

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/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Kurmanšek, G. 2016. Ocena vpliva zelenih streh na količino padavinskega odtoka. Magistrsko delo. = Evaluation of green roof performance on rainwater runoff quantity. M. Sc. Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 139 str. (mentor: Panjan, J., somentor Lenart, S.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6144/>

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



**UNIVERZITETNI PODIPLOMSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
VARSTVO OKOLJA**

MAGISTRSKI ŠTUDIJ

Kandidatka:

GORDANA KURMANŠEK, prof. geo. in ang.

**OCENA VPLIVA ZELENIH STREH NA KOLIČINO
PADAVINSKEGA ODTOKA**

Magistrsko delo štev.: 294

**EVALUATION OF GREEN ROOF PERFORMANCE ON
RAINWATER RUNOFF QUANTITY**

Master of Science Thesis No.: 294

Mentor:
izr. prof. dr. Jože Panjan

Predsednik komisije:
prof. dr. Mitja Brilly

Somentor:
doc. dr. Stanislav Lenart

Člana komisije:
doc. dr. Mojca Šraj
prof. dr. Sašo Medved

Ljubljana, 22. september 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka GORDANA KURMANŠEK,
vpisna številka 97404541, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom:
OCENA VPLIVA ZELENIH STREH NA KOLIČINO PADAVINSKEGA ODTOKA

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 pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

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

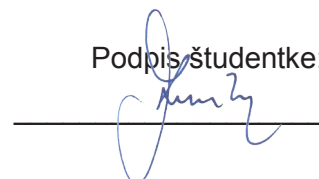
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

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

V: Mislinji

Datum: 22. 9. 2016

Podpis študentke:



BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	551.578.1:692.4(497.4)(043)
Avtor:	Gordana Kurmanšek
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Panjan
Somentor :	doc. dr. Stanislav Lenart
Naslov:	Ocena vpliva zelenih streh na količino padavinskega odtoka
Tip dokumenta	magistrsko delo - UPŠVO
Obseg in oprema	133 str., 19 pregl., 16 sl., 64 graf., 9 pril.
Ključne besede:	zelena streha, padavinski odtok, modeliranje, zadrževanje padavinskih vod, evapotranspiracija, podnebna območja

Izvleček

Magistrsko delo obravnava vpliv ekstenzivnih zelenih streh na zadrževanje in zmanjšanje padavinskega odtoka v treh podnebnih območjih značilnih za Slovenijo. Opravili smo meritve na treh testnih strehah in rezultate uporabili pri modeliranju padavinskega odtoka. Z modelom smo pridobili podatke o zmanjšanju padavinskega odtoka za tri zelene strehe v treh različnih podnebnih območjih. Ugotovili smo, da je zmanjšanje padavinskega odtoka odvisno od višine evapotranspiracije v določenih podnebnih razmerah in od koeficienta evapotranspiracije zelene strehe. Zadrževalne sposobnosti zelene strehe je smiselno večati pri strehah z visokim koeficientom evapotranspiracije na območjih z visoko evapotranspiracijo. Povečanje zadrževalne sposobnosti zelene strehe v krajih z nizko evapotranspiracijo nima želenega vpliva na zmanjšanje padavinskega odtoka. Na podlagi ugotovitev smo predlagali idejno konstrukcijo modro-zelene strehe, ki je primerna za vsa tri obravnavana podnebna območja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 551.578.1:692.4(497.4)(043)
Author: Gordana Kurmanšek
Supervisor: Assoc. Prof. Jože Panjan, Ph. D.
Co-advisor : Assist. Prof. Stanislav Lenart, Ph. D.
Title: Evaluation of green roof performance on rainwater runoff quantity
Document type: M. Sc. Thesis
Notes: 133 p., 18 tab., 16 fig., 62 graph., 9 en.
Key words: green roofs, runoff, modelling, green roof stormwater retention, evapotranspiration, climate

Abstract

The master thesis deals with performance of extensive green roofs on rainwater runoff quantity in three different climates typical for Slovenia (continental, submediterranean and mountain). The measurements were done on three different test green roofs. The data were used for rainwater runoff modelling. The results showed the response of three different roofs in three different climates. We have found that the reduction of rainwater runoff depends on the rate of evapotranspiration in the area and on the green roof evapotranspiration coefficient. It is reasonable to increase the retention capacity only for green roofs with high evapotranspiration coefficient in climates with high rate of evapotranspiration. Increasing the retention of green roof in climates with low evapotranspiration does not always result in runoff attenuation. Based on the findings, we proposed the conceptual design of the blue-green roof which is suitable for all three climate types of our research.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojemu mentorju izr. prof. dr. Jožetu Panjanu za spodbude v času študija, somentorju doc. dr. Stanislavu Lenartu za strokovno pomoč in neprecenljive nasvete pri izdelavi magistrskega dela.

Iskreno se zahvaljujem podjetjem Norik d.o.o., Knauf Insulation d.o.o. Škofja Loka in MGing d.o.o. za donirane module ekstenzivnih zelenih streh.

Zahvaljujem se tudi možu Tomažu za izjemno potrpežljivost, spodbude, nasvete in pomoč. Posebno podporo sem v obdobju pisanja magistrskega dela prejela tudi od moje Neže, Jakoba, Eve in najmlajše Klare. Hvala vam.

KAZALO VSEBINE

Izjave	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček.....	II
Bibliographic-documentalistic information and abstract.....	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
1.1..Opredelitev raziskovalnega problema	1
1.2..Hipoteza.....	3
1.3..Cilji 3	
1.4..Metodološka izhodišča in struktura dela.....	3
2 URBANA ODVODNJA	5
2.1..Zgodovina urbane odvodnje	5
2.2..Moderna urbana odvodnja	6
2.3..Trajnostni sistemi urbane odvodnje	6
2.4..Modre in modro-zelene strehe	7
3 ZELENE STREHE	10
3.1..Zgodovina zelenih streh	10
3.2..Sestavni elementi sodobnih zelenih streh	11
3.2.1 Zaščitni in vodozadrževalni sloj.....	12
3.2.2 Drenažni sloj	12
3.2.3 Filtrski sloj	12
3.2.4 Rastni substrat	12
3.2.5 Vegetacijski oziroma ozelenitveni sloj	13
3.3..Delitev zelenih streh glede na vrsto ozelenitve.....	13
3.3.1 Ekstenzivna zelena streha	14
3.3.2 Intenzivna zelena streha	15
3.4..Prednosti in slabosti zelene strehe.....	15
3.4.1 Uravnavanje in razporejanje padavinske vode	16
3.4.2 Uravnavanje temperature zraka	16
3.4.3 Kakovost zraka.....	17
3.4.4 Absorpcija polutantov	18
3.4.5 Zvočna izolacija.....	18
3.4.6 Dodaten življenjski prostor za rastline in živali.....	18
3.4.7 Uporaba recikliranega gradbenega materiala	18

4	DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA ZMANJŠANJE PADAVINSKEGA ODTOKA Z EKSTENZIVNE ZELENE STREHE	19
4.1.	Debelina in sestava substrata.....	21
4.2.	Klimatske značilnosti in vreme	21
4.2.1	Vpliv podnebja na padavinski odtok	21
4.2.2	Vpliv trajanja in intenzitete padavin na padavinski odtok	22
4.2.1	Vpliv števila predhodnih sušnih dni na padavinski odtok	26
4.2.2	Vpliv padavin na dinamiko padavinskega odtoka	27
4.2.3	Vpliv letnega časa na padavinski odtok.....	28
4.3.	Naklon strehe	29
4.4.	Vegetacija	30
4.5.	Starost zelene strehe	32
4.6.	Drenažna in zadrževalna plast	33
4.7.	Razmerje med količino padavin in odtokom ter kapaciteta skladiščenja	33
4.8.	Vpliv zelenih streh na urbano odvodnjo.....	33
4.9.	Zaključki	34
5	PRIMERJAVA treh EKSTENZIVNIH ZELENIH STREH IN NJIHOVIH ZADRŽEVALNIH SPOSOBNOSTI	36
5.1.	Opis izbranih ekstenzivnih zelenih streh	36
5.1.1	Streha 1: sistem ekstenzivne zazelenitve Xeroflor	36
5.1.2	Streha 2: modularni sistem za zelene strehe Urbanscape.....	37
5.1.3	Streha 3: ekstenzivna ozelenitev MG E standard	40
5.2.	Kapaciteta zadrževanja padavinskih vod pri zelenih strehah v odvisnosti od povratnih dob za ekstremne padavine	41
5.2.1	Celje	43
5.2.2	Portorož	46
5.2.3	Rateče	49
5.2.4	Zaključki.....	52
6	EKSPERIMENTALNE MERITVE	54
6.1.	Izhodišča in namen preiskav.....	54
6.2.	Evapotranspiracija.....	55
6.3.	Eksperiment 1	58
6.3.1	Metodologija.....	58
6.3.2	Meritve zadrževalnih sposobnosti posameznih zelenih streh	59
6.3.3	Meritve izhlapevanja	60
6.3.4	Analiza podatkov in rezultati.....	62
6.4.	Eksperiment 2	70
6.4.1	Metodologija.....	70
6.4.2	Meritve izhlapevanja vode iz različnih materialov v naravnih pogojih	73

6.4.3	Meritve izhlapevanja vode iz različnih materialov v kontroliranih pogojih	76
7	MODEL ZELENE STREHE.....	81
7.1.	Izhodišča in namen	81
7.2.	Vhodni podatki	84
7.3.	Kalibracija in verifikacija modela	86
7.4.	Validacija modela	87
7.5.	Odziv modela na 40-letno padavinsko obdobje in evapotranspiracijo	89
7.5.1	Celje.....	90
7.5.2	Portorož	91
7.5.3	Rateče	93
7.5.4	Analiza podatkov.....	95
8	ODZIV TESTNIH STREH V RAZLIČNIH PODNEBNIH RAZMERAH	97
8.1.	Celje	98
8.2.	Portorož.....	100
8.3.	Rateče	101
8.4.	Prikaz vpliva koeficienta ET zelene strehe in povečanja zadrževanja vode na zasičenost in padavinski odtok z zelene strehe	102
8.5.	Predlagana rešitev	107
9	RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI.....	116
9.1.	Dokaz hipoteze.....	116
9.2.	Praktična uporabnost ugotovitev in rezultatov.....	117
9.3.	Usmeritve za nadaljnje delo	119
10	POVZETEK.....	120
11	SUMMARY	121
	VIRI IN LITERATURA	122

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Izrazi za trajnostno upravljanje s padavinskimi vodami (Fletcher in sod., 2015) ...	7
Preglednica 2:	Vrednosti zadrževalnih sposobnosti ekstenzivnih zelenih streh različnih avtorjev prirejen po Nawaza, McDonald, Postoyko (2015)	20
Preglednica 3:	Pregled po avtorjih - vpliv intenzitete padavin na zadrževanje padavinskega odtoka zelene strehe	25
Preglednica 4:	Sestava ekstenzivne zazelenitve Xeroflor (Xeroflor, 2016: str. 4).....	37
Preglednica 5:	Sestava modela Urbanscape Green Roof modul (Urbanscape, 2014).....	39
Preglednica 6:	Sestava zelene strehe MG E ekstenzivna ozelenitev standard (MG zelene strehe, 2016).....	40
Preglednica 7:	Primerjava testnih modelov zelenih streh glede na količino vode v zasičenosti ..	44
Preglednica 8:	Povzetek značilnosti obravnavanih zelenih streh 1, 2 in 3	60
Preglednica 9:	Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka z zelenih streh, ko je substrat suh in ko je delno zasičen	67
Preglednica 10:	Primerjava krivulje zrnivosti naključno odvzete rečne zemljine in zrnivosti po FLL smernicah za multi-course ekstenzivne sisteme	72
Preglednica 11:	Primerjava krivulje zrnivosti naključno odvzete rečne zemljine in zrnivosti po FLL smernicah za single-course ekstenzivne sisteme	72
Preglednica 12:	Testni materiali za merjenje izhlapevanja v naravnih pogojih	73
Preglednica 13:	Testni materiali za meritve zadrževanja in izgub vode zaradi izhlapevanja	76
Preglednica 14:	Dnevne vrednosti referenčne evapotranspiracije po Turcovi enačbi	85
Preglednica 15:	Koeficient ET (k) za strehe 1, 2 ali 3	86
Preglednica 16:	Povprečno, minimalno, maksimalno zmanjšanje odtoka za Celje, Portorož, Rateče (1975-2015)	96
Preglednica 17:	Povečanje zadrževanja vode v različnih materialih zaradi povečanja njihove debeline (rezultati eksperimenta 2)	98
Preglednica 18:	Vpliv povečanja zadrževalne sposobnosti strehe na zmanjšanje padavinskega odtoka	99
Preglednica 19:	Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka pri strehi 2 in predlagani modro-zeleni strehi	113

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Primerjava odtoka s tradicionalne in zelene strehe v odvisnosti od padavin (Stovin in sod., 2012: str. 149)	16
Grafikon 2:	Povprečna temperatura površine tradicionalne in zelene strehe (prirejeno po Technical Preservation Services, 2016).....	17
Grafikon 3:	Zadrževanje padavinskega odtoka v odvisnosti od intenzitete padavin (Zhang in sod., 2015: str. 147)	22
Grafikon 4:	Volumen padavinskega odtoka v odvisnosti od intenzitete padavin (Krishnan in Ahmad, 2014: str. 4)	23
Grafikon 5:	Odstotek zadrževanja padavin v odvisnosti od količine padavin (Carter in Rasmussen, 2006: str. 1268)	24
Grafikon 6:	Zakasnitev konice odtoka z zelene strehe v primerjavi s tradicionalno streho (Carter in Rasmussen, 2006: str. 1269).....	27
Grafikon 7:	Hidrogram padavin in odtoka z zelene strehe (GSA, 2011)	28
Grafikon 8:	Spreminjanje dnevne kumulativne ET prvi in četrti teden meritev v pomladnih in poletnih razmerah (Poë in sod., 2015: str. 364)	32
Grafikon 9:	Zadrževanje padavinskih vod kot funkcija povratnih dob (Stovin in sod., 2012: str. 155).....	42
Grafikon 10:	Podnebni diagram za Celje od leta 1981 do 2010 (ARSO, 2016a)	43
Grafikon 11:	Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti za Celje	44
Grafikon 12:	Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Celju	45
Grafikon 13:	Celje - odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami	45
Grafikon 14:	Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode 8,5 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Celju	46
Grafikon 15:	Podnebni diagram za Portorož od leta 1981 do leta 2010 (ARSO, 2016b) ..	47
Grafikon 16:	Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti za Portorož.....	47
Grafikon 17:	Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu	48
Grafikon 18:	Odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu	48
Grafikon 19:	Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode 8,5 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu	49

Grafikon 20:	Podnebni diagram za Rateče od leta 1981 do leta 2010 (ARSO, 2016c)	50
Grafikon 21:	Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti v Ratečah.....	50
Grafikon 22:	Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah	51
Grafikon 23:	Odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah	51
Grafikon 24:	Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode 8,5 l/m ² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah	52
Grafikon 25:	Vpliv različnih vrst vegetacije na padavinski odtok v primerjavi s celotno količino padavin (Krishnan in Ahmad, 2014: str. 4).....	57
Grafikon 26:	Celoten pregled meritev na modelih zelenih streh od 15. 4. do 13. 5. 2016.....	61
Grafikon 27:	Spreminjanje zasičenosti strehe 1, 2 in 3 v prvih 12-ih dneh opravljanja meritev	63
Grafikon 28:	Spreminjanje zasičenosti streh 1, 2 in 3 po padavinskem dogodku 27. 4. 2016.....	65
Grafikon 29:	Spreminjanje zasičenosti strehe 1, 2 in 3 po padavinskih dogodkih 1. 5. in 2. 5. 2016	66
Grafikon 30:	Celotno zadrževanje padavinskega odtoka	68
Grafikon 31:	Primerjava evapotranspiracije v % za prvih 10 dni za strehe 1, 2 in 3	68
Grafikon 32:	Povprečna dnevna izmerjena evapotranspiracija za strehe 1, 2 in 3	69
Grafikon 33:	Primerjava spremembe teže med posameznimi meritvami na m ² strehe 3 in kontrolnega merjenja substrata iz drobljene opeke od 3. 5. 2016 do 13. 5. 2016.....	70
Grafikon 34:	Sprememba zasičenosti testnih materialov	73
Grafikon 35:	Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh rečne zemljine v naravnih pogojih	74
Grafikon 36:	Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh mineralnih vlaken v naravnih pogojih.....	75
Grafikon 37:	Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh filca v naravnih pogojih.....	75
Grafikon 38:	Spreminjanje zasičenosti substrata iz drobljene opeke	78
Grafikon 39:	Izhlapevanje iz različnih materialov v kontroliranih pogojih.....	79
Grafikon 40:	Sprememba izhlapevanja med posameznimi meritvami za lahek substrat, mineralna vlakna in rečno zemljino	80

Grafikon 41:	Sprememba izhlapevanja med posameznimi meritvami za drobljeno opeko	80
Grafikon 42:	Verifikacija modela - izmerjen in modeliran odziv streh 1, 2 in 3 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 23. 4. 2016	87
Grafikon 43:	Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 1 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016	88
Grafikon 44:	Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 2 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016	88
Grafikon 45:	Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 3 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016	89
Grafikon 46:	Celje– minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1.....	90
Grafikon 47:	Celje – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2.....	91
Grafikon 48:	Celje – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3.....	91
Grafikon 49:	Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1.....	92
Grafikon 50:	Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2.....	92
Grafikon 51:	Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3.....	93
Grafikon 52:	Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1.....	94
Grafikon 53:	Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2.....	94
Grafikon 54:	Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3.....	95
Grafikon 55:	Celje - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe.....	99
Grafikon 56:	Portorož - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe.....	100
Grafikon 57:	Rateče - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe.....	101
Grafikon 58:	Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 2 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 40 mm/m ² , koeficient ET za streho 2 je 1,67)	103
Grafikon 59:	Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 3 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 40 mm/m ² , koeficient ET za streho 3 je 0,67)	104
Grafikon 60:	Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 2 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 80 mm/m ² , koeficient ET za streho 2 je 1,67)	105
Grafikon 61:	Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 3 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 80 mm/m ² ,	

koeficient ET za streho 3 je 0,67)	106
Grafikon 62: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Celje	114
Grafikon 63: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Portorož	114
Grafikon 64: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Rateče	115

KAZALO SLIK

Slika 1: Modro-zelena pametna streha podjetja Vegetal i. D. (Vegetalid, 2016)	9
Slika 2: Konstrukcija zelene strehe (Sustainable designs, 2016)	11
Slika 3: Ekstenzivna zelena streha (Bellingham Green Roofs, 2009).....	14
Slika 4: Intenzivna zelena streha (Morrison in Vaterlaus, 2016).....	15
Slika 5: Vegetacijska preproga Sedum-moss na strehi 1 (Vir: avtor).....	36
Slika 6: Sestava strehe 1 (vegetacija s substratom in filc) (Vir: avtor)	37
Slika 7: Vegetacijska preproga na strehi 2 (Vir: avtor).....	38
Slika 8: Sestava strehe 2 (vegetacija, substrat, kamena volna, drenaža) (Vir: avtor)	39
Slika 9: Streha 3 - substrat iz drobljene opeke (Vir: avtor)	40
Slika 10: Sestava strehe 3 (vegetacija, substrat, drenaža) (Vir: avtor)	41
Slika 11: Shematičen prikaz sistema zelene strehe (Wong in Jim, 2015: str. 175).....	54
Slika 12: Eksperimentalne zelene strehe na objektu (Vir: avtor)	58
Slika 13: Eksperimentalne zelene strehe po sneženju 28. 4. 2016 (Vir: avtor)	59
Slika 14: Diagram poteka za izračun modela zelene strehe	82
Slika 15: Predlagana sestava modro-zelene strehe s kapilarnimi ploščami.....	107
Slika 16: Diagram poteka za izračun modela modro-zelene strehe.....	109

LIST OF TABLES

Table 1:	Sustainable Stormwater runoff management terminology (Fletcher et al., 2015).....	7
Table 2:	The reported retention values from various studies on extensive green roofs adapted from Nawaza, McDonald, Postoyko (2015).....	20
Table 3:	Review of the authors - the impact of the rainfall intensity on the retention of a green roof runoff	25
Table 4:	Configuration of the extensive green roof Xeroflor (Xeroflor, 2016: p. 4)	37
Table 5:	Configuration of Urbanscape Green Roof modul (Urbanscape, 2014).....	39
Table 6:	Configuration of MG E extensive standard green roof (MG zelene strehe, 2016).....	40
Table 7:	Comparison of the water amount in saturated conditions of green roof test modules.....	44
Table 8:	A summary of the green roofs' 1, 2 and 3 characteristics	60
Table 9:	Comparison of green roofs runoff reduction, when the substrate is dry and when it is partially saturated	67
Table 10:	Comparison of granulometric distribution curve for river soil and granulometric distribution range of FLL guidelines for multi - course extensive systems.....	72
Table 11:	Comparison of granulometric distribution curve for river soil and granulometric distribution range of FLL guidelines for single - course extensive systems.....	72
Table 12:	Test materials for evaporation measuring under field conditions	73
Table 13:	Test materials for measuring retention and water loss due to evaporation ..	76
Table 14:	Daily values of reference evapotranspiration according to Turc's equation	85
Table 15:	ET coefficient (k) for the roof 1, 2 or 3	86
Table 16:	Average, minimum, maximum reduction of runoff for Celje, Portorož, Rateče (1975-2015).....	96
Table 17:	Improving the water retention in different materials by increasing their thickness (the results of the experiment 2)	98
Table 18:	The impact of improving the water retention ability of the green roof to reduce stormwater runoff	99
Table 19:	Comparison of stormwater runoff reduction from the roof 2 and the proposed blue - green roof.....	113

LIST OF GRAPHS

Graph 1:	Stormwater runoff from traditional and green roof dependent on precipitation (Stovin et al., 2012: p. 149)	16
Graph 2:	The average surface temperature of a traditional roof and a green roof (adapted from the Technical Preservation Services, 2016)	17
Graph 3:	Runoff retention dependent on the intensity of precipitation (Zhang et al., 2015: p. 147).....	22
Graph 4:	The volume of stormwater runoff dependent on the intensity of precipitation (Krishnan in Ahmad, 2014: p. 4).....	23
Graph 5:	Percentage of stormwater retention dependent on the amount of precipitation (Carter in Rasmussen, 2006: p. 1268).....	24
Graph 6:	Green roof runoff detention compared to a traditional roof (Carter in Rasmussen, 2006: p. 1269)	27
Graph 7:	Precipitation and green roof runoff hydrograph (GSA, 2011).....	28
Graph 8:	Daily cumulative ET changes in the first and fourth week of measurements in the spring and summer conditions (Poč et al., 2015: p. 364).....	32
Graph 9:	Stormwater runoff retention as a function of return periods (Stovin et al., 2012: p. 155).....	42
Graph 10:	Climate graph for Celje from 1981 to 2010 (ARSO, 2016a).....	43
Graph 11:	Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years in Celje	44
Graph 12:	Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Celje	45
Graph 13:	Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Celje	45
Graph 14:	Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of 8,5 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Celje	46
Graph 15:	Climate graph for Portorož from 1981 to 2010 (ARSO, 2016b).....	47
Graph 16:	Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years for in Portorož.....	47
Graph 17:	Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Portorož	48
Graph 18:	Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Portorož	48

Graph 19:	Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of 8,5 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Portorožu	49
Graph 20:	Climate graph for Rateče from 1981 to 2010 (ARSO, 2016c).....	50
Graph 21:	Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years in Rateče	50
Graph 22:	Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Rateče	51
Graph 23:	Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Rateče	51
Graph 24:	Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of 8,5 l/m ² dependent on rainfall with different return periods in Rateče	52
Graph 25:	The influence of different types of vegetation on stormwater runoff compared to the total amount of precipitation (Krishnan and Ahmad, 2014: p. 4).....	57
Graph 26:	An overview of the green roof models measurements from 15/4/ to 13/5/2016.....	61
Graph 27:	Changes in the saturation of roofs 1, 2 and 3 in the first 12 days of measurements	63
Graph 28:	Changes in saturation of roofs 1, 2 and 3 after the rainfall event 27/4/2016.....	65
Graph 29:	Changes in saturation of roofs 1, 2 and 3 after rainfall events 1/5 and 2/5/2016.....	66
Graph 30:	Total stormwater runoff retention.....	68
Graph 31:	Comparison of evapotranspiration in % of the roofs 1, 2 and 3 for the first 10 days.....	68
Graph 32:	Measured average daily evapotranspiration for roofs 1, 2 and 3	69
Graph 33:	Comparison of weight changes per m ² of the roof 3 between individual measurements and controled measurements of the crushed bricks substrate from 3/5/2016 to 13/5/2016.....	70
Graph 35:	Comparison of saturation changes in different thick layers of river soil under natural conditions.....	74
Graph 36:	Comparison of saturation changes in different thick layers of mineral fibres under natural conditions	75
Graph 37:	Comparison of saturation changes in different thick layers of geotextile fabric under natural conditions	75
Graph 38:	Saturation changes of crushed brick substrate.....	78
Graph 39:	Evaporation from different materials under controlled conditions.....	79

Graph 40:	Evaporation change during individual measurements for lightweight substrat, mineral fibres and river soil	80
Graph 41:	Evaporation change during individual measurements for crushed bricks.....	80
Graph 42:	Model verification – measured and modeled response of the roofs 1, 2 and 3 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 23/4/2016	87
Graph 43:	Model validation - measured and modeled response of the roof 1 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016	88
Graph 44:	Model validation - measured and modeled response of the roof 2 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016	88
Graph 45:	Model validation - measured and modeled response of the roof 3 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016	89
Graph 46:	Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 1.....	90
Graph 47:	Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 2.....	91
Graph 48:	Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 3.....	91
Graph 49:	Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 1	92
Graph 50:	Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 2	92
Graph 51:	Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 3	93
Graph 52:	Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 1	94
Graph 53:	Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 2	94
Graph 54:	Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 3	95
Graph 55:	Celje – runoff reduction dependent on the green roof retention capacity	99
Graph 56:	Portorož - runoff reduction dependent on the green roof retention capacity.....	100
Graph 57:	Rateče - runoff reduction dependent on the green roof retention capacity.	101
Graph 58:	The impact of the ET coefficient of the roof 2 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 40 mm/m ² , coefficient of ET for the roof 2 is 1,67).....	103
Graph 59:	The impact of the ET coefficient of the roof 3 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 40 mm/m ² , coefficient of ET for the roof 3 is 0,67).....	104
Graph 60:	The impact of the ET coefficient of the roof 2 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 80 mm/m ² , coefficient of ET for the roof 2 is 1,67).....	105
Graph 61:	The impact of ET coefficient of the roof 3 and precipitation on the green	

	roof saturation and stormwater runoff (retention capacity 80 mm/m ₂ , coefficient of ET for the roof 3 is 0,67).....	106
Graph 62:	Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Celje	114
Graph 63:	Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Portorož	114
Graph 64:	Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Rateče	115

LIST OF FIGURES

Figure 1:	Vegetal i. D. smart blue-green roof (Vegetalid, 2016)	9
Figure 2:	Construction of green roof (Sustainable designs, 2016)	11
Figure 3:	Extensive green roof (Bellingham Green Roofs, 2009)	14
Figure 4:	Intensive green roof (Morrison and Vaterlaus, 2016)	15
Figure 5:	Vegetation carpet Sedum-moss of the roof 1 (Source: author)	36
Figure 6:	Configuration of the roof 1 (vegetation with substrate and geotextile fabric) (Source: author)	37
Figure 7:	Vegetation carpet on the roof 2 (source: author).....	38
Figure 8:	Configuration of the roof 2 (vegetation, substrate, rockwool, drainage) (Source: author)	39
Figure 9:	The roof 3 – crushed brick substate (Source: author)	40
Figure 10:	Configuration of the roof 3 (vegetation, substrate, drainage) (Source: author)	41
Figure 11:	Conceptual model of a green roof system (Wong and Jim, 2015: p. 175)	54
Figure 12:	The experimental green roofs on the building (Source: author)	58
Figure 13:	The experimental green roofs after snowing 28/4/2016 (Source: author).....	59
Figure 14:	Flowchart of the green roof model calculation.....	82
Figure 15:	The proposed configuration of a green roof with capillary plates	107
Figure 16:	Flowchart of the green roof model calculation.....	109

OKRAJŠAVE

ARSO	Agencija Republike Slovenije za Okolje
ATs	Alternative techniques
BMPs	Best management practices
CN	Curve number
CTs	Compensatory techniques
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau
LECA	Lightweight Expanded Clay Aggregate (slov. Ekspandirana glina oziroma glinopor)
LID	Low impact Development
SCMs	Stormwater control measures
SUDS	Sustainable urban drainage systems
SuDS	Sustainable drainage systems
SWMM	Stormwater management model
UN	United Nations
ZDA	Združene države Amerike
WSUD	Water sensitive urban design

VELIČINE IN ENOTE

ET_0	[mm/dan]	referenčna evapotranspiracija
ET	[mm/dan]	evapotranspiracija
ET_{d1}	[mm/dan]	dejanska evapotranspiracija vegetacijskega sloja
ET_{d2}	[mm/dan]	dejanska evapotranspiracija zbiralnika vode
m_1	[mm/m ²]	začetna točka strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
m_2	[mm/m ²]	končna točka strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
m_3	[mm/m ²]	začetna točka položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
m_4	[mm/m ²]	končna točka položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
S_t	[l/m ²]	trenutna zasičenost zelene strehe
S_{t-1}	[l/m ²]	predhodna zasičenost zelene strehe
S_{max}	[l/m ²]	popolna zasičenost zelene strehe 1, 2 ali 3
$S_{1(t)}$	[l/m ²]	trenutna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom
$S_{1(t-1)}$	[l/m ²]	predhodna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom
S_{1max}	[l/m ²]	popolna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom
$S_{2(t)}$	[l/m ²]	trenutna zasičenost zbiralnika vode
$S_{2(t-1)}$	[l/m ²]	predhodna zasičenost zbiralnika vode
S_{2max}	[mm/m ²]	maksimalna kolčina vode v zbiralniku
$S_{(33,1)}$	[mm/m ²]	popolna zasičenost modro-zelene strehe enaka strehi 2
t	[d]	trajanje do popolne izpraznitve zbiralnika vode
t_1	[min]	čas začetne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
t_2	[min]	čas končne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
t_3	[min]	čas začetne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
t_4	[min]	čas končne točke položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke
t_{s2}	[d]	<i>trajanje do popolne izpraznitve strehe 2</i>
t_{mz}	[d]	<i>trajanje do popolne izpraznitve modro-zelene strehe</i>
T	[°C]	povprečna temperatura zraka
Z	[mm/m ²]	zadrževanje zelene strehe
Q	[mm/m ²]	padavinski odtok z zelene strehe

SIMBOLI

k	<i>koeficient ET strehe 1, 2 ali 3</i>
k_1	koeficient ET vegetacijskega sloja s substratom
k_2	koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode
n	razmerje med hitrostjo izhlapevanja iz drobljene opeke pri strmim in pri položnem delu krivulje

1 UVOD

1.1 Opredelitev raziskovalnega problema

Urejanje padavinskega odtoka je vedno večji problem za mesta po celem svetu. Stopnja urbanizacije narašča, trenutno živi v urbanih območjih več kot polovica svetovne populacije, do leta 2050 naj bi živel v mestih 70 % prebivalstva (UN habitat, 2013). Vpliv urbanizacije na okolje se kaže z nadomeščanjem naravnih površin z nepropustnimi, s tem se preprečuje infiltracija padavin v podtalnico ter povečuje površinski odtok.

Teh velikih količin padavinskih odtokov obstoječemu kanalizacijskemu sistemu večinoma ne uspe odvajati. Padavinski odtok se v zadnjih letih povečuje tudi zaradi klimatskih sprememb, ki povzročajo pogostejše intenzivne padavinske dogodke, kar vodi v poplave (Berndtsson, 2010). Odvajanje padavinske vode v kanalizacijo ob takšnih nalivih povzroča prelivanje odvečne vode v bližnje odvodnike ter posledično njihovo onesnaževanje (Panjan, 2002). Ker padavine spirajo z neprepustnih površin različne polutante, so onesnažene, to pa povzroča tudi probleme pri čiščenju odpadne vode na čistilnih napravah.

Reševanje problematike prevelikega volumna padavinskega odtoka je pomembno zaradi zmanjševanja njegovega negativnega vpliva na okolje. Gradnja vedno večjih presekov kanalizacij se je pokazala za ekonomsko nesprejemljivo, vendar je v pozidanih središčih mest to pogosto edina rešitev (Kompore, 2002), zato so raziskave usmerjene v alternativne oblike urbane odvodnje (VanWoert in sod., 2005), ki povečajo ponikanje ter omogočajo trajnostni način upravljanja s kakovostjo in količino odvodnje padavinskih vod (Nawaz, McDonald, Postoyko, 2015). Padavinske vode naj bi čim dlje zadrževali na mestu, kamor so padle, da bi se zmanjšala količina odtoka po kanalizaciji in obremenitev čistilne naprave ter recipientov (Panjan, 2002). S takšnim načinom posnemamo hidrologijo območja pred urbanizacijo.

Primeri zadrževanja padavinskih vod so ponikovalni bazeni, prepustni pločniki (Stovin, Poe in Berretta, 2013), akumulacije, s katerimi deževnico skladiščimo v depresijah, urejenih ribnikih (Panjan, 2002), in zelene strehe (Stovin in sod., 2013). Večina teh oblik zahteva velike površine, pri čemer zelene strehe ne potrebujejo dodatnih urbanih površin in jih je zato enostavno vključiti v nove ali obstoječe stavbe. To predstavlja prednost za visoko urbanizirana mestna središča, ki se srečujejo s pomanjkanjem prostora in kjer prevladuje mešani kanalizacijski sistem (Vesuviano, 2014) ter strehe predstavljajo velik delež vseh nepropustnih površin (VanWoert in sod., 2005). Stovin, Poe in Berretta (2013) navajajo, da je njihov delež 40-50%.

Zelene strehe imajo poleg koristi pri upravljanju z urbano odvodnjo tudi pozitiven vpliv na uravnavanje temperature in številne druge pozitivne učinke na okolje. Mentens, Raes in Hermy (2006) ugotavljajo, da so zelene strehe odličen pripomoček za blaženje težav padavinskega odtoka, ki vodi v poplave. V kombinaciji z drugo infrastrukturo lahko prispevajo k očitnemu zmanjšanju količine vode, ki pride v kanalizacijsko omrežje v času padavinskih dogodkov.

Velik del padavin se tako zadrži in se vrne v naravni krogotok v atmosfero preko evapotranspiracije. Ponekod lahko zelene strehe zmanjšajo odtok za 75 % (Köhler in sod., 2001). Posledično zelene strehe zakasnijo začetek odtoka zaradi pronicanja vode skozi sistem zelene strehe (Vesuviano, 2014), zmanjšajo celotno količino odtoka, saj ga del zadržijo, in porazporedijo preko daljšega časovnega obdobja v primerjavi s tradicionalno streho (Berndtsson, 2010; Mentens, Raes in Hermy, 2006). Vsekakor je učinkovitost zadrževanja padavinskih vod v sistemu zelenih streh odvisna od številnih dejavnikov.

Čeprav zelene strehe predstavljajo vedno pogostejšo rešitev trajnostne gradnje, so velikokrat zgrajene brez posebnega namena doseči določene cilje ali brez posebne pozornosti na specifične klimatske značilnosti nekega območja (Simmons, 2008). V magistrskem delu bomo zato na izbranih klimatskih območjih preučevali oceno hidrološkega vpliva zelenih streh na zmanjšanje količin padavinskega odtoka v času padavinskega dogodka. Osredotočili se bomo na gradnjo ekstenzivnih zelenih streh, saj se zaradi manjše teže (100 mm zemljine) lahko postavijo na katerikoli konstrukciji.

Na podlagi študije dosedanjih raziskav bomo predstavili glavne dejavnike, ki vplivajo na količino padavin, ki jih posamezni tipi ekstenzivnih zelenih streh zadržijo in njihove meritve. Izvedli bomo meritve na testnih strehah, ki jih bomo primerjali z modeliranjem realnega stanja. Z modelom bomo ocenili potencialno korist zelenih streh pri zadrževanju padavinskih vod pod vplivom določenih klimatskih razmer. Eksperimentalne meritve nam bodo pomagale določiti strešno konstrukcijo, ki bi idealno odgovarjala na različna klimatska območja v Sloveniji.

Reševanje omenjene problematike bo dobilo trajnostni pristop, katerega glavni cilj je zaščita površinskih in podzemnih vod v smislu količin ter kakovosti.

1.2 Hipoteza

V urbanem okolju problem predstavljajo velike nepropustne površine, ki omogočajo hitro odtekanje padavinskih vod, kar ima negativen vpliv na okolje. V raziskavi se bomo osredotočili na strehe, saj le-te predstavljajo največji odstotek nepropustnih površin.

V delu zato želimo raziskati, kakšen učinek bi imele ekstenzivne zelene strehe na zakasnitev, zadrževanje in zmanjšanje padavinskega odtoka v času padavinskega dogodka.

Ključni vprašanji sta, koliko padavinskih vod bi lahko zadržala zelena streha na primeru testnih streh ter kako bi lahko izboljšali zadrževalne sposobnosti zelene strehe, da bi ustrezale padavinskim razmeram, ki so značilne za posamezna klimatska območja v Sloveniji.

Hipoteza, ki jo preverja magistrsko delo je:

- zelene strehe zmanjšajo volumen odtoka padavinskih vod;
- njihova sposobnost zadrževanja vode je odvisna od strukture zelene strehe in klimatskih razmer ter predhodne vlažnosti substrata.

1.3 Cilji

Magistrsko delo temelji na podrobni analizi raziskav dejavnikov, ki vplivajo na zmanjšanje padavinskega odtoka na zeleni strehi. V delu bomo tako dosegli naslednje cilje:

- na podlagi podatkov iz literature izračun količin padavin, ki jih posamezni tipi streh zadržijo;
- meritve na testnih strehah ter modeliranje realnega stanja;
- meritve količin zadržane vode in izhlapevanja iz različnih substratov ter primerjava scenarijev, kako bi drugačna strešna konstrukcija na testnih strehah lahko izboljšala njene zadrževalne sposobnosti;
- določitev tipične strešne konstrukcije, ki bi idealno odgovarjala na padavinske razmere, značilne za različna podnebna območja v Sloveniji.

1.4 Metodološka izhodišča in struktura dela

Obdelava teme temelji na spoznanjih iz strokovne in znanstvene literature. Magistrsko delo je sestavljeno iz dveh temeljnih vsebinskih sklopov. Namen teoretičnega dela raziskave je bil podati izhodišča s področja zadrževanja urbanih padavinskih vod na zelenih strehah ter njihovim pozitivnim učinkom na urbano okolje. Podan je pregled strokovne literature ter

glavne ugotovitve in stališča s tega področja. Na osnovi pregleda zelenih streh v Sloveniji in pridobitvi treh testnih modelov, smo izračunali in primerjali količine padavin, ki jih posamezni tipi zelenih streh zadržijo.

V drugem, empiričnem delu so podana nova spoznanja, pridobljena z meritvami na treh testnih modelih zelenih streh. Z njimi smo pridobili podatke o zadrževalni sposobnosti in podatek o učinku evapotranspiracije posameznih zelenih streh. Z modeliranjem smo simulirali lokalne padavine v primerjavi z zadrževanjem substrata in evapotranspiracije.

Izmerili smo kakšno količino padavin zadrži naravna zemljina v primerjavi s substrati, ki se uporabljajo v komercialne namene, nato smo merili izhlapevanje vode. Na osnovi podatkov o količinah padavin smo določili tipično strešno konstrukcijo, ki bi ustrezala podnebnim značilnostim treh slovenskih krajev.

Sledila je primerjava vpliva različnih strešnih konstrukcij na izboljšanje njihovih zadrževalnih sposobnosti, pri čemer ima pomembno vlogo globina substrata, vrsta rastlin, število in tip uporabljenih plasti. Na koncu smo predlagali konstrukcijo zelene strehe, ki bi najbolje odgovarjala različnim podnebnim razmeram v Sloveniji.

Za celovito razumevanje, reševanje in analiziranje obravnavane problematike smo najprej preučili teoretična izhodišča in pregledali že opravljene raziskave na tem področju, ki so predstavljene v naslednjih treh poglavjih.

2 URBANA ODVODNJA

2.1 Zgodovina urbane odvodnje

Skoraj pri vseh arheoloških izkopavanjih civiliziranih naselbin najdemo tudi ostanke objektov za oskrbo in odvod vode (Panjan, 2002). Že najstarejše civilizacije so odstranjevale odpadke iz bližine svojega doma. Izkopanine iz bronaste dobe kažejo na odvoz trdih odpadkov in odstranjevanje odpadne vode s kanalizacijo v starih mestih, kot so Indija, Perzija, Asirija, Mezopotamija (Ninive in Babilon), Egipt (Memfis in Tebe), Palestina (Jeruzalem) in v majevskih ter inkovskih mestih v Srednji in Južni Ameriki (Kompore, 1991; Panjan, 2002).

Problematika odvoda padavinske vode se je v naseljih pojavila že v bronasti dobi, ko so ljudje prepustne površine nadomestili z nepropustnimi zgradbami in cestami. Ohranjeni primeri sistemov urbane odvodnje so ob reki Ind, Mezopotamiji, Perziji. V kamniti naselbini Skara Brae (Orknejski otoki na Škotskem) so odkrili, da je vsako bivališče imelo manjši prostor z odvodnjo, ki je bila speljana proti morju. Ta prostor je služil verjetno kot kopalnica (Vesuviano, 2014).

Ob reki Ind so odvajali padavinsko vodo po odprtih uličnih kanalih, prav tako so nanje priključili tudi hišno odpadno vodo. Nasprotno so v Mezopotamiji in Perziji imeli ločene sisteme za padavinsko in odpadno vodo. Perzijci so celo uzakonili, da je treba urbano padavinsko vodo ohraniti čisto, jo zbirati in uporabiti kot pitno vodo. Zbiranje deževnice je bilo značilno za obe civilizaciji (Vesuviano, 2014).

Minojska civilizacija s Krete je imela visoko razvit sistem odvodnje odpadnih in padavinskih vod, ki je potekal pod in nad zemljo.

Rimska civilizacija je bila znana po gradnji cest, mostov, viaduktov, akvaduktov, kanalizacije, kopališč itd. Največji odvodni kanal, imenovan Cloaca Maxima (Veliki kanal) v Rimu (Panjan, 2002; Vesuviano, 2014), so zgradili Etruščani v 6. stoletju pr. n. št. z namenom urejanja vodotoka, ki je tekkel v bližini Rimskega Foruma. Rimljani so kanal prekrili v začetku 2. stoletja pr. n. št. Tako je kanal Cloaca Maksima postal glavni kanal za odvajanje vode iz javnih kopališč, vodnjakov, javnih zgradb ter padavinskih vod, ki so bile priključene nanj. Šele okrog leta 100 so se pričeli neposredni hišni priključki kanalizacijskega sistema na Cloako Maksimo (Vesuviano, 2014).

S propadom rimskega imperija je zamrla tudi ideja o kanalizaciji, vodovodu in higieni. V srednjem veku se je v Evropi zmanjšal pomen urbane odvodnje. Spoznanja iz antike o povezanosti osnovne higiene in zdravja so šla v pozabo. Ljudje so urbane in odpadne vode

speljali neposredno v vodotoke, ob katerih so živeli. Širiti so se začele bolezni in veliko ljudi je umrlo.

2.2 Moderna urbana odvodnja

Konec 19. stoletja in v začetku 20. stoletja so odpadno vodo iz sanitarij in stoječe vode začeli povezovati z boleznimi. Skrb za higieno se je zopet pojavila z nastopom renesanse po epidemijah kolere v vseh večjih evropskih naseljih (Panjan, 2002). Namesto v greznice so odpadne vode speljali neposredno v novo zgrajeno kanalizacijo.

Prvi moderni kanalizacijski sistem so po mnenju Vesuviana (2014) začeli graditi leta 1843 v Hamburgu, v Londonu pa so prvi mešani kanalizacijski sistem začeli graditi leta 1859. V Parizu so kanalizacijsko omrežje začeli graditi leta 1808 (Panjan, 2002). Zaradi asfaltiranja urbaniziranih površin je naraščala tudi količina odvoda padavinskih vod. Sistem gradnje mešanega kanalizacijskega omrežja se je iz Londona razširil tudi v druga evropska in ameriška mesta ter se kot tak ohranil vse do sredine 60. let 19. stoletja.

Novejša urbana območja imajo ločen sistem za odpadne in padavinske vode. Mešani kanalizacijski sistemi niso bili nadomeščeni z ločenimi. Zaradi naraščanja števila prebivalcev in širjenja urbanega okolja preseki cevi ne zadoščajo potrebam. Prihaja do prelivanja vod in močnega onesnaževanja. Pogostost prelivanja mešanega kanalizacijskega sistema zmanjšamo tako, da zmanjšamo volumen padavinskega odtoka.

2.3 Trajnostni sistemi urbane odvodnje

Razvoj trajnostnega upravljanja s padavinskimi vodami je nastajal hkrati v različnih državah po svetu, zato zanj poznamo veliko izrazov (preglednica 1). Poimenovanja se nanašajo na obnovitev naravnega hidrološkega cikla.

V Evropi pogosto uporabljamo tudi pojem zelena infrastruktura. Zelena infrastruktura omogoča reševanje urbanih in klimatskih izzivov s sonaravno gradnjo. Cilj je zmanjšati količino padavinskega odtoka, zakasniti odtok, izboljšati njegovo kakovost in ustvariti dodatne habitate z multifunkcionalnimi zelenimi površinami, ki imajo mikroklimatski vpliv, saj znižajo temperaturo zraka, hkrati izboljšajo njegovo kakovost, voda je manj onesnažena, prav tako zemlja. Vse to omogoča ljudem višjo kakovost življenja (The Vermont Rain Garden, 2013).

