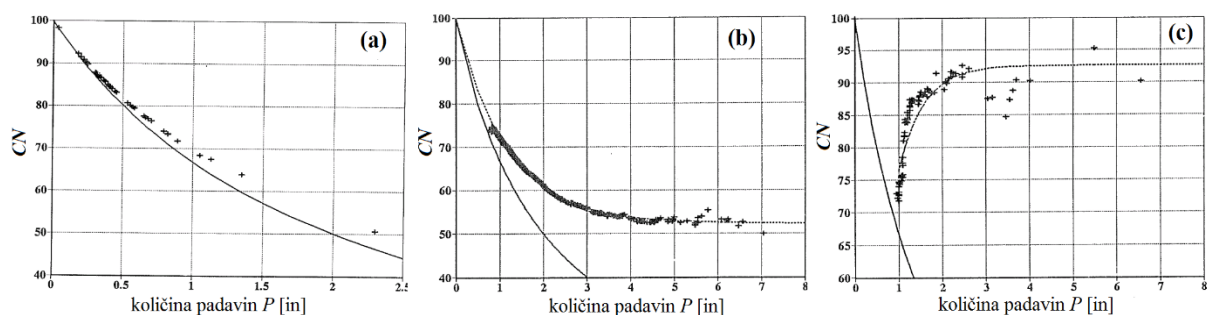
$Q_{dot.pon}$  lahko za določen naliv  $P$  izračunamo s pomočjo enačb (24) in (25), pri čemer moramo za koeficient  $CN$  v enačbi (25) vzeti kompozitno vrednost koeficienta  $CN$  za prispevno območje objekta za ponikanje padavinske vode, ki jo določimo s pomočjo enačbe (26) in vrednosti koeficientov  $CN$ , ki so podane v tabeli 2.  $Q_{skl}$  posameznega objekta za ponikanje lahko določimo na podlagi dotoka padavinske vode, na katerega je ta objekt dimenzioniran (MDE, 2012). V našem primeru smo  $Q_{skl}$  za posamezen objekt izračunali tako, da smo parameter  $Q_{in}$  [ $m^3/s$ ], ki nastopa v enačbi (5) (poglavje 2.5.1), delili z vsoto vseh prispevnih površin tega objekta  $\sum A_{C,i}$  [ $m^2$ ] in množili s trajanjem naliva  $D$  [min], na katerega je objekt dimenzioniran ter s faktorjem  $10^3$ , da smo  $Q_{skl}$  dobili v milimetrih.

Poleg omenjenega načina interpretacije skladiščnega volumna objekta za ponikanje padavinske vode, nekateri priročniki navajajo še druge možnosti. Skladiščno kapaciteto na primer lahko izenačimo z volumnom, ki ga izračunamo na podlagi dimenzij ponikalnega objekta (Comprehensive Environmental Inc., 2012) ali pa parameter  $Q$  določimo s pomočjo empirične enačbe (Zomorodi, 2015).

S pomočjo enačbe (28) dobimo pri različnih padavinah  $P$  različne vrednosti koeficienta  $CN$ , za modeliranje pa potrebujemo eno vrednost, ki bo odražala odtočne razmere na posameznem prispevnem območju z objekti za ponikanje padavinske vode.

Kadar se vrednost koeficienta  $CN$  z večanjem količine padavin približuje določeni konstantni vrednosti, lahko to vrednost privzamemo kot vrednost koeficienta  $CN$ , ki je reprezentativna za obravnavano prispevno območje. Če koeficiente  $CN$  izračunamo po enačbi (28) s pomočjo podatkov o meritvah padavin in odtokov, ki jih razvrstimo po velikosti, nato pa po principu ujemanja povratnih dob združimo v pare, se med padavinami  $P$  in koeficienti  $CN$  skoraj vedno vzpostavi sekundarna zveza (Hawkins, 1993). Pri tem ni potrebno, da posamezen odtok lahko povežemo s točno določenimi padavinami, ki so ga povzročile, le povratne dobe padavin in odtokov se morajo ujemati. Princip ujemanja povratnih dob padavin in odtokov predpostavlja, da enačba (24) predstavlja transformacijo med porazdelitvijo višine padavin in porazdelitvijo višine površinskega odtoka. Najpogosteje se ta princip uporablja za izračun odtoka z določeno povratno dobo na podlagi podatkov o padavinah z isto povratno dobo (Hjelmfelt, 1980, cit. po Hawkins, 1993).

Ločimo 3 variante obnašanja zveze  $CN(P)$ , in sicer samozadostno (complacement), standardno (standard) ali divje (violent) obnašanje (Hawkins, 1993). Pri prvi varianti koeficient  $CN$  z naraščanjem padavin enakomerno upada in se ne približuje neki očitni konstantni vrednosti. Pri drugi varianti, ki je najpogostejša, z naraščanjem padavin  $CN$  enakomerno upada in se približuje konstantni vrednosti, pri tretji varianti pa sprva  $CN$  z naraščajočimi padavinami strmo upada, nato pa začne pri določenih padavinah strmo naraščati in se približevati konstantni vrednosti. Na sliki 20 je prikazan primer zveze  $CN(P)$  za prispevno območje West Donaldson Creek v Oregonu, ki je značilna za samozadostno obnašanje (a), primer zveze  $CN(P)$  za prispevno območje Coweeta v Severni Karolini, ki je značilna za standardno obnašanje (b) in primer zveze  $CN(P)$  za prispevno območje Berea v Kentuckyju, ki je značilna za divje obnašanje (c).



Slika 20: Primeri obnašanja zveze  $CN(P)$  (prirejeno po Hawkins, 1993).

Figure 20: Violent, standard and replacement behaviour of  $CN(P)$  relationship (adapted from Hawkins, 1993).

V primeru t. i. samozadostnega obnašanja z opisanim pristopom ne moremo določiti reprezentativne vrednosti koeficienta  $CN$  za prispevno območje, saj se koeficienti  $CN$  z naraščanjem padavin ne približujejo neki očitni konstantni vrednosti. V primeru t. i. standardnega in divjega obnašanja zveze  $CN(P)$  pa je ta vrednost očitna in odraža vrednost koeficienta  $CN$ , ki je reprezentativna za prispevno območje.

Opisane principe smo uporabili za določanje koeficientov  $CN$  za območja z objekti za ponikanje padavinske vode. Na podlagi podatkov o nalivih z različnimi povratnimi dobami, ki so podani v preglednici 3 (poglavje 2.6.4), smo s pomočjo enačbe (29) najprej izračunali odtoke z območij z objekti za ponikanje padavinske vode, nato pa smo s pomočjo enačbe (28) za ta območja izračunali ustrezne koeficiente  $CN$ . Tako dobljene pare  $P$ - $CN$  smo za posamezna območja nanizali na graf, nato pa določili vrednost, h kateri se koeficient  $CN$  približuje. To vrednost smo privzeli kot vrednost

koeficienta  $CN$ , ki odraža odtočne razmere posameznega območja z objekti za ponikanje padavinske vode.

V primeru zelenih streh smo koeficient  $CN$  določili s pomočjo enačbe (25), kot to priporoča priručnik za program HydroCAD (HydroCAD Software Solutions LLC., 2011). Pri tem smo predpostavili, da je parameter  $S$  enak skladiščni kapaciteti, ki jo glede na obstoječo literaturo, zagotavljajo zelene strehe z izbrano debelino substrata.

### 2.6.3 Metoda za izračun neposrednega odtoka

Izmed metod, ki so na voljo za izračun neposrednega odtoka s prispevnega območja, smo izbrali metodo uporabniško določenega hidrograma enote, saj smo imeli na voljo meritve padavin in pretokov. »Hidrogram enote trajanja  $T_d$  je definiran kot površinski odtok, ki ga povzroči enota efektivnih padavin 10 mm (v inženirski praksi ZDA 1 palec), ki so bile v času  $T_d$  enakomerno razporejene po povodju« (Brilly in Šraj, 2005, str. 44). Hidrogram enote je funkcija, ki ponazarja vplive vseh dejavnikov na površinski odtok, kot so oblika prispevnega območja, naklon površine, geološke lastnosti, prisotnost vegetacije, trajanje efektivnih padavin (Brilly in Šraj, 2005). Pri izračunu neposrednega odtoka s pomočjo hidrograma enote program HEC-HMS uporabi diskretno enačbo konvolucije za linearni sistem (Feldman, 2000):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (30)$$

$Q_n$  ... ordinata hidrograma odtoka pri času  $n\Delta t$ ,

$P_m$  ... efektivne padavine v časovnem intervalu od  $m\Delta t$  do  $(m+1)\Delta t$ ,

$M$  ... število posameznih pulzov padavin,

$U_{n-m+1}$  ... ordinata hidrograma enote pri času  $(n-m+1)\Delta t$ .

$Q_n$  in  $P_m$  sta izražena kot pretok oziroma kot debelina vodne plasti,  $U_{n-m+1}$  pa ima enote pretoka na enoto višine padavin. Postopek predpostavlja, da so efektivne padavine v času in prostoru razporejene enakomerno in da je vpliv predhodnih padavin na hidrogram odtoka zanemarljiv (Brilly in Šraj, 2005).

Če želimo skonstruirati hidrogram enote, moramo imeti na voljo ustrezne podatke meritev padavin in pretokov. Padavine morajo biti kratkotrajne in imeti konstantno intenziteto, zajeti pa morajo celotno

prispevno območje (Brilly in Šraj, 2005). Postopek konstrukcije hidrograma enote je naslednji (Feldman, 2000):

- Ocenimo izgube in jih odštejemo od padavin, ocenimo bazni odtok in ga ločimo od hidrograma celotnega odtoka s prispevnega območja.
- Izračunamo volumen neposrednega odtoka in ga pretvorimo v ekvivalentno višino vodnega stolpca na prispevnem območju.
- Ordinate hidrograma neposrednega odtoka delimo z ekvivalentno višino vodnega stolpca.
- Rezultat je hidrogram enote.

Kadar potrebujemo hidrogram enote s trajanjem  $T_2$ , ki je manjše od trajanja hidrograma enote  $T_1$ , ki ga imamo na voljo, si pomagamo s t. i. S-krivuljo, ki temelji na načelu superpozicije. »Vsota neskončne vrste enotnih hidrogramov trajanja  $T_1$  nam da hidrogram, katerega odtok je konstanten ter enak zmnožku površine povodja in enotnih padavin, deljenemu s časom trajanja  $T_1$ . Tak hidrogram zaradi njegove oblike imenujemo S-krivulja. Če sedaj hidrogram premaknemo po časovni osi za vrednost  $T_2$  in ga odštejemo od prvotnega hidrograma, razlika predstavlja novi hidrogram trajanja  $T_2$ , katerega odtok je v razmerju  $T_2/T_1$ . Želeni hidrogram dobimo tako, da ordinate slednjega delimo z vrednostjo razmerja  $T_2/T_1$ .« (Brilly in Šraj, 2005, str. 54).

V primeru modeliranja sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom smo predpostavili, da se zaradi sonaravnih ukrepov hidrogram enote ni spremenil.

#### 2.6.4 Metoda za izračun baznega odtoka

Bazni odtok v kanalizaciji mešanega sistema je v glavnem posledica priključevanja komunalnih odpadnih vod in pronicanja podpovršinske vode v kanal. V tem primeru baznega odtoka ne moremo opisati z eksponentno recesijskim modelom, zato smo izmed metod, ki so na voljo za izračun baznega odtoka, lahko izbrali le metodo konstantnega mesečnega baznega odtoka. Pri tej metodi program bazni odtok računa kot konstantni odtok, ki ga uporabnik določi za posamezen mesec. Program nato med simulacijo tako določen bazni odtok vsak časovni interval prišteje k neposrednemu odtoku, ki ga izračuna na podlagi podatkov o padavinah.

Za potrebe umerjanja in preverjanja hidrološkega modela, smo bazni odtok določili za vsak dogodek posebej. Določili smo ga tako, da smo izračunali aritmetično sredino med izmerjenim pretokom tik preden je hidrogram odtoka začel naraščati in izmerjenim pretokom takoj potem, ko je hidrogram odtoka nehal upadati.

## 2.6.5 Meteorološki model

### 2.6.5.1 Sintetični nalivi

V meteorološkem modelu smo poleg uporabniško določenih histogramov padavin, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje oziroma verifikacijo modela, določili tudi sintetične nalive, ki smo jih poleg prej omenjenih podatkov kasneje uporabili za modeliranje vpliva sonaravnih ukrepov na površinski odtok. Te smo določili s pomočjo metode »frequency storm«, ki je vgrajena v program HEC-HMS (USACE, 2015b). Ta metoda generira sintetično nevihto z izbrano povratno dobo in izbranim trajanjem na podlagi statističnih podatkov o padavinah, ki jih za posamezno padavinsko postajo lahko odčitamo iz ITP krivulj (intenziteta-trajanje-povratna doba) oziroma tabel povratnih dob za ekstremne padavine, ki so objavljene na spletnih straneh Agencije RS za okolje (preglednica 3) (ARSO, 2009). Omenjene ekstremne padavine so izračunane s pomočjo verjetnostnih analiz podatkov o intenzivnih padavinah s trajanjem od 5 minut do 24 ur za različne povratne dobe po Gumbelovi metodi. V preglednici 3 so prikazane povratne dobe za ekstremne padavine za meteorološko postajo Ljubljana-Bežigrad. Izračunane so bile na nizu podatkov od leta 1948 do leta 2008.

Preglednica 3: Povratne dobe za ekstremne padavine, postaja Ljubljana-Bežigrad (ARSO, 2009).

Table 3: Return periods for extreme rainfall, Ljubljana-Bežigrad station (ARSO, 2009).

trajanje padavin	POVRATNA DOBA							
	1 leto	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let
5 min	4	9	12	14	17	19	21	23 mm
10 min	7	13	18	21	25	28	31	35 mm
15 min	8	16	23	27	32	36	40	45 mm
20 min	9	19	26	30	36	40	45	50 mm
30 min	10	22	31	36	44	49	54	61 mm
45 min	10	25	35	42	50	56	62	70 mm
60 min	14	28	38	45	54	60	67	75 mm
90 min	17	32	43	51	61	69	76	86 mm
120 min	18	34	47	55	66	74	82	92 mm
180 min	23	38	52	60	72	80	88	99 mm
240 min	25	42	56	65	76	85	93	104 mm
300 min	27	45	59	68	80	89	97	109 mm
360 min	28	48	62	71	83	91	100	111 mm
540 min	28	54	68	78	90	98	107	118 mm
720 min	31	59	74	85	97	107	116	128 mm
900 min	36	64	79	89	102	112	121	134 mm
1080 min	37	67	84	95	108	119	129	142 mm
1440 min	39	75	94	106	122	133	145	160 mm

Uporabnik za določene časovne intervale, ki so definirani v programu HEC-HMS, na podlagi podatkov pridobljenih iz ITP krivulj definira višino padavin, ki ustreza trajanju, enakemu dolžini posameznega časovnega intervala in izbrani povratni dobi sintetične nevihte. Na podlagi teh podatkov

program s pomočjo linearne interpolacije logaritmičnih vrednosti najprej določi vrednosti padavin za vsak časovni korak, nato pa izračuna ustrezne priraste padavin, ki jih razporedi s pomočjo metode alternirajočih stolpcev. Maksimalni prirast padavin oziroma maksimalni stolpec postavi glede na uporabnikove nastavitve na 25, 50 ali 75 % trajanja padavinskega dogodka. Ostale priraste razporedi v padajočem vrstnem redu izmenično desno oziroma levo od sredinskega stolpca (Feldman, 2000).

### 2.6.5.2 Evapotranspiracija

Program HEC-HMS ima na voljo 7 različnih metod za izračun evapotranspiracije. Izbrali smo metodo mesečnih povprečij (Monthly Average), pri kateri je potrebno podati povprečne mesečne vrednosti izhlapele vode (pan evapotranspiration) in pripadajoče koeficiente (pan koeficient), s pomočjo katerih program nato izračuna referenčno evapotranspiracijo ( $ET_0$ ). Ker so na spletnih straneh Agencije RS za okolje že podane povprečne mesečne vrednosti  $ET_0$ , smo namesto povprečnih mesečnih vrednosti izhlapele vode v meteorološkem modelu podali kar povprečne vrednosti  $ET_0$ , namesto t. i. »pan« koeficientov pa smo podali faktorje rastlin  $k_c$ . V modelu za izračun prestreženih padavin smo zato za faktor rastlin  $k_c$  privzeli vrednost 1. Na ta način je izračun potencialne evapotranspiracije namesto v modelu za izračun prestreženih padavin tako stekel že v meteorološkem modelu.

### 2.6.6 Umerjanje in preverjanje modela

Na podlagi razpoložljivih podatkov o merjenih padavinah in pretokih smo najprej izločili posamezne dogodke. V nadaljnji analizi smo uporabili samo dogodke, pri katerih predhodno ni bilo prisotne snežne odeje, padavine pa so padle le v obliki dežja. Za umerjanje modela smo izbrali štiri padavinske dogodke različnih velikosti in še pet različnih dogodkov za preverjanje modela.

Model smo umerjali ročno, in sicer tako, da smo vrednost koeficienta  $CN$  povečevali ali zmanjševali za 1 % (tj. za celo vrednost) in vsakič izračunane hidrograme odtoka primerjali z izmerjenimi. Preverjali smo razlike med merjenimi in izračunanimi konicami pretokov, volumni odtoka, časi nastopa merjene in izračunane konice ter za pretoke računali tudi koren povprečne kvadratne napake (Root Mean Square Error –  $RMSE$ ) po enačbi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{izr,i} - Q_{izm,i})^2}{n}} \quad (31)$$



- $RMSE$  ... koren povprečne kvadratne napake [ $m^3/s$ ],  
 $Q_{izr, i} - Q_{izm, i}$  ... razlika pretokov v določenem časovnem intervalu [ $m^3/s$ ],  
 $n$  ... število časovnih intervalov.

## 2.7 Scenariji uporabe sonaravnih ukrepov in modeliranje

Glavni cilj naloge je bil določiti vplive posameznih sonaravnih ukrepov in njihovih kombinacij na hidrogram odtoka. V ta namen smo predpostavili 6 različnih scenarijev oziroma izhodišč za modeliranje in analizo:

- Scenarij 1: na prispevnem območju ni nikakršnih sonaravnih ukrepov za upravljanje s padavinsko vodo (tudi obstoječih ne).
- Scenarij 2: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod s streh, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.
- Scenarij 3: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod z vseh utrjenih površin, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.
- Scenarij 4: predvidena je ureditev zelenih streh na objektih, kjer je naklon strehe manjši od 1:3.
- Scenarij 5: predvideno je dodatno ponikanje padavinskih vod s streh ter z vseh utrjenih površin, kjer je to mogoče glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve.
- Scenarij 6: predvidena je kombinacija ukrepov iz scenarija 2, scenarija 3 in scenarija 4. V primeru, da je pri določeni strehi možno površinski odtok bodisi ponikati bodisi uporabiti zeleno streho, smo predvideli, da je odtok v takem primeru odveden v ponikanje.

Za vsakega od zgoraj naštetih scenarijev smo na novo vzpostavili model za izračun padavinskih izgub. Pri prvem scenariju, ki predvideva, da na prispevnem območju ni nikakršnih sonaravnih ukrepov za upravljanje s padavinsko vodo, smo na račun površin, ki imajo pri obstoječem stanju površinski odtok odveden v ponikanje, v modelu ustrezno povečali delež neposredno povezanih nepropustnih površin. Kompozitni koeficient ( $CN_{komp.}$ ) za preostale površine, kjer odtok ni neposredno povezan s kanalizacijskim sistemom, smo določili na podlagi vrednosti v tabeli 2. Pri ostalih scenarijih, ki predvidevajo dodatne ukrepe za upravljanje s površinskim odtokom, pa smo na račun površin, ki imajo površinski odtok odveden v ponikanje oziroma na račun predvidenih zelenih streh, delež neposredno povezanih nepropustnih površin ustrezno zmanjšali. Ker se je na račun teh površin povečalo območje, kjer površinski odtok ni neposredno odveden v kanalizacijski sistem, smo za te površine ponovno izračunali še kompozitni koeficient  $CN_{komp.}$ . Za površine, ki imajo površinski odtok odveden v predvidene objekte za ponikanje oziroma za strehe, kjer smo predvideli ureditev zelenih streh, smo

koeficient  $CN$  določili po postopkih, ki sta opisana v poglavju 2.6.2.2. Za preostalo območje, kjer površinski odtok že prej ni bil neposredno povezan s kanalizacijskim sistemom, smo upoštevali vrednost koeficienta  $CN$ , ki smo jo dobili z umerjanjem modela.

Površinski odtok pri posameznem scenariju smo nato simulirali za vse dogodke, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje osnovnega modela, in pa za 6 sintetičnih neviht. Vsi dogodki, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje, razen dogodka 2. februarja 2013, imajo povratno dobo krajšo od enega leta, povratna doba v primeru dogodka 2. februarja 2013 znaša nekaj več kot eno leto. Izbrane sintetične nevihte imajo 2-, 5-, 10-, 25-, 50- in 100-letno povratno dobo in trajanje 1 uro. Omenjeno trajanje smo izbrali glede na čas koncentracije  $T_c$ , ki je značilen za obravnavano območje. Čas koncentracije smo določili na podlagi meritev pretokov in padavin. Velja namreč, da je maksimalni odtok pri določeni količini padavin dosežen takrat, ko je trajanje padavin enako času koncentracije  $T_c$  prispevnega območja. Glede na ugotovitve Domna Dolšaka (2015), ki je med drugim za različne padavinske postaje analiziral normirane čase nastopa konice intenzitete padavin v primeru neviht z različnim trajanjem, smo privzeli, da se največja intenziteta padavin v primeru sintetičnih neviht z različnimi povratnimi dobami v našem primeru pojavi pri 25 % trajanja padavin, kar je značilno za padavine na območju Bežigrada v Ljubljani.

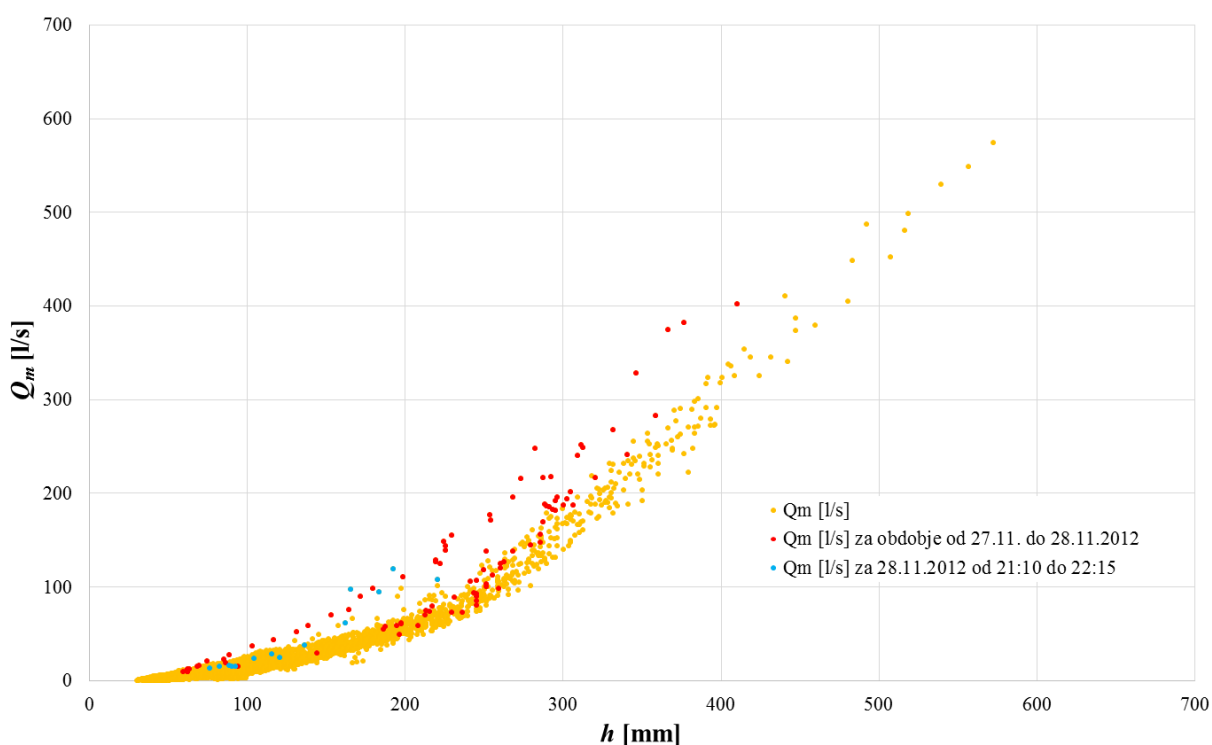
Za vsak posamezen scenarij uporabe sonaravnih ukrepov in vsak padavinski dogodek smo določili volumen odtoka, konico pretoka in čas do nastopa konice pretoka. To je čas od začetka naraščanja hidrograma odtoka do nastopa konice pretoka. V nadaljevanju smo za vsak scenarij preverili, za koliko odstotkov volumni odtoka in konice pretokov, ki smo jih izračunali s pomočjo modela za posamezne izmerjene dogodke in sintetične nevihte, odstopajo od volumnov odtoka in konic pretokov pri obstoječem stanju. Odstopanja smo določili po enačbi (32).

$$\frac{\text{scenarij}_{1-6} - \text{obstoječe stanje}}{\text{obstoječe stanje}} \cdot 100\% \quad (32)$$

### 3 REZULTATI

#### 3.1 Obdelava podatkov o padavinah in pretokih

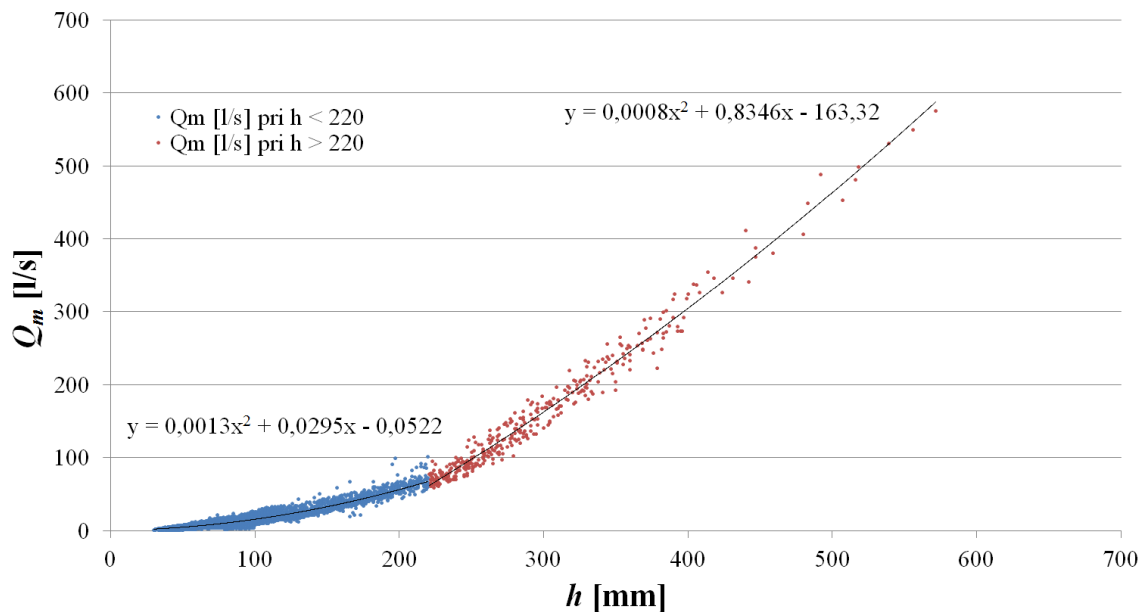
Podatke o času posameznega zvrata zvratnega mehanizma v dežemeru smo pretvorili v podatke o padavinah s časovno resolucijo 5 min. Podatki o pretokih niso potrebovali posebne obdelave, razen za obdobje, ko senzor hitrosti ni deloval. Za to obdobje smo pretoke določili s pomočjo postopka, ki je opisan v poglavju 1.5.3. Najprej smo na podlagi vseh podatkov o padavinah in pretokih za obdobje, ko je senzor hitrosti še deloval določili zvezo  $Q=f(h)$ . Pri tem smo iz analize izvzeli podatke od 27. 11. 2012 20:45 do 28. 11. 2012 4:35 in podatke z dne 28. 11. 2012 od 21:10 do 22:15, saj se ti statistično bistveno razlikujejo od ostalih podatkov. Predvidevamo, da se je v teh dveh časovnih intervalih pretočni režim na merskem mestu spremenil zaradi prisotnosti določene ovire v toku. Na grafikonu 1 so prikazani pari podatkov  $Q-h$  za obdobje, ko je merilnik hitrosti še deloval. Z rdečo so prikazani pari podatkov za obdobje od 27. 11. 2012 20:45 do 28. 11. 2012 4:35, z modro pa pari podatkov za obdobje od 28. 11. 2012 21:10 do 28. 11. 2012 22:15.



