

UDK/UDC: 556.121:696.136

Prejeto/Received: 21.06.2017

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 27.09.2017

MODELIRANJE IN OCENA VPLIVOV RAZPRŠENIH UKREPOV ZADRŽEVANJA IN PONIKANJA PADAVINSKE VODE NA ODTOK IZ URBANEGA POVODJA

MODELLING AND EVALUATING IMPACTS OF DISTRIBUTED RETENTION AND INFILTRATION MEASURES ON URBAN RUNOFF

Matej Radinja^{1,*}, Primož Banovec¹, Joaquim Comas Matas^{2,3}, Nataša Atanasova^{1,2}

¹Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

²LEQUiA, Institute of the Environment, University of Girona, 17071 Girona, Španija

³ICRA, Catalan Institute for Water Research, Parc Científic i Tecnològic de la UdG. 17003 Girona, Španija

Izvleček

Članek obravnava vpliv razpršenih ukrepov zadrževanja in ponikanja padavinske vode na mestu nastanka na odtok z urbanega povodja na študijskem primeru mesta Girona, Španija. Ti ukrepi (angl. SUDS) zmanjšajo količino vode, ki se iz kanalizacijskega sistema razbremeni v odvodnik, in tako prispevajo k njegovi boljši kakovosti. Za oceno učinkovitosti posameznih ukrepov smo v programu Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2016 vzpostavili model urbanega povodja. V okviru raziskave smo na razbremenilniku za potrebe umerjanja modela merili pretoke. V skladu z razmerami v urbanem povodju, ki obsega 2,7 km², smo razvili pet scenarijev možnih ukrepov razpršenega zadrževanja in ponikanja, ki so zajemali infiltracijske kotanje, infiltracijske jarke, zelene strehe in njihove kombinacije. Glede na kriterij zmanjšanja prelivanja na enoto izvedenega ukrepa se je kombinacija infiltracijskih kotlin in jarkov izkazala kot najučinkovitejši scenarij. Med scenariji s po eno vrsto ukrepa so bile najučinkovitejše infiltracijske kotanje. Ugotovili smo, da lahko razpršeni ukrepi znatno zmanjšajo količino razbremenjevanja iz mešanega kanalizacijskega sistema, medtem ko nudijo dodatne koristi. Zato bi morali biti vključeni v bodoče aktivnosti, povezane z upravljanjem voda na urbanih območjih.

Ključne besede: razpršeni ukrepi, zadrževanje, ponikanje, padavinska voda, razbremenilnik mešanega kanalizacijskega sistema, površinski odtok.

Abstract

This paper presents the impacts of distributed retention and infiltration measures on urban runoff on a case study of the city of Girona, Spain. These measures, i.e. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), reduce the quantity of water that would otherwise overflow from combined sewer system (CSS) into the recipient and in this way contribute to their quality. To assess their effectiveness the software Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2016 was employed for developing an urban catchment model. Flow measurements were taken in the combined sewer overflow (CSO) channel for calibration. In accordance with the conditions in the urban catchment, which covers 2.7 km², five scenarios were developed consisting of the following measures:

* Stik / Correspondence: matej.radinja@fgg.uni-lj.si

© Radinja M. et al.; Vsebinska tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Radinja M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

infiltration basins, infiltration trenches, green roofs, and combinations thereof. The most efficient scenario in terms of overflow reduction per unit of implemented SUDS measure was the one including the combination of infiltration basins and infiltration trenches. Among scenarios with a single measure, infiltration basins were the most effective. In conclusion SUDS can significantly reduce CSOs while offering additional benefits. Therefore they should be included in the strategies of urban water management, i.e. in the design of urban drainage systems.

Keywords: distributed measures, retention, infiltration, rain water, combined sewer overflow, surface runoff.

1. Uvod

Urbanizacija povzroča spremembe v naravnem hidrološkem krogu, ki se kažejo v manjši infiltraciji in evapotranspiraciji ter povečanem površinskem odtoku. Mešani kanalizacijski sistemi so dimenzionirani tako, da prevajajo sanitarno vodo in v omejenih količinah tudi padavinsko vodo do čistilne naprave. Med padavinskimi dogodki, ko je njihova prevodna zmogljivost presežena, razbremenilniki odvajajo presežne količine vode v odvodnik.

Tradicionalna in centralizirana rešitev za preprečevanje direktnega razbremenjevanja v odvodnik so podzemni zadrževalniki, ki so načrtovani tako, da zajamejo čistilni val, ki se ga po nalivu odvede na čistilno napravo. Čistilni val je mešanica izpranih, organsko onesnaženih suspendiranih delcev in padavinske odpadne vode, ki kot posledica prvega naliva padavinske odpadne vode odteka po kanalizaciji (Uredba, Ur. l. RS, št. 98/2015: 3842). Ko je dosežena dovolj velika stopnja redčenja vode, pa se jo odvaja v odvodnik. Alternativa mešanemu sistemu je ločen sistem za odvajanje padavinske vode, ki je lahko sestavljen iz sistema odvodnih cevi za padavinsko vodo ali pa razpršenih ukrepov zadrževanja in ponikanja padavinske vode na mestu nastanka. Medtem ko ločeni 'ceveni' sistem padavinsko vodo le odvede do odvodnika, imajo ukrepi zadrževanja in ponikanja tudi čistilno funkcijo ter cilj oponašati naravne hidrološke procese. Ta članek se ukvarja z ločenim sistemom slednjega tipa, pri čemer pa se ne ukvarja s čistilno funkcijo posameznih ukrepov, temveč le z njihovo kapaciteto zadrževanja padavinske vode. Tovrstni trajnostni sistemi za odvajanje padavinskih voda z urbanih površin (angl. Sustainable Urban Drainage Systems, v nadaljevanju SUDS), ne predstavljajo novega koncepta, saj so bili

predstavljeni že nekaj desetletij nazaj. Razen v nekaj pionirskih državah, kot sta Združeno kraljestvo in Nizozemska, dodatne koristi, ki jih nudi tovrstna »zelen«*»zelen«* infrastruktura, še niso bile ustrezno predstavljene nacionalnim in lokalnim oblastem, upravljalcem sistemov in javnosti. Za razliko od tradicionalnega pristopa, ki temelji na odvajanju in zadrževanju vode znotraj kanalizacijskega sistema, za tovrstne sisteme še niso uveljavljene smernice in programska orodja, namenjena odločevalskemu procesu. Posledično so dodatne koristi SUDS-ov lahko spregledane, saj so procesi ocenjevanja rešitvenih različic nejasni, poleg tega dolgoročno delovanje teh sistemov za deležnike predstavlja negotovost oz. tveganje. Čeprav nekatera modelska orodja že vključujejo module za modeliranje SUDS-ov z vidika hidravlike in kakovosti vode, je področje dodatnih koristi, kot so dodana vrednost, biotska raznovrstnost ter dolgoročni vidiki stroškov in koristi, v ta orodja nezadostno vključeno (Chow et al., 2014).