Preglednica 1: Izrazi za trajnostno upravljanje s padavinskimi vodami (Fletcher in sod., 2015)

Table 1: *Sustainable Stormwater runoff management terminology (Fletcher et al., 2015)*

IZRAZI	DRŽAVE
Low impact Development (LID)	Severna Amerika in Nova Zelandija
Water sensitive urban design (WSUD)	Avstralija
Sustainable urban drainage systems (SUDS) ali Sustainable drainage systems (SuDS)	Velika Britanija
Best management practices (BMPs)	ZDA in Kanada
Stormwater control measures (SCMs)	ZDA
Alternative techniques (ATs) ali Compensatory techniques (CTs)	Francija
Source control	Severna Amerika
Green Infrastructure (GI)	Amerika in Evropa

Zmanjšanje odtoka dosežemo s prepustnimi površinami v parkih, igriščih, na parkiriščih. Kompore (2002) predlaga tudi zadrževanje na strehah, ponikanje na naravno prepustnih površinah (vrtovi, parki), ponikanje pod sicer neprepustnimi površinami (parkirišča, cestišča), zadrževanje in ponikanje na za to posebej namenjenih površinah (suhi in/ali mokri zadrževalniki), zadrževanje v podzemnih zadrževalnikih. S temi načini zaščitimo količino in kakovost površinske in podzemne vode, kar pomeni, da poskušamo zmanjšati volumen padavinskih vod in odstraniti njihove polutante.

Z zelenimi strehami padavinsko vodo skladiščimo in jo zadržimo, ko pronica skozi plasti zelene strehe, pa se tudi prečisti. Poleg zelenih streh, ki jih bomo natančneje proučili v našem delu, bomo v nadaljevanju kot novejši alternativni način upravljanja s padavinskimi vodami, na kratko opisali tudi modre in modro-zelene strehe. Kombinacija modre in zelene strehe se je izkazala za najboljšo rešitev učinkovitega zmanjšanja padavinskega odtoka s streh.

2.4 Modre in modro-zelene strehe

Modre strehe so precej nov alternativni način upravljanja s padavinskimi vodami. Njihov namen je izključno skladiščenje in počasni izpust padavinskih vod z namenom zmanjšanja odtoka in potencialnih poplav. Pogosto so modre strehe vključene v sklopu zelenih streh za potrebe namakanja vegetacije. Sestavlja jih svetel material zaradi zmanjšanja urbanih

toplotnih otokov. Z njimi se zmanjša oziroma omeji potreba po podzemeljskem skladiščenju padavinskih vod (McGar, 2015).

Modra streha začasno skladišči padavinske vode v zadrževalnem sistemu na strehi. Njen namen je, da zadrži in upočasni padavinski odtok. Hitrost odtoka se lahko prilagaja z velikostjo odtoka. Premer odtoka se lahko spreminja od 10 do 50 mm.

Modre strehe so najbolj koristne v visoko urbaniziranih mestnih središčih z mešanim kanalizacijskim sistemom. Padavinsko vodo močnih nalivov zadržijo in začasno preprečijo, da bi odtekla v kanalizacijski sistem. Po nevihti voda počasi odteče (Roy in sod., 2014).

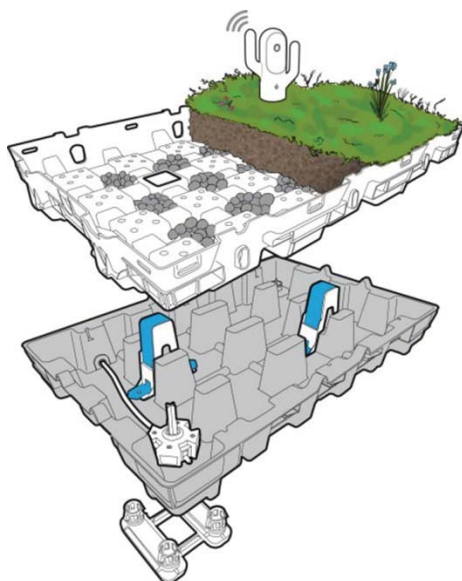
Oddelek za varstvo okolja v New Yorku je podprl pilotni program izvedbe sistema modrih streh v mestu, s katerimi so želeli prikazati njihov vpliv na zmanjšanje padavinskega odtoka. Med tremi uporabljenimi tehnikami modrih streh je bila najbolj uspešna tehnika z moduli modrih streh. Modul je bil napolnjen s kamenjem in je zadržal 30 mm vode. Sistem je zmanjšal 45 % padavinskega odtoka posamezne nevihte. Moduli so praktični, ker jih lahko postavimo okoli odtokov na strehah in jih po potrebi tudi odstranimo. Takšen sistem ne zahteva dodatnega vodozadrževalnega sloja (Roy in sod., 2014).

McGar (2015) meni, da bo tehnologija modrih streh v prihodnosti postala vsakdanja praksa in glavni del uravnavanja odtoka padavinskih vod.

Pri pregledu literature smo zasledili, da je francosko podjetje Vegetal i.D. leta 2014 razvilo edinstveno kombinacijo modre in zelene ekstenzivne strehe (slika 1). Podjetje je postavilo nove standarde modre in zelene infrastrukture na področju upravljanja s padavinskimi vodami. Njihova streha Hydroventiv je pametna streha, za katero so leta 2015 prejeli zlato nagrado za inovacijo pametnih rešitev upravljanja s padavinskimi vodami na mestu nastanka.

Streha ima plastični podstavek, ki deluje kot zbiralnik vode z dodatno kapaciteto zadrževanja (100 mm), pasivno namaka rastline in nadzoruje odtok s strehe. Odtok je ves čas enakomeren.

Drugi model modro-zelene strehe, ki ga je podjetje testiralo je sistem s senzorjem, ki napove padavinske dogodke. Voda je zadržana med padavinskim dogodkom, kasneje jo lahko uporabijo rastline. Ko sistem predvidi padavine, se zbiralnik vode izprazni, da bi lahko zadržal vso količino vode naslednjega padavinskega dogodka.



Slika 1: Modro-zelena pametna streha podjetja Vegetal i. D. (Vegetalid, 2016)

Figure 1: *Vegetal i. D. smart blue-green roof (Vegetalid, 2016)*

Menimo, da je slabost obstoječe rešitve v uporabi elektronskih sistemov, ki lahko predstavljajo težave pri vzdrževanju. Prav tako je slabost samega vzdrževanja strehe, ki ga proizvajalec svetuje 4-krat letno. Vsakič je potrebno očistiti nekaj točk, kjer je odtok s strehe. Pri tem je potrebno odstraniti zgornji del sistema, ki predstavlja zeleno streho in očistiti odtoke modrega dela strehe. Nato je potrebno preveriti ali sistem deluje. Sistem je treba napolniti z vodo in pogledati, ali voda odteka počasi. Preveriti je potrebno delovanje zapisovalnika podatkov in internetnih povezav.

Menimo, da je takšna rešitev predraga in nedostopna večjemu krogu potrošnikov, zato smo v zaključku magistrskega dela pripravili idejni načrt modro-zelene strehe, ki ima enostavno konstrukcijo, minimalne zahteve za vzdrževanje ter nima delov, ki bi se lahko hitro pokvarili. V tem vidimo prednost rešitve tako za kupca kot tudi za proizvajalca. Takšna streha bi učinkovito zmanjšala padavinski odtok v vseh obravnavanih podnebnih razmerah

3 ZELENE STREHE

V literaturi se poleg pojma zelene ali ozelenjene strehe uporabljajo še druga poimenovanja, kot na primer vegetacijske, eko, bivalne ali vrtno strehe. Gre za strehe, ki imajo vegetacijske sloje in rastline kot zaključni del (Kunič, 2012). V tuji literaturi se pojavlja poimenovanje green roofs, ecoroofs, living roofs.

Zelene strehe imajo velik potencial za trajnostno načrtovanje mest, saj lahko nadomestijo del naravne krajine. Imenujemo jih tudi »mestna pljuča« (Mirt, 2012), saj rastline vežejo ogljikov dioksid, prašne delce, smog, sproščajo pa kisik in tako izboljšujejo kakovost zraka.

3.1 Zgodovina zelenih streh

S travo pokrite strehe so že od nekdaj pokrivalo človekova bivališča zaradi boljše izolacije (Berndtsson, 2010). V severnih državah so s svojimi lastnostmi varovale pred mrazom, v vročih podnebnih razmerah pa so ščitile pred vročino. V Skandinaviji so se pojavile pred približno 3800 leti, poznali so jih že Vikingi (Kunič, 2008c; Mirt, 2012). Strehe so tam bile pokrite s šoto, ki je njihov tradicionalni gradbeni material, in porasle s travo. V arhitekturi skandinavskih držav in na Islandiji so se ohranile vse do danes. Še v 19. stoletju je več kot polovica Islandcev živelo v hišah z zeleno streho (Kunič, 2008c). Znani so terasasti previsni vrtovi Babilona iz sedmega stoletja pr. n. št. (Kunič, 2008c; Mirt, 2012) in antične rimske vile z zelenimi strehami. V času carske Rusije je Kremelj imel več kot 6 ha zelenih streh. Vladarska družina Medici iz Toskane je več stoletij podpirala izgradnjo zelenih streh (Kunič, 2008c). Proti koncu 19. stoletja so v Nemčiji gradili nizkocenovne hiše za industrijske delavce, ki so jih prekrili s prodom, peskom in travo za protipožarno zaščito (Köhler, 2006).

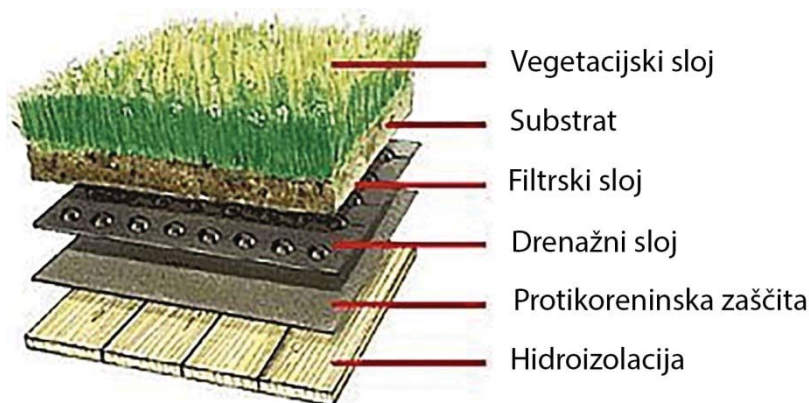
Raziskovanje zelenih streh kot urbanih habitatov se je začelo v Nemčiji v 50. letih, raziskave tankega substrata so bile v 60. letih. V komercialne namene proizvajajo sodobne zelene strehe vse od leta 1970. Po letu 1980 so v Nemčiji (največ v Berlinu) gradili zelene strehe z namenom vračanja vegetacije v urbano okolje. Primarni cilj teh sistemov je zmanjšanje padavinskega odtoka s streh, imajo pa še številne druge koristi (Vesuviano, 2014). Veliko izkušenj imajo z zelenimi strehami tudi v Severni Ameriki, Avstraliji in na Japonskem. Izvedba zelene strehe je uspešna v različnih klimatskih razmerah.

V nekaterih državah so zelene strehe zakonsko predpisane, saj z njimi nadomeščajo zelene površine, ki so jih izgubili zaradi urbanizacije. V Nemčiji je za gradnjo možno pridobiti subvencije in kasneje znižanje pristojbin za kanalizacijsko omrežje (Simonič, Dobrilovič, 2005).

3.2 Sestavni elementi sodobnih zelenih streh

Ugotavljamo, da je zelo pomembno znati pravilno skonstruirati zeleno streho z namenom uresničevanja točno določenih ciljev. Pogosto pa zelene strehe gradimo, brez da bi želeli doseči določene cilje. Pravilna izbira posameznih komponent konstrukcije je odvisna od geografske lege oziroma od podnebnih razmer.

Zelena streha je navadno sestavljena iz štirih plasti (slika 2): drenažni in filtrski sloj, substrat in vegetacija. Med različnimi proizvajalci zelenih streh se pojavljajo velike razlike v debelini materiala in njegovi sestavi ter v vrsti vegetacije (Berndtsson, 2010). Pod to konstrukcijo je na streho treba dati hidroizolacijo in protikoreninsko zaščito.



Slika 2: Konstrukcija zelene strehe (Sustainable designs, 2016)

Figure 2: Construction of green roof (Sustainable designs, 2016)

Obstajajo gospodarne izvedbe zelenih streh, pri katerih ima en sloj več funkcij. Tak sistem vsebuje tri sloje: zaščitno-zadrževalni, ki dobi še funkcijo filtrirnega, nato rastni, ki zaradi posebne sestave prevzame tudi funkcijo zbiralno-drenažnega sloja, in vegetacijski sloj (Primc, 2011).

Izvedba zelene strehe je možna na vsaki dobro zasnovani konstrukciji. Sestavljena je iz različnih slojev, ki pa so odvisni od tega, ali bo ozelenitev ekstenzivna ali intenzivna.

Kunič (2008a) opozarja, da moramo pri projektiranju zelenih ravnih streh upoštevati geografske in mikroklimatske pogoje določene lokacije (povečan vpliv vetra, snega, toče in drugih padavin), izbrati je treba rastline iz regionalnega območja, da bi bila rast čim bolj uspešna.

Kunič (2008b) navaja spodaj opisane sestavne elemente zelenih ravnih streh.

Pod podlago zelene strehe so v smeri proti površini naštetje plasti, ki jih uporabljamo pri ravni strehi:

- nosilna konstrukcija,
- parna zapora,
- toplotna izolacija,
- hidroizolacija,
- sledi protikoreninska zaščita, ki preprečuje vdor korenin skozi sloje ravne strehe in posledično zamakanje konstrukcije.

V naslednjih podpoglavjih bomo opisali sloje, ki sledijo zgoraj naštetim in so del zelene strehe.

3.2.1 Zaščitni in vodozadrževalni sloj

Zaščitni sloj je iz poliestrskega filca. Predstavlja mehansko zaščito za spodnje sloje in zadržuje vodo, ki je pomembna za vegetacijo v sušnih obdobjih, saj nadomešča namakalni sistem. Za zadrževanje se uporabljajo vodne čaše ali vodovpojen filc. Veliko vpojnost imajo substrati kamene volne surovih neobdelanih mineralnih vlaken različnih debelin (npr. debelina 4 cm vpije 29 l vode na m²) (Lešnik, 2016).

3.2.2 Drenažni sloj

Drenažni sloj je odvisen od vrste substrata in podnebnih razmer. Namenjen je odvajanju odvečne padavinske vode v odtok in je lahko iz različnih materialov (npr. peska, drobljencev, drobirja iz opeke, iz čepastih membran, ki služijo tudi kot vodozadrževalni sloj za potrebe vegetacije v sušnih obdobjih). Uporabljajo se tudi plošče za zadrževanje vode iz polietilena ali ekspaniranega polistirena (Primc, 2011). Predolgo zastajanje padavinske vode v drenažnem sloju povzroča gnitje korenin.

3.2.3 Filtrski sloj

Filtrski sloj je iz prepustnega poliestrskega filca, ki preprečuje izpiranje zemljine, substrata, peska in drugih delcev v drenažni sloj in nato v odtok. Če tega sloja ne bi uporabili, bi se v vodnih kotanjah nabral mulj, ki bi preprečeval zadrževanje vode (Finale, 2014).

3.2.4 Rastni substrat

V preteklosti je rastni substrat (v nadaljevanju substrat) predstavljal dobro vodoprepustna peščena glina, katere slabost je bila prevelika teža za nosilno konstrukcijo. Sledil je razvoj v smeri lažjih substratov. Za ozelenitev streh je primernejši anorganski substrat.

Mešan substrat ima pri ekstenzivni ozelenitvi največ 20 % (najpogosteje pa od 3 do 10 %) organskih primesi, ki zagotavljajo hranljive snovi. Preveč hranil v substratu namreč škodljivo vpliva na rastline (Kunič, 2008b). Največkrat se za substrate uporablja mešanica vrtna zemlje z granulatom vulkanskih poroznih kamnin in dodatkom organske snovi, navadno je to humus ter del šote. Anorganski deli substrata so ekspanzirani skrilavec, plovec, apnena glina, opeka, terakota.

Substrat vsebuje mineralna hranila za rastline, imeti mora veliko sposobnost vpijanja in zadrževanja vode, hkrati pa mora biti prepusten za zrak (Finale, 2014). Najmanjša debelina substrata je 7 cm, izjemoma 5 cm, poznamo pa tudi primere s samo 3 cm debelimi sloji. Pri intenzivni ozelenitvi z grmičevjem je substrat debel vsaj 25 cm. Največja debelina znaša tudi več kot 120 cm. Priporočljiv pH substrata je od 6,5 do 8,0, saj se s časom stopnja kislosti substrata povečuje. Pomemben dejavnik je zrnavost substrata, saj je od nje odvisno zadrževanje vode, ki je pomembno za rast rastlin.

3.2.5 Vegetacijski oziroma ozelenitveni sloj

Pri ekstenzivni ozelenitvi streh vegetacija ne potrebuje posebne nege, vendar pa je izpostavljena velikim klimatskim obremenitvam. Vegetacijski sloj zahteva izbiro različnih, a po zahtevnosti sorodnih rastlin. Rastline se lahko sejejo, sadijo posamično, pri ekstenzivnih strehah se lahko ozelenjujejo z že pripravljenimi tepihi sedumov (nizko rastlinje) v rolah (Lešnik, 2016).

Mešanica substrata mora posnemati razmere, ki jih izbrane rastline potrebujejo v naravi, kjer uspevajo na suhih, tankih in s hranili siromašnih tleh. Rastline so prilagojene na sušo in tudi na daljše deževno obdobje (Kunič, 2008b). To so rastline planinskega izvora, ki jih ni treba kositi (Finale, 2014).

Kunič (2012) navaja, da morajo rastline biti neobčutljive na temperaturna nihanja in na onesnažen zrak, imeti morajo plitek koreninski sistem in sposobnost, da se hitro razrastejo.

3.3 Delitev zelenih streh glede na vrsto ozelenitve

Ozelenitev zelenih streh delimo v tri sklope:

- ekstenzivna ozelenitev (gomoljnice, homulice, lišaji, zeli grmovnice);
- polintenzivna ozelenitev (trave);
- intenzivna ozelenitev (drevesa, trava, grmovje).

Razlika med vsemi vrstami ozelenitve je predvsem v tem, da se razlikujejo po dostopnosti na streho, izboru rastlin, debelini substrata, višini investicijskih stroškov, po stroških in pogostosti vzdrževanja (Ilešič, 2010). V splošnem sta znana dva načina ozelenjevanja zelenih streh: ekstenzivni in intenzivni.

3.3.1 Ekstenzivna zelena streha

Ekstenzivna zelena streha predstavlja najpogostejšo ozelenitev (slika 3). Te strehe se uveljavljajo že 50 let. Na njih so zasajene nizko rastoče rastline, ki so zelo odporne in značilne za alpsko vegetacijo (Vesuviano, 2014). Ozelenitev je manj obremenjujoča za streho, saj je obtežba od 50 do 170 kg/m² (Kunič, 2008a), kar ne zahteva posebne nosilnosti objekta.

Zasajene rastline so manj zahtevne za vzdrževanje, v prvih sezonah je priporočljivo gnojenje. Namakanje je priporočljivo le v daljših sušnih obdobjih. Rastline imajo nizko rast, plitve korenine in so odporne proti suši in občasnemu daljšemu deževju (npr. nagelj, perunika, rman, netresk, sivka, bor, pušpan, trave, mahovi, tudi kaktusi, ki so odporni proti zmrzali). Zanje je značilno, da gosto prekoreninijo substrat in se dobro razmnožujejo. Zaradi tanke plasti substrata od 4 cm in največ do 15 cm (Kunič, 2008a; Vesuviano, 2014), ki vsebuje malo organskih snovi (Vesuviano, 2014), je rast plevelu otežena (Ilešič, 2010).

Ekstenzivna ozelenitev je primerna tako za ravne strehe kot tudi za strehe z manjšim naklonom od 2° do 30° in več.



Slika 3: Ekstenzivna zelena streha (Bellingham Green Roofs, 2009)

Figure 3: Extensive green roof (Bellingham Green Roofs, 2009)

3.3.2 Intenzivna zelena streha

Vegetacijsko plast intenzivnih zelenih streh predstavljajo večinoma grmovnice in nizko rastoča drevesa, kot so javor, bor, hortenzija, vrtnice vzpenjavke itd. (slika 4). To so rastline, ki zahtevajo stalno vzdrževanje, gnojenje in zalivanje. Pod intenzivno ozelenitvijo vključujemo tudi redke primere, kot je postavitve pregrad, različnih poti in majhnih bazenčkov ter vodnjakov. Potrebna je substratna podlaga debeline najmanj 20 cm, pri visokih rastlinah tudi do 100 cm in več, celo do 10 m (Vesuviano, 2014). Obtežitev strehe je od 300 do 450 kg/m² (Kunič, 2008a). Takšne strehe imajo lahko le minimalne nagibe.

Intenzivna ozelenitev je precej obremenilna za streho, njeno vzdrževanje je zahtevno, saj rastline potrebujejo veliko nege, stalno namakanje in občasno gnojenje, zato z ekološkega vidika intenzivna ozelenitev ne pomeni nobene prednosti pred cenejšo in lažjo ekstenzivno ozelenitvijo (Kunič, 2008a).



Slika 4: Intenzivna zelena streha (Morrison in Vaterlaus, 2016)

Figure 4: *Intensive green roof (Morrison and Vaterlaus, 2016)*

3.4 Prednosti in slabosti zelene strehe

Zelene strehe imajo v primerjavi z navadno streho daljšo življenjsko dobo, saj jih ščitijo pred vetrom, dežjem in temperaturnimi spremembami. Zelena streha je torej dobra toplotna, protipožarna in zvočna zaščita objekta, sama vegetacijska plast pa dodatno ščiti ostale elemente, ki so pod njo. Zaradi tega je življenjska doba zelene strehe daljša in doseže od 70 do 100 let. Z njimi dvignemo kvaliteto bivanja v mestih.

Kljub številnim prednostim pa imajo zelene strehe v primerjavi z drugimi alternativnimi oblikami odvodnje to slabost, da voda, ki ponika skozi zeleno streho, ne dviga nivoja podtalnice (Vesuviano, 2014). V primerjavi s tradicionalno ravno streho je investicijska cena

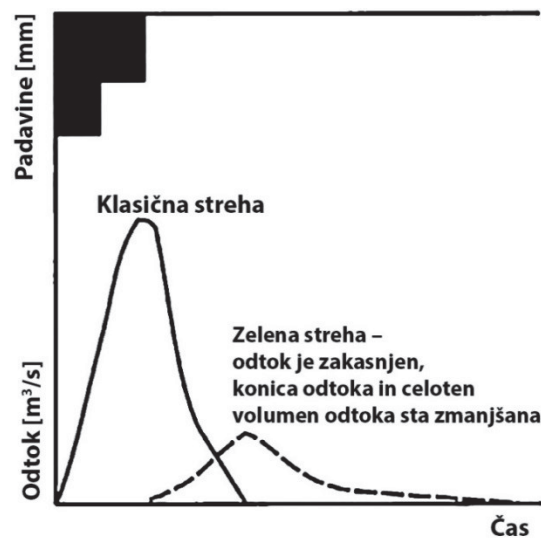
zelenih streh višja, visoka je obremenitev statičnega sistema in tudi stopnja vzdrževanja, ki se razlikuje glede na vrsto ozelenitve zelene strehe.

Primarni namen sodobnih zelenih streh je zmanjšati odtok padavinskih vod s streh in njihova časovna zakasnitev, kar zmanjša možnost poplav. Zelene strehe imajo še številne druge ekološke koristi, tako tudi estetske, sociološke, ekonomske (Simonič, Dobrilovič, 2005). Njihova ekološka vloga prispeva k izboljšanju okoljskih razmer v urbanem okolju.

3.4.1 Uravnavanje in razporejanje padavinske vode

Zelena streha zadrži padavinsko vodo, zakasni začetek padavinskega odtoka ter konico odtoka. Celotni volumen odtoka je zmanjšan v primerjavi s tradicionalno streho (grafikon 1).

Koliko vode zadrži posamezna zelena streha, je odvisno od intenzitete padavin, debeline substrata in stopnje evapotranspiracije, ki dodatno zmanjša odtok. Posledično se zmanjša količina padavinske vode v mestnem kanalizacijskem omrežju. Vpliv zelenih streh na zadrževanje padavinskih vod bomo podrobneje opisali v poglavju 3.5.



Grafikon 1: Primerjava odtoka s tradicionalne in zelene strehe v odvisnosti od padavin (Stovin in sod., 2012: str. 149)

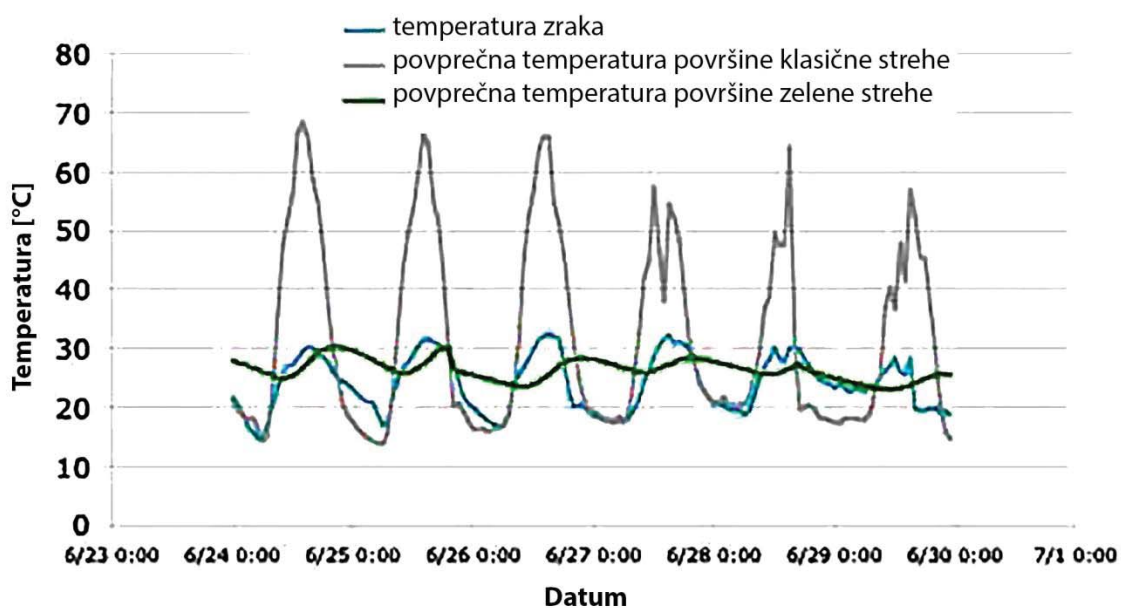
Graph 1: Stormwater runoff from traditional and green roof dependent on precipitation (Stovin et al., 2012: p. 149)

3.4.2 Uravnavanje temperature zraka

V urbanih središčih se zaradi segrevanja objektov in ostalih površin ustvarjajo toplotni otoki. Na strehah dosežejo temperature do 70 °C (Mirt, 2012). Takebayashi in Moriyama (2007) sta primerjala temperaturo zraka nad zeleno streho in nad streho z visoko odbojnostjo sončnega

sevanja ter ugotovila, da evaporacija v sklopu zelenih streh blaži učinek urbanih toplotnih otokov. Znižanje temperature okoliškega zraka v letnem času je za 3-4 °C, kar ima ugoden vpliv na mikroklimo (Mirt, 2012).

Grafikon 2 prikazuje gibanje povprečne temperature površine zelene strehe, ki se giblje med 25 in 30 °C, najvišja temperatura površine tradicionalne strehe doseže skoraj 70 °C podnevi in okoli 15 °C ponoči, zunanja temperatura zraka se giblje med 33 °C podnevi in 14 °C ponoči. Zelena streha zmanjša maksimalno temperaturo zraka za približno 38 °C.



Grafikon 2: Povprečna temperatura površine tradicionalne in zelene strehe (prirejeno po Technical Preservation Services, 2016)

Graph 2: The average surface temperature of a traditional roof and a green roof (adapted from the Technical Preservation Services, 2016)

3.4.3 Kakovost zraka

Strešna vegetacija absorbira toksine, škodljive pline (npr. ogljikov dioksid), prašne delce in tvori kisik. Na zelo urbaniziranih območjih so zelene strehe edina alternativa urbanim gozdnim površinam. Tako je npr. v Seulu v Južni Koreji, kjer na prebivalca pripada 6,78 m² urbanega gozda, kar je le okoli dve tretjini minimalnih priporočil Svetovne zdravstvene organizacije (9 m² na prebivalca) (Hong, Kim, Koo, 2012). Yang, Yu in Gong (2008) so v Chicagu raziskovali vpliv zelenih streh na zmanjšanje onesnaženja zraka (O₃, NO₂, PM10, SO₂) in ugotovili, da 1 ha površin zelenih streh odstrani 85 kg zračnih polutantov na leto.

3.4.4 Absorpcija polutantov

Zemlja predstavlja naravni filter, kjer se padavinske vode očistijo. Težke kovine v padavinski vodi se vežejo na talne delce in se tako ne spirajo v kanalizacijsko omrežje ter v podtalnico. Vijayaraghavan in Joshi (2014) sta raziskovala potencial zelenih streh za zadrževanje različnih onesnaževal. Rezultati so pokazali zadrževanje različnih kovin (Ca, Mg, Al, Fe, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb in Cd) in hkrati nevtralizacijo rahlo kisle deževnice. Raziskava potrjuje vpliv zelenih streh na izboljšanje kvalitete vode.

3.4.5 Zvočna izolacija

Zelene strehe zmanjšajo hrup v notranjih prostorih, kar sta v svoji raziskavi potrdila Connelly in Hodgson (2013). Na osnovi laboratorijskih meritev in vrednotenj zelenih streh z različno debelim substratom, vsebnostjo vode in z različno vegetacijo sta ugotovila, da zelena streha zmanjša prenos hrupa za 10-20 dB.

3.4.6 Dodaten življenjski prostor za rastline in živali

Zelene strehe predstavljajo naravni habitat za mnoge rastline in živali v urbanem okolju ter so nadomestek za izgubljene naravne zelene površine. Največja biološka pestrost je na strehah poraščenih z avtohtonimi vrstami. Madre in sod. (2014) so v študiji 115 zelenih streh identificirali 176 rastlinskih vrst, od tega jih je bilo 86 % avtohtonih, in ugotovili, da so zelene strehe kljub svoji legi v urbani pokrajini ugoden življenjski prostor za avtohtone vrste. Na njihovo pestrost pa vpliva predvsem debelina substrata.

3.4.7 Uporaba recikliranega gradbenega materiala

Poleg ekološkega vidika imajo zelene strehe tudi to prednost, da lahko za njihovo konstrukcijo uporabimo tudi recikliran gradbeni material. Mickovski in sod. (2013) so testirali primernost inertnega gradbenega materiala kot del substrata ekstenzivnih zelenih streh. Ugotovili so, da je primeren za substrat in da zagotavlja dobro odvajanje padavinske vode.

Zelene strehe imajo še veliko več prednosti, kot smo jih zgoraj opisali. Vendar niso optimizirane, da bi dosegale te koristi. Več kot je raziskav, več vprašanj se pojavlja, zato je potreba po nadaljnjem razvoju zelenih streh in možnih je še veliko izboljšav (Berndtsson, 2010). V nadaljevanju se bomo ukvarjali z učinkom zelenih streh na zmanjšanje padavinskega odtoka.

4 DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA ZMANJŠANJE PADAVINSKEGA ODTOKA Z EKSTENZIVNE ZELENE STREHE

Pri pregledu raziskav smo se osredotočili na tiste, ki raziskujejo dejavnike ekstenzivnih zelenih streh, le-ti pa zmanjšujejo padavinski odtok na ravni stavbe. Zanimalo nas je, kaj najbolj vpliva na količino skladiščenja padavinskih vod in na njihovo dinamiko odtoka, s čimer so povezani pojmi, kot so zakasnitev odtoka, zmanjšanje odtoka in zadrževanje oz. retencija padavinske vode.

Zakasnitev odtoka pomeni časovno zakasnitev, izraženo v minutah, ki se pojavi med padavinami, ki padejo na streho in niso zadržane, ter med njihovim odtokom (Stovin in sod., 2015).

Zmanjšanje odtoka izraža razliko med konico padavin in konico odtoka, izraženo v odstotkih. Visoka stopnja zmanjšanja odtoka pomeni tudi večjo zakasnitev (Vesuviano, 2014).

Zadrževanje oziroma retencija označuje padavine, ki ostanejo v sistemu zelene strehe in je ne zapustijo v obliki odtoka (t. i. začetne izgube). Zadržane padavine naknadno zapustijo streho v procesu evapotranspiracije (Stovin in sod., 2015).

Povprečna maksimalna zadrževalna kapaciteta zelene strehe je približno enaka četrtini debeline njenega substrata (Vesuviano, 2014). Ugotovitve številnih raziskav v različnih klimatskih območjih potrjujejo, da lahko ekstenzivne zelene strehe zadržijo od 50 do 80 % celotnih padavin (Vesuviano, 2014).

Krishnan in Ahmad (2012) sta pregledala 19 člankov od leta 2001 do 2011. Raziskave se usmerjajo predvsem v preučevanje dejavnikov, ki lahko zmanjšajo volumen padavinskega odtoka v kanalizacijsko omrežje (tudi na letni ravni) in povečajo zadrževalni čas zelenih streh v posameznih padavinskih dogodkih, vendar je učinek zadrževanja različen. Dejavniki so analizirani na osnovi eksperimentalnih meritev padavinskih odtokov in drugih podatkov iz literature.

Raziskovalci so kot najpomembnejše identificirali naslednje dejavnike:

- **značilnosti sestave zelene strehe** (debelina in vrsta substrata ter njegova predhodna vlažnost, poraščenost in vrsta vegetacije, naklon strehe, starost zelene strehe);
- **vremenske razmere** (dolžina predhodnega sušnega obdobja, letni čas, temperatura zraka, vetrovnost, vlažnost);
- **značilnosti posameznega padavinskega dogodka** (intenziteta in trajanje padavin).

Poleg naštetih dejavnikov, ki jih bomo v nadaljevanju podrobneje opisali, se vedno pogosteje raziskujejo tudi hidrološke značilnosti rastlin (transport vode skozi rastline) v odvisnosti od izbire različnih vrst in uporaba avtohtonih rastlin pri zasaditvi.

Preglednica 1 prikazuje vrednosti zadrževalnih sposobnosti ekstenzivnih zelenih streh različnih avtorjev prirejen po Nawaza, McDonald, Postoyko (2015). Odstotek zadrževanja padavin se giblje najpogosteje med 50 in 80 %. Najnižja vrednost zadrževanja je bila 34 %, najvišja pa 82,8 %.

Preglednica 2: Vrednosti zadrževalnih sposobnosti ekstenzivnih zelenih streh različnih avtorjev prirejen po Nawaza, McDonald, Postoyko (2015)

Table 2: The reported retention values from various studies on extensive green roofs adapted from Nawaza, McDonald, Postoyko (2015)

Avtorji	Zadrževanje [%]	Območje
Fassman-Beck in sod. (2013)	56,0	Auckland, Nova Zelandija
Voyde in sod. (2010)	66,0	Auckland, Nova Zelandija
Hathaway in sod. (2008)	64,0	Severna Karolina, ZDA
Buccola in Spolek (2011)	54,0	Portland, ZDA
Gregoire in Clausen (2011)	51,4	Connecticut, ZDA
Carpenter in Kaluvakolanu (2011)	68,3	Michigan, ZDA
VanWoert in sod. (2005)	82,8	Michigan, ZDA
Getter in sod. (2007)	80,8	Michigan, ZDA
Morgan in sod. (2013)	50,0	Illinois, ZDA
Carson in sod. (2013)	36,0	New York, ZDA
Stovin in sod. (2013)	59,0	Sheffield, Velika Britanija
Stovin in sod. (2012)	50,2	Sheffield, Velika Britanija
Stovin (2010)	34,0	Sheffield, Velika Britanija
Mentens in sod. (2006)	54,0	Bruselj, Belgija
Seters in sod. (2009)	63,0	Toronto, Kanada
Fioretti in sod. (2010)	68,0	severozahodna in osrednja Italija
DeNardo in sod. (2005)	45,0	Pensilvanija, ZDA
VanWoert in sod. (2005)	60,6	Michigan, ZDA
Carter in Rasmussen (2006)	78,0	Georgia, ZDA

4.1 Debelina in sestava substrata

Povezava med padavinami in odtokom na letni ravni je močno povezana z debelino substrata zelene strehe (Mentens, Raes in Hermy, 2006). Sposobnost zadrževanja padavin na letni ravni se giblje med 60 % za povprečno 150 mm substrata, 55 % za povprečno 100 mm substrata in 50 % za 50 mm substrata, kar so dokazali s simulacijami Mentens, Raes in Hermy (2003) za Bruselj, ki ima povprečno letno količino padavin 821 mm.

Voyde, Fassman in Simcock (2010) so ugotovili, da povečanje debeline substrata od 50 na 70 mm ne doprinese k dodatnemu zmanjšanju padavinskega odtoka z zelene strehe.

Stovin in sod. (2015) navajajo, da je najbolj porozen substrat imel najnižje zadrževanje in zakasnitev odtoka. Substrat na osnovi drobljene opeke je pri manjših padavinskih dogodkih imel večjo zadrževalno sposobnost v primerjavi s substratom iz ekspanzirane glin¹.

Pravilna struktura substrata je pomembna za dolgotrajno uspešno rast vegetacije. Poleg dobrega zadrževanja mora substrat zagotavljati tudi dobro drenažo. Če ostane preveč vode v substratu, bi to lahko škodilo rastlinam (Hui in Chu, 2009).

4.2 Klimatske značilnosti in vreme

4.2.1 Vpliv podnebja na padavinski odtok

Konstrukcija zelene strehe je odvisna od podnebja in vremena. Večina raziskav je bila narejenih v zmernotoplem pasu. Tehnologija zelenih streh se uporablja v vseh klimatskih razmerah, vendar učinek ni isti (Krishnan in Ahmad, 2012).

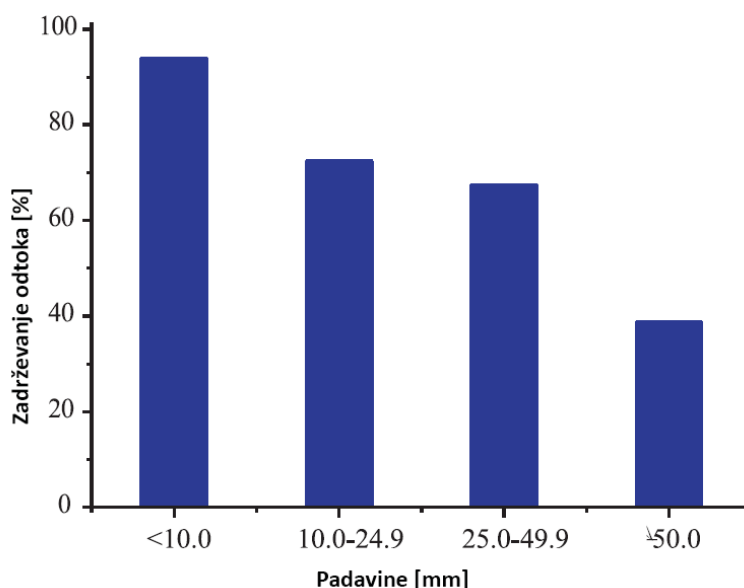
Köhler (2001) predlaga, da imajo lahko vroča, vlažna tropska območja večje koristi od zelenih streh, saj je količina padavin stoletnih padavinskih dogodkov v zmernotoplem pasu skoraj enaka povprečni letni količini padavin v tropskih območjih. Velika povprečna letna količina padavin ter visoke temperature preko celega leta pa omogočajo vegetacijsko rast. Za subtropske klimatske razmere Aucklanda Voyde, Fassman in Simcock (2010) ugotavljajo, da sezonske razlike ne vplivajo bistveno na padavinski odtok, česar ostali avtorji ne potrjujejo (poglavje 4.2.3).

¹ Ekspanzirana glina oziroma glinopor (ang. LECA-Lightweight Expanded Clay Aggregate) nastane pri žganju glin pri zelo visokih temperaturah (1200 °C).

4.2.2 Vpliv trajanja in intenzitete padavin na padavinski odtok

Na zadrževanje padavinskih vod vplivajo zunanji dejavniki, kot sta na primer trajanje in intenziteta padavin, kar so z računalniškimi simulacijami odkrili Hilten, Lawrence in Tollner (2008), ki poudarjajo tudi pomen stopnje evaporacije, transpiracije in začetnih pogojev vlažnosti substrata. Z modelom so simulirali padavinski odtok za posamezne nevihte z različno intenziteto. Zelena streha s substratom debeline 10 cm je v celoti zadržala nevihte do 2 cm. Pri večjih nevihtah se podaljša čas odtoka in zmanjša prvi val, ki je značilen za neprepustne površine.

Zhang in sod. (2015) so v raziskavi na Kitajskem ugotovili, da je kapaciteta zadrževanja padavinskih vod pri zelenih strehah odvisna od debeline substrata in intenzitete padavin. Pojavljala se je v razponu med 35,5 in 100 %, v povprečju pa je dosegala 77,2 %. Na letni ravni bi zelena streha zadržala 68 % padavin. Volumen zadrževanja padavinskih vod je bil odvisen od intenzitete padavin. Manjše nevihte (< 10 mm) so bile zadržane 94 %, srednje nevihte (10-24,9 mm) so bile zadržane > 72 % in večje nevihte (25-49,9 mm) > 67 % in skoraj 39 % nevihte večje od 50 mm (grafikon 3).



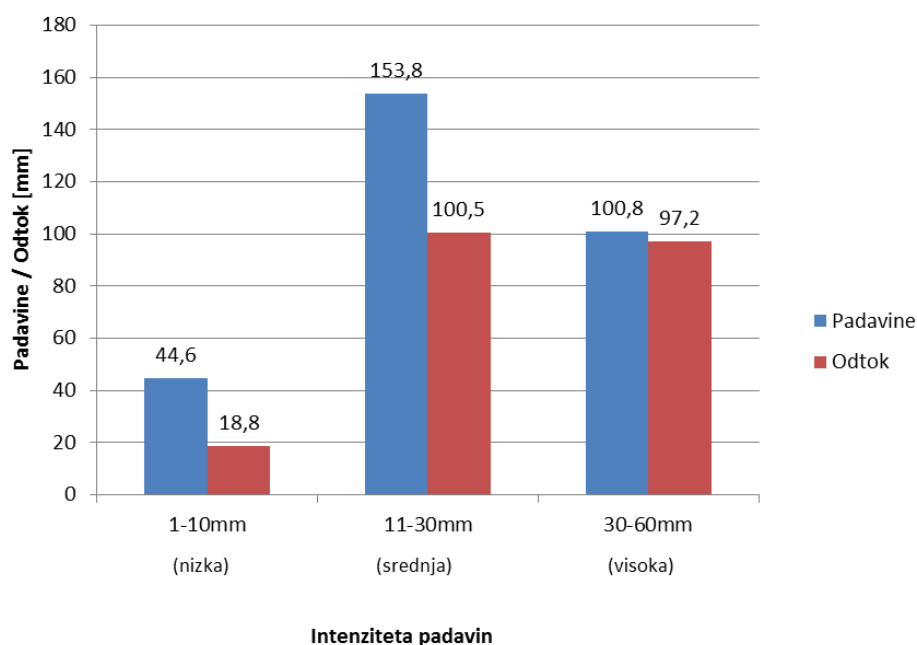
Grafikon 3: Zadrževanje padavinskega odtoka v odvisnosti od intenzitete padavin (Zhang in sod., 2015: str. 147)

Graph 3: Runoff retention dependent on the intensity of precipitation (Zhang et al., 2015: p. 147)

Tudi VanWoert in sod. (2005) poročajo o vplivu intenzitete in trajanja padavin na zadrževalno sposobnost zelene strehe v Kanadi (Michigan). Večja kot je intenziteta padavin večji je padavinski odtok. Ko je zemljina zasičena, substrat ne more zadržati več vode. Povprečno zadrževanje padavin zelene strehe je bilo 82,8 %.

Teemusk in Mander (2007) sta v raziskavi v Estoniji opazovala taljenje snega. Opazna sta dva odtoka, najprej taljenje snežne plasti in kasneje taljenje zamrznjene vode v substratu. Sneg se je stalil v enem dnevu, a streha ni zakasnila odtoka ali ga podaljšala, bil je enak kontrolni strehi. Substrat se je talil 12 dni. Streha je zadržala tudi srednje velike padavine, ko je substrat bil vlažen zaradi predhodnih padavin. Avtorja potrjujeta učinkovito zadrževanje manjših padavinskih dogodkov. Padavinski dogodek 2,1 mm je bil zadržan 85,7 %.

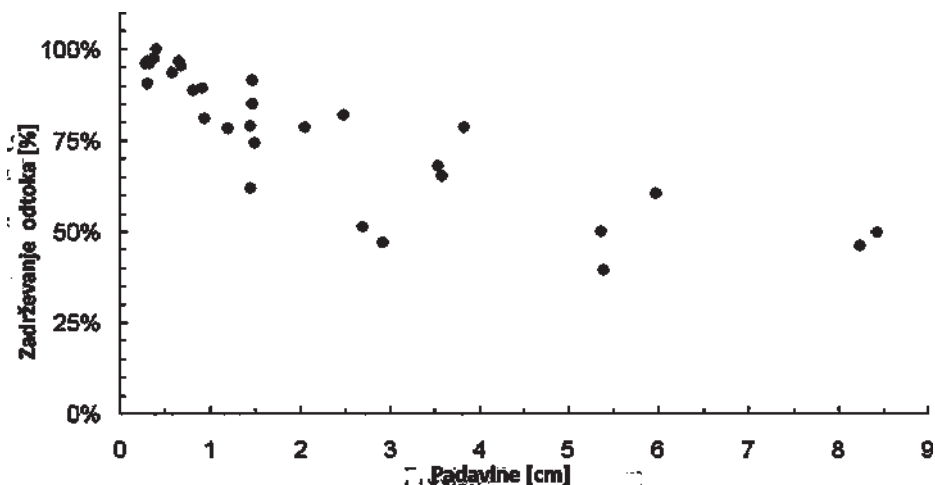
Krishnan in Ahmad (2014) ugotavljata povezavo med odtokom padavin in njihovo intenziteto kot je razvidno iz grafikona 4. Močnejša kot je intenziteta večji je odtok, tako je bil pri 30-60 mm padavin odtok zmanjšan le za 3,6 %, pri srednji intenziteti je bil odtok zmanjšan za 34,7 %, pri nizki intenziteti padavin 1-10 mm pa je bil odtok zmanjšan za 57,8 %.