Grafikon 1: Diagram  $Q-h$  za obdobje od 22. 11. 2012 12:50 do 29. 3. 2013 23:40.

Graph 1:  $Q-h$  diagram for the period from 22. 11. 2012 12:50 until 29. 3. 2013 23:40.

Zvezo  $Q=f(h)$  smo konstruirali iz dveh segmentov (grafikon 2). Meja med obema segmentoma se nahaja pri gladini 220 mm. Pri gladini 220 mm se prečni profil na merskem mestu namreč skokovito razširi in preide iz polkrožne oblike v pravokotno. Sprememba profila je razvidna iz slike 15 (poglavje 2.3.2). Na grafikonu 2 so prikazani pari podatkov  $Q-h$  za posamezen segment ter potek trendnih črt, ki se prilegajo tem podatkom in predstavljajo zvezo  $Q=f(h)$ .



Grafikon 2: Diagram  $Q-h$  pri  $h < 220$  mm in  $h > 220$  mm in pripadajoči trendni črti.

Graph 2:  $Q-h$  diagram for  $h < 220$  mm and  $h > 220$  mm and corresponding trend lines.

Zveza  $Q=f(h)$  za prvi segment ( $h < 220$  mm):

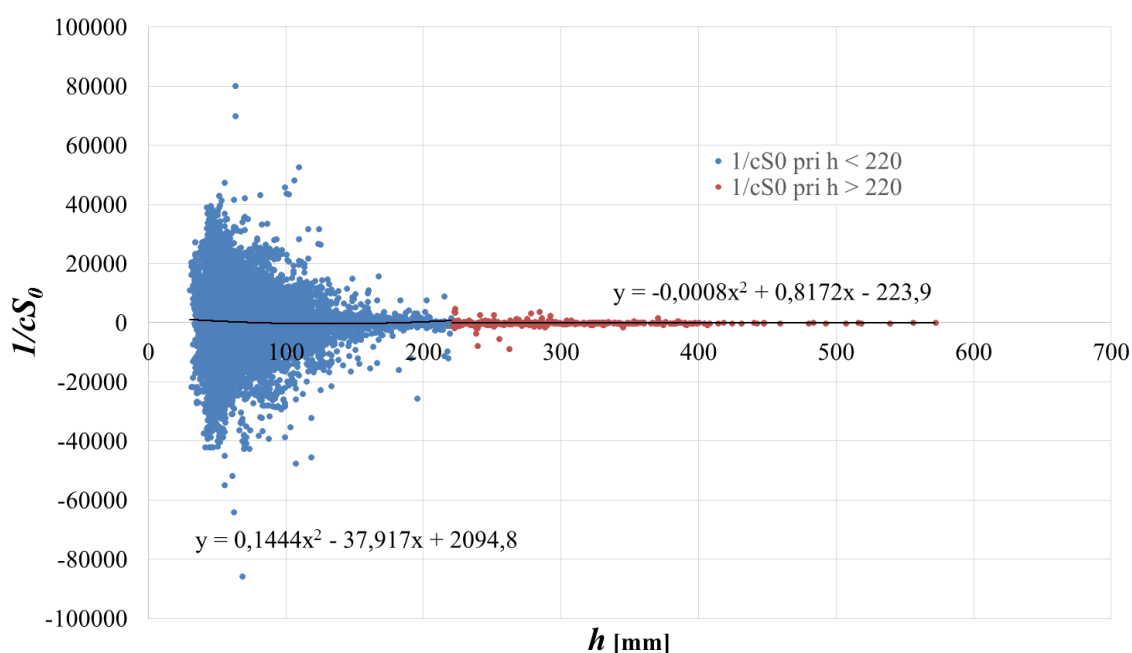
$$Q = 0,0013 \cdot h^2 + 0,0295 \cdot h - 0,0522 \quad (33)$$

Zveza  $Q=f(h)$  za drugi segment ( $h > 220$  mm):

$$Q = 0,0008 \cdot h^2 + 0,8346 \cdot h - 163,32 \quad (34)$$

Za več posameznih dogodkov iz obdobja, ko je merilnik hitrosti še deloval, smo preverili, če je na diagramu  $Q-h$  mogoče opaziti histerezo. Ugotovili smo, da je v splošnem histerezna zanka lepo vidna (grafikon 4, grafikon 5). V nadaljevanju smo na podlagi postopka, ki je opisan v poglavju 2.3.3, pretoke izračunane s pomočjo enačb (33) in (34) zaradi pojava histereze korigirali. S pomočjo enačbe (2) smo določili korekcijske faktorje  $I/cS_0$ . Pri tem smo privzeli, da je pretok pri stalnem toku  $Q_r$ , ki

nastopa v enačbi (2), enak pretoku  $Q$ , ki ga izračunamo s pomočjo enačb (33) in (34). Upoštevali smo le podatke, kjer  $dt$  znaša 5 min ali manj. Na ta način smo preprečili, da bi v analizi upoštevali časovno spremembo gladine v obdobju, ko merilnik hitrosti ni deloval (npr. menjava baterije), tj. v času med dvema meritvama. Poleg tega nismo upoštevali podatkov, pri katerih je bilo razmerje  $dh/dt$  enako nič, saj v tem primeru člen  $1/cS_0$  ni definiran. Za posamezen segment zveze  $Q=f(h)$  (tj. za  $h < 220$  mm in  $h > 220$  mm) smo izrisali diagram  $1/cS_0-h$  (grafikon 3) in določili trendno linijo, ki se prilega parom podatkov  $1/cS_0-h$  in predstavlja zvezo  $1/cS_0=f(h)$ .



Grafikon 3: Diagram  $1/cS_0-h$  pri  $h < 220$  mm in  $h > 220$  mm ter pripadajoči trendni črti.

Graph 3:  $1/cS_0-h$  diagram for  $h < 220$  mm and  $h > 220$  mm and corresponding trend lines.

Zveza  $1/cS_0=f(h)$  za prvi segment:

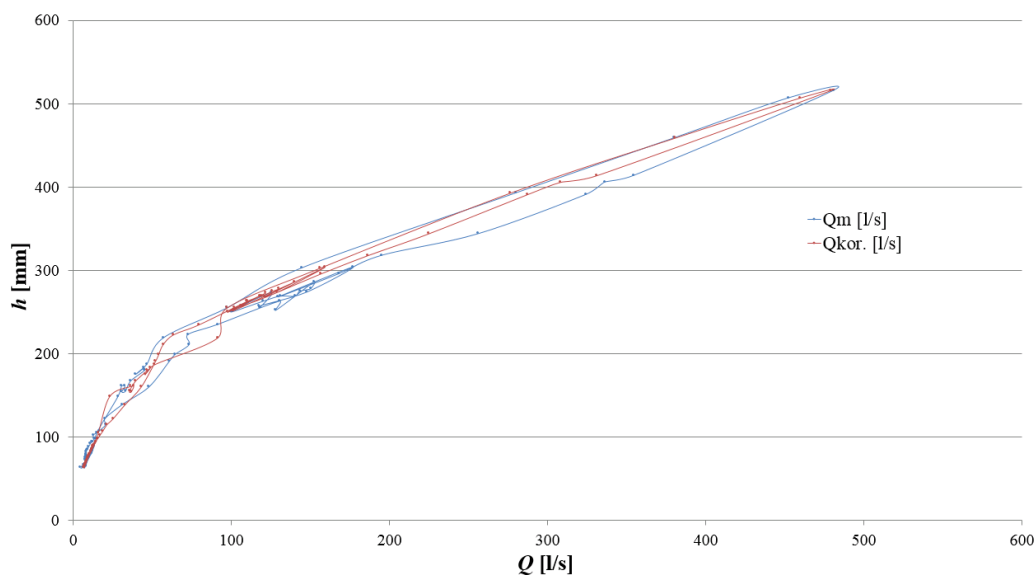
$$1/cS_0 = 0,1444 \cdot h^2 - 37,917 \cdot h + 2094,8 \quad (35)$$

Zveza  $1/cS_0=f(h)$  za drugi segment:

$$1/cS_0 = -0,0008 \cdot h^2 + 0,8172 \cdot h - 223,9 \quad (36)$$

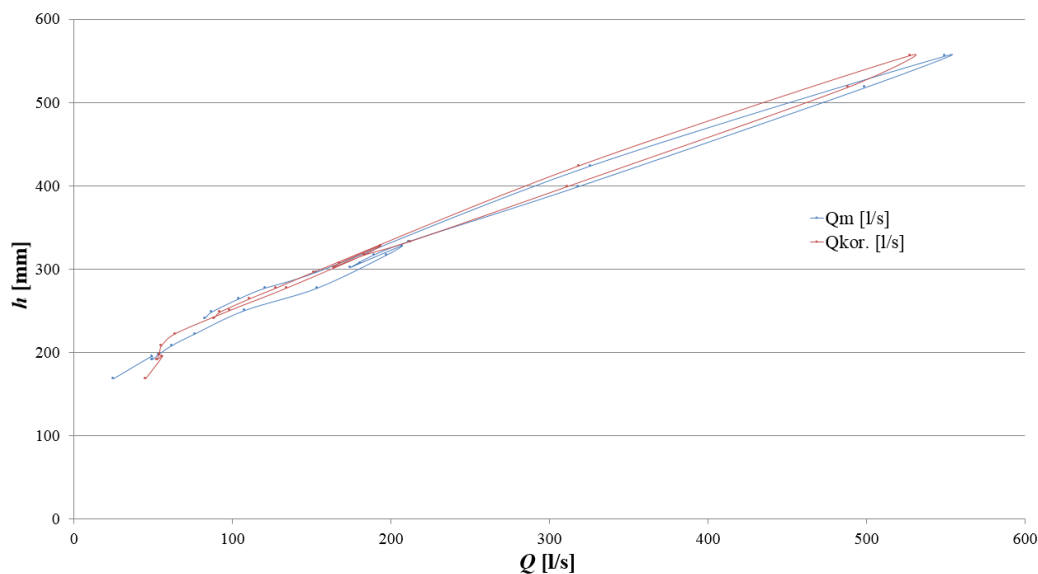
Korigirane pretoke  $Q_{kor}$  smo na koncu izračunali s pomočjo enačbe (1), pri čemer  $Q_m$  v enačbi (1) v tem primeru predstavlja korigiran pretok  $Q_{kor}$ .

Za kontrolo smo na podlagi podatkov o gladinah v primeru največjih dveh dogodkov iz obdobja, ko je senzor hitrosti še deloval, po enakem postopku oziroma s pomočjo enačb (1), (2), (33), (34), (35) in (36) izračunali pretoke  $Q_{kor}$  in jih primerjali z izmerjenimi pretoki. Na graf smo na ordinato nanizali izmerjene gladine  $h$ , na absciso pa izmerjene pretoke  $Q_m$  ter po zgornjem postopku izračunane in korigirane pretoke  $Q_{kor}$ . Vrednosti  $Q_m$  in  $Q_{kor}$  smo med seboj povezali, kot si časovno sledijo (grafikon 4, grafikon 5). Opazimo lahko, da se histerezne zanke v primeru izmerjenih in izračunanih podatkov v splošnem dobro ujemajo.



Grafikon 4: Histereza pri dogodku z dne 26. 12. 2012 od 14:15 do 22:30.

Graph 4: Hysteretic stage-discharge relation for the event on 26. 12. 2012 from 14:15 until 22:30.



Grafikon 5: Histereza pri dogodku z dne 18. 3. 2013 od 19:05 do 20:55.

Graph 5: Hysteretic stage-discharge relation for the event on 18. 3. 2013 from 19:05 until 20:55.

## 3.2 Vhodni parametri za osnovni model

### 3.2.1 Parametri za izračun prestreženih padavin

Privzeli smo, da je na začetku simulacije delež skladiščne kapacitete vegetacije, ki je zapolnjen z vodo, enak 0. Maksimalno skladiščno kapaciteto vegetacije, ki je odvisna predvsem od vrste vegetacije in od letnega časa (Zabret in Šraj, 2015), pa smo za posamezen mesec v letu določili z umerjanjem. Pri tem smo opazovali, kako se pri različnih vrednostih tega parametra ujemata začetna dela merjenega in simuliranega hidrograma odtoka pri posameznem dogodku.

Za meseca februar in marec, ko so drevesa v mirovanju in še nimajo listov, smo z umerjanjem dobili maksimalno skladiščno kapaciteto vegetacije 0,55 mm. Za mesec maj smo dobili dve vrednosti. Dogodkom na začetku meseca je ustrezala vrednost skladiščne kapacitete 1 mm, dogodkom proti koncu meseca pa skladiščna kapaciteta 1,45 mm. Razlika je najverjetneje posledica dejstva, da na začetku meseca maja listje na drevesih še niso bilo povsem razvito, medtem ko so na sredini meseca že dosegli polno velikost. Izjema je dogodek 19. maja, kjer je začetna skladiščna kapaciteta krošenj znašala 1,4 mm. Razlike med skladiščnimi kapacitetami pri posameznih dogodkih, ki se pojavijo v istem delu meseca, so najverjetneje posledica dejstva, da je skladiščna kapaciteta vegetacije odvisna še od nekaterih drugih dejavnikov. To so količina padavin, intenziteta in trajanje padavin, hitrost in smer vetra, temperatura zraka, vlažnost, tip nevihte in porazdelitev velikosti kapljic (Calder, 1996; Crockford & Richardson, 2000; Nanko et al., 2006; Šraj et al., 2008a, cit. po Zabret in Šraj, 2015).

V meteorološkem modelu smo namesto povprečnih mesečnih vrednosti izhlapele vode podali vrednosti referenčne evapotranspiracije ( $ET_0$ ), namesto t. i. »pan« koeficientov pa smo podali faktorje rastlin  $k_c$ , kot je opisano že v poglavju 2.6.4.2. Povprečne vrednosti referenčne evapotranspiracije –  $ET_0$  [mm/mesec], ki so izračunane za posamezno meteorološko postajo za obdobje od leta 1971 do 2000, so podane na spletnih straneh Agencije RS za okolje (ARSO, 2016). Referenčna evapotranspiracija ( $ET_0$ ) je v tem primeru količina vode, ki izhlapi iz aktivno rastoče trave, ki popolnoma prekriva tla in je zadostno preskrbljena z vodo, ima višino 0,12 m, površinsko upornost 70 s/m in albedo 0,23 (ARSO, 2016; Pintar, 2006). Za faktor rastlin  $k_c$  smo v modelu upoštevali povprečno mesečno vrednost  $k_c$  (povprečje treh dekad) za jabolane, ki je edino drevo, za katerega je ta parameter na območju osrednje Slovenije določen (Pintar, 2006). V preglednici 4 je podana referenčna evapotranspiracija  $ET_0$  [mm/mesec] in faktor rastlin za mesece februar, marec in maj.

Preglednica 4: Referenčna evapotranspiracija  $ET_0$  (ARSO, 2016) in povprečni faktor  $k_c$  za jabolane (Pintar, 2006) za mesec februar, marec in maj.

Table 4: Reference evapotranspiration  $ET_0$  (ARSO, 2016) and average crop coefficient for apple tree according to Pintar (2006) for February, March and May.

Mesec	$ET_0$ [mm/mesec]	Faktor rastline $k_c$
Februar	21	0
Marec	48	0
Maj	109	1,03

### 3.2.2 Parametri za izračun padavinskih izgub s pomočjo metode SCS

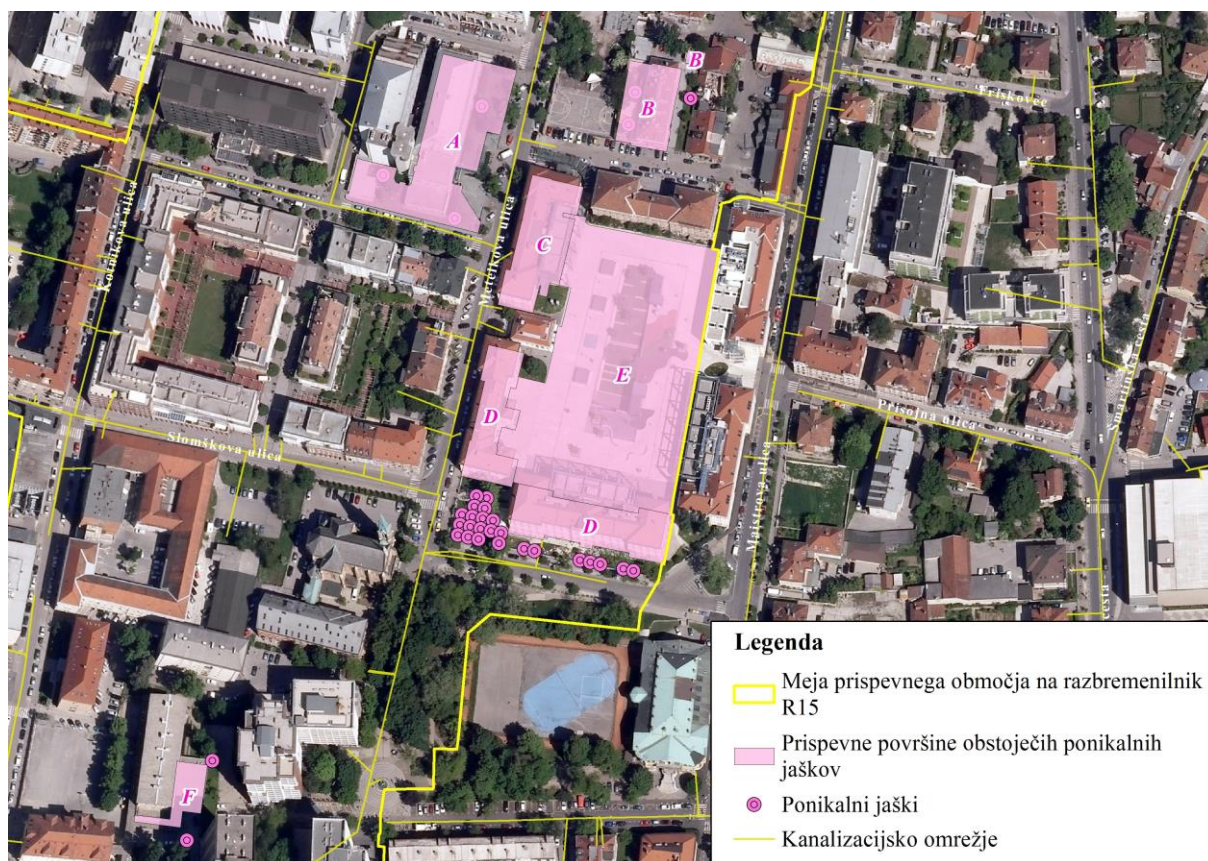
Privzeli smo, da padavinska voda z vseh utrjenih površin in streh, razen z utrjenih površin in streh, ki imajo urejeno ponikanje padavinske vode v obstoječe ponikalne jaške, odteče neposredno v kanalizacijo. Delež teh površin na prispevnem območju znaša 74,9 %. Za preostale površine na obravnavanem območju oziroma površine, ki niso neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom, smo s pomočjo enačbe (26) določili kompozitno vrednost koeficienta  $CN$ .

Koeficiente  $CN$  za površine s ponikalnimi jaški smo določili s pomočjo metode, ki je opisana v poglavju 2.6.2.2, koeficiente  $CN$  za preostale tipe površin oziroma pokrovnosti tal na prispevnem območju pa smo določili na podlagi vrednosti, ki so podane v preglednici 2. Glede na podatke geotehničnih raziskav (GZL, 1990; GZL, 1992; IGGG, 1998; Prestor in Hoetzl, 2002) spadajo zemljine na površini tal oziroma umetni nasip v hidrološko skupino A (Brakensiek and Rawls 1983, cit. po NRCS, 1986). Vendar, ker je zemljina v procesu urbanizacije podvržena kompaktiranju, smo pri izbiri ustreznih vrednosti koeficientov  $CN$  za posamezen tip površine privzeli, da vrhnji sloj zemljine na obravnavanem prispevnem območju spada v hidrološko skupino zemljin D, kar je skladno z ugotovitvami nekaterih avtorjev (Lim et al., 2006; OCSCD, 2001). Za zelene površine smo privzeli, da je pokritost s travo nad 75 % in izbrali vrednost koeficienta  $CN$  80. Ker je v preglednici 2 podana samo vrednost  $CN$  za makadamske ceste s pripadajočimi obcestnimi površinami, smo privzeli, da vrednost  $CN$  zgolj za makadamske površine znaša 96. To je tudi vrednost, ki jo v tem primeru priporočajo v priročniku za program HydroCAD (HydroCAD Software Solutions LLC, 2011) in navajajo v priročniku oddelka za naravne vire v zvezni državi Wincinson (Wisconsin department of natural resources, 2015). Za zelenice, ki se nahajajo nad podzemnimi garažami, smo za vrednost koeficienta  $CN$  izbrali vrednost 89.



Prispevne površine obstoječih ponikalnih jaškov so prikazane na sliki 21. Zaradi lažjega poimenovanja smo te prispevne površine označili s črkami od A do F. Površine, ki imajo površinski odtok odveden v ponikanje, so:

- del strehe in zelenice, ki pripadata objektu na naslovu Metelkova 9 (ZD Center) – površina A,
- streha in del utrjenih površin, ki pripadajo objektu na naslovu Metelkova 8 (Hostel Celica) – površina B,
- streha objekta na Metelkovi 4 – površina C,
- strehi objektov Metelkova 25 in Metelkova 27 – površina D,
- plato t. i. »Muzejske ploščadi« na Metelkovi – površina E,
- streha prizidka k objektu na naslovu Kotnikova 6b – površina F.

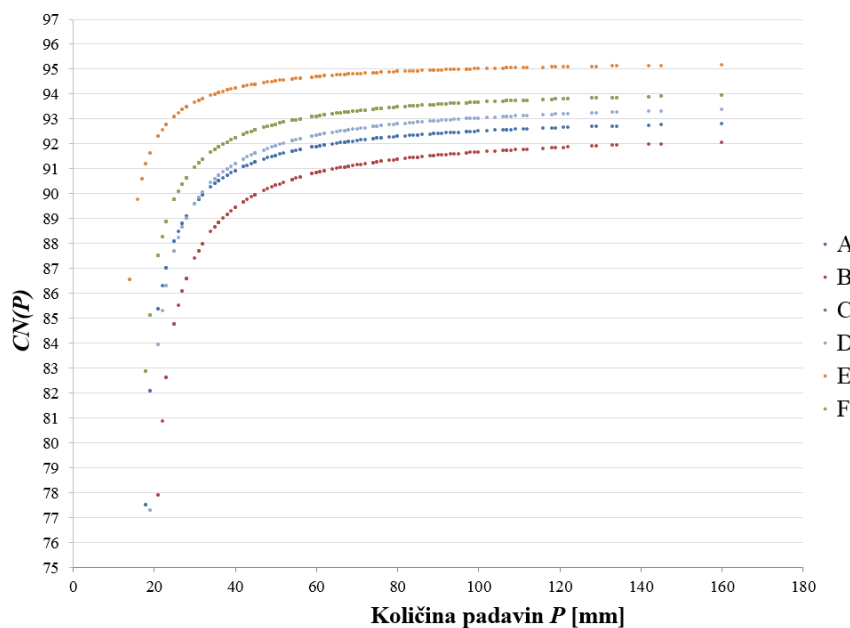


Slika 21: Obstoječi ponikalni jaški in pripadajoče prispevne površine (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 21: Existing infiltration shafts and contributing drainage areas (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

Višino površinskega odtoka  $Q_{in}$  [mm], ki jo moramo podati v enačbi (5), smo določili na podlagi podatkov o nalivih, na katere so bili posamezni ponikalni jaški dimenzionirani. Te smo pridobili iz projektov hišnih priključkov (SOZD ABC Pomurka – Projektivno podjetje Agens projekt, 1979; Arhe d.o.o., 2003; Emona projekt, 1982; Projekt MR inženiring d. d., 2001). Vse ponikalnice na obravnavanem območju so bile dimenzionirane na nalive, ki so bili za posamezne povratne dobe in posamezna trajanja določeni na nizu podatkov o padavinah med leti 1921 in 1946 (Sketelj, 1954, cit. po Kolar, 1983). Ponikalni jaški za ponikanje padavinske vode z območja površin B, so dimenzionirani na 10-minutni naliv z 1-letno povratno dobo (211,6 l/s/ha). Ponikalno polje južno od kompleksa »Muzejske ploščadi« je dimenzionirano tako, da lahko sprejme odtok s površine E, ki nastane pri 5-minutnem nalivu z 1-letno povratno dobo (327,4 l/s/ha) in odtok s površine D, ki nastane pri 10-minutnem nalivu z 1-letno povratno dobo (211,6 l/s/ha). Ponikalni jaški za ponikanje padavinske vode z območja površine C so dimenzionirani na 15-minutni naliv z 1-letno povratno dobo (160,6 l/s/ha). Podatki o nalivih, na katere so bili dimenzionirani ponikalni jaški za ponikanje padavinske vode z območij površin A in F, niso na voljo. Ker je bil v preteklosti za dimenzioniranje kanalizacijskega omrežja in objektov za ponikanje padavinske vode največkrat v uporabi 10-minutni naliv z 1-letno povratno dobo (211,6 l/s/ha), smo privzeli, da so ponikalni jaški za te površine dimenzionirani na ta naliv.

V nadaljevanju smo tako pridobljene pare podatkov  $CN-P$  nanizali na graf. Diagrami  $CN-P$  za posamezne površine s ponikalnimi jaški so prikazani na grafikonu 6.



Grafikon 6: Diagram  $CN-P$  za posamezna območja z obstoječimi ponikalnimi jaški (A-F).

Graph 6: Diagram  $CN-P$  for areas with infiltration shafts installed (A-F).

Čeprav so zveze  $CN(P)$  polinomi, ki nimajo prave asimptote, lahko opazimo, da se v primeru padavin z visoko povratno dobo vrednosti koeficientov  $CN$  ne spreminjajo več bistveno (grafikon 6). Za vsako območje z obstoječimi ponikalnimi jaški lahko iz grafikona 6 odčitamo vrednost, h kateri se koeficient  $CN$  približuje pri nalivih z višjimi povratnimi dobami. Te vrednosti, zaokrožene na celo vrednost, so za posamezno območje zbrane v preglednici 5. V zadnjem stolpcu je za ta območja podana še kompozitna vrednost koeficienta  $CN$ .

Preglednica 5: Vrednosti koeficientov  $CN$  za območja s ponikalnimi jaški (A-F) .

Table 5:  $CN$  values determined for areas with infiltration shafts installed (A-F).

Oznaka površine	Površina A [m <sup>2</sup> ]	Delež celotne površine [%]	$CN_{matrika}$	$CN_{komp.}$
<b>A</b>	2459,3	16,4	93	94
<b>B</b>	851,1	5,7	92	
<b>C</b>	1209,0	8,1	94	
<b>D</b>	2248,1	15,0	93	
<b>E</b>	7895,6	52,6	95	
<b>F</b>	355,0	2,4	94	

Koeficienti  $CN$  za posamezen tip površine oziroma pokrovnost tal in kompozitni  $CN$  za celotno prispevno območje so prikazani v preglednici 6.

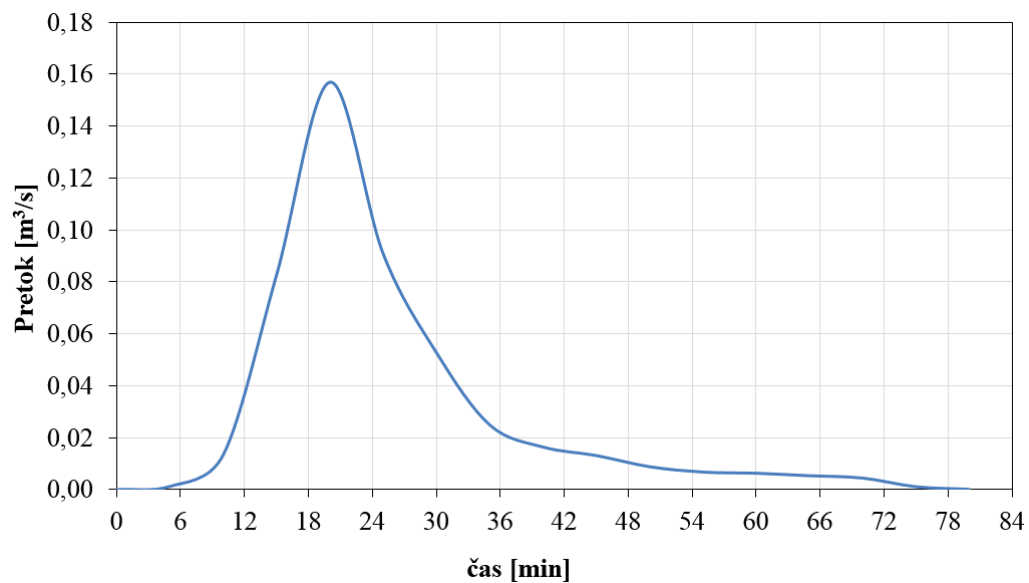
Preglednica 6: Kompozitna vrednost koeficienta  $CN$  za prepustni del območja oziroma za del območja, kjer površinski odtok ni neposredno odveden v kanalizacijski sistem.