Avtorji, ki so v preteklosti izvajali študije, povezane s SUDS-i, so poročali, da lahko njihova uporaba znatno zmanjša površinski odtok z urbanih povodij (Autixier et al., 2014; Cipolla et al. 2016; Ellis and Viavattene, 2014; Fornes, 2015; Štajdohar, 2016). Na rezultate vplivajo predvsem obseg njihove izvedbe in značilnosti analiziranih padavinskih dogodkov.

2. Ukrepi razpršenega zadrževanja in ponikanja padavinske vode (SUDS)

2.1 Zakonodaja

Najpomembnejša pravna dokumenta Evropskega parlamenta in Sveta sta t. i. vodna direktiva (Evropski parlament, 2000) in direktiva o čiščenju

komunalne odpadne vode (Svet Evropske unije, 1991). Prva direktiva ureja področje upravljanja kanalizacijskih sistemov in njihovega vpliva na odvodnike posredno z zahtevo po »dobrem« ekološkem in kemijskem statusu za vse površinske in podzemne vode, medtem ko druga direktiva to področje neposredno ureja. Ta med drugim državam članicam nalaga, da izvedejo ukrepe, ki bodo omejili onesnaževanje odvodnikov prek razbremenilnikov v izjemnih razmerah, kot je močan naliv. Hkrati je v direktivi pripoznano, da ni mogoče zagotoviti sistemov zadrževanja, ki bi preprečili razbremenjevanje tudi ob ekstremnih padavinah, zato državam članicam nalaga, da določijo, pri kakšnem razmerju redčenja ali kolikokrat na leto je razbremenjevanje v odvodnik še dovoljeno.

2.2 Standardi in smernice združenja DWA

Nemško združenje za vodo, odpadno vodo in odpadke (angl. German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA), nem. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (v preteklosti ATV-DVWK)) je izdajatelj mnogih standardov in smernic za upravljanje voda. Kar nekaj njihovih standardov je povezanih s tematiko te raziskave. Tematiko razbremenilnikov obravnava standard ATV-A 128E: »Standards for the Dimensioning and Design of Stormwater Overflows in Combined Wastewater Sewers« (slov. Standard za dimenzioniranje in načrtovanje razbremenilnikov v mešanem kanalizacijskem sistemu). Med najpomembnejšimi priporočili je minimalna stopnja redčenja (7), ki bi morala biti zagotovljena pred razbremenjevanjem v odvodnik.

Z vidika načrtovanja ukrepov je s SUDS-i povezan standard DWA-A 138E: »Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of Precipitation Water« (slov. Načrtovanje, gradnja in obratovanje naprav za ponikanje padavinske vode), ki podaja natančna priporočila za načrtovanje ukrepov, povezanih z infiltracijo, kot so ponikovalnice, infiltracijski jarki in infiltracijske kotanje.

2.3 SUDS

Priročnik The SuDS Manual, ki ga je pripravilo združenje CIRIA (angl. Construction Industry Research and Information Association), London, Združeno kraljestvo, celovito predstavi zasnovo, načrtovanje, gradnjo in vzdrževanje vseh ukrepov, ki jih poznamo pod tem imenom.

SUDS-i lahko blažijo probleme in hkrati ustvarijo večfunkcionalno infrastrukturo. Ti sistemi za urbano odvodnjavanje tipično uporabljajo pristope, kot so infiltracija, zbiranje deževnice za ponovno uporabo, površinsko zadrževanje vode in na splošno zadrževanje padavin na lokaciji, kjer padejo, in tako zmanjšujejo količino površinskega odtoka s povodja. SUDS-i zagotavljajo štiri glavne kategorije koristi:

- 1) količina vode: SUDS-i zmanjšujejo količino površinskega odtoka z urbanega povodja in tako zmanjšajo pritisk na kanalizacijski sistem ter posledično zmanjšajo potrebo po njegovem razbremenjevanju; izboljšujejo poplavno varnost; bogatijo podtalnico in izboljšujejo vlažnost zemljine;
- 2) kakovost vode: SUDS-i ščitijo površinske in podzemne vode pred škodljivimi vplivi onesnaženega odtoka z urbanega povodja;
- 3) dodana vrednost: SUDS-i ustvarjajo atraktivna območja, kjer ljudje želijo živeti in delati; ustvarjajo urbana območja, ki so bolj odporna na podnebne spremembe; blažijo učinek toplotnih otokov;
- 4) biotska raznovrstnost: SUDS-i podpirajo naravne habitate in njihovo povezavo s povezanimi ekosistemi.

V raziskavi smo z namenom zmanjšanja površinskega odtoka znotraj obravnavanega območja simulirali vpliv naslednjih ukrepov:

- infiltracijski jarki,
- infiltracijske kotanje in
- zelene strehe.

3. Metodologija dela in podatki

3.1 Študijsko območje

Mesto Girona, s približno 100.000 prebivalci, leži na severovzhodu avtonomne pokrajine Katalonija, Španija. V hidrološkem smislu mesto leži na sotočju reke Ter in njenih pritokov: Onyar, Galligants in Güell. Za leto 2013 je bila na inštitutu Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) izdelana vodna bilanca kanalizacijskega sistema v Gironi. Iz nje izhaja, da je v povprečju 23 % padavinskih voda očiščenih na centralni čistilni napravi, preostalih 77 % pa se kot mešana komunalna voda na razbremenilnikih prelije v odvodnike (slika 1).



Slika 1: Preplavanje mešane kanalizacije prek razbremenilnika – 7. 2. 2016.

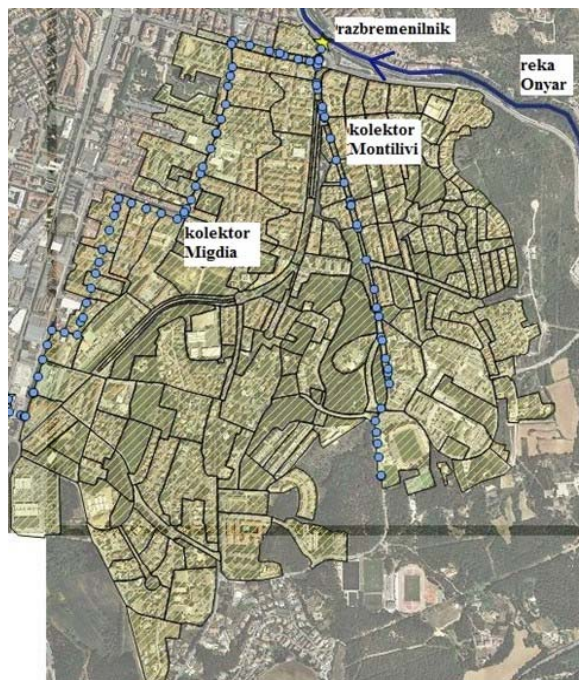
Figure 1: The CSO event – 7.2.2016.