Grafikon 4: Volumen padavinskega odtoka v odvisnosti od intenzitete padavin (Krishnan in Ahmad, 2014: str. 4)

Graph 4: The volume of stormwater runoff dependent on the intensity of precipitation (Krishnan in Ahmad, 2014: p. 4)

Tudi Carter in Rasmussen (2006) sta odkrila obratno povezavo med višino padavin in odstotkom dežja, ki je bil zadržan (grafikon 5). Za manjše nevihte (< 25,4 mm) velja 88 % zadrževanje padavinskih vod, za srednje (25,4-76,2 mm) več kot 54 % in za močne nevihte (> 76,2 mm) 48 % zadrževanje. Podatki vlažnosti substrata pred nevihto niso bili podani. Povprečno zadrževanje v zasičenosti zelene strehe je bilo 78 %, gibalo se je med 39 % in 100 %.



Grafikon 5: Odstotek zadrževanja padavin v odvisnosti od količine padavin (Carter in Rasmussen, 2006: str. 1268)

Graph 5: Percentage of stormwater retention dependent on the amount of precipitation (Carter in Rasmussen, 2006: p. 1268)

Podobno poročajo Simmons in sod. (2008) ter Villarreal in Bengtsson (2005). Padavinski dogodki, manjši od 10 mm, so bili na zelenih strehah v celoti zadržani. Pri padavinskih dogodkih 12 mm pa so zelene strehe zadržale od 26 do 88 % padavinskih vod, odvisno od substrata in vrste drenažnega sloja. Padavinska dogodka 28 mm in 49 mm sta pokazala zadrževanje od 43 do 8 % in 44 do 13 % (Simmons in sod., 2008). Pri simulaciji padavin 0,4 mm/min in nagibu 2 % je bilo zadrževanje 62 %, pri padavinah z intenziteto 1,3 mm/min pa je bilo zadrževanje padavinskih vod 21 % (Villarreal in Bengtsson, 2005).

Stovin in sod. (2015) so ugotovili, da je učinkovitost zadrževanja padavin močno povezana z višino padavin. Pri višini padavin pod 10 mm je bilo zadrževanje več kot 80 %, pri več kot 10 mm pa je bilo zadrževanje veliko manjše.

V preglednici 3 je prikazan pregled ugotovitev različnih avtorjev, ki so raziskovali vpliv intenzitete padavin na zadrževanje padavinskega odtoka zelene strehe. Avtorji so različno definirali manjše, srednje in močne nevihte zato je njihove ugotovitve težko primerjati. Kot smo že ugotovili velja, da manjša kot je nevihta več padavin je zadržanih.

Preglednica 3: Pregled po avtorjih - vpliv intenzitete padavin na zadrževanje padavinskega odtoka zelene strehe

Table 3: Review of the authors - the impact of the rainfall intensity on the retention of a green roof runoff

Avtorji	Država kraj	Debelina substrata [cm]	Manjše nevihte [mm]	Zadrževanje [%]	Srednje nevihte [mm]	Zadrževanje [%]	Močne nevihte [mm]	Zadrževanje [%]
Hilten, Lawrence in Tollner (2008)	ZDA, Georgia (Athens)	10	< 25,4	100	/	/	/	/
Zhang in sod. (2015)	Kitajska	15	< 10	94	10-24,9	> 72	25-49,9 > 50	> 67 39
VanWoert (2005)	ZDA, Michigan, (Detroit)	2,5	/	96,2	/	82,9	/	52,4
Teemus in Mander (2007)	Estonija	10	2,1	85,7	/	/	/	/
Krishnan in Ahmad (2014)	Malezija	10	1-10	57,8	11-30	34,7	31-60	3,6
Carter in Rasmussen (2006)	ZDA, Georgia	7,62	< 12,7 < 25,4	>90 84	25,4-76,2	59	>76,2	44
Simmons in sod. (2008)	ZDA, Teksas, (Austin)	10	< 25,4	88	25,4-76,2	54	>76,2	48
Villarreal in Bengtsson (2005)	Švedska, (Lund)	4	0,4 mm/min	62	1,3 mm/min	21	/	/
Stovin in sod. (2015)	VB, (Sheffield)	8	< 10 < 2	> 80 100	/	/	/	/

4.2.1 Vpliv števila predhodnih sušnih dni na padavinski odtok

Podrobne analize so pokazale, da imajo predhodni sušni dnevi največji vpliv na učinkovitost zadrževanja padavinskih vod in na zakasnitev padavinskega odtoka. Še posebej je učinkovitost zelene strehe zmanjšana, ko je evapotranspiracija nizka (Voyde, Fassman, Simcock, 2010).

Stovin (2010) je dokazal, da je eksperimentalna zelena streha zadržala vseh 12,8 mm padavin po dolgem sušnem obdobju. Po večjih padavinskih dogodkih v istem dnevu pa je zadržala le 5 % od 74,4 mm padavin, kar je 3,7 mm padavin. Villarreal in Bengtsson (2005) poročata, da je pri suhem vremenu in pri debelini substrata ter vegetacije 4 cm, bilo potrebnih 6-12 mm padavin, da se je začel odtok, pri vlažnih razmerah pa se je odtok začel skoraj takoj.

Da predhodna navlaženost substrata vpliva na povečan odtok in zmanjšanje zadrževalne sposobnosti zelene strehe, pa ugotavljajo VanWoert in sod. (2005), Bass in Baskaran (2003) ter Stovin (2010).

Bass in Baskaran (2003) poročata, da je suh substrat debeline 150 mm zadržal 8 mm padavin. Po treh padavinskih dogodkih, ko je v 12-ih urah padlo 10 mm padavin je substrat postal zasičen, odtok je bil zakasnen za 45 min. Po tem, ko je zapadlo 2 mm padavin, se je pojavil odtok. Zadržanih je bilo 45 % padavin. S hidrološkim modelom sta avtorja potrdila meritve. Model je pokazal, da bi delno zasičen substrat zadržal 42 % padavin. Model je bil testiran tudi pri ekstremnih razmerah značilnih za hurikan Mitch v Nikaragvi. S povečanjem debeline substrata na 300 mm, bi streha zadržala 30 % padavin. Sklepamo lahko, da bi streha z debelejšo plastjo substrata in več vegetacije zadržala več vode.

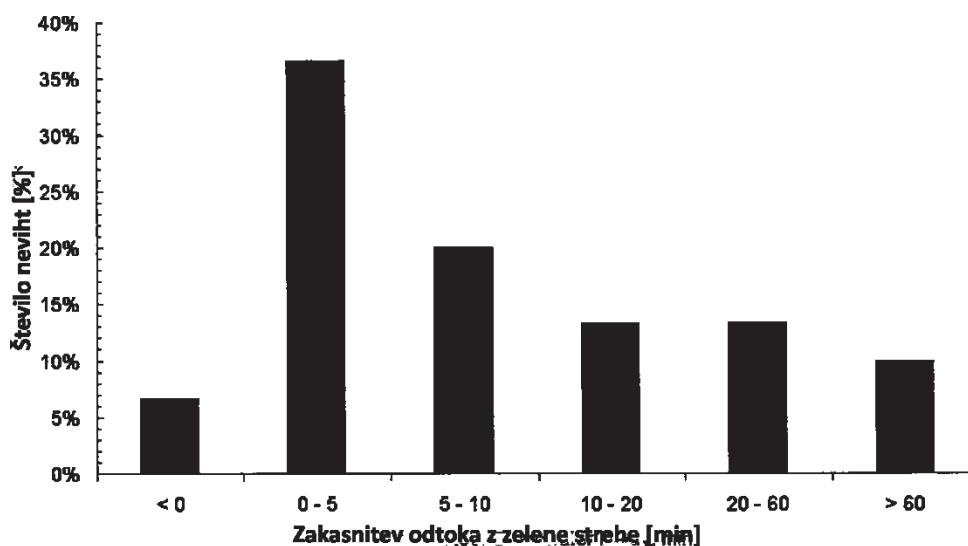
V štirih dneh je v seriji padavinskih dogodkov zapadlo 57,9 mm padavin. Streha je povprečno zadržala 72 % padavin. Prvi padavinski dogodek s 4,3 mm ni imel odtoka, naslednji dogodek (15,2 mm) je bil zadržan 82 %, odtok je bil zakasnen za 25 minut, pri tretjem dogodku (19,8 mm) se je odtok pojavil brez zakasnitve, 66 % padavin je bilo zadržanih. Zadnji padavinski dogodek je bil zadržan 59 % (Voyde, Fassman in Simcock, 2010).

Več kot je sušnih dni nižja je ET (evapotranspiracija) zelene strehe. Na stopnjo ET in na kapaciteto zadrževanja vpliva vsebnost vlage v substratu. Manj kot je vlage v substratu, nižja je ET kar dokaže Poë in sod. (2015).

4.2.2 Vpliv padavin na dinamiko padavinskega odtoka

Številne študije potrjujejo vpliv zelenih streh na dinamiko odtoka padavinskih vod z zmanjšanjem in zakasnitvijo konic odtoka v primerjavi s padavinskimi konicami ali s konicami odtokov s tradicionalnih streh. Zopet so precejšnje količinske razlike med različnimi študijami. Na osnovi ugotovitev iz poglavja 4.2.1 lahko rečemo, da je zakasnitev padavinskega odtoka čim večja tem daljše je sušno obdobje pred padavinskim dogodkom.

Carter in Rasmussen (2006) v raziskavi navajata, da je bil odtok z zelene strehe povprečno zakasnen za 34,9 minut. 57 % konic odtokov je bilo zakasnenih do 10 minut, najdaljša zakasnitev konice odtoka je bila približno 2 uri, povprečna zakasnitev je bila 23,1 minute. Konica odtoka za manjše nevihte je bila veliko nižja z zelenih streh kot s tradicionalnih, vendar pa je ta učinek precej zmanjšan pri večjih nevihtah (grafikon 6). Zakasnitev konice odtoka je odvisna od intenzitete padavin med padavinskim dogodkom in od predhodne vlažnosti substrata.



Grafikon 6: Zakasnitev konice odtoka z zelene strehe v primerjavi s tradicionalno streho (Carter in Rasmussen, 2006: str. 1269)

Graph 6: Green roof runoff detention compared to a traditional roof (Carter in Rasmussen, 2006: p. 1269)

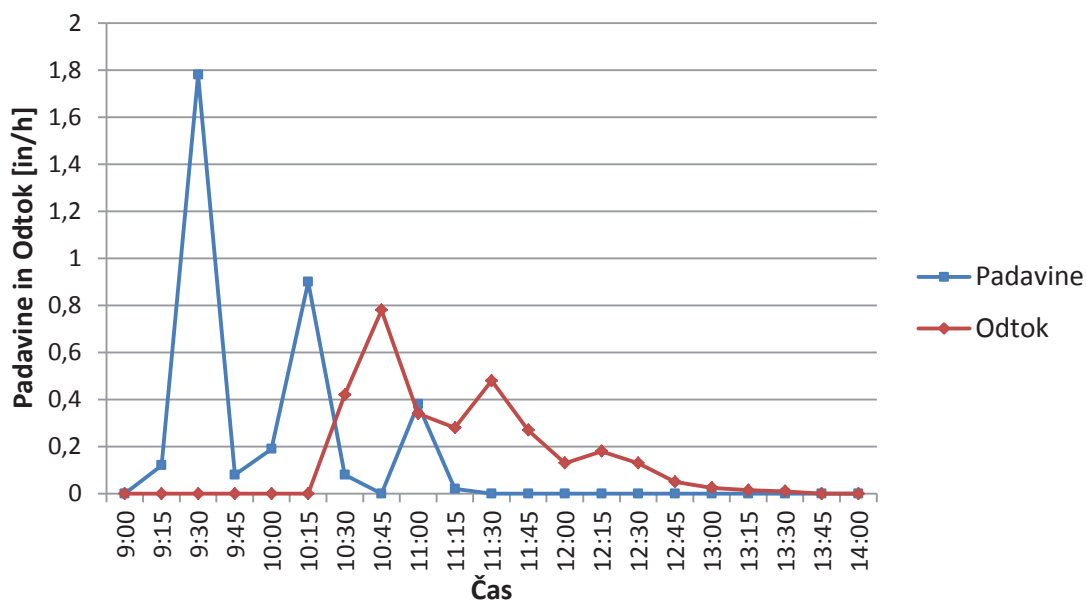
Tudi VanWoert in sod. (2005) poročajo o vplivu intenzitete in trajanja padavin na zadrževalno sposobnost zelene strehe v Kanadi (Michigan). Povprečno zadrževanje padavin zelene strehe je bilo 82,8 %. Zakasnitev odtoka rahlih padavin (< 2 mm) s poraščene strehe je bila 55 minut po začetku padavin, zakasnitev odtoka srednjih padavinah (2 do 6 mm) je bila za 15 minut. Pri močnih padavinah (> 6 mm) je bil odtok po 5 minutah začetka padavin. Pri močnih nevihtah se je odtok podaljšal in je trajal še 3 ure po tem, ko se je padavinski dogodek že končal.

Hiltner, Lawrence in Tollner (2008) ugotavljajo zakasnitev odtoka za približno 12 ur pri nevihtah med 5 in 7,93 cm pri začetni vlažnosti 10 %.

DeNardo in sod. (2005) ugotavljajo, da zelene strehe zmanjšajo konice povprečno intenzivnih padavin 4,3 mm/h na povprečni odtok z zelene strehe, ki znaša 2,4 mm/h. Povprečna zakasnitev odtoka z zelene strehe je 5,7 ure, zakasnitev konice odtoka pa 2 uri. Zelene strehe so zadržale povprečno 45 % padavin, zakasnitev odtoka je bila 2 uri.

Teemusk in Mander (2007) poročata, da se je odtok pri močnejših nalivih (12,1 mm) zamaknil za pol ure. Zadrževanje je bilo učinkovitejše, če so bili predhodni dnevi sušni in je tudi substrat bil suh.

Hidrogram padavin in odtoka z zelene strehe (grafikon 7) prikazuje serijo padavinskih dogodkov v Chicagu za junij 2009. Razberemo lahko zmanjšanje celotnega odtoka zaradi učinka zelene strehe, zakasnitev padavinskega odtoka z zelene strehe je bila 1,5 ure, ter zakasnitev konice odtoka z zelene strehe prav tako 1,5 ure. Prav tako opazimo, da je odtok z zelene strehe upočasnen in traja še dve uri po tem, ko se je padavinski dogodek končal.



Grafikon 7: Hidrogram padavin in odtoka z zelene strehe (GSA, 2011)

Graph 7: Precipitation and green roof runoff hydrograph (GSA, 2011)

4.2.3 Vpliv letnega časa na padavinski odtok

Zadrževalna sposobnost zelene strehe je odvisna od letnega časa. Poleti je večja evapotranspiracija, zato se zadrževalna kapaciteta zelene strehe hitreje obnovlja (Mentens, Raes in Hermy 2006).

Zhang in sod. (2015) poročajo, da je bila mesečna stopnja zadrževanja padavin zelene strehe manjša junija in oktobra zaradi večje količine padavin in višja julija, avgusta in septembra zaradi višjih temperatur in posledično višje evapotranspiracije (ET).

V hladnem in mrzlem letnem času ni opaziti povezav med odtokom in debelino substrata. V toplim letnem času (1. 5.-30. 9.), pa vsak centimeter substrata pomeni dodatno zmanjšanje odtoka za 2,5 mm. Debelina substrata je bila testirana v treh skupinah (< 50, 50-150, > 150 mm). V toplim obdobju je bilo zmanjšanje odtoka 62 %, 70 %, 80 %. Povprečje je bilo v toplim obdobju 70 %, v hladnem vmesnem obdobju 49 % in v mrzlem 33 % (Mentens, Raes in Hermy 2006).

Bengtsson in sod. (2005) poročajo, da se je odtok z ekstenzivnih zelenih streh najmanj zmanjšal februarja (19 %) in največ junija (88 %). Zmanjšanje odtoka se spreminja glede na letni čas. Od septembra do februarja je 34 % in od marca do avgusta 67 %.

Voyde, Fassman in Simcock (2010) so ugotovili učinkovitost zelenih streh skozi celo leto v subtropskih podnebnih razmerah Aucklanda. Med poletjem in zimo ni večjih razlik v zmanjšanju padavinskega odtoka z zelene strehe.

Poudariti moramo, da je težko primerjati rezultate različnih raziskav, saj avtorji na različne načine definirajo letne čase.

4.3 Naklon strehe

Villarreal in Bengtsson (2005) sta z eksperimenti dokazala, da naklon strehe vpliva na volumen zadrževanja padavinskih vod in na zakasnitev odtoka pri začetnih pogojih suhega substrata. Z večanjem naklona se zadrževanje manjša. Pri vlažnem substratu pa je možna le zakasnitev odtoka in ne zadrževanje.

VanWoert in sod. (2005) so pri naklonih 2 % in 6,5 % raziskovali, kakšen vpliv ima naklon na zadrževanje padavin. Pri debelini substrata 4 cm je 2 % naklon zadržal 87 % padavin, naklon 6,5 % pa 21,1 % manj padavin. Kombinacija zmanjšane naklona in povečane debeline substrata zmanjša skupno količino odtoka.

Getter, Rowe in Andresen (2007) so primerjali štiri različne naklone: 2 %, 7 %, 15 %, 25 %. Za vse strehe poročajo o 80 % povprečnem zadrževanju padavinskih vod. Zadrževanje padavinskih vod pri posameznih strehah je bilo 75,3 % pri naklonu 25 %. Največja stopnja zadrževanja pa je bila pri naklonu 2 % in sicer 85,2 %. Bengtsson in sod. (2005) meni, da naklon ne vpliva na odtok in zadrževanje. Nasprotno rezultati raziskav so lahko posledica različnih klimatskih in vremenskih razmer na območjih posameznih raziskav.

Getter, Rowe, Andresen (2007) so izračunali tudi CN (curve number) koeficient za navedene naklone streh, ki so bili 84, 87, 89 in 90. Vsi so nižji kot pri tradicionalni strehi, kjer je odtočni količnik 98, kar pove, da je bil odtok pri vseh zelenih strehah v raziskavi nižji kot pri tradicionalni. Z naraščanjem naklona je bil višji tudi odtočni količnik.

4.4 Vegetacija

Vegetacija je vrhnja plast in najpomembnejši element, ki določa zeleno streho. Mnogi raziskovalci uporabljajo za eksperimente sedum (ostrá homulica, bradavičnik), ker ima rastlina višjo stopnjo preživetja v ostrih razmerah na strehi.

Stovin in sod. (2015) so raziskovali zelene strehe z 80 mm debelimi substrati z različno poroznostjo, različnimi sposobnostmi zadrževanja vode ter s tremi različnimi poraščenosti. Poraščeni substrati so imeli večje zadrževalne sposobnosti kot neporaščeni. Pri substratu iz ekspandirane gline se je pokazal večji vpliv vegetacije na zadrževanje kot vpliv samega substrata. Vpliv substrata in vegetacije na zadrževanje je bil največji pri padavinskih dogodkih večjih od 10 mm, pri dogodkih manjših od 10 mm je bil vpliv manjši.

Berhage in sod. (2007) poroča, da lahko izbira rastlin z višjo stopnjo ET poveča zadrževalno sposobnost zelene strehe za 40 %. Primera takšnih rastlin sta sedum in delosperma, ki zelo hitro črpata vodo, ki je na voljo, ko pa je suša, pa zmanjšata potrebo po vodi. Stopnja izhlapevanja s poraščenih modulov je bila prvih pet dni dvakrat višja v primerjavi z neporaščenimi moduli. Nato je sledila počasnejša faza izhlapevanja. Stopnja izhlapevanja je bila bolj ali manj linearna in pri obeh modulih približno enaka.

Tudi Wolf in Lundholm (2008) sta poudarila, da so rastline različne po zgradbi, hidroloških učinkih ter stopnji ET in zato različno zmanjšajo odtok. Na izgubo vode iz sistema zelene strehe zaradi evapotranspiracije naj bi vplivala količina vode, ki je na voljo. Ko je bila v sušnih razmerah količina vode omejena, je na izgubo vode imela večji vpliv vrsta vegetacija. V vlažnih razmerah sta avtorja odkrila velike razlike v izgubi vode med različnimi rastlinami. Trave so na primer najbolj vplivale na izhlapevanje, vendar niso odporne na sušne razmere. Izgubo vode bi optimizirali z različnimi rastlinami, ki imajo pod različnimi pogoji vlage v substratu hkrati tudi velik vpliv na izhlapevanje.

Tudi v tropskih razmerah so razlike v zmanjšanju odtoka z zelene strehe odvisne od tipa vegetacije (Krishnan in Ahmad, 2014). Najbolj učinkovita je bila praproť, sledijo zelišča, sedum in trava. Povečana gostota koreninskega sistema rastlin zmanjša poroznost substrata, kar vpliva na zadrževanje vode. K učinkovitim zadrževalnim sposobnostim zelenih

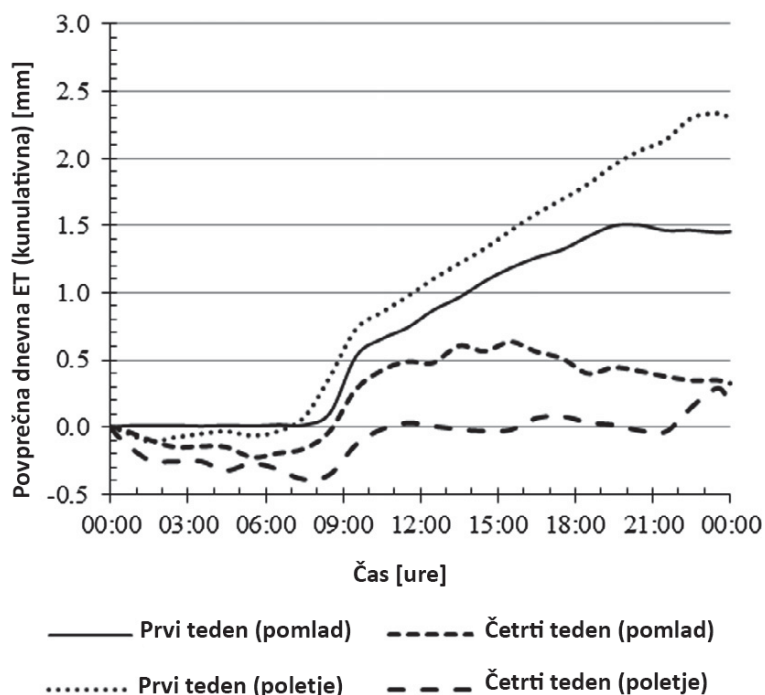
streh prispevajo tudi struktura, gostota, vrsta listov in vegetacijska biomasa. Razlike v ET različnih rastlin so do 61 %. V zmernih klimatskih razmerah je vpliv ET manjši.

Musa (2011) iz Malezije je primerjala odtok pri zasajenih modulih in pri kontrolnem modulu z golim substratom. Pri poraščenem modulu je bil odtok 20 %, pri golem substratu 39 %.

Poë in sod. (2015) so dokazali, da je v daljšem sušnem obdobju (28 dni) poraščen substrat imel opazno večje izgube vode zaradi ET kot neporaščen substrat. Začetne izgube vode so bile večje pri neporaščenem substratu (7-10 dni spomladi in 1-2 dneva poleti), kar kaže na to, da je vpliv vegetacije povečan, ko postane količina vlage omejena. V pomladnih mesecih je bila ET 0,6-1 mm na dan, v poletnih mesecih pa 0,7-1,25 mm/dan (po 28-ih sušnih dnevih). Ta razpon kaže na vpliv sestavnih elementov zelene strehe na ET. Kumulativna ET je bila največja pri substratih z največjo kapaciteto zadrževanja vode, razlika je bila tudi med poraščenimi in neporaščenimi moduli. Na začetku je bila evapotranspiracija spomladi 2 mm/dan in poleti 3,4 mm/dan. Zaradi zmanjšanja količine vlage v substratu je bila evapotranspiracija po 7 sušnih dneh spomladi 1,4 mm/dan in po 14 sušnih dneh 1 mm/dan, poleti pa 1 mm/dan in 0,5 mm/dan. Na razlike v ET med različnimi zelenimi strehami so vplivali vremenski pogoji, vrsta vegetacije in vrsta substrata.

Vpliv vegetacije na ET se spreminja glede na količino vlage v substratu, število predhodno sušnih dni in glede na podnebne razmere (grafikon 8). Meritve spreminjanja dnevne kumulativne ET prvi in četrti teden v pomladnih in poletnih razmerah so pokazale, da je bil prvi teden substrat zasičen, četrti teden pa je bila vlaga v substratu omejena. Vsebnost vlage v substratu vpliva na stopnjo ET in na zadrževalne sposobnosti zelene strehe. Med dvema različnima vrstama vegetacije ni bilo opaziti pomembne razlike v ET.

Dunnnett in sod. (2008) je raziskoval padavinski odtok pri petih vrstah rastlin. Nekaj vode rastline prestrežejo, vpijejo, s transpiracijo pa voda preide iz rastlin nazaj v atmosfero. Monokulturna zasaditev je zadržala očitno manj vode kot pa mešana zasaditev. Nagase in Dunnnett (2010) sta raziskovala vpliv različnih vrst vegetacije in njuno raznolikost na količino odtoka padavinske vode. Testna polja so bila poraščena monokulturno, s 4 različnimi vrstami rastlin in z 12 različnimi vrstami rastlin. Rezultati so pokazali očitne razlike v odtoku. Pri zmanjšanju odtoka so bile najbolj učinkovite trave, sledijo zelišča in sedumi. Prav tako na odtok vplivata velikost rastlin in njihova struktura. Višje in širše rastline z večjim koreninskim sistemom so bile bolj učinkovite. Raznolikost rastlinskih vrst v raziskavi ni vplivala na količino odtoka.



Grafikon 8: Spreminjanje dnevne kumulativne ET prvi in četrty teden meritev v pomladnih in poletnih razmerah (Poë in sod., 2015: str. 364)

Graph 8: Daily cumulative ET changes in the first and fourth week of measurements in the spring and summer conditions (Poë et al., 2015: p. 364)

Večina uporabljenih rastlin v eksperimentih ni raznolikih, niti ne morejo biti uporabljene kjerkoli, zato se kaže potreba po raziskavah hidroloških učinkov avtohtonih rastlinskih vrst.

4.5 Starost zelene strehe

Krishnan in Ahmad (2012) ugotavljata, da se fizikalne in kemične lastnosti substrata s časom spreminjajo. Delci prsti se degradirajo v manjše delce, raztopljenе snovi so sprane, rastline s koreninami razrahljajo substrat, kar lahko potencialno poveča zadrževalne kapacitete.

Maclvor in Lundholm (2011) sta z eksperimentom dokazala, da koreninski sistem določenih rastlin že v enem letu postane gostejši, poroznost substrata se zmanjša, zato je tudi manj prostora za akumulacijo vode.

Getter in sod. (2007) poročajo ravno nasprotno in sicer da ima 5 let stara zelena streha 50,37 % večjo kapaciteto zadrževanja vode v primerjavi z novim substratom, zaradi večje poroznosti substrata in več organskih snovi (rast korenin).

Za potrditev vpliva starosti zelene strehe na padavinski odtok so potrebni še dolgoročni eksperimenti (Krishnan in Ahmad, 2012).

4.6 Drenažna in zadrževalna plast

Drenažna in zadrževalna plast sta eden glavnih notranjih dejavnikov zadrževanja padavinske vode. Njun tip je odvisen od vrste zelene strehe (manjše za ekstenzivne, večje za intenzivne strehe). Če želimo povečati drenažo in zmanjšati debelino strehe, lahko obrnemo plasti, da so luknje na spodnji strani, odtok se tako poveča, skladiščenje pa je omejeno bolj na substrat (Hui in Chu, 2009).

4.7 Razmerje med količino padavin in odtokom ter kapaciteta skladiščenja

Poudariti moramo, da se v raziskavah pojavljajo velike razlike v hidrološki učinkovitosti različnih zelenih streh, kar je mogoče razložiti zaradi razlik v sestavi zelene strehe ter padavinskih dogodkov, pri čemer mislimo na višino, trajanje in intenziteto padavin (Stovin in sod., 2013), vpliva tudi dolžina opazovanega obdobja in število padavinskih dogodkov v obdobju meritev (Berndtsson, 2010). Zato numerične vrednosti, ki opisujejo hidrološko učinkovitost zelenih streh, ne moremo neposredno primerjati. Vrednosti zmanjšanja odtoka padavinske vode so izražene v odstotku padavin (preglednica 1). Prav tako je pri zadrževalni sposobnosti zelenih streh pomembno predhodno sušno obdobje, ki loči dva padavinska dogodka, zato je vlažnost substrata pred padavinskim dogodkom ključnega pomena. Vsebnost vode v substratu je prikazana kot odstotek volumna substrata. Ko so vse pore zapolnjene z vodo, je zemljina zasičena (Berndtsson, 2010).

Nemške študije med letoma 1987 in 2003, ki so jih povzeli Mentens, Raes in Hermy (2006) so pokazale letno zmanjšanje odtoka intenzivnih streh za 65-85 % letnih padavin in ekstenzivnih 27-81 %, kar je zelo širok razpon.

Hui in Chu (2009) ugotavljata, da manjkajo meritve in podatki na lokalni ravni, zato v nadaljevanju povzemamo študijo primera iz Francije.

4.8 Vpliv zelenih streh na urbano odvodnjo

Hidrološki vpliv zelenih streh na urbano odvodnjo je prikazan na osnovi študije primera iz Francije, Hauts-de-Seine county (Versini in sod., 2013).

Študija je pokazala, da imajo zelene strehe pozitiven vpliv na urbano odvodnjo, saj zmanjšujejo odtok in upočasnijo kritični odtok ter zmanjšajo volumen odtoka. Cilj raziskave je bil proučiti vpliv zelenih streh na zmanjšanje padavinskega odtoka v večjem merilu, zato združuje metodo določanja scenarijev zelenih streh s presojo maksimalnih površin streh, ki so bile pokrite in orodje za modeliranje, s katerim je možno simulirati hidrološko obnašanje

zelenih streh. Uporabljen je model SWMM (Stormwater management model). Ta model je apliciran na dve urbani povodji, ki ju večkrat prizadenejo poplave in s tem povezana prelivanja kanalizacijskega omrežja.

Rezultati kažejo, da so zelene strehe učinkovite pri zmanjšanju pogostosti in velikosti poplav in prelivanj kanalizacijskih omrežij. Učinkovitost je odvisna od odstotka zelenih streh na nekem območju. Zelene strehe, združene z ostalo infrastrukturo, pa predstavljajo zanimivo rešitev za reševanje težav urbane odvodnje v prihodnosti. Cilj takšne infrastrukture je, da se presežek padavinske vode začasno skladišči, preden se ga postopoma pošlje v omrežje ali v okolje v smislu izpraznjenja, infiltracije ali izhlapevanja.

Takšna infrastruktura pa potrebuje prostor v urbanih območjih. Ravno zaradi pomanjkanja urbanega prostora je namen razviti hkrati z urbanizacijo pripomočke za upravljanje z padavinskimi vodami v manjšem merilu (okoli 10^2 - 10^3 m²) in rešiti ali preprečiti težave srednjih razsežnosti (10^4 - 10^5 m²). Te tehnike pa vključujejo zelene strehe, prepustne površine, rezervoarje za vodo.

Zelene strehe so še posebej primerne, ker strehe predstavljajo pomemben delež nepropustnih površin in odvajajo strupene kovine v vodotoke. Glavni učinek zelenih streh pri upravljanju s padavinskimi vodami je zmanjšanje količine odtoka na letni ravni, zmanjšanje velikosti odtoka ter njegova zakasnitev v posameznem padavinskem dogodku. Vse to pa je odvisno od strukture zelene strehe, intenzitete padavin, predhodne vlažnosti substrata. Zaradi teh razlogov je širitev zelenih streh trenutno v porastu.

Kljub velikemu številu zelenih streh je bilo le nekaj raziskav osredotočenih na njihov vpliv na padavinski odtok in na reševanje urbanega gospodarjenja z vodami. Večina študij se je ukvarjala s hidrološkim vplivom zelenih streh v obsegu zgradbe, kjer so ti vplivi prvotno povzročeni. Zelo redke raziskave ocenjujejo možen vpliv v večjem merilu, ki bi bil bolj prilagojen na urbano upravljanje z vodami.

4.9 Zaključki

Raziskave v različnih državah so pokazale, da so zelene strehe pomembno orodje za ravnanje z padavinskimi vodami. Obstaja veliko tipov zelenih streh, večina jih ima nekaj plasti, ki imajo zmožnost, da zadržijo vodo. Najpomembnejše plasti so: plast substrata, vegetacije, drenažni sloj, vodozadrževalni sloj. Vse te plasti delujejo zelo učinkovito pri zmanjšanju volumna odtoka s strehe in pri zakasnitvi začetka odtoka s strehe in zmanjšanju konice odtoka.

Konstrukcija zelene strehe je odvisna od podnebja in vremena. Ugotavljamo, da je količina skladiščenja vode odvisna od debeline substrata in od vsebnosti vlage tik pred deževjem. Na zadrževanje padavinskih vod vplivajo zunanji dejavniki, kot so višina in trajanje ter intenziteta padavin. Zelene strehe so zelo učinkovite pri manjših nevihtah. Odtok se zamakne, a večinoma ne more biti popolnoma zadržan. S povečano intenziteto padavin se poveča padavinski odtok. Manjša kot je intenziteta, večje je zadrževanje padavinske vode. Ko je zemljina zasičena, substrat ne more zadržati več vode. Za ocenjevanje učinkovitosti zelene strehe je poleg vpliva velikosti padavinskega dogodka v večji meri pomemben vpliv spreminjanja njegove intenzitete.

Podrobne analize so pokazale, da ima predhodno sušno obdobje, ki loči dva padavinska dogodka, največji vpliv na količino zadrževanja padavinskih vod. Tako je vlažnost substrata pred padavinskim dogodkom ključnega pomena, prav tako pa je pomembna tudi vrsta substrata in drenažnega sloja.

Rastline so si različne po zgradbi, hidroloških učinkih in stopnji ET, ki zmanjšajo ali povečajo odtok in zadrževanje. Ugotavljamo tudi, da sta drenažna in zadrževalna plast eden glavnih notranjih dejavnikov zadrževanja padavinske vode.

Konice odtokov zakasniijo sorazmerno s tradicionalnimi strehami, saj je bilo v raziskavi 57 % konic odtokov z zelenih streh zakasnjenih za do 10 minut v primerjavi s tradicionalnimi strehami (Simmons in sod., 2008; VanWoert in sod., 2005).

Na osnovi teh ugotovitev bomo za osnovno obravnavo izbrali tri ekstenzivne zelene strehe, ki se tržijo v Sloveniji. Pri analizi padavinskih podatkov bomo izhajali iz povratnih dob za ekstremne padavine gospodarsko enakovrednih nalivov, pri čemer nas bodo najbolj zanimali krajši padavinski dogodki z veliko intenziteto ter daljši padavinski dogodki. Takšni dogodki namreč najbolj obremenjujejo kanalizacijsko omrežje, hkrati pa dobi zelena streha funkcijo neprepustne površine in odtok je enak kot pri tradicionalni strehi.

V nadaljevanju bomo upoštevali vpliv predhodnih sušnih dni med nevihtami in evapotranspiracijo, saj sta to glavna dejavnika, ki vplivata na to, da se zelena streha lahko osuši in učinkovito zmanjša odtok naslednjega padavinskega dogodka.

Namen raziskave je raziskati hidrološko učinkovitost zelene strehe pri zadrževanju in zmanjšanju prostornine padavinskega odtoka, ki obremenjuje kanalizacijsko omrežje za pretekle padavinske dogodke, značilne za obravnavano območje.

5 PRIMERJAVA TREH EKSTENZIVNIH ZELENIH STREH IN NJIHOVIH ZADRŽEVALNIH SPOSOBNOSTI

Kot smo že omenili, v nadaljevanju sledi primerjava treh ekstenzivnih zelenih streh. Strehe se razlikujejo po sestavi in posledično po količini akumulirane vode. Po meritvah proizvajalcev zadrži največ vode streha 2 (39,4 l/m²), streha 1 zadrži 28,3 l/m² in najmanj zadrži streha 3 (8,5 l/m²).

5.1 Opis izbranih ekstenzivnih zelenih streh

Pridobili smo testne modele treh ekstenzivnih zelenih streh, ki se tržijo v Sloveniji. To so:

- sistem ekstenzivne zazelenitve Xeroflor podjetja Norik;
- modularni sistem za zelene strehe Urbanscape podjetja Knauf Insulation in
- ekstenzivna ozelenitev MG E standard podjetja MGing.

Merili smo izhlapevanje vode iz sistema posamezne zelene strehe, ko je bil njen substrat zasičen, ter simulirali padavinske dogodke z različno povratno dobo, pri čemer smo merili vpliv posamezne zelene strehe na padavinski odtok.

5.1.1 Streha 1: sistem ekstenzivne zazelenitve Xeroflor

Sistem ekstenzivne zazelenitve Xeroflor sestavljajo drenažni sloj Xerodrain, vodovpojni filc kot vodni "akumulator" in vegetacijska "preproga" s substratom Xeroterr in različnimi rastlinami. Maksimalna kapaciteta vode v substratu je 51,9 % volumna substrata. Vegetacijska preproga XF 301 ne potrebuje dodatnega ravnega substrata (Xeroflor, 2016). Sestavo in akumulacijo vode v zasičenosti strehe 1 prikazuje preglednica 3. Sliki 5 in 6 prikazujeta izgled strehe.



Slika 5: Vegetacijska preproga Sedum-moss na strehi 1 (Vir: avtor)
Figure 5: Vegetation carpet Sedum-moss of the roof 1 (Source: author)



Slika 6: Sestava strehe 1 (vegetacija s substratom in filc) (Vir: avtor)

Figure 6: Configuration of the roof 1 (vegetation with substrate and geotextile fabric)
(Source: author)

Preglednica 4: Sestava ekstenzivne zazelenitve Xeroflor (Xeroflor, 2016: str. 4)

Table 4: Configuration of the extensive green roof Xeroflor (Xeroflor, 2016: p. 4)

SESTAVA STREHE 1	DEBELINA [cm]	POPOLNA ZASIČENOST	
		TEŽA [kg/m ²]	KOLIČINA VODE [l/m ²]
Vegetacijska plast XF 301	3,5	32	19
Filc kot akumulator vode XF 159	1,2	10,5	9,3
Drenažni sloj s filtrnim voalom XF 108	1,5	0,4	/
Protikoreninska zaščita (po potrebi)	/	/	/
SKUPAJ	6,2	42,9	28,3

5.1.2 Streha 2: modularni sistem za zelene strehe Urbanscape

Montažni sistem Urbanscape Green Roof je sestavljen iz protikoreninske membrane, drenažnega sistema z zalogovnikom vode ali brez, patentiranega substrata iz mineralnih vlaken in vegetacijske preproge. Odvisno od lokalnih podnebnih razmer se lahko vgradi namakalni sistem (Urbanscape, 2014).

Sistem Urbanscape se lahko vgradi na različne strešne konstrukcije. Prilagodi se le osnovna sestava strehe, elementi zelene strehe pa so povsod enaki.

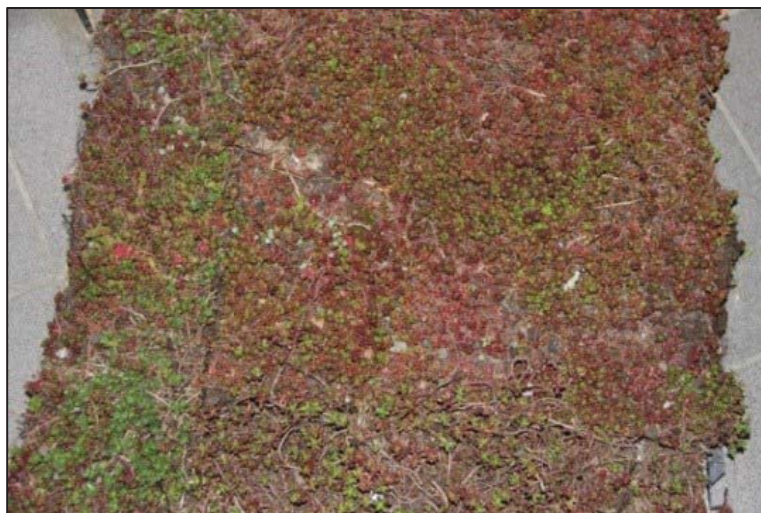
Suha teža je 18-24 kg/m², zasičena teža pa 43-70 kg/m². Kapaciteta zadrževanja vode je 25-49 l/m². Različne vrste substratov Urbanscape se prilagaja klimatskim razmeram.

Streha ima sistem **drenaže Urbanscape z zalogovnikom vode**. Sistem omogoča zadrževanje vode v sušnih obdobjih, v deževnih obdobjih pa hitro odvajanje odvečne vode. Volumen zadrževanja vode je 11,8 l/m².

Urbanscape substrat Green Roll (HTC GR) je lahek substrat iz dolgih mineralnih vlaken, narejen s patentiranim postopkom iglanja. Substrat zagotavlja veliko sposobnost zadrževanja vode in je tudi dobra rastna podlaga. 1 m² 20 mm debelega substrata zadrži 17 l vode, 40 mm pa 29 l.

Vegetacijska preproga Urbanscape Sedum-mix, ima 10-12 različnih vrst rastlin – sedumov, ki dobro skladiščijo vodo.

Urbanscape Green Roof modul je lahek element z visoko zadrževalno sposobnostjo in je iz treh delov: drenaže Urbanscape, ki ima kapaciteto zadrževanja vode 2,4 l/m², substrata Urbanscape Green Roll in vegetacijske preproge Urbanscape Sedum-mix (Urbanscape, 2014). Značilnosti strehe 2 so podane v preglednici 4. Sliki 7 in 8 prikazujeta izgled strehe 2.



Slika 7: Vegetacijska preproga na strehi 2 (Vir: avtor)
Figure 7: Vegetation carpet on the roof 2 (source: author)



Slika 8: Sestava strehe 2 (vegetacija, substrat, kamena volna, drenaža) (Vir: avtor)
 Figure 8: Configuration of the roof 2 (vegetation, substrate, rockwool, drainage) (Source: author)

Preglednica 5: Sestava modela Urbanscape Green Roof modul (Urbanscape, 2014)
 Table 5: Configuration of Urbanscape Green Roof modul (Urbanscape, 2014)

SESTAVA STREHE 2	DEBELINA [mm]	TEŽA (suha) [kg/m ²]	POPOLNA ZASIČENOST	
			TEŽA [kg/m ²]	KOLIČINA VODE [l/m ²]
Urbanscape Sedum-mix	20-40	15	/	8
Urbanscape Green Roll substrat	20/40	2,2	/	17/29
Drenaža Urbanscape	25 mm	2,4	/	2,4 ali
Drenaža Urbanscape z vodnim zalogovnikom	25	1,06	/	11,8
SKUPAJ:	65-85 mm (pri 20 cm substrata)	20,1 kg/m²	47,5-59,5	27,4-39,4
	85-110 (pri 40 cm substrata)		ali 56,9-68,9	ali 36,8-48,8

5.1.3 Streha 3: ekstenzivna ozelenitev MG E standard

Gre za ekstenzivno ozelenitev s petimi vrstami sedumov (homulic). Ekstenzivni rastni substrat je MG E 10. V preglednici 5 so predstavljene osnovne značilnosti strehe 3. Slika 9 prikazuje substrat iz drobljene opeke, slika 10 pa vegetacijski sloj strehe 3.

Preglednica 6: Sestava zelene strehe MG E ekstenzivna ozelenitev standard (MG zelene strehe, 2016)

Table 6: Configuration of MG E extensive standard green roof (MG zelene strehe, 2016)

SESTAVA STREHE 3	DEBELINA [mm]	TEŽA (suha) [kg/m ²]	POPOLNA ZASIČENOST	
			TEŽA [kg/m ²]	KOLIČINA VODE [l/m ²]
MG E ozelenitev standard	/	/	/	/
Ekstenzivni substrat MG E 10	100 mm Odvod vode 0,24	980 kg/m ³ 98	1035 kg/m ³ 103,5	5,5
Hidroizolacija ter zadrževalni sloj MG PF 500	4	/	/	3
SKUPAJ:	104	98	103,5	8,5



Slika 9: Streha 3 - substrat iz drobljene opeke (Vir: avtor)
Figure 9: The roof 3 – crushed brick substate (Source: author)



Slika 10: Sestava strehe 3 (vegetacija, substrat, drenaža) (Vir: avtor)

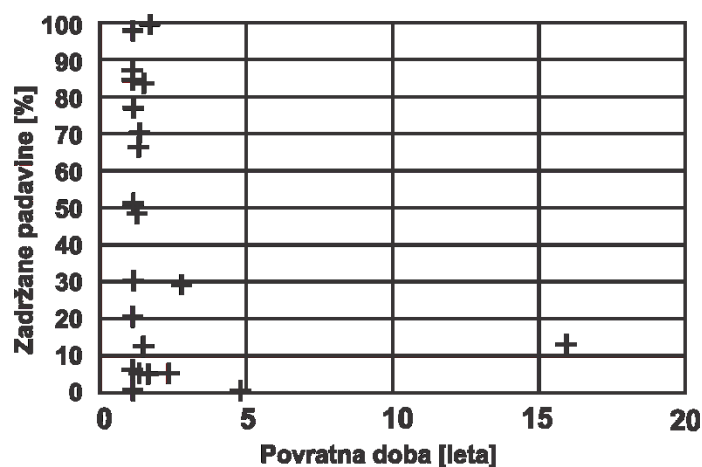
Figure 10: Configuration of the roof 3 (vegetation, substrate, drainage) (Source: author)

5.2 Kapaciteta zadrževanja padavinskih vod pri zelenih strehah v odvisnosti od povratnih dob za ekstremne padavine

Osnovni podatki za določanje količin odtoka padavinske vode s površin naselij in odvodnjavanja avtocest so posamezni statistično ovrednoteni nalivi določenega časovnega trajanja t_r (npr. $t_r = 5, 10, 15, 20, 30$ min...) in pogostosti n , ki pove, kolikokrat se naliv pojavi v enem letu ($n = 1$ pomeni, da se pojavi enkrat na leto, $n = 0,5$ pa enkrat v dveh letih), oziroma kakšna je njegoja povprečna povratna doba $T = 1/n$ (Panjan, Bogataj, Kompore, 2005).