Table 6: Composite  $CN$  for the pervious part of the catchment area.

Tip površine	Površina A [m <sup>2</sup> ]	Delež celotne površine [%]	$CN$	$CN_{komp.}$
<b>Zelenice</b>	13932,6	0,38	80	88
<b>Zelenice nad garažami</b>	4715,0	0,13	89	
<b>Makadam</b>	2842,2	0,08	96	
<b>Obst. ponikalnice</b>	15018,1	0,41	94	

### 3.2.3 Hidrogram enote

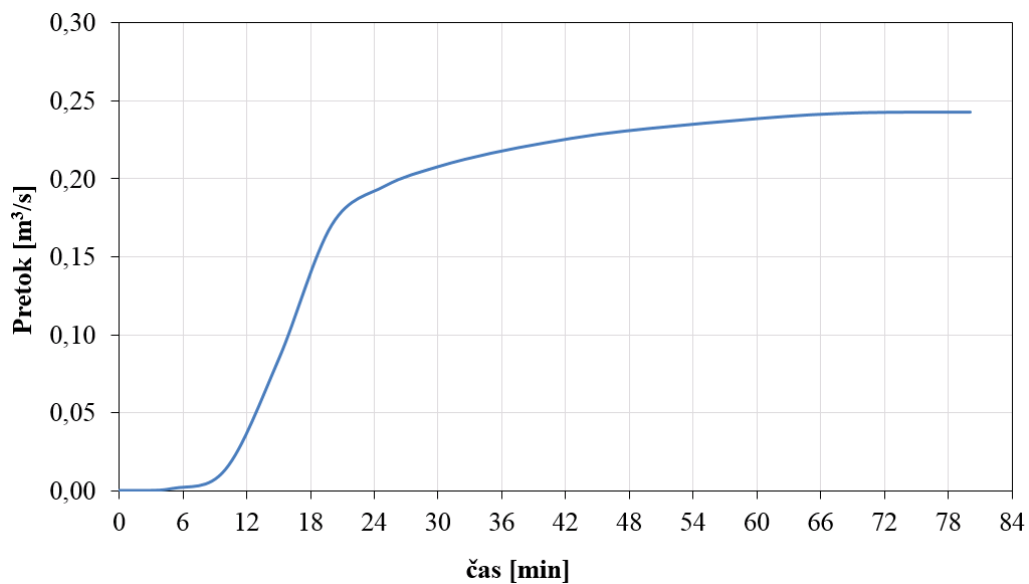
Izmed podatkov o padavinah in pretokih, ki smo jih imeli na voljo, je kriterijem, po katerih je dogodek primeren za konstrukcijo hidrograma enote, najbolj ustrezal dogodek z dne 19. 5. 2013 od 15:15 do 16:35. Na podlagi tega dogodka smo skonstruirali 10-minutni hidrogram enote (grafikon 7), kot je opisano v poglavju 2.6.3. Bazni odtok za ta dogodek smo določili, kot je opisano v poglavju 2.6.4.



Grafikon 7: 10-minutni hidrogram enote.

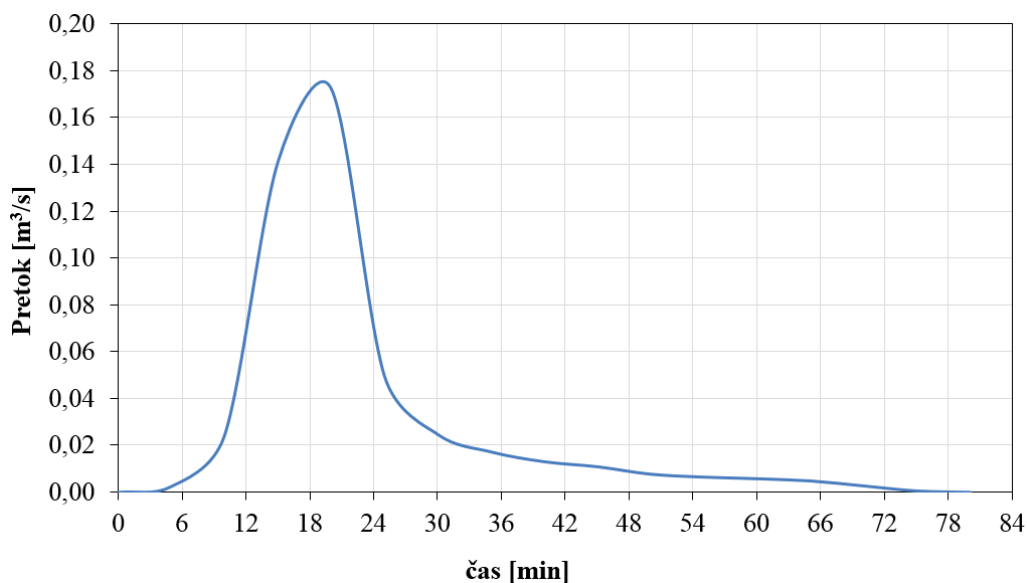
Graph 7: 10-minute unit hydrograph.

Ker smo za časovni korak v programu v programu HEC-HMS izbrali 5 minut, smo 10-minutni hidrogram enote v nadaljevanju s pomočjo S-krivulje (grafikon 8) pretvorili v 5-minutni hidrogram enote (grafikon 9).



Grafikon 8: S-krivulja.

Graph 8: S-curve.



Grafikon 9: 5-minutni hidrogram enote.

Graph 9: 5-minute unit hydrograph.

### 3.3 Umerjanje in preverjanje modela

#### 3.3.1 Umerjanje

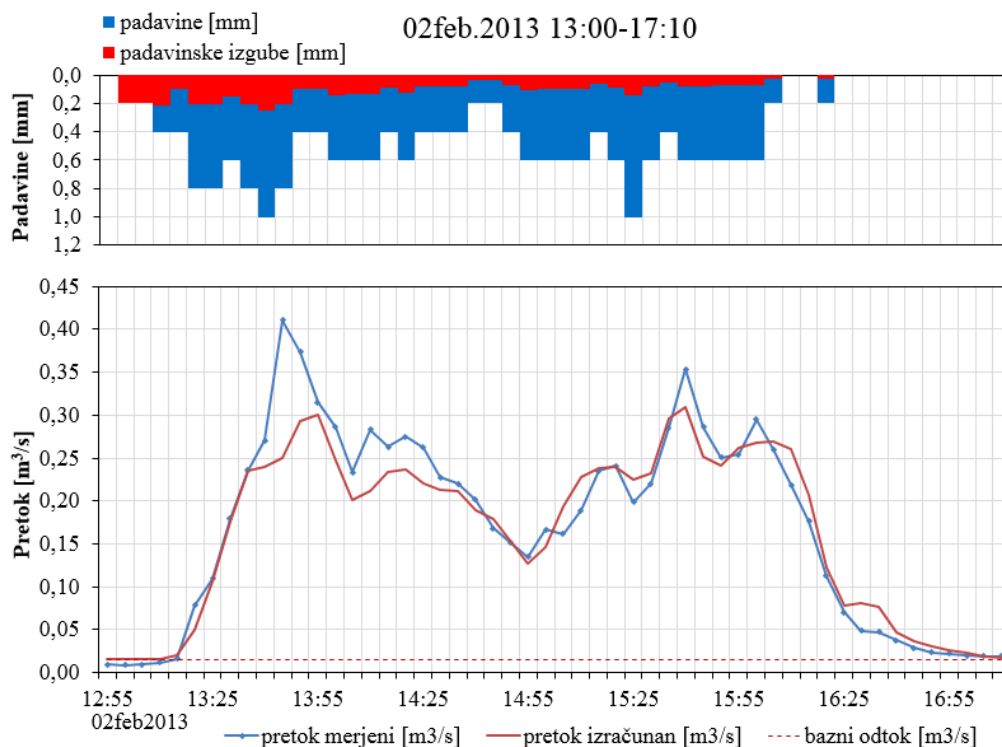
Model smo umerili s pomočjo 4 dogodkov različnih velikosti. Čas začetka padavin, čas trajanja padavin, količina padavin, bazni odtok, maksimalna skladiščna kapaciteta vegetacije, konica pretoka in čas nastopa konice pretoka so za dogodke, ki smo jih izbrali za umerjanje modela, prikazani v preglednici 7. Pri dogodkih z več konicami so v tabeli prikazane maksimalne konice.

Preglednica 7: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.

Table 7: Characteristics of the rainfall events used for model calibration.

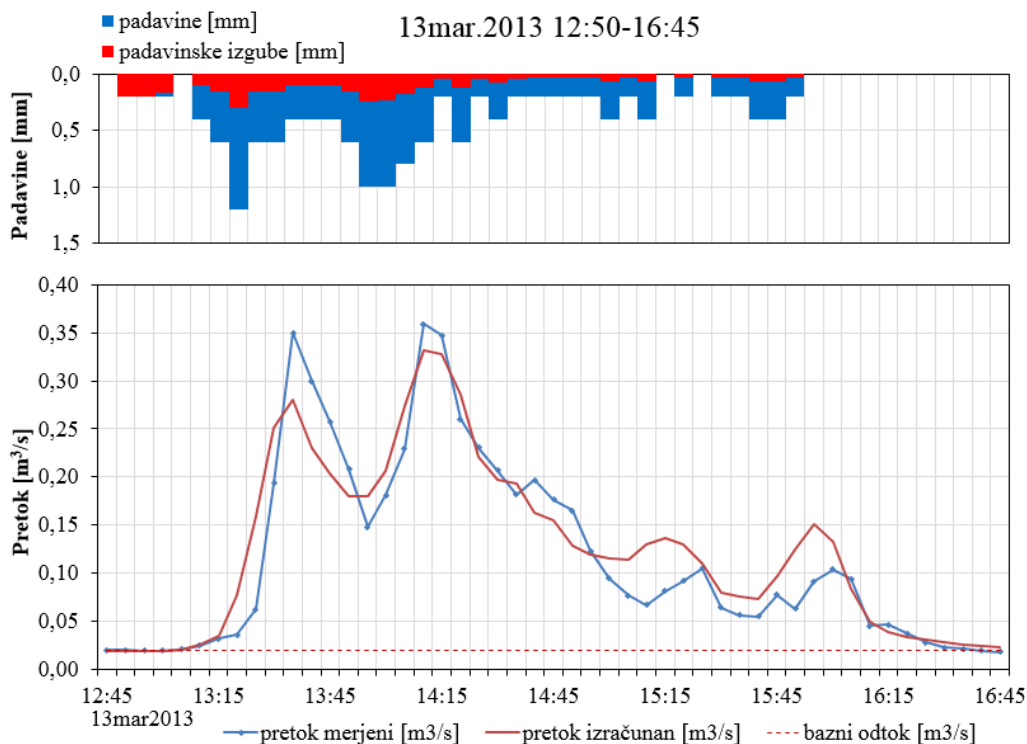
Datum	Čas začetka padavin	Čas trajanja padavin [min]	Količina padavin [mm]	Povpr. bazni odtok [m <sup>3</sup> /s]	Maks. sklad. kapaciteta vegetacije [mm]	Konica pretoka [m <sup>3</sup> /s]	Čas nastopa konice pretoka [hh:mm]
<b>2.feb.13</b>	13:00	100	20,40	0,015	0,55	0,411	13:45
<b>13.mar.13</b>	12:50	180	14,20	0,020	0,55	0,359	14:10
<b>6.-7.maj.13</b>	22:50	130	8,60	0,011	1,00	0,178	00:50
<b>29.maj.13</b>	12:35	40	1,80	0,012	1,45	0,050	13:25

Z umerjanjem smo določili koeficient  $CN$ . Za začetno, ocenjeno vrednost smo privzeli vrednost 88, umerjena vrednost pa znaša 90. Nekoliko višja umerjena vrednost je najverjetneje posledica dejstva, da smo pri določanju kompozitnega  $CN$  na podlagi podatkov iz preglednice 2 predpostavili, da je na območju zelenic pokritost s travo nad 75 %. Če bi uporabili koeficient  $CN$ , ki je značilen za pokritost s travo, ki znaša med 50 % in 75 % (tj. 84), bi dobili kompozitno vrednost koeficienta  $CN$ , ki znaša ravno 90. Na grafikonih 10-13 so prikazane padavine in padavinske izgube ter merjeni in izračunani hidrogrami odtoka za posamezen dogodek, na katerega je bil model umerjen. V preglednici 8 so prikazani rezultati umerjanja oziroma odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka, konicami pretokov, časi nastopa konic pretokov in koren povprečne kvadratne napake ( $RMSE$ ) za te dogodke. V primeru dogodkov, ki imajo več konic, so v preglednici prikazana odstopanja pri maksimalnih konicah.



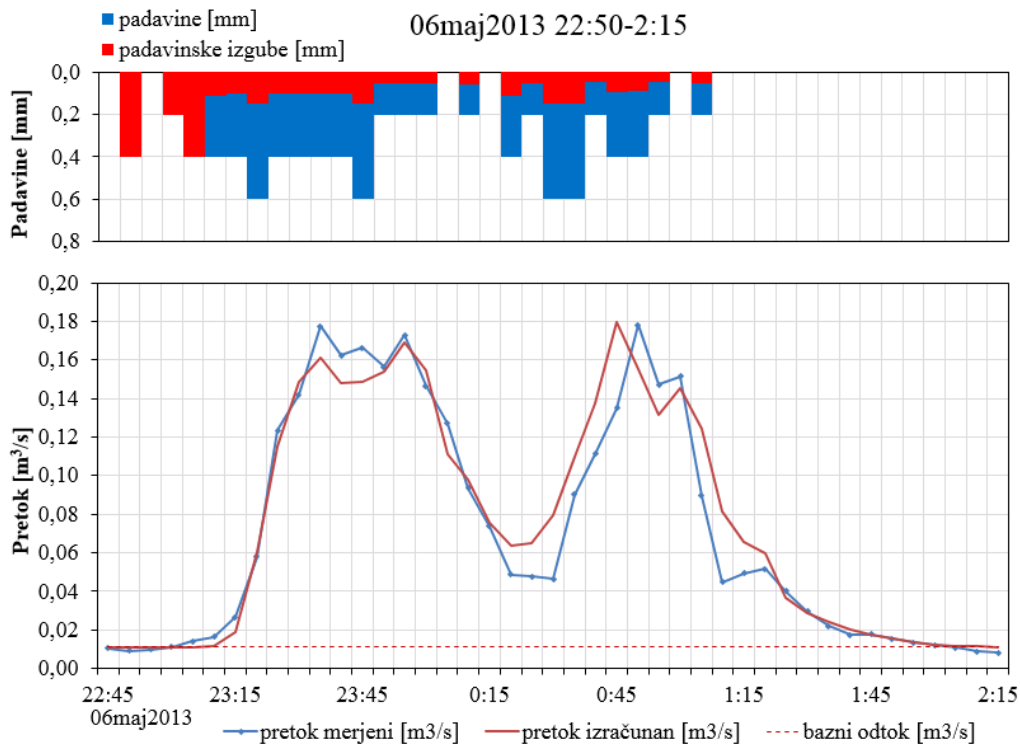
Grafikon 10: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 2. februarja 2013.

Graph 10: Observed and calculated hydrograph for the event on 2nd of February 2013.



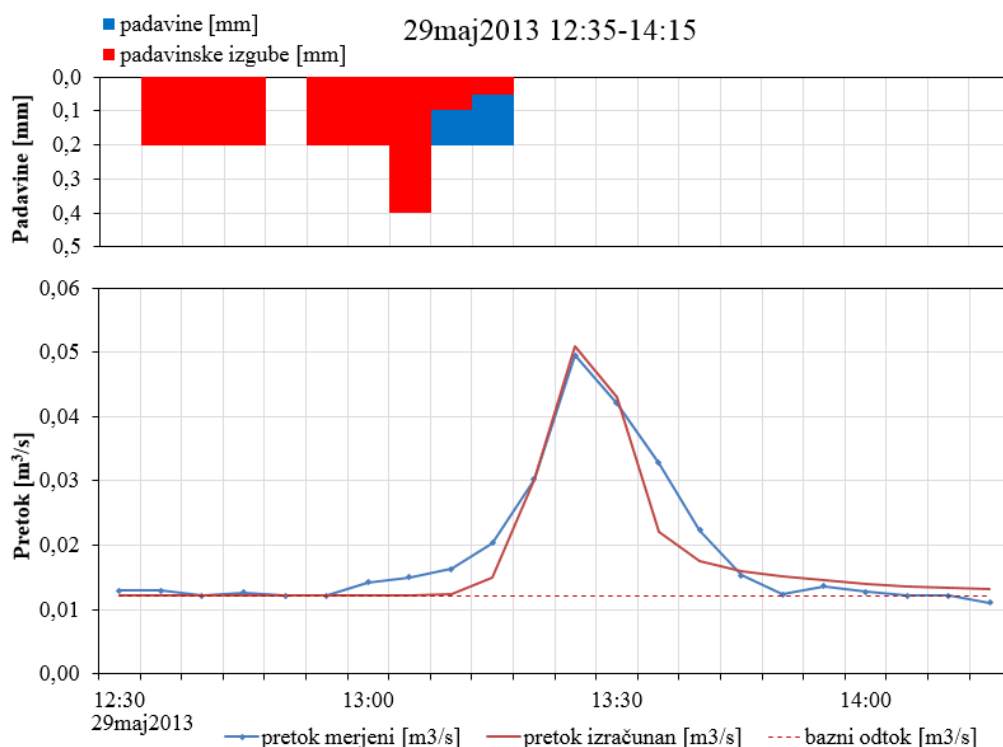
Grafikon 11: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 13. marca 2013.

Graph 11: Observed and calculated hydrograph for the event on 13th of March 2013.



Grafikon 12: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek od 6. maja do 7. maja 2013.

Graph 12: Observed and calculated hydrograph for the event from 6th until 7th of May 2013.



Grafikon 13: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 29. maja 2013.

Graph 13: Observed and calculated hydrograph for the event on 29th of May 2013.

Preglednica 8: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter *RMSE* v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za umerjanje modela.

Table 8: Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and *RMSE* for events used for model calibration.

Datum	Razlika izračunan/izmerjen volumen [%]	Razlika izračunana/izmerjena konica pretoka [%]	Razlika časa nastopa merjene in izračunane konice pretoka [hh:mm]	<i>RMSE</i> [m³/s]
2.feb.13	-4,4	-24,5	01:55	0,0339
13.mar.13	7,0	-7,7	00:00	0,0339
6.-7.maj.13	4,8	0,8	-00:05	0,0151
29.maj.13	-4,8	3,0	00:00	0,0031

V splošnem je ujemanje merjenih in simuliranih volumnov odtoka, konic pretokov in časov nastopa konice pretoka dobro, na kar kažejo tudi nizke vrednosti *RMSE*. Največje odstopanje volumnov lahko opazimo v primeru dogodka 13. 3. 2013, ki znaša 7,0 %, največje odstopanje konic pretokov pa v



primeru dogodka 2. 2. 2013, ki znaša 24,5 %. Pri ostalih dogodkih je odstopanje merjenih in simuliranih volumnov odtoka med 4,4 % in 4,8 %, odstopanje konic pretokov pa med 0,8 % in 7,7 %. Razlika v času nastopa konice merjenega in simuliranega pretoka je največja v primeru dogodka 2. 2. 2013 in znaša 01:55. V tem primeru gre za dogodek z dvema izrazitima konicama, ki se po velikosti ne razlikujeta bistveno. V primeru merjenega hidrograma je večja prva konica pretoka, ki nastopi ob 13:55 v primeru simuliranega hidrograma odtoka pa je večja druga konica pretoka, ki nastopi ob 15:40. Če primerjamo čas nastopa prve izmerjene konice s časom nastopa prve simulirane konice, pa razlika med njima znaša 10 minut. Največja vrednost *RMSE* znaša 0,0339 m<sup>3</sup>/s in se pojavi v primeru dogodkov 2. 2. 2013 in 13. 3. 2013. Opazimo lahko, da je v primeru večjih dogodkov ujemanje merjenih in simuliranih hidrogramov odtoka slabše. V primeru večjih dogodkov so simulirane konice pretokov nekoliko podcenjene.

### 3.3.2 Preverjanje

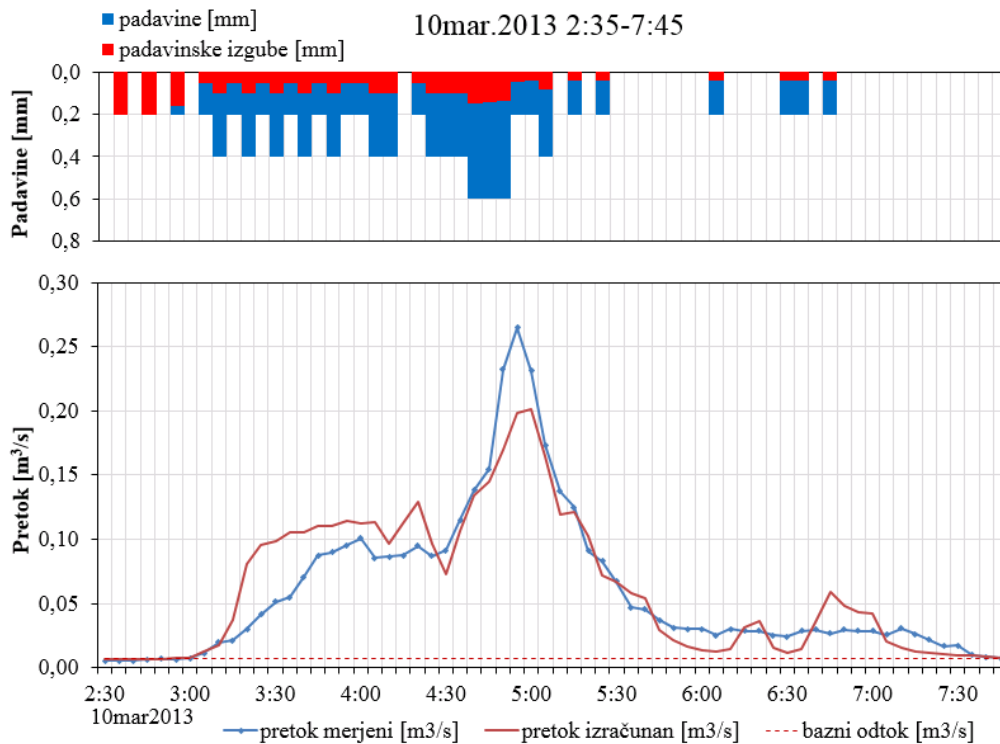
Model smo preverili s pomočjo 5 dogodkov različnih velikosti. Čas začetka padavin, čas trajanja nevihte, količina padavin, bazni odtok, maksimalna skladiščna kapaciteta vegetacije, konica pretoka in čas nastopa konice pretoka so za dogodke, ki smo jih izbrali za umerjanje modela, prikazani v preglednici 9. Pri dogodkih z več konicami so v tabeli prikazane maksimalne konice.

Preglednica 9: Značilnosti dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.

Table 9: Characteristics of the rainfall events used for model verification.

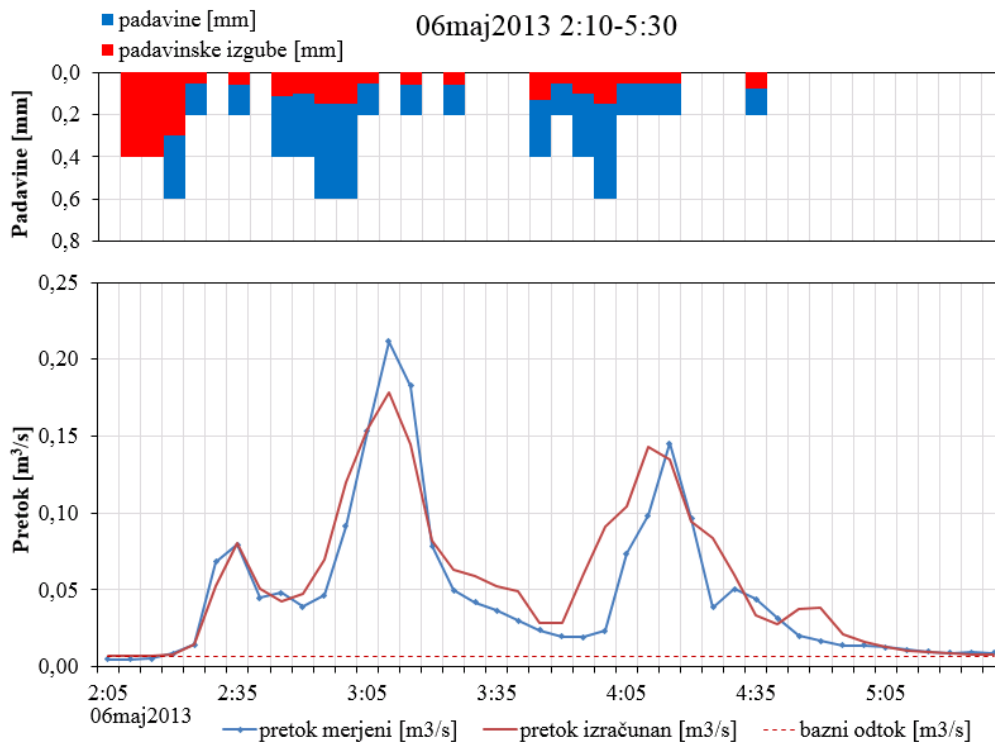
Datum	Čas začetka padavin	Čas trajanja padavin [min]	Količina padavin [mm]	Povpr. bazni odtok [m <sup>3</sup> /s]	Maks. sklad. kapaciteta vegetacije [mm]	Konica pretoka [m <sup>3</sup> /s]	Čas nastopa konice pretoka [hh:mm]
<b>10.mar.13</b>	2:35	245	10,0	0,0070	0,55	0,2647	04:55
<b>6.maj.13</b>	2:10	145	6,8	0,0069	1	0,2118	03:10
<b>21.maj.13</b>	0:50	105	5,4	0,0108	1,45	0,3590	01:40
<b>6.feb.13</b>	7:35	70	5,4	0,0124	0,55	0,1791	08:45
<b>19.maj.13</b>	15:15	10	2,0	0,0067	1,4	0,0832	15:35

Na grafikonih 14-18 so prikazane padavine in padavinske izgube ter merjeni in izračunani hidrogrami odtoka za posamezen dogodek, s pomočjo katerega je bil model preverjen. V preglednici 8 so prikazani rezultati umerjanja oziroma odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka, konicami pretokov, časi nastopa konic in *RMSE* za te dogodke. V primeru dogodkov z več konicami so prikazana odstopanja pri maksimalnih konicah.



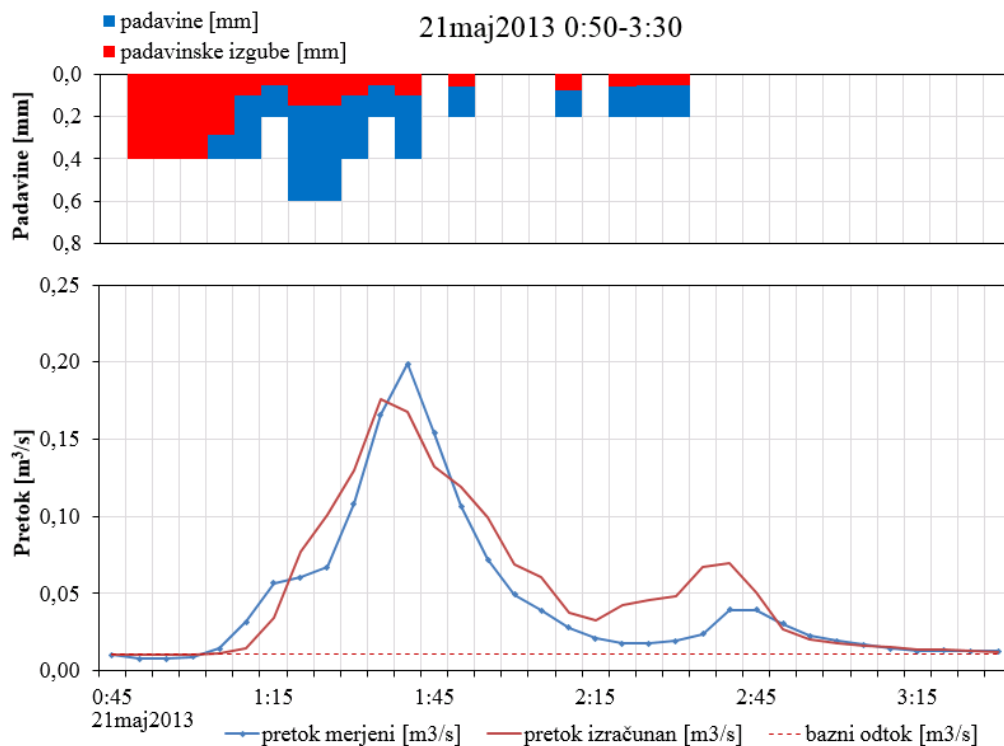
Grafikon 14: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 10. marca 2013.

