

UDK/UDC: 551.583:556.164"405"

Prejeto/Received: 03.01.2024

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 23.02.2024

DOI: [10.15292/acta.hydro.2023.07](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2023.07)

Objavljeno na spletu/Published online: 25.03.2024

ANALIZA VPLIVA ZELENE INFRASTRUKTURE NA POVRŠINSKI ODTOK Z URBANEGA OBMOČJA

ANALYSIS OF THE IMPACT OF GREEN INFRASTRUCTURE ON SURFACE RUNOFF FROM AN URBAN AREA

Urban Vozelj¹, Mojca Šraj¹, Nejc Bezak^{1,*}

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

Izvleček

Sedanji načini gradnje in izrazito povečevanje urbanizacije prispevajo k velikemu deležu neprepustnih površin. Takšne površine zmanjšujejo infiltracijo padavin v tla, kar vodi k večjim površinskim odtokom, ki imajo lahko negativne posledice z vidika poplavne varnosti. Z vpeljavo zelene in hibridne infrastrukture poskušamo izboljšati značilnosti urbanih površin z vidika povečanja infiltracije padavinske vode. V raziskavi smo obravnavali večje industrijsko območje Rudnik v Ljubljani. Na podlagi podatkov o značilnostih padavin in lastnosti tal smo izračunali površinski odtok za trenutno stanje in stanje po vpeljavi izboljšav, pri čemer smo kot ukrepe upoštevali zelene strehe, zasaditev dreves in porozne talne površine. Na podlagi analize podatkov, meritev in izračunov smo ugotovili, da zelena infrastruktura pozitivno prispeva k zmanjšanju površinskega odtoka na urbanih površinah. Na letnem nivoju so bile razlike do 20 %, na nivoju večjega nevihtnega padavinskega dogodka pa do 10 % v primerjavi s stanjem brez izboljšav. Z vidika površinskega odtoka smo kot najboljšo rešitev prepoznali vpeljavo poroznih talnih površin, pri čemer so bile razlike med izbrano infrastrukturo relativno majhne. S finančnega vidika se je kot najboljša rešitev izkazala zasaditev dreves, saj ta lahko zagotavljajo podobno zmanjševanje površinskega odtoka kot zelene strehe in porozne talne površine, pri tem pa so stroški izgradnje in vzdrževanja manjši.

Ključne besede: padavine, infiltracija, površinski odtok, hibridna infrastruktura, zelena infrastruktura, podnebne spremembe.

Abstract

Current construction methods and the marked increase in urbanisation are contributing to a high proportion of impermeable surfaces in built areas. Such surfaces reduce the infiltration of rainfall into the ground, which in turn leads to high amounts of surface runoff, which can have negative consequences in terms of flood safety. The introduction of green and hybrid infrastructure seeks to improve the characteristics of urban areas in terms of increasing the infiltration of rainwater and reducing stormwater runoff. In this study, we considered the larger industrial area of Rudnik in Ljubljana. Based on data on rainfall characteristics and soil properties, we calculated the surface runoff for the current situation and the situation when the improvements were

¹ Stik / Correspondence: nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

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

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

introduced, where we took into account green roofs, tree planting and porous ground surfaces. Having analyzed the data, measurements, and calculations, we found that green infrastructure contributed positively to the reduction of surface runoff in urban areas, with differences of up to 20% at the annual level and up to 10% at the storm event level compared to the situation without improvements. In terms of surface runoff, the use of porous ground surfaces was identified as the best solution, with relatively small differences between the selected measures. From a financial point of view, tree planting was identified as the best solution, as trees can provide similar surface runoff reduction as green roofs and porous surfaces, with lower construction and maintenance costs.

Keywords: precipitation, infiltration, runoff, hybrid infrastructure, green infrastructure, climate changes.

1. Uvod

Podnebne spremembe vplivajo na pogostost, magnitudo in sezonskost različnih naravnih nesreč, kot so poplave, suše, plazovi, drobirski tokovi in procesi erozije tal (IPCC, 2019). Ker naravne nesreče močno vplivajo na infrastrukturo, človeška življenja in okolje ter povzročajo veliko socialno in gospodarsko škodo (npr. 4,8 milijardo USD škode v obdobju 1980–2018 na svetovni ravni), je jasno, da morajo biti prilagoditveni ukrepi namenjeni spopadanju s spreminjajočim se podnebjem (Debele et al., 2019; Keesstra et al., 2018; Munich Re-NatCatSERVICE, 2019). Za spopadanje s spremenjenim pojavljanjem in značilnostmi naravnih nesreč bo treba izvajati različne vrste ukrepov, vključno z zeleno, modro, hibridno in sivo infrastrukturo (Alves et al., 2020). Načini gradnje z uporabo sive infrastrukture in povečevanjem urbanizacije lahko zmanjšujejo infiltracijo padavin v tla, kar posledično vodi k velikim površinskim odtokom, ki imajo lahko negativne posledice z vidika poplavne ogroženosti (Rosenzweig et al., 2018; Zhang et al., 2021). Če infrastruktura, katere naloga je odvajanje vode, ni ustrezno dimenzionirana na določeno vrednost povratne dobe glede na smernice (npr. SIST EN 752:2017), lahko pride do zapolnitve kapacitet in posledično pojavljanja poplav. Z vpeljavo modre, zelene in hibridne infrastrukture poskušamo izboljšati značilnosti urbanih površin z vidika povečanja infiltracije padavinske vode in z zmanjševanjem površinskega odtoka (Alves et al., 2020; Nakamura, 2022). Modro-zelena infrastrukturo lahko opredelimo kot naravne in delno naravne decentralizirane sisteme, namenjene upravljanju padavinskih voda v mestih, ki hkrati opravljajo širok nabor ekosistemskih storitev, osnovni namen