Stovin in sod. (2012) so zbrane podatke testnih modulov v Sheffieldu (Velika Britanija) interpretiral z vidika povratnih dob. Za padavinske dogodke s povratno dobo od 1 do 2 leti je možno do 100 % zadrževanje. Rezultat je bil pričakovan, saj so kratki padavinski dogodki (< 12 h) z enoletno povratno dobo bili manjši, kot je maksimalna kapaciteta zadrževanja padavinskih vod pri zelenih strehah (20 mm). Tudi dogodki, krajši od treh ur in s povratno dobo dveh let, so manjši od te vrednosti. Štirje padavinski dogodki so bili večji od dvoletne povratne dobe in so bili zadržani 29,3 %. Padavinski dogodek s povratno dobo 16 let je bil zadržan s 15 %. Z višanjem povratne dobe pričakovana količina padavin presega maksimalno kapaciteto zadrževanja strehe. Dogodek z 10-letno povratno dobo (72 mm v 24 urah), bi bil zadržan z 28 %, šesturni dogodek (42 mm), pa bi bil zadržan z 48 %. 20 mm pomeni 91 % 1 uro trajajočega padavinskega dogodka z 10-letno povratno dobo za Sheffield. Predpostavimo, da je minilo 48 ur od takrat, ko je zelena streha bila zasičena. Ta vrednost je postala standard pri načrtovanju zelenih streh. Izguba vode zaradi ET bi bila v teh 48 urah 1-6 mm, odvisno od letnega časa. 6 mm pa predstavlja 27 % količine padavinskega dogodka z 10-letno povratno dobo.

Od padavinskih dogodkov z dolgo povratno dobo lahko pričakujemo visoko stopnjo padavinskega odtoka in nizek odstotek zadrževanja. Za dogodke s 100-letno povratno dobo je odstotek zadrževanja vedno nizek, čeprav je na voljo maksimalna kapaciteta zadrževanja strehe. Pri 100-letni povratni dobi enournega padavinskega dogodka v Sheffieldu, kjer je zapadlo 44,8 mm padavin in pri maksimalni kapaciteti zelene strehe 20 mm, bi streha zadržala 44,6 % padavin. Za 24-urni dogodek s 120 mm padavin pa maksimalna sposobnost zadrževanja pade na 16,5 %. Enourne dogodke s povratno dobo 1 leto je streha zadržala 100 %, čeprav je bila na voljo 50 % kapacitete zadrževanja. 24-urni dogodek s povratno dobo 1 leto je streha zadržala 72,2 % pri maksimalni kapaciteti zadrževanja (grafikon 9).



Grafikon 9: Zadrževanje padavinskih vod kot funkcija povratnih dob (Stovin in sod., 2012: str. 155)

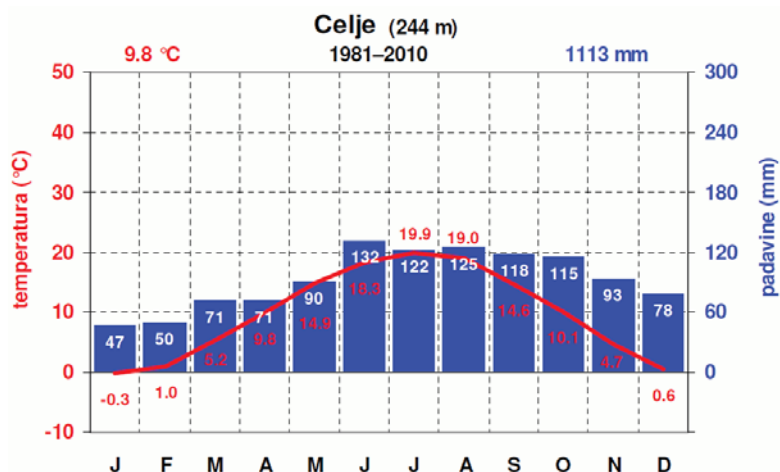
Graph 9: Stormwater runoff retention as a function of return periods (Stovin et al., 2012: p. 155)

V nadaljevanju smo primerjali sposobnost zadrževanja padavinskih vod pri treh ekstenzivnih strehah, ki so opisane v poglavju 5.1, na osnovi povratnih dob za ekstremne padavine za tri slovenske kraje. Strehe imajo naslednje maksimalne sposobnosti zadrževanja vode 28,3 l/m², 39,4 l/m² in 8,5 l/m².

Za analizo smo izbrali podatke ekstremnih padavin s povratnimi dobami 2, 5, 10, 25, 50 in 100 let za Celje, Rateče in Portorož. Podatki so pridobljeni iz arhiva meritev slovenske Državne meteorološke službe pri Agenciji Republike Slovenije za okolje. Preglednice so v prilogi A, B in C. Pri analizi smo upoštevali, da je predhodno obdobje suho, prav tako substrat.

5.2.1 Celje

Celje leži na območju Celjske kotline, na nadmorski višini 238 m. Vremenska postaja leži na nadmorski višini 244 m. Podnebje je celinsko z alpskimi, celinskimi in sredozemskimi vremenskimi vplivi. Povprečna letna temperatura je 9,8 °C, povprečna letna količina padavin pa 1113 mm. Največ padavin je meseca junija (132 mm), najmanj pa januarja (47 mm), ko so tudi povprečne temperature najnižje (grafikon 10).

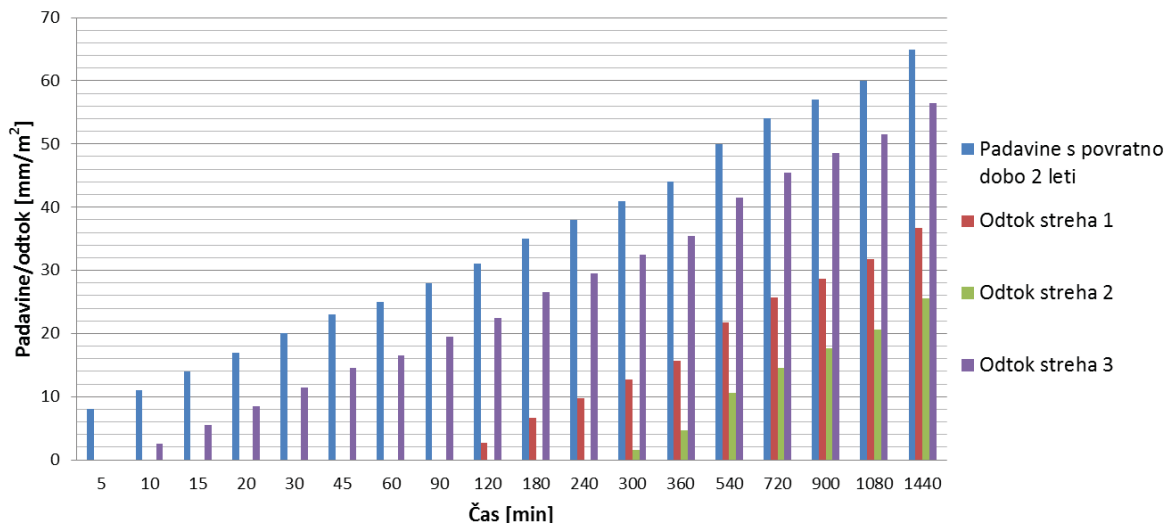


Grafikon 10: Podnebni diagram za Celje od leta 1981 do 2010 (ARSO, 2016a)

Graph 10: Climate graph for Celje from 1981 to 2010 (ARSO, 2016a)

Ker se za dimenzioniranje kanalizacijskega sistema uporabljajo gospodarsko enakovredni nalivi s povratno dobo dveh let, smo s spodnjimi stolpčnimi grafikoni prikazali primerjavo odvisnosti odtoka od vseh treh obravnavanih zelenih streh za Celje, Portorož in Rateče.

Iz grafikona 11 razberemo, da je streha 3 najmanj učinkovita pri zadrževanju padavinskih dogodkov z 2-letno povratno dobo, saj bi v Celju zadržala le 5-minutni naliv. Najbolj učinkovita je streha 2, ki bi zadržala 240-minutni naliv in bi pri 24-urnih padavinah, ko zapade 65 mm/m² padavin, zadržala 58 % padavin. Streha 1 bi zadržala 90-minutni naliv, 24-urno količino padavin pa bi zadržala 43,1 %, streha 3 bi enako količino 24-urnih padavin zadržala le 13,1 %.



Grafikon 11: Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti za Celje

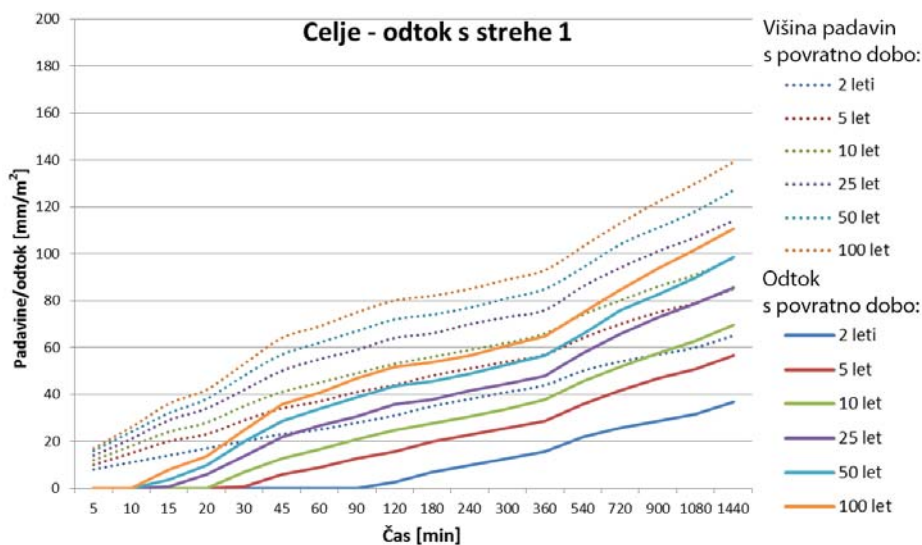
Graph 11: Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years in Celje

V nadaljevanju smo primerjali sposobnost zadrževanja padavin pri vseh ekstenzivnih zelenih strehah, ki so opisane v poglavju 5.1, na osnovi povratnih dob (2, 5, 10, 25, 50 in 100 let) za ekstremne padavine v Celju. Strehe imajo naslednje maksimalne sposobnosti zadrževanja vode: streha 1 28,3 l/m², streha 2 39,4 l/m² in streha 3 8,5 l/m² (preglednica 6).

Preglednica 7: Primerjava testnih modelov zelenih streh glede na količino vode v zasičenosti

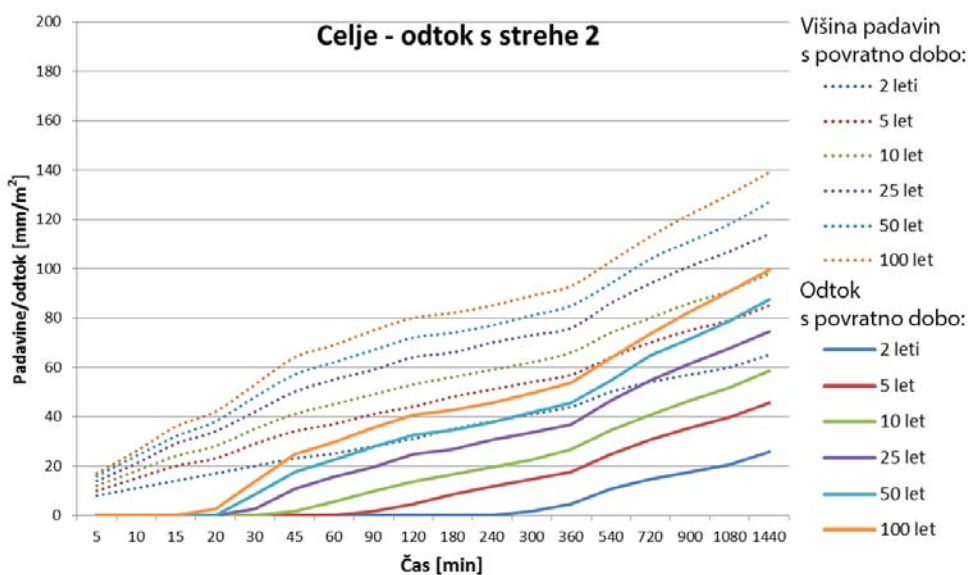
Table 7: Comparison of the water amount in saturated conditions of green roof test modules

	Streha 1	Streha 2	Streha 3
Količina vode v popolni zasičenosti [l/m²]	28,3 l/m ²	39,4 l/m ²	8,5 l/m ²



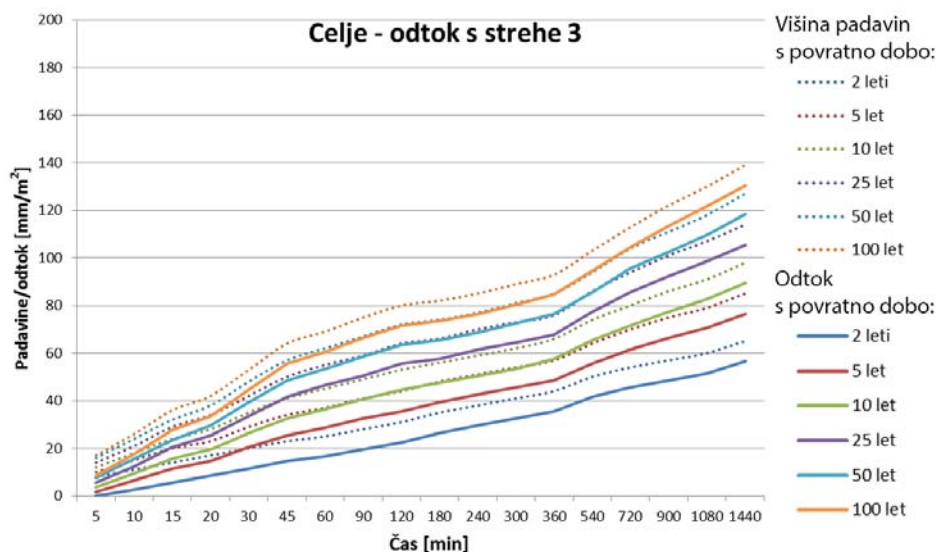
Grafikon 12: Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Celju

Graph 12: Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Celje



Grafikon 13: Celje - odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami

Graph 13: Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Celje



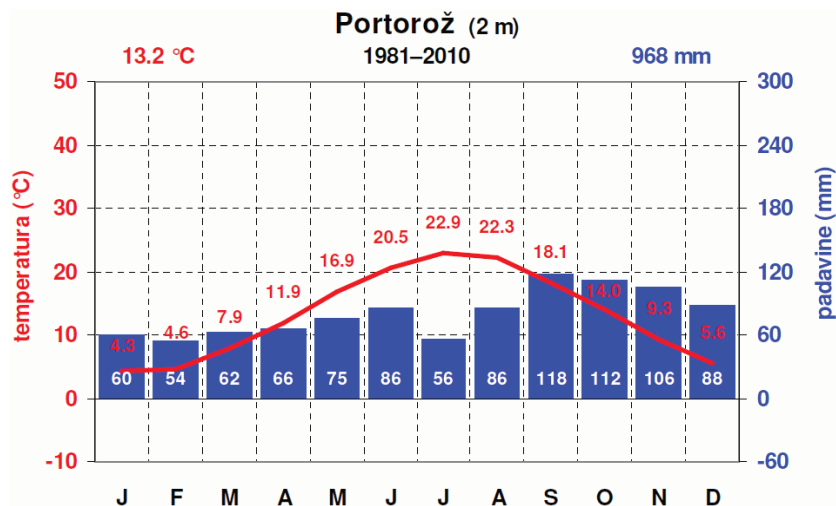
Grafikon 14: Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode $8,5 \text{ l/m}^2$ v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Celju

Graph 14: Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of $8,5 \text{ l/m}^2$ dependent on rainfall with different return periods in Celje

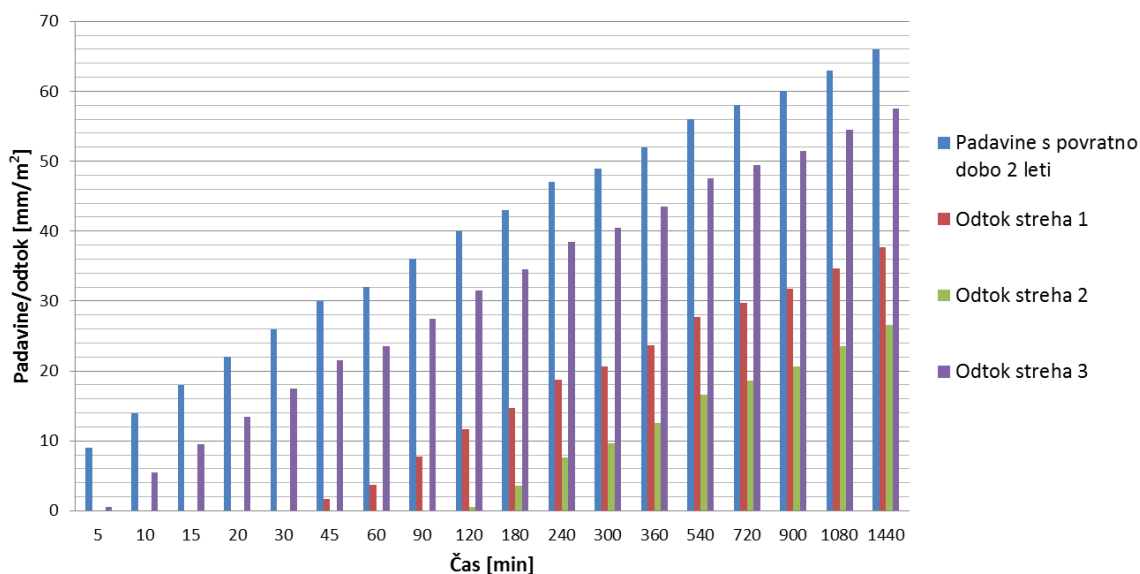
Grafikoni 12, 13 in 14 nam podajo naslednje podatke: streha 1 v celoti zadrži 90-minutni naliv s povratno dobo 2 leti, streha 2 pa 240-minutni naliv. S 5-letno povratno dobo zadrži streha 1 20-minutni naliv, streha 2 pa 60-minutnega. Z 10-letno povratno dobo zadrži streha 1 20-minutni, streha 2 pa 30-minutni naliv. S 25-, 50- in 100-letno povratno dobo zadrži streha 1 10-minutni naliv. Streha 2 zadrži 20-minutni naliv s povratno dobo 25 in 50 let. Streha 1 zadrži 5-minutni naliv z 250-letno povratno dobo, medtem ko streha 2 zadrži 10-minutnega. Streha 3 zadrži le 5-minutni naliv z 2-letno povratno dobo.

5.2.2 Portorož

Vremenska postaja Portorož leži na nadmorski višini 2 m. Tu se stikajo sredozemski in celinski podnebni vplivi, zato podnebje imenujemo submediteransko. Povprečna letna temperatura je $13,2 \text{ }^\circ\text{C}$, povprečna letna količina padavin je 968 mm. Največ padavin je meseca septembra (112 mm), najmanj pa julija (56 mm), ko so tudi najvišje povprečne temperature $22,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Najnižje temperature so meseca januarja ($4,3 \text{ }^\circ\text{C}$) (grafikon 15).



Grafikon 15: Podnebni diagram za Portorož od leta 1981 do leta 2010 (ARSO, 2016b)
Graph 15: Climate graph for Portorož from 1981 to 2010 (ARSO, 2016b)

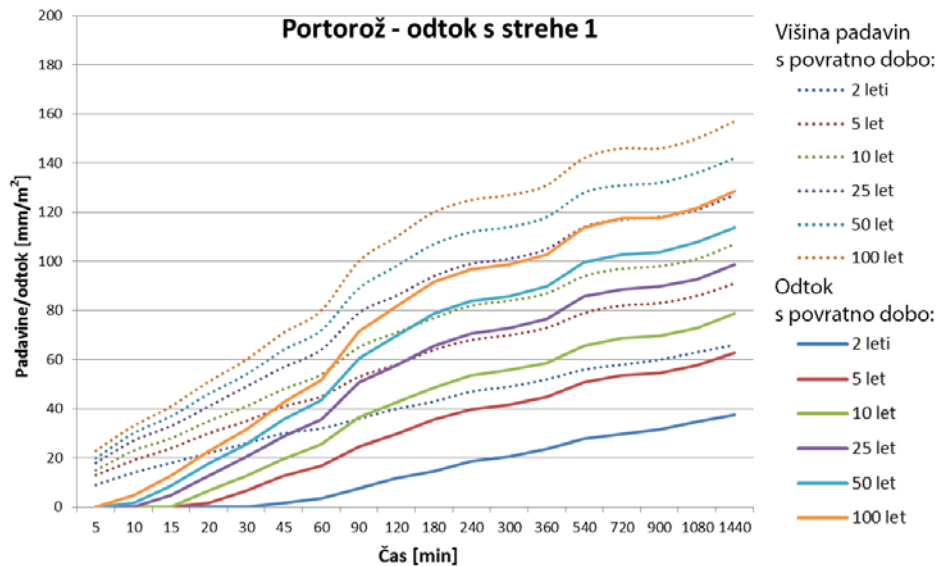


Grafikon 16: Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti za Portorož

Graph 16: Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years for in Portorož

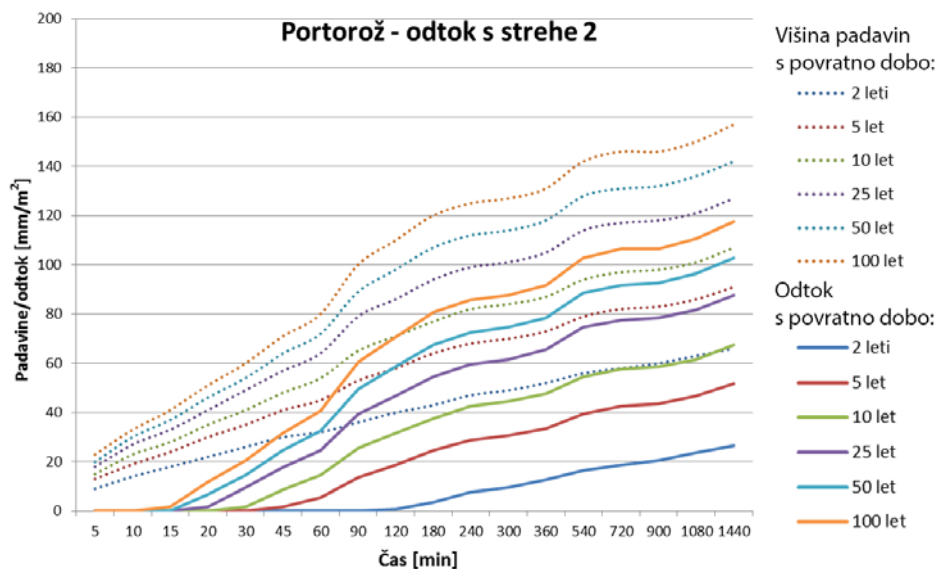
Streha 3 je v klimatskih razmerah značilnih za Portorož najmanj učinkovita, saj bi zadržala le 5-minutni naliv. Najbolj učinkovita je streha 2, ki bi zadržala 90-minutni naliv in bi pri 24-urnih padavinah, ko zapade 66 mm/m^2 padavin, zadržala 59,7 % padavin. Streha 1 bi zadržala 30-minutni naliv, 24-urno količino padavin pa bi zadržala 42,9 % padavin streha 3 bi enako količino 24-urnih padavin zadržala le 12,9 %, streha 2 pa bi zadržala 60,2 % padavin (grafikon 16).

Sledi primerjava sposobnosti zadrževanja vseh treh ekstenzivnih zelenih streh, ki so opisane v poglavju 5.1, na osnovi povratnih dob (2, 5, 10, 25, 50 in 100 let) za ekstremne padavine v Portorožu. Strehe imajo naslednje maksimalne sposobnosti zadrževanja vode: streha 1 28,3 l/m², streha 2 39,4 l/m² in streha 3 8,5 l/m² (grafikoni 17, 18 in 19).



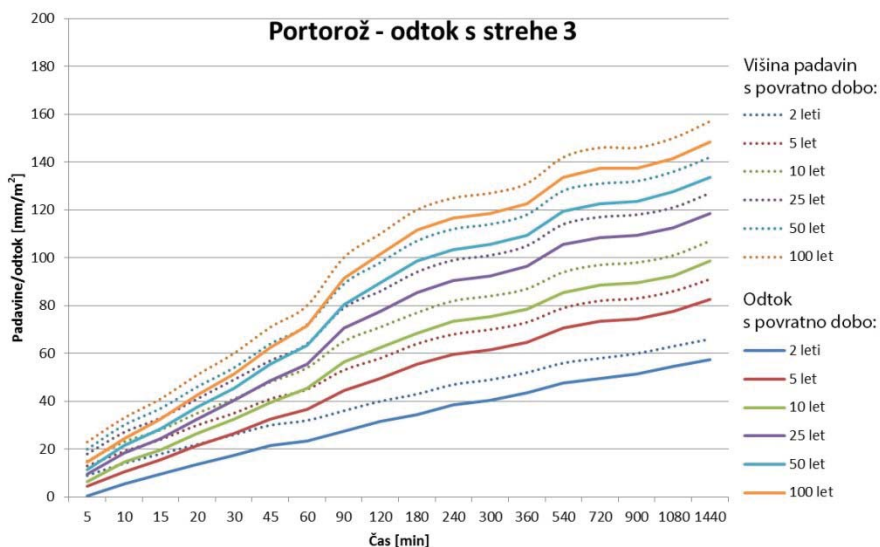
Grafikon 17: Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu

Graph 17: Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Portorož



Grafikon 18: Odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu

Graph 18: Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Portorož



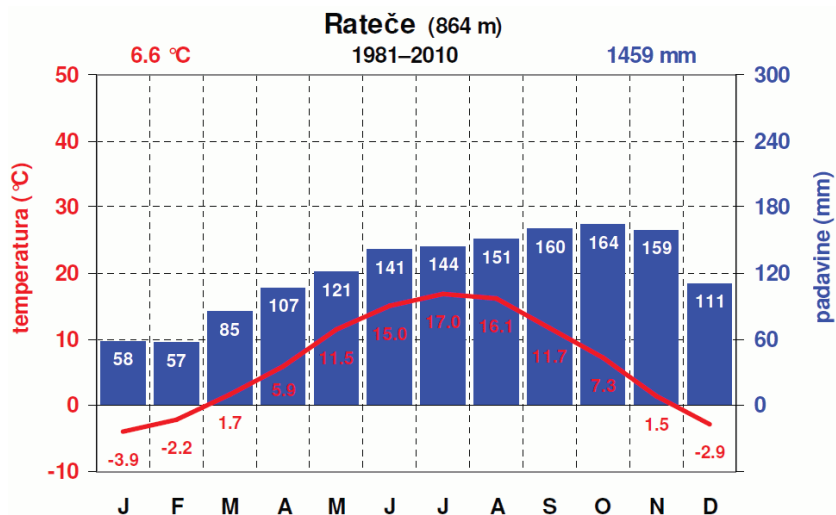
Grafikon 19: Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode $8,5 \text{ l/m}^2$ v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Portorožu

Graph 19: Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of $8,5 \text{ l/m}^2$ dependent on rainfall with different return periods in Portorožu

Streha 1 v celoti zadrži 30-minutni naliv s povratno dobo 2 leti, streha 2 pa 90-minutni naliv. S 5-letno povratno dobo zadrži streha 1 15-minutni naliv, streha 2 pa 30-minutnega. Z 10-letno povratno dobo zadrži streha 1 15-minutni, streha 2 pa 20-minutni naliv. S 25-letno povratno dobo zadrži streha 1 10-minutni naliv, streha 2 pa 15-minutnega. Streha 1 zadrži 5-minutni naliv s 50, 100 in 250-letno povratno dobo, medtem ko streha 2 zadrži 15-minutni naliv s 50-letno povratno dobo in 10-minutni naliv s 100 in 250-letno povratno dobo. Streha 3 ne zadrži niti 5-minutnega naliva z 2-letno povratno dobo.

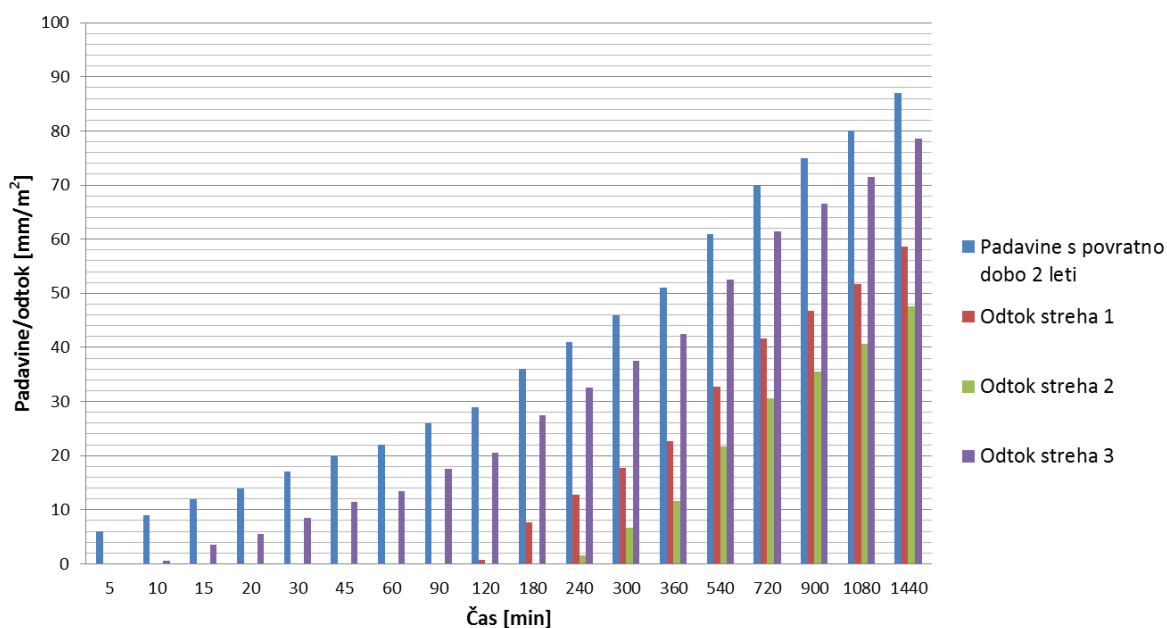
5.2.3 Rateče

Vremenska postaja Rateče leži na nadmorski višini 864 m, podnebje je gorsko. Povprečna letna temperatura je $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$, povprečna letna količina padavin je 1459 mm. Največ padavin je meseca oktobra (164 mm), najmanj pa februarja (57 mm). Najnižja povprečna temperatura je januarja ($-3,9 \text{ }^\circ\text{C}$), najvišja pa julija ($17,0 \text{ }^\circ\text{C}$) (grafikon 20).



Grafikon 20: Podnebni diagram za Rateče od leta 1981 do leta 2010 (ARSO, 2016c)

Graph 20: Climate graph for Rateče from 1981 to 2010 (ARSO, 2016c)

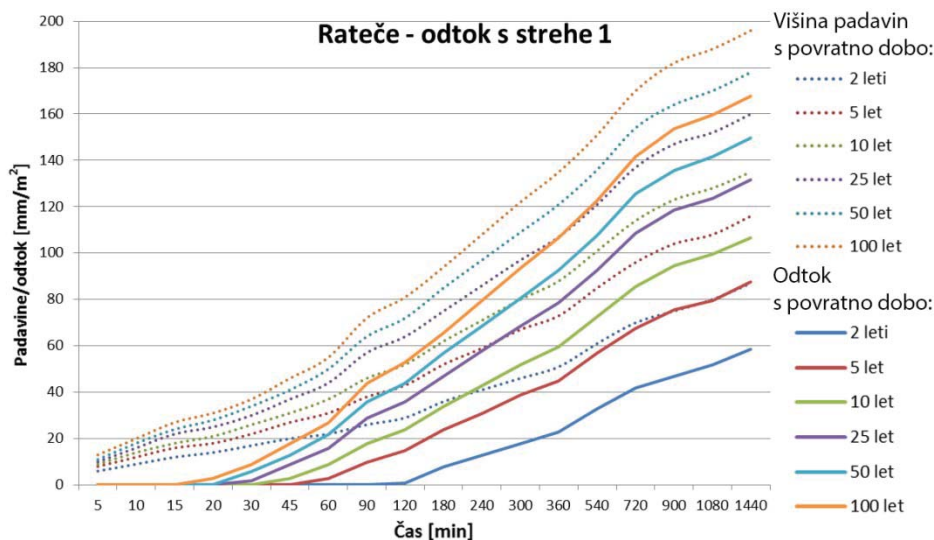


Grafikon 21: Primerjava odtoka s posameznih zelenih streh v odvisnosti od višine padavin s povratno dobo 2 leti v Ratečah

Graph 21: Green roofs stormwater runoff from different roofs dependent on the amount of rainfall with return period of 2 years in Rateče

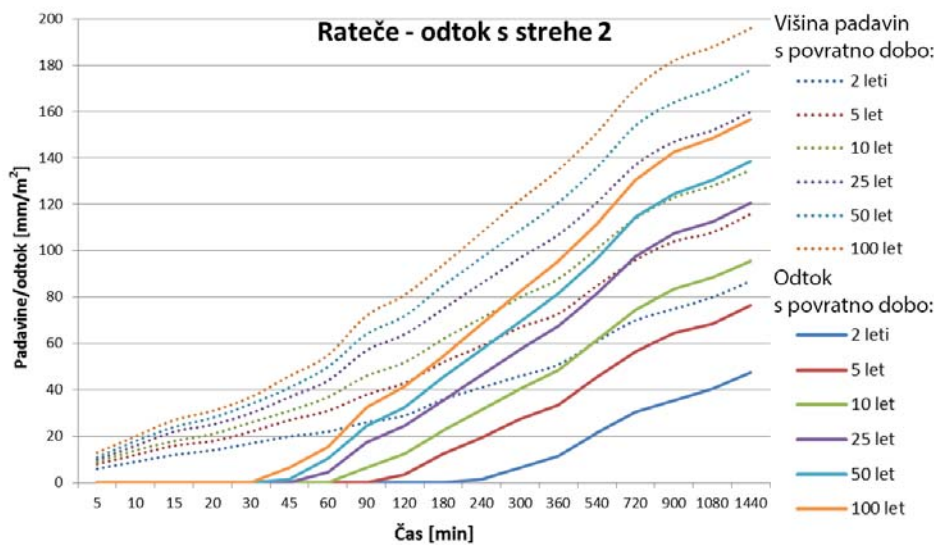
Streha 3 je v klimatskih razmerah značilnih za Rateče najmanj učinkovita (grafikon 21), saj bi zadržala le 5-minutni naliv. Najbolj učinkovita je streha 2, ki bi zadržala 180-minutni naliv in bi pri 24-urnih padavinah, ko zapade 87 mm/m² padavin, zadržala 45 % padavin. Streha 1 bi zadržala 90-minutni naliv, 24-urno količino padavin pa bi zadržala 32 %, streha 3 bi enako količino 24-urnih padavin zadržala le 9,7 %.

Sledi primerjava sposobnosti zadrževanja padavinskih vod pri vseh ekstenzivnih zelenih strehah, ki so opisane v poglavju 5.1, na osnovi povratnih dob (2, 5, 10, 25, 50 in 100 let) za ekstremne padavine v Ratečah. Strehe imajo naslednje maksimalne sposobnosti zadrževanja vode: streha 1 28,3 l/m², streha 2 39,4 l/m² in streha 3 8,5 l/m².



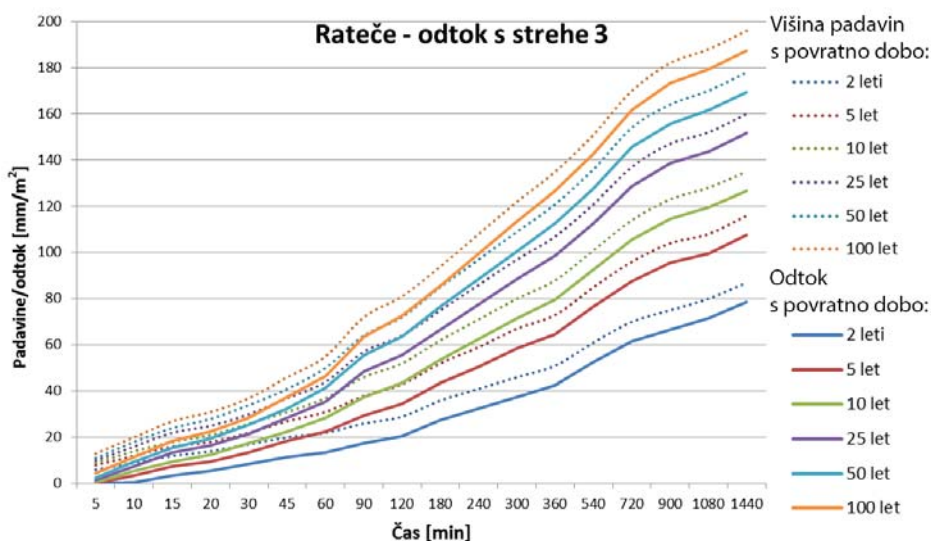
Grafikon 22: Odtok s strehe 1 z akumulacijo vode 28,3 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah

Graph 22: Stormwater runoff from the roof 1 with water accumulation of 28,3 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Rateče



Grafikon 23: Odtok s strehe 2 z akumulacijo vode 39,4 l/m² v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah

Graph 23: Stormwater runoff from the roof 2 with water accumulation of 39,4 l/m² dependent on rainfall with different return periods in Rateče



Grafikon 24: Odtok s strehe 3 z akumulacijo vode $8,5 \text{ l/m}^2$ v odvisnosti od padavin z različnimi povratnimi dobami v Ratečah

Graph 24: Stormwater runoff from the roof 3 with water accumulation of $8,5 \text{ l/m}^2$ dependent on rainfall with different return periods in Rateče

Streha 1 v celoti zadrži 90-minutni naliv s povratno dobo 2 leti, streha 2 pa 180-minutnega. S 5-letno povratno dobo zadrži streha 1 45-minutni naliv, streha 2 pa 90-minutnega. Z 10-letno povratno dobo zadrži streha 1 30-minutni, streha 2 pa 60-minutni naliv. S 25-letno povratno dobo zadrži streha 1 20-minutni naliv, streha 2 pa 45-minutnega. Streha 1 zadrži 20-minutni naliv s 50-letno povratno dobo, medtem ko streha 2 zadrži 30-minutnega. S 100-letno povratno dobo zadrži streha 1 15-minutni, streha 2 pa 30-minutni naliv. Z 250-letno povratno dobo zadrži streha 1 10-minutni, streha 2 pa 20-minutni naliv. Streha 3 zadrži 5-minutni naliv z 2- in 5-letno povratno dobo (grafikoni 22, 23 in 24).

5.2.4 Zaključki

Statistično analizo gospodarsko enakovrednih dogodkov uporabljamo za oblikovanje kanalizacijskega omrežja in črpališč, ugotovitev trajanja in pogostosti prelivanja razbremenilnikov in zadrževalnikov, določanje kritičnega dotoka na komunalno čistilno napravo ali izpusta v vodotok. Osnovna podatka sta intenziteta in trajanje naliva pri izbrani povratni dobi (Panjan, Bogataj, Kompare, 2005).

Stovin in sod. (2012) so dognali, da so predhodni sušni dnevi pomemben dejavnik hidrološke učinkovitosti zelene strehe. Vendar pa so na osnovi rezultatov študije povzeli, da ni možno napovedati verjetnosti zadrževanja padavinskih vod pri zeleni strehi povezane z določenim padavinskim dogodkom ali povratno dobo, čeprav upoštevamo predhodne sušne dneve, intenziteto padavin in druge vremenske parametre.

Takšna analiza vpliva zelenih streh na zmanjšanje padavinskega odtoka ne more prikazati vpliva evapotranspiracije, ki se pojavi med posameznimi padavinskimi dogodki. Odtok je namreč odvisen od vlažnosti substrata pred padavinskim dogodkom.

Dejanski padavinski dogodki se razlikujejo po intenziteti, to pa je glavni dejavnik, ki vpliva na količino padavinskega odtoka. Hipotetična nevihta ne more predstavljati dejanskega padavinskega dogodka iz preteklosti (Beyerlein, 2009). Učinkovitost zelene strehe je odvisna od dogajanja med posameznimi padavinskimi dogodki. Hipotetični padavinski dogodki se vedno začnejo s povprečnimi pogoji vlage v zemljini. Dejanski padavinski dogodki se pojavijo eden za drugim ali po dolgem sušnem obdobju, zato je substrat različno navlažen, prav tako je različna količina vode, ki jo je substrat zmožen akumulirati. Na začetku padavinskega dogodka je zelena streha delno zapolnjena z vodo ali polna vode, le po daljšem sušnem obdobju je prazna.

Sklepanja na osnovi enega padavinskega dogodka niso primerna, zato uporabimo simulacije hidroloških procesov, kot so npr. kapaciteta zadrževanja, vlažnost zemljine, evaporacija, transpiracija, infiltracija. Pri tem uporabimo padavinske podatke za daljše časovno obdobje in ustvarimo simuliranje odtoka z uporabo podatkov evapotranspiracije. Padavinska voda, ki pade na zeleno streho, se infiltrira v substrat, odteče in izhlapi nazaj v atmosfero.

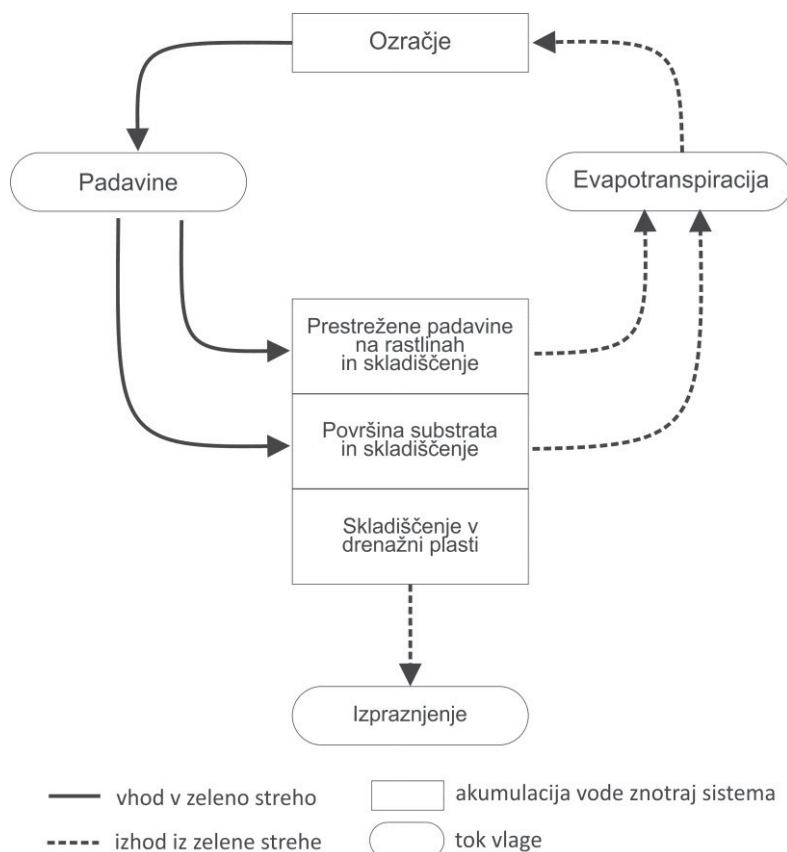
Večina infiltracije in evapotranspiracije se pojavi med posameznimi padavinskimi dogodki in ne v času samega dogodka. Zelene strehe so učinkovite pri zmanjševanju padavinskih vod zaradi evapotranspiracije. Dogajanje med enim in drugim padavinskim dogodkom je prav tako pomembno kot to, kar se dogaja med samo nevihto.

V nadaljevanju bomo zato upoštevali vpliv evapotranspiracije v sistemu zelenih streh, saj je naš cilj ugotoviti, kakšen bi bil odziv zelenih streh med dejanskimi padavinskimi dogodki v preteklosti. Vzeli bomo 40-letno mersko obdobje padavinskih podatkov na omenjenih klimatoloških postajah, tako bomo iz podatkov razbrali predhodne sušne dneve in zasičenost substrata. V ta namen smo izvedli meritve izhlapevanja vode iz treh opisanih zelenih streh.

6 EKSPERIMENTALNE MERITVE

6.1 Izhodišča in namen preiskav

Spodnji grafični model (slika 11), prikazuje dele sistema zelene strehe, ki akumulirajo vodo, in prehajanje vlage skozi zeleno streho v odtok ali nazaj v atmosfero. Vegetacija, substrat in drenažna plast padavinsko vodo akumulirajo. Nekaj vode odteče v odtok, ostala voda se vrne nazaj v atmosfero preko evapotranspiracije. Evapotranspiracija je v vodni bilanci zelene strehe najbolj kompleksen parameter. Stopnja evapotranspiracije je odvisna od vrste rastlin, sestave substrata, tipa drenažne plasti in vlage. Na evapotranspiracijo vplivajo tudi vremenski elementi, kot so npr. temperatura zraka, relativna vlažnost, sončno obsevanje in vetrovnost.



Slika 11: Shematičen prikaz sistema zelene strehe (Wong in Jim, 2015: str. 175)
Figure 11: Conceptual model of a green roof system (Wong and Jim, 2015: p. 175)

Mnogi avtorji, med njimi Garofalo in sod. (2016), so v svojih modelih poleg evapotranspiracije upoštevali tudi proces infiltracije, ki pomeni hitrost vstopanja vode skozi površinski sloj

substrata, ter perkolacijo, ki pomeni pronicanje vode skozi substrat. Prav tako kot evapotranspiracija je tudi infiltracija pomemben del hidrološkega kroga.

Ker je evapotranspiracija glavni proces, ki vpliva na izgube vode iz zelene strehe, smo v sklopu eksperimentalnih meritev izvajali eksperiment 1, pri katerem smo merili spreminjanje vsebnosti vode v treh sistemih zelenih streh v odvisnosti od padavin, evapotranspiracije in odtoka v pomladnih podnebnih razmerah ter eksperiment 2, pri katerem smo merili izhlapevanje iz treh različnih debelin zemljin, pri čemer smo ugotavljali ali na hitrost izhlapevanja vode iz substrata vpliva vrsta substrata in različna debelina substrata. Podatke smo potrebovali pri modeliranju odtoka z zelene strehe pri različnih podnebnih razmerah.

V nadaljevanju smo podrobneje opisali evapotranspiracijo.

6.2 Evapotranspiracija

Pojem evapotranspiracija zajema evaporacijo in transpiracijo. Evapotranspiracija (ET) je prehajanje vode v obliki vodne pare s površine tal in skozi listne reže rastlin v atmosfero. Izhlapevanje ali evaporacija pomeni, da voda iz tekočega agregatnega stanja preide v plinasto. Transpiracija je fiziološki proces rastlin, ki s koreninami črpajo vodo iz tal, jo uporabijo v metaboličnem procesu in nato izpustijo v atmosfero skozi list (Brilly, Šraj, 2005). Evapotranspiracija je zelo pomembna pri računanju padavinskih izgub.