Graph 14: Observed and calculated hydrograph for the event on 10th of March 2013.



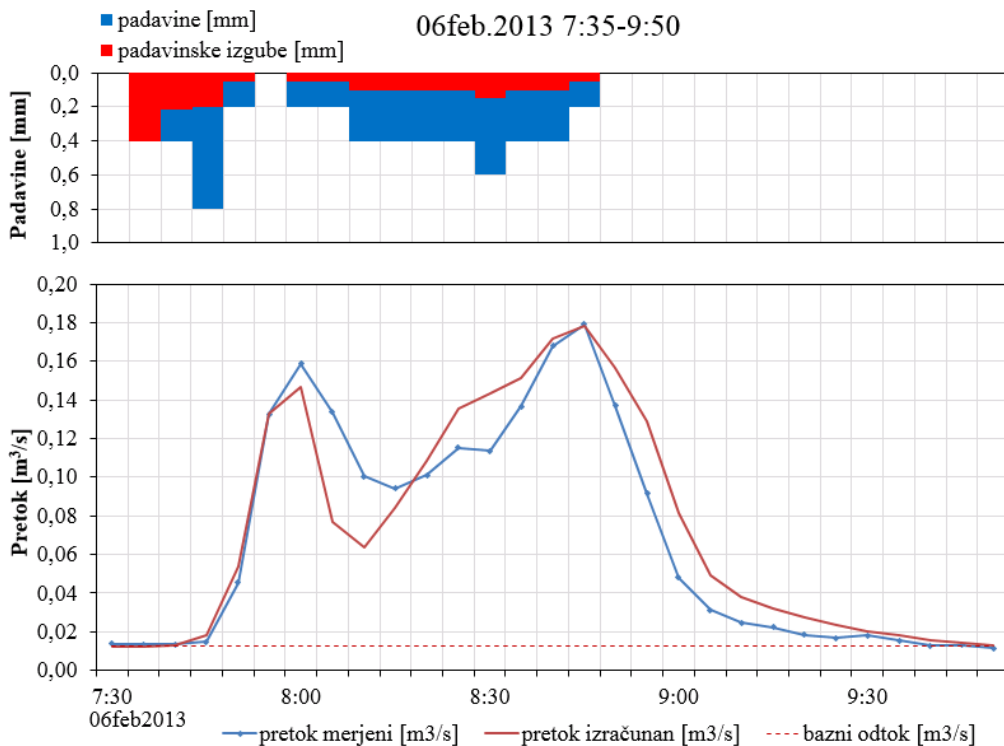
Grafikon 15: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 6. maja 2013.

Graph 15: Observed and calculated hydrograph for the event on 6th of May 2013.



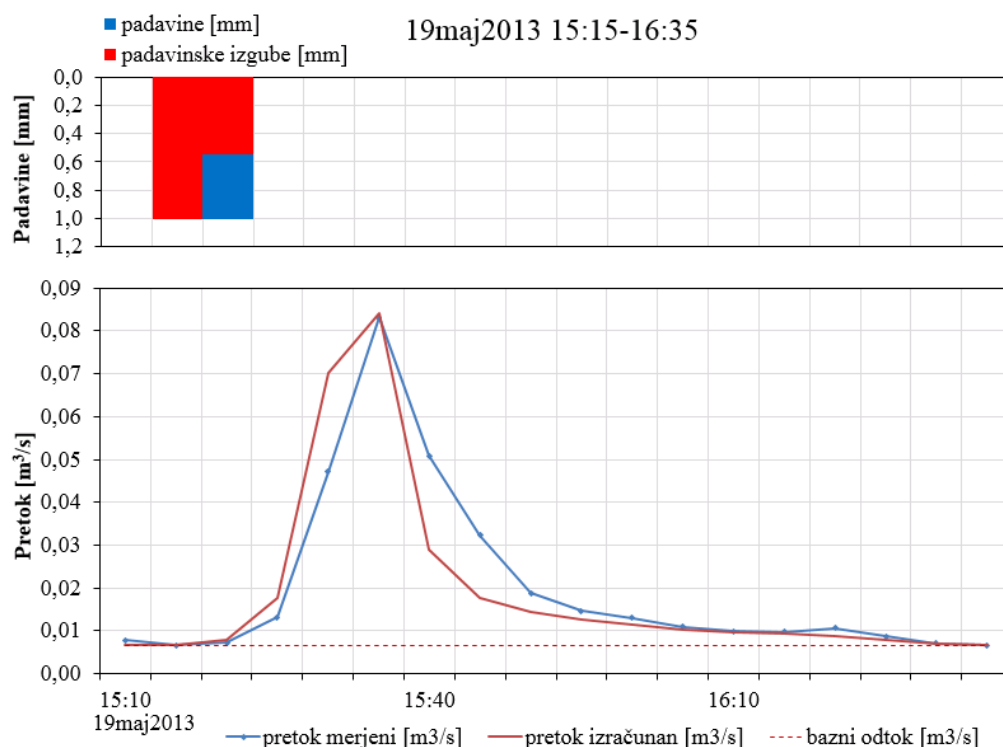
Grafikon 16: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 21. maja 2013.

Graph 16: Observed and calculated hydrograph for the event on 21st of May 2013.



Grafikon 17: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 6. februarja 2013.

Graph 17: Observed and calculated hydrographs for the event on 6th of February 2013.



Grafikon 18: Merjeni in izračunani hidrogram odtoka za dogodek z dne 19. maja 2013.

Graph 18: Observed and calculated hydrograph for the event on 19th of May 2013.

Preglednica 10: Odstopanja med merjenimi in simuliranimi volumni odtoka ter konicami pretokov v odstotkih in razlike v času nastopa konic pretokov ter *RMSE* v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela.

Table 10: Percent differences between observed and calculated volumes, peak flows, differences in time to peak and *RMSE* for events used for model verification.

Datum	Razlika izračunan/izmerjen volumen [%]	Razlika izračunana/izmerjena konica pretoka [%]	Razlika časa nastopa merjene in izračunane konice pretoka [hh:mm]	<i>RMSE</i> [m³/s]
10.mar.13	4,20	-23,8	00:05	0,0219
6.maj.13	15,9	-15,7	00:00	0,0206
21.maj.13	17,2	-11,4	-00:05	0,0184
6.feb.13	6,4	-0,3	00:00	0,0187
19.maj.13	-5,5	1,2	00:00	0,0084

Največje odstopanje volumnov odtoka v primeru dogodkov, ki smo jih uporabili za preverjanje modela in ki znaša 17,2 %, lahko opazimo pri dogodku 21. 5. 2013, največje odstopanje konic pretokov, ki znaša 23,8 %, pa pri dogodku dne 10. 3. 2013. Pri ostalih dogodkih je odstopanje

merjenih in simuliranih volumnov odtoka med 4,20 % in 15,9 %, odstopanje merjenih in simuliranih konic pretokov pa med 1,2 % in 15,7 %. Odstopanje merjenega in simuliranega časa, ko nastopi konica pretoka, je največje pri dogodkih dne 10. 3. 2013 in dne 21. 5. 2013 ter znaša 5 minut. Največja vrednost *RMSE* je izračunana za dogodek dne 10. 3. 2013 in znaša 0,0219 m<sup>3</sup>/s.

### **3.4 Razporeditev, dimenzioniranje in modeliranje sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom**

Izbrane ukrepe za ponikanje padavinske vode in zelene strehe smo glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve, ki so opisane v poglavju 2.4, razporedili po prispevnem območju in jim po postopkih, ki so opisani v poglavju 2.5 določili ustrezne dimenzije. V primeru ponikalnih jaškov in cevni ponikalnih jarkov smo privzeli, da koeficient hidravlične prevodnosti pri zasičeni zemljini  $k_f$  znaša  $1,45 \cdot 10^{-3}$  m/s. To je vrednost, ki so jo določili s pomočjo nalivalnih preizkusov na območju Etnografskega muzeja ob Metelkovi ulici (Brenčič, 2003). Merodajno trajanje naliva v primeru ponikalnih jaškov je v vseh primerih 15 minut, v primeru cevni ponikalnih jarkov pa 10 min. Za vrednost faktorja potopitve  $f_s$  smo privzeli vrednost 1,2. V prilogi A so prikazane osnovne karakteristike predvidenih ponikalnih jaškov, v prilogi B pa osnovne karakteristike predvidenih cevni ponikalnih jarkov. Predvidene zelene strehe smo razporedili po prispevnem območju glede na naklon strehe, ki smo ga ocenili na podlagi ortofoto posnetka in terenskega ogleda. Naklon strehe, ki je še primeren za ureditev zelene strehe mora biti manjši od 1:3.

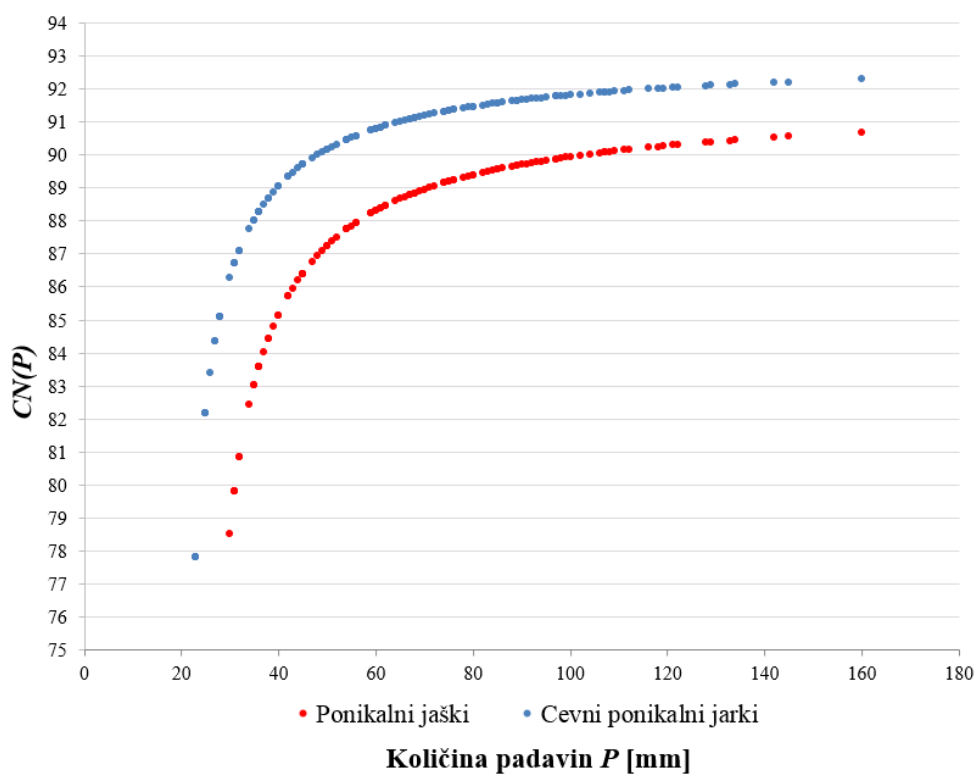
Izkazalo se je, da je na obravnavanem območju možno dodatno ponikati padavinsko vodo s streh s skupno površino 18826,3 m<sup>2</sup> streh, kar predstavlja 12,9 % celotne površine prispevnega območja, 16185,0 m<sup>2</sup> utrjenih površin, kar predstavlja 11,6 % celotnega območja in urediti 18398,5 m<sup>2</sup> zelenih streh, kar predstavlja 12,6 % celotnega območja. Omenjene vrednosti so zbrane v preglednici 11.

Koeficiente *CN* za strehe s predvidenimi ponikalnimi jaški oziroma koeficient *CN* za utrjene površine s predvidenimi cevni ponikalnimi jarki, smo določili po enakem postopku kot koeficiente *CN* za območja z obstoječimi ponikalnimi jaški oziroma s pomočjo metode, ki je opisana v poglavju 2.6.2.2. Diagrama *CN-P* za ta območja (slika 22 in slika 23) sta prikazana na grafikonu 19. Kot je razvidno iz omenjenih grafikonov, se v primeru streh s predvidenimi ponikalnimi jaški koeficient *CN* približuje vrednosti 91 (zaokroženo na celo vrednost), v primeru utrjenih površin s predvidenimi cevni ponikalnimi jarki pa k vrednosti 92.

Preglednica 11: Deleži neprepustnih površin, ki jih pri posameznem scenariju odklopimo s kanalizacijskega sistema.

Table 11: Percent impervious area disconnected from sewer system for each scenario.

	Površina, ki jo odklopimo s kanalizacijskega sistema pri pos. scenariju A [m <sup>2</sup> ]	Delež od celotnega prisp. območja [%]
Scenarij 2	18826,3	12,9
Scenarij 3	16518,8	11,4
Scenarij 4	18398,5	12,6
Scenarij 5	35345,0	24,3
Scenarij 6	48593,9	33,4

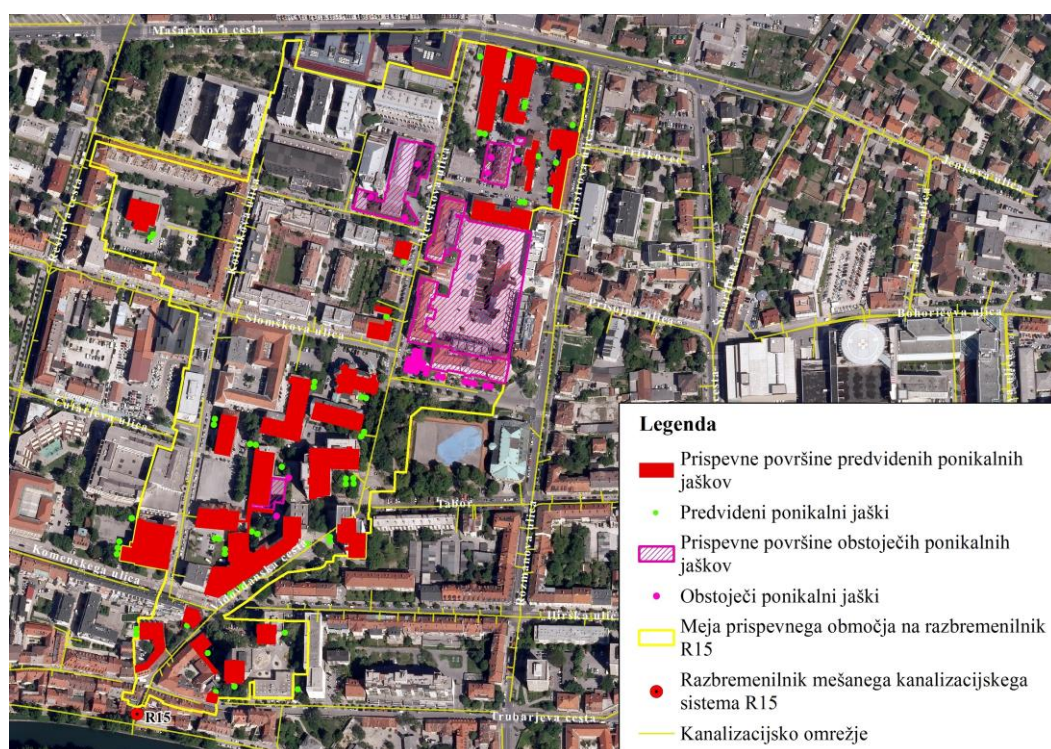


Grafikon 19: Diagrama  $CN-P$  za površine s predvidenimi ponikalnimi jaški in cevni ponikalnimi jarki.

Graph 19: Diagrams  $CN-P$  for areas with proposed infiltration shafts and proposed pipe infiltration trenches.

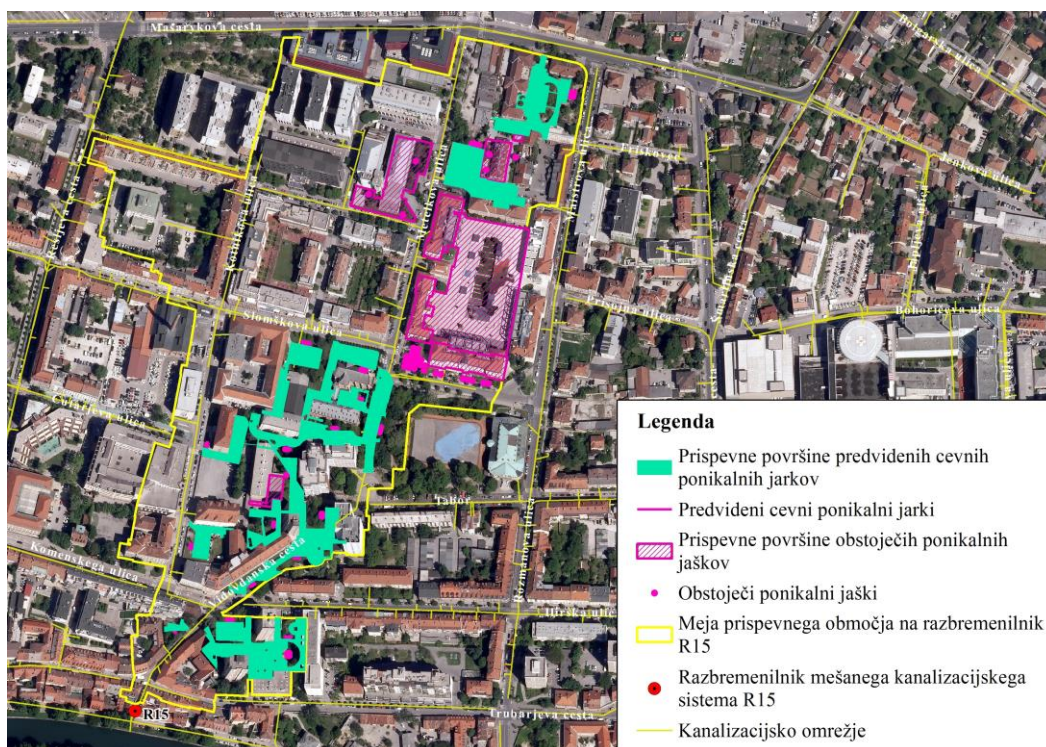
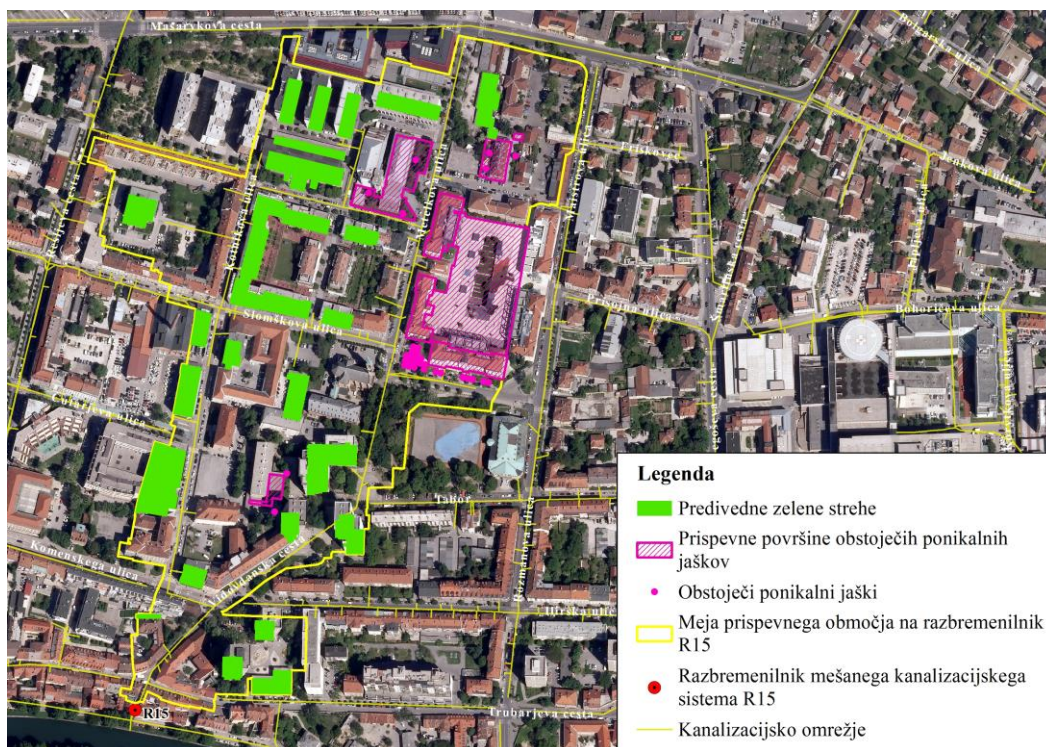
V primeru scenarija 1, ki predvideva da na območju ni ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom (tudi obstoječih ne), znaša delež neprepustnih površin, ki so direktno povezane s kanalizacijskim sistemom ( $DNP$ , ang. *proportion of impervious area – PIA*) 83,5 %,  $CN_{komp.}$  pa 87.

Za preostale scenarije, ki so opredeljeni v poglavju 2.7, so v nadaljevanju na posameznih kartah območja prikazane površine, ki imajo padavinsko vodo odvedeno bodisi v ponikanje bodisi imajo urejene zelene strehe (slike 22-26). Poleg tega je zraven pripisan še delež neposredno povezanih neprepustnih površin ( $DNP$ ), ki se po uvedbi ukrepov ustrezno zmanjša in nova vrednost kompozitnega koeficienta ( $CN_{komp.}$ ) za prispevno območje, v kateri so poleg površin, ki že prej niso bile neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom, sedaj upoštevane še površine s ponikalnimi jaški in cevnimi ponikalnimi jarki ter predvidene zelene strehe.

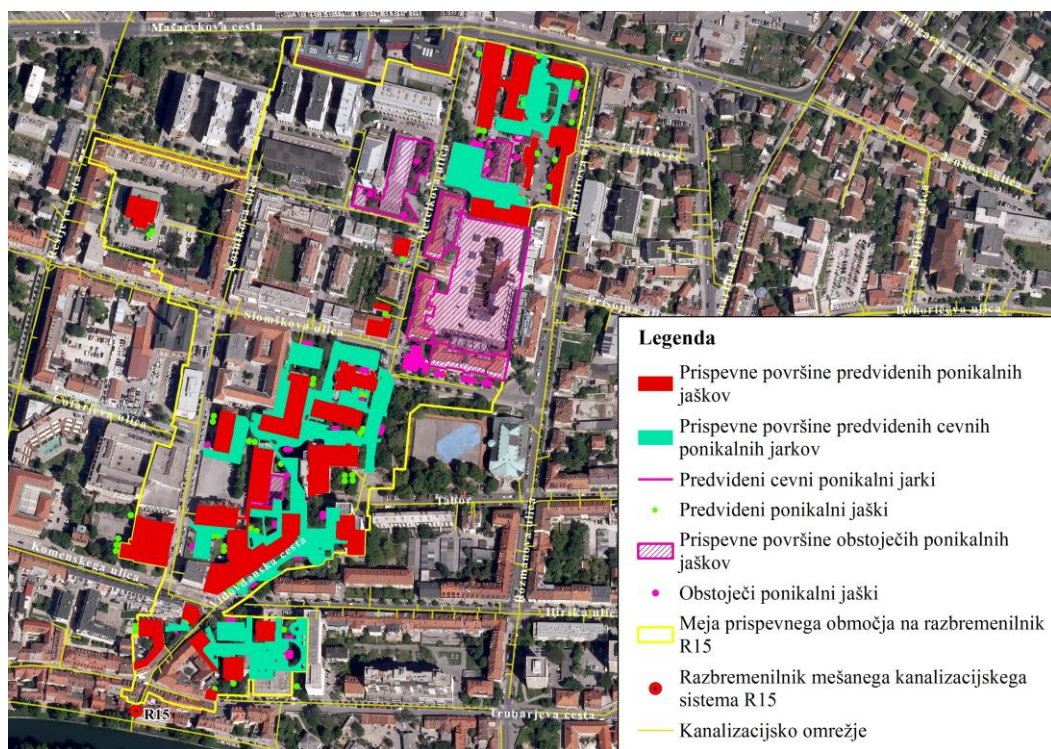


Slika 22: Scenarij 2:  $DNP = 62,0\%$ ,  $CN_{komp.} = 90$  (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 22: Scenario 2:  $PIA = 62,0\%$ ,  $CN_{comp.} = 90$  (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

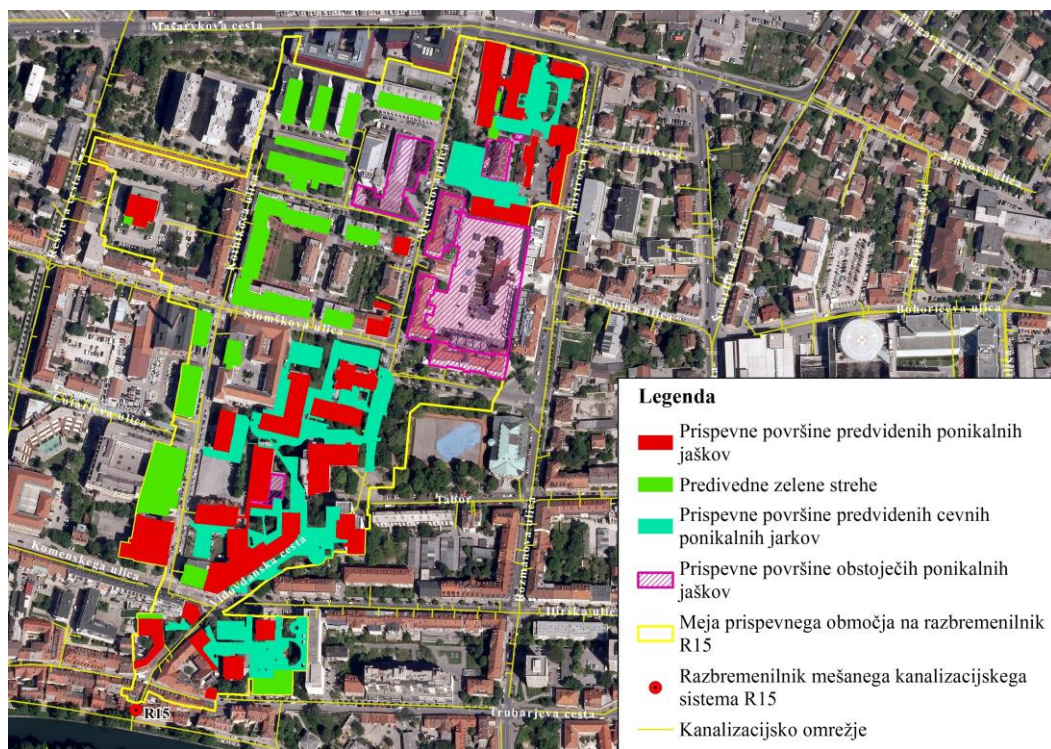
Slika 23: Scenarij 3:  $DNP = 63,7\%$ ,  $CN_{komp.} = 91$  (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).Figure 23: Scenario 3:  $PIA = 63,7\%$ ,  $CN_{comp.} = 91$  (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).Slika 24: Scenarij 4:  $DNP = 62,3\%$ ,  $CN_{komp.} = 91$  (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).Figure 24: Scenario 4:  $PIA = 62,3\%$ ,  $CN_{comp.} = 91$  (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).





Slika 25: Scenarij 5:  $DNP = 50,6 \%$ ,  $CN_{komp.} = 91$  (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 25: Scenario 5:  $PIA = 50,6 \%$ ,  $CN_{comp.} = 91$  (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

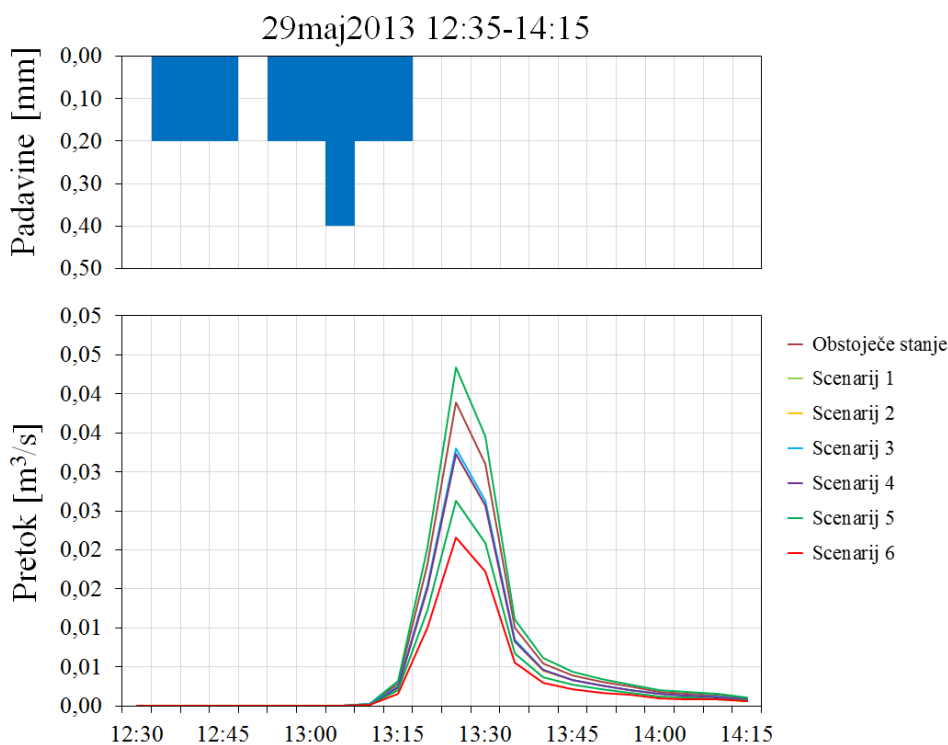


Slika 26: Scenarij 6:  $DNP = 41,5 \%$ ,  $CN_{komp.} = 91$  (ortofoto: GURS, 2014; kataster kan.: JP VO-KA, 2013).