te infrastrukture pa je posnemanje naravnih procesov (Radinja et al., 2021). Po drugi strani lahko sivo infrastrukturo razumemo kot klasične gradbene ukrepe (Kryžanowski et al., 2014; Sodnik et al., 2023), ki ne opravljajo veliko ekosistemskih storitev. Čeprav je njihova uporaba trenutno v ospredju, zgolj zeleni ukrepi oziroma infrastruktura pogosto ne morejo zadostovati za obvladovanje napovedane podnebne nevarnosti (Bezák et al., 2021; Johnen et al., 2020; Kabisch et al., 2017; Zabret in Šraj, 2019, 2015). Zato se zdi, da so hibridne rešitve, ki združujejo elemente zelene in sive infrastrukture, privlačna možnost za prilagajanje podnebnim spremembam (Štajdohar et al., 2016). Hibridna infrastruktura je tako definirana kot kombinacija sive in zelene infrastrukture (Nakamura, 2022; Sutton-Grier et al., 2015). Nakamura (2022) hibridno infrastrukturo definira kot kombinacijo zelene infrastrukture v zaledju porečja in klasične inženirske (sive) infrastrukture na kritičnih lokacijah. Anderson et al. (2022) hibridno infrastrukturo definirajo kot kombinacijo sive in zelene infrastrukture oziroma posameznih gradbenih elementov. Podobne definicije so podali tudi drugi avtorji (Sutton-Grier et al., 2015). Treba je poudariti, da se v strokovni literaturi različni ukrepi pogosto označujejo kot zelena infrastruktura oziroma kot na naravi temelječe rešitve (angl. nature-based solutions (NBS)) (Schanze, 2017). Namen raziskave je ugotoviti vpliv izbrane infrastrukture na količino površinskega odtoka z območja neprepustnih površin v mestu Ljubljana in ovrednotiti razlike med izbrano infrastrukturo.

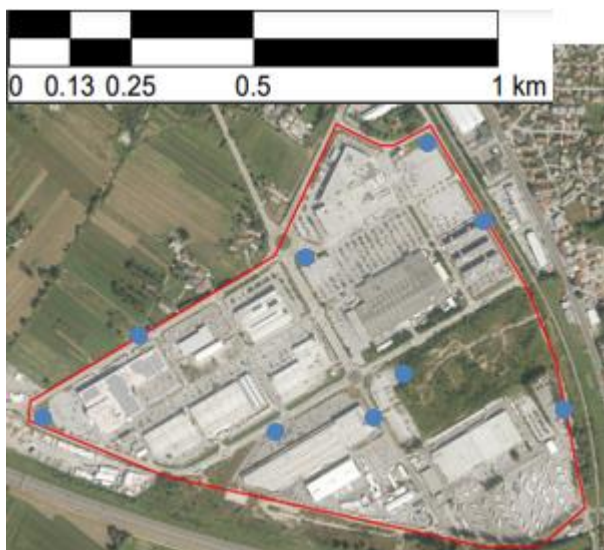
2. Metode in podatki

2.1 Testno območje

V sklopu izvedenih analiz je bilo izbrano testno območje industrijske cone Rudnik v Ljubljani. Območje je v osrednji Sloveniji, na jugovzhodnem delu Ljubljane. Meje območja so predstavljale ceste oziroma ulice (slika 1):

- Bettetova cesta,
- Premrlova ulica,
- Jurčkova cesta,
- Cvetkova ulica,
- Ukmarjeva ulica,
- Lorenzova cesta.

Površina območja znaša približno 600.000 m². Skupnih neprepustnih površin glede na ortofoto posnetek in terenski ogled na območju je 468.000 m², skupnih naravnih površin je 132.000 m². Neprepustne površine sestavljajo: ravne strehe (155.000 m²), parkirišča (197.000 m²), ceste (61.000 m²), dovozi (38.000 m²), pločniki (17.000 m²). Naravne površine sestavljajo: urejeni travniki (42.000 m²), naravno odprto območje (90.000 m²). Kot izhodišče smo uporabili ortofoto posnetek iz leta 2018, saj v času izdelave raziskave ni bilo na voljo novejših in dovolj kakovostnih ortofoto posnetkov območja (Vozelj, 2023). Območje se je od leta 2018 do 2024 delno spremenilo.



Slika 1: Meje izbranega območja na ortofoto posnetku. Modre točke označujejo lokacije meritev z mini disk infiltrometrom.

Figure 1: Boundaries of the selected area on an orthophoto image; Blue points indicate locations of measurements using mini disk infiltrometer.

2.2 Izračun površinskega odtoka

Za izračun površinskega odtoka z izbranega območja smo uporabili spletno orodje Green Value Calculator (CNT, 2024), ki omogoča izračun vpliva izbrane zelene in hibridne infrastrukture na površinski odtok z izbranega območja. Za izračun učinkovitih padavin program uporablja metodo padavinskih izgub Soil Conservation Service (SCS) (Banasik et al., 2014; Bezak et al., 2022; Šraj et al., 2010; Zema et al., 2017). Gre za relativno preprosto metodo, ki omogoča oceno razmerja med padlimi in učinkovitimi padavinami na podlagi parametra Curve Number (CN) (Banasik et al., 2014). Parameter CN lahko ocenimo na podlagi podatkov o rabi in tipu tal. Raba tal izbranega območja je bila določena glede na ortofoto posnetek območja (slika 1).

Za določitev tipa tal je bilo v sklopu raziskave izvedenih več meritev infiltracijske sposobnosti z uporabo mini disk infiltrometra (Decagon Devices) (Vozelj, 2023). Za izračun koeficienta hidravlične prevodnosti je bila uporabljena metoda Zhanga, ki jo predlaga tudi proizvajalec (Decagon Devices) mini disk infiltrometra, ki je bil uporabljen v raziskavi (Radinja et al., 2019; Vozelj, 2023).