Izhlapevanje vode je odvisno od različnih dejavnikov. Za našo raziskavo so pomembni naslednji dejavniki, ki so povzeti po Brilly in Šraj (2005):

- energija sončnega sevanja in energija, ki se sprošča s hlajenjem podlage, iz katere izhlapeva voda;
- temperatura zraka in podlage (pri višjih temperaturah zrak absorbira več vodne pare);
- vlažnost zraka, saj zrak sprejme pri določeni temperaturi omejeno količino vodne pare;
- vrsta in stanje podlage, saj temnejša podlaga absorbira več sončnega sevanja;
- vlažnost zemljine (podlage), ki v točki venenja preneha;
- veter, ki pospešuje izhlapevanje vode.

Potencialna evapotranspiracija predstavlja največjo količino vode, ki lahko preide v atmosfero z območja, ki je v celoti prekrito z rastlinstvom in dobro oskrbljeno z vodo, glede na lastnosti atmosfere in količino energije, ki je na razpolago.

Dejanska evapotranspiracija je količina vode, ki dejansko preide v atmosfero s površine tal in rastlin pri naravni količini vlage v tleh (Brilly, Šraj, 2005).

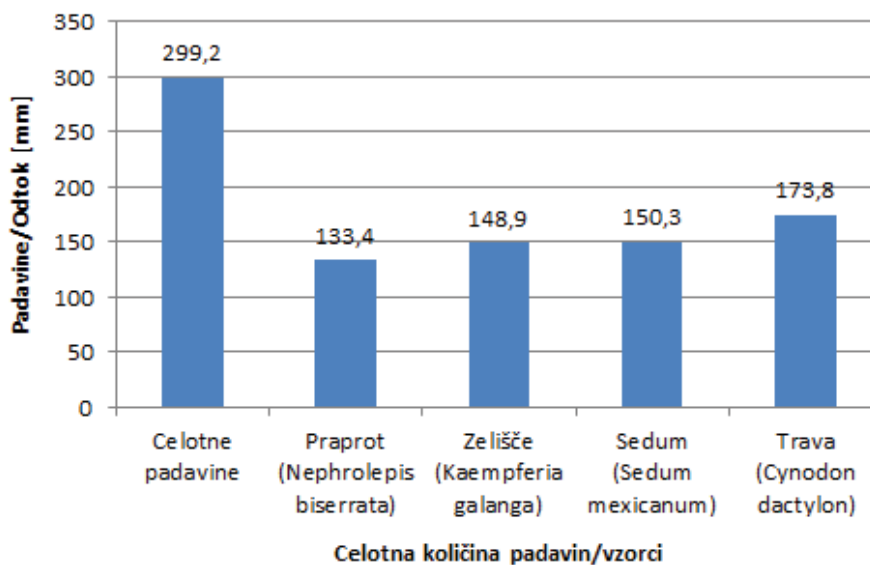
Pogosto se računa referenčna evapotranspiracija (ET_0). To je količina vode, ki je izhlapela iz referenčne rastline in tal. Referenčna površina je trava, ki popolnoma prekriva tla in je dovolj preskrbljena z vodo, ima višino 0,12 m, površinsko upornost 70 s/m in albedo 0,23.

Dnevni podatki za referenčno evapotranspiracijo in padavine so dostopni od leta 1961 na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO). Za izračun ET_0 je uporabljena Penman-Monteithova metoda, ki upošteva temperaturo zraka, relativno zračno vlago, hitrost vetra in sončno sevanje (ARSO, 2016).

V matematičnem modelu, ki ga bomo uporabili v nadaljevanju magistrskega dela, bomo tako kot v zgornjem primeru upoštevali vpliv povprečne urne evapotranspiracije za izbrane kraje (Celje, Rateče, Portorož).

Ker imajo naši testni modeli različno vegetacijo, v nadaljevanju povzemamo izsledke raziskav o vplivu vegetacije zelene strehe na količino padavinskega odtoka avtorjev Krishnan in Ahmad 2014. Grafikon 25 prikazuje razliko v odtoku z zelene strehe zaradi različne evapotranspiracije rastlin, ki so bile vključene v raziskavo. V raziskavi je bilo preučevanih 31 padavinskih dogodkov s skupno količino padavin 299,2 mm. Dve od treh avtohtonih rastlinskih vrst sta bolj zmanjšali odtok v primerjavi z neavtohtono vrsto *Sedum mexicanum*. Najbolj se je zmanjšal odtok pri zasaditvi praproti *Nephrolepis bisserata*, najmanj pa pri travi *Cynodon dactylon*, in sicer kar za 13,4 % manj kot *Nephrolepis bisserata*.

Razlika med rastlinama z najvišjo in z najnižjo evapotranspiracijo je bila 61 %, kar je značilno za tropske klimatske razmere. Medtem ko Berghage (2007) ugotavlja 40 % razliko med rastlinami v zmanjšanju odtoka v zmernotoplem pasu.



Grafikon 25: Vpliv različnih vrst vegetacije na padavinski odtok v primerjavi s celotno količino padavin (Krishnan in Ahmad, 2014: str. 4)

Graph 25: The influence of different types of vegetation on stormwater runoff compared to the total amount of precipitation (Krishnan and Ahmad, 2014: p. 4)

V našem primeru ima streha 1 samo eno vrsto vegetacije, na modelu strehe 2 opazimo tri vrste vegetacije in na modelu strehe 3 dve vrsti. Strehi 1 in 2 imata zelo gosto prekoreninjen substrat, medtem ko streha 3 nima prekoreninjenega substrata. Predvidevali smo, da bodo vsi ti dejavniki vplivali na učinek evapotranspiracije pri posameznem modelu zelene strehe.

6.3 Eksperiment 1

6.3.1 Metodologija

Meritve izhlapevanja vode smo izvajali v kraju Mislinja, ki leži na nadmorski višini 600 m. Testni moduli so bili postavljeni na strehi 12 m visokega poslovno-stanovanjskega objekta (sliki 12 in 13). Klimatološki podatki so iz 10 km oddaljene klimatološke postaje Šmartno pri Slovenj Gradcu, ki leži na nadmorski višini 455 m. Povprečna letna temperatura v obdobju med letoma 1981 in 2010 je bila 8,5 °C, povprečna letna količina padavin je bila 1205 mm. Najvišja povprečna mesečna temperatura je bila meseca julija (18,7 °C) in najnižja januarja (-2,5 °C), povprečna letna evapotranspiracija je bila 670 mm, povprečna najvišja mesečna evapotranspiracija pa je bila 117 mm meseca julija in najnižja meseca decembra, ko je znašala 7 mm.



Slika 12: Eksperimentalne zelene strehe na objektu (Vir: avtor)

Figure 12: The experimental green roofs on the building (Source: author)

Meritve smo izvajali 28 dni, od 15. 4. 2016 do 13. 5. 2016. Uporabili smo metodo tehtanja vzorcev z laboratorijsko tehtnico z natančnostjo 0,2 g. Tehtali smo 5-krat na dan. Zmanjšana teža je pomenila izgubo vode v modelu zelene strehe zaradi evapotranspiracije ali odtoka. Teža je bila povečana zaradi padavin, ki so bile zadržane ali pa še niso v celoti odtekle. Podobno sta izvajala meritve Krishnan in Ahmad (2014), ko sta ugotavljala vpliv različne vegetacije zelene strehe na evapotranspiracijo.



Slika 13: Eksperimentalne zelene strehe po sneženju 28. 4. 2016 (Vir: avtor)
Figure 13: The experimental green roofs after snowing 28/4/2016 (Source: author)

Na strehi smo imeli preprost dežemer, posodo za merjenje zajetih padavin, ki smo jih tehtali in preračunali na 1 m² površine. Pri manjših padavinah je na meritve vplivalo izhlapevanje vode iz posode, saj nam ni uspelo vedno izmeriti količine padavin takoj po deževju. V tem časovnem obdobju je bila najvišja izmerjena temperatura, 17. 4. 2016, ko je bila 21,1 °C, in najnižja 26. 4. 2016, ko je bila - 4,3 °C.

Modeli zelenih streh so bili veliki 29×20,5 cm (streha 1), 28×22 (streha 2) in 19,5×22 cm (streha 3). Vsi izmerjeni podatki so bili preračunani na 1 m² zelene strehe.

6.3.2 Meritve zadrževalnih sposobnosti posameznih zelenih streh

V preglednici 7 so povzete osnovne značilnosti vseh treh obravnavanih zelenih streh, ki smo jih predstavili že v poglavju 5.1.

Pred začetkom izvajanja meritev izhlapevanja smo opravili test zadrževanja vode s simulacijo treh padavinskih dogodkov (8 mm, 20 mm in 10 mm). Tako smo s skupno količino vseh treh padavinskih dogodkov dosegli zadrževalno sposobnost strehe 2, ki po podatkih proizvajalca znaša 39,4 mm. Pri dogodku 8 mm padavin ni bilo odtoka, pri 20 mm se pojavi odtok pri strehah 1 in 3.

Streha 1 je zadržala 23,5 mm padavin, kar je 15 % manj padavin od podatka, ki ga navaja proizvajalec, streha 2 33,1 mm padavin, kar je tudi 15 % manj padavin, kot jih navaja proizvajalec, streha 3 pa 24,1 mm padavin, kar je skupaj z vegetacijskim slojem 2,89-krat več od podatka proizvajalca, ki navaja podatke o akumulaciji vode v zasičenosti zelene strehe brez upoštevanja vegetacije.

Preglednica 8: Povzetek značilnosti obravnavanih zelenih streh 1, 2 in 3
 Table 8: A summary of the green roofs' 1, 2 and 3 characteristics

ZELENA STREHA	Posebnosti v sestavi	Debelina [cm]	Teža v popolni zasičenosti [kg/m ²]	Količina vode v popolni zasičenosti [l/m ²]	
				Po podatkih proizvajalca	Izmerjeno v eksperimentu
Streha 1	Filc kot akumulator vode	6,2	42,9	28,3	23,5
Streha 2	Substrat iz mineralnih vlaken Drenaža z vodnim zalogovnikom	8,5	59,5	39,4	33,1
Streha 3	Substrat iz drobljene opeke Drenaža z vodnim zalogovnikom	10,4	103,5	8,5 ²	24,1

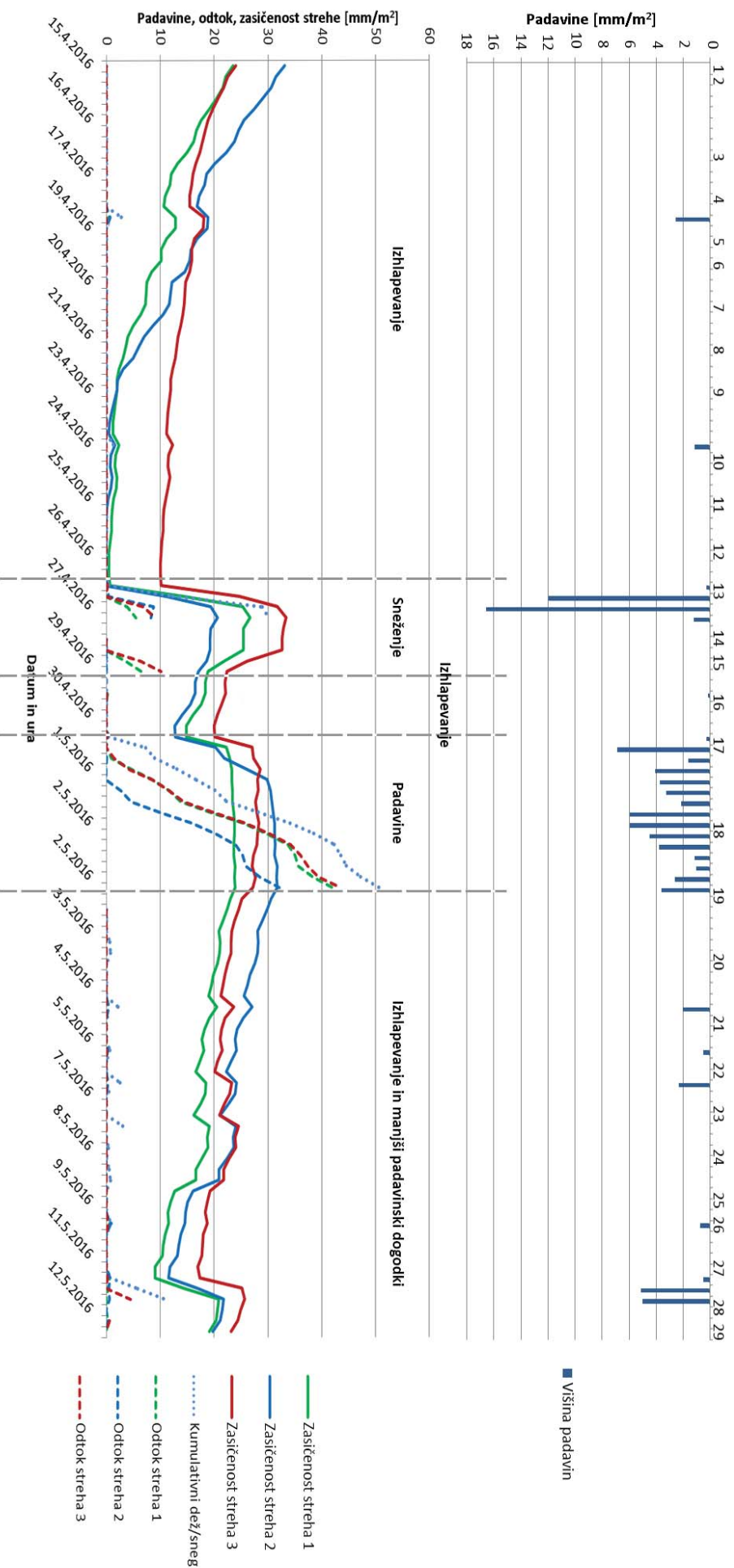
6.3.3 Meritve izhlapevanja

Po izvedenih meritvah zadrževalnih sposobnosti posameznih tipov streh, smo nadaljevali z meritvami izhlapevanja v vremenskih pogojih med 15. 4. in 13. 5. 2016.

Predpostavili smo, da so sistemi zelenih streh v zasičenosti, kasneje se je izkazalo, da ta predpostavka ni najbolj držala le za streho 3, katere substrat je iz drobljene opeke.

Grafikon 26 prikazuje celoten potek eksperimenta 1 z vsemi podatki, ki smo jih pridobili v merskem obdobju. Razberemo lahko spreminjanje vsebnosti vode v treh sistemih zelenih streh v odvisnosti od padavin, evapotranspiracije in odtoka.

² Brez vegetacijskega sloja



Grafikon 26: Celoten pregled meritev na modelih zelenih streh od 15. 4. do 13. 5. 2016
 Graph 26: An overview of the green roof models measurements from 15/4/ to 13/5/2016

6.3.4 Analiza podatkov in rezultati

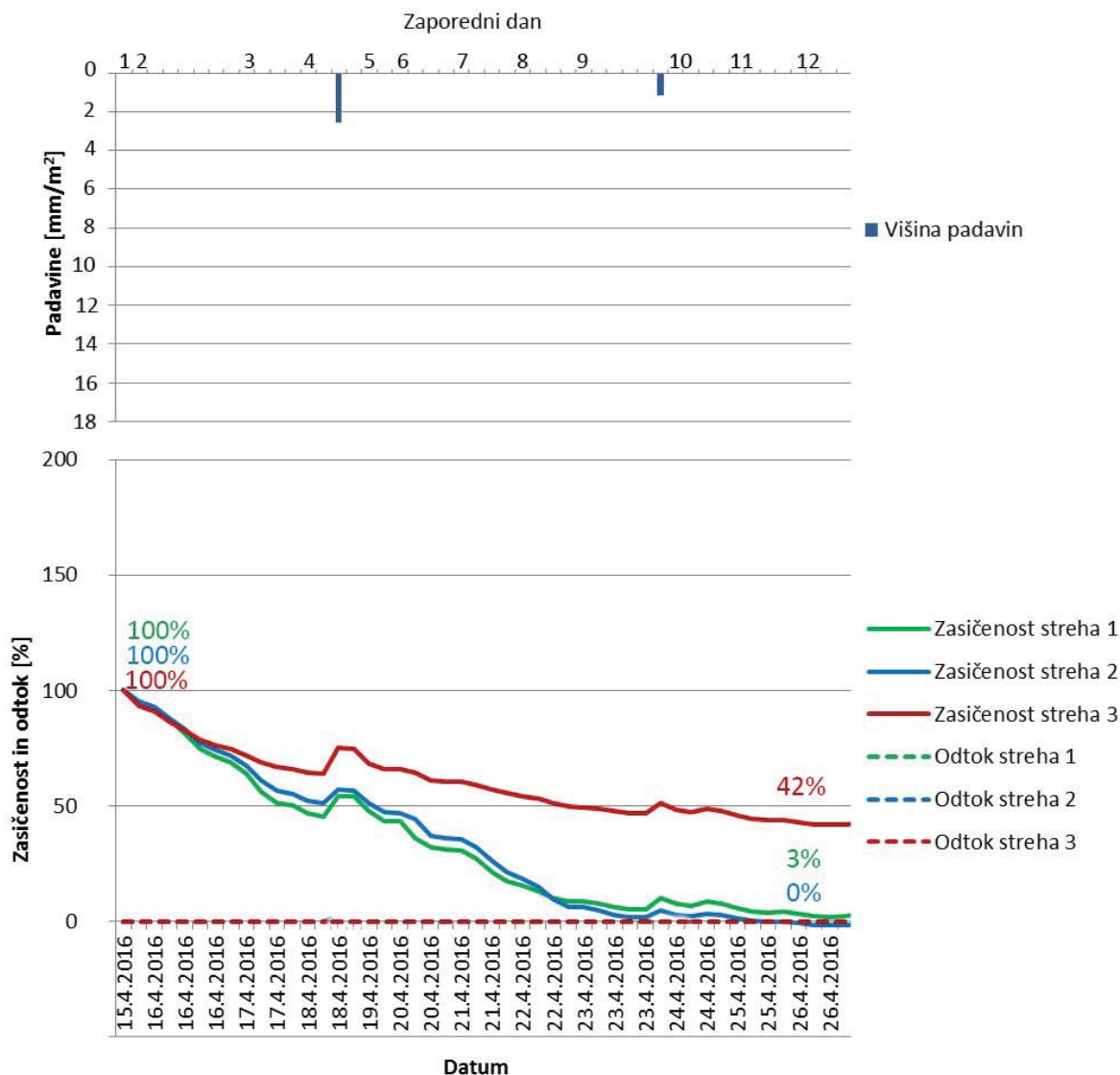
Rezultati, ki so bili pridobljeni v eksperimentu 1, so prikazani z grafikonom 26. Mersko obdobje je bilo dolgo 29 dni. Glede na rezultate smo ga razdelili na 4 dele: izhlapevanje (12 dni), sneženje in izhlapevanje (4 dni), padavine (3 dni), izhlapevanje in manjši padavinski dogodki (10 dni)

6.3.4.1 Izhlapevanje

Prvih 10 dni izvajanja meritev so bili povprečni dnevni vremenski pogoji naslednji: temperatura 11,2 °C, relativna vlažnost 63,3 %, sončno sevanje 212,4 W/m². Obdobje je bilo brez večjih padavinskih dogodkov, evapotranspiracija s streh 1, 2 in 3 je bila ves čas enakomerna. Pridobili smo rezultate, ki so bili potrebni za kalibracijo modela zelene strehe.

Vrednosti za povprečno dnevno temperaturo zraka in povprečno dnevno sončno sevanje smo uporabili za izračun povprečne dnevne ET₀, ki smo jo upoštevali pri določitvi koeficienta ET za posamezno zeleno streho. Izračunane vrednosti so prikazane v preglednicah 14 in 15 na strani 85. Model smo kalibrirali s primerjavo izračunanih vrednosti ET₀ in izmerjenih vrednosti izhlapevanja s streh 1, 2 in 3 od 16. 4. do 22. 4. 2016.

Pri zeleni strehi 1 in 3 opazimo prve 4 dni zelo enakomerno izhlapevanje (grafikon 27). Streha 2 je deveti dan presegla izhlapevanje vode s strehe 1. Deseti dan po zalivanju in z dvema manjšima padavinskima dogodkoma (2,6 mm in 1,2 mm) je streha 2 postala popolnoma izsušena in tako najbolj pripravljena na naslednji padavinski dogodek. Streha 1 je bila suha 12. dan popoldan, ko nismo izmerili več izhlapevanja oz. izgube vode. Tako je s strehe 1 v enajstih dneh izhlapelo 23,5 l/m² vode, s strehe 2 33,1 l/m² in s strehe 3 14 l/m². Pri strehi 3 smo opazili zelo počasno izhlapevanje vode in predvidevamo, da zaradi neprekoreninjenosti substrata.



Grafikon 27: Spreminjanje zasičenosti strehe 1, 2 in 3 v prvih 12-ih dneh opravljanja meritev

Graph 27: Changes in the saturation of roofs 1, 2 and 3 in the first 12 days of measurements

Po 12-ih dneh od 100 % zasičenosti modelov zelenih streh je bila streha 2 popolnoma izsušena, v strehi 1 je ostalo 3 %, v strehi 3 pa 42 % vlage. To so vrednosti za začetno zasičenost streh ob prvih večjih padavinah.

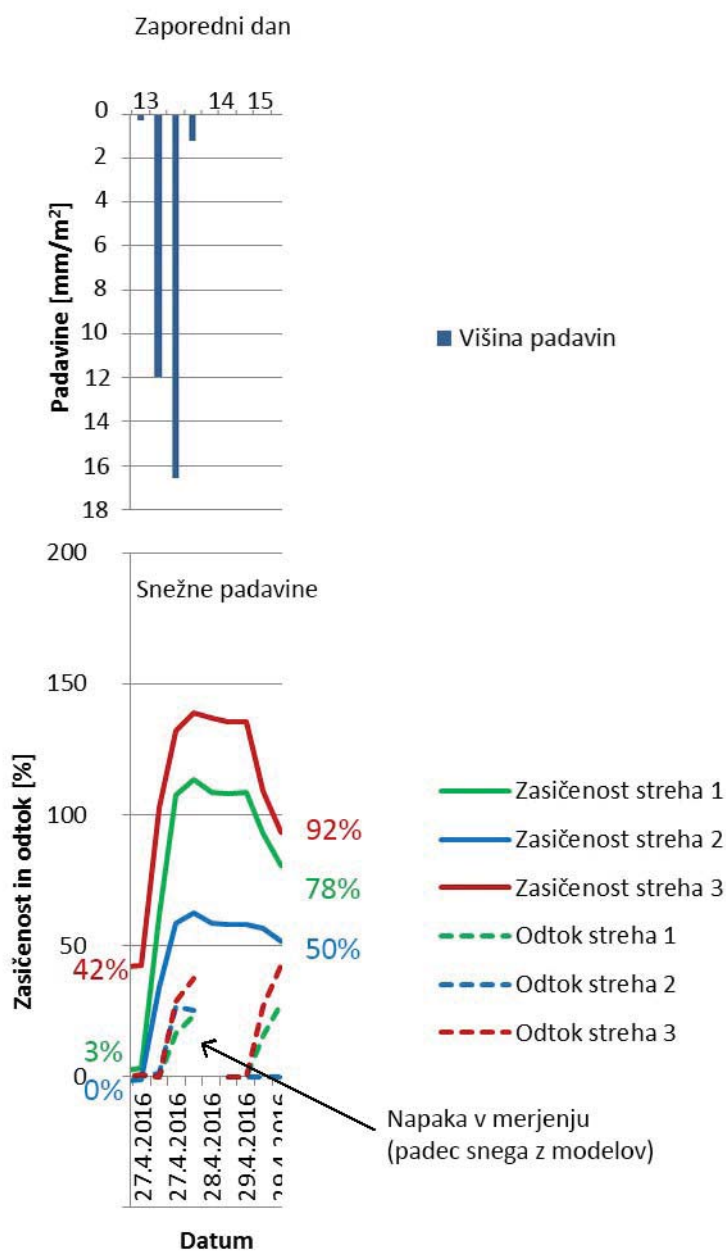
6.3.4.2 Sneženje in izhlapevanje

12. dan, 26. 4. 2016 je zvečer začelo snežiti. Do 28. 4. 2016 je padlo 29,7 mm/m² snežnih padavin. Pri tehtanju modelov s snegom je prišlo do manjše napake, ker je del snega padel s posameznega modela. Naslednji dan, 29. 4. 2016, se je ves sneg stalil, višek vode je

odtekel. Odtok se pojavi pri strehah 1 in 3, streha 2 ni imela odtoka, ampak je zadržala vso količino snežnih padavin. Iz podatkov vidimo, da sta po taljenju snega strehi 1 in 3 postali zasičeni.

Čeprav so snežne padavine nenavadne za mesec maj, so bile za našo raziskavo dobrodošle, na grafu se nazorno vidi, da ima sneg na zeleno streho velik vpliv. S taljenjem snega postane zelena streha zasičena.

15. in 16. dan izvajanja meritev je bila stopnja evapotranspiracije enakomerna pri strehah 1 in 2, izhlapevanje vode je bilo pri strehi 3 počasnejše. Izhlapevanje pred naslednjim padavinskim dogodkom je trajalo en dan, najmanj je bila zasičena streha 2 (47 %), streha 1 je bila zasičena 75 % in streha 3 89 %, kar je razvidno iz grafikona 28.

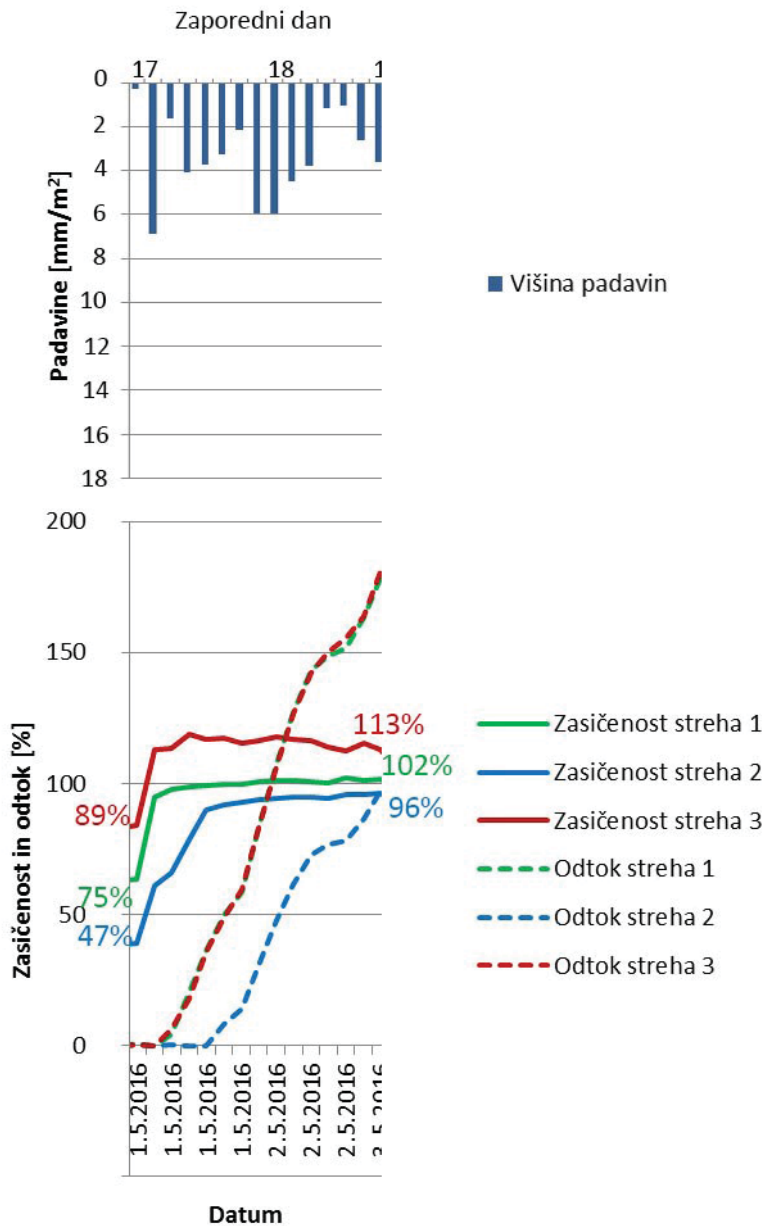


Grafikon 28: Spreminjanje zasičenosti streh 1, 2 in 3 po padavinskem dogodku 27. 4. 2016
 Graph 28: Changes in saturation of roofs 1, 2 and 3 after the rainfall event 27/4/2016

6.3.4.3 Padavinski dogodki

Od 1. 5. do 3. 5. 2016 oziroma od 17. do 19. dneva opravljanja meritev je bila serija padavinskih dogodkov s skupno količino 50,7 mm (grafikon 29). Opazimo zakasnitev odtoka pri vseh treh strehah. Najdlje je zakasnel odtok s strehe 2 in ga tudi najbolj zadržal. Strehi 1 in 3 imata enak odtok, ki narašča enakomerno z naraščanjem padavin. Vse tri strehe so imele v času padavinskih dogodkov skoraj enake vrednosti zasičenosti kot na začetku merskega obdobja 15. 4. 2016. Strehi 1 in 2 sta se zelo približali začetnemu stanju. Po

padavinah 1. 5. 2016 je voda odtekla in takrat je bila razlika v zadrževanju strehe 3 glede na začetne vrednosti 4,7 %.



Grafikon 29: Spreminjanje zasičenosti strehe 1, 2 in 3 po padavinskih dogodkih 1. 5. in 2. 5. 2016

Graph 29: Changes in saturation of roofs 1, 2 and 3 after rainfall events 1/5 and 2/5/2016

Grafikon 25 prikazuje, da so vse tri strehe 1. 5. 2016 postale zasičene, pri vseh treh se je pojavil odtok. Odtok se najprej pojavi hkrati pri strehah 1 in 3, približno 4 ure kasneje pa pri strehi 2. Odstotek zasičenosti se razlikuje glede na začetno stanje 15. 4. 2016. Največja razlika je pri substratu iz drobljene opeke. Predvidevali smo, da je razlika nastala zaradi počasnega vpijanja vode pri glinenih delcih, ki bi jih zato morali namakati, da bi na začetku

meritev dosegli realno zasičenost. Tako je streha 3 na koncu padavinskega dogodka dosegla indeks zasičenosti 1,13, streha 2 0,96 in streha 1 1,02 glede na začetno domnevno popolno zasičenost, pred pričetkom merjenja izhlapevanja.

6.3.4.4 Interpretacija podatkov evapotranspiracije

Vzrok za nižjo evapotranspiracijo lahko najdemo v drugačnih vremenskih pogojih: povprečna temperatura 8,2 °C, povprečna relativna vlažnost 77,9 % in sončno sevanje 152,2 W/m².

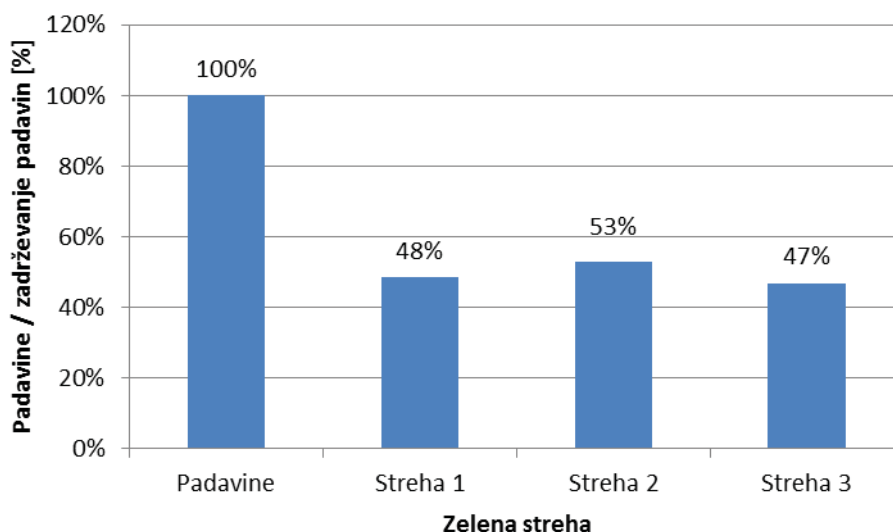
Ko se sistem zelene strehe osuši, je pripravljen na naslednji padavinski dogodek in tako lahko najbolj učinkovito zadrži in zmanjša padavinski odtok. V našem primeru in v opisanih vremenskih pogojih od 1. do 11. dne po zalivanju je s strehe 1 izhlapelo 23,1 l/m² vode, s strehe 2 33,7 l/m², medtem ko je s strehe 3 izhlapelo komaj 14 l/m², kar je 41,5 % manj kot pri strehi 2 z največjim izhlapevanjem. Nižjo evapotranspiracijo pri strehi 3 si lahko razlagamo zaradi neprekoreninjenosti substrata iz drobljene opeke modela strehe, ki smo ga pridobili.

Snežnih padavin je bilo 30 mm, ko se je sneg naslednji dan stopil, je bil odtok s strehe 1 6,6 mm, s strehe 3 10,2 mm, streha 2 ni imela odtoka. Pred snežnimi padavinami je bilo 11 suhih dni. Serija padavinskih dogodkov od 1. 5. do 3. 5. 2016 pa se je zgodila, ko so strehe bile v naslednji zasičenosti: streha 1 75 %, streha 2 47 %, streha 3 89 %. Padlo je 50,7 mm padavin, streha 1 je imela 42 mm odtoka, streha 2 32 mm in streha 3 43,5 mm. Tako se je padavinski odtok pri suhem substratu zmanjšal pri strehi 1 za 78 %, pri strehi 2 za 100 % in pri strehi 3 za 66 %. Ko je bil substrat zasičen, pa je streha 1 zmanjšala padavinski odtok za 17,3 %, streha 2 za 37 % in streha 3 za 14,3 % (preglednica 9). Najbolj učinkovita je bila streha 2. Z meritvami smo potrdili navedbe iz literature, da na učinkovitost zmanjšanja odtoka z zelene strehe vpliva število sušnih dni pred padavinskim dogodkom.

Preglednica 9: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka z zelenih streh, ko je substrat suh in ko je delno zasičen

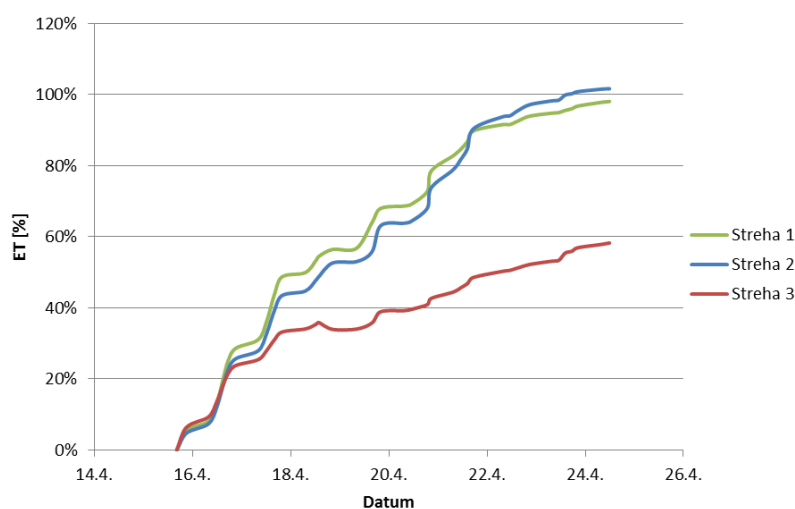
Table 9: Comparison of green roofs runoff reduction, when the substrate is dry and when it is partially saturated

ZASIČENOST SUBSTRATA	ZMANJŠANJE ODTOKA po padavinskem dogodku		
	Streha 1	Streha 2	Streha 3
Suh substrat (predhodno suho obdobje)	78 %	100 %	66 %
Delno zasičen substrat/ za streho 1 (75 %), 2 (47 %) in 3 (89 %)	17,3 %	37 %	14,3 %



Grafikon 30: Celotno zadrževanje padavinskega odtoka
Graph 30: Total stormwater runoff retention

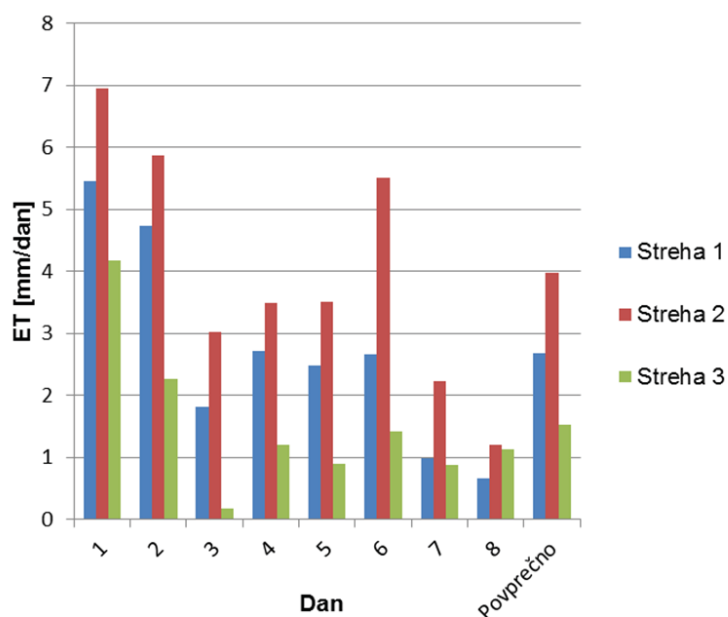
Na grafikonu 30 je prikazano zadrževanje padavinskega odtoka v eksperimentu 1. Od skupne količine padavin, ki je bila v opazovanem obdobju 94 mm/m^2 je streha 1 zadržala povprečno 48 %, streha 2 53 % in streha 3 47 % padavin. Glede na velike razlike v sposobnostih zadrževanja posamezne strehe so to majhne razlike. Takšen rezultat razlagamo kot posledica kratkega opazovanega obdobja in okoliščin po sneženju, ko so vse tri strehe postale zasičene. Količina padavin je bila tako velika, da so se vse strehe odzivale kot neprepustne površine.



Grafikon 31: Primerjava evapotranspiracije v % za prvih 10 dni za strehe 1, 2 in 3
Graph 31: Comparison of evapotranspiration in % of the roofs 1, 2 and 3 for the first 10 days

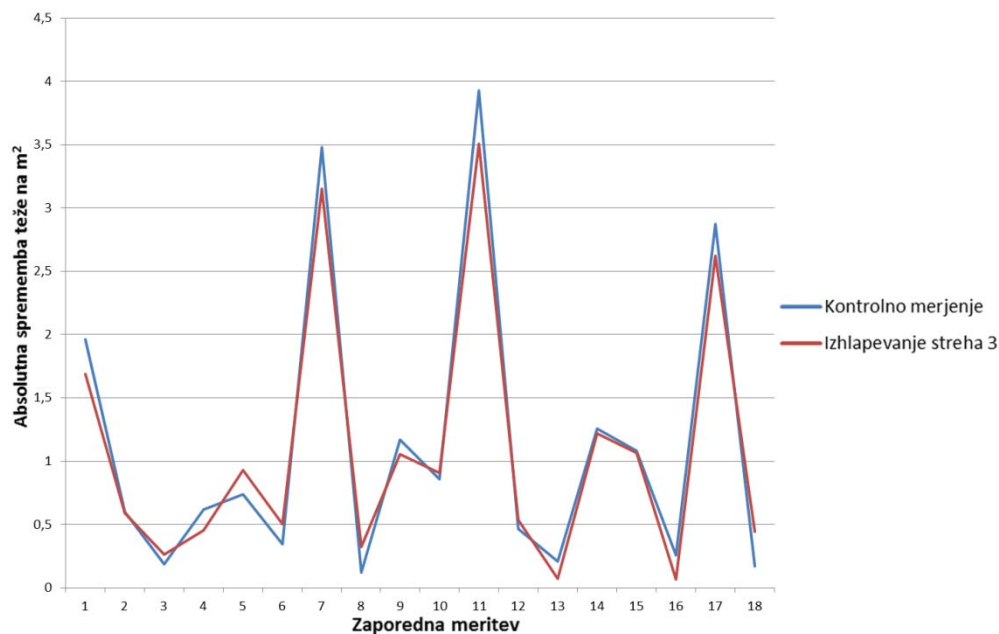
Na grafikonu 31 je prikazana primerjava stopnje evapotranspiracije s treh zelenih streh za prvih 10 dni. Poe in sod. (2015) so ugotovili, da na stopnjo ET vpliva vsebnost vlage v substratu, kar pa v eksperimentu 1 nismo potrdili. Vse tri strehe so vseh 10 dni izgubljale vodo skoraj enakomerno. Stopnja ET je bila prva dva dneva pri vseh strehah enaka, od tretjega dne naprej je bila stopnja ET nižja pri strehi 3 s substratom iz drobljene opeke.

Ker smo v matematičnem modelu upoštevali povprečno dnevno evapotranspiracijo za Celje, Rateče in Portorož, smo najprej primerjali povprečno stopnjo evapotranspiracije za Šmartno pri Slovenj Gradcu z vrednostmi, ki smo jih pridobili z meritvami (grafikon 32).



Grafikon 32: Povprečna dnevna izmerjena evapotranspiracija za strehe 1, 2 in 3
Graph 32: Measured average daily evapotranspiration for roofs 1, 2 and 3

Povprečna dnevna evapotranspiracija za Šmartno pri Slovenj Gradcu je po podatkih ARSO za mesec april 2,2 mm/dan, za mesec maj pa je 3,2 mm/dan. Na osnovi meritev smo ugotovili vrednost evapotranspiracije v opazovanem obdobju za streho 1 2,68 mm, za streho 2 3,97 mm in za streho 3 1,52 mm. Izmerjene vrednosti za streho 1 in streho 2 so primerljive povprečnim vrednostim. Zaradi slabega izhlapevanja s strehe 3 smo 18. dan, 3. 5. 2016, uvedli kontrolno merjenje izhlapevanja iz samega substrata. Ugotovili smo, da je izhlapevanje iz modela strehe 3 enako izhlapevanju samega substrata iz drobljene opeke (grafikon 33), kar pomeni, da vegetacija strehe 3 ne poveča izhlapevanja. S tem smo ovrgli predvidevanja, da je slabo izhlapevanje s strehe 3 posledica neprekoreninjenosti substrata iz drobljene opeke.



Grafikon 33: Primerjava spremembe teže med posameznimi meritvami na m² strehe 3 in kontrolnega merjenja substrata iz drobljene opeke od 3. 5. 2016 do 13. 5. 2016

Graph 33: Comparison of weight changes per m² of the roof 3 between individual measurements and controlled measurements of the crushed bricks substrate from 3/5/2016 to 13/5/2016

6.4 Eksperiment 2

6.4.1 Metodologija

V eksperimentu 1 smo zaznali različno hitrost izhlapevanja iz posameznih zelenih streh. Zanimalo nas je ali na hitrost izhlapevanja vode iz substrata vpliva vrsta substrata in različna debelina substrata. Izhlapevanje vode iz substratov, ki so bili uporabljeni v testnih zelenih strehah, smo primerjali z izhlapevanjem iz naravnega materiala, ki je uporabnikom cenovno dostopen.

Merili smo izhlapevanje vode iz treh različnih debelin zemljine (2, 4 in 8 cm), ki smo jo pobrali iz vodotoka reke Mislinje. Za primerjavo smo vzeli dve debelini mineralnih vlaken (4 in 8 cm), ki jih proizvajalec uporablja v strehi 2 kot substrat z veliko sposobnostjo zadrževanja vode, enojno in dvojno plast zadrževalnega filca (2 in 4 cm), ki je v strehi 1 ter substrat iz drobljene opeke, ki je del strehe 3. Izhlapevanje iz substrata drobljene opeke, smo merili tudi v sklopu meritev modelov zelenih streh, saj je bilo izhlapevanje s strehe 3 veliko nižje kot iz ostalih dveh streh.

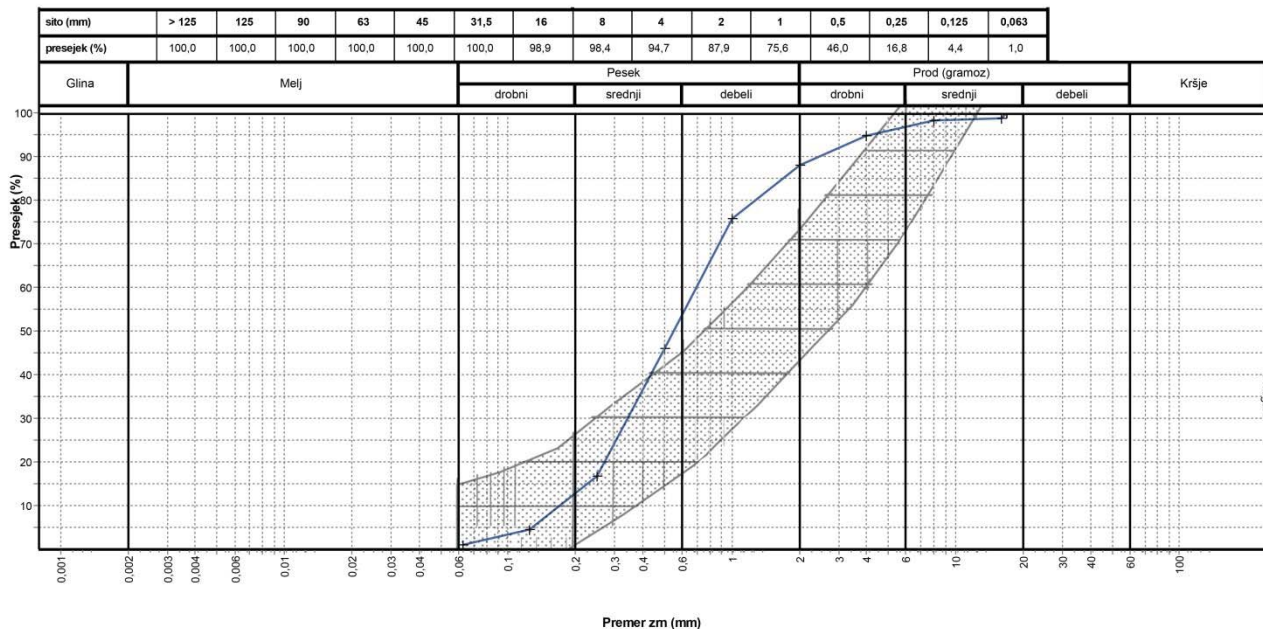
Zemljina iz vodotoka je bila naključno pobrana. V laboratoriju smo s sejhalno analizo po standardu SIST EN 933-1:2012 določili njeno zrnavost in jo primerjali z nemškimi FLL smernicami za zrnavost substrata zelenih streh. Pri konstrukciji zelenih streh namreč upoštevamo mednarodno uveljavljene nemške standarde in smernice FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) za načrtovanje, izvedbo in vzdrževanje zelenih streh (FLL, 2002)GSA.