Figure 26: Scenario 6:  $PIA = 41,5 \%$ ,  $CN_{comp.} = 91$  (orthophoto: GURS, 2014; sewer sys.: JP VO-KA, 2013).

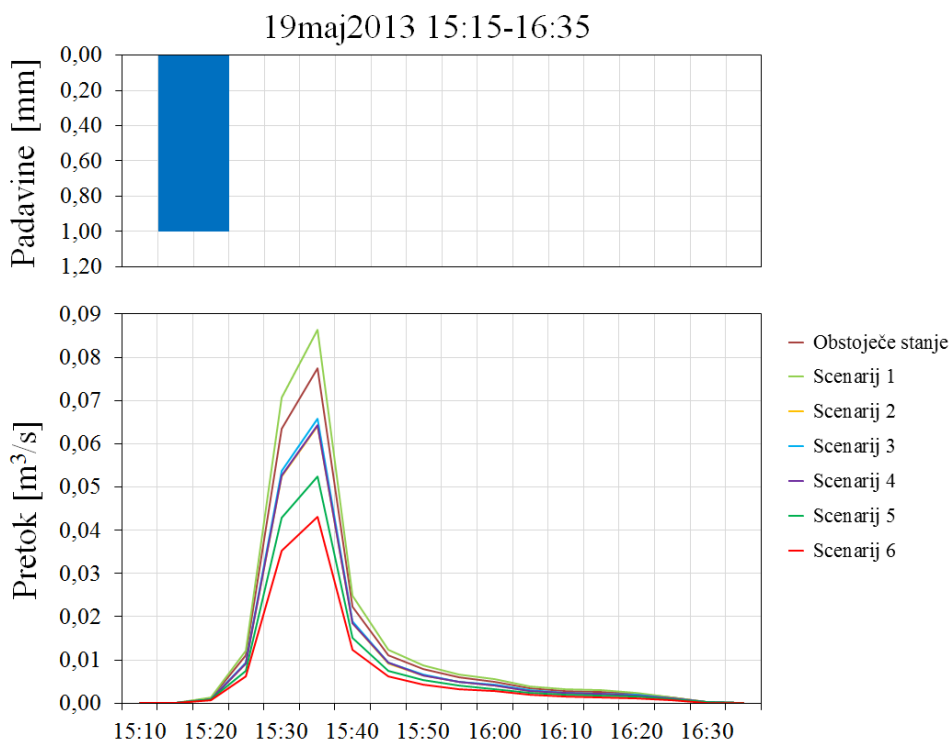
### 3.5 Rezultati modeliranja površinskega odtoka pri posameznih scenarijih uporabe sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom

Kot je omenjeno že v poglavju 2.7, smo površinski odtok v primeru posameznih scenarijev simulirali za vse dogodke, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje osnovnega modela, in pa za 6 primerov sintetičnih neviht s povratnimi dobami 2, 5, 10, 25, 50 in 100 let. Na grafikonih 20-28 so prikazani histogrami skupne količine padavin in hidrogrami površinskega odtoka, ki so posledica različnih scenarijev uporabe sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom, v primeru dogodkov, s pomočjo katerih smo umerili in preverili osnovni model, na grafikonih 29-34 pa v primeru sintetičnih neviht.



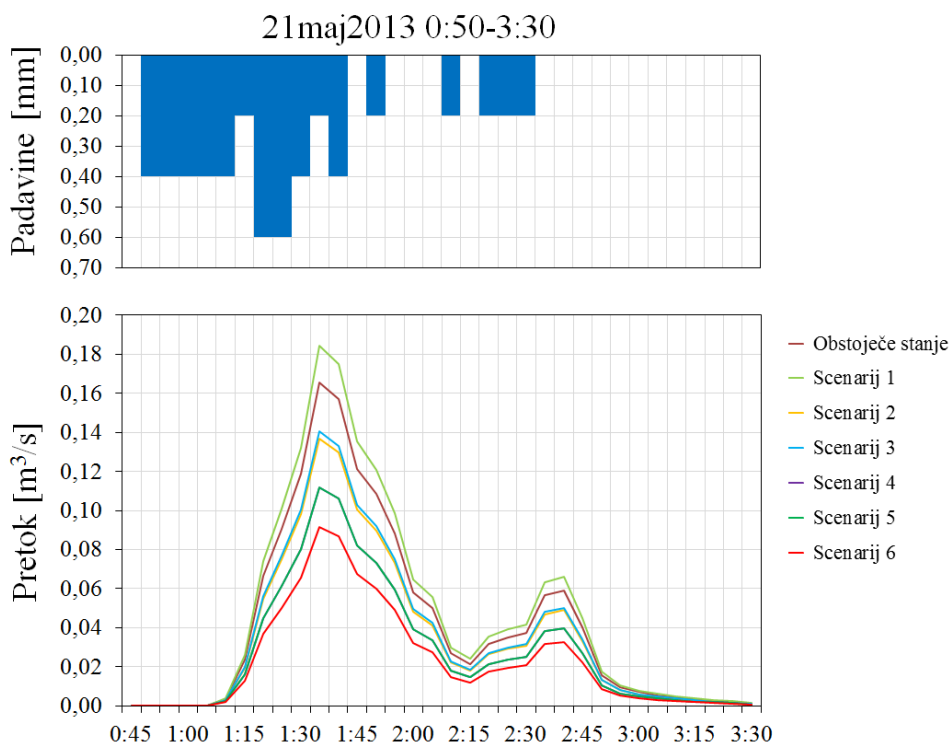
Grafikon 20: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 29. maja 2013.

Graph 20: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 29th of May 2013.



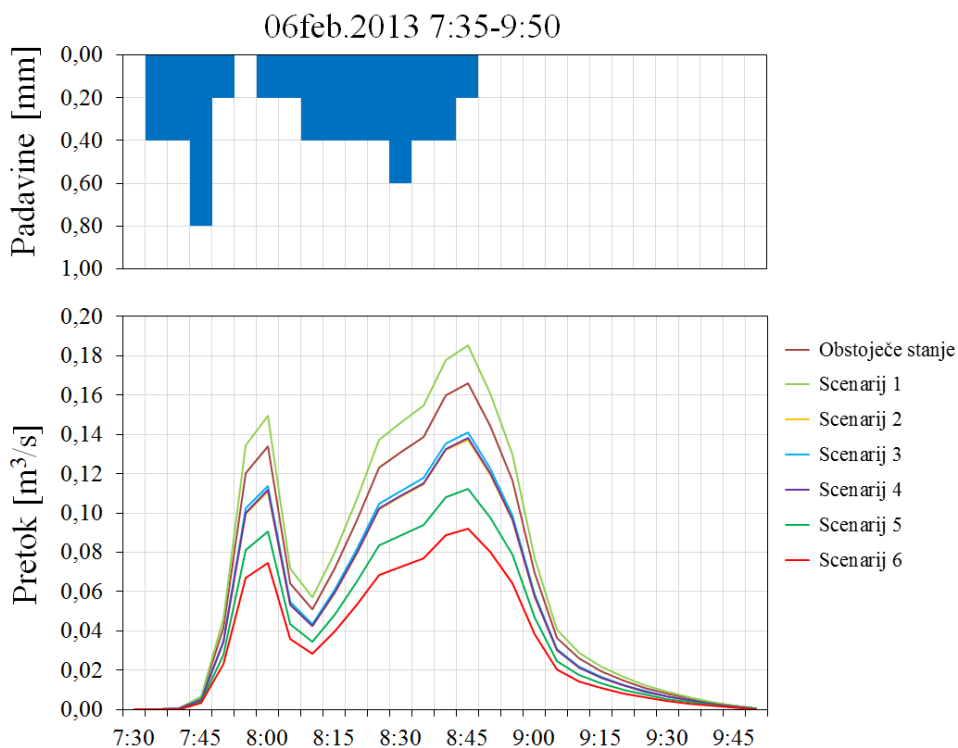
Grafikon 21: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 19. maja 2013.

Graph 21: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 19th of May 2013.



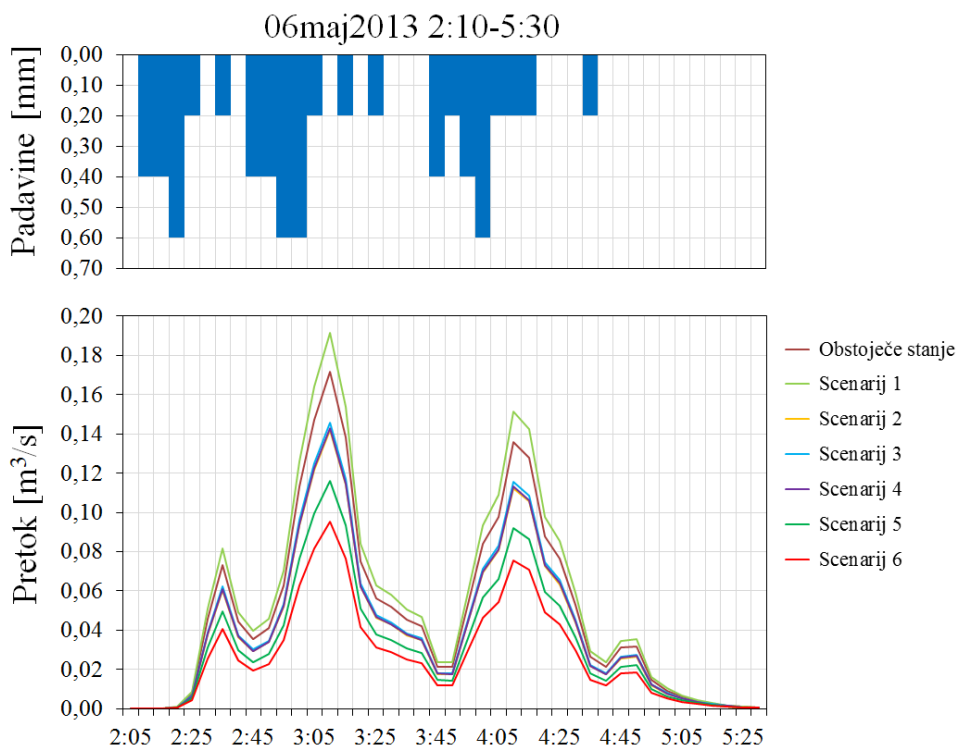
Grafikon 22: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 21. maja 2013.

Graph 22: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 21st of May 2013.



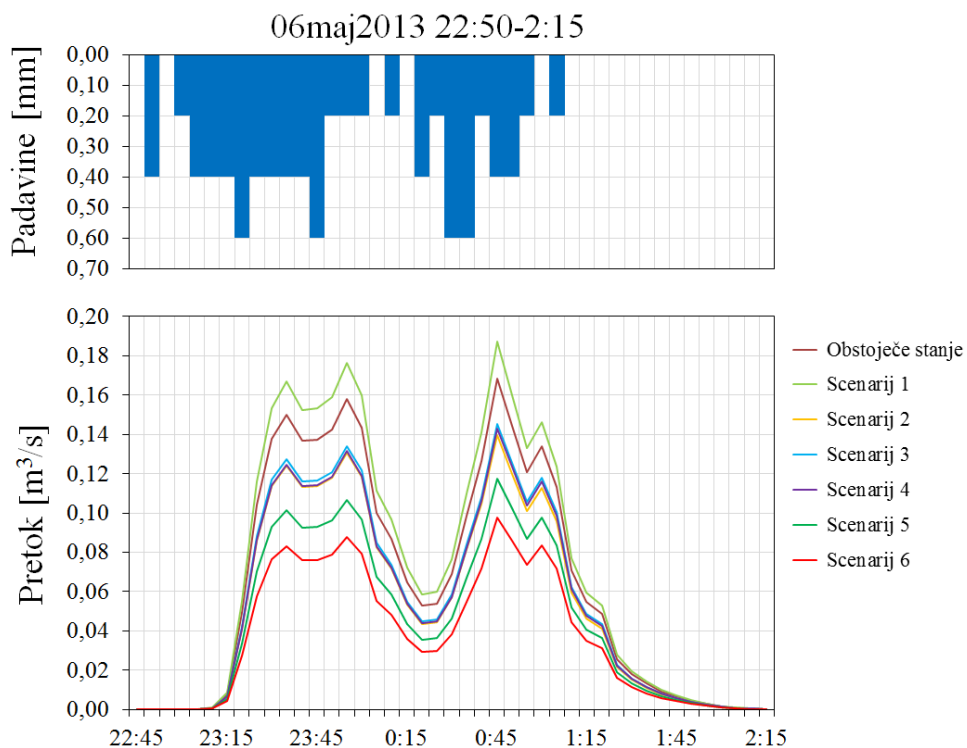
Grafikon 23: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 6. februarja 2013.

Graph 23: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 6th of February 2013.



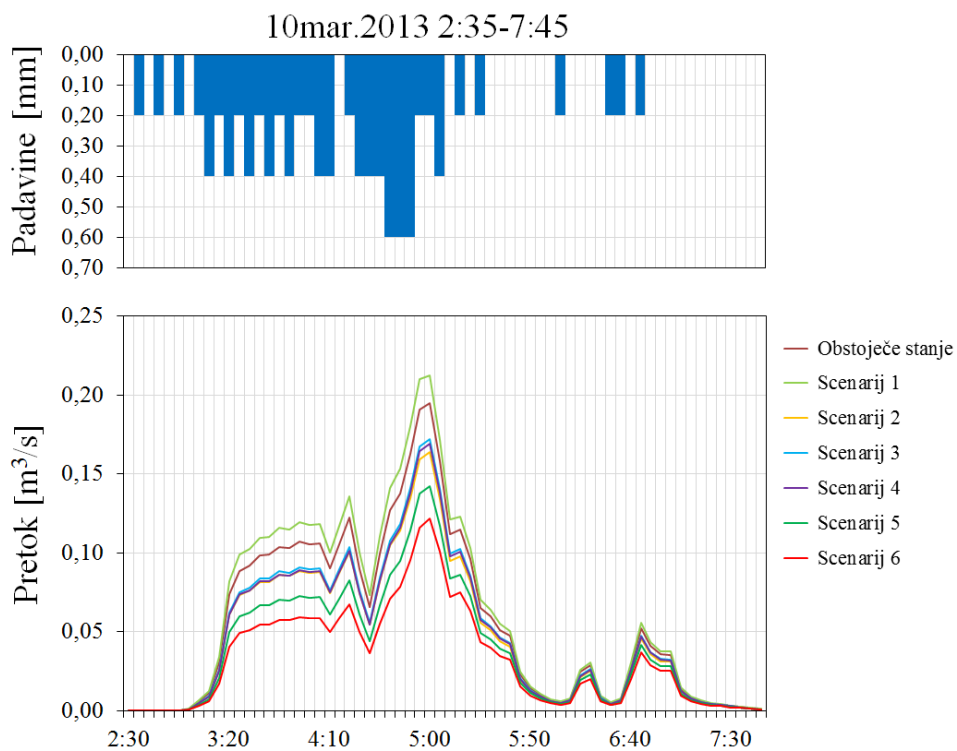
Grafikon 24: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 6. maja 2013 zjutraj.

Graph 24: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 6th of May 2013.



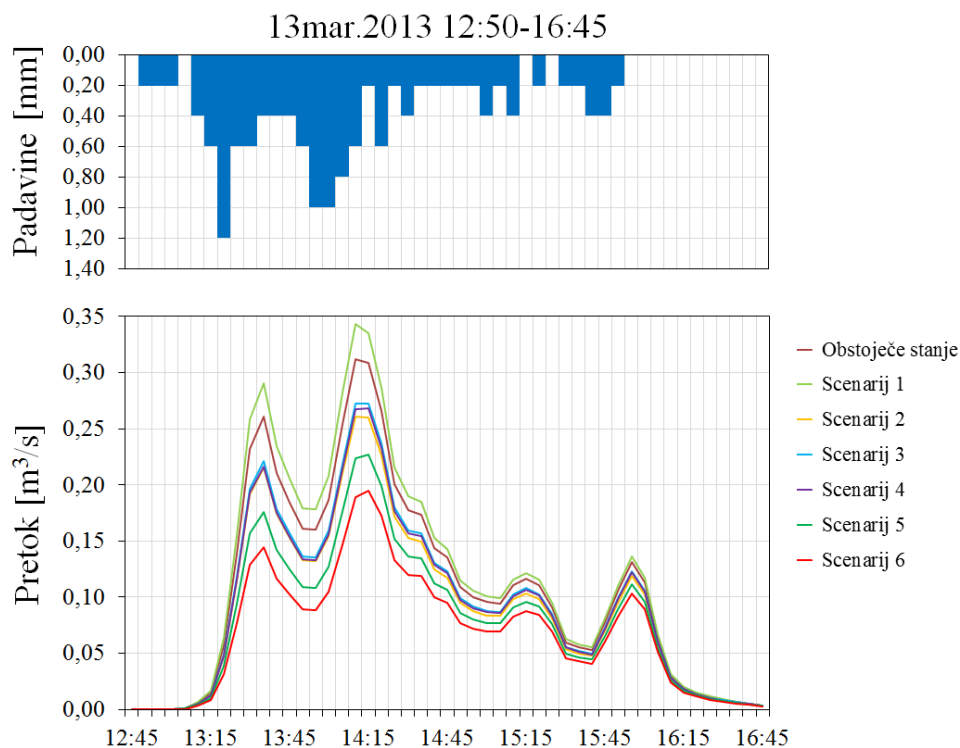
Grafikon 25: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku od 6. maja do 7. maja 2013.

Graph 25: Runoff hydrographs for each scenario for the event from 6th until 7th of May 2013.



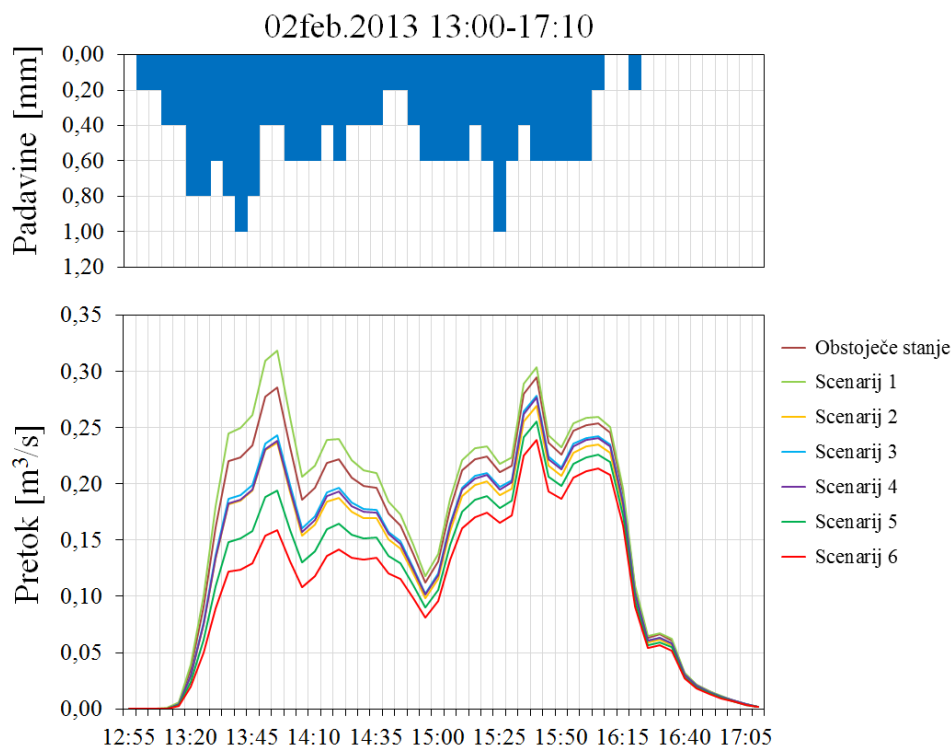
Grafikon 26: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 10. marca 2013.

Graph 26: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 10th of March 2013.



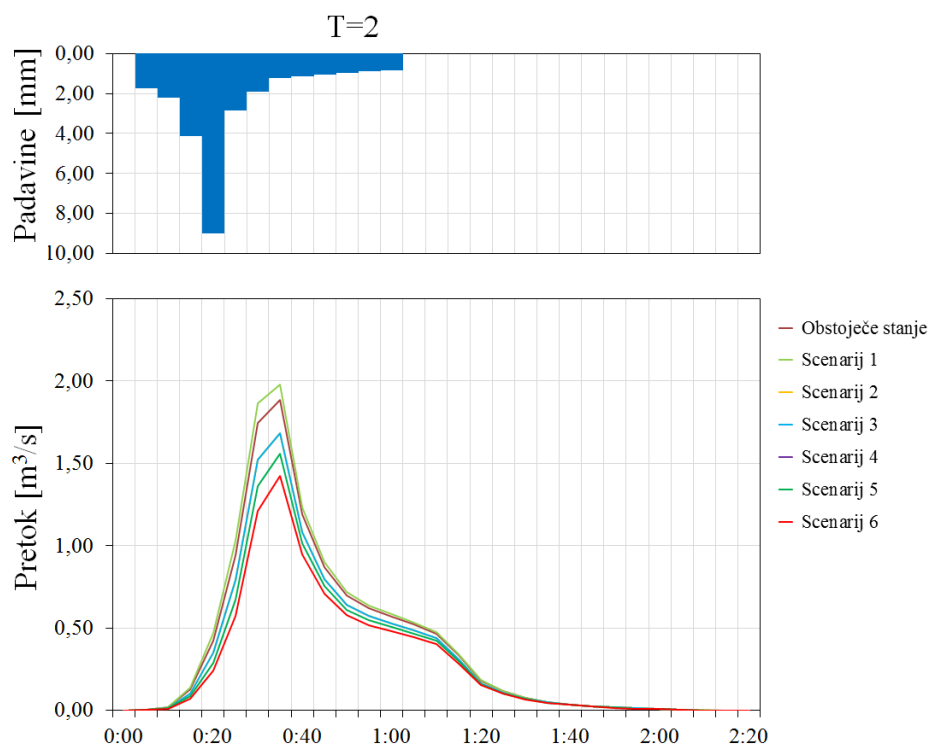
Grafikon 27: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 13. marca 2013.

Graph 27: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 13th of March 2013.



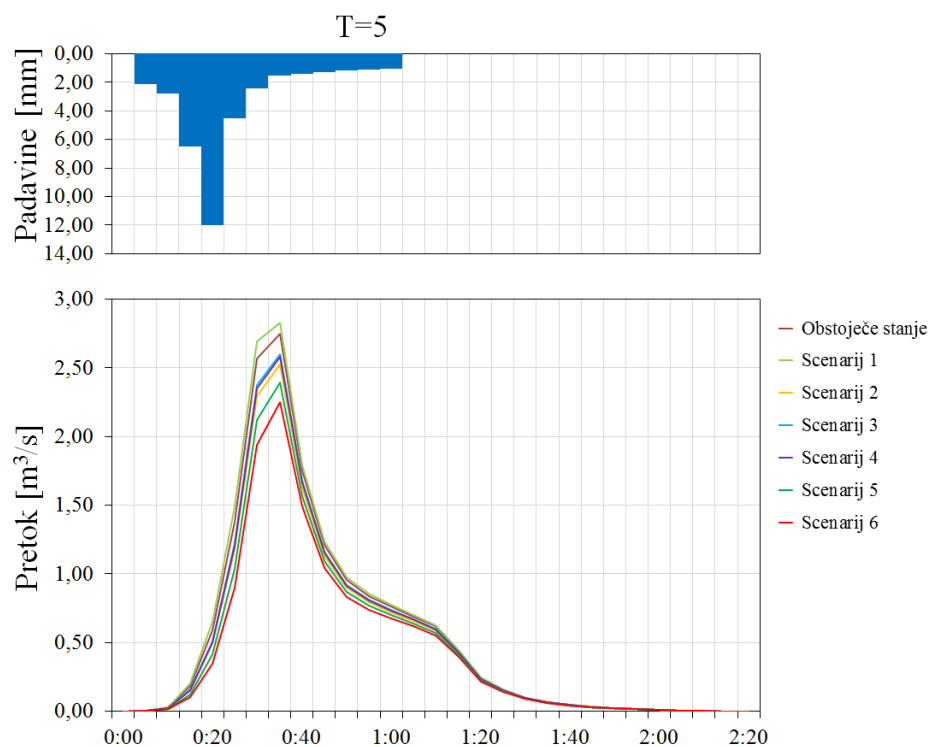
Grafikon 28: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z dne 2. februarja 2013.

Graph 28: Runoff hydrographs for each scenario for the event on 2nd of February 2013.



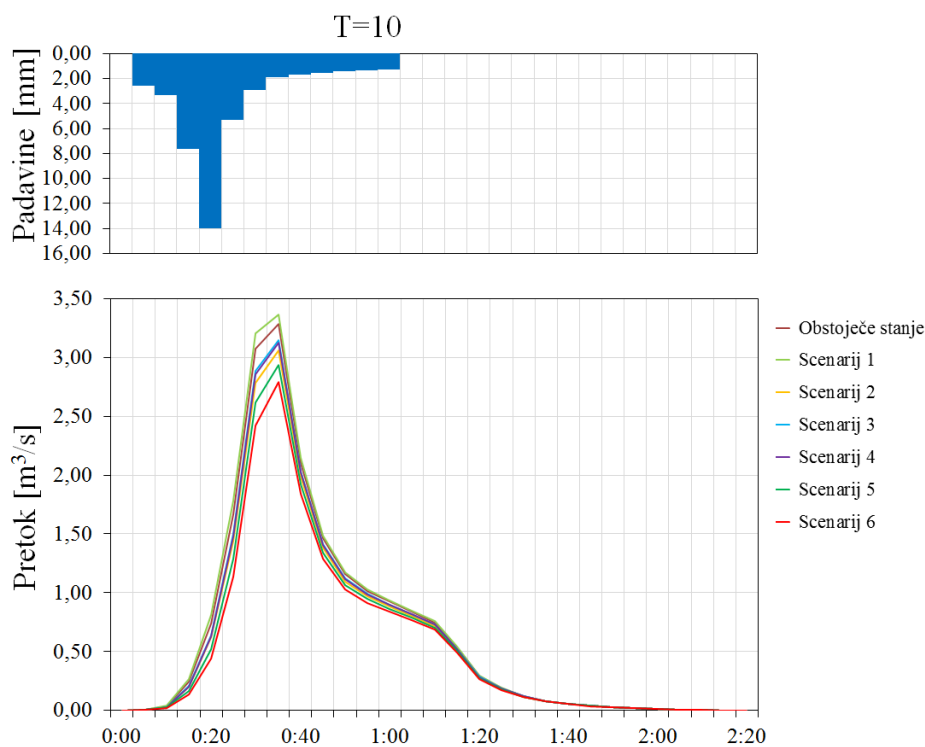
Grafikon 29: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z 2-letno povratno dobo.

Graph 29: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 2-year return period.



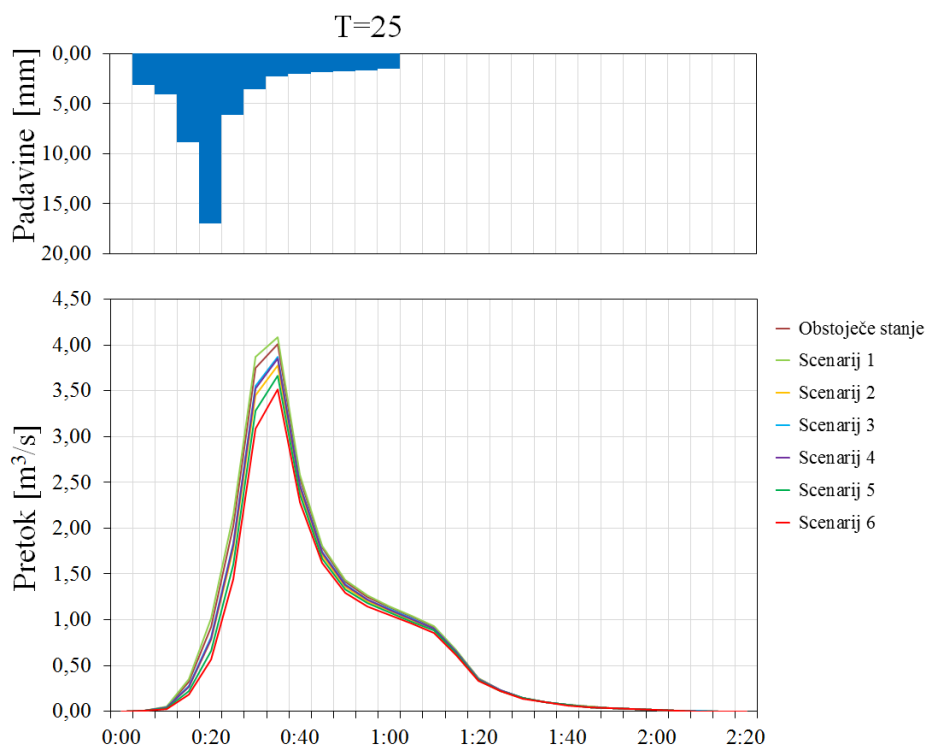
Grafikon 30: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 5-letno povratno dobo.