V okviru raziskave smo analizirali zaključeno območje znotraj Girone, ki obsega 2,7 km², kjer se odpadne padavinske vode odvajajo prek mešanega kanalizacijskega sistema, ki ga na tem območju tvorita dva glavna kolektorja: Montilivi in Migdia, ki se tik pred razbremenilnikom združita. Ker je prevodnost kanalizacijskega sistema od tu naprej proti čistilni napravi znatno omejena, prevodna zmogljivost se namreč zmanjša z 10 m³/s na 0,5 m³/s, se presežek voda prek razbremenilnika odvaja neposredno v reko Onyar (slika 2). Pri tem je treba izpostaviti, da pogosto posledično ni zagotovljeno zadostno razredčenje, kar ima negativne posledice na kakovost odvodnika, reko Onyar.

Negativnih vplivov razbremenilnika na reko se zavedajo tudi lokalne oblasti, ki so v svojem poročilu že predlagale nekatere tehnične rešitve, s katerim bi omejili razbremenjevanje (Ajuntament de Girona, 2015). V skladu z njim bi ob

razbremenilniku zgradili podzemni zadrževalnik ter hkrati vzpostavili nov kanal, s katerim bi hudournik, ki priteče iz okoliških hribov, ločeno odvajali neposredno v reko in tako preprečili, da bi se znatne količine padavinske vode znašle v mešanem kanalizacijskem sistemu.

Cilj raziskave je bila vzpostavitev modela, s katerim bodo ocenjeni ukrepi razpršenega zadrževanja in ponikanja padavinskih voda na mestu nastanka ter njihov vpliv na zmanjšanje količine razbremenjene kanalizacijske vode preko obstoječega razbremenilnika, ki je ob trgu Plaça dels Països Catalans v Gironi, v reko Onyar (lokacija razbremenilnika je na sliki 2 označena z zvezdico). Predlagani scenariji, ki bodo vključevali različne komponente SUDS-ov, bodo s primerjalno analizo ocenjeni na podlagi njihovega vpliva na zmanjšanje preplivanja na razbremenilniku.



Slika 2: Obravnavano območje.

Figure 2: Case study area.

3.2 Metodologija dela

Metodologija dela zajema zbiranje obstoječih podatkov in meritve novih, vzpostavitev in kalibracijo hidrološko-hidravličnega modela, načrtovanje SUDS-ov, vzpostavitev in simulacije SUDS-ov v modelu ter primerjalno analizo scenarijev.

Obstoječi podatki so zajemali:

- podatke o padavinah z 10-minutnim intervalom za merilno mesto: Girona – parc Migdia;
- intenzitetne krivulje padavin (AEMET, 2003);
- podatke o kanalizacijskem sistemu;
- karto rabe tal (CREAF, 2009) in
- hidrogeološko karto.

3.3 Meritve infiltracije

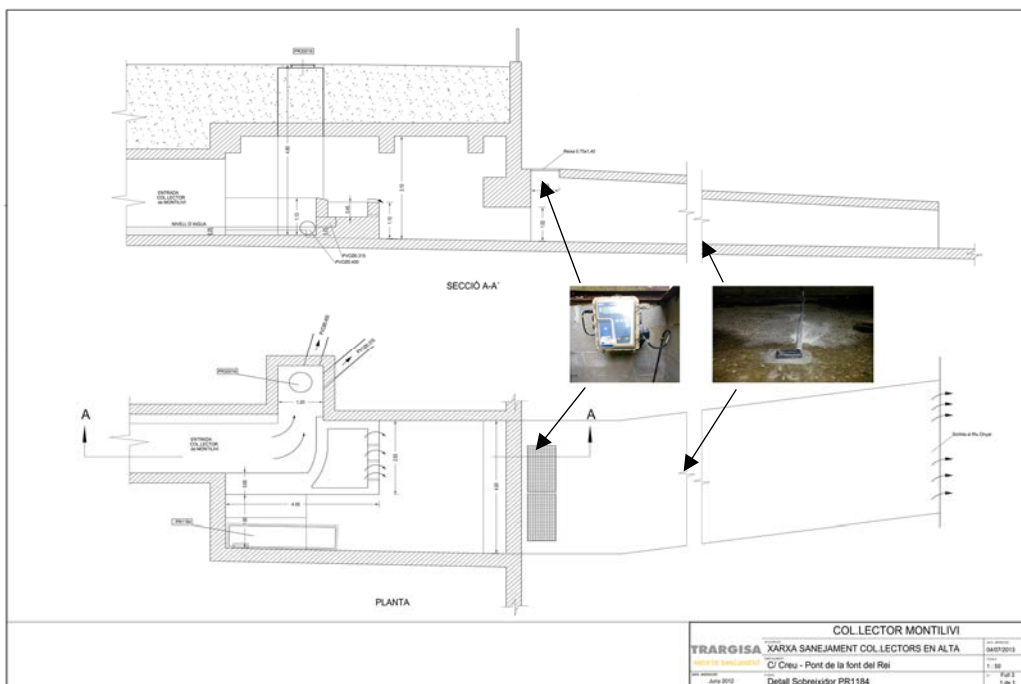
Meritve infiltracije smo izvedli z infiltrometrom z dvema obročema (Eijkelkamp Company, 2015) na treh lokacijah znotraj obravnavanega območja. Vsaka lokacija je bila znotraj druge litološke skupine glede na hidrogeološko karto Girone.

3.4 Meritve pretoka na razbremenilniku

Namen meritev pretoka na razbremenilniku je bila umestitev rezultatov modela v pravilni časovni

interval, tj. pravilni odziv modela na pojav in trajanje deževnih dogodkov v skladu z namenom modela, ki pa je ocena deleža prostornine padavinske vode, ki jo lahko zadržimo z načrtovanimi SUDS-i. Sistematična kalibracija, ki bi omogočala natančno simulacijo prostornine odtoka, bi zahtevala več merilnih mest v celotnem urbanem povodju in je potrebna v primeru natančnega načrtovanja (dimenzioniranja) ter umeščanja SUDS-ov.

Za izvajanje meritev smo uporabili merilnik pretoka Sigma 950, HACH, ki je meril razbremenjevanje v odvodnem kanalu razbremenilnika pred iztokom v reko (slika 3). Merilnik hkrati meri globino in hitrost vodnega toka na podlagi Dopplerjevega efekta. S samimi meritvami je bilo povezanih kar nekaj negotovosti: izvajanje meritev v območju kritičnega toka, meritve se izvaja samo v eni točki širokega (4 m) in ne horizontalnega profila, izmerjene so bile negativne vrednosti toka, kar pomeni, da se v tem območju občasno pojavlja tudi povratni tok.



Slika 3: Vzдолžni prerez in tloris razbremenilnika z označenimi lokacijami posameznih delov merilnika pretoka.