Za ekstenzivne strehe obstajajo priporočila za sisteme, ki imajo različne sloje (ang. multi-course sisteme), kjer vegetacija prekriva ločen drenažni sloj iz nakopičenega peska, proda pokritega s filtrom ali iz umetnega materiala (plastične čašice), ter sisteme, ki so brez posebnega drenažnega sloja (ang. single-course sistemi). Zato smo našo sestavo zemljine primerjali glede na FLL standarde tako za sisteme z drenažo (preglednica 9), kot tudi za sisteme brez nje (preglednica 10), saj smo v sklopu meritev testnih modelov zelenih streh imeli primer več slojnega multi-course sistema streh 2 in 3 ter single-course sistema brez posebne drenaže pri strehi 1.

Že pri odvzetem vzorcu smo videli, da vsebuje preveč peska glede na FLL smernice za multi-course sisteme, kar smo potrdili s sejhalno analizo (preglednica 9). Krivulja zrnivosti odvzetega vzorca pa se skoraj v celoti sklada s FLL smernicami za single-course ekstenzivne sisteme (preglednica 10). Tako lahko zaključimo, da je izbira naravnega materiala primerna za substrat ekstenzivnih zelenih streh brez posebnega drenažnega sloja.

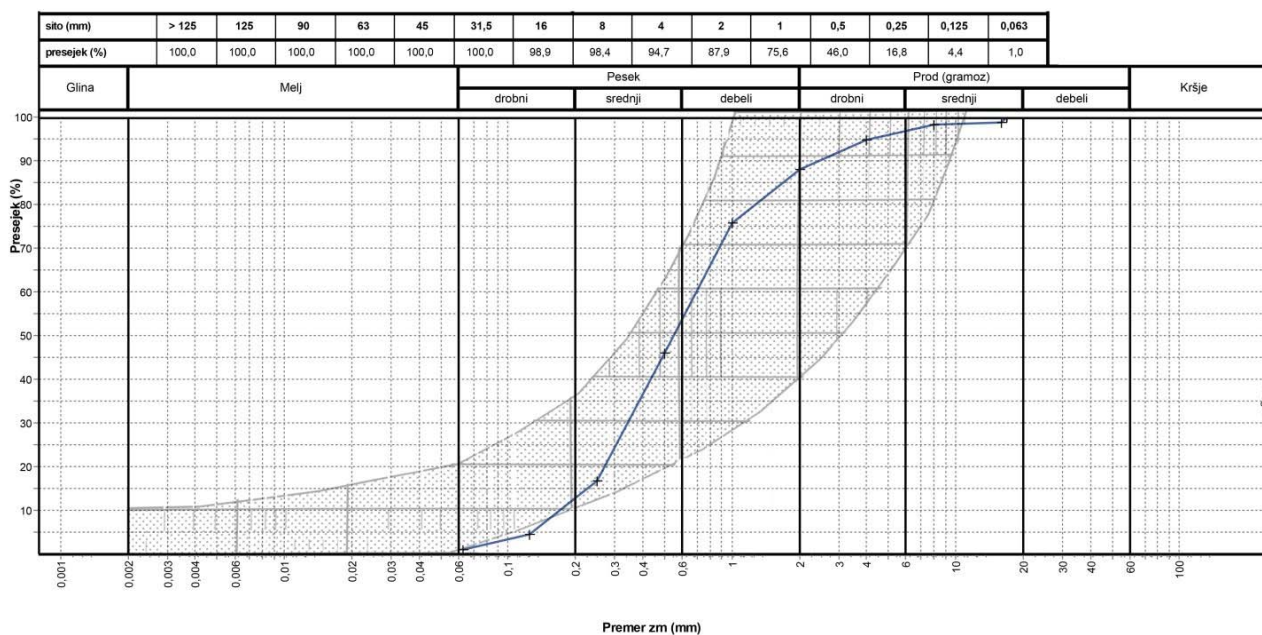
Preglednica 10: Primerjava krivulje zrnivosti naključno odvzete rečne zemljine in zrnivosti po FLL smernicah za multi-course ekstenzivne sisteme

Table 10: Comparison of granulometric distribution curve for river soil and granulometric distribution range of FLL guidelines for multi - course extensive systems



Preglednica 11: Primerjava krivulje zrnivosti naključno odvzete rečne zemljine in zrnivosti po FLL smernicah za single-course ekstenzivne sisteme

Table 11: Comparison of granulometric distribution curve for river soil and granulometric distribution range of FLL guidelines for single - course extensive systems



6.4.2 Meritve izhlapevanja vode iz različnih materialov v naravnih pogojih

Izhlapevanje iz rečne zemljine (debeline 2, 4 in 8 cm), iz mineralnih vlaken (debeline 4 in 8 cm) ter iz zadrževalnega filca (debeline 1 in 2 cm) smo testirali v naravnih pogojih (preglednica 11). Merjenje je trajalo 12 dni. Izbrani debelini mineralnih vlaken in zadrževalnega filca sta primer enojne in dvojne plasti materiala, ki ga uporablja proizvajalec. Izbrali smo jih z namenom ugotavljanja razlik pri izhlapevanju vode iz različno debelih substratov.

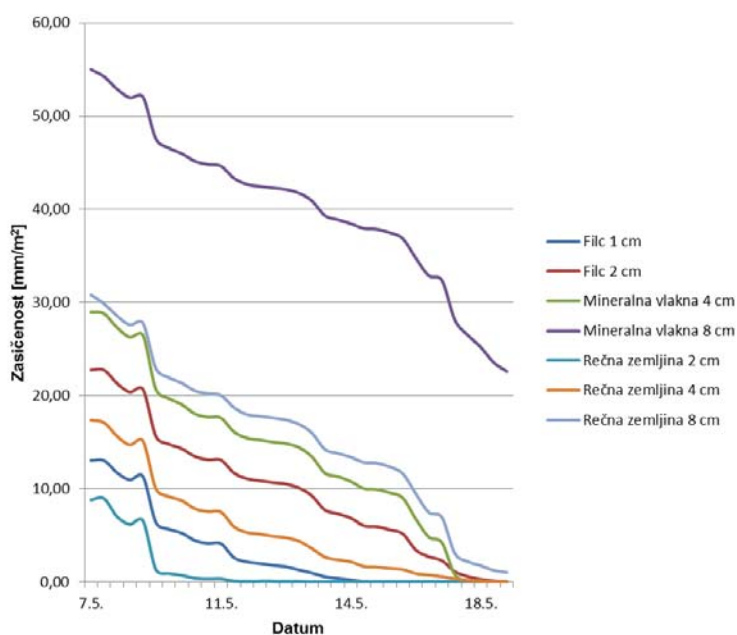
Preglednica 12: Testni materiali za merjenje izhlapevanja v naravnih pogojih

Table 12: Test materials for evaporation measuring under field conditions

TESTNI MATERIALI	DEBELINA
Rečna zemljina	2, 4 in 8 cm
Substrat iz mineralnih vlaken	4 in 8 cm
Zadrževalni filc	1 in 2 cm

V meritvah ni bilo vključenega substrata iz drobljene opeke. Menili smo, da ta ni potreben saj smo pri meritvah testnih modelov zelenih streh pred tem uvedli kontrolno merjenje. Izkazalo se je, da nam manjka podatek o izhlapevanju vode iz substrata drobljene opeke, zato smo meritve ponovili v kontroliranih pogojih.

Grafikon 34 prikazuje spremembe zasičenosti treh materialov različnih debelin.



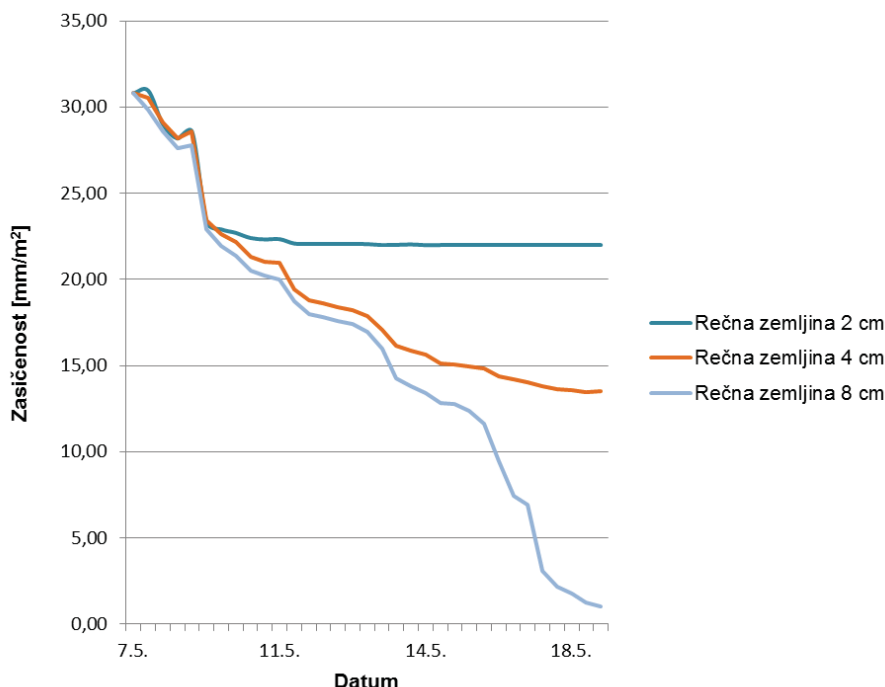
Grafikon 34: Sprememba zasičenosti testnih materialov
Graph 34: Changes in saturation of the test materials

Za lažjo primerjavo vpliva izhlapevanja iz različnih debelin enakih substratov smo nizke vrednosti zasičenosti prestavili na višino zasičenosti enakega substrata (grafikon 35, 36 in 37).

Krivulje meritev zasičenosti rečne zemljine (debeline 2, 4 in 8 cm) so bile prva dva dneva poravnane, potem se je sloj debeline 2 cm osušil (grafikon 35). Tudi krivulji zasičenosti mineralnih vlaken (debeline 4 in 8 cm) ter zadrževalnega filca (debeline 1 in 2 cm) sta bili prva dva dneva izvajanja meritev poravnani (grafikon 36 in 37). Ostale dneve je bila razlika v zasičenosti mineralnih vlaknih debeline 4 in 8 cm minimalna. 11. dan se je sloj iz mineralnih vlaken debeline 4 cm osušil. Enako je bilo pri filcu debeline 1 cm in 2 cm.

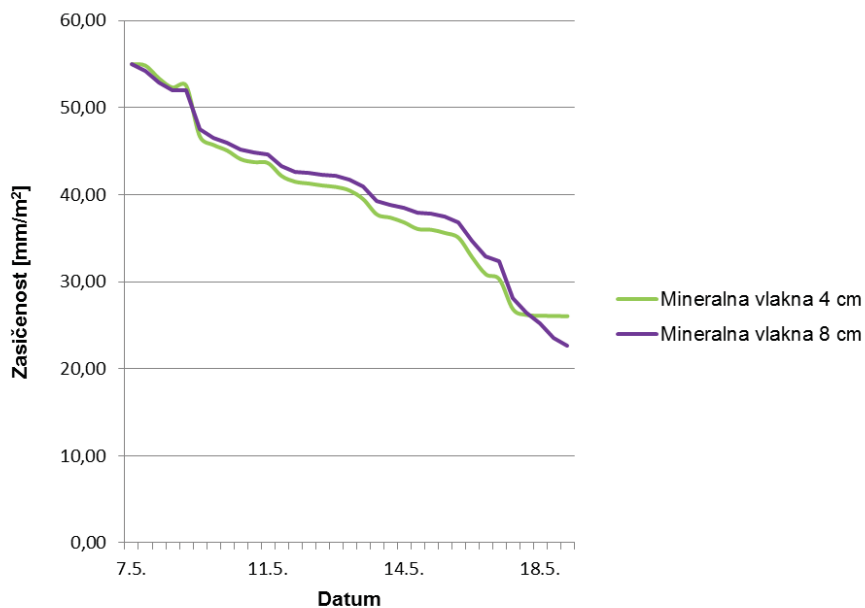
Glavna ugotovitev je bila, da različne debeline substratov ne vplivajo na hitrost izhlapevanja. Količina vode v vseh testiranih materialih se je sorazmerno zmanjševala ne glede na to, koliko je bil substrat zasičen. To ugotovitev smo uporabili pri kalibraciji modela. V modelu smo upoštevali, da se z večanjem sposobnosti zadrževanja oziroma debeline substrata koeficient izhlapevanja ne spreminja.

S primerjavo krivulj lahko zaključimo, da debelina substrata ekstenzivne zelene strehe ne vpliva na hitrost izhlapevanja vode oziroma je vpliv debeline zanemarljiv.



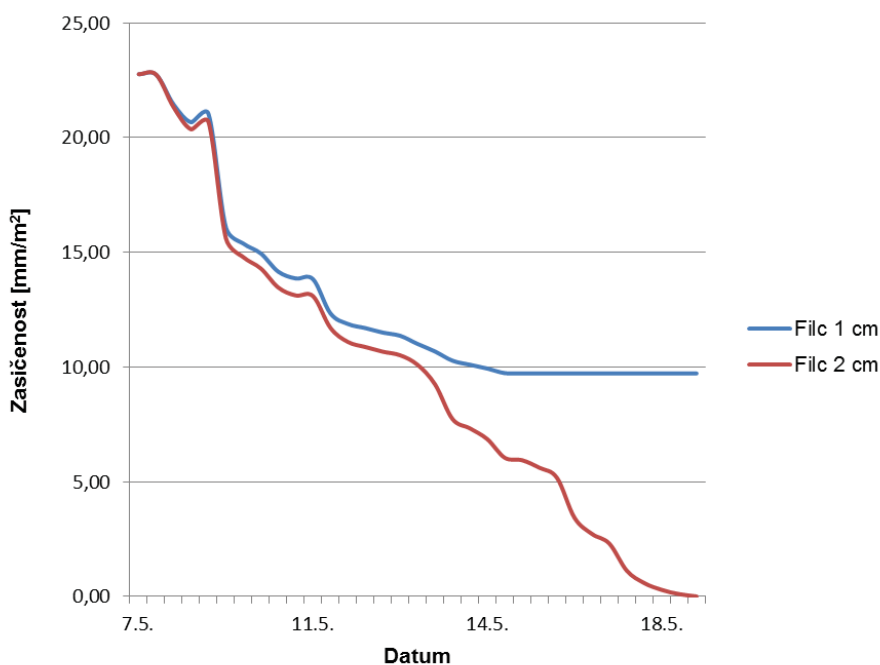
Grafikon 35: Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh rečne zemljine v naravnih pogojih

Graph 35: Comparison of saturation changes in different thick layers of river soil under natural conditions



Grafikon 36: Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh mineralnih vlaken v naravnih pogojih

Graph 36: Comparison of saturation changes in different thick layers of mineral fibres under natural conditions



Grafikon 37: Primerjava spremembe zasičenosti v različno debelih plasteh filca v naravnih pogojih

Graph 37: Comparison of saturation changes in different thick layers of geotextile fabric under natural conditions

6.4.3 Meritve izhlapevanja vode iz različnih materialov v kontroliranih pogojih

Izmerjene vrednosti izhlapevanja v naravnih pogojih smo primerjali z vrednostmi izhlapevanja iz različnih materialov v kontroliranih pogojih. Zanimalo nas je, ali stopnja zasičenosti substrata vpliva na izhlapevanje. Za primerjavo smo izbrali različne debeline materialov (preglednica 11). Glede na sestavo testnih zelenih streh smo izbrali lahek substrat, ki je del strehe 1, mineralna vlakna, ki so del strehe 2, ter drobljeno opeko, ki je del strehe 3. Merili smo tudi izhlapevanje iz naravne zemljine, odvzete iz vodotoka, za katero smo določili zrnavost v poglavju 6. 4. in se sklada z nemškimi standardi za zelene strehe FLL.

Posamezne debeline materialov so bile primerljive debelinam posameznih slojev v testnih zelenih strehah (rečna zemljina 2 cm, mineralna vlakna 4 cm, drobljena opeka 9 cm, lahek substrat 4 cm). Izhlapevanje je potekalo v kontroliranih pogojih pri 56 °C. Količina vode v zasičenosti materiala je bila za rečno zemljino 13,4 l/m², za mineralna vlakna 27,5 l/m², drobljeno opeko 19,3 l/m² in za lahek substrat 21 l/m² (preglednica 12).

Preglednica 13: Testni materiali za meritve zadrževanja in izgub vode zaradi izhlapevanja
Table 13: Test materials for measuring retention and water loss due to evaporation

TESTNI MATERIALI	DEBELINA	KOLIČINA VODE V ZASIČENOSTI [l/m ²]
Rečna zemljina	2 cm	13,4
Substrat iz mineralnih vlaken	4 cm	27,5
Drobljena opeka	9 cm	19,3
Lahek substrat	4 cm	21

Pri treh materialih (mineralna vlakna, lahek substrat in rečna zemljina) smo ugotovili sorazmerno izhlapevanje (grafikon 38). Izhlapevanje iz drobljene opeke je bilo veliko počasnejše kot pri ostalih materialih (grafikon 40). S tem smo potrdili meritve izhlapevanja iz poglavja 6.3.3, kjer smo zaznali počasno izhlapevanje iz drobljene opeke. Tako lahko potrdimo ugotovitve kontrolnega merjenja (grafikon 33), da počasno izhlapevanje s strehe 3 ni bilo posledica neprekoreninjenosti substrata, ampak da voda iz drobljene opeke počasneje izhlapeva. Če bi želeli ugotavljati vpliv transpiracije, bi morali imeti na razpolago dobro prekoreninjen substrat.

Hitrost izhlapevanja je pri vseh substratih enakomerna (grafikon 38), razen pri drobljeni opeki je bilo izhlapevanje na začetku zelo hitro, potem se je upočasnilo in enakomerno padalo.

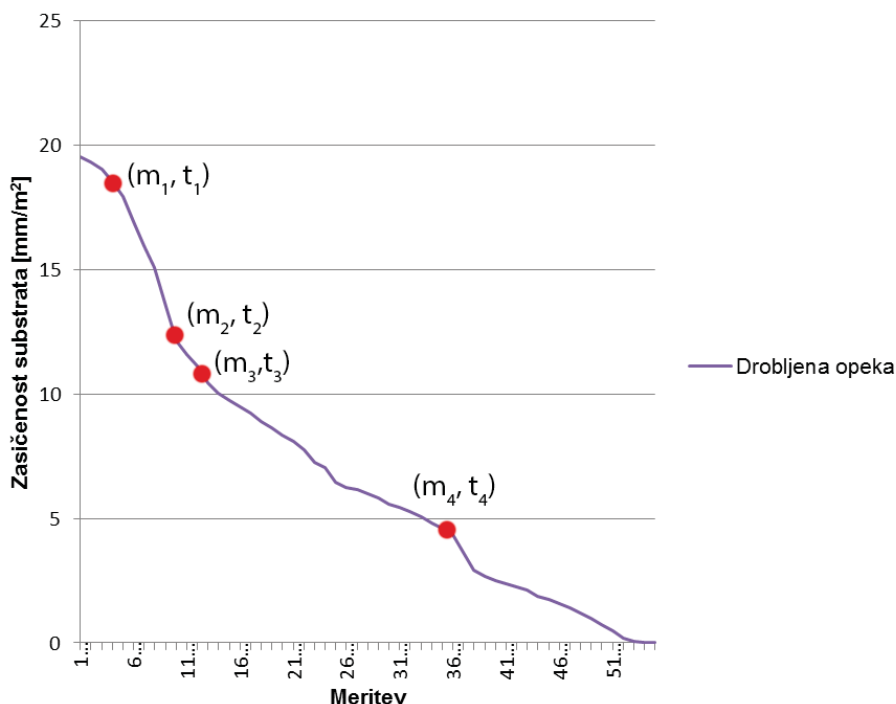
Ugotovitev, da je izhlapevanje neodvisno od stopnje zasičenosti velja za vse materiale razen za opeko, kjer je vpliv stopnje zasičenosti večji. Izhlapevanje je bilo hitrejše na začetku, ko je voda izhlapevala s površja, nato se upočasnilo in linearno padalo.

Izračunali smo razmerje med hitrostjo izhlapevanja iz drobljene opeke pri strmem in pri položnem delu krivulje.

$$n = \frac{(m_2 - m_1) * (t_4 - t_3)}{(m_4 - m_3) * (t_2 - t_1)} = 3,8$$

Kjer je:

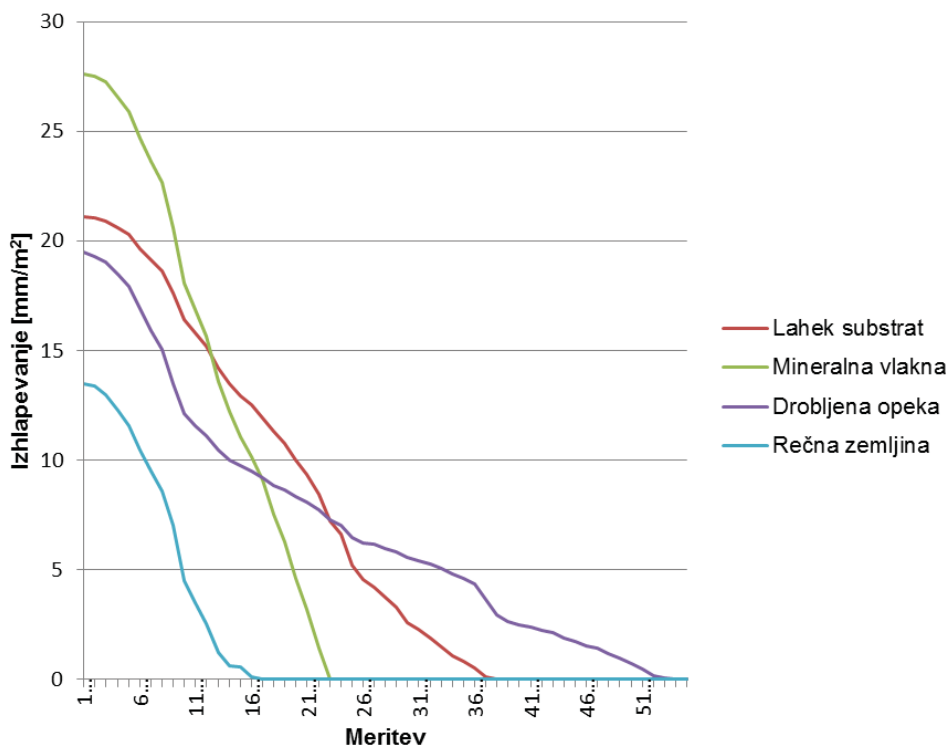
- n razmerje med hitrostjo izhlapevanja iz drobljene opeke pri strmem in pri položnem delu krivulje,
- m₂ končna točka strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [mm/m²],
- m₁ začetna točka strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [mm/m²],
- m₄ končna točka položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [mm/m²],
- m₃ začetna točka položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [mm/m²],
- t₄ čas končne točke položnega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [min],
- t₃ čas začetne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [min],
- t₂ čas končne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [min],
- t₁ čas začetne točke strmega dela krivulje zasičenosti drobljene opeke [min].



Grafikon 38: Spreminjanje zasičenosti substrata iz drobljene opeke
Graph 38: Saturation changes of crushed brick substrate

Začetna točka dela krivulje počasnejšega izhlapevanja iz drobljene opeke (m_3, t_3) se ne sklada s končno točko dela krivulje hitrejšega izhlapevanja (m_2, t_2). Zamik smo naredili, zaradi nejasnega prehoda med hitrejšim in počasnejšim delom izhlapevanja. Mejo med hitrejšim in počasnejšim delom izhlapevanja iz drobljene opeke smo določili pri zasičenosti substrata 13 l/m^2 . Pri 22. in 36. meritvi opazimo povečano izhlapevanje. Ugotavljamo, da je izsušitev enega substrata imela vpliv na povečano izhlapevanje iz ostalih substratov.

Razmerje nam pove, kolikokrat hitreje je izhlapevanje pri prvem delu krivulje. Prvi del krivulje izhlapeva 3,8 krat hitreje. Ta podatek smo uporabili pri modeliranju padavinskega odtoka z zelene strehe 3.

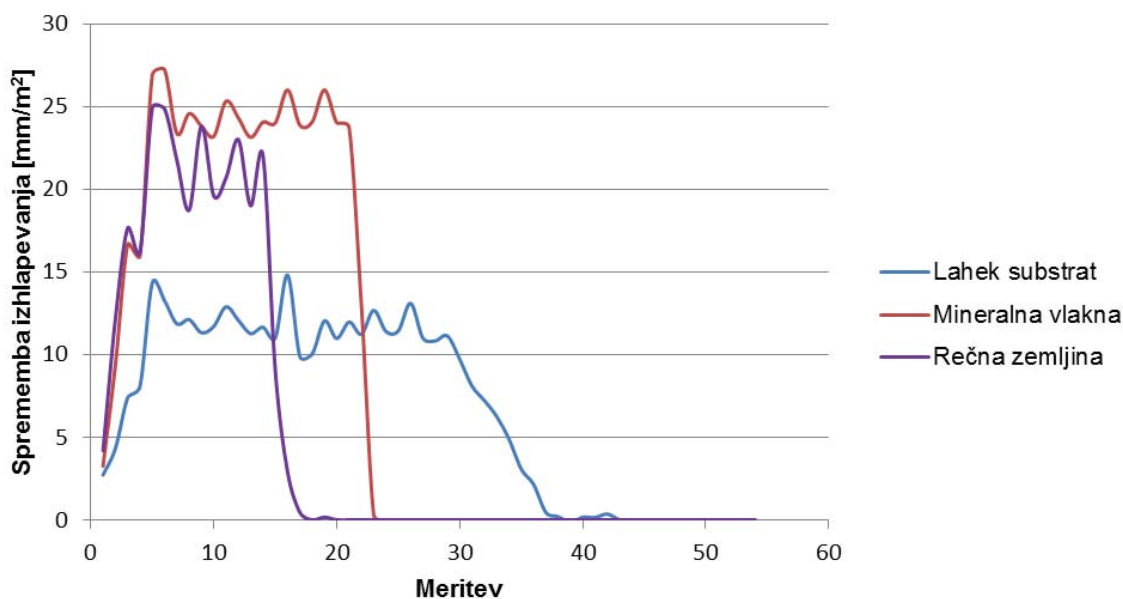


Grafikon 39: Izhlapevanje iz različnih materialov v kontroliranih pogojih
Graph 39: Evaporation from different materials under controlled conditions

Z grafikonoma 40 in 41 smo prikazali hitrost izhlapevanja v odvisnosti od stopnje zasičenost substrata. Nihanja v zgornjem delu krivulj (grafikon 40), so posledica opravljanja meritev, ko se je temperatura zaradi odpiranja vrat pečice znižala.

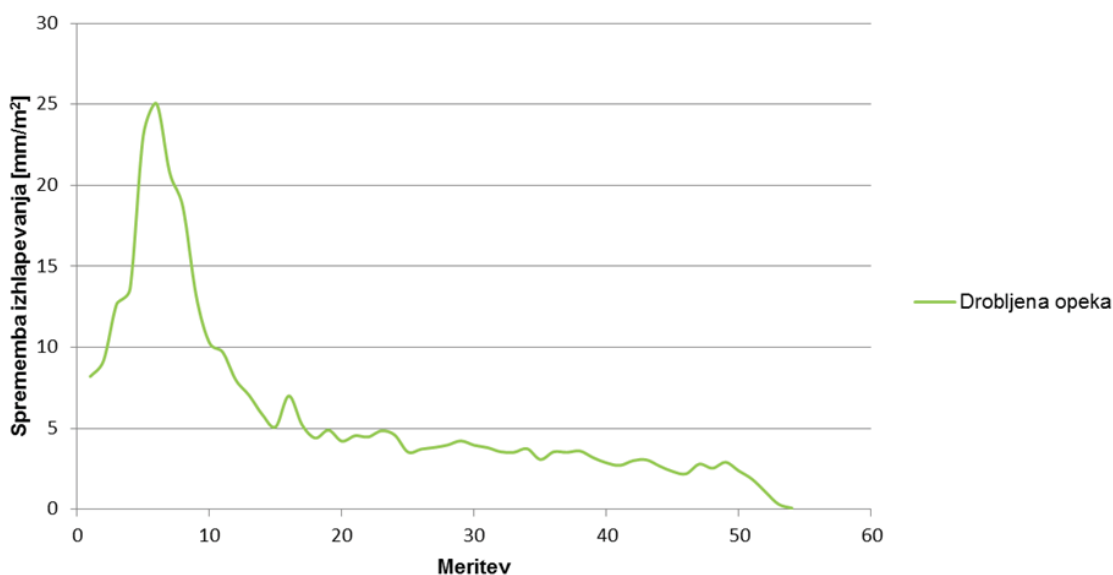
Hitrost izhlapevanja je pri vseh substratih enakomerna (grafikon 40), razen pri drobljeni opeki je bilo izhlapevanje na začetku zelo hitro, potem se je upočasnilo in enakomerno padalo (grafikon 41).

Ugotovitev, da je izhlapevanje neodvisno od stopnje zasičenosti materiala velja za vse materiale razen za opeko, kjer je vpliv stopnje zasičenosti večji. Izhlapevanje je bilo hitrejše na začetku, ko je voda izhlapevala s površja, nato se upočasnilo in linearno pada.



Grafikon 40: Sprememba izhlapevanja med posameznimi meritvami za lahek substrat, mineralna vlakna in rečno zemljino

Graph 40: Evaporation change during individual measurements for lightweight substrat, mineral fibres and river soil



Grafikon 41: Sprememba izhlapevanja med posameznimi meritvami za drobljeno opeko

Graph 41: Evaporation change during individual measurements for crushed bricks

Izhlapovanje iz mineralnih vlaken in rečne zemljine je zelo podobno (grafikon 39). Oba materiala ima skoraj enako hitrost izhlapevanja. Prednost rečne zemljine je v nizki ceni, prednost mineralnih vlaken pa je v večji sposobnosti zadrževanja in v nižji teži.

7 MODEL ZELENE STREHE

7.1 Izhodišča in namen

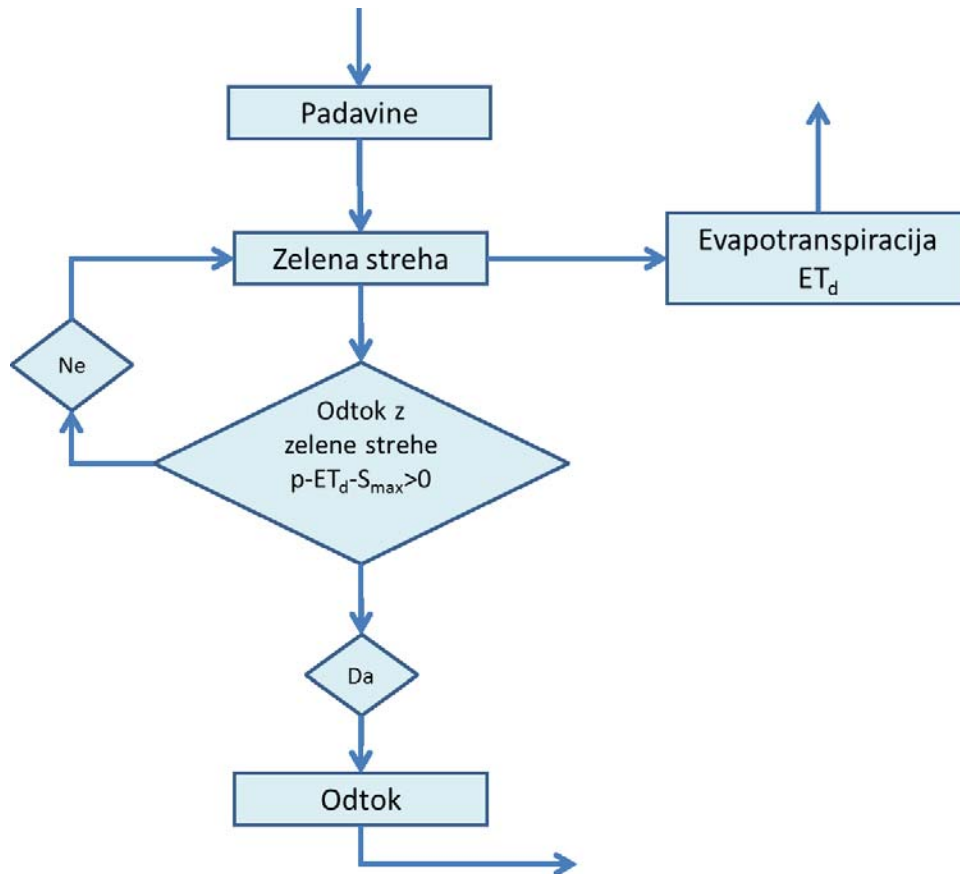
Hidrološki učinek zelenih streh je v številnih študijah obravnavan s pomočjo različnih metod, ki temeljijo na modelih vodne bilance. Vodna bilanca sistema je uporabljena za vrednotenje vstopnih in izstopnih parametrov zelene strehe. Model predvideva, da se odtok začne, ko je prekoračena zadrževalna kapaciteta sistema. Ko je zapolnjena maksimalna prostornina zadrževanja, je količina odtoka enaka količini padavin.

Pri pregledu literature smo zasledili številne hidrološke modele za modeliranje odtoka z zelene strehe. Modeli predvidijo odtočni odziv strehe glede na teoretične padavinske dogodke. Carter in Jackson (2006) sta uporabila metodo Soil Conservation Service (SCS) Curve Number (CN) kot model infiltracije in odtoka, da sta testirala vpliv zelene strehe v večjem merilu. Hilten in sod. (2008) so uporabili model HYDRUS-1D, ki natančno predvidi odtoke za manjše nevihte, medtem ko pri večjih nalivih napove preveliko količino odtoka. Model je primeren za napovedovanje učinkovitosti zelenih streh pri posameznih padavinskih dogodkih na katerikoli lokaciji z debelino substrata podobnega tipa. Palla in sod. (2009) so uporabili model SWMS_2D.

V modelih so upoštevani vertikalni in horizontalni procesi gibanja vode. Vertikalni procesi so prestrezanje padavin, evaporacija, infiltracija, skladiščenje vode v substratu, evapotranspiracija, perkolacija in akumulacija snega ter taljenje snega. Horizontalni proces gibanja vode vključuje površinski odtok, ki se pojavi ob zasičenju sistema zelene strehe.

Namen modeliranja v magistrskem delu je, da z modelom ugotovimo odziv treh obravnavanih zelenih streh na realne padavinske podatke za zadnjih 40 let, od leta 1975 do 2015, ter njihov odziv na evapotranspiracijo na osnovi meritev. Ugotoviti želimo ali je sestavo zelene strehe smotrno prilagajati različnim podnebnim razmeram v Sloveniji (celinsko, submediteransko in gorsko podnebje) in na kakšen način.

V nadaljevanju je opisan diagram poteka modela, ki smo ga uporabili za izračun padavinskega odtoka z zelene strehe (slika 14).



Slika 14: Diagram poteka za izračun modela zelene strehe
Figure 14: Flowchart of the green roof model calculation

Kjer je:

- S_{max} popolna zasičenost zelene strehe [l/m^2],
- p količina padavin [mm/m^2],
- ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
- ET_d dejanska evapotranspiracija zelene strehe [mm/dan],
- k koeficient ET za strehe 1, 2 ali 3.

Dejanska evapotranspiracija

$$ET_d = \begin{cases} ET_0 & \text{if } p \geq S_{max} \\ ET_0 \cdot \frac{p - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} & \text{if } S_{min} < p < S_{max} \\ 0 & \text{if } p \leq S_{min} \end{cases}$$

Dejanska evapotranspiracija iz drobljene opeke

$$ET_d = \begin{cases} ET_0 * k; & S_{t-1} > 13 \\ ET_0 * k/n; & 13 > S_{t-1} > 0 \\ 0; & S_{t-1} < 0 \end{cases}$$

Trenutna zasičenost zelene strehe

$$S_{(t)} = \begin{cases} S_{max}; & S_{t-1} + p - ET_d > S_{max} \\ S_{t-1} + p - ET_d; & 0 < S_t \leq S_{max} \\ 0; & S_{t-1} + p - ET_d < 0 \end{cases}$$

Trenutni padavinski odtok z zelene strehe

$$Q = \begin{cases} S_{t-1} + p - ET_d - S_{max}; & S_t \geq S_{max} \\ 0; & S_{t-1} + p - ET_d - S_{max} < 0 \end{cases}$$

Kjer je:

- S_t trenutna zasičenost zelene strehe [l/m^2],
- S_{t-1} predhodna zasičenost zelene strehe [l/m^2],
- S_{max} popolna zasičenost zelene strehe [l/m^2],
- p količina padavin [mm/m^2],
- Q padavinski odtok z zelene strehe [mm/m^2],
- ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
- ET_d dejanska evapotranspiracija zelene strehe [mm/dan],
- k koeficient ET za strehe 1, 2 ali 3,
- n razmerje izhlapevanja pri substratu iz drobljene opeke.

Dejanska evapotranspiracija se računa v odvisnosti od predhodne zasičenosti zelene strehe. Če je zasičenost večja od 0, potem je dejanska evapotranspiracija enaka zmnožku referenčne evapotranspiracije in koeficienta ET zelene strehe. Če je zasičenost manjša od 0, potem je dejanska evapotranspiracija enaka 0.

Dejanska evapotranspiracija iz drobljene opeke je enaka zmnožku referenčne evapotranspiracije in koeficienta ET zelene strehe, če je predhodna zasičenost zelene strehe večja od 13 l/m^2 . Če je predhodna zasičenost manjša od 13 l/m^2 in večja od 0 l/m^2 , potem koeficient zelene strehe iz drobljene opeke zmanjšamo za 3,8 (izračunano razmerje med hitrostjo izhlapevanja počasnejšega in hitrejšega dela). Če je predhodna zasičenost manjša od 0, potem je dejanska evapotranspiracija enaka 0. Mejo med hitrejšim in počasnejšim delom izhlapevanja iz drobljene opeke smo določili pri zasičenosti substrata 13 l/m^2 , kar smo ugotovili pri merjenju izhlapevanja v eksperimentu 2 (grafikon 38).

Trenutna zasičenost zelene strehe je enaka vsoti predhodnega stanja zasičenosti zelene strehe in količine padavin od katere odštejemo dejansko evapotranspiracijo zelene strehe. Če je rezultat večji kot je maksimalna zasičenost strehe, se upošteva maksimalna zasičenost strehe. Če je rezultat manjši od 0 se upošteva vrednost 0.

Trenutni padavinski odtok zelene strehe je enak vsoti predhodnega stanja zasičenosti zelene strehe in količine padavin, od katere odštejemo dejansko evapotranspiracijo zelene strehe in maksimalno količino zasičenosti strehe. Če je trenutni padavinski odtok manjši od 0, je vrednost odtoka enaka 0.

7.2 Vhodni podatki

Sprogramirali smo model zelene strehe na osnovi meritev izhlapevanja vode in padavinskega odtoka s treh eksperimentalnih zelenih streh v Mislinji.

Vhodni podatki v modelu so:

- **Zadrževanje zelene strehe**

Zadrževalne sposobnosti zelene strehe so odvisne od značilnosti strešne konstrukcije oziroma značilnosti njenih posameznih slojev. Glavni podatek, ki smo ga potrebovali, je količina vode, ki jo sistem posamezne zelene strehe akumulira v stanju zasičenosti.

- **Referenčna evapotranspiracija (ET_0)**

Za območje klimatološke postaje Šmartno pri Slovenj Gradcu, ki je od Mislinje oddaljena 10 km, smo izračunali vrednosti ET_0 za izhlapevanje v suhem obdobju od 16. 4. do 22. 4. 2016 (grafikon 23). ET_0 smo izračunali s Turcovo enačbo (preglednica 13), ki je izražena v milimetrih na dan. ET_0 smo izračunali, ker so tudi podatki z vremenskih postaj podani za ET_0 .

$$ET_0 = 0,013 * (23,88 * R_s + 50) + T \frac{1}{(T + 15)}$$

Kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

T povprečna dnevna temperatura zraka [°C],

R_s sončno sevanje [$\frac{MJ}{m^2 dan}$].

Preglednica 14: Dnevne vrednosti referenčne evapotranspiracije po Turcovi enačbi
 Table 14: Daily values of reference evapotranspiration according to Turc's equation

Datum	Temperatura zraka [°C]	Sončno sevanje [W/dan]	ET_0 [mm/dan]
16. 4. 2016	15,42	287,69	4,24
17. 4. 2016	17,05	237,15	3,73
18. 4. 2016	13,18	77,54	1,28
19. 4. 2016	10,13	125,23	1,62
20. 4. 2016	7,99	264,06	2,69
21. 4. 2016	10,77	297,04	3,60
22. 4. 2016	13,28	284,81	3,89
Povprečje ET_0 [mm/dan]			3,01

Povprečna dnevna ET_0 je bila 3,01 mm/dan, to vrednost smo upoštevali za določitev koeficienta ET za posamezno zeleno streho (preglednica 15). Koeficient smo izračunali iz

podatkov ET posamezne zelene strehe v merjenem obdobju od 16. 4. do 22. 4. 2016 in povprečne dnevne ET_0 v enakem obdobju. Za obdobje med 16. 4. in 22. 4. 2016 se izračunana povprečna vrednost ET_0 (3,01 mm/dan) zelo dobro ujema s podano povprečno vrednostjo ET_0 klimatološke postaje Šmartno pri Slovenj Gradcu (3,1 mm/dan), ki je objavljena na spletni strani ARSO.

7.3 Kalibracija in verifikacija modela

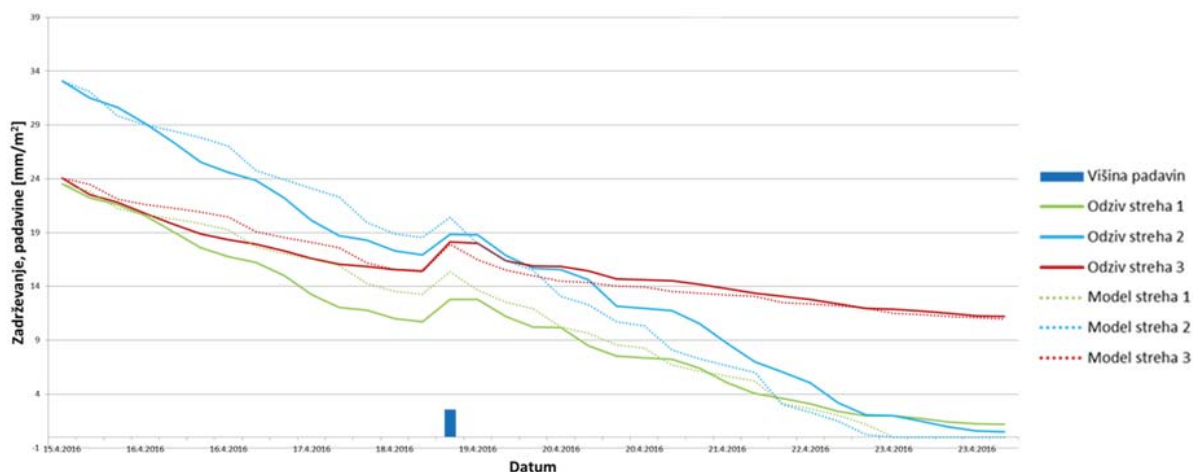
Model smo kalibrirali (umerili) s primerjavo izračunanih vrednosti ET_0 in izmerjenih vrednosti izhlapevanja s streh 1, 2 in 3 od 16. 4. do 22. 4. 2016. Povprečna vrednost ET_0 je bila 3,01 mm/dan. Izmerjene vrednosti ET so bile za streho 1 3,53 mm/dan, streho 2 5,02 mm/dan in za streho 3 2,02 mm/dan. Izhlapevanje smo merili na osnovi zmanjšanja teže testnih modelov.

V nadaljevanju smo upoštevali rezultate meritev izhlapevanja iz različnih materialov iz poglavja 6.4.2. Ugotovili smo, da se količina vode sorazmerno zmanjšuje ne glede na to, koliko je substrat zasičen, in da izhlapevanje ni odvisno od debeline substrata, zato izračunanega koeficienta ET ni bilo treba dodatno prilagajati. Stopnja zasičenosti substrata in evapotranspiracije se v naravi spreminja glede na letni čas in glede na časovno razporeditev padavinskih dogodkov. V modelu smo upoštevali povprečno mesečno referenčno evapotranspiracijo (ET_0) in jo prilagodili (pomnožili) z izračunanim koeficientom ET za posamezno streho (preglednica 15). Koeficient ET je bil za streho 1 1,17, za streho 2 1,67 in za streho 3 0,67. Iz podatkov ET_0 , koeficienta ET in razpoložljive vlage v zeleni strehi smo dobili dejansko ET.

Preglednica 15: Koeficient ET (k) za strehe 1, 2 ali 3
Table 15: ET coefficient (k) for the roof 1, 2 or 3

Zelena streha	Izmerjena vrednost ET [mm/dan]	$k = ET_{(1,2,3)}/ET_0$
Streha 1	3,53	1,17
Streha 2	5,02	1,67
Streha 3	2,02	0,67

Grafikon 42 prikazuje verifikacijo oziroma preverjanje modela, ki predstavlja izmerjen in modeliran odziv streh 1, 2 in 3 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 23. 4. 2016. To obdobje je bilo obdobje izhlapevanja. Dva substrata sta izgubila večino svoje vode. Rezultati primerjave izračunanih in merjenih vrednosti so se dobro ujemali.