Graph 30: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 5-year return period.



Grafikon 31: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku z 10-letno povratno dobo.

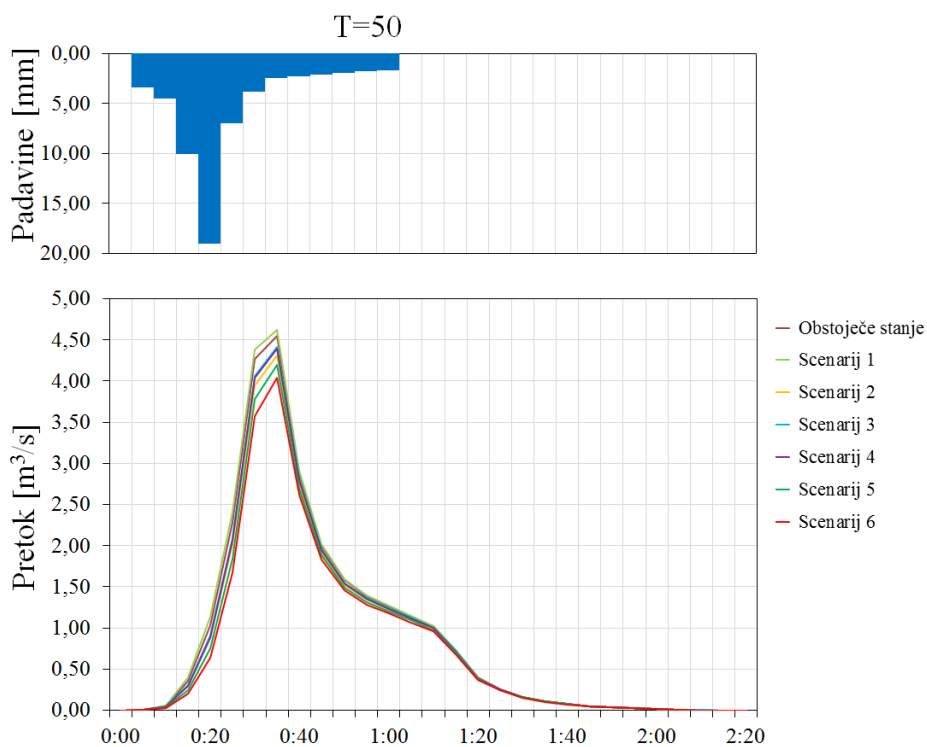
Graph 31: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 10-year return period.



Grafikon 32: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 25-letno povratno dobo.

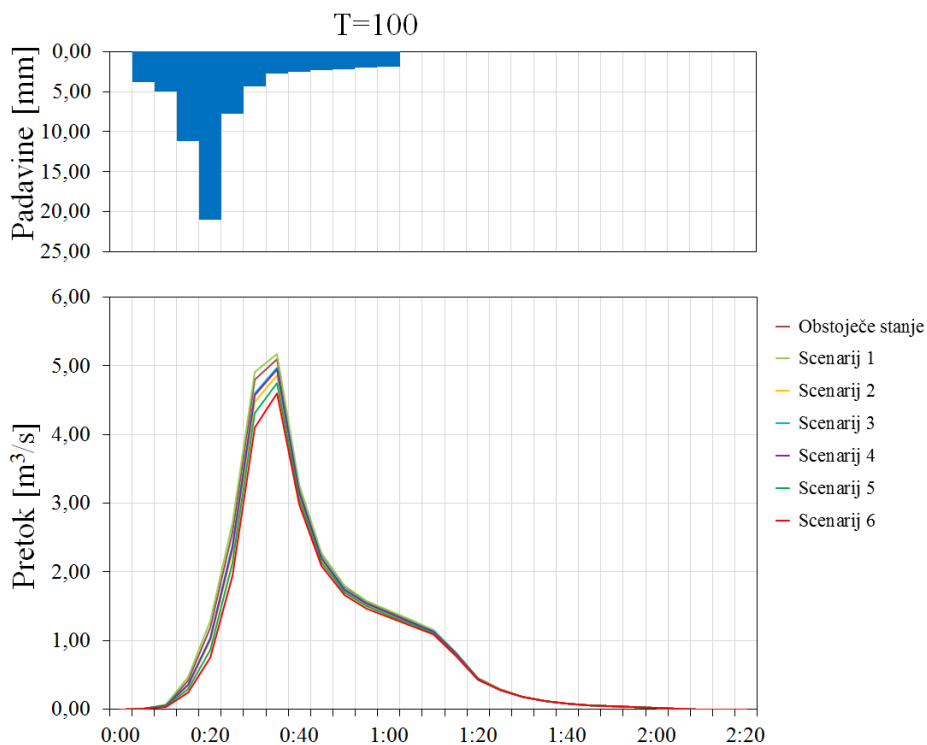
Graph 32: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 25-year return period.





Grafikon 33: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 50-letno povratno dobo.

Graph 33: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 50-year return period.



Grafikon 34: Hidrogrami odtoka za posamezne scenarije pri dogodku s 100-letno povratno dobo.

Graph 34: Runoff hydrographs for each scenario for the event with 100-year return period.

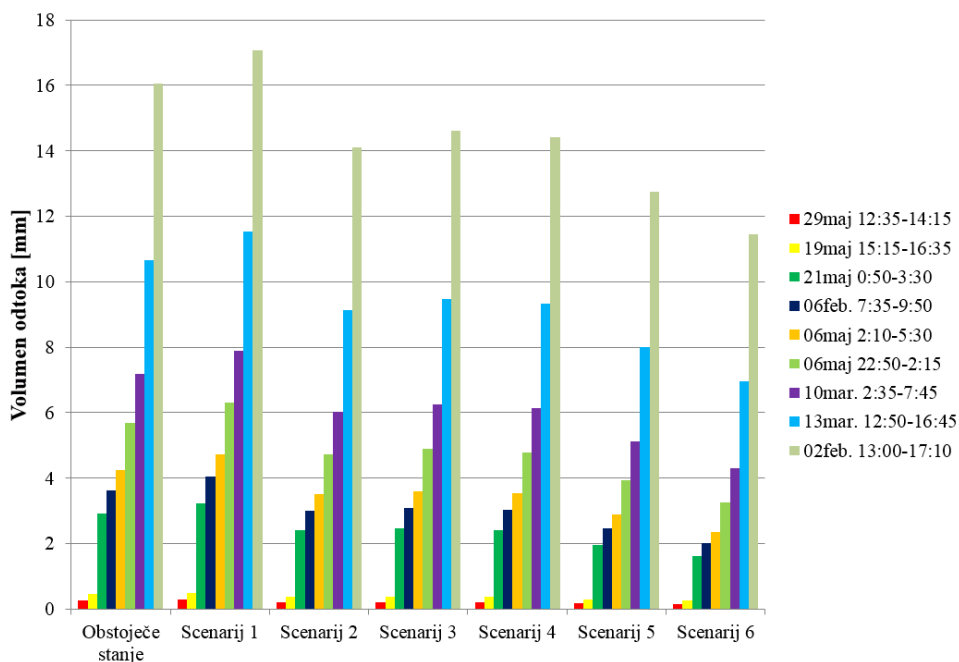
V preglednici 12 so prikazani volumni odtoka in velikosti konic pretokov za posamezne dogodke in scenarije. V primeru realnih dogodkov z več konicami so prikazane velikosti maksimalnih konic. Časi do nastopa konice pretoka niso prikazani, saj se razen pri dogodku 13. marca v primeru scenarijev 4, 5 in 6 glede na obstoječe stanje niso spremenili v nobenem drugem primeru oziroma so se spremenili za manj, kot je časovna resolucija podatkov. Zaradi tega njihove vrednosti niso relevantne za nadaljnjo analizo. To je razvidno tudi iz grafikonov 20-34. Pri dogodku 13. marca je čas nastopa maksimalne konice pretoka v primeru scenarijev 4, 5 in 6 za 5 minut daljši kot pri obstoječih razmerah.

Preglednica 12: Volumni odtoka in konice pretokov pri posameznih scenarijih in dogodkih.

Table 12: Runoff volumes and peak flows for each scenario and rainfall event.

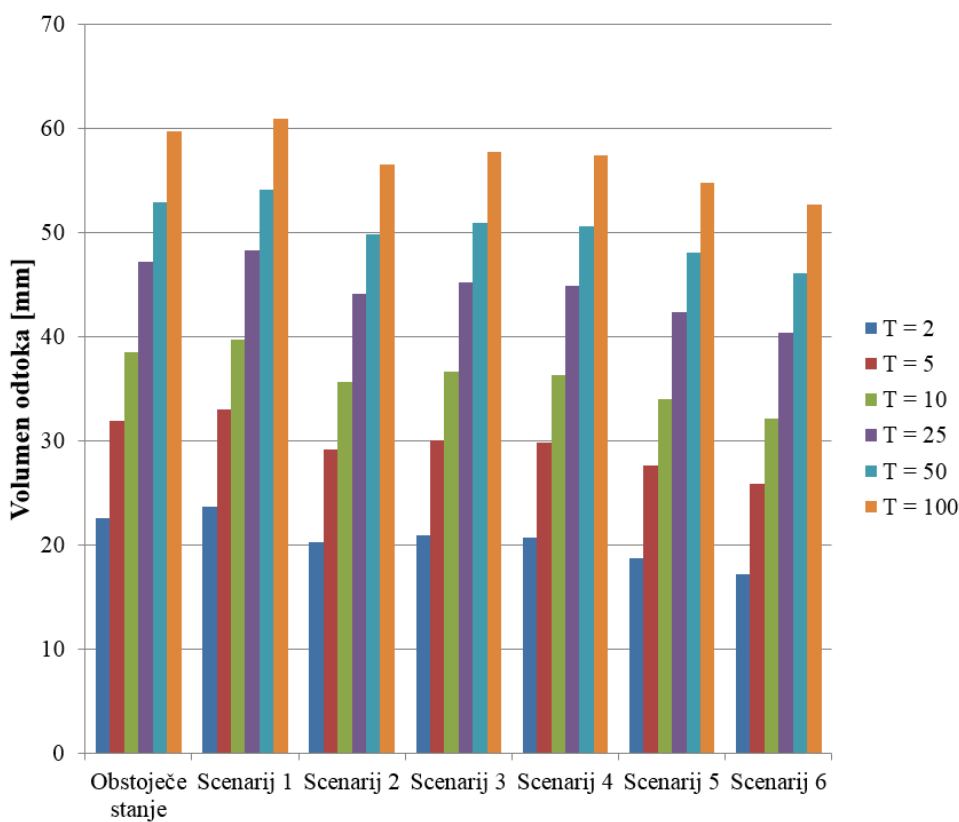
	Sc 1		Sc 2		Sc 3		Sc 4		Sc 5		Sc 6	
	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_{sc.}$ [mm]	$Q_{sc.}$ [m <sup>3</sup> /s]
<b>29maj 12:35-14:15</b>	0,3	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
<b>19maj 15:15-16:35</b>	0,5	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,0
<b>21maj 0:50-3:30</b>	3,2	0,2	2,4	0,1	2,5	0,1	2,4	0,1	2,0	0,1	1,6	0,1
<b>06feb. 7:35-9:50</b>	4,0	0,2	3,0	0,1	3,1	0,1	3,0	0,1	2,5	0,1	2,0	0,1
<b>06maj 2:10-5:30</b>	4,7	0,2	3,5	0,1	3,6	0,1	3,5	0,1	2,9	0,1	2,4	0,1
<b>06maj 22:50-2:15</b>	6,3	0,2	4,7	0,1	4,9	0,1	4,8	0,1	3,9	0,1	3,3	0,1
<b>10mar. 2:35-7:45</b>	7,9	0,2	6,0	0,2	6,2	0,2	6,1	0,2	5,1	0,1	4,3	0,1
<b>13mar. 12:50-16:45</b>	11,5	0,3	9,1	0,3	9,5	0,3	9,3	0,3	8,0	0,2	6,9	0,2
<b>02feb. 13:00-17:10</b>	16,1	0,3	16,1	0,3	16,1	0,3	16,1	0,3	16,1	0,3	11,5	0,2
<b>T = 2</b>	23,6	2,0	20,2	1,7	20,9	1,7	20,7	1,7	18,7	1,6	17,2	1,4
<b>T = 5</b>	33,0	2,8	29,2	2,5	30,0	2,6	29,8	2,6	27,6	2,4	25,8	2,3
<b>T = 10</b>	39,7	3,4	35,7	3,1	36,6	3,1	36,3	3,1	34,0	2,9	32,1	2,8
<b>T = 25</b>	48,3	4,1	44,1	3,8	45,1	3,9	44,9	3,9	42,4	3,7	40,4	3,5
<b>T = 50</b>	54,1	4,6	49,8	4,3	50,9	4,4	50,6	4,4	48,0	4,2	46,0	4,0
<b>T = 100</b>	60,9	5,2	56,5	4,9	57,7	5,0	57,4	4,9	54,7	4,8	52,6	4,6

Na grafikonih 35-38 so prikazani volumni odtoka in konice pretokov za različne padavinske dogodke in scenarije.



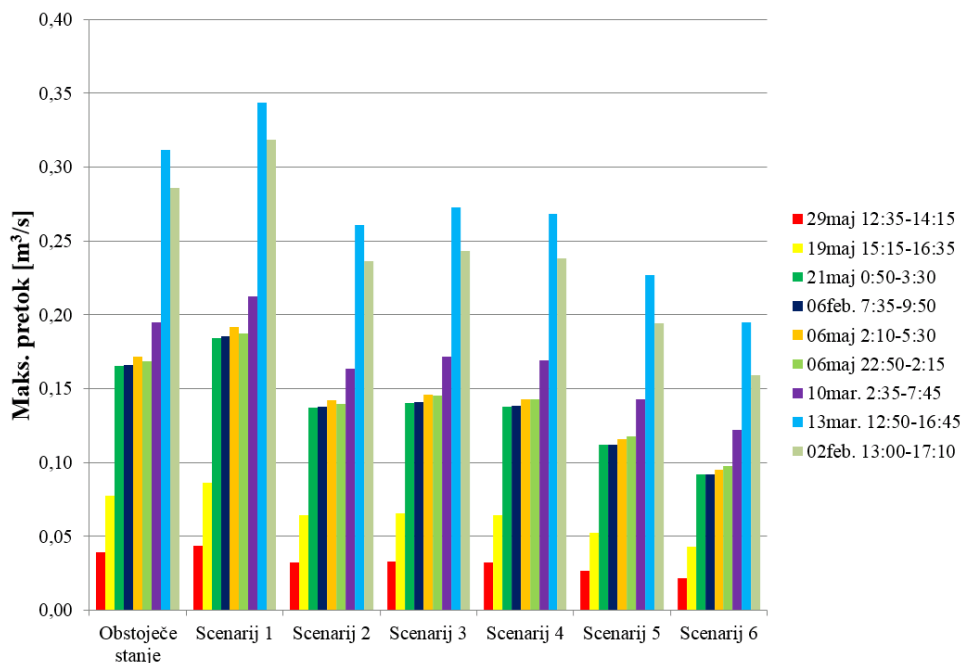
Grafikon 35: Volumni odtoka pri posameznih scenarijih in padavinskih dogodkih.

Graph 35: Runoff volumes for each scenario for several rainfall events.



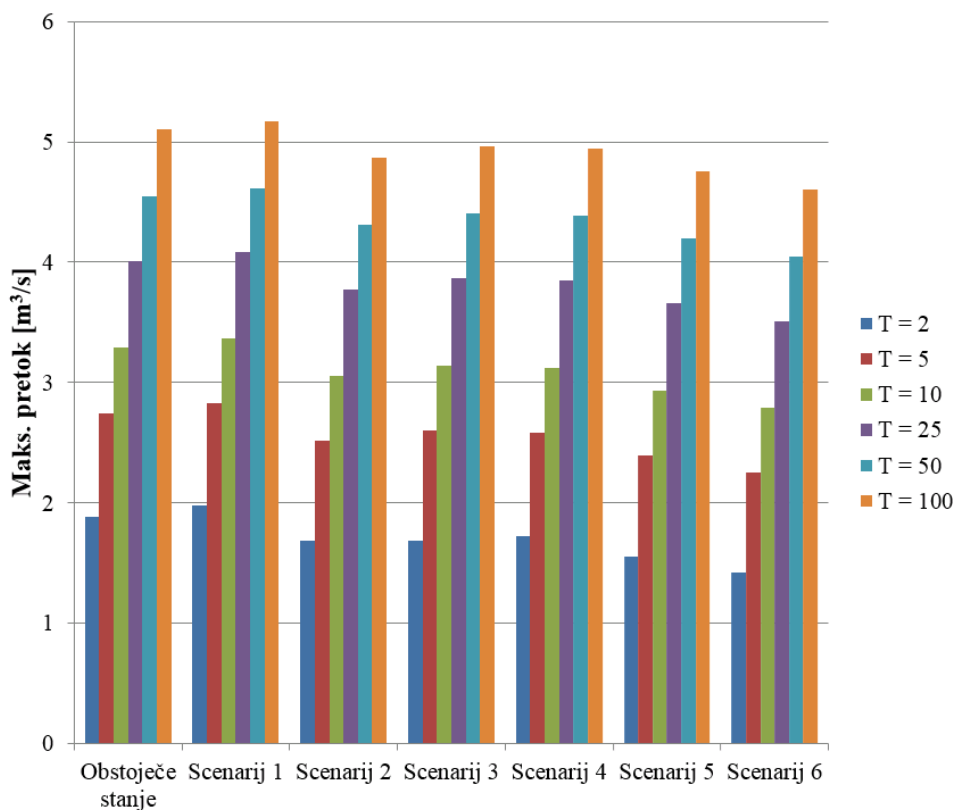
Grafikon 36: Volumni odtoka pri posameznih scenarijih za šest sintetičnih neviht.

Graph 36: Runoff volumes for each scenario for six synthetic storms.



Grafikon 37: Konice pretokov pri posameznih scenarijih in padavinskih dogodkih.

Graph 37: Peak flows for each scenario for several rainfall events.



Grafikon 38: Konice pretokov pri posameznih scenarijih za šest sintetičnih neviht.

Graph 38: Peak flows for each scenario for six synthetic storms.

#### 4 ANALIZA IN RAZPRAVA

Glede na veljavno zakonodajo, tehnične in prostorske omejitve je na obravnavanem območju poleg padavinske vode s površin, ki imajo že urejene ponikalne jaške in ki zavzemajo 12,3 % neposredno povezanih neprepustnih površin, možno v ponikanje dodatno odvesti še padavinsko vodo z 29,0 % neposredno povezanih neprepustnih površin, od tega 15,5 % neposredno povezanih neprepustnih površin predstavljajo strehe, 13,6 % pa tlakovane površine. To po drugi strani predstavlja 40,1 % vseh streh in 26,6 % vseh tlakovanih površin. Za ponikanje padavinske vode s streh na obravnavanem območju je najbolj smiselna uporaba ponikalnih jaškov, za ponikanje padavinske vode z utrjenih površin pa uporaba cevni ponikalnih jarkov. Od sonaravnih ukrepov, ki ne temeljijo na ponikanju padavinske vode, je na obravnavanem območju smiselna še uporaba zelenih streh. Te bi lahko uredili na 35,0 % vseh streh na prispevnem območju oziroma na 15,1 % vseh neposredno povezanih neprepustnih površin. S kombinacijo vseh treh ukrepov bi s kanalizacijskega sistema lahko dodatno odklopili 39,9 % vseh neposredno povezanih neprepustnih površin na prispevnem območju.

Pri razvrščanju ukrepov v prostor smo opazili, da je pri večini objektov (razen dveh), ki so bili zgrajeni po letu 1990, ponikanje nemogoče. To je posledica dejstva, da se pod zemljišči, ki pripadajo tem objektom, nahajajo podzemne garaže. Po drugi strani pa je za vse te objekte značilno tudi, da imajo ravno streho, kar omogoča ureditev zelenih streh. V primeru objektov, ki so bili zgrajeni pred letom 1990, pa je ponikanje večinoma izvedljivo. Izjema so nekateri bivši industrijski objekti in pa objekti, ki so razvrščeni okoli skupnega dvorišča, ki je namenjeno izključno parkirnim površinam.

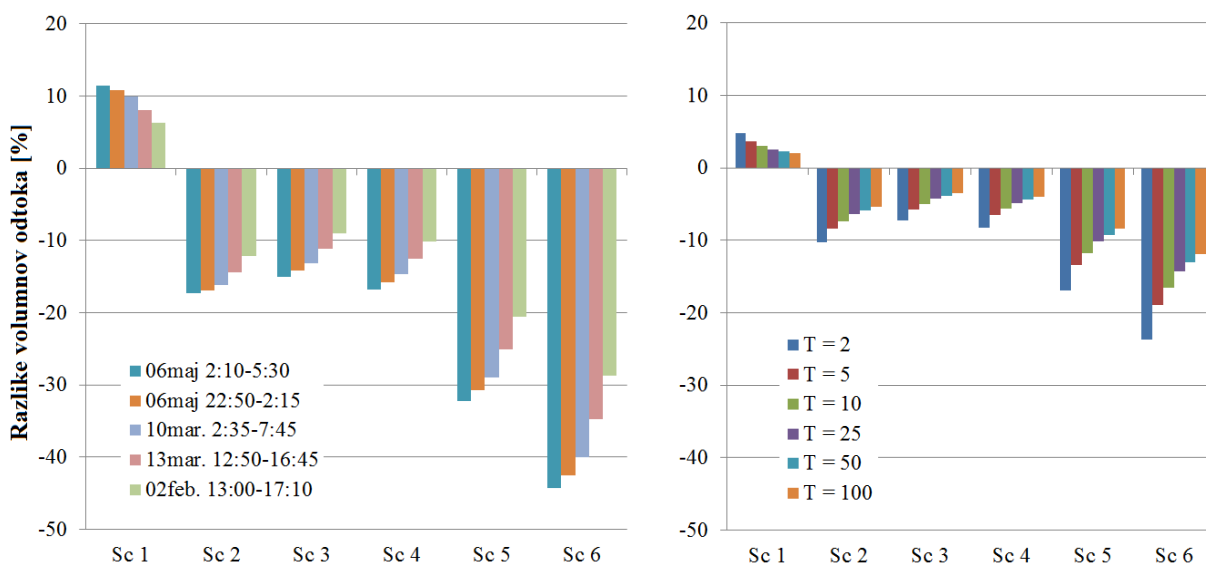
Za vsak scenarij, ki je opredeljen v poglavju 2.7, smo preverili, za koliko odstotkov se volumni odtoka in konice pretokov, ki smo jih s pomočjo modela izračunali za posamezne izmerjene padavinske dogodke in sintetične nevihte, razlikujejo od volumnov odtoka in konic pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem območju ter za koliko se v posameznih primerih spremenijo časi do nastopa konice pretoka. V primeru izmerjenih dogodkov, pri katerih se pojavi več konic, smo v analizi upoštevali samo maksimalno konico pretoka. Odstopanja volumnov odtoka in konic pretokov so prikazana v preglednici 13 ter na grafikonih 39 in 40. Ker se je izkazalo, da so učinki ukrepov v primeru posameznih scenarijev pri vseh padavinskih dogodkih, kjer je padlo manj kot 6,8 mm padavin, enaki, so v nadaljevanju prikazana samo odstopanja za enega izmed teh dogodkov. To je padavinski dogodek, ki se je zgodil 6. maja 2013 od 2:10 do 5:30 in pri katerem je padlo 6,8 mm padavin. Enaki učinki pri različnih scenarijih so posledica dejstva, da je površinski odtok v primeru teh dogodkov nastal samo na neprepustnih površinah, ki so neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom (tj. na

površinah, kjer program ne upošteva izgub), na preostalih površinah pa so bile izgube tolikšne, da so presegle omenjeno količino padavin. Če v takih primerih zmanjšamo delež neprepustnih površin za določen odstotek, se bodo torej tudi volumni odtoka in konice pretokov zmanjšali za ta enak odstotek. Odstopanja časov do nastopa konice pretoka pri posameznih scenarijih od časov do nastopa konice pretoka pri obstoječem stanju niso prikazana. Časi do nastopa konice pretoka se razen v primeru scenarijev 4, 5 in 6 pri dogodku 13. marca namreč niso spremenili v nobenem primeru oziroma so se spremenili za manj kot je časovna resolucija podatkov. V primeru scenarijev 4, 5 in 6 pri dogodku 13. marca pa se je maksimalna konica pojavila 5 minut kasneje kot pri obstoječem stanju.

Preglednica 13: Odstopanja volumnov odtoka in konic pretokov pri posameznih scenarijih od volumnov odtoka in konic pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.

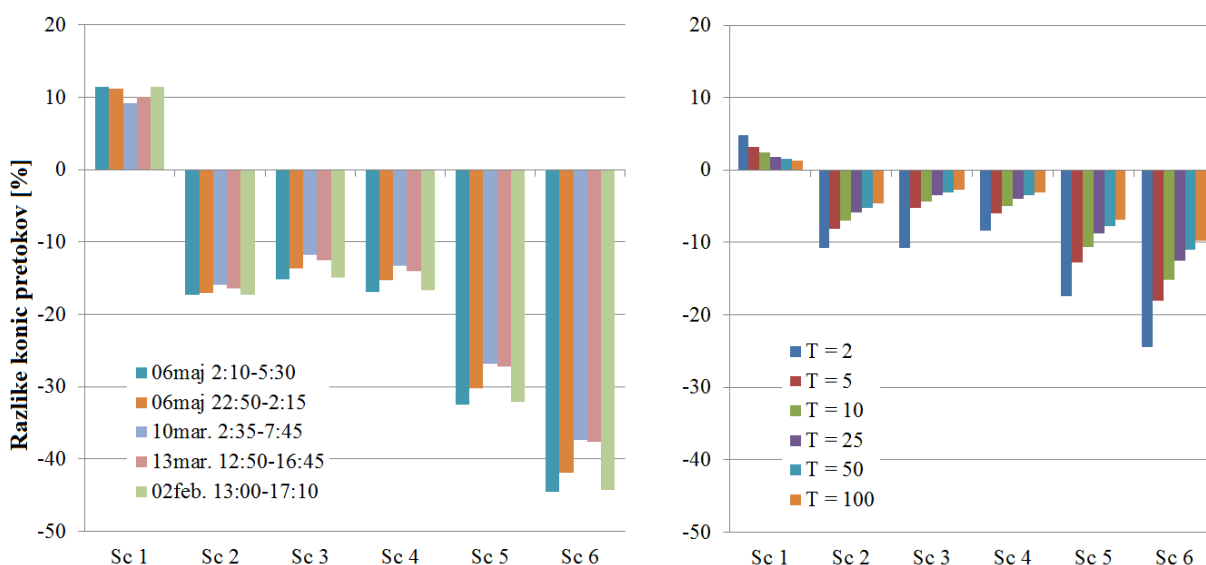
Table 13: Percent difference from the existing conditions on the drainage area for runoff volumes and peak flows for each scenario.

	Sc 1		Sc 2		Sc 3		Sc 4		Sc 5		Sc 6	
	%V	%Q	%V	%Q	%V	%Q	%V	%Q	%V	%Q	%V	%Q
<b>06maj 2:10-5:30</b>	11,5	11,4	-17,3	-17,3	-15,0	-15,2	-16,7	-16,9	-32,2	-32,4	-44,3	-44,6
<b>06maj 22:50-2:15</b>	10,9	11,2	-16,9	-17,1	-14,1	-13,6	-15,8	-15,3	-30,8	-30,3	-42,5	-42,0
<b>10mar. 2:35-7:45</b>	9,9	9,2	-16,2	-15,9	-13,1	-11,7	-14,7	-13,3	-28,9	-26,8	-40,1	-37,4
<b>13mar. 12:50-16:45</b>	8,1	10,1	-14,4	-16,4	-11,2	-12,6	-12,5	-14,0	-25,0	-27,3	-34,8	-37,6
<b>02feb. 13:00-17:10</b>	6,3	11,5	-12,2	-17,2	-9,0	-15,0	-10,1	-16,7	-20,5	-32,2	-28,7	-44,3
<b>T = 2</b>	4,9	4,8	-10,2	-10,8	-7,3	-10,8	-8,2	-8,4	-16,9	-17,4	-23,6	-24,5
<b>T = 5</b>	3,6	3,1	-8,3	-8,2	-5,7	-5,2	-6,5	-6,0	-13,5	-12,7	-18,9	-18,0
<b>T = 10</b>	3,1	2,4	-7,4	-7,0	-4,9	-4,3	-5,6	-5,0	-11,8	-10,7	-16,6	-15,2
<b>T = 25</b>	2,5	1,8	-6,4	-5,9	-4,2	-3,5	-4,8	-4,0	-10,1	-8,8	-14,3	-12,5
<b>T = 50</b>	2,2	1,5	-5,9	-5,2	-3,8	-3,1	-4,4	-3,5	-9,3	-7,8	-13,1	-11,1
<b>T = 100</b>	2,0	1,3	-5,4	-4,7	-3,5	-2,7	-4,0	-3,1	-8,4	-6,8	-11,9	-9,8



Grafikon 39: Odstopanja volumnov odtoka pri različnih scenarijih glede na volumne odtoka pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.