2.3 Padavine

Programsko orodje Green Value Calculator (CNT, 2024) kot vhodni podatek uporabi naslednje spremenljivke: letna količina padavin, število deževnih dni v letu, povprečna količina padavin v deževnem dnevu, spremenljivost v deževnih dneh ter količina padavin v t. i. nevihtnem padavinskem dogodku, ki predstavlja 99,1-percentilni padavinski dogodek (t. i. nevihtni padavinski dogodek) (CNT, 2024). Za določitev teh spremenljivk so bili uporabljeni podatki z meteorološke postaje Ljubljana - Bežigrad za obdobje 1982–2022 (ARSO, 2024). Celotno obravnavano obdobje je bilo razdeljeno na naslednja krajša obdobja: 1982–1991, 1992–2001, 2002–2011 in 2012–2022.

Dodatno smo v analizah upoštevali tudi vpliv podnebnih sprememb, in sicer smo kot vhodni podatek uporabili podatke o padavinah, ki jih je pripravila Agencija RS za okolje v okviru projekta Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja (Bertalanich et al., 2018). Uporabili smo

podatke o padavinah za tri scenarije RCP (RCP2.6; RCP4.5 in RCP8.5) ter skupno za 14 različnih podnebnih modelov. Celotno obdobje obravnavanih scenarijev smo razdelili v tri obdobja: 1981–2020 (preteklo obdobje), 2021–2060 (bližnja prihodnost) in 2061–2100 (daljna prihodnost). Za vsak RCP smo glede na razpoložljive modele izračunali mediane spremenljivk, ki jih orodje Green Value Calculator uporablja kot vhodni podatek (Vozelj, 2023). Za določitev količine padavin za vse dni (uporabljeni so bili dnevni podatki) je bila uporabljena lokacija izbranega testnega območja.

2.4 Infrastruktura in scenariji

Izračun površinskega odtoka smo najprej izvedli z upoštevanjem dejanske rabe tal (trenutno stanje), ki je bila določena glede na ortofoto posnetek. Spletno orodje Green Value Calculator za vsako vrste rabe tal predvideva stroške gradnje in letne stroške vzdrževanja ter tipično življenjsko dobo posamezne infrastrukture (CNT, 2024). Na primer v primeru ravnih streh je predvideni strošek gradnje približno 40 EUR na m², stroški vzdrževanja so približno 1,4 EUR na m², življenjska doba je 20 let. Pri izračunih je upoštevan 3,1 % t. i. discount rate in življenjska doba 30 let (CNT, 2024). Podobno so tudi v primeru zelenih in hibridnih izboljšav predvideni stroški gradnje, vzdrževanja in tipične življenjske dobe. Dodatno smo analizirali vpliv treh scenarijev:

- uporaba zelenih streh (strošek gradnje približno 120 EUR/m², strošek vzdrževanja približno 7,5 EUR/m² in življenjska doba 40 let) na dveh objektih (slika 2),
- dodatna zasaditev dreves (strošek drevesa približno 250 EUR, strošek vzdrževanja približno 180 EUR in življenjska doba 80 let) na izbranih parkiriščih (slika 3),
- uporaba poroznih talnih površin (strošek gradnje približno 87 EUR/m², strošek vzdrževanja približno 2 EUR/m² in življenjska doba 30 let) na izbranih parkiriščih (slika 4).

V vseh treh primerih so bile uporabljene privzete vrednosti karakteristik (npr. velikost krošenj dreves, debelina zelene strehe, poroznost talnih površin, itd.) zelenih in hibridnih izboljšav. Enako velja tudi za infrastrukturo, ki je bila določena glede na

trenutno stanje. Pri zelenih strehah so kot koristi upoštevane: zmanjšanje energije, napajanje podtalnice in zmanjšanje zdravstvenih stroškov. Pri zasaditvi dreves so kot dodatne koristi upoštevane: zmanjšanje energije, zmanjšanje onesnaženja zraka, zmanjšanje CO₂, kompenzacijska vrednost, napajanje podtalnice in zmanjšanje zdravstvenih stroškov. Pri poroznih talnih površinah so kot dodatne koristi upoštevane: napajanje podtalnice in zmanjševanje zdravstvenih stroškov. Natančna razlaga izračuna posameznih koristi je podana v sklopu spletnega orodja Green Value Calculator (CNT, 2024).



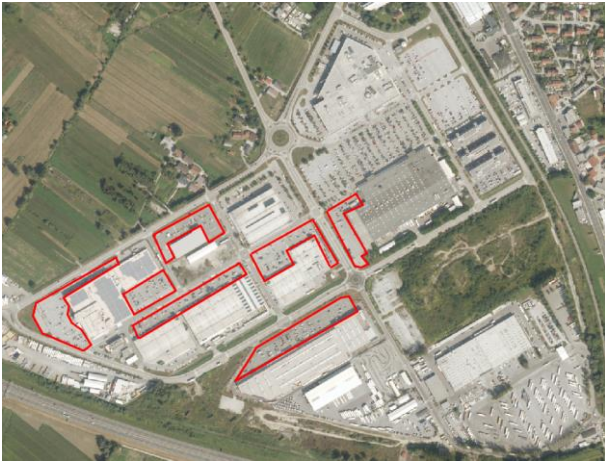
Slika 2: Stavbe določene za vpeljavo zelenih streh.

Figure 2: Buildings selected for the green roofs.



Slika 3: Območje, kjer je načrtovana dodatna zasaditev 2000 dreves.