Grafikon 42: Verifikacija modela - izmerjen in modeliran odziv streh³ 1, 2 in 3 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 23. 4. 2016

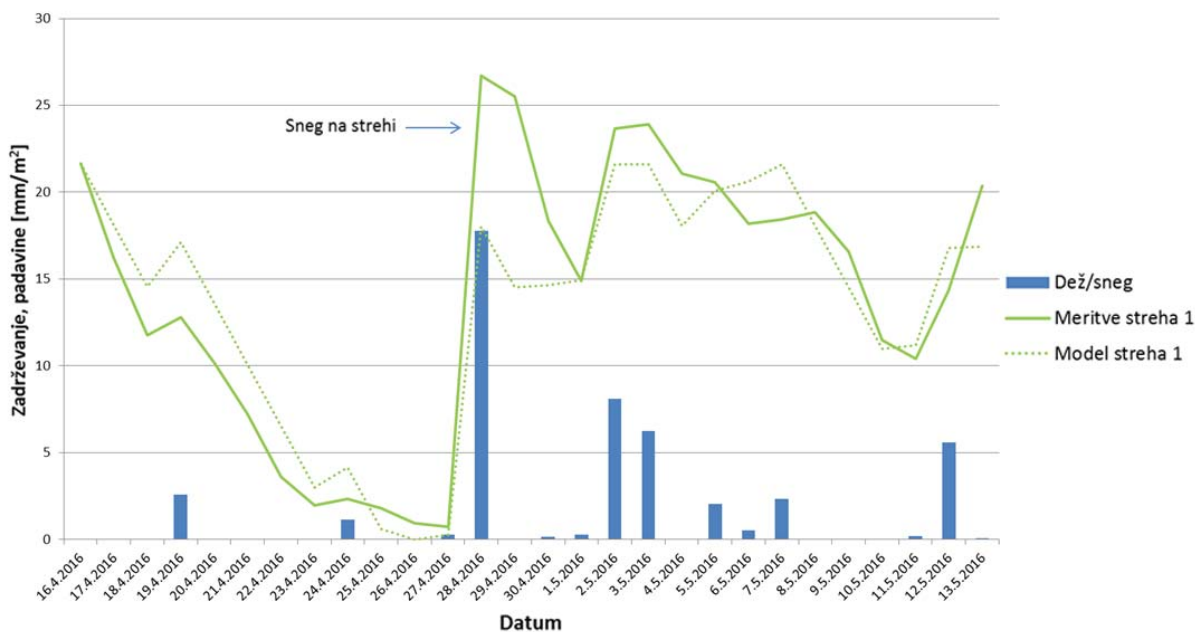
Graph 42: Model verification – measured and modeled response of the roofs 1, 2 and 3 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 23/4/2016

7.4 Validacija modela

Po tem, ko smo model kalibrirali in verificirali, smo nato dokazali, da se model pravilno obnaša tudi v primerih, ki niso bili zajeti v fazi umerjanja. Z validacijo oziroma potrditvijo modela smo pokazali pravilnost njegovega delovanja. Uporabili smo izmerjene podatke o padavinah, izhlapevanju in padavinskem odtoku za obdobje 28 dni, od 16. 4. do 12. 5. 2016.

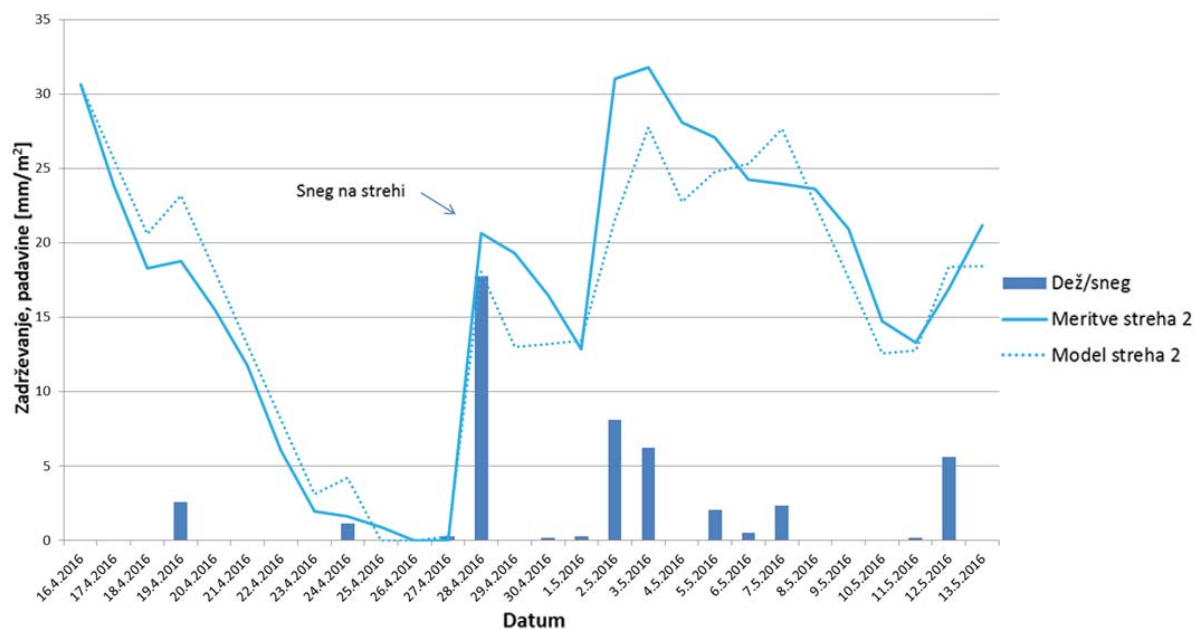
Ugotavljamo, da modelirane vrednosti ET_0 , ki smo jih kalibrirali z ustreznim koeficientom ET za posamezno streho, predstavljajo značilnosti izmerjenih podatkov. ET_0 je zelo blizu temu, kar se dogaja v realnih razmerah v naravi. V času padavin smo upoštevali, da ne prihaja do izhlapevanja. Odstopanja so bila 28. 4. 2016 zaradi snežnih padavin. Sneg je ostal na strehi, zato so vrednosti zasičenosti več kot 100 % (grafikoni 43, 44 in 45).

³ Odziv streh pomeni spreminjanje zasičenosti posamezne zelene strehe, ki je odvisna od njene sestave, stopnje evapotranspiracije, količine padavin in padavinskega odtoka.



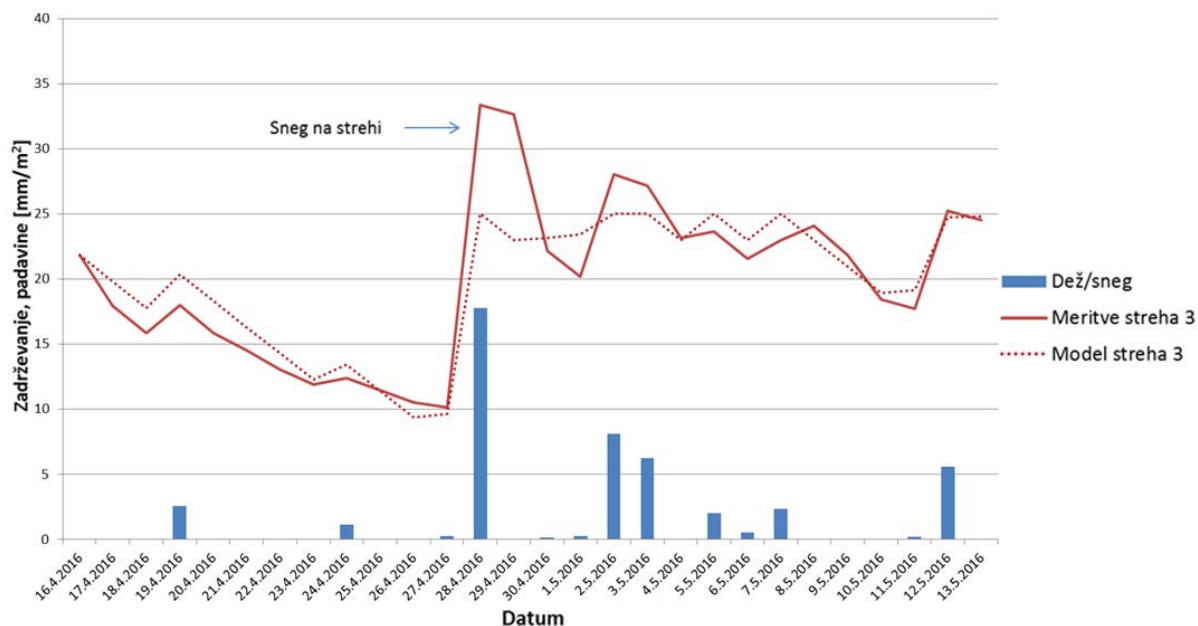
Grafikon 43: Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 1 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016

Graph 43: Model validation - measured and modeled response of the roof 1 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016



Grafikon 44: Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 2 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016

Graph 44: Model validation - measured and modeled response of the roof 2 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016



Grafikon 45: Validacija modela - izmerjen in modeliran odziv strehe 3 na evapotranspiracijo in padavine med 16. 4. in 12. 5. 2016

Graph 45: Model validation - measured and modeled response of the roof 3 on evapotranspiration and precipitation between 16/4 and 12/5/2016

Ugotovili smo, da se model odziva v skladu z meritvami (grafikoni 43, 44 in 45), zato sklepamo, da je pravilnost modela dokazana. Model tako lahko potrdimo.

Rezultati omogočajo orodje za raziskovanje vpliva zelenih streh na količino padavinskega odtoka, kar je predmet naše raziskave.

7.5 Odziv modela na 40-letno padavinsko obdobje in evapotranspiracijo

Na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) smo pridobili 5-minutne padavinske podatke za Celje, Rateče in Portorož za zadnjih 30 let, od 1986 do vključno 2015 (Vičar, 2016). Manjkajoče padavinske podatke smo nadomestili z vrednostjo 0, da je bilo časovno zaporedje pravilno. Podatke smo naložili na strežnik in jih uvozili v Excel.

Ugotovili smo, da so pridobljeni 5-minutni padavinski podatki za omenjene kraje zelo nepopolni. Za Celje je bilo 10,5 % podatkov, za Rateče 9,9 % in za Portorož le 8,8 %. Ocenili smo, da za računanje padavinskega odtoka v našem primeru zadostujejo dnevni podatki, ki smo jih pridobili z ARSO za zadnjih 40 let, od leta 1975 do 2015 (ARSO, 2016g). Tako smo razpolagali tudi z višino snežnih padavin, ki v 5-minutnih podatkih ni bila zabeležena in s

povprečnimi dnevnimi vrednostmi za referenčno evapotranspiracijo (ET_0), za vsak mesec posebej v določenem kraju.

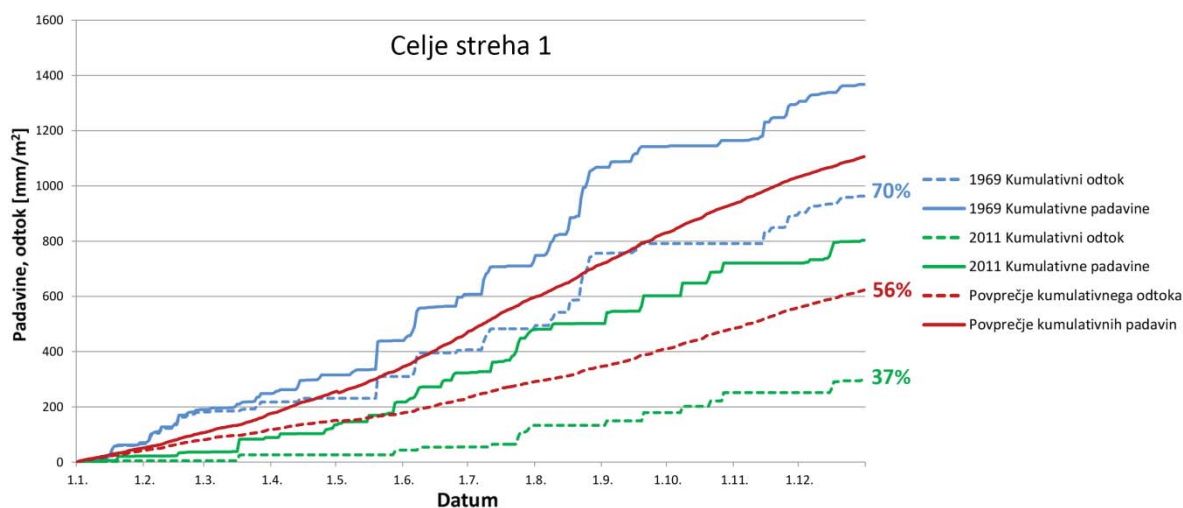
V modelu smo upoštevali padavinske podatke za zadnjih 40 let, zasičenost zelenih streh in ET za vsako streho posebej. Podatke smo obdelali v Excelu in napisali model (stran 82, 83).

Odločili smo se za analizo treh podnebnih območij in za vsako od njih izbrali po en kraj: celinsko - Celje, submediteransko - Portorož in gorsko - Rateče. Ti kraji se med seboj tudi najbolj razlikujejo po povprečni letni količini padavin. Na osnovi tega smo lahko določili tipično strešno konstrukcijo, ki bi najbolj ustrezala padavinskim razmeram, ki so značilne za različna podnebna območja v Sloveniji, to je bil namreč tudi eden izmed naših ciljev.

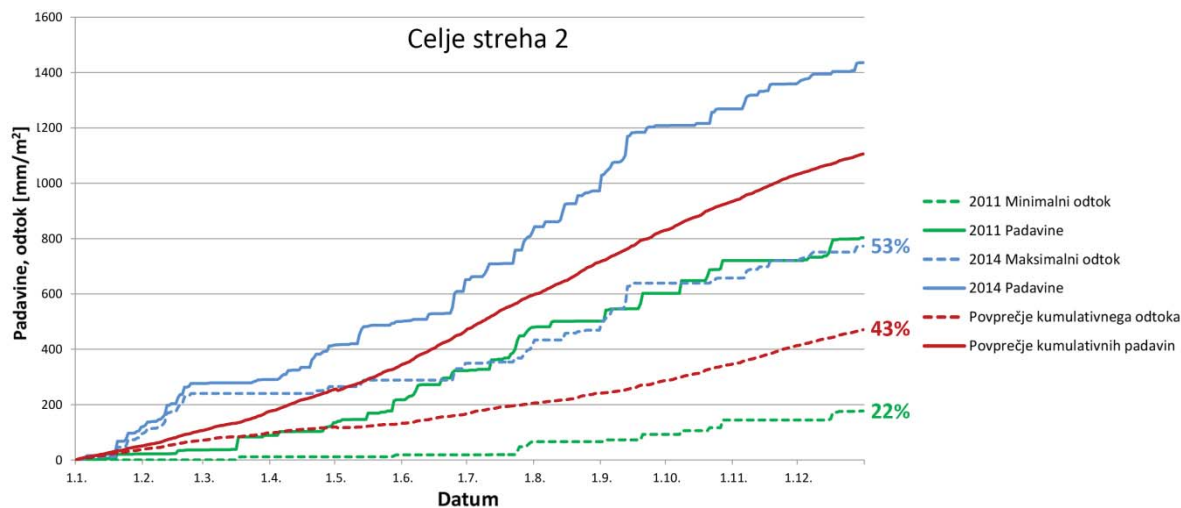
7.5.1 Celje

Matematični model je za obdobje 40 let (1975-2015) v Celju za streho 1 pokazal povprečni kumulativni odtok 56 %, minimalni odtok je bil 37 % (2011), maksimalni odtok pa 70 % (1969) (grafikon 46). Streha 2 ima povprečni kumulativni odtok 43 %, minimalni odtok je bil 22 % (1997), maksimalni odtok pa 38 % (1969) (grafikon 47).

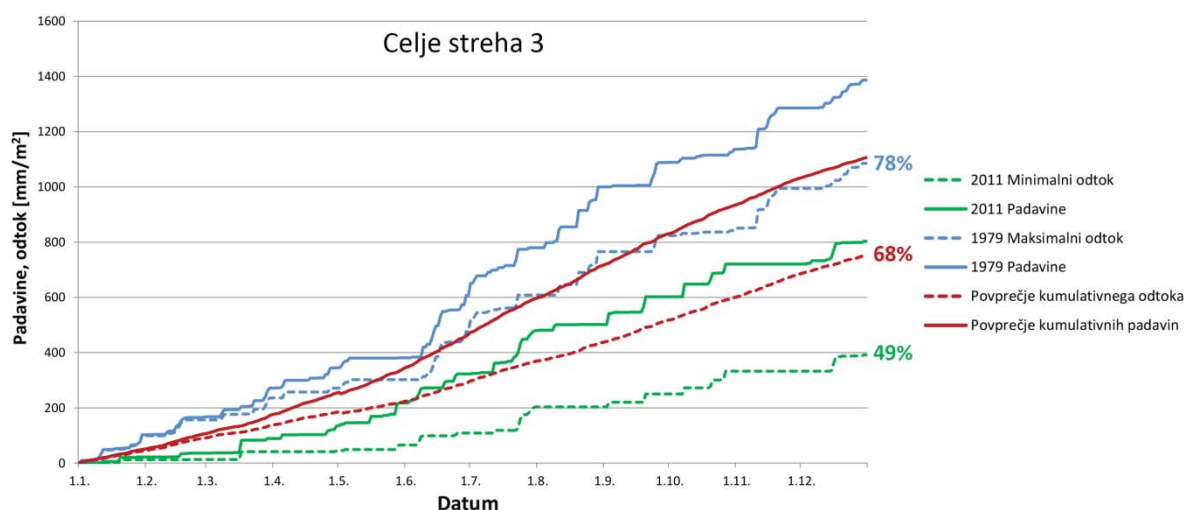
Za streho 3 je povprečni skupni odtok 68 %, minimalni odtok je bil 49 % (2011), maksimalni odtok pa 79 % (1972) (grafikon 48).



Grafikon 46: Celje– minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1
Graph 46: Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 1



Grafikon 47: Celje – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2
Graph 47: Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 2



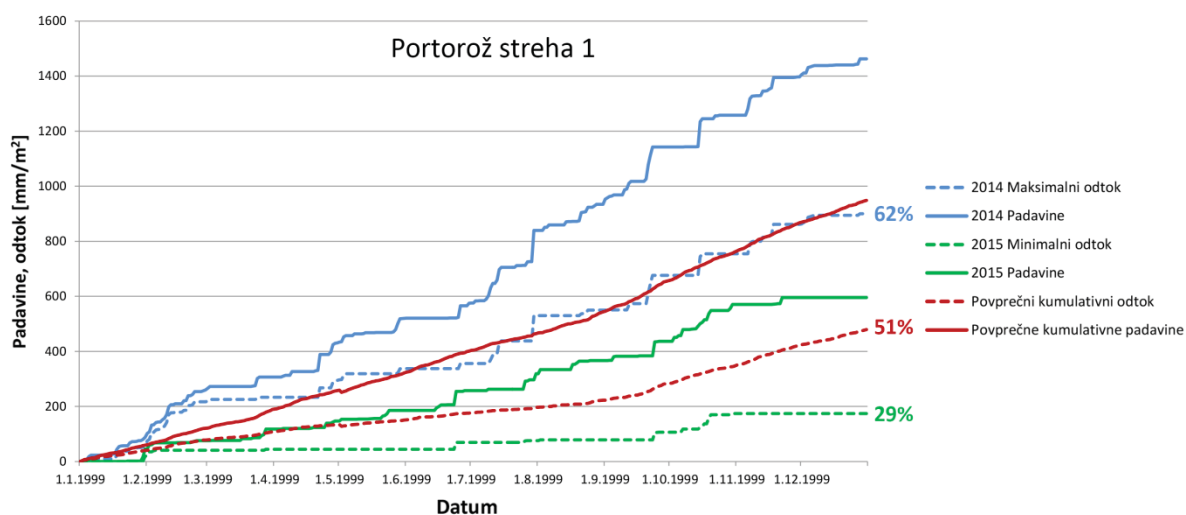
Grafikon 48: Celje – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3
Graph 48: Celje– minimum, maximum, average runoff from the roof 3

7.5.2 Portorož

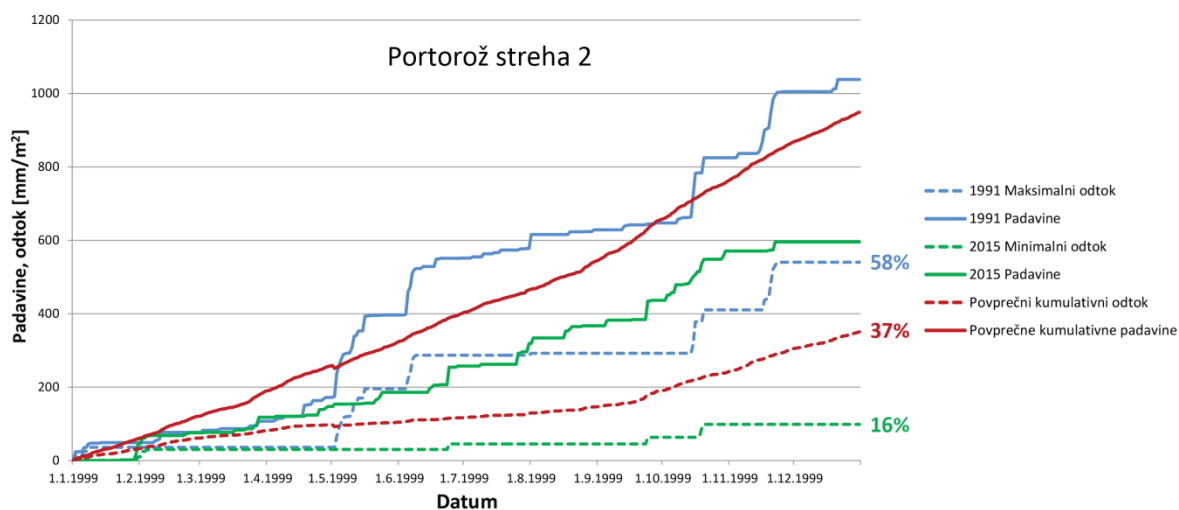
Matematični model je za obdobje 40 let (1975-2015) v Portorožu za streho 1 pokazal povprečni skupni odtok 51 %, minimalni odtok je bil 29 % (2015), maksimalni odtok pa 62 % (2014) (grafikon 49).

Po izračunih je imela streha 2 povprečni skupni odtok 37 %, minimalni odtok je bil 16 % (2015), maksimalni odtok pa 58 % (1991) (grafikon 50).

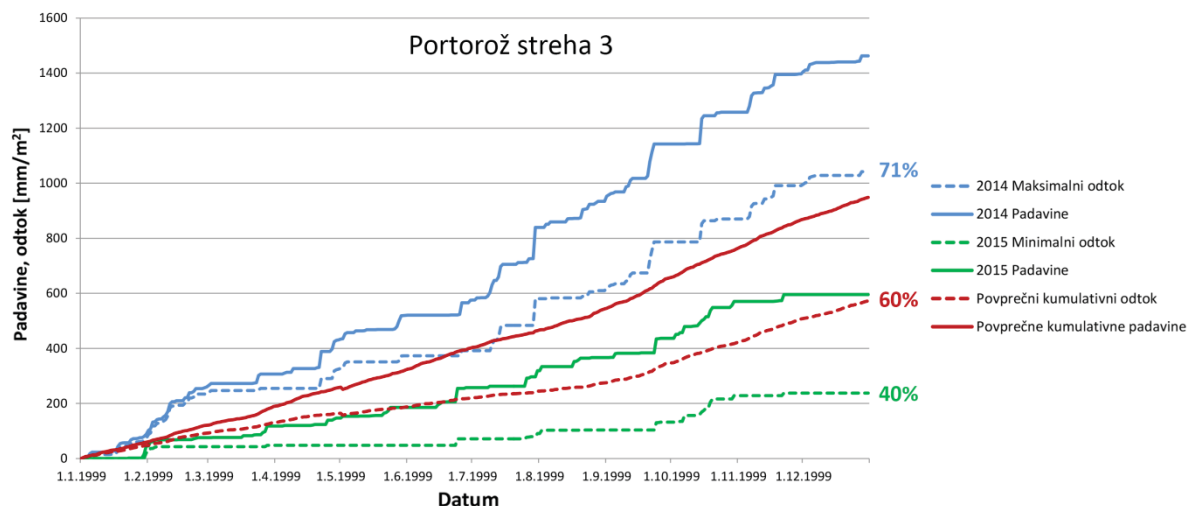
Za streho 3 je povprečni skupni odtok 60 %, minimalni odtok je bil 40 % (2015), maksimalni odtok pa 71 % (1991) (grafikon 51).



Grafikon 49: Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1
Graph 49: Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 1



Grafikon 50: Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2
Graph 50: Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 2



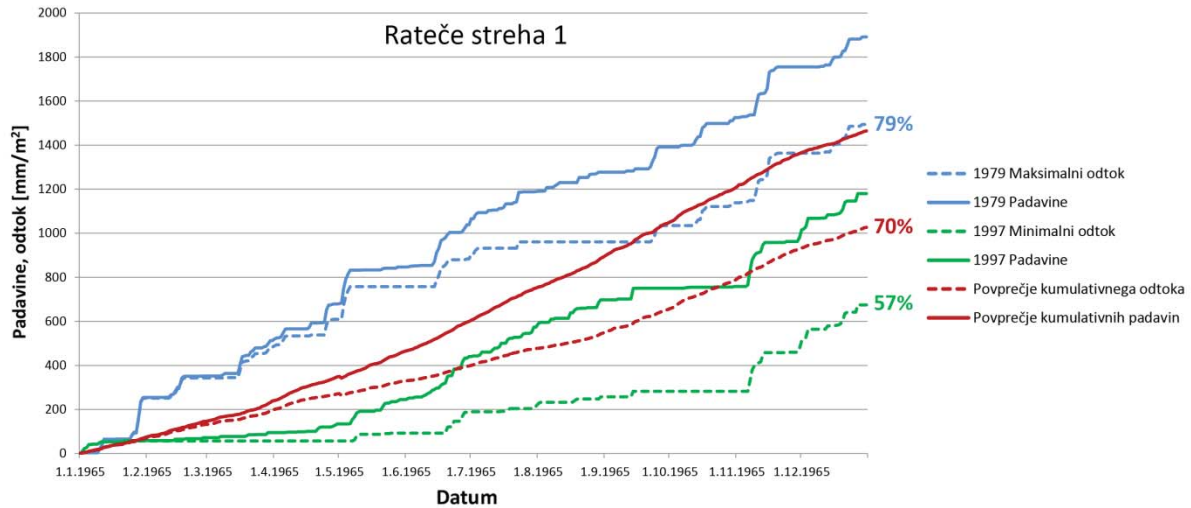
Grafikon 51: Portorož – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3
Graph 51: Portorož – minimum, maximum, average runoff from the roof 3

7.5.3 Rateče

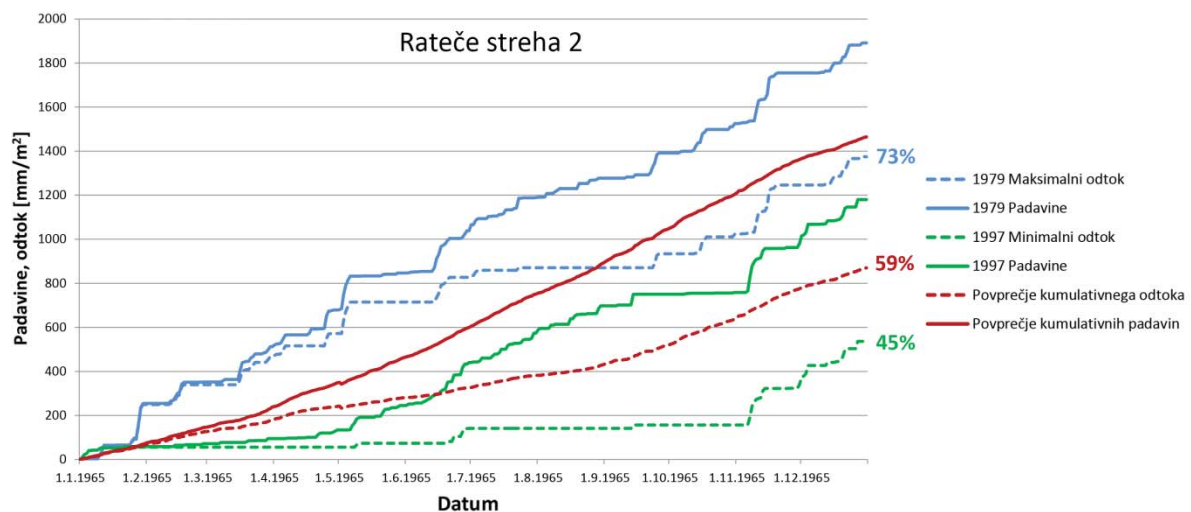
Matematični model je za obdobje 40 let (1975-2015) v Ratečah za streho 1 pokazal povprečni kumulativni odtok 70 %, minimalni odtok je bil 57 % (1997), maksimalni odtok pa 79 % (1979) (grafikon 52).

Streha 2 ima povprečni kumulativni odtok 59 %, minimalni odtok je bil 45 % (1997), maksimalni odtok pa 73 % (1979) (grafikon 53).

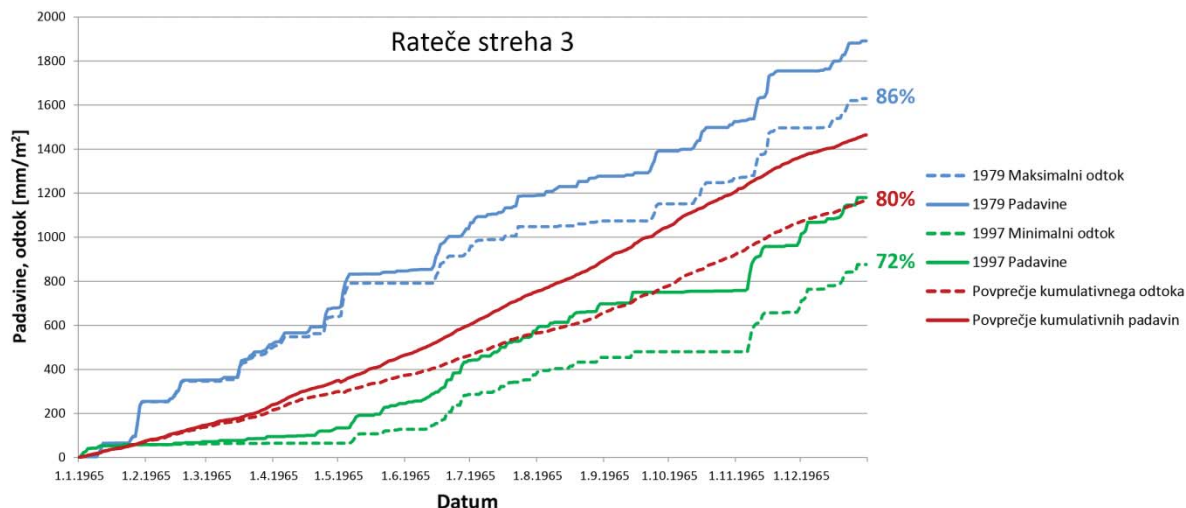
Za streho 3 je povprečni skupni odtok 80 %, minimalni odtok je bil 72 % (1997), maksimalni odtok pa 86 % (1979) (grafikon 54).



Grafikon 52: Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 1
Graph 52: Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 1



Grafikon 53: Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 2
Graph 53: Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 2



Grafikon 54: Rateče – minimalni, maksimalni, povprečni odtok s strehe 3
Graph 54: Rateče – minimum, maximum, average runoff from the roof 3

7.5.4 Analiza podatkov

V preglednici 16 je povzetek rezultatov modeliranja povprečnega, maksimalnega in minimalnega zmanjšanja padavinskega odtoka za Celje, Portorož in Rateče, za vsako streho posebej med letoma 1975 in 2015. V vseh krajih je najbolj učinkovita streha 2.

V Celju se je padavinski odtok povprečno najbolj zmanjšal pri strehi 2 in sicer 57 %, najmanj se je zmanjšal pri strehi 3 za povprečno 32 %. Največje zmanjšanje odtoka je bilo pri strehi 2 leta 2011 (za 78 %), najmanjše zmanjšanje odtoka pa pri strehi 3 leta 1979 (21 %).

V Portorožu se je padavinski odtok povprečno najbolj zmanjšal pri strehi 2, in sicer za 63 %, najmanj se je zmanjšal pri strehi 3, za povprečno 40 %. Največje zmanjšanje odtoka je bilo 84 % pri strehi 2 leta 2015. Najmanjše zmanjšanje odtoka je bilo 29 % pri strehi 3 leta 2014.

V Ratečah se je padavinski odtok povprečno najbolj zmanjšal pri strehi 2, in sicer 41 %, najmanj se je zmanjšal pri strehi 3 za povprečno 20 %. Največje zmanjšanje odtoka je bilo pri strehi 2 leta 2007 (55 %), najmanjše zmanjšanje pa pri strehi 3 leta 1979 (14 %).

Če primerjamo vse tri kraje in vse tri strehe (preglednica 16), bi bilo največje povprečno zmanjšanje odtoka v Portorožu (63 %). V Portorožu dosežemo s streho 2 tudi maksimalno zmanjšanje odtoka (78 %), najmanj bi se odtok zmanjšal v Ratečah (14 %) pri strehi 3. V Ratečah slab rezultat zmanjšanja odtoka odraža tamkajšnje klimatske razmere. Streha 3 ima zadrževalno sposobnost 24,1 l/m², v primerjavi s Celjem in Portorožem je v Ratečah najnižja evapotranspiracija, padavin je največ, tudi intenziteta padavin je najvišja. Obilnejše padavine

povzročijo zasičenost, nizka evapotranspiracija ne more zagotoviti, da bi se streha osušila, zato v takšnih pogojih deluje kot 100 % odvod.

Preglednica 16: Povprečno, minimalno, maksimalno zmanjšanje odtoka za Celje, Portorož, Rateče (1975-2015)

Table 16: Average, minimum, maximum reduction of runoff for Celje, Portorož, Rateče (1975-2015)

KRAJ	ZELENA STREHA	ZMANJŠANJE PADAVINSKEGA ODTOKA 1975-2015		
		Povprečno [%]	Maksimalno [%]	Minimalno [%]
Celje	Streha 1	44	63	30
	Streha 2	57	78	62
	Streha 3	32	51	21
Portorož	Streha 1	49	71	38
	Streha 2	63	84	42
	Streha 3	40	60	29
Rateče	Streha 1	30	43	21
	Streha 2	41	55	27
	Streha 3	20	28	14

Izkazalo se je, da je poleg velike sposobnosti zadrževanja vode pri zeleni strehi zelo pomemben njen odziv na evapotranspiracijo. Dobra evapotranspiracija omogoča strehi, da se hitro pripravi na nove padavinske dogodke. Streha 2 ima zelo dobre lastnosti zadrževanja in najboljšo evapotranspiracijo. Izkazalo se je, da ima streha 3 večjo sposobnost zadrževanja kot streha 1 in slabši odziv na evapotranspiracijo.

8 ODZIV TESTNIH STREH V RAZLIČNIH PODNEBNIH RAZMERAH

Na začetku magistrskega dela smo si zadali cilj, da bomo določili tipično strešno konstrukcijo, ki bi najbolj ustrezala padavinskim razmeram, ki so značilne za različna podnebna območja v Sloveniji. Za potrebe raziskave smo določili tri podnebna območja z izbranim krajem: celinsko podnebje (Celje), submediteransko podnebje (Portorož) in gorsko podnebje (Rateče). Podnebja se zelo razlikujejo po povprečni letni količini padavin in evapotranspiraciji.

Pri določitvi najprimernejše strukture zelene strehe smo upoštevali, kakšno zadrževalno sposobnost ima zelena streha ter koeficient ET za posamezno streho, ki smo ga izračunali pri modeliranju. Med seboj smo primerjali omenjene tri eksperimentalne zelene strehe. Vzeli smo podatke zadrževanja, ki smo jih pridobili z eksperimentalnimi merjenji (streha 1 23,5 l/m², streha 2 33,1 l/m², streha 3 24,1 l/m²).

Na grafikonih 55, 56 in 57 smo prikazali vpliv povečanja zadrževalne sposobnosti zelene strehe na zmanjšanje padavinskega odtoka. Največji vpliv na odtok se kaže pri zadrževalni sposobnosti posamezne zelene strehe pri obsegu padavin do 20 l/m². Debelino strehe oziroma njene zadrževalne sposobnosti je smiselno povečevati le do določene vrednosti, ki je odvisna od evapotranspiracije in padavin. Povečanje debeline zadrževalnih slojev zelene strehe ne pomeni vedno upoštevanja vrednih sprememb v povečanju kapacitete zadrževanja padavinskih vod. VanWoert in sod. (2005) poročajo, da se je s povečanjem debeline substrata od 25 mm do 40 mm kapaciteta zadrževanja povečala za manj kot 3 %.

Proizvajalci omogočajo različne debeline posameznih slojev zelene strehe, s katerimi lahko povečamo njeno zadrževalno sposobnost. Povečamo lahko drenažni sloj z vodnim zalogovnikom, debelino substrata, debelino zadrževalnega filca.

V poglavju 6. 4 smo z eksperimentom določali zadrževalne sposobnosti različnih materialov, ki so bili del naših testnih streh. Rezultati zadrževanja, ki so nas zanimali pri določanju ustrezne zelene strehe, prilagojene podnebnim razmeram, so podani v preglednici 17.

Ko smo povečali debelino zadrževalnega filca za 100 % se je sposobnost zadrževanja povečala za 74 %, sposobnost zadrževanja mineralnih vlaken se je povečala za 90 %, rečne zemljine pa za 97 %. Ko smo debelino zemljine povečali iz 2 cm na 8 cm oziroma za 4 x, se je sposobnost zadrževanja povečala za 3,5 x.

Preglednica 17: Povečanje zadrževanja vode v različnih materialih zaradi povečanja njihove debeline (rezultati eksperimenta 2)

Table 17: *Improving the water retention in different materials by increasing their thickness (the results of the experiment 2)*

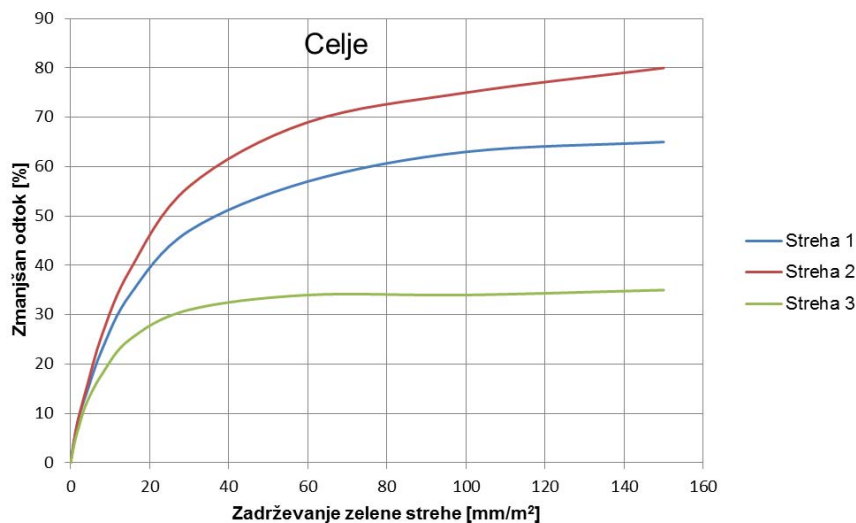
TESTNI MATERIAL debelina [cm]	Filc		Mineralna vlakna		Rečna zemljina		
	1 cm	2 cm	4 cm	8 cm	2 cm	4 cm	8 cm
Količina vode v popolni zasičenosti [mm/m ²]	13	23,8	28,9	55	8,8	17,3	30,8
Povečanje zadrževanja glede na osnovno debelino [mm/m ²]	-	9,7	-	26	-	8,5	13,5
Povečanje zadrževanja glede na osnovno debelino [%]	-	74	-	90	-	97	78

8.1 Celje

Grafikon 55 prikazuje primerjavo zadrževalnih sposobnosti streh 1, 2 in 3 za celinsko podnebje. Za izračun smo uporabili 40-letne podatke o padavinah in ET_0 s klimatološke postaje Celje. Povprečna dnevna ET_0 za zadnjih 40 let v Celju je 2,1 mm/dan, povprečna letna količina padavin je 1105 mm/m².

Med strehami je razlika v koeficientu ET. Iz grafikona 48 in tudi računsko je razvidno, da pri nizki zadrževalni sposobnosti (manjše od 5 mm/m²) ET nima velikega vpliva. Vpliv se pokaže pri večji zadrževalni sposobnosti (večji od 5 mm/m², preglednica 18). Vidi se, da streha 2 najbolj zmanjšuje odtok. Izmed teh treh streh ima najboljši koeficient ET (1,67). Voda iz nje najhitreje izhlapeva in je zato streha hitro pripravljena na nove padavinske dogodke.

Streha 3 ima najslabši koeficient ET (0,67). Iz grafikona 55 je razvidno, da je nesmiselno povečevati zadrževalno sposobnost strehe nad določeno količino zadrževanja padavin (30 mm/m²). Če povečamo sposobnost zadrževanja substrata, se količina odtoka ne zmanjša. Zaradi nizkega koeficienta ET voda ne more izhlapeti s strehe in je zato streha slabše pripravljena na nove padavinske dogodke.



Grafikon 55: Celje - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe

Graph 55: Celje – runoff reduction dependent on the green roof retention capacity

Če povečamo sposobnost zadrževanja streh 1, 2 in 3 za 1-krat, streha 2 dodatno zmanjša padavinski odtok za 13 %, streha 1 za 10 % in streha 3 za 4 % (preglednica 18). Pri strehi 3 zaradi nizkega učinka (4 %) in velike teže v stanju zasičenosti (103,5 kg/m²) ni smiselno povečevati zadrževalne sposobnosti.

Preglednica 18: Vpliv povečanja zadrževalne sposobnosti strehe na zmanjšanje padavinskega odtoka

Table 18: The impact of improving the water retention ability of the green roof to reduce stormwater runoff

KRAJ	STREHA 1		STREHA 2		STREHA 3	
	Popolna zasičenost [l/m ²]	Zmanjšanje odtoka [%]	Popolna zasičenost [l/m ²]	Zmanjšanje odtoka [%]	Popolna zasičenost [l/m ²]	Zmanjšanje odtoka [%]
CELJE	23,5	44	33,1	57	24,1	32
	47	54	66,2	70	48,2	36
	70,5	60	99,3	75	72,3	38
	94	63	132,4	79	96,4	38
PORTOROŽ	23,5	49	33,1	63	24,1	40
	47	63	66,2	76	48,2	49
	70,5	70	99,3	82	72,3	53
	94	74	132,4	86	96,4	56
RATEČE	23,5	30	33,1	41	24,1	20
	47	37	66,2	50	48,2	22
	70,5	40	99,3	54	72,3	22
	94	41	132,4	57	96,4	22

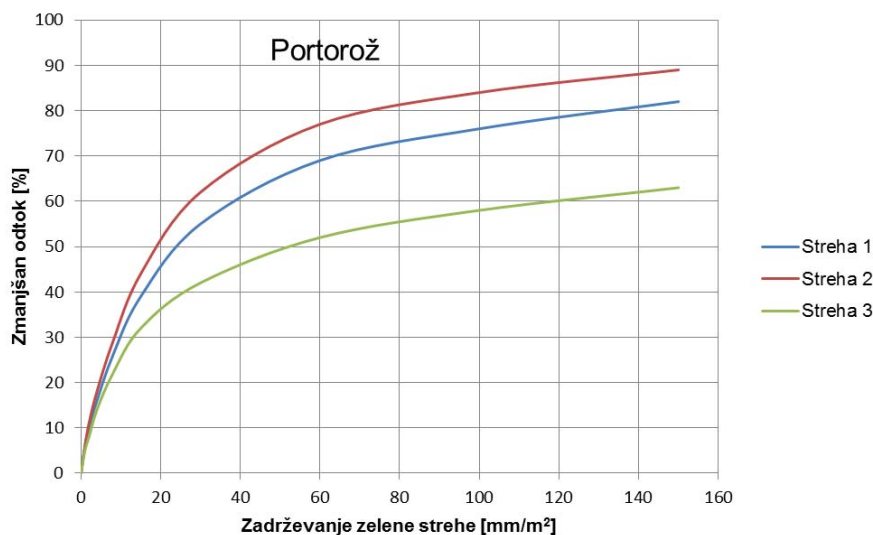
8.2 Portorož

Za analizo padavinskega odtoka v submediteranskem podnebju, smo uporabili 40 letne podatke padavin in ET_0 za Portorož. Povprečna dnevna ET_0 za zadnjih 40 let je 2,9 mm/dan. Povprečna letna količina padavin je 948 mm/m². Analizirali smo padavinski odtok s streh 1, 2 in 3.

V submediteranskem podnebju je ET_0 višja kot v celinskem podnebju. Razlika je tudi v količini in intenziteti padavin. Padavine so redkejše, vendar zapade večja količina padavin naenkrat.

Če povečamo sposobnost zadrževanja streh 1, 2 in 3 za 1-krat, streha 1 dodatno zmanjša padavinski odtok in sicer za 14 %, streha 2 ima skoraj enak učinek zmanjšanja odtoka (13 %) in streha 3 za 9 % (preglednica 18).

Analiza podatkov, ki so predstavljeni na grafikonu 56, je pokazala, da strehe bolje zmanjšujejo odtok, ker voda hitreje izhlapeva. Streha 2 je najbolj učinkovita pri zmanjšanju padavinskega odtoka zaradi višjega koeficienta ET (1,67). Glede na analizo so za to podnebje primerne strehe 1, 2 ali 3. Zaradi močne burje je najbolj primerna streha 3, saj je najtežja.



Grafikon 56: Portorož - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe

Graph 56: Portorož - runoff reduction dependent on the green roof retention capacity

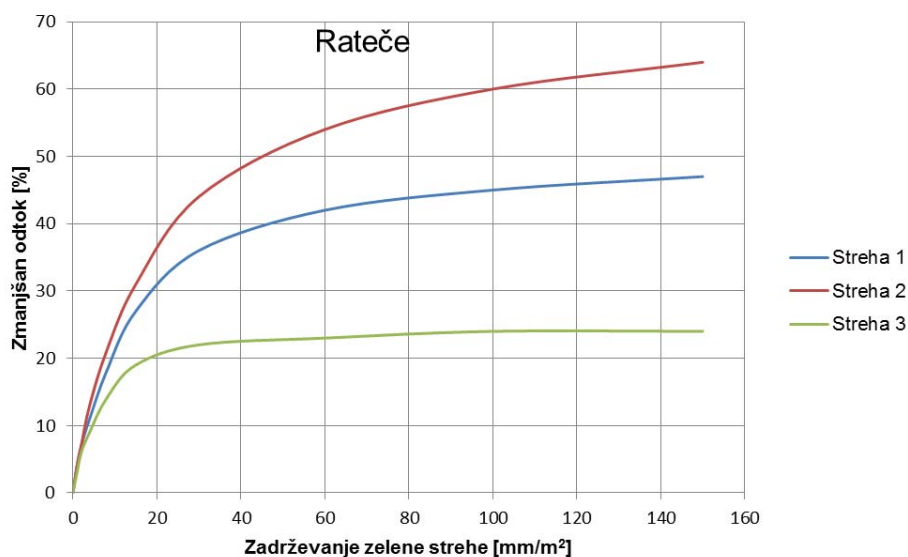
8.3 Rateče

Klimatološka postaja Rateče leži na območju gorskega podnebja. Povprečna dnevna ET_0 za zadnjih 40 let 1,6 mm/dan. Povprečna letna količina padavin je po podatkih za zadnjih 40 let 1464 mm/m².