Figure 3: Longitudinal cross-section and ground plan of the CSO object with marked locations of flowmeter unit.

Ker razbremenilnik ni bil projektiran tako, da bi omogočal izvajanje meritev pretokov, ugotavljamo, da je bil poizkus izvajanja meritev neregularen. Zato smo se zatekli k pomožnim metodam – identifikaciji aktivacije razbremenilnika z uporabo temperaturnih senzorjev.

3.5 Temperaturni senzorji

Na podlagi vseh negotovosti, povezanih z meritvami pretoka, so bili na razbremenilniku dodatno nameščeni še temperaturni senzorji tipa HOBO® Pendant Temperature/Light Data Logger UA-002-64. Z njimi lahko na podlagi zaznane spremembe v temperaturi določimo, kdaj se je začelo prelivanje oz. kdaj je bil določen senzor prelit z vodo. Nameščeni so bili štirje senzorji, dva na kanalu razbremenilnika, senzor št. 3 na prelivnem polju razbremenilnika in senzor št. 4 v območju pod krono razbremenilnika, ki je prvi zaznal naraščanje nivoja vode nad nivo sušnega pretoka (slika 4).



Slika 4: Senzorja številka 3 in 4.

Figure 4: Sensors number 3 and 4.

3.6 Postavitev modela

Za načrtovanje in analizo SUDS-ov ter mešanega kanalizacijskega sistema smo uporabili modelsko orodje Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2016 (v nadaljevanju SSA). Programska oprema lahko hkrati modelira kompleksno hidrologijo, hidravliko in kakovost vode, pri čemer je ena izmed njenih tipičnih uporabnosti tudi načrtovanje strategij za zmanjšanje prelivanja mešane kanalizacije na

razbremenilnikih. Postopek vzpostavitve modela je prikazan na sliki 5.

1. KORAK: Določanje PROJEKTHNIH POGOJEV:

- 1.1 Enote in specifikacija elementov:
 - Merski sistem: metrični
 - Enota za pretok: m^3/s
 - Višinski tip: nadmorska višina
- 1.2 Specifikacija hidrološkega odtoka:
 - Hidrološka metoda: EPA SWMM
 - Infiltracijska metoda EPA SWMM: SCS krivulje
- 1.3 Specifikacija hidravličnega izračuna:
 - Metoda za izračun toka po ceveh: hidrodinamična
 - Enačba za cev pod tlakom: Hazen-Williams
 - Minimalni naklon cevi: 0 %
- 1.4 Računske in poročevalske metode:
 - Značilnosti infiltracije v zadrževalnih elementih: konstantna stopnja, prosta površina

2. KORAK: Določanje HIDROLOGIJE:

- 2.1 Uvoz karte rabe tal
- 2.2 Definiranje podpovodij na podlagi rabe tal (fizične lastnosti, lastnosti odtoka, št. krivulje po metodi SCS)
- 2.3 Definiranje padavinskih dogodkov

3. KORAK: Določanje HIDRAVLIKE:

- 3.1 GIS-uvoz jaškov in cevi (.shp)
- 3.2 Urejanje lastnosti elementov, ki sestavljajo sistem

4. KORAK: Določanje MOŽNOSTI ANALIZE:

- 4.1 Časovni koraki, datumi
- 4.2 Izračuni analize: površinski odtok, hidravlični tok
- 4.3 Parametri hidrodinamične analize:
 - Vztrajnostni pogoji: ohranjeni v času modeliranja
 - Kritični tok nastopi ob: kritičnem naklonu vodne gladine v cevi in Froudeovem številu > 1.0
- 4.4 Izbira padavinskega dogodka

Slika 5: Postopek vzpostavitve modela.

Figure 5: Procedure of model building.

3.7 Analiza občutljivosti, kalibracija in validacija modela

Analizo občutljivosti smo izvedli s spreminjanjem parametrov modela za -20% , -10% , $+10\%$ in $+20\%$ ter z opazovanjem sprememb, ki jih je to povzročilo pri rezultatih simulacij. Analizo smo izvedli na testnem območju, znotraj katerega smo za vsako rabo tal opredelili eno podpovodje in analizirali vpliv sprememb parametrov podpovodij na odtok. Pri analiziranju cevi smo ugotavljali vpliv spremembe Manningovega koeficienta hrapavosti na odtok.

Na podlagi pridobljenih podatkov in vrednosti parametrov za kanalizacijski sistem in podpovodja, ki jih predlaga orodje SSA, smo oblikovali začetne značilnosti petih vrst rabe tal (urbano območje, stanovanjsko območje, ceste, parki, gozdovi). Poleg teh smo pri kalibraciji obravnavali tudi Manningov koeficient hrapavosti za cevi.

S temi začetnimi značilnostmi rabe tal smo simulirali padavinski dogodek z dne 23. 4. 2016 (10,8 mm v 3 urah) in primerjali rezultate z merjenim pretokom na razbremenilniku. V skladu z ugotovitvami občutljivostne analize smo nato značilnosti rabe tal prilagodili tako, da bi se simulirani pretok razbremenjevanja čim bolj približal merjenemu. Pri tem smo upoštevali razpon parametrov, ki jih predlaga orodje SSA.

Model smo validirali na padavinskih dogodkih z dne 21. 4. 2016 (26,4 mm v 12 urah) in 9. 5. 2016 (12,4 mm v 12 urah).

3.8 Načrtovanje SUDS-ov

Postopka za načrtovanje infiltracijskih jarkov in infiltracijskih kotanj po priročniku CIRIA in standardu DWA-A 138E smo na testnem območju za vsak ukrep navzkrižno preverili.

Zelene strehe smo v model implementirali na poenostavljeni način. Predpostavili smo njihovo kapaciteto zadrževanja na 5 mm globine, ki ustreza tudi kapaciteti zadrževanja za prepustne površine znotraj podpovodij. Nato smo delež prepustnih površin znotraj podpovodja povečali za 20 %, pri čemer ocenjujemo, da to predstavlja približno 50 % vseh streh znotraj podpovodja.

3.9 Scenariji razpršenih ukrepov

V okviru raziskave smo obdelali pet scenarijev glede na razpoložljivi prostor za njihovo izvedbo. Glede na padajočo stopnjo njihove prioritete izvedbe so zajemali: infiltracijske kotanje, infiltracijske jarke, zelene strehe in njihove kombinacije:

SC0: trenutno stanje,

SC1: infiltracijske kotanje,

SC2: infiltracijski jarki,

SC3: zelene strehe,

SC4: kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov (SC1, SC2) in

SC5: kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov ter zelenih streh (SC1, SC2, SC3).

Primerjalno analiza učinkovitosti scenarijev smo izvedli s kriterijem »Povprečno zmanjšanje preliivanja na 1000 enot izvedenega ukrepa« [%].