Figure 3: Area where additional tree planting is planned (2000 trees).



Slika 4: Območje, kjer so načrtovane porozne talne površine.

Figure 4: Area where porous floor surfaces are planned.

Zelene strehe so del tehnologije zelene gradnje in predstavljajo ozelenjeno plast ravne ali poševne strehe. Rastline so v zeleni strehi zasajene v medij, ki jim omogoča rast in se nahaja nad vodotesno membrano (CNT, 2024). Glavna naloga zelenih streh je opravljanje procesov zadrževanja vode in evapotranspiracije. Tako je zmanjšan površinski odtok z območja, to pa zmanjšuje obremenitev kanalizacijskih sistemov. Za postavitev zelenih streh potrebujemo določeno znanje (tehnologijo), vizualno prevlada zeleni vidik. Hkrati zelene strehe zagotavljajo dodatne koristi, kot so čiščenje zraka, manjša temperaturna nihanja ali bolj estetski videz (v primerjavi z običajnimi strehami) (CNT, 2024; Haowen et al., 2020). Tudi nekateri predpisi, kot je na primer Odlok o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana (Uradni list RS, št. 59/2022 z dne 3. 5. 2022), predpisujejo, da morajo imeti novi objekti s površino strehe več kot 400 m² vsaj 75 % neto površine strehe (in ne manj kot 400 m²) pokrite z zeleno streho. Pri tem so izvzeti primeri, ko zaradi statične stabilnosti objekta to ne bi bilo mogoče (v primeru rekonstrukcij ali prizidav).

Drevesa v urbanem in delno urbanem okolju zagotavljajo številne ekosistemske storitve, ki zagotavljajo okoljske in ekonomske prednosti (CNT, 2024). Drevesa s krošnjami prestrezajo padavinsko vodo. Prestrežene padavine se lahko na takšen način delno infiltrirajo in ne tvorijo površinskega odtoka (Zabret and Šraj, 2019, 2015).

Poleg tega tla, v katera so drevesa zasajena, upočasnjujejo in omogočajo infiltracijo vodi, ki že tvori površinski odtok, če je zasaditev ustrezna. Drevesa zagotavljajo tudi številne dodatne koristi, kot so lokalno zmanjševanje temperature zraka, zmanjševanje onesnaženosti zraka (CNT, 2024). Drevesa so lahko prisotna kot individualni elementi, kot urbani parki ali kot urbani gozdovi (Kermavnar and Vilhar, 2017). Sajenje dreves sicer zahteva določeno gradbeno mehanizacijo, a postavitev (sajenje) je manj zahtevna v primerjavi z zelenimi strehami. Izbrana gostota dreves v primeru dodatne zasaditve (400 dreves na ha) presega smernice glede števila dreves na določenih gradbenih parcelah, ki so podane v sklopu Odloka o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana (Uradni list RS, št. 59/2022 z dne 3. 5. 2022). Večja gostota je bila izbrana, ker bi manjša gostota (npr. 20 dreves na ha) imela minimalen učinek na izračun površinskega odtoka.

Porozne talne površine so oblika infrastrukture, ki klasično talno površino iz asfalta ali betona nadomesti z materiali, ki omogočajo infiltriranje vode skozi površino (Bezak et al., 2021; CNT, 2024). Materiali pri tem ohranjajo vse ostale značilnosti klasičnih talnih površin. Prostori med posameznimi gradniki so lahko različno veliki, glede na specifične razmere posameznega območja. To daje poroznim talnim površinam možnost uporabnosti v veliko različnih razmerah. Vse porozne talne površine imajo bazo iz agregata, ki omogoča strukturno stabilnost, prispeva prostor za zadrževanje vode in ob tem delno odstranjuje tudi onesnaževala v površinskem odtoku (CNT, 2024). V večini primerov prevladuje siv izgled, čeprav imajo nekatere rešitve lahko tudi dele, ki so zatravljeni (CNT, 2024; Vozelj, 2023).

Preglednica 1: Pregled izbrane infrastrukture.

Table 1: Overview of the selected measures.

Infrastruktura	Površina [m ²]
Zelena streha	42.000
Zasaditev dreves (2000)	50.000
Porozne površine	50.000

3. Rezultati in razprava

3.1 Analiza padavin

Iz merjenih podatkov lahko ugotovimo, da je bilo na meteorološki postaji Ljubljana - Bežigrad največ padavin v obdobju med 2012 in 2022 (preglednica 2). V tem obdobju je bila v povprečju dosežena največja letna količina padavin (preglednica 2). Poleg tega so bile v obdobju med 2012 in 2022 padavine najbolj intenzivne, saj v tem obdobju v

povprečju ni bilo največjega števila deževnih dni na leto, količina dežja pa je bila največja (preglednica 2). Poudariti je treba, da so razlike med posameznimi obdobji majhne. Posledično na podlagi rezultatov analiz težko določimo trend, saj se podatki precej razlikujejo. Obdobje 40 let je prekratko, da bi lahko postavili konkretne trditve glede podnebnih sprememb in podobnih vplivov na padavine.

Preglednica 2: Osnovne statistike padavinskih podatkov za obdobje meritev. Prikazane so povprečne vrednosti po obdobjih.

Table 2: Basic rainfall statistics in the measurement period; Average values by period are shown.

Spremenljivka	1982–1991	1992–2001	2002–2011	2012–2022	1982–2022
Povprečne letne padavine [mm]	1330	1367	1351	1413	1365
Povprečno število deževnih dni na leto	148	158	149	152	152
Povprečne padavine na deževni dogodek [mm]	9	9	9	9	9
Nevihtne padavine [mm]	47	49	48	50	48

Preglednica 3: Osnovne statistike padavinskih podatkov za obdobje simulacije vpliva podnebnih sprememb. Prikazane so povprečne vrednosti po obdobjih.