Graph 39: Percent difference from the existing conditions for runoff volumes for each scenario.



Grafikon 40: Odstopanja konice pretokov pri različnih scenarijih glede na konice pretokov pri obstoječem stanju na obravnavanem prispevnem območju.

Graph 40: Percent difference from the existing conditions for peak flows for each scenario.

Pri dogodkih, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje modela in ki imajo povratno dobo v glavnem krajšo od enega leta (dogodek 2. februarja 2013 ima povratno dobo nekaj več kot eno leto) znašajo odstopanja volumnov odtoka, ki so podana tudi v preglednici 13, od 6,3 % do 44,3 %, konice pretokov pa od 11,5 % do 44,6 %, odvisno od scenarija in velikosti dogodka. Odstopanja pri teh

dogodkih so za nekatere primere podrobneje opisana v nadaljevanju. V primeru scenarija 1, kjer smo predpostavili, da na obravnavanem območju ni nikakršnih ukrepov, niti obstoječih ponikalnih jaškov, so volumni odtoka glede na obstoječe stanje večji za 6,3 % do 11,5 %, konice pretokov pa za 9,2 % do 11,5 %. V primeru scenarija 2, kjer so poleg obstoječih ponikalnih jaškov predvideni še dodatni ponikalni jaški, so volumni odtoka glede na obstoječe stanje manjši za 12,2 % do 17,3 %, konice pretokov pa za 15,9 % do 17,3 %. Učinki ukrepov, ki so predvideni v scenariju 3, ki predvideva ponikanje utrjenih površin in v scenariju 4, ki predvideva ureditev zelenih streh, so podobni kot v primeru scenarija 2. To je posledica dejstva, da so utrjene površine, ki imajo površinski odtok odveden v predvidene cevne ponikalne jarke, približno enako velike kot površina predvidenih zelenih streh in da je kompozitna vrednost koeficienta *CN* za del prispevnega območja, kjer površinski odtok ni neposredno povezan s kanalizacijskim sistemom pri obeh scenarijih približno enaka. V primeru scenarijev 5 in 6, kjer so predvidene različne kombinacije sonaravnih ukrepov, so učinki na volumne odtoka in konice pretokov glede na druge scenarije že bistveno bolj opazni. V primeru scenarija 5, kjer je predvidena kombinacija ponikalnih jaškov in cevnih ponikalnih jarkov, so volumni odtoka glede na obstoječe stanje manjši za 20,5 % do 32,2 %, konice pretokov pa za 26,8 % do 32,4 %. Največji učinek na volumne odtoka in konice pretokov imajo sonaravni ukrepi v primeru scenarija 6, kjer je predvidena kombinacija ponikalnih jaškov, cevnih ponikalnih jarkov in zelenih streh. V tem primeru so volumni odtoka glede na obstoječe stanje na obravnavanem območju manjši za 12,2 % do 17,3 %, konice pretokov pa za 28,7 % do 44,3 %.

Pri sintetičnih nevihtah, ki imajo povratno dobo 2 leti ali več, so učinki sonaravnih ukrepov na volumne odtoka in konice pretokov v primerjavi z dogodki, ki imajo povratno dobo 1 leto ali manj, že razmeroma manjši. V primeru scenarija 1, ki predpostavlja, da na obravnavanem območju ni nikakršnih sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom, so pri dogodku z 2-letno povratno dobo volumni odtoka glede na obstoječe stanje večji za 4,9 %, konice pretokov pa za 4,8 %, pri dogodku s 100-letno povratno dobo pa so v tem primeru volumni odtoka glede na obstoječe stanje večji za 2,0 %, konice pretokov pa za 1,3 %. V primeru scenarija 2, kjer so poleg obstoječih predvideni še dodatni ponikalni jaški, so volumni odtoka glede na obstoječe stanje pri dogodku z 2-letno povratno dobo manjši za 10,2 %, konice pretokov pa za 10,8 %, pri dogodku s 100-letno povratno dobo pa so volumni odtoka v tem primeru manjši za 5,4 %, konice pretokov pa za 4,7 %. V primeru scenarija 6 so pri dogodku z 2-letno povratno dobo glede na obstoječe stanje volumni odtoka manjši za 23,4 %, konice pretokov pa za 24,5 %, pri dogodku s 100-letno povratno dobo pa so volumni odtoka manjši za 11,9 %, konice pretokov pa za 9,8 %.



Tako pri padavinskih dogodkih, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje modela, kot tudi pri sintetičnih nevihtah, lahko opazimo, da so odstopanja volumnov odtoka in konic pretokov od volumnov odtoka in konic pretokov pri obstoječem stanju večja pri scenarijih, kjer je predvideno večje število sonaravnih ukrepov. Podobno so ugotovili tudi drugi avtorji, ki so preučevali vpliv različnih sonaravnih ukrepov na površinski odtok. To so na primer Damodaram et al. (2010) ter Rose in Hodges (2010), ki so preučevali vpliv prepustnih asfaltov, zelenih streh in cistern za zbiranje deževnice, avtorji Brander et al. (2004), ki so preučevali vplive različnih kombinacij ukrepov za ponikanje padavinske vode, avtorji Jeon et al. (2010), ki so preučevali vpliv prepustnih asfaltov in zelenih streh in še nekateri drugi.

V splošnem lahko ugotovimo, da imajo sonaravni ukrepi in njihove kombinacije večji vpliv na volumne odtokov in konice pretokov pri manjših padavinskih dogodkih s krajšo povratno dobo. Do podobnih ugotovitev so poleg prej omenjenih avtorjev prišli še drugi avtorji, ki so prav tako preučevali vpliv sonaravnih ukrepov na površinski odtok. To so na primer Williams in Wise (2006) ter Holman-Dodds et al. (2003), ki so preučevali vpliv sonaravnega pristopa, ki temelji na ponikanju padavinske vode, avtorja Gilroy in McCuen (2008), ki sta preučevala vpliv cistern za zbiranje deževnice in bioretencijskih površin, avtorji Juan et al. (2013), ki so preučevali vpliv zelenih streh in prepustnih asfaltov ter avtorja Ellis in Viavattene (2013), ki sta preučevala vpliv ponikalnih bazenov, zelenih streh in prepustnih asfaltov. Kljub temu, da so naše ugotovitve v splošnem konsistentne z ugotovitvami drugih avtorjev, pa je konkretne rezultate glede učinkov sonaravnih ukrepov na volumne odtoka in konice pretokov med posameznimi raziskavami težko med seboj primerjati. Vpliv sonaravnih ukrepov na površinski odtok je namreč odvisen od različnih dejavnikov, kot so prepustnost in predhodna vlažnost tal na obravnavanem območju, vrsta izbranih ukrepov, velikost in trajanje obravnavanih neviht ipd.

Opazili smo tudi, da je učinek sonaravnih ukrepov na konice pretokov med drugim odvisen tudi od časovne razporeditve padavin. To lahko opazimo pri realnih dogodkih, ki smo jih uporabili za umerjanje in preverjanje modela, kjer odstopanje konic pretokov pri posameznih scenarijih od konic pretokov pri obstoječem stanju ni konsistentno z velikostjo dogodka, kot je to primer pri sintetičnih nevihtah, kjer je razporeditev padavin v vseh primerih enaka (preglednica 13).

Časi do nastopa konice pretoka v primeru posameznih scenarijev uporabe sonaravnih ukrepov pri večini dogodkov glede na obstoječe stanje niso spremenili. Iz tega lahko sklepamo, da zaradi predpostavljenih sonaravnih ukrepov na obravnavnem območju, padavinske izgube še vedno niso

dovolj velike, da bi vplivale na ta parameter. Razlike v časih do nastopa konice pretokov v primeru dogodka 13. marca pri scenarijih 4, 5 in 6 glede na obstoječe stanje so najverjetneje posledica dejstva, da so največji pretoki pri tem dogodku vztrajali relativno dolgo časa, zaradi česar konica ni izrazita. Razlika med konico pretoka in pretokom v naslednjem časovnem intervalu je pri tem dogodku majhna, zato je že relativno majhna sprememba v skladiščni kapaciteti prispevnega območja povzročila, da se je konica prestavila za en časovni interval naprej. Ker tudi večina prej omenjenih avtorjev, kot so na primer Damodaram et al. (2010), Rose in Hodges (2010), Gilroy in McCuen (2008), Jeon et al. (2010), Brander et al. (2004) in še nekateri drugi, prav tako ne poroča o spremembi časov do nastopa konice pretoka zaradi uporabe sonaravnih ukrepov na prispevnem območju, lahko sklepamo, da tudi v teh primerih ni prišlo do bistvenih sprememb in da so naše ugotovitve skladne z ugotovitvami drugih avtorjev.

Čeprav so rezultati skladni z našimi pričakovanji, pa se je pri njihovi interpretaciji potrebno zavedati določenih omejitev. Tako dežemer kot merilnik pretokov, ki smo ju uporabili pri izvajanju meritev, merita z določeno točnostjo, pridobljeni podatki pa imajo določeno resolucijo. Na omejitve smo naleteli tudi pri določanju mej prispevnega območja in pokrovnosti tal. Pri določanju mej je največjo težavo predstavljalo pomanjkanje podatkov o priključevanju površinskega odtoka s posameznih površin na javno kanalizacijo, še posebej pri starejših objektih. Pri določanju pokrovnosti tal pa so največjo težavo delale sence objektov na ortofoto posnetku in pa dejstvo, da ortofoto posnetek ni narejen povsem v ptičji perspektivi, zato določene površine niso vidne.

Poleg omejitev, ki izhajajo iz točnosti meritev oziroma natančnosti ostalih pridobljenih podatkov, obstajajo tudi omejitve, ki so vezane na eksperimentalno metodo. Te med drugim izhajajo iz pomanjkljivosti metode SCS za izračun padavinskih izgub, ki so opisane v poglavju 2.6.2. Metoda SCS na primer ne upošteva trajanja in intenzitete padavin in tudi ne predhodne vlažnosti tal, vrednosti koeficientov *CN* pa moramo obravnavati z določeno rezervo. Pri tem je potrebno poudariti, da je z določeno rezervo potrebno obravnavati tudi koeficiente *CN*, ki smo jih določili za izračun površinskega odtoka z območij s sonaravnimi ukrepi. Pri izračunu koeficientov *CN* za območja z objekti za ponikanje padavinske vode, je v enačbi (29) potrebno podati skladiščno kapaciteto (skladiščni volumen) ponikalnih objektov, ki pa jo je razmeroma težko opredeliti. Različni priročniki v ta namen priporočajo različne metode, ki pa v vsakem primeru predstavljajo le približek dejanskemu stanju. Poleg tega je potrebno opozoriti še na predpostavko, da so vse utrjene površine in strehe na obravnavanem območju, ki površinskega odtoka nimajo odvedenega na objekte za ponikanje padavinske vode, neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom. Kljub temu, da v večini primerov to zagotovo drži, kar je razvidno tudi iz projektne dokumentacije posameznih hišnih priključkov, pa ni

nujno, da to velja za vse omenjene površine. V določenih primerih se površinski odtok s streh in utrjenih površin lahko razliva po sosednjih zelenicah, kar nismo posebej preverjali. Zaradi omenjenih predpostavk in omejitev, rezultatov te raziskave ne smemo interpretirati v striktno kvantitativnem smislu. Kljub temu pa pridobljeni rezultati pripomorejo k lažjemu razumevanju ključnih procesov in odpirajo nove dileme, ki narekujejo smernice za nadaljnje raziskovalno delo.

## 5 ZAKLJUČEK

V magistrski nalogi smo preverili, v kolikšni meri lahko s pomočjo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom vplivamo na konice pretokov, volumne odtokov in čase nastopa konice pretoka na manjšem urbaniziranem prispevnem območju, ki je tipično za središče mesta Ljubljane. Poleg tega smo ugotavljali, v kolikšni meri je učinek sonaravnih ukrepov odvisen od povratne dobe padavinskih dogodkov.

Zaradi visoke stopnje pozidanosti in majhnega deleža zelenih površin ter omejitev, ki izhajajo iz zakonodaje, so možnosti za uporabo posameznih sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom na obravnavanem območju omejene, vendar pa lahko s kombinacijami posameznih ukrepov vplivamo na površinski odtok z razmeroma velikega deleža neprepustnih površin. Glede na zakonske, tehnične in prostorske omejitve je na obravnavanem območju smiselna uporaba ponikalnih jaškov za ponikanje padavinske vode s streh, cevnih ponikalnih jarkov za ponikanje padavinske vode z utrjenih površin, možna pa je tudi ureditev zelenih streh. S pomočjo vsakega od omenjenih ukrepov bi s kanalizacijskega sistema lahko odklopili približno 15 % direktno povezanih neprepustnih površin na obravnavanem območju, s pomočjo kombinacije vseh treh ukrepov pa kar 40 %.

Ugotovili smo, da s pomočjo sonaravnih ukrepov lahko zmanjšamo volumne odtoka in konice pretokov in da je učinkovitost sonaravnih ukrepov v tem pogledu večja v primeru manjših padavinskih dogodkov s krajšo povratno dobo. Z uporabo vseh možnih ukrepov na obravnavanem območju, lahko pri dogodkih s povratno dobo približno eno leto ali manj, volumne odtoka na primer zmanjšamo za 29 % do 44 %, konice pretokov pa za 37 % do 45 %. Pri dogodkih s povratno dobo 2 leti, so ti učinki že manjši. Volumen odtoka lahko v tem primeru zmanjšamo za 24 %, konico pretoka pa za 25 %. Pri dogodku s 100-letno povratno dobo pa zmanjšanje volumna odtoka pri kombinaciji vseh ukrepov znaša le še 12 %, zmanjšanje konice pretoka pa 10 %. V primeru drugih scenarijev, ki predvidevajo manjše število sonaravnih ukrepov, so ti učinki seveda sorazmerno manjši. Poleg tega smo ugotovili, da je učinek sonaravnih ukrepov na konice pretokov odvisen tudi od razporeditve padavin in da na čas do nastopa konice pretoka s sonaravnimi ukrepi na obravnavanem območju ne moremo vplivati bistveno, kar je konsistentno z ugotovitvami nekaterih drugih avtorjev.

Kljub temu, da s sonaravnimi ukrepi ne moremo vplivati na vse komponente hidrološkega režima, pa lahko zaradi zmanjšanja volumnov odtoka in konic pretokov dosežemo vrsto okoljskih ciljev. Na račun zmanjšanih volumnov odtoka se na primer poveča infiltracija padavinske vode v podzemne

vode, kar pozitivno vpliva na bogatenje podtalnice. Voda, ki se izgubi v ozračje na račun zelenih streh na primer pozitivno vpliva na urbano mikroklimo in znižuje temperature ozračja v bližnji okolici. Zaradi manjših volumnov odtoka in konic pretokov se zmanjša tudi pogostost prelivanja mešanih odpadnih vod v vodotoke in s tem izboljša kvaliteta površinskih vod, čistilne naprave pa so obremenjene bolj enakomerno. Glede na to, da pri dogodkih z visokimi povratnimi dobami s pomočjo sonaravnih ukrepov na volumne odtoka in konice pretokov ne moremo vplivati bistveno, je v teh primerih negativne vplive urbanizacije na površinski odtok potrebno blažiti tudi s konvencionalnimi ukrepi za upravljanje s padavinsko vodo.

## 6 POVZETEK

V okviru magistrske naloge smo ugotavljali, v kolikšni meri lahko s pomočjo sonaravnih ukrepov za upravljanje s površinskim odtokom vplivamo na volumne odtoka in maksimalne pretoke ter na čas do nastopa maksimalnega pretoka na manjšem urbaniziranem prispevnem območju, ki je glede na tip pozidave reprezentativno za širše mestno središče Ljubljane. Poleg tega smo ugotavljali, v kolikšni meri je učinek sonaravnih ukrepov odvisen od povratne dobe padavinskih dogodkov.

Na območju širšega mestnega središča Ljubljane je odvajanje padavinske vode urejeno z mešanim kanalizacijskim sistemom, ki odvaja tako komunalno kot padavinsko odpadno vodo. Z namenom, da bi izbrali reprezentativno prispevno območje, smo najprej identificirali vse razbremenilnike mešanih odpadnih vod od Prul do Vodmata. Iz izbora smo nato izločili razbremenilnike na glavnih kolektorjih, saj v teh primerih meje prispevnih območij niso jasno opredeljene. Preostalim razbremenilnikom oziroma razbremenilnikom na stranskih vodih smo nato določili prispevna območja. Za modeliranje površinskega odtoka in nadaljnje analize smo v ožji izbor vključili območja, pri katerih je pozidava reprezentativna za širše mestno središče in pri katerih je bilo na iztoku mogoče namestiti merilnik pretokov. Izmed teh prispevnih območij smo za preučevanje izbrali tisto, pri katerem je bilo meje oziroma razvodnico mogoče najbolj natančno določiti. Izbrali smo območje, ki se nahaja ob Kotnikovi in Metelkovi ulici.

Za izbrano prispevno območje smo s pomočjo programa HEC-HMS vzpostavili hidrološki model, ki smo ga umerili s pomočjo podatkov o meritvah padavin in pretokov. Pretoke smo merili na iztoku iz kanalizacijskega sistema s pomočjo merilnika pretočnih hitrosti, temperatur in vodnega tlaka Starflow, padavine pa na lokaciji, ki se nahaja približno 500 m dolvodno od obravnavanega območja s pomočjo dežemera Onset RG3-M. Meritve so potekale od 22. 11. 2012 do 5. 6. 2013. Resolucija tako pridobljenih podatkov je bila 5 minut. Ker je dne 29. 3. 2013 senzor pretočnih hitrosti v merilniku Starflow nehal delovati, smo za obdobje od 29. 3. 2013 do 5. 6. 2013 pretoke izračunali s pomočjo zveze  $Q=f(h)$ , ki smo jo določili na nizu podatkov, ko je senzor hitrosti še deloval. Ker je bilo na diagramu podatkov  $Q-h$  pri posameznih dogodkih mogoče opaziti histerezo, smo izračunane pretoke korigirali s pomočjo Jonesove enačbe (DHV, 1999).

Za izračun prestreženih padavin smo v programu HEC-HMS izbrali t. i. enostavno metodo prestrežanja za izračun padavinskih izgub pa metodo SCS. Pri metodi SCS je v modelu potrebno podati delež neposredno povezanih neprepustnih površin oziroma delež površin, ki imajo površinski

odtok odveden neposredno v kanalizacijski sistem in pa kompozitno vrednost koeficienta *CN*, ki jo določimo za prepustni del prispevnega območja. Koeficiente *CN* za posamezne tipe površin na prispevnem območju, ki smo jih uporabili za izračun kompozitne vrednosti koeficienta *CN* in ki se med seboj ločijo glede na pokrovnost tal, smo določili s pomočjo podatkov o hidrogeološki sestavi tal (ARSO, 2004; GZL, 1990; GZL, 1992; IGGG, 1998; Prestor in Hoetzl, 2002) in tabele 2-2a, ki je podana v dokumentu z naslovom »Urban Hydrology for Small Watersheds – TR-55« (USDA, 1986). Za površine, ki imajo površinski odtok odveden v ponikalne jaške, smo koeficiente *CN* določili s pomočjo enačbe, ki je podana v priročniku za modeliranje objektov za ponikanje padavinske vode s pomočjo programa TR-20 z naslovom »Modelling infiltration practices using the TR-20 hydrologic program« (MDE, 1983) ter s pomočjo metode, pri kateri na podlagi zveze med padavinami in koeficienti *CN* določimo tisto vrednost koeficienta *CN*, ki je reprezentativna za prispevno območje (Hjelmfelt, 1980; Hawkins, 1983). Za izračun neposrednega odtoka smo uporabili metodo uporabniško določenega hidrograma enote.

V izvedbenem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana (Uradni list RS št. 78/2010) ima ponikanje prednost pred ukrepi, ki temeljijo na zadrževanju padavinskih vod, zato smo najprej preverili, katere vrste objektov za ponikanje in v kakšnem obsegu je glede na zakonske, prostorske in tehnične omejitve možno predvideti na obravnavanem območju. Pri izbiri vrste ponikalnih objektov in pri njihovi razporeditvi v prostoru smo se oprli na nemški standard za načrtovanje, gradnjo in obratovanje ponikalnih objektov in naprav (DWA-A-138E, 2005). V nadaljevanju smo preverili, kakšne so druge možnosti za uporabo sonaravnih ukrepov. Pri tem smo upoštevali smernice za uporabo sonaravnih ukrepov na urbanih območjih, ki so podane v priročniku za sonaravno upravljanje s površinskim odtokom, ki ga je izdalo združenje za gradbeniško in industrijsko raziskovanje in informiranje iz Londona (Construction industry research and information association – CIRIA, 2015). Izkazalo se je, da bi bilo na obravnavanem območju najbolj smiselno uporabiti ponikalne jaške za ponikanje padavinskih vod s streh in cevne ponikalne jarke za ponikanje padavinskih vod z utrjenih površin. Poleg ukrepov za ponikanje pa bi bilo smiselno uporabiti še zelene strehe. Na tak način bi bilo mogoče ponikati padavinsko vodo s 15,5 % streh in 13,6 % utrjenih površin, ki so sicer neposredno povezane s kanalizacijskim sistemom, na 35 % površin vseh streh pa bi lahko uredili zelene strehe. V nadaljevanju smo s pomočjo prej omenjenih smernic objektom za ponikanje in zelenim streham določili še ustrezne dimenzije.

Vpliv sonaravnih ukrepov na površinski odtok smo preučevali v sklopu šestih scenarijev. Pri prvem smo predvideli, da na obravnavanem območju ni nikakršnih sonaravnih ukrepov, pri drugem scenariju

smo predvideli ponikanje padavinske vode s streh, pri tretjem ponikanje padavinske vode z utrjenih površin, pri četrtem uporabo zelenih streh, pri petem kombinacijo ponikanja padavinske vode s streh in utrjenih površin in pri šestem scenariju kombinacijo vseh treh ukrepov. Za vsakega od naštetih scenarijev smo na novo vzpostavili model za izračun padavinskih izgub, v katerem smo določili ustrezno vrednost deleža neposredno povezanih nepropustnih površin in vrednost kompozitnega koeficienta *CN*. Za površine, pri katerih smo predvideli ponikanje padavinske vode s ponikalnimi jaški in cevnimi ponikalnimi jarki, smo vrednosti koeficientov *CN* določili po enakem postopku kot za površine z obstoječimi ponikalnimi jaški, koeficiente *CN* za zelene strehe pa smo določili na podlagi podatkov iz literature in s pomočjo metode, ki je opisana v priročniku za program Hydrocad (HydroCAD Software Solutions LLC. 2011). Za vsak posamezen scenarij uporabe sonaravnih ukrepov in vsak padavinski dogodek, ki smo ga uporabili za umerjanje in verifikacijo modela ter za 6 sintetičnih neviht s povratnimi dobami 2, 5, 10, 25, 50 in 100 let, smo nato izračunali volumne odtoka, konice pretoka in čase do nastopa konice pretoka in jih primerjali z volumni odtoka, maksimalnimi pretoki in časi do nastopa konice pretoka pri obstoječem stanju.

Ugotovili smo, da so možnosti za posamezne sonaravne ukrepe za upravljanje s površinskim odtokom na obravnavanem območju precej omejene, vendar pa lahko s posameznimi kombinacijami ukrepov vplivamo na površinski odtok z razmeroma velikega deleža neprepustnih površin. Ugotovili smo, da je učinkovitost sonaravnih ukrepov večja v primeru manjših padavinskih dogodkov s kratko povratno dobo. V primeru dogodkov s povratno dobo do enega leta lahko s kombinacijo ponikalnih jaškov, cevni ponikalni jarki in zelenih streh volumne odtoka in konice pretokov z obravnavanega območja zmanjšamo do 45 %. V primeru dogodka s 100-letno povratno dobo pa lahko z omenjenimi ukrepi volumen odtoka zmanjšamo zgolj za 12 %, konico pretoka pa za 10 %. Pri drugih scenarijih, ki predvidevajo manjše število sonaravnih ukrepov, so ti učinki seveda sorazmerno manjši. Ugotovili smo tudi, da na čas do nastopa konice pretoka, s sonaravnimi ukrepi na obravnavanem območju ne moremo vplivati bistveno.



## 7 SUMMARY

The thesis investigates the effects of sustainable measures for stormwater management on runoff volumes, peak flows and time to peak on a small representative urbanized drainage area within a wider city centre of Ljubljana. The aim was also to investigate to what extent the effects of sustainable measures were influenced by rainfall event frequency.

Stormwater drainage within a wider city centre of Ljubljana is arranged via a combined sewer system that conveys domestic sewage and stormwater runoff. In order to select a representative drainage area all sewer overflow structures between the areas of Prule and Vodmat were identified first. Next, all overflow structures situated on the main collectors were eliminated from the selection as the drainage divide to this type of outflows cannot be clearly defined. For the remaining overflows, i.e. overflows connected in parallel, the drainage areas were assigned. From this set of drainage areas, we further eliminated areas which were not distinguished by a building layout sufficiently representative for a wider city centre of Ljubljana and also areas where outflow features were not suitable for conducting discharge measurements. In the end, the area chosen for hydrological modelling and further analysis was the area for which a drainage divide was most accurately defined. This is the area along Kotnikova and Metelkova street.

The hydrologic model selected for this investigation was HEC-HMS. To calibrate and verify the model, we conducted a series of flow and rainfall measurements. Discharge measurements were made at the drainage area outflow using Unidata's ultrasonic Doppler instrument (Starflow) and a rain gauge (Onset RG3-M) was situated on a locality some 500 m downstream from the study site. Data were collected from the 22nd of November 2012 to the 5th of June 2013 at 5 minute intervals. For the period from the 29th of March to the 5th of June 2013, we had to apply the stage discharge relationship  $h=f(Q)$  to determine discharge data, because on the 29th of March, the Starflow's velocity sensor broke down. Stage discharge relationship  $h=f(Q)$  was developed using stage and flow measurement for the period from the 22nd of November 2012 to the 29th of March. The discharge data calculated using stage discharge relationship were corrected applying Jones' formula (DHV, 1999), as there was an apparent hysteresis discovered while observing stage-discharge graph for some specific events.

The so-called Simple Canopy Method was applied to compute intercepted rainfall and the SCS Loss Method to determine excess rainfall i.e. runoff volumes from the drainage area. For HEC-HMS to

compute runoff volume, the percentage of a drainage area which is directly connected impervious area, i.e. the drainage area directly connected to the sewer system, has to be specified and for the pervious part of the basin area a composite curve number *CN* has to be calculated. The *CN* values for different land cover types present in the drainage area were determined using available hydrogeological data (ARSO, 2004; GZL, 1990; GZL, 1992; IGGG, 1998; Prestor and Hoetzl, 2002) and by means of Table 2-2, published in an USDA document titled Urban Hydrology for Small Watersheds – TR-55 (USDA, 1986). For areas with runoff drained to the proposed infiltration devices, the *CN* values were determined by means of the equation given in the document Modelling Infiltration Practices Using the TR-20 Hydrologic Program (MDE, 1983) and the method which uses rainfall-*CN* relationship to determine the drainage area's representative *CN* value (Hjelmfelt, 1980; Hawkins, 1983). To transform excess rainfall into direct runoff, a user specified unit hydrograph method was applied.

According to the Spatial Plan of the City municipality of Ljubljana (Uradni list RS št. 78/2010), rainfall infiltration devices are preferred over detention devices when mitigating the impact of impervious areas on runoff. For this reason we checked what types of infiltration devices could be implemented within the area under study, with regard to applicable legislation, as well as the spatial and technical limitations. In the process of choosing appropriate infiltration devices and their spatial arrangement, the spatial/technical constraints stipulated by German DWA Rules and Standards for Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of Precipitation Water (DWA-A-138E, 2005) were observed. Other options for the implementation of sustainable measures were also considered observing the directives put forward by the document titled "Planning, Design, Construction and Maintenance of Sustainable Drainage Systems (SuDS) (CIRIA, 2015)" published by the London based Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). It turned out that the most convenient measure for roof runoff infiltration would be the installation of infiltration shafts and that infiltration trench elements would be the most appropriate facility for paved areas runoff infiltration. In addition to infiltration devices, we proposed green roofs as a reasonable choice for sustainable stormwater management as well. We've shown that with the proposed measures it is possible to infiltrate runoff from 15,5 % of watershed's roof area and 13,6 % of watershed's paved area, both otherwise directly connected to the drainage system. It is also feasible to convert as much as 35 % of watershed's roof area to green roofs. The next step was to size all the chosen devices applying aforementioned directives, rules and standards.