4. Rezultati

4.1 Meritve

Meritve infiltracije so na vseh treh lokacijah pokazale, da so tam dobro prepustne zemljine, ki smo jih lahko umestili v hidrološko skupino zemljin A, ki predstavlja peske in ilovnate peske. Njihovi karakteristiki sta nizek odtočni potencial ter visoka stopnja infiltracije, ki je kljub dobri navlaženosti zemljine večja od 10 mm/h (USDA, 1986).

Temperaturni senzorji so delovali v dveh časovnih obdobjih: 14. 3. 2016–22. 3. 2016 in 6. 4. 2016–29. 4. 2016. Merilnik pretoka na razbremenilniku je deloval v treh časovnih obdobjih: 25. 2. 2016–22. 3. 2016, 29. 3. 2016–30. 4. 2016 in 1. 5. 2016–17. 6. 2016. Meritve se prekrivajo samo za tri padavinske dogodke. S primerjavo smo ugotovili, da temperaturni senzorji in merilnik pretoka sočasno zaznajo preliivanje na razbremenilniku, kar potrjuje pravilnost meritev merilnika pretoka s časovnega vidika.

4.2 Analiza občutljivosti

Z analizo občutljivosti smo ugotavljali vpliv posameznega parametra na rezultate simulacije. Parametri: širina podpovodja in Manningova koeficienta hrapavosti za prepustne in neprepustne površine imajo vpliv na čas koncentracije. Širina podpovodja ima enak vpliv ne glede na vrsto rabe tal, medtem ko za vpliv koeficienta hrapavosti velja, da mora biti zastopanost prepustnih oz. neprepustnih površin znotraj podpovodja dovolj velika, da ima vpliv na čas koncentracije.

Na površinski odtok vplivata dva parametra: globina depresij znotraj prepustnih in neprepustnih površin ter parameter, ki določa, v kolikšnem deležu

Preglednica 1: Analiza občutljivosti za testna podpovodja.

Table 1: Sensitivity analysis for test subbasins.

PARAMETER	IMA VPLIV NA	VRSTA RABE TAL	SPREMEMBA PARAMETRA				
			-20 %	-10 %	Izhodiščna vrednost	10 %	20 %
Globina depresij – prep. pov. [mm]	Površinski odtok [mm]	UO – urbana območja	0,9 %		4		-0,9 %
		SO – stanovanjska območja	0,4 %	/	4	/	0,0 %
		C – cesta			0		
		G – gozd	0,0 %		4		0,0 %
		P – park			7,5		
		P, G	0,6 %		2,5		-0,6 %
Globina depresij – neprep. pov. [mm]	Površinski odtok [mm]	SO	0,4 %	/	2	/	-0,4 %
		UO	0,3 %		2		-0,3 %
		C	0,2 %		1,5		-0,2 %
		P, G	-2,5 %	-1,3 %	80	1,3 %	2,5 %
"no depression" [%]	Površinski odtok [mm]	UO, SO	-2,2 %	-1,1 %	85	1,1 %	2,2 %
		C	-1,7 %	-0,8 %	90	0,8 %	1,7 %
		UO (neprep. pov. = 85 %)			0,15		
n – neprep. pov.	Čas koncentracije	C (neprep. pov. = 95 %)	-13,0 %	-6 %	0,01	6 %	11,6 %
		SO, P, G (prep. pov. > 35 %)	-13,0 %	-6 %	0,4	6 %	11,6 %
n – prep. pov.	Čas koncentracije	VSE	14,0 %	6,5 %		-6 %	-10,4 %

se depresije znotraj neprepustne površine ne pojavljajo (v nadaljevanju »no depression«). Njun vpliv je odvisen od vrst rabe tal oz. njihove razširjenosti znotraj podpovodja, pri tem pa ima koeficient »no depression« največji vpliv. Rezultati analize občutljivosti za tesna območja so prikazani v preglednici 1.

Pri analizi Manningovega koeficienta hrapavosti v ceveh smo ugotovili, da ta pri spremembi izhodiščne vrednosti 0,015 za 13 % povzroči 8-odstotno spremembo pri maksimalni hitrosti znotraj cevi. Na ostale rezultate pa njegovo spreminjanje nima vpliva.

4.3 Kalibracija in validacija modela

Primerjava simuliranega in merjenega preliivanja na razbremenilniku za padavinski dogodek z dne 23. 4.

2016 je pokazala dobro časovno ujemanje obeh serij, zato kalibracije s ciljem večjega časovnega ujemanja nismo izvajali. Nasprotno pa je bila

potrebna kalibracija modela v odnosu do količine in konice pretoka.

V skladu z analizo občutljivosti in priporočenimi vrednostmi parametrov (SSA) smo v kalibraciji spremenili naslednje parametre:

- zmanjšanje neprepustnih površin za urbana in stanovanjska območja za 5 % ter posledično zmanjšanje njihove krivulje SCS za 3 točke (USDA, 1986),
- zmanjšanje parametra »no depression« za urbana in stanovanjska območja s 50 % na 15 %,
- zmanjšanje parametra »no depression« za ceste z 80 % na 30 % in
- zmanjšanje parametra »no depression« za parke in gozdove z 80 % na 15 %.

Vrednosti kalibriranih parametrov za posamezne vrste rabe tal so prikazane v preglednici 2. S spremembo parametrov smo za padavinski dogodek z dne 23. 4. 2016 dosegli zmanjšanje konice pretoka z začetnih 2,1 m³/s na 1,3 m³/s, pri čemer je merjena konica pretoka znašala 1,05 m³/s. Celotna količina prelivanja pa se je z 8925 m³ zmanjšala na 5010 m³, kar je še vedno 2,75-krat več, kot je merjena prostornina pretoka pri 1820 m³ (slika 6).

Preglednica 2: Kalibrirani parametri za vrste rabe tal.

Table 2: Calibrated land use type parameters.

Raba tal:	Urbana območja	Stanovanjska območja	Ceste	Parki	Gozd
Št. krivulje SCS (tip zemljine A)	86	74	98	39	36
NEPREPUSTNE POVRŠINE					
Območje [%]	80 %	60 %	95 %	10 %	5 %
Manningov koef. hrapavosti	0,15	0,15	0,015	0,015	0,015
»no depression« [%]	15	15	30	15	15
Globina depresij [mm]	2,5	2,5	1,5	2,5	2,5
PREPUSTNE POVRŠINE					
Globina depresij [mm]	5	5	5	5	7,5
Manningov koef. hrapavosti	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8