Table 3: Basic rainfall statistics for the climate change simulation period; Average values by period are shown.

RCP	Spremenljivka	1981–2020	2021–2060	2061–2100
2.6	Povprečne letne padavine [mm]	1313	1376	1396
	Povprečno število deževnih dni na leto	185	183	185
	Povprečne padavine na deževni dogodek [mm]	7	7	7
	Nevihtne padavine [mm]	44	46	45
4.5	Povprečne letne padavine [mm]	1323	1364	1427
	Povprečno število deževnih dni na leto	187	183	183
	Povprečne padavine na deževni dogodek [mm]	7	7	8
	Nevihtne padavine [mm]	44	46	48
8.5	Povprečne letne padavine [mm]	1318	1413	1508
	Povprečno število deževnih dni na leto	185	181	177
	Povprečne padavine na deževni dogodek [mm]	7	8	8
	Nevihtne padavine [mm]	44	48	52

Podobno smo analizirali tudi lastnosti padavin na podlagi podnebnih scenarijev (Bertalanič et al., 2018). Modelni izračun RCP2.6 obravnava optimistični scenarij in zato ni opaziti bistvenih razlik med tremi izbranimi obdobji (preteklo obdobje ter dve prihodnji obdobji), glede na simulacije se naj bi nekoliko povečala letna količina padavin (preglednica 3). V primeru scenarija RCP4.5 je prav tako zaznan nekoliko naraščajoči trend letne količine padavin, pri čemer je ta trend nekoliko bolj izrazit kot v primeru RCP2.6 (preglednica 3). Prav tako naj bi se nekoliko povečale količinske vrednosti nevihtnih padavin (preglednica 3). V primeru RCP8.5 je trend povečanja letne količine padavin in nevihtnih padavin še nekoliko bolj izrazit, pri tem pa naj bi se zmanjšalo število deževnih dni na leto (preglednica 3).

3.2 Meritve infiltracije

Metoda SCS, ki je bila uporabljena za izračun padavinskih izgub, za določitev parametra CN potrebuje tudi podatek o tipu tal, ki je bil določen glede na meritve z mini disk infiltrimetrom (Decagon Devices). Meritve infiltracije so bile izvedene 29. 6. 2023 na devetih lokacijah na izbranem območju (slika 1) z uporabo mini disk infiltrimetra M1 z 0,5 cm srka (Vozelj, 2023). Na podlagi izvedenih meritev je bilo ugotovljeno, da je tip tal na testnem območju v večini primerov zaglinjen melj ali podoben, relativno slabo prepusten material, saj so se koeficienti hidravlične prevodnosti gibali okrog 0,0005 cm/s (na večini lokacij) (Vozelj, 2023). Posledično smo tla na testnem območju razvrstili v kategorijo D glede na metodologijo SCS (CNT, 2024; HEC HMS, 2021). Podatek o tipu tal se uporabi za določitev parametrov CN za različne vrste tal, ki se pojavljajo na testnem območju. Vrednosti CN za posamezne rabe tal so podane v okviru spletnega orodja Green Value Calculator (CNT, 2024).

3.3 Površinski odtok za trenutno stanje

V prvem koraku smo izračunali letno vrednost skupnega površinskega odtoka s testnega območja ob upoštevanju padavin za obdobje 1982–2022 in

upoštevanju podatkov o številu padavinskih dogodkov in povprečni količini padavin na padavinski dogodek (preglednica 4). Podobno so bili dodatno narejeni še izračuni za 99-percentilni padavinski dogodek oziroma za nevihtni dogodek (preglednica 4). Opazimo lahko, da je koeficient odtoka za nevihtni padavinski dogodek enak 0,72 (preglednica 4). Pri izračunu letnega odtoka pa spletno orodje (CNT, 2024) predpostavi porazdelitev padavin (glede na vhodne podatke) po dnevih in izračun efektivnih padavin (oziroma površinskega odtoka) naredi za vsak padavinski dogodek posebej. Posledično je koeficient odtoka za dogodke z manjšo količino padavin manjši, saj metoda SCS upošteva, da začetne izgube znašajo 20 % največje možne vrednosti padavinskih izgub. Skupni parameter CN za trenutno stanje je znašal približno 94, kar pomeni, da maksimalno zadrževanja S znaša okrog 17 mm in začetne izgube približno 3,5 mm. Za padavinski dogodek z 10 mm padlih padavin to pomeni, da količina efektivnih padavin znaša približno 1,8 mm. Rezultat tega postopka so relativno nizke vrednosti letnega odtoka za obravnavano območje, ki so glede na dejanske razmere verjetno podcenjene.

Preglednica 4: Površinski odtok za trenutno stanje ob upoštevanju preteklih padavinskih dogodkov tako za letne padavine kot za nevihtni dogodek.

Table 4: Surface runoff for the current situation, taking into account past rainfall events for both the annual rainfall and the storm event.