A set of six scenarios was studied to test the use of sustainable measures for managing stormwater runoff. For the first scenario, we assumed that no sustainable practices were implemented on the drainage area, not even the existing ones. For the second scenario, we assumed that roof runoff was drained to infiltration shafts, and for the third scenario, that the paved areas runoff was drained to individual pipe infiltration elements. Under the fourth scenario, we assumed that green roofs were implemented on existing roof areas as a single measure. Under the fifth scenario, both roof and paved area's runoff was diverted to proposed infiltration shafts and pipe infiltration elements respectively, and under the sixth scenario, the combination of all three afore mentioned measures was studied. For each scenario, we established a SCS loss model. Consequently, a unique percentage of watersheds directly connected impervious area and composite *CN* value were determined for each loss model. The *CN* values for areas connected to infiltration devices were calculated using the same method as applied for determining *CN* values for areas connected to existing infiltration shafts. *CN* values for green roofs were calculated using the method proposed by HydroCAD Software Manual (HydroCAD Software Solutions LLC., 2011). For each scenario, the runoff volume, the peak flow and the time to peak were computed applying the nine rainfall events, previously used for model calibration and verification as well as six synthetic rainstorm events with 2-, 5-, 10-, 25-, 50- and 100-year return period. Finally, the results were compared with those obtained from the existing drainage area conditions.

We've arrived at a conclusion that there are limited options for the implementation of sustainable measures within the study area. Nevertheless, it is possible to control runoff from a relatively large part of the drainage area in case a combination of individual measures are applied. We can point out that sustainable measures are more efficient in reducing runoff volumes and peak flows for small and more frequent rainfall events. In the case of events having the return period of 1 year or less, the runoff volumes and peak flows reduction is approximately 45 % when simulating a combination of infiltration shafts, pipe infiltration trench elements and green roofs. On the other hand, the reduction of runoff volume and peak flow in the case of a 100 year event is only 12 % and 10 % respectively when simulating the same scenario. For other scenarios with less sustainable measures implemented, the effects on runoff are adequately less significant. We've also discovered that implementation of sustainable measures is not very effective in controlling runoff's time to peak.

**VIRI**

Ahiablame L.M., Engel, B.A., Chaubey, I. 2012. Representation and evaluation of low impact development practices with L-THIA-LID: An example for site planning. *Environment and pollution* 1, 2: 1-13.

[doi:http://dx.doi.org/10.5539/ep.v1n2p1](http://dx.doi.org/10.5539/ep.v1n2p1)

Ahiablame L.M., Engel, B.A., Chaubey, I. 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of Environmental Management* 119: 151-161.

[doi:10.1016/j.jenvman.2013.01.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.019)

Arhe d.o.o.. 2003. Načrt krajinske arhitekture, PGD 1. Faza, št. načrta 69/2002: 11 str.

ARSO. 2009. Povratne dobe za ekstremne padavine po gumbelovi metodi. Ljubljana, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 67 str.

[http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by\\_variable/precip-return-periods\\_2008.pdf](http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/precip-return-periods_2008.pdf) (Pridobljeno 1. 10. 2015.)

ARSO. 2016. Povprečne mesečne vrednosti evapotranspiracije v obdobju 1971-2000.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/etp/> (Pridobljeno 1. 5. 2016.)

Booth, D.B., Karr, J.R., Schauman S., Konrad. C.P., Morley, S.A., Larson, M.G., Henshaw, P.C., Nelson, E.J., Stephen J.B. 2001. Urban stream rehabilitation in The Pacific Northwest. Final report of EPA Grant Number R82-5284-010. Seattle, University of Washington: 78 str.

[http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiLrsvc0dbMAhXLRB4KHeyKAJ0QFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.eahcp.org%2Fdocuments%2F2001\\_Booth-et-al\\_StreamRehabilitation.pdf&usq=AFQjCNH5wg\\_tOEBXsk-eX0XUXp5ikjStxQ&sig2=WE3I4Y346FIENVP8EBXpVQ](http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiLrsvc0dbMAhXLRB4KHeyKAJ0QFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.eahcp.org%2Fdocuments%2F2001_Booth-et-al_StreamRehabilitation.pdf&usq=AFQjCNH5wg_tOEBXsk-eX0XUXp5ikjStxQ&sig2=WE3I4Y346FIENVP8EBXpVQ) (Pridobljeno 13. 5. 2016.)

Brander, K.E., Owen, K.E., Potter, K.W. 2004. Modeled impacts of development type on runoff volume and infiltration performance. *Journal of the American Water Resources Association* 40, 4: 961-969.

doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01059.x

Brenčič, M. 2003. Poročilo o meritvah ponikanja na območju etnografskega muzeja-Metelkova-Ljubljana. Geološki Zavod Slovenije: 12. str.

Brilly, M. 1993. Priročnik za program HEC-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 122 str.

Brilly, M. 2002. Modeliranje hidroloških pojavov (skripta). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 126 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Carter, T., Jackson, R.J. 2007. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning* 80, 1–2 : 84-94.

[doi:10.1016/j.landurbplan.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.06.005)

Clark, J.L. 1999. Effects of urbanization on streamflow in three basins in the Pacific Northwest. Portland State University, Oregon D.C.

<http://nwdata.geol.pdx.edu/Thesis/FullText/1999/Clark/Clark.pdf> (Pridobljeno 1. 9. 2005.)

Chow V.T. 1964. Runoff. V: Chow V.T. (ur.). *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw Hill: str. 20-1 do 20-43.

CIRIA. 2015. *The SuDS Manual*. London, Construction Industry Research and Information Association, Department of Environment Food and Rural Affairs: 888 str.

Coffman, L.S. 2000. Low impact development design: a new paradigm for stormwater management mimicking and restoring the natural hydrologic regime. An alternative stormwater management technology. Prince George's County, Department of Environmental Resources: 10 str.

[http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb2/water\\_issues/programs/stormwater/muni/nrdc/19%20lid%20design-%20a%20new%20paradigm.pdf](http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb2/water_issues/programs/stormwater/muni/nrdc/19%20lid%20design-%20a%20new%20paradigm.pdf) (Pridobljeno 24. 9. 2014.)

Comprehensive Environmental Inc. 2012. Stormwater practices research project. Final report. Vermont, Vermont Agency of Transportation: 166 str.

Damodaram, C., Giacomoni, M.H., Khedun, C.P., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., Zechman, E.M. 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management. *Journal of the American Water Resources Association* 46, 5: 907-918.

doi:10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x

DHV Consultants BV & Delft Hydraulics. 1999. Training module # SWDP – 29, How to establish stage discharge rating curve. Hydrology project, Ministry of Water Resources, Government of India: 31 str.

Dietz, M.E., Clausen, J.C. 2007. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *Journal of Environmental Management* 87: 560-566.

[doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.026)

Dolšak, D. 2015. Algoritem za analizo časovne porazdelitve padavin znotraj padavinskega dogodka. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Dolšak): 76. str.

Dottori, F., Martina, M.L.V., Todini, E. 2009. A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 847-863.

doi:10.5194/hess-13-847-2009

DWA-A-138E:2005. Planning, construction and operation of facilities for the percolation of precipitation water. German Association for Water, Wastewater and Waste: 60 str.

Ellis, J.B., Viavattene, C. 2014. Sustainable urban drainage system modeling for managing urban surface water flood risk. *CLEAN – Soil, Air, Water* 42: 153-159.

doi:10.1002/clen.201300225

Emona projekt. 1982. Prizidek jedilnice doma tehniških šol, PGD št. 16/82-1933-1/82: 11 str.

EPA. 2000. Low Impact Development (LID). A literature review. NW, Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Water: 35 str.

<http://www.lowimpactdevelopment.org/publications.htm> (Pridobljeno 18. 4. 2016.)

EPA. 2014. Benefits of low impact development. How LID can protect your community's resources. NW, Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds: 2 str.

<http://water.epa.gov/polwaste/green/upload/bbfs1benefits.pdf> (Pridobljeno 6. 12. 2014.)

ESRI. 2016. Environmental System Research Institute, Inc., ArcMap.

<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/> (Pridobljeno 28. 4. 2016.)

Fang, X., Cleveland, T., Garcia, C.A., Thompson, D., Malla, R. 2005. Literature review on timing parameters for hydrographs. Beaumont, Lamar University, College of Civil Engineering, Department of Civil Engineering: 72 str.

Fassman-Beck, E., Simcock, R. 2013. Hydrology and water quality of living roofs in Auckland. Prispevek na konferenci NOVATECH, Lyon, Francija, Junij, 2013: 10 str.

Feldman, A.D. (ur.). 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual. Davis, California, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: 149 str.

[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf) (Pridobljeno 24. 9. 2014.)

Federal Interagency Stream Corridor Restoration Working Group (FISRWG). 1998. Stream corridor restoration. Principles, processes, and practices. Federal Interagency Stream Corridor Restoration Working Group: 637 str.

Getter, K.L., Rowe, D.B., Andersen, J.A. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. Ecological Engineering 31: 225-231.

[doi:10.1016/j.ecoleng.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004)

Gilroy, K.L., McCuen, R.H. 2009. Spatio-temporal effects of low impact development practices. Journal of Hydrology 367, 3-4: 228-236.

[doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.008)

GURS. 2014. Ortofoto posnetek za območje MOL. Geodetski Zavod Slovenije.

GURS. 2016. Prostor – prostorski portal RS. Geodetska uprava Slovenije.

<http://prostor3.gov.si/javni/login.jsp?jezik=sl> (Pridobljeno 19. 5. 2016.)

GZL. 1990. Geotehnično poročilo o sestavi tal in pogojih temeljenja ter gradnje stanovanjskih in poslovnih objektov na ureditvenem območju CO5/3 Zdravstveni dom. Geodetski zavod Ljubljane: 17 str.

GZL. 1992. Geotehnično poročilo o pogojih temeljenja in izgradnje objektov 9, 10(D); 11(E) ter garažne hiše na ustreznem območju ZN CO 5/3 zdravstveni dom v Ljubljani. Geološki zavod Ljubljana, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko: 13 str.

GZL, 1997. Hidrogeološka karta TK – 25.000 za občino Ljubljana. Strokovne podlage za zavarovanje vodnih virov. Geološki zavod Ljubljana, Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko.

Hawkins, R.H. 1973. Improved prediction of storm runoff in mountain watersheds. Journal of Irrigation and Drainage Division 99, 4: 519-523.

Hawkins, R.H. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 119, 2: 334-345.

[doi:http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))

Hjelmfelt, A.T: Jr. 1980. Empirical investigation of curve number technique. Journal of the Hydraulics Division 106, 9: 1471-1476.

Hollis, G.E. 1975. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. Water Resources Research 11, 3: 431-434.

[doi:10.1029/WR011i003p00431](http://dx.doi.org/10.1029/WR011i003p00431)

Holman-Dodds, J.K., Bradley, A.A., Potter, K.V. 2003. Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management. Journal of the American Water Resources Association 39, 1: 205-215.

doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb01572.x



Hrast, V. 2007. Ureditev plovbe na Ljubljanici. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Hrast): 65 str.

Hood, M.J., Clausen, J.C., Warner, G.S. 2007. Comparison of stormwater lag times for low impact and traditional residential development. *Journal of the American Water Resources Association* 43, 4: 1036-1046.

doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00085.x

Huang, S.-Y., Cheng, S.-J., Wen, J.-C., Lee, J.-H. 2012. Identifying hydrograph parameters and their relationships to urbanization variables. *Hydrological Sciences Journal* 57, 1: 144-161.

doi:10.1080/02626667.2011.637044

HydroCAD Software Solutions LLC. 2011. HydroCAD Stormwater Modeling System. Chocorua, HydroCAD Software Solutions LLC.

<http://www.hydrocad.net/> (Pridobljeno 30. 4. 2015.)

IBE, d.d., Svetovanje projektiranje in inženiring d.d.. 2003. PGD št. JGAR.ME-D531/007A, Metelkova, Garaže v I. in II. kleti, atrij in skladiščni prostori v kleti. RS Ministrstvo za kulturo: 21 str.

Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko (IGGG). 1998. Poslovno apartmajsko stanovanjski objekt CO 5\_3 – Zaščita gradbene jame s sidrano jet grouting in AB pilotno steno. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko: 128 str.

Jeon, J.H., Lim, K.J., Choi, D., Kim, T.D. 2010. Modeling the effects of Low Impact Development on runoff and pollutant loads from an apartment complex. *Environmental Engineering Research* 15, 3: 167-172.

[doi:10.4491/eer.2010.15.3.167](https://doi.org/10.4491/eer.2010.15.3.167)

JP VO-KA. 2013. Kataster kanalizacije. Ljubljana, JP VODOVOD-KANALIZACIJA d.o.o.

Jones, B.E. 1916. A method of correcting river discharge for a changing stage. US Geol. Survey Water Supply Paper 375-E.

Juan, A., Fang, N., Bedient, P. 2013. Flood Improvement and LID Modeling Using XP-SWMM. Houston, Rice University: 11 str.

Khedun, P., Demodaram, C., Giacomoni, M., Ryan, A., Holmes, H., Klein, R., Saour, W., Hollingsworth, M., Berthold, T., Davis, M., Bullock, P., Ravikumar, N., Zechman, E., Moore, G., Boulanger, B., Stoleru, R. 2009. Improving hydrologic sustainability of Texas A&M University Campus. Prispevek na konferenci World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers, ASCE: p. 1238-1247.

doi:10.1061/41036(342)122

Kolar J. 1983. Odvod odpadne vode iz naselij in zaščita voda – tehnika zbiranja, odvoda, čiščenja in dispozicija odpane ter padavinske vode. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 523 str.

Kompare, B. 1991. Modeliranje deževnega odtoka iz urbaniziranih povodij. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, VTOZD Gradbeništvo in geodezijo. Inštitut za zdravstveno hidrotehniko: 509 str.

Lim, K.J., Engel, B.A., Muthukrishnan, S., Harbor, J. 2006. Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology. Journal of the American Water Resources Association 42, 3: 626-643.

doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x

Liu, K., Minor, J. 2005. Performance evaluation of an extensive green roof. City of Toronto, National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction: 12 str.

Liu, Y., Ahiablame L.M., Bralts, V.F., Engel, B.A. 2015. Enhancing a rainfall runoff model to assess the impact of BMPs and LID practices on storm runoff. Journal of Environmental Management 147: 12-23.

[doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.005)

Low Impact Development Center, Inc. 2014. Urban Design Tools Website. Beltsville, Low Impact Development Center.

<http://www.lid-stormwater.net/index.html> (Pridobljeno 22. 9. 2014.)

LUZ d.d. 1999. PGD št. 4560/1 Objekt D1, območje urejanja CO 5/3 zdravstveni dom. Energoplan d.d.: 30 str.

LUZ d.d. 1996. PGD št. 4560, Poslovno apartmajski objekt. Investplan d.d.: 54 str.

Martin, B.K. 2008. The dynamic stormwater response of a green roof. The Faculty of Graduate Studies of The University of Guelph: 149. str.

MDE. 1983. Modelling infiltration practices using the TR-20 hydrologic program. Baltimore, Maryland Department of the Environment: 15 str.

<http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/SoilErosionandSedimentControl/Documents/Modeling%20Infiltration%20wTR%202020.pdf> (Pridobljeno 9. 5. 2015.)

MDE. 2012. Stormwater Design Guidance – Addressing Quantity Control Requirements. Baltimore, Maryland Department of the Environment: 4 str.

<http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/SedimentandStormwaterHome/Documents/ESDMEP%20Quantity%20Management%20Design%20Guidance.pdf>

(Pridobljeno 10. 5. 2015.)

Medvešček, T. Grmek, J. 2002. SPO-CO-1/5 Komenskega ul., faza 1.1 in 1.2, podzemna garaža, niz Komenskega. IMOS, Investicijske gradnje d.d.: 22 str.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica 20, 32.

[ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32\\_1.pdf](ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf) (Pridobljeno 1. 5. 2016.)

Moran, A.C. Hunt, B. Jennings, G. 2003. A North Carolina field study to evaluate green roof runoff quantity, runoff quantity, runoff quality, and plant growth. World Water & Environmental Resources Congress 2003: 1-10.

[doi:10.1061/40685\(2003\)335](https://doi.org/10.1061/40685(2003)335)

Muste, M., Kyutae, L. 2013. Quantification of hysteretic behavior in streamflow rating curves. Proceedings of 2013 IAHR World Congress, Chengdu, China, September 2003: 15 str.

[doi:10.13140/2.1.1302.3369](https://doi.org/10.13140/2.1.1302.3369)

National Research Council. 2009. Urban stormwater management in the United States. Washington, D.C., National Research Council, The National Academies Press: 513 str.

OCSCD. 2001. Impact of soil disturbance during construction on bulk density and infiltration in Ocean County, New Jersey. Ocean County Soil Conservation District, Schnabel Engineering Associates, Inc., USDA National Resources Conservation Service: 18 str.

Odlok o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana – izvedbeni del. Uradni list RS št. 78/2010: 11441

Onset Computer Corporation. 2005-2012. Data logging rain gauge RG3 and RG3-M User's Manual. Onset Computer Corporation: 12 str.

Onset Computer Corporation. 2016. HOBO Rain Gauge Data Logger.  
<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/rg3> (Pridobljeno 29. 4. 2016.)

Panjan, J. 2002. Odvajanje onesnaženih voda. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 91 str.

Paudel, B.K. 2009. Calibration and testing of simple mass balance model for quantifying stormwater management benefit of an extensive green roof. Faculty of Graduate Studies through the Department of Civil and Environmental Engineering at the University of Windsor: 97 str.

Perez-Pedini, C., Limbrunner, J.F., Vogel, R.M. 2005. Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. Journal of Water Resources Planning and Management 131, 6: 441-448.

[doi:http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:6\(441\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:6(441))

Petersen-Øverleir, A. 2006. Modelling stage–discharge relationships affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques 51, 3: 365-388.

doi:10.1623/hysj.51.3.365

Pintar, M. 2006. Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v zahodni, osrednji in južni Sloveniji. Ljubljana, Republika Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 55 str.

Poff N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C. 1997. The natural flow regime – A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47, 11: 769-784.

Ponce, V., Hawkins, R. 1996. Runoff Curve Number: Has it reached maturity?. *Journal of Hydrologic Engineering* 1, 11: 11-19.

[doi:http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))

Prestor, J., Hoetzi, M. 2002. Hidrogeološko mnenje o stanju podzemnih voda za lokacijo CO 1/5 Komenskega v Ljubljani. Geološki zavod Ljubljane: 3 str.

Prince George's County. 1999. Low-impact development design strategies. An integrated design approach. Maryland, Prince George's County, Department of Environmental Resources Programs and Planning Division: 150 str.

Progres Slovenj Gradec, delovna organizacija za projektiranje in inženirig. 1990. PGD št. 894, Poslovni proizvodni objekt ISKRA COMMERCE. ISKRA COMMERCE Ljubljana: 7 str.

Projekt MR inženiring d. d.. 2001. Mladinski hotel na Metelkovi ulici v Ljubljani. PGD št. 331 – 787, arhitektura. Mestna občina Ljubljana: 25 str.

Projektiva Gorica d.o.o. 1992. PGD št. 1403/P2. CO 5/3 Zdravstveni dom Ljubljana, objekt podzemni parking II. Faza. IMOS d.d., Ljubljana: 10 str.

Projektivno konstrukcijski biro SGP Stavbenik Koper. 1983. PGD, PZI št. 83-33. Stanovanjski objekt L5 plinarna. IMOS Inženiring d.d.: 7 str.

Rose, K., Hodges, B.R. 2010. Evaluating the effects of low impact development on Texas A&M University west campus. Center for Research in Water Resources, The University of Texas in Austin.: 45 str.

<http://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10897/CRWR%20online%20report%2010-08.pdf?sequence=2> (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

Sample, D.J., Heaney, J.P., Wright, L.T., Koustas, R. 2001. Geographic information system, decision support systems and urban stormwater management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127, 3: 155-161.

[doi:http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:3\(155\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:3(155))

Schueler, T. 1996. Site planning for urban stream protection. *Metropolitan Washington Council of Governments*: 232 str.

Sin, J., C. Juna, C., Zhua, J.H., Yoo C. 2014. Evaluation of flood runoff reduction effect of LID (Low Impact Development) based on the decrease in CN: case studies from Gimcheon Pyeonghwa district, Korea. *Procedia Engineering* 70:1531-1538.

[doi:10.1016/j.proeng.2014.02.169](http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.169)

SOZD ABC Pomurka – Projektivno podjetje Agens projekt. 1979. Zdravstveni dom center. Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja št. 711, arhitektura. Ljubljana, Skupnost za izvedbo programa izgradnje objektov družbenega standarda na območju ljubljanskih občin: 40 str.

State of Delaware. 2015. Delaware DNREC runoff reduction guidance document. Post construction stormwater management. State of Delaware: 25 str.

<http://www.dnrec.delaware.gov/swc/Drainage/Documents/Sediment%20and%20Stormwater%20Program/Technical%20Document/Latest%20Version%20of%20all%20Articles/3.04%20Post%20Construction%20SWM.pdf> (Pridobljeno 10. 5. 2015.)

Suriya, S., Mudgal, B.V. 2012. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology* 412-413: 210-219.

[doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.008)

UL FGG. 2016a. Avtomatski dežemer ONSET RG2-M. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/predstavitev/oprema> (Pridobljeno 29. 4. 2016.)

UL FGG. 2016b. Dopplerjev merilec pretočnih hitrosti, temp. vode in vodnega tlaka Starflow Unidata model 6526-51. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/predstavitev/oprema/strafllow.pdf> (Pridobljeno 29. 4. 2016.)

Unidata Pty Ltd. 2011. Manual Starflow ultrasonic doppler instrument with micrologger model 6526. Unidata Pty Ltd.: 136 str.

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo. Uradni list RS št. 64/2012: 6392.

Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja. Uradni list RS št. 43/2015: 4751.

USACE. 2015a. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: aplikacija HEC-HMS 4.1 for Windows. United States Army Corps of Engineers.

[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_4.1.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.1.pdf)  
(Pridobljeno 15. 6. 2015.)

USACE. 2015b. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual version 4.1: 584 str.

[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_4.1.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.1.pdf)  
(Pridobljeno 15. 6. 2015.)

USDA. 1986. Urban hydrology for small watersheds, Technical release – 55. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division: 164 str.

[http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf) (Pridobljeno 26. 4. 2015.)

Valenčič, M. 2010. Ponikanje in zadrževanje padavinskih vod. EGES 1/2010: 30-36.

Van Roon, M. 2007. Water localisation and reclamation: Steps toward low impact urban design and development. Journal of Environmental Management 83: 437-447.

[doi:10.1016/j.jenvman.2006.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.008)

Viessman, W. Jr., Knapp, J.W., Lewis, G.L., Harbaugh T.E. 1977. Introduction to hydrology. IEP A Dun-Donnelley Publisher, New York: 704 str.

Whiters & Ravenel. 2006. Wake County Stormwater Design Manual. Wake County, North Carolina.

[http://conservationsuccess.wikispaces.com/file/view/Wake+County+DRAFT\\_STORMWATER\\_MANUAL.pdf](http://conservationsuccess.wikispaces.com/file/view/Wake+County+DRAFT_STORMWATER_MANUAL.pdf) (Pridobljeno 10. 5. 2015.)

Whiters & Ravenel. 2012. LID – EZ User's Manual. Town of Cedar Point.

<http://www.cedarpointnc.org/vertical/sites/%7BBAA1665C-D429-43A8-B524-794449BD3011%7D/uploads/CedarPointLID-EZUsersManual.pdf> Pridobljeno 9. 5. 2015.)

Williams, E.S., Wise, W.R.. 2006. Hydrologic impacts of alternative approaches to storm water management and land development. Journal of the American Water Resources Association 42, 2: 443-455.

doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb03849.x

Wisconsin department of natural resources. 2015. Modelling post construction stormwater management treatment. Wisconsin department of natural resources, Storm water management programme, Bureau of watershed management: 13 str.

Woltemade, C.J. 2010. Impact of residential soil disturbance on infiltration rate and stormwater runoff. Journal of the American Water Resources Association 46, 4: 700-711.

doi:10.1111/j.1752-1688.2010.00442.x

Yoo, C., Kim, K., Park, M., Yoon, J. 2013. Quantification of flood runoff reduction effect of storage facilities by the decrease in CN. Journal of Hydrologic Engineering 18, 6: 729-733.

[doi:http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000661](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000661)

Zabret, K., Šraj, M. 2015. Can urban trees reduce the impact of climate change on storm runoff?. Urbani izziv 26: 16 str.

Zakon o vodah. Uradni list RS št. 67/2002: 7648.



Zomorodi, K. 2015. Curve number and groundwater recharge credits for LID facilities in New Jersey.  
[http://dewberry.com/docs/default-source/documents/curve\\_number\\_and\\_groundwater\\_recharge\\_credits.pdf](http://dewberry.com/docs/default-source/documents/curve_number_and_groundwater_recharge_credits.pdf) (Pridobljeno 11. 6. 2015.)



## SEZNAM PRILOG

Priloga A:	Osnovne karakteristike predvidenih ponikalnih jaškov.	A1
Priloga B:	Osnovne karakteristike predvidenih cevni ponikalnih jarkov.	B1

»Ta stran je namenoma prazna.«

**PRILOGA A: Osnovne karakteristike predvidenih ponikalnih jaškov.**

Oznaka ukrepa	Površina prisp. območja na ponikalne jaške [m <sup>2</sup> ]	Št. potrebnih ponik. jaškov	Premer <i>D</i> [cm]	Maks. višina vode v jašku z [m]	Skupna prostornina <i>V</i> [m <sup>3</sup> ]
P001	92,52	1	100	0,80	0,63
P003	303,44	1	150	1,68	2,97
P004	616,73	2	150	1,94	6,87
P005	231,25	1	150	1,18	2,09
P006	1504,88	4	150	2,54	17,95
P009	685,48	2	150	2,19	7,73
P010	559,48	2	150	1,74	6,16
P011	395,33	1	150	2,33	4,11
P012	660,88	2	150	2,10	7,42
P013	388,94	1	150	2,28	4,03
P014	1353,62	4	150	2,27	16,06
P016	541,26	2	150	1,68	5,93
P017	719,43	2	150	2,31	8,15
P018	375,89	1	150	2,19	3,87
P019	363,58	1	150	2,10	3,72
P020	683,58	2	150	2,18	7,71
P021	834,55	2	150	2,71	9,59
P022	347,79	1	150	1,99	3,52
P023	695,77	2	150	2,22	7,86
P024	240,09	1	150	1,24	2,20
P025	341,63	1	150	1,95	3,44
P026	1057,85	3	150	2,33	12,37
P027	710,72	2	150	2,28	8,05
P028	246,14	1	150	1,28	2,27
P029	289,44	1	150	1,58	2,79
P030	259,29	1	150	1,37	2,43
P031	390,24	1	150	2,29	4,05
P032	762,49	2	150	2,46	8,69
P033	674,67	2	150	2,15	7,60
P038	620,71	2	150	1,96	6,92
P039	379,89	1	150	2,22	3,92
P040	315,50	1	150	1,76	3,12
P041	122,35	1	150	0,47	0,83
P042	410,85	1	150	2,44	4,31
P044	226,42	1	150	1,15	2,04



**PRILOGA B: Osnovne karakteristike predvidenih cevnih ponikalnih jarkov.**

Oznaka ukrepa	Površina prisp. območja na ukrep $A$ [m <sup>2</sup> ]	Št. drenažnih cevi $D = 30$ cm	Širina cev. ponik. jarka $b_{IT}$ [m]	Globina cev. ponik. jarka $h_{IT}$ [m]	Dolžina cev. ponik. jarka $l_{IT}$ [m]
cpj001	572,99	1	2,5	1,00	4,66
cpj002	645,71	1	2,5	1,00	5,26
cpj003	1038,16	2	2,5	1,00	8,30
cpj004	1284,71	2	4,0	1,00	6,77
cpj005	939,09	2	3,0	1,00	6,40
cpj006	1105,75	2	4,0	1,00	5,83
cpj007	768,03	2	2,5	1,00	6,14
cpj008	699,80	2	2,5	1,00	5,59
cpj009	508,69	1	1,5	1,00	6,38
cpj010	1400,68	2	5,0	1,00	6,02
cpj011	916,15	2	2,5	1,00	7,32
cpj012	255,04	1	1,0	1,00	4,38
cpj013	150,96	1	1,0	1,00	2,59
cpj014	1969,29	2	6,0	1,00	7,14
cpj015	1992,02	2	4,0	1,00	10,50
cpj016	423,81	2	2,5	1,00	3,39
cpj017	486,29	1	1,5	1,00	6,10
cpj018	1166,29	2	3,0	1,00	7,95
cpj019	491,56	1	1,5	1,00	6,16