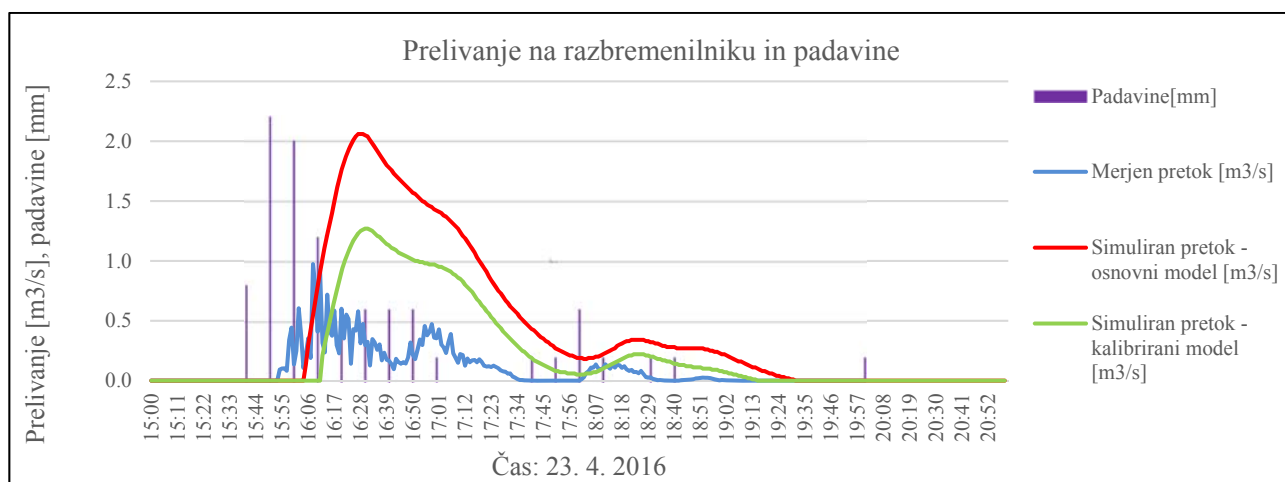
Validacija modela na padavinski dogodek z dne 21. 4. 2016 je pokazala, da model presega prostornino merjenega pretoka (7640 m³) za 158 % (19.740 m³). Kljub velikemu odstopanju bi bilo to brez kalibracije večje za 270 % (28.300 m³). Validacija modela na padavinski dogodek z dne 9. 5. 2016 je pokazala, da model presega prostornino merjenega pretoka (2000 m³) za 35 % (2780 m³). Kljub velikemu odstopanju bi bilo to brez kalibracije večje za 175 % (5533 m³) (slika 7).

Kalibracijo lahko na podlagi navedenih vrednosti ocenjujemo kot neustrezno ali kot poizkus kalibracije, kar utemeljujemo z zahtevnimi oziroma neregularnimi pogoji na merilnem mestu za meritve pretokov na razbremenilniku. Ocenjujemo, da model vendarle odraža stanje, ki omogoča izvedbo samega namena raziskave – primerjalno analizo izvedbe različnih ukrepov SUDS.

4.4 Scenariji

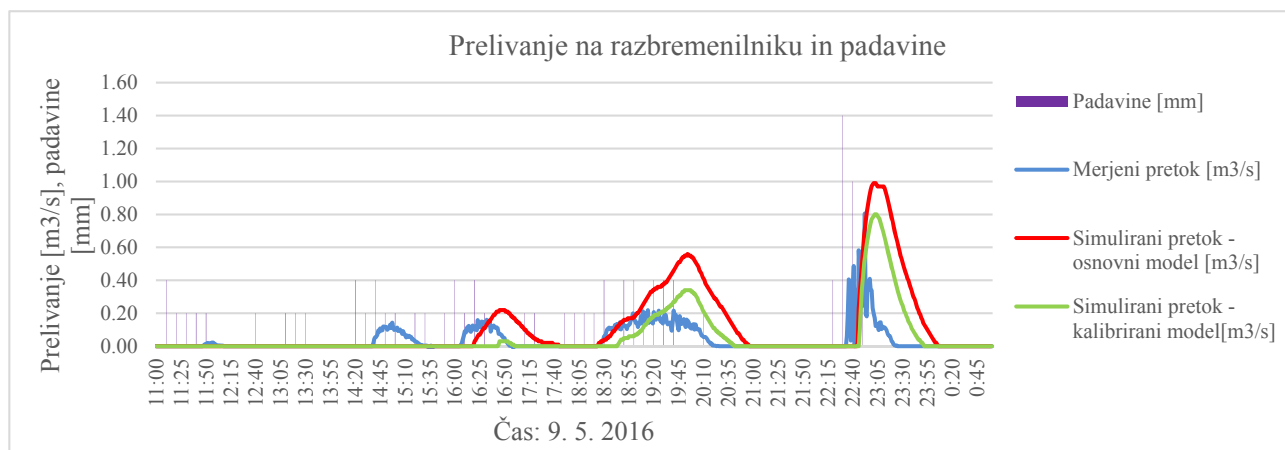
SC0: »trenutno stanje«

Ta scenarij predstavlja trenutno stanje na povodju in služi kot primerjava za učinkovitost ostalih scenarijev. Zajema 198 podpovodij s skupno površino 2,7 km². Podpovodja si po deležu zastopanosti po površini sledijo tako: stanovanjska (43,4 %), urbana (34,1 %), parki (12,6 %), gozdovi (5,4 %) in ceste (4,5 %).



Slika 6: Prelihanje na razbremenilniku: merjeno in simulirano (osnovni in kalibrirani model) s padavinami: 23. 4. 2016.

Figure 6: Overflow at the CSO: measured and simulated (initial and calibrated model) with precipitation: 23 April 2016.



Slika 7: Prelihanje na razbremenilniku: merjeno in simulirano (osnovni in kalibrirani model) s padavinami: 9. 5. 2016.

Figure 7: Overflow at the CSO: measured and simulated (initial and calibrated model) with precipitation: 9 May 2016.

SC1: »infiltracijske kotanje«

Primerjava postopka za načrtovanje infiltracijskih kotanj na testnem območju po postopku CIRIA in standardu DWA-A 138E je pokazala, da oba vodita do primerljivih rezultatov. V nadaljevanju smo za načrtovanje infiltracijskih kotanj in infiltracijskih jarkov uporabili postopek CIRIA, kasneje pa so nam izračunane dimenzije služile kot orientacijske vrednosti pri njihovi uporabi v modelu. Globino infiltracijskih kotanj smo izračunali na podlagi površine prispevnih območij in proste površine za izvedbo. V izračunih smo za infiltracijske kotanje in infiltracijske jarke uporabili stopnjo infiltracije

130 mm/h, faktor varnosti 2 in poroznost uporabljenega materiala (gramoz) 0,4. Predvideli smo 13 infiltracijskih kotanj, katerih globina se giblje med 2–3 m, njihova skupna površina znaša 36.550 m², skupna prostornina pa 83.500 m³. Na sliki 8 so te označene s Stor-01 do Stor-13, drenirana podpovodja pa obarvana s svetlo modro barvo.

SC2: »infiltracijski jarki«

Globino infiltracijskih jarkov smo izračunali na podlagi površine prispevnih območij in proste

površine za izvedbo. Predvideli smo 4 infiltracijske jarke, katerih globina se giblje med 3–4 m, njihova skupna površina znaša 5940 m², skupna prostornina pa 16.055 m³. Na sliki 8 so ti označeni s Stor-14 do Stor-17, drenirana podpovodja pa obarvana s svetlomodro.