Padavine	Količina
Letni odtok [mm]	455
Letni odtok [m ³]	272.839
Nevihtni odtok [mm]	32
Nevihtni odtok [m ³]	19.403

3.4 Površinski odtok ob vpeljavi dodatne infrastrukture

V naslednjem koraku smo izračunali površinski odtok tudi z vpeljavo dodatne infrastrukture na testnem območju (preglednica 5). Opazimo lahko,

da vse tri izbrane izboljšave zmanjšajo letni površinski odtok z izbranega območja, in sicer za približno 10–20 % glede na izhodiščno stanje brez izboljšav (preglednica 4). Tudi za nevihtni dogodek izbrana infrastruktura zmanjša površinski odtok, v tem primeru je zmanjšanje manjše in znaša približno 5–10 % glede na stanje brez izboljšav (preglednica 4). Poudariti je treba, da so obravnavani scenariji predvideli postavitev izbrane infrastrukture na približno 10 % celotne površine (preglednica 1). Opazimo lahko, da uvedba dodatne infrastrukture na manj kot 10 % lahko v nekaterih primerih zmanjša letni odtok tudi do 20 %. Vozelj (2023) je analiziral tudi stroške izgradnje in vzdrževanja izbrane infrastrukture ter izračunal tudi dodatne koristi (npr. zmanjšanje CO₂, zmanjšanje zdravstvenih stroškov). Ugotovil je, da so stroški izgradnje poroznih talnih površin največji, sledijo stroški postavitve zelenih streh, medtem ko so stroški zasaditve dreves precej manjši (približno 15 % stroškov v primeru zelene strehe in poroznih površin). Stroški vzdrževanja so najvišji v primeru poroznih površin, sledi vzdrževanje dreves, najbolj ugodno je vzdrževanje zelenih streh (Vozelj, 2023). Zasaditev dreves ima tudi daleč največji potencialni znesek koristi, ki znašajo letno preko 500.000 EUR (Vozelj, 2023). Največji delež med obravnavanimi koristmi prispeva kompenzacijska vrednost, ki zajema povečanje vrednosti območja zaradi zasaditve dodatnih dreves (upoštevana je vrednost približno 275 EUR na drevo). Če se te vrednosti ne upošteva, je vsota vseh ostalih koristi približno 70.000 EUR letno, pri čemer ima največji delež zmanjšanje energije (upoštevana je vrednost približno 35 EUR na drevo, kar naj bi zmanjšalo porabo energije v sosednjih stavbah) (CNT, 2024). Sledijo zelene strehe, kjer so potencialne koristi ovrednotene na približno 80.000 EUR letno. Tudi v tem primeru ima največji delež zmanjšanje energije. V primeru poroznih površin ta znesek znaša približno 5000 EUR letno (Vozelj, 2023). Ob izračunu stroškov izgradnje, vzdrževanja in potencialnih koristi so bile uporabljene predlagane vrednosti v spletnem orodju Green Value Calculator (CNT, 2024). Vidimo lahko, da so z vidika stroškov izgradnje in potencialnih koristi najbolj ugodna možnost zasaditev dreves na izbranem območju, vpliv na površinski odtok pa je v primeru takšnega

ukrepa podoben kot finančno bolj zahtevna izgradnja zelenih streh ali poroznih talnih površin.

Preglednica 5: *Površinski odtok z izboljšavami ob upoštevanju preteklih padavinskih dogodkov tako za letne padavine kot za nevihtni dogodek.*

Table 5: *Surface runoff with improvements, taking into account past rainfall events for both the annual rainfall and the storm event.*

Infrastruktura	Padavine	Količina (% zmanjšanja glede na trenutno stanje)
Zelena streha	Letni odtok [mm]	386 (15 %)
	Letni odtok [m ³]	231.751
	Nevihtni odtok [mm]	29 (10 %)
	Nevihtni odtok [m ³]	17.406
Zasaditev dreves	Letni odtok [mm]	400 (12 %)
	Letni odtok [m ³]	238.888
	Nevihtni odtok [mm]	30 (6 %)
	Nevihtni odtok [m ³]	17.795
Porozne površine	Letni odtok [mm]	360 (21 %)
	Letni odtok [m ³]	215.868
	Nevihtni odtok [mm]	28 (11 %)
	Nevihtni odtok [m ³]	16.932

3.5 Vpliv podnebnih sprememb na površinski odtok

Dodatno so bili izračuni površinskega letnega in nevihtnega odtoka narejeni tudi z uporabo podatkov o padavinah, ki so bili generirani na podlagi podnebnih scenarijev (preglednica 3). Opazimo, da naj bi se površinski odtok v prihodnosti povečal (za obstoječe stanje), kar velja tako za letno količino padavin kot za t. i. nevihtne padavine (preglednica 6). Pri analizi vpliva posameznih dodatnih izboljšav smo ugotovili, da porozne površine v največji meri zmanjšajo površinski odtok ne glede na izbrani scenarij RCP. Pri tem pa razlike med tremi izbrani tipi infrastrukture niso zelo velike, še posebej to velja za nevihtne padavine, medtem ko so na letni

ravni razlike nekje v razponu do 10 % (preglednica 7).

Vidimo, da so preprosti ukrepi, kot je zasaditev dreves, lahko relativno učinkoviti na manjšem območju, medtem ko se njihova učinkovitost zmanjšuje z večanjem prispevnega območja (Unger, 2023). V tem primeru je za zagotavljanje poplavne varnosti še vedno treba dodatno upoštevati klasične protipoplavne ureditve, kot so suhi zadrževalniki, s katerimi lahko dosežemo zmanjšanje konice površinskega odtoka tudi za več deset odstotkov (Bezák et al., 2021; Johnen et al., 2020).

Preglednica 6: *Površinski odtok za trenutno stanje ob upoštevanju podnebnih sprememb.*

Table 6: *Surface runoff for the current situation with the consideration of climate change precipitation.*

RCP	Padavine	Količina
2.6	Letni odtok	445
	Nevihetni odtok	29
4.5	Letni odtok	468
	Nevihetni odtok	30
8.5	Letni odtok	481
	Nevihetni odtok	32

4. Zaključki

Na podlagi analize podatkov, meritev in izračunov smo ugotovili, da zelena in hibridna infrastruktura pozitivno prispeva k zmanjšanju površinskega odtoka na urbanih površinah. Največje zmanjšanje površinskega odtoka je bilo ugotovljeno pri vpeljavi poroznih talnih površin, kjer je bilo zmanjšanje do 20 % letnega odtoka ob izgradnji poroznih površin na manj kot 10 % celotne površine. Pri povprečnih letnih padavinah se površinski odtok zaradi poroznih talnih površin zmanjša približno 95 mm, v primerjavi s primerom brez dodane hibridne infrastrukture (trenutno stanje). Pri t. i. nevihtnih padavinah se površinski odtok zaradi dodanih poroznih talnih površin v našem primeru zmanjša za približno 4 mm v primerjavi s trenutnim stanjem.

Tudi v primeru drugih dveh tipov infrastrukture je bilo zmanjševanje površinskega odtoka podobnega velikostnega razreda, vendar nekoliko manjše kot v primeru poroznih talnih površin. Največje finančne koristi prinese zasaditev dreves na izbrana območja. Zasaditev dreves je tudi finančno najbolj ugodna možnost glede izgradnje, medtem ko so stroški vzdrževanja najmanjši pri zelenih strehah.

Preglednica 7: *Površinski odtok glede na izbrane izboljšave ob upoštevanju podnebnih sprememb.*

Table 7: *Surface runoff with the improvements with the consideration of climate change precipitation.*

RCP	Infrastruktura	Padavine	Količina [mm] (% zmanjšanja glede na trenutno stanje)
2.6	Zelena streha	Letni odtok	383 (14 %)
		Nevihetni odtok	26 (10 %)
	Zasaditev dreves	Letni odtok	397 (11 %)
		Nevihetni odtok	27 (7 %)
4.5	Porozne površine	Letni odtok	353 (21 %)
		Nevihetni odtok	25 (14 %)
	Zelena streha	Letni odtok	390 (17 %)
		Nevihetni odtok	27 (10 %)
8.5	Zasaditev dreves	Letni odtok	404 (14 %)
		Nevihetni odtok	28 (7 %)
	Porozne površine	Letni odtok	372 (20 %)
		Nevihetni odtok	26 (14 %)
8.5	Zelena streha	Letni odtok	401 (17 %)
		Nevihetni odtok	29 (10 %)
	Zasaditev dreves	Letni odtok	416 (14 %)
		Nevihetni odtok	29 (10 %)
Porozne površine	Letni odtok	383 (20 %)	
	Nevihetni odtok	28 (12 %)	

Vsak od tipov infrastrukture ima svoje prednosti in slabosti, zato ne moremo trditi, da obstaja univerzalno najboljši ukrep. Naslednji korak raziskave bi bil kontrola različnih scenarijev, kjer bi primerjali več sočasnih vpeljav zelene oziroma hibridne infrastrukture. Ob primerjavi različnih modelov, ki napovedujejo stanje v prihodnosti, lahko v bližnji in predvsem daljni prihodnosti pričakujemo trend intenzivnejših padavin, ki naj bi se pojavljale kot posledica podnebnih sprememb. Na območjih z neprepustno podlago bi lahko takšen trend podnebnih sprememb povzročil veliko težav. Zato je pomembno, da iščemo rešitve za zmanjšanje vpliva površinske vode po padavinah, med katere sodi tudi obravnavana hibridna in zelena infrastruktura. Čeprav hibridna in zelena infrastruktura ne predstavlja absolutne rešitve problematike poplav na urbanih območjih, kaže dober potencial za zmanjšanje omenjenega problema v prihodnosti, saj zagotavlja tudi dodatne koristi, nekateri ukrepi pa so tudi finančno relativno ugodni. Pri tem je treba poudariti, da so vsi trije tipi infrastrukture, ki smo jih obravnavali, povezani z določenimi omejitvami, npr. pri postavitvi zelene strehe je treba zagotoviti statično stabilnost takšnega objekta in ustrezno izvesti odvodnjavanje z zelene strehe, v primeru dodatne zasaditve dreves na parkiriščih bi se zmanjšalo število parkirnih mest, porozne talne površine pa bi lahko slabše delovale, saj imajo tla na testnem območju relativno slabo infiltracijsko sposobnost in je zato infiltracija večjih količin padavin lahko precej otežena.

Financiranje

Raziskava je bila izvedena v sklopu raziskovalnega projekta J6-4628, ki ga financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Projekt J6-4828 delno financira tudi Czech Science Foundation (22-04520L).

Viri

Alves, A., Vojinovic, Z., Kapelan, Z., Sanchez, A., Gersonius, B. (2020). Exploring trade-offs among the multiple benefits of green-blue-grey infrastructure for urban flood mitigation. *Sci. Total Environ.* **703**.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134980>

Anderson, C. C., Renaud, F. G., Hanscomb, S., Gonzalez-Ollauri, A. (2022). Green, hybrid, or grey disaster risk reduction measures: What shapes public preferences for nature-based solutions? *J. Environ. Manage.* **310**, 114727. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114727>

ARSO (2024). ARSO Arhivski podatki [WWW Document]. URL <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>

Banasik, K., Rutkowska, A., Kohnová, S. (2014). Retention and curve number variability in a small agricultural catchment: The probabilistic approach. *Water (Switzerland)* **6(5)**, 1118–1133. <https://doi.org/10.3390/w6051118>

Bertalančič, R., Mojca, D., Andrej, D., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., Vlahovič, Ž., Žust, A. (2018). Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja, 1st ed. Slovenian Environment Agency, Ljubljana.