SC3: »zeleni strehe«

Zelene strehe smo predvideli za 23 urbanih podpovodij in 3 stanovanjska podpovodja. Njihova skupna površina znaša 115.380 m², skupna prostornina pa 577 m³. Ukrep uvedbe zelenih streh je močno odvisen od samega načina izvedbe obstoječih streh, zato smo za ta ukrep, glede na stanje v Gironi, predvideli precej omejene učinke. Na sliki 8 so označene z rumeno šrafuro.

SC4: »kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov (SC1, SC2)«

Ta scenarij ugotavlja obstoj sinergijskega učinka med infiltracijskimi kotanjami in jarki. Skupno 106 podpovodij je odvajalo površinski odtok v 13 infiltracijskih kotanj in 4 infiltracijske jarke.

SC5: »kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov ter zelenih streh (SC1, SC2, SC3)«

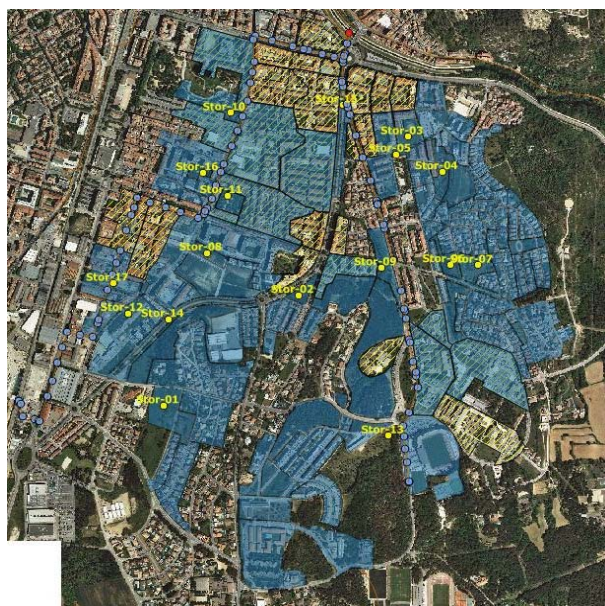
Tako kot prejšnji scenarij je bil tudi ta namenjen ugotavljanju sinergijskih učinkov med posameznimi ukrepi. V skupno 123 podpovodjih je bil izveden eden od ukrepov.

4.5 Povzetek rezultatov

Preglednica 3 povzema rezultate simulacij za vse scenarije in padavinske dogodke. V stolpcu SC0 so predstavljene količine simuliranega pretoka za izhodiščni scenarij. Zmanjšanje preliivanja za ostale scenarije je izračunano glede na te vrednosti. Na dnu preglednice 3 je prikazano povprečno zmanjšanje preliivanja za vsak scenarij.

Zaradi različnega obsega izvedbe posameznega scenarija je bila njihova učinkovitost zmanjševanja preliivanja ocenjena s kriterijem: »Povprečno zmanjšanje preliivanja na 1000 enot izvedenega ukrepa [%] (preglednica 4). S povprečnim

zmanjšanjem preliivanja na razbremenilniku za 0,58 % na 1000 enot izvedenega ukrepa je kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov najbolj učinkovita. Sledita jim singularna scenarija z enim ukrepom, infiltracijske kotanje z zmanjšanjem za 0,54 % in infiltracijski jarki z zmanjšanjem za 0,52 %. Najmanjše zmanjšanje razbremenjevanja ponudijo zelene strehe pri 0,04 %, posledično tudi scenarij, ki je kombinacija vseh treh ukrepov, zmanjša razbremenjevanje le za 0,28 %.



Slika 8: Prikaz SC5 – kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov ter zelenih streh z njihovimi prispevnimi podpovodji.

Figure 8: Presentation of SC5 – combination of infiltration basins and trenches, green roofs, and their associated subbasins.

Po naši študiji je za obravnavano območje najbolj primeren ukrep kombinacija infiltracijskih kotanj in jarkov, s povprečnim zmanjšanjem preliivanja na razbremenilniku za 57 %.

5. Razprava in zaključki

Članek prikazuje uporabo orodij in postopkov, s katerimi lahko SUDS-e uporabimo kot dopolnjujoči ukrep ob tradicionalnem pristopu k odvajanju padavinskih voda v naseljih, ter oceno njihove učinkovitosti. Ukrepe smo prikazali za urbano povodje dela mesta Girona v Španiji z namenom zmanjšanja preliivanja mešanih kanalizacijskih voda prek razbremenilnika.

Preglednica 3: Zmanjšanje prelivanja za vse scenarije in simulirane padavinske dogodke.

Table 3: Overflow reduction for all scenarios and simulated rain events.

PADAVINSKI DOGODEK			SCENARIJ					
Trajanje	Povratna doba [leta]	Intenziteta padavin [mm/h]	SC0 [m ³]	SC1	SC2	SC3	SC4: SC1 + SC2	SC5: SC1 + SC2 + SC3
15 MIN	2	61	13.300	58 %	15 %	8 %	69 %	73 %
	5	85	13.375	47 %	9 %	6 %	60 %	64 %
	10	102	18.740	37 %	7 %	6 %	52 %	57 %
1 URA	2	31	28.961	49 %	7 %	5 %	61 %	65 %
	5	46	35.446	31 %	5 %	3 %	44 %	46 %
	10	56	37.847	24 %	3 %	3 %	36 %	36 %
6 UR	2	10	73.098	60 %	14 %	5 %	71 %	71 %
	5	15	125.071	55 %	11 %	3 %	65 %	65 %
	10	19	151.729	47 %	4 %	2 %	58 %	58 %
Povprečje:				45 %	8 %	5 %	57 %	59 %

Preglednica 4: Ovrednotenje učinkovitosti posameznega scenarija v odnosu do števila izvedenih enot.

Table 4: Evaluation of scenario effectiveness in relation to the number of implemented units.

	Površina [m ²]	Št. enot [m ³ oz. m ²]	Povprečno zmanjšanje prelivanja [%]	Povprečno zmanjšanje prelivanja na 1000 enot izvedenega ukrepa [%]
SC1: INFIL. KOTANJE	36.550	83.500	45	0,54
SC2: INFIL. JARKI	5930	16.055	8	0,52
SC3: ZELENE STREHE	115.380	115.380	5	0,04
SC4: SC1 + SC2	42.480	99.555	57	0,58
SC5: SC1 + SC2 + SC3	157.860	214.935	59	0,28

Ta raziskava obravnavana dve metodologiji za načrtovanje SUDS-ov, priročnik CIRIA in standard DWA-A 138E. Obe metodi sta ponudili podobne rezultate in potrdili svojo primernost za načrtovanje SUDS-ov.

Metodologija dela, ki jo vzpostavi ta raziskava, temelji na modeliranju urbanega povodja in vključuje: zbiranje podatkov, vzpostavitev modela, načrtovanje SUDS-ov ter njihovo implementacijo v model, simuliranje scenarijev, ki vključujejo različne ukrepe SUDS-ov in ovrednotenje njihove učinkovitosti v razmerju do izhodiščnega scenarija. Dobre meritve kanalizacijskega sistema so osnova dobrega modela, saj nam služijo za njegovo kalibracijo, ki je ključni korak do modela, ki bo nudil zanesljive rezultate. Da bi zapolnili vrzel med obstoječimi in potrebnimi podatki, smo izvedli

meritve infiltracije na več lokacijah znotraj povodja in tudi meritve prelivanja mešanih komunalnih voda na razbremenilniku, čemur smo za potrditev časovne pravilnosti meritev dodali meritve temperaturnih senzorjev. Čeprav smo s temperaturnimi senzorji lahko potrdili pravilno delovanje merilnika pretoka, saj so čas razbremenjevanja zaznali sočasno, je z meritvami količin pretoka še vedno povezanih kar nekaj negotovosti. Zato smo te meritve uporabili zgolj kot orientacijske vrednosti in ne kot natančne vrednosti, ki bi jih uporabili za kalibracijo modela. Ker nimamo natančnih meritev, imajo simulacije modela nižjo stopnjo zaupanja. Kljub temu so simulirani pretoki na razbremenilniku pravilno kvalitativno sledili padavinskemu dogodku in času razbremenjevanja, kar je omogočilo ustrezno oceno

uspešnosti SUDS-ov pri zadrževanju površinskega odtoka. Tako je model služil za preliminarno oceno ustreznosti SUDS-ov.

S to raziskavo smo naslovlili predvsem hidravlični vidik urbane odvodnje, ki gre z roko v roki z vidiki kakovosti vode (čiščenje površinskega odtoka, prelivanje mešane komunalne vode v odvodnik, ustrezno redčenje). Teh vidikov zaradi obsežnosti področja nismo posebej naslavljali, vendar bi bilo to ključno za celovit pristop.

Ugotovili smo, da so SUDS-i primerna rešitev, ki lahko pomaga preprečiti in zmanjšati površinski odtok in posledično prelivanja iz mešanega kanalizacijskega sistema prek razbremenilnika v odvodnik. V obstoječih naseljih z mešano kanalizacijo bi morali biti vključeni kot dopolnjujoči ukrep, ki zmanjša količino razbremenjene vode v odvodnik. V primeru novih naselij pa bi morali SUDS-e uporabljati kot del ločenega kanalizacijskega sistema in tako ponuditi smiselno alternativo tradicionalnim pristopom upravljanja padavinskih voda.

Članek prikazuje sistemsko ustrezen pristop k analizi obstoječega stanja, z vidika analize scenarijev možnih ukrepov trajnostnih sistemov za odvajanje padavinskih voda z urbanih površin. Kot smo prikazali, so bili pristopi in ukrepi, s katerimi se trajnostna urbana odvodnja izvaja, opredeljeni že pred več desetletji, zato želimo, da do njihove systemske uveljavitve ne bi preteklo še nekaj novih desetletij.

Zahvala

Zahvaljujemo se dr. Lluísu Corominasu Tabaresu in Raimonu Canalu z instituta ICRA za izvajanje meritev na razbremenilniku.

Raziskava je bila izdelana v okviru projekta Reucity, projektna številka TECSPR14-1-0013, in sofinancirana v okviru delovnega programa »Ljudje« (dejavnosti Marie Curie) sedmega okvirnega programa Evropske unije (FP7/2007-2013), sporazum o dodelitvi nepovratnih sredstev št. 600388 (program TECNIOspring), in agencije Agency for Business Competitiveness of the Government of Catalonia, ACCIÓ.

Viri

AEMET (2003). Curvas de intensidad – duración-frecuencia [Archivo de ordenador]: Estructura temporal de la precipitación. Agencia Estatal Meteorología, Madrid (v španščini).

Ajuntament de Girona (2015). Tanc anti-descarregues del sistema unitari de sanejament, vora la placa Paisos Catalans i canalització de la riera Gornau find el riu Onyar. Ajuntament de Girona, Girona (v španščini).

ATV-A 128E (1992). Standards for the Dimensioning and Design of Stormwater Structures in Combined Sewers. German Association for the water environment, 65 str.

Autixier, L., Mailhot, A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A. S., Galarnau, M., Prévost, M. and Dorner, S. (2014). Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer overflows in sources of drinking water. *Science of the Total Environment* **499**, 238–247.

Autodesk (2015). Storm and Sanitary Analysis 2016 User's guide. Mill Valley, Autodesk Inc.: 526 str.

Chow, J. F., Savić, D., Fortune, D., Kapelan, Z., Mebrate, N. (2014). Using a systematic, multi-criteria decision support framework to evaluate sustainable drainage designs. *Procedia Engineering* **70**, 0: 343–352.

Cipolla, S. S., Maglionico, M. and Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering* **95**, 876–887.

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

CREAF (2009). Land Cover Map of Catalonia. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestal, Barcelona. <http://www.creaf.uab.es/mcsc/usa/index.htm> (pridobljeno 12. 1. 2016).

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.

Eijkelkamp Company (2015). Double ring infiltrometer – operating instructions : 9. str. https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=M109_04e_Ringinfiltrrometer_776f.pdf (pridobljeno: 10. 1. 2016).

Evropski parlament (2000). Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike. Uradni list evropskih skupnosti L327, 22/12/2000: 1–73.

<http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj> (pridobljeno: 12. 10. 2016).

Fornes, M. T. (2015). Anàlisi cost-benefici per la implementació de Sistemes Urbans de Drenatge Sostenible (SUDS) al municipi de La Garriga. Girona. Unpublished Bachelor Thesis, University of Girona, 35 str. (v španščini).

HACH (2014). Sigma 950 User Manual, Edition 3., Hach Company, Loveland.

Onset Computer Corporation (2009). HOB0® Pendant Temperature/Light Data Logger Manual, MAN-UA-002. http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/9556-L%20MAN-UA-002.pdf (pridobljeno: 16. 5. 2016).

Svet Evropske unije (1991). Direktiva Sveta z dne 21. maja 1991 o čiščenju komunalne odpadne vode. Uradni list evropskih skupnosti L135/40, 30/05/1991.

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:31991L0271>

(pridobljeno: 4. 9. 2016).

Štajdohar, M. (2016). Vpliv sonaravnih ukrepov na hidrogram odtoka z urbaniziranega prispevnega območja, *Acta hydrotechnica* **29(51)**, 145–162. (in Slovenian)

http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH/acta_articles/a29ms2.htm (pridobljeno 27. 9. 2017).

Uredba o odvajanju in čiščenju komunalne odpadne vode (2015). Uradni list RS, št. 98, 3842.

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