Bezak, N., Kovačević, M., Johnen, G., Lebar, K., Zupanc, V., Vidmar, A., Rusjan, S. (2021). Exploring options for flood risk management with special focus on retention reservoirs. *Sustain.* **13(18)**. <https://doi.org/10.3390/su131810099>

Bezak, N., Peranič, J., Mikoš, M., Arbanas, Ž. (2022). Evaluation of Hydrological Rainfall Loss Methods Using Small-Scale Physical Landslide Model. *Water* **14(17)**. <https://doi.org/10.3390/w14172726>

CNT (2024). CNT calculator [WWW Document]. *Online Calc.* URL <https://greenvalues.cnt.org/index.php#tabtop>

Debele, S. E., Kumar, P., Sahani, J., Marti-Cardona, B., Mickovski, S. B., Leo, L. S., Porcù, F., Bertini, F., Montesi, D., Vojinovic, Z., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S. (2019). Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases. *Environ. Res.* **179**. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108799>

Haowen, X., Yawen, W., Luping, W., Weilin, L., Wenqi, Z., Hong, Z., Yichen, Y., Jun, L. (2020). Comparing simulations of green roof hydrological processes by SWMM and HYDRUS-1D. *Water Sci. Technol. Water Supply* **20(1)**, 130–139. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.140>

HEC HMS (2021). HEC HMS User's Manual, v. 4.7.

IPCC (2019). Climate Change and Land.

Johnen, G., Sapač, K., Rusjan, S., Zupanc, V., Vidmar, A., Bezak, N. (2020). Modelling and Evaluation of the Effect of Afforestation on the Runoff Generation Within the Glinščica River Catchment (Central Slovenia), in: *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer. Springer, 1–17. <https://doi.org/http://doi-org->

[443.webvpn.fjmu.edu.cn/10.1007/978-3-319-56091-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5)

Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., Bonn, A. (2017). Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice, 1st ed. Springer, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>

Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Sci. Total Environ.* **610–611**, 997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>

Kermavnar, J., Vilhar, U. (2017). Canopy precipitation interception in urban forests in relation to stand structure. *Urban Ecosyst.* **20(6)**, 1373–1387. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0689-7>

Kryžanowski, A., Brilly, M., Rusjan, S., Schnabl, S. (2014). Review Article: Structural flood-protection measures referring to several European case studies. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **14(1)**, 135–142. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-135-2014>

Munich Re-NatCatSERVICE (2019). Natural Catastrophe Know-How for Risk Management and Research [WWW Document]. *Nat. Catastr. Online Tool*. URL <https://www.munichre.com/en/solutions/for-industry-clients/natcatservice.html>

Nakamura, F. (2022). Concept and Application of Green and Hybrid Infrastructure, in: Nakamura, F. (Ed.), *Green Infrastructure and Climate Change Adaptation: Function, Implementation and Governance*. Springer Singapore, Singapore, 11–30. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6791-6_2

Radinja, M., Atanasova, N., Zavodnik Lamovšek, A. (2021). Vodarski pogled na uvajanje modro-zelene infrastrukture v mestih. *Urbani Izziv* **32(1)**, 28 – 39. <https://doi.org/10.5379/URBANI-IZZIV-2021-32-01-003>

Radinja, M., Vidmar, I., Atanasova, N., Mikoš, M., Šraj, M. (2019). Determination of Spatial and Temporal Variability of Soil Hydraulic Conductivity for Urban Runoff Modelling. *Water* **11(5)**. <https://doi.org/10.3390/w11050941>

Rosenzweig, B. R., McPhillips, L., Chang, H., Cheng, C., Welty, C., Matsler, M., Iwaniec, D., Davidson, C. I. (2018). Pluvial flood risk and opportunities for resilience. *WIREs Water* **5(6)**, e1302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1302>

Schanze, J. (2017). Nature-based solutions in flood risk management – Buzzword or innovation? *J. Flood Risk Manag.* **10(3)**, 281–282. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12318>

Sodnik, J., Mikoš, M., Bezak, N. (2023). Torrential Hazards' Mitigation Measures in a Typical Alpine Catchment in Slovenia. *Appl. Sci.* **13(20)**.

<https://doi.org/10.3390/app132011136>

Šraj, M., Dirnbek, L., Brilly, M. (2010). The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph | Vplyv efektivnih zrážok na modelovaný hydrograf odtoku. *J. Hydrol. Hydromechanics* **58(1)**, 3–14. <https://doi.org/10.2478/v10098-010-0001-5>

Štajdohar, M., Brilly, M., Šraj, M. (2016). The influence of sustainable measures on runoff hydrograph from an urbanized drainage area. *Acta Hydrotechnica* **29(51)**, 145–162.

Sutton-Grier, A. E., Wowk, K., Bamford, H. (2015). Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environ. Sci. Policy* **51**, 137–148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>

Unger, K. (2023). Evaluation of hazard-mitigating hybrid infrastructure under climate change scenarios. University of Ljubljana.

Vozelj, U. (2023). Analiza vpliva hibridne infrastrukture na poplave. University of Ljubljana.

Zabret, K., Šraj, M. (2019). Rainfall Interception by Urban Trees and Their Impact on Potential Surface Runoff. *Clean - Soil, Air, Water* **47(8)**, 1800327. <https://doi.org/10.1002/clen.201800327>

Zabret, K., Šraj, M. (2015). Can Urban Trees Reduce the Impact of Climate Change on Storm Runoff? *Urbani izziv* **26**, S165–S178. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-011>

Zema, D. A., Labate, A., Martino, D., Zimbone, S. M. (2017). Comparing Different Infiltration Methods of the HEC-HMS Model: The Case Study of the Mésima Torrent (Southern Italy). *L. Degrad. Dev.* **28(1)**, 294–308. <https://doi.org/10.1002/ldr.2591>

Zhang, Y., Zhao, W., Chen, X., Jun, C., Hao, J., Tang, X., Zhai, J. (2021). Assessment on the effectiveness of urban stormwater management. *Water (Switzerland)* **13(1)**. <https://doi.org/10.3390/w13010004>