Strehe 1, 2 in 3 najmanj zmanjšajo padavinski odtok zaradi najnižje ET_0 in velike količine padavin na tem območju.

Streha 3 najbolj zmanjša padavinski odtok, če ima zadrževalne sposobnosti 20 l/m², višja zadrževalna sposobnost ne bi imela učinka na zmanjšanje padavinskega odtoka (grafikon 57).

Iz preglednice 18 razberemo, da če povečamo sposobnost zadrževanja streh 1, 2 in 3 za 1-krat, streha 2 dodatno zmanjša padavinski odtok za 9 %, streha 1 za 7 % in streha 3 za 2 %. Učinek zmanjšanja padavinskega odtoka je premajhen, da bi bilo smiselno povečevati zadrževalne sposobnosti zelene strehe z debelino posameznih plasti.



Grafikon 57: Rateče - zmanjšanje padavinskega odtoka v odvisnosti od zadrževalne sposobnosti zelene strehe

Graph 57: Rateče - runoff reduction dependent on the green roof retention capacity

8.4 Prikaz vpliva koeficienta ET zelene strehe in povečanja zadrževanja vode na zasičenost in padavinski odtok z zelene strehe

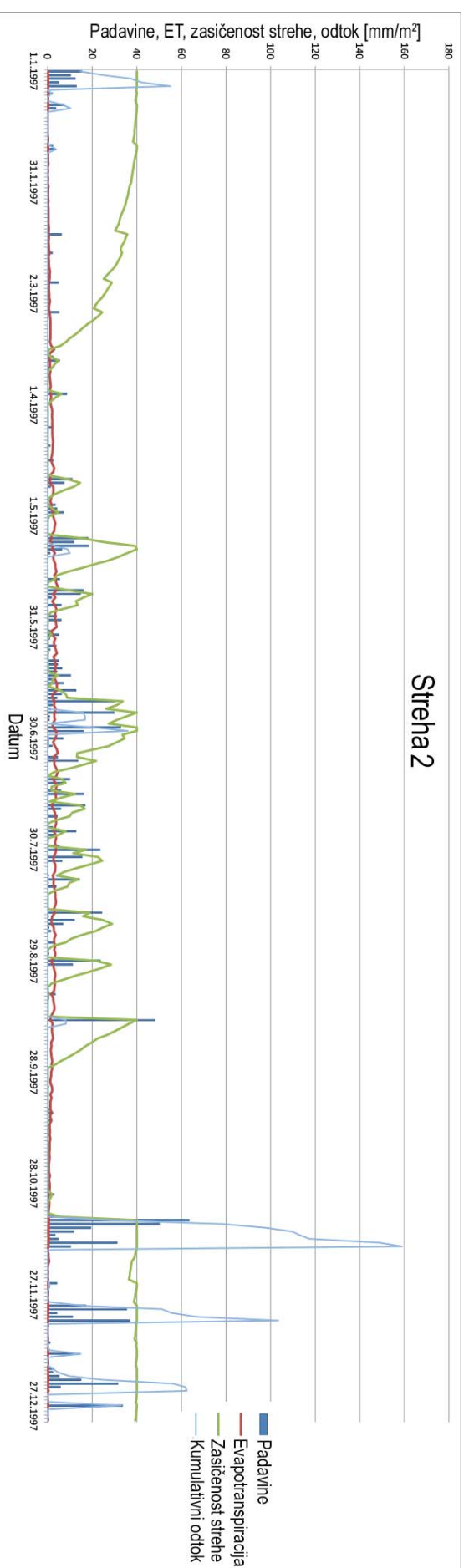
Iz priloženih grafikonov 58 in 59 je razviden vpliv koeficienta ET na padavinski odtok z zelene strehe. Iz podatkov za zadnjih 40 let za Rateče smo izbrali leto 1997, ko je bil izračunan minimalni padavinski odtok.

Za primerjavo smo izbrali streho 2, ki ima koeficient ET 1,67, in streho 3 s koeficientom ET 0,67. Za obe strehi smo določili zadrževalno sposobnost 40 mm/m^2 . Iz grafikonov 58 in 59 lahko razberemo, da je bila zaradi nižjega koeficienta ET (0,67) streha 3 celo leto do določene stopnje zasičena in se med posameznimi padavinskimi dogodki ni uspela osušiti.

Streha 2 s koeficientom ET 1,67 se je pri enaki količini zadrževanja med posameznimi padavinskimi dogodki osušila in zmanjšala padavinski odtok, saj je velik del padavin uspešno zadržala. Pri višjem koeficientu ET je bil padavinski odtok nižji.

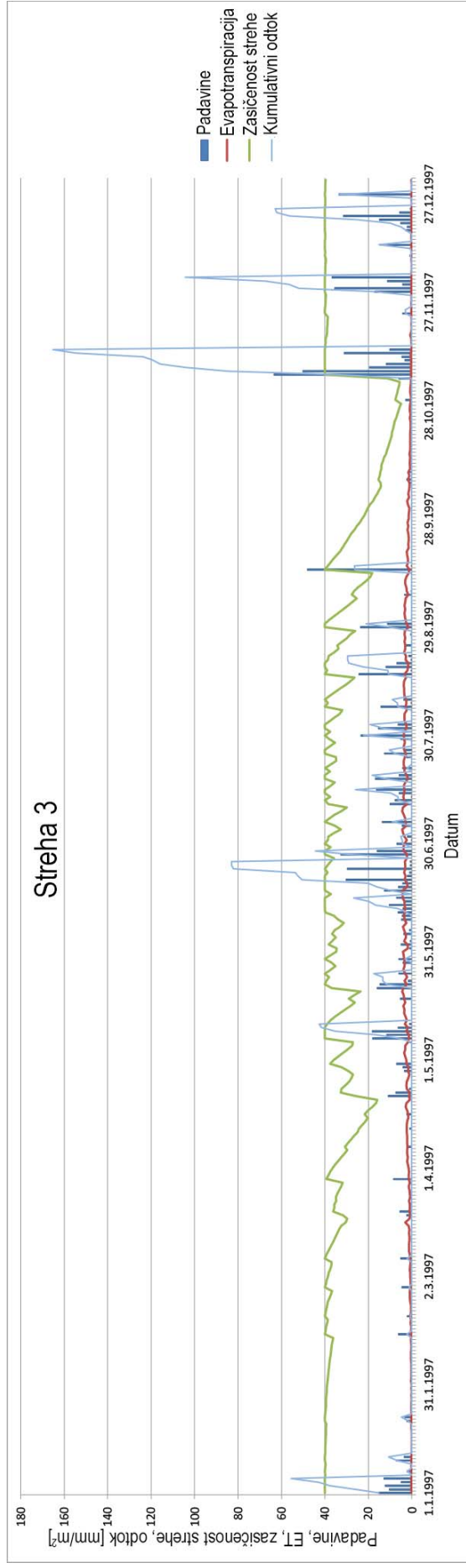
Tudi pri strehah 2 in 3 pri zadrževalni sposobnosti 80 mm/m^2 (grafikon 60 in 61) opazimo enak odziv streh.

Iz grafikonov 58 in 60 se vidi, da povečanje zadrževalne sposobnosti zelene strehe ne vpliva na odtok, ker se streha med padavinskimi dogodki ne osuši.



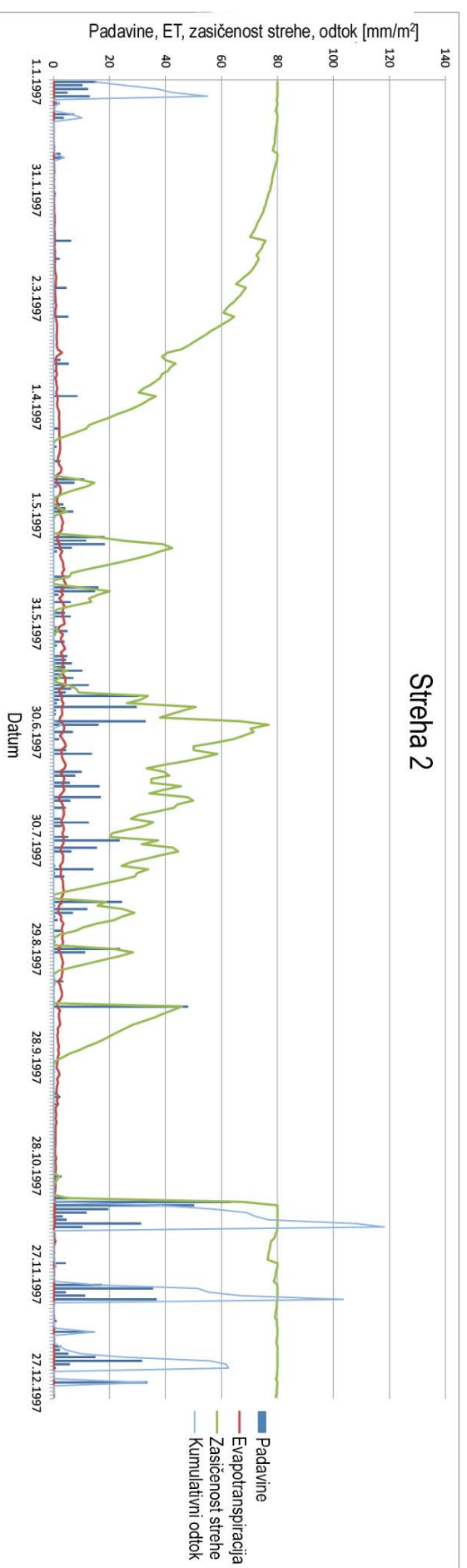
Grafikon 58: Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 2 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 40 mm/m², koeficient ET za streho 2 je 1,67)

Graph 58: *The impact of the ET coefficient of the roof 2 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 40 mm/m², coefficient of ET for the roof 2 is 1,67)*



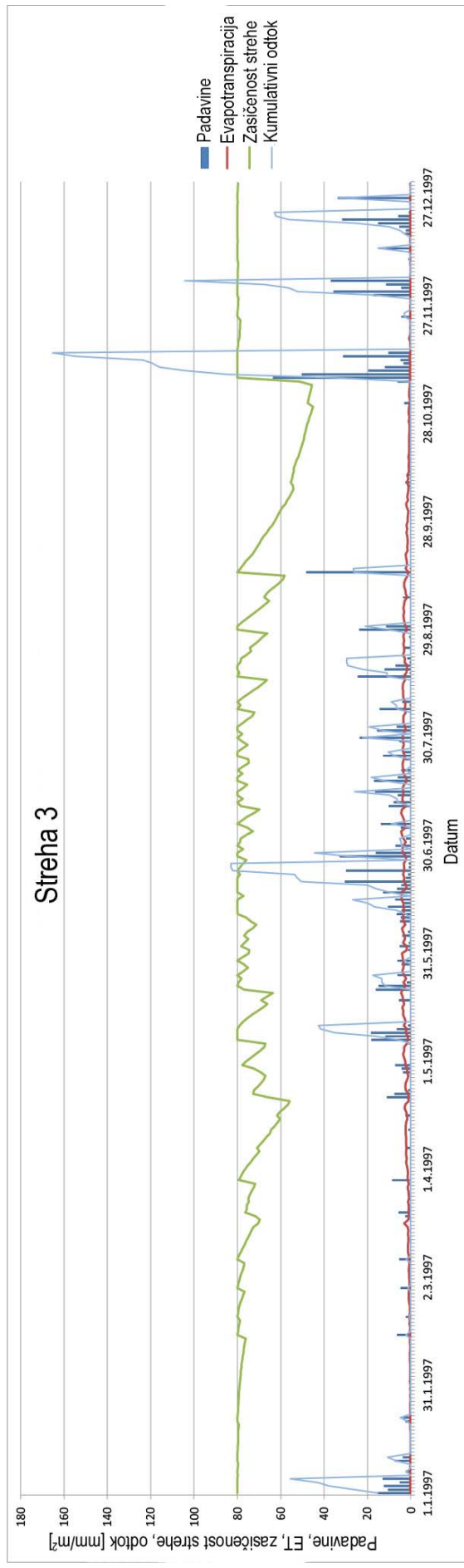
Grafikon 59: Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 3 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 40 mm/m², koeficient ET za streho 3 je 0,67)

Graph 59: The impact of the ET coefficient of the roof 3 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 40 mm/m², coefficient of ET for the roof 3 is 0,67)



Grafikon 60: Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 2 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 80 mm/m², koeficient ET za streho 2 je 1,67)

Graph 60: The impact of the ET coefficient of the roof 2 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity of 80 mm/m², coefficient of ET for the roof 2 is 1,67)



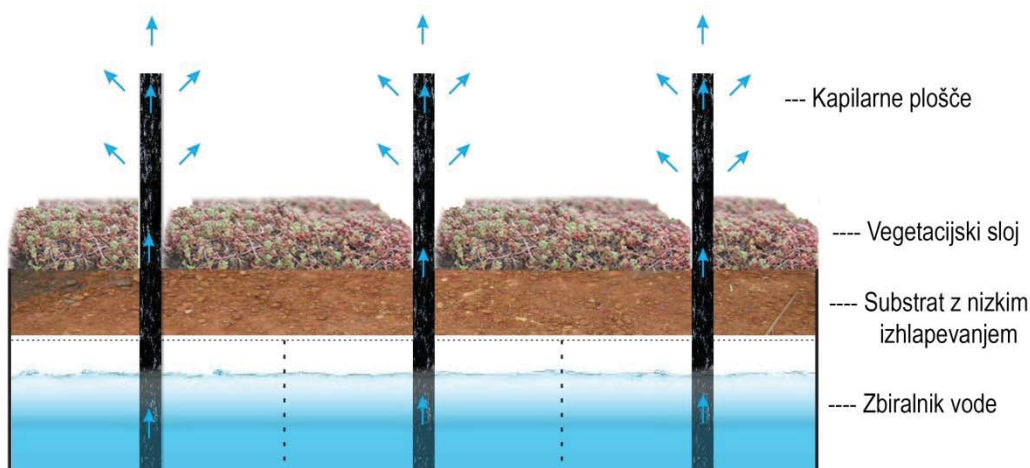
Grafikon 61: Prikaz vpliva koeficienta ET strehe 3 in padavin na zasičenost zelene strehe in padavinski odtok (sposobnost zadrževanja 80 mm/m², koeficient ET za streho 3 je 0,67)

Graph 61: The impact of ET coefficient of the roof 3 and precipitation on the green roof saturation and stormwater runoff (retention capacity 80 mm/m², coefficient of ET for the roof 3 is 0,67)

8.5 Predlagana rešitev

Z modelom smo pokazali, da je streho z dovolj visokim koeficientom ET smiselno debeliti oziroma povečevati njeno zadrževalno sposobnost. Streha z nizkim koeficientom ET je primerna za vzdrževanje rastlin, da v sušnih poletnih mesecih ne propadejo. Kombinacija obojega bi bila najboljša rešitev.

Zamislili smo si zeleno streho, ki bi se glede na naše izračune dobro odzivala na različne podnebne razmere. Sestavljena je iz treh slojev in dodatka kapilarnih plošč. Slika 15 prikazuje njeno sestavo. Gre za kombinacijo modre in zelene strehe. V tuji literaturi smo zasledili, da so modre strehe (blue roofs) namenjene izključno zadrževanju padavinskega odtoka, v kombinaciji z zelenimi strehami smo jih opisali v teoretičnem delu.



Slika 15: Predlagana sestava modro-zelene strehe s kapilarnimi ploščami
Figure 15: The proposed configuration of a green roof with capillary plates

Predlagamo substrat, ki mu povečamo izhlapevanje z dodatnimi kapilarnimi ploščami črne barve, povezanimi v zbiralnik vode. Plošče samodejno črpajo vodo in služijo kot dodatna površina za izhlapevanje.

Rastlinski sloj zelene strehe sestavljajo različne rastline, ki so neobčutljive na sušne in pretirano vlažne podnebne razmere ter imajo nizko rast. Rastlinski sloj s substratom je izbran tako, da ima nizko stopnjo izhlapevanja. Ker voda počasi izhlapeva, imajo rastline tudi v sušnem obdobju dovolj vlage. Na osnovi eksperimenta smo ugotovili, da je substrat iz drobljene opeke najprimernejši za rastline, saj zadrži dovolj vode za njihovo uspešno rast tudi v sušnih razmerah. Debelino rastnega substrata smo omejili na 5 cm.

Sledi sloj filca, ki preprečuje vdor drobnih delcev v zbiralnik vode. Spodnji del je zbiralnik vode, ki predstavlja prazen prostor namenjen hitremu akumuliranju večjih količin vode. Višina tega dela je 10 cm, kar pomeni, da ima sposobnost zadrževanja vode 100 mm/m^2 .

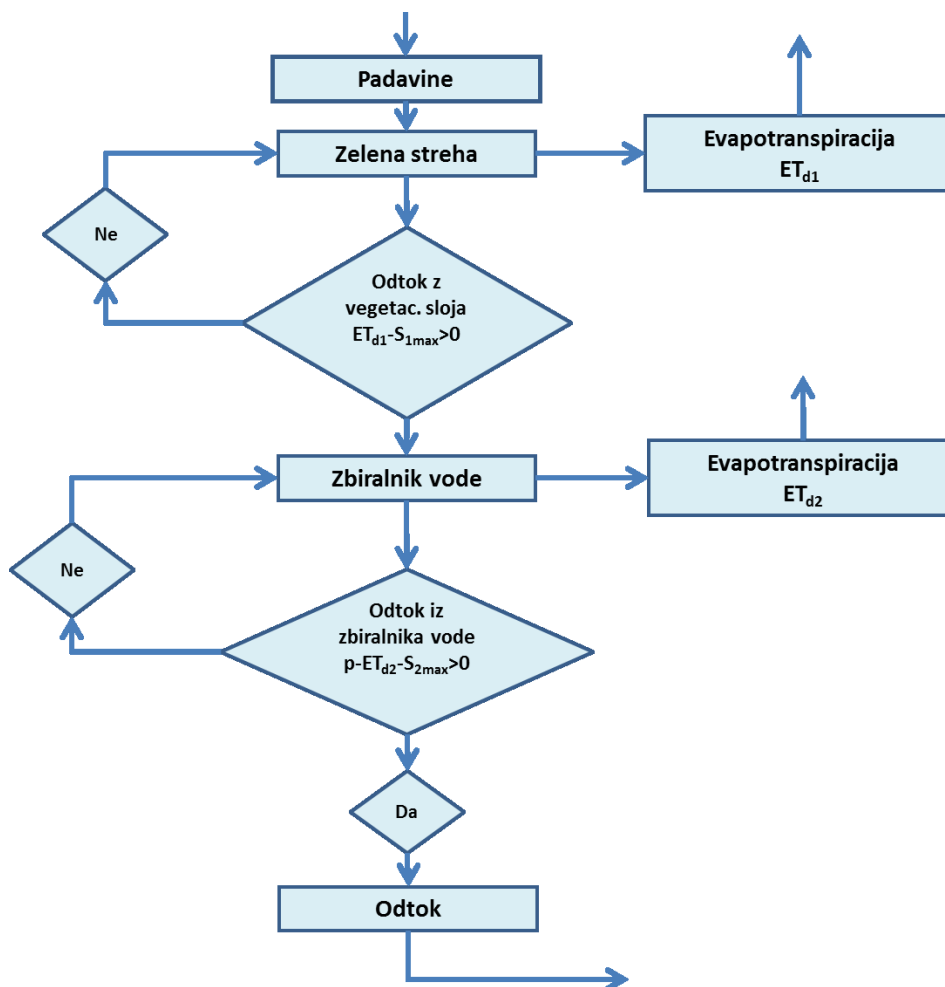
Na zbiralniku vode so postavljene kapilarne plošče. Plošče imajo vlogo, da močno povečujejo izhlapevanje vode iz zbiralnika, saj se voda po porozni površini hitro pomika. Z omenjenimi ploščami se lahko koeficient izhlapevanja poveča tudi do 8x, odvisno od njihove velikosti. Prednost kapilarnih plošč je v tem, da samodejno potegnejo vodo na površje, kjer je visok učinek sončnega sevanja in vetra. Ker imajo plošče hrapavo površino, je s tem dodatno povečana površina izhlapevanja.

Pri kapilarnih ploščah izkoriščamo lastnost kapilarnega dviga tekočin, ki omogoča, da se v zelo ozkih prostorih tekočina samostojno dviga. Višina kapilarnega dviga vode bi bila v našem primeru do 35 cm. Plošče bi bile med seboj odmaknjene 50 cm .

Za vsa tri klimatska območja predlagamo modro-zelena streho, ki ima nizek koeficient ET z rastlinskega sloja s substratom, s spodnjega dela, kjer se voda akumulira, pa ima visoko izhlapevanje. Takšna streha bi se dobro odzivala tudi v drugih klimatskih območjih.

V testnem okolju je zbiralnik s ploščami izhlapeval 6,2-krat hitreje kot zbiralnik brez plošč. Opozoriti moramo, da izbira kapilarnih plošč ni bila optimalna.

Model smo preoblikovali tako, da ustreza predlagani modro-zeleni strehi. Model se deli na dva dela (vegetacijski sloj s substratom in zbiralnik vode) (slika 16).



Slika 16: Diagram poteka za izračun modela modro-zelene strehe
Figure 16: Flowchart of the green roof model calculation

$$ET_{d1} = \begin{cases} ET_0 * k_1; S_{1(t-1)} > 0 \\ 0; S_{1(t-1)} < 0 \end{cases}$$

Kjer je:

- S_{1max} popolna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom [l/m^2],
- ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
- ET_{d1} dejanska evapotranspiracija vegetacijskega sloja [mm/dan],
- ET_{d2} dejanska evapotranspiracija zbiralnika vode [mm/dan],
- k_1 koeficient ET vegetacijskega sloja s substratom,
- S_{2max} maksimalna količina vode v zbiralniku [mm/m^2],
- k_2 koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode.

Vegetacijski sloj s substratom

$$S_{1(t)} = \begin{cases} S_{1\max}; S_{1(t-1)} + p - ET_{d1} > S_{1\max} \\ S_{1(t-1)} + p - ET * k_1; 0 < S_{1(t)} < S_{1\max} \\ 0; S_{1(t-1)} + p - ET_{d1} < 0 \end{cases}$$

Pronicanje vode skozi vegetacijski sloj s substratom

$$p_1 = \begin{cases} S_{1(t-1)} + p - ET_{d1} - S_{1\max}; S_{1(t)} \geq S_{1\max} \\ 0; S_{1(t-1)} + p - ET_{d1} - S_{1\max} < 0 \end{cases}$$

Zbiralnik vode

$$ET_{d2} = \begin{cases} ET_0 * k_2; S_{2(t-1)} > 0 \\ 0; S_{2(t-1)} < 0 \end{cases}$$

$$S_{2(t)} = \begin{cases} S_{2\max}; S_{2(t-1)} + p_1 - ET_{d2} > S_{2\max} \\ S_{2(t-1)} + p_1 - ET_{d2}; 0 < S_{2(t)} \leq S_{2\max} \\ 0; S_{2(t-1)} + p_1 - ET_{d2} < 0 \end{cases}$$

Trenutni padavinski odtok z zelene strehe

$$Q = \begin{cases} S_{2(t-1)} + p_1 - ET_{d2} - S_{2\max}; S_{2(t)} \geq S_{2\max} \\ 0; S_{2(t-1)} + p_1 - ET_{d2} - S_{2\max} < 0 \end{cases}$$

Kjer je:

$S_{1(t)}$	trenutna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom [l/m^2],
$S_{1(t-1)}$	predhodna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom [l/m^2],
S_{1max}	popolna zasičenost vegetacijskega sloja s substratom [l/m^2],
p	količina padavin [mm/m^2],
ET_0	referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
ET_{d1}	dejanska evapotranspiracija vegetacijskega sloja [mm/dan],
ET_{d2}	dejanska evapotranspiracija zbiralnika vode [mm/dan],
k_1	koeficient ET vegetacijskega sloja s substratom,
p_1	pronicanje vode iz substrata v zbiralnik vode [mm/m^2],
$S_{2(t)}$	trenutna zasičenost zbiralnika vode [l/m^2],
$S_{2(t-1)}$	predhodna zasičenost zbiralnika vode [l/m^2],
S_{2max}	maksimalna količina vode v zbiralniku [mm/m^2],
k_2	koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode,
Q	padavinski odtok z zelene strehe [mm/m^2].

Zasičenost vegetacijskega sloja s substratom je enaka vsoti predhodnega stanja zasičenosti sloja in količini padavin, od katere smo odšteli zmnožek vrednosti evapotranspiracije in koeficienta evapotranspiracije sloja. Če je rezultat večji, kot je maksimalna zasičenost sloja, se upošteva maksimalna zasičenost strehe. Če je rezultat manjši od 0, se upošteva vrednost 0.

Trenutno pronicanje vode skozi vegetacijski sloj s substratom v zbiralnik vode je enako vsoti predhodnega stanja zasičenosti sloja in količini padavin, od katere smo odšteli zmnožek evapotranspiracije in koeficienta ET sloja ter odšteli maksimalno količino zasičenosti sloja. Če je trenutni padavinski odtok manjši od 0, je vrednost odtoka enaka 0.

Zasičenost zbiralnika vode je enaka vsoti predhodnega stanja zasičenosti zbiralnika in količine prepuščanja vegetacijskega sloja, od katere smo odšteli zmnožek evapotranspiracije in koeficienta izhlapevanja iz zbiralnika vode. Če je rezultat večji kot je maksimalna zasičenost zbiralnika, se upošteva maksimalna zasičenost zbiralnika. Če je rezultat manjši od 0, se upošteva vrednost 0.

Trenutni padavinski odtok zbiralnika vode je enak odtoku celotne strehe. Izračuna se ga tako, da vsoti predhodnega stanja zasičenosti zbiralnika vode in količine padavin, od katere smo odšteli zmnožek evapotranspiracije in koeficienta izhlapevanja iz zadrževalnika vode in odšteli maksimalno količino zasičenosti zadrževalnika vode. Če je trenutni padavinski odtok manjši od 0, je vrednost odtoka enaka 0.

Izračunali smo zadrževalno sposobnost predlagane modro-zelene strehe z zbiralnikom vode, ki zadrži 100 mm vode, substrat zadrži 5 mm ter rastlinski sloj 1 mm padavin. Koeficient ET rastlinskega dela z glinenim substratom je 0,67, koeficient zbiralnika vode je 6. Sposobnost zadrževanja vode predlagane modro-zelene strehe je 106 mm/m².

Čas izhlapevanja do popolne izpraznitve zbiralnika vode bi bil v Portorožu povprečno 5,2 dni. Povprečna ET₀ je 2,88 mm/dan, koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode je 6.

$$t = \frac{S_{2\max}}{ET_0 * k_2} = 5,2 \text{ dni}$$

Kjer je:

- t trajanje do popolne izpraznitve zbiralnika vode [d],
- S_{2max} maksimalna količina vode v zbiralniku [mm/m²],
- ET₀ referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
- k₂ koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode.

V poletnih mesecih je ET₀ 5,8 mm/dan. Streha potrebuje 2,9 dneva, da se osuši.

$$t = \frac{S_{2\max}}{ET_0 * k_2} = 2,9 \text{ dni}$$

Kjer je:

- t trajanje do popolne izpraznitve zbiralnika vode [d],
- S_{2max} maksimalna količina vode v zbiralniku [mm/m²],
- ET₀ referenčna evapotranspiracija [mm/m²],
- k₂ koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode.

Primerjali smo količino vode, ki jo zadrži najboljša testirana streha (streha 2) in količino vode modro-zelene strehe ter ugotovili, da je streha 2 s sposobnostjo zadrževanja 33,1 mm/m², s povprečno ET₀ 2,88 v Portorožu pripravljena v 6,9 dneh.

$$t_{s2} = \frac{S_{\max}}{ET_0 * k} = 6,89 \text{ dni}$$

Kjer je:

- t_{s2} trajanje do popolne izpraznitve strehe 2 [d],
 S_{max} popolna zasičenost zelene strehe 2 [l/m^2],
 ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
 k koeficient ET za streho 2.

Predlagana modro-zelena streha je z enako količino vode $33,1 \text{ mm/m}^2$ pripravljena v 1,9 dnev.

$$t_{kx} = \frac{S_{(33,1)}}{k} = \frac{33,1}{k}$$

Kjer je:

- t_{mz} trajanje do popolne izpraznitve modro-zelene strehe [d],
 ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
 k_2 koeficient izhlapevanja iz zbiralnika vode,
 $S_{(33,1)}$ popolna zasičenost modro-zelene strehe enaka strehi 2 [l/m^2].

Streha 2 bi se v Portorožu osušila povprečno v sedmih dneh, predlagana streha z enako zadrževalno sposobnostjo pa v dveh dneh.

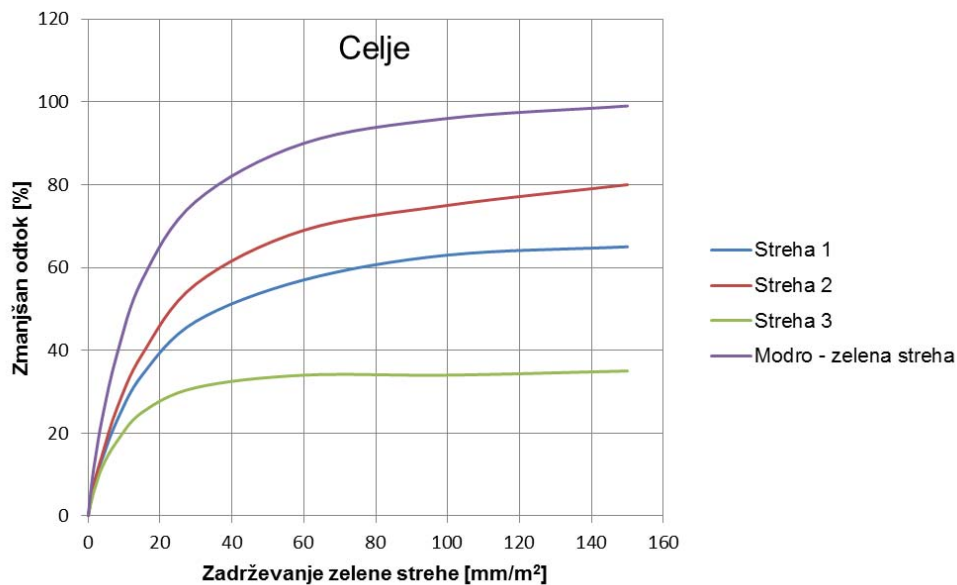
Ko smo predlagano streho testirali v modelu s 40-letnimi padavinskimi podatki, so se pokazale naslednje zadrževalne sposobnosti: Portorož (98,3 %), Celje (96 %), Rateče (79,9 %) (preglednica 18).

Preglednica 19: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka pri strehi 2 in predlagani modro-zelene strehi

Table 19: Comparison of stormwater runoff reduction from the roof 2 and the proposed blue - green roof

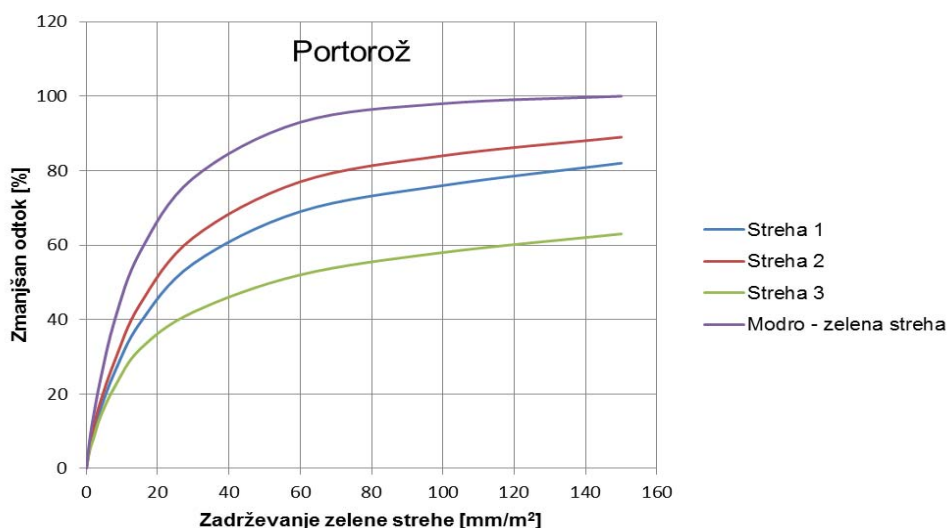
ZELENA STREHA	ZMANJŠANJE/ZADRŽEVANJE PADAVINSKEGA ODTOKA [%]		
	Celje	Portorož	Rateče
Streha 2	57	63	41
Predlagana streha (modro-zelena)	96	98,3	79,9

Z grafikoni 62, 63 in 64 smo prikazali rezultat modela predlagane modro-zelene strehe v primerjavi z obravnavanimi zelenimi strehami 1, 2 in 3.



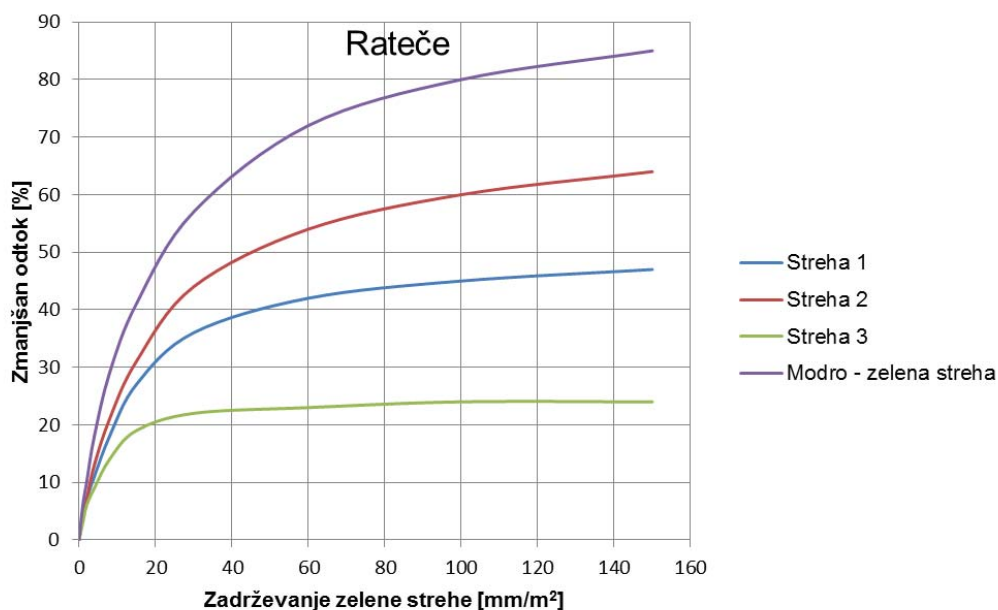
Grafikon 62: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Celje

Graph 62: Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Celje



Grafikon 63: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Portorož

Graph 63: Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Portorož



Grafikon 64: Primerjava zmanjšanja padavinskega odtoka med strehami 1, 2 in 3 ter predlagano modro-zelena streho za Rateče

Graph 64: Runoff reduction of roof 1, 2 and 3 compared to proposed blue-green roof for Rateče

Pri predvideni zadrževalni sposobnosti modro-zelene strehe (106 mm/m²), bi predlagana modro-zelena streha v Portorožu in Celju na leto v povprečju zadržala skoraj vso padavinsko vodo. V Ratečah bi zadržala 80 % padavin. Rezultat modeliranja je pokazal zelo visoke vrednosti zadrževanja predlagane strehe. Takšna streha je primerna za učinkovito zmanjšanje padavinskega odtoka v vseh podnebnih razmerah.

9 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

9.1 Dokaz hipoteze

Namen magistrskega dela je bil raziskati učinek ekstenzivnih zelenih streh na zadrževanje in zmanjšanje padavinskega odtoka. Zaradi vedno večjih nepropustnih površin v urbanem okolju padavinske vode hitro odteka, kar ima negativen vpliv na okolje. Ključni vprašanji sta bili, koliko padavinskih vod bi lahko zadržale različne testne ekstenzivne zelene strehe ter kako bi lahko izboljšali njihove zadrževalne sposobnosti, da bi odgovarjale padavinskim razmeram, ki so značilne za posamezna podnebna območja v Sloveniji.

Podobnih raziskav za območje Slovenije nismo zasledili, prav tako smo ugotovili, da podjetja, ki tržijo ekstenzivne zelene strehe v Sloveniji, ne opravljajo monitoringov na področju zadrževanja padavinskih vod. Obstajajo pa meritve maksimalne akumulacije vode v zasičenosti substrata, ki ga proizvajalci uporabljajo in zasičenosti celotnega sistema ekstenzivne zelene strehe. Ker je učinkovitost zmanjšanja padavinskega odtoka odvisna od številnih dejavnikov, podatki proizvajalca ne povedo veliko, saj ne velja, da zelena streha z veliko zadrževalno sposobnostjo tudi najbolj učinkovito zmanjša padavinski odtok.

Predvidevali smo, da zelene strehe zmanjšajo volumen odtoka padavinskih vod in da je njihova učinkovitost zadrževanja vode odvisna od strukture zelene strehe, klimatskih razmer ter predhodne vlažnosti substrata. Hipotezo smo dokazali na osnovi eksperimentalnih meritev izhlapevanja iz treh različnih zelenih streh in merjenja padavinskega odtoka. Z meritvami pridobljene podatke smo uporabili pri modeliranju odziva treh testnih zelenih streh na konkretne padavinske dogodke za daljše časovno obdobje (40 let).

Primerjali smo odziv testnih zelenih streh v treh različnih podnebnih območjih v Sloveniji (celinsko, submediteransko in gorsko). Osnovni klimatski podatki, ki smo jih uporabili pri modeliranju, so bili padavinski podatki za obdobje 1975-2015 za tri klimatološke postaje (Celje, Portorož in Rateče) iz katerih je bila razvidna značilnost posameznih padavinskih dogodkov (intenziteta in trajanje padavin) ter časovni razmik med padavinami. Upoštevali smo tudi višino evapotranspiracije za posamezne klimatološke postaje.

Na začetku smo predvidevali, da bo na količino zadržanih padavin imelo velik vpliv predhodno sušno obdobje, vendar se je z modeliranjem izkazalo, da ima velik vpliv stopnja evapotranspiracije v posameznem kraju oziroma klimatskem območju in koeficient ET za posamezno streho.

Rezultate eksperimentalnih meritev in modeliranja lahko strnemo v naslednje ugotovitve:

- zelene strehe zmanjšajo volumen padavinskega odtoka, ko postane zelena streha zasičena, je količina odtoka s strehe enaka količini padavin;
- povprečno zmanjšanje padavinskega odtoka s strehe 2, ki se je izkazala za najbolj učinkovito, je za Celje 57 %, Portorož 63 % in Rateče 41 %, rezultati so primerljivi z ostalimi raziskavami v različnih podnebnih območjih po svetu;
- učinkovitost zmanjšanja padavinskega odtoka je odvisna od predhodne vlažnosti substrata, kadar si padavinski dogodki sledijo v kratkem časovnem razmiku, je učinkovitost zadrževanja nizka, kar smo potrdili z meritvami in modeliranjem odtoka;
- debelina zelene strehe ne vpliva na intenzivnost izhlapevanja;
- različna stopnja zasičenosti substrata ima vpliv na hitrost izhlapevanja le pri substratu iz drobljene opeke, za katerega smo izračunali tudi najnižji koeficient izhlapevanja;
- z modelom smo pokazali, da je posamezne sloje zelene strehe z dovolj visokim koeficientom ET smiselno debeliti oziroma povečevati zadrževalno sposobnost zelene strehe le do določene vrednosti, kar je odvisno od klimatskih razmer;
- povečanje zadrževalne sposobnosti zelene strehe v krajih z nizko evapotranspiracijo nima zelenega vpliva na zmanjšanje padavinskega odtoka;
- streha z nizkim koeficientom ET je primerna za vzdrževanje rastlin, da v sušnih poletnih mesecih ne propadejo.

9.2 **Praktična uporabnost ugotovitev in rezultatov**

Visoko urbanizirana mesta po celem svetu iščejo rešitve, kako zmanjšati vedno večji padavinski odtok, ki je posledica urbanizacije in podnebnih sprememb. Mesta se srečujejo s težavama kot sta prelivanje kanalizacijskih odpadnih vod v vodotoke in s poplavami. Marsikje vidijo možnost zmanjšanja padavinskega odtoka s pomočjo zelenih streh.

V raziskavah, ki smo jih v uvodu magistrskega dela pregledali, avtorji večinoma upoštevajo, da na stopnjo ET vpliva vsebnost vlage v substratu. Manj kot je vlage v substratu, nižja je ET kar dokaže Poë in sod. (2015). ET se manjša eksponentno s časom. V magistrskem delu

smo z eksperimentalnim merjenjem treh različnih materialov ugotovili, da je izhlapevanje neodvisno od stopnje zasičenosti. ET se je manjšala linearno s časom. Manjši vpliv stopnje zasičenosti smo opazili le pri substratu iz drobljene opeke.

Voyde, Fassman in Simcock (2010) navajajo, da imajo predhodni sušni dnevi največji vpliv na učinkovitost zadrževanja padavinskega odtoka. Učinkovitost zelene strehe se še bolj zmanjša, ko je ET nizka. Naše meritve so pokazale, da ima največji vpliv na zadrževanje padavinskega odtoka višina evapotranspiracije in koeficient evapotranspiracije zelene strehe. Strehi 2 in 3 z enako zadrževalno sposobnostjo in z različnim koeficientom ET nista bili enako učinkoviti. Streha z nižjim koeficientom ET se celo leto ni osušila, zato je bil tudi odtok višji.

Avtorji navajajo, da se padavinski odtok s povečanjem zadrževalne sposobnosti zelene strehe zmanjša. Tako Mentens, Raes in Hermy (2006) navajajo, da je odtok močno povezan z debelino substrata zelene strehe. Voyde, Fassman in Simcock (2010) ugotavljajo, da povečanje debeline substrata od 50 na 70 mm ne doprinese k dodatnemu zmanjšanju padavinskega odtoka. V delu smo natančneje analizirali učinek zmanjšanja padavinskega odtoka, če bi zadrževalno sposobnost strehe povečali za 1-krat. V takšnem primeru bi najbolj zmanjšala odtok streha 2 in sicer za 14 % v Portorožu. Najmanj bi zmanjšala streha 3 v Ratečah in sicer za 2 %. Menimo, da večanje zadrževalnih sposobnosti zelene strehe v krajih z nizko ET nima vpliva na zmanjšanje padavinskega odtoka. V krajih z višjo ET pa je večanje zadrževalnih sposobnosti smiselno le do določene vrednosti.

Pri raziskavi smo ugotovili, da testne zelene strehe zmanjšajo padavinski odtok do določene mere. V Celju strehe 3, 1 in 2 zadržijo 32, 44 in 57 % padavin, v Portorožu 40, 49 in 63 % in Ratečah 20, 30 ter 41 %. Namen konstrukcije zelene strehe v visoko urbaniziranih območjih je, da učinkovito zmanjša padavinski odtok in želeli bi si boljših rezultatov.

Zapisane ugotovitve smo zato praktično uporabili v idejni zasnovi zelene strehe, ki bi najbolj učinkovito zmanjšala padavinski odtok v obravnavanih klimatskih razmerah. Gre za kombinacijo modre in zelene strehe. Sestavljena je iz treh slojev (zbiralnik vode, substrat z nizkim izhlapevanjem in vegetacijski sloj) ter dodatkom kapilarnih plošč. Streha ima nizek koeficient ET iz rastlinskega sloja s substratom, iz zbiralnika vode pa ima visoko izhlapevanje, ki ga ustvarimo s pomočjo kapilarnih plošč. Kapilarni dvig vode smo predvideli za 35 cm, plošče pa bi bile med seboj odmaknjene 50 cm. Z modelom smo izračunali, da bi s takšno streho v Celju zmanjšali padavinski odtok za 96 %, v Portorožu za 98 % in v Ratečah za 80 %. S tem smo dokazali uporabnost rezultatov magistrskega dela.

9.3 Usmeritve za nadaljnje delo

V skladu s predlagano rešitvijo raziskovalnega problema bi bilo treba izbrati materiale za izdelavo modro-zelene strehe, testirati najboljše materiale za kapilarne plošče in dodelati substrat za vegetacijski sloj. Konstrukcijo predlagane modro-zelene strehe bi bilo treba testirati. S tem bi dokazali učinkovitost predlagane rešitve pri zmanjšanju padavinskega odtoka v naravnih razmerah.

Ugotovitve v magistrskem delu so lahko osnova za nadaljnje izračune zmanjšanja padavinskega odtoka v mestih po svetu, ki ležijo v različnih klimatskih območjih. Menimo, da bi bilo treba pri raziskavah, ki obravnavajo učinkovitost zadrževanja padavinskega odtoka, upoštevati padavinske podatke in ET za daljše časovno obdobje ter izračun koeficienta ET za posamezno zeleno streho. Slednjega namreč v dosedanjih raziskavah nismo zasledili.

10 POVZETEK

Urejanje padavinskega odtoka je zaradi vpliva urbanizacije vedno večji problem za mesta po celem svetu. Padavinske vode naj bi čim dlje zadrževali na mestu, kamor so padle, da bi se zmanjšala količina odtoka po kanalizaciji.

Zelene strehe predstavljajo vedno pogostejšo rešitev trajnostne gradnje. Poleg koristi pri upravljanju z urbano odvodnjo imajo številne druge pozitivne učinke na okolje. Zelene strehe se pogosto gradi brez upoštevanja klimatskih značilnosti območja. Zato smo v magistrskem delu preučevali oceno hidrološkega vpliva ekstenzivnih zelenih streh na zmanjšanje količin padavinskega odtoka v treh klimatskih območjih značilnih za Slovenijo.

Na podlagi študije dosedanjih raziskav smo predstavili glavne dejavnike, ki vplivajo na količino padavin, ki jih posamezni tipi streh zadržijo in njihove meritve. Opravili smo meritve na treh testnih strehah in jih uporabili pri modelu zadrževanja padavinskih vod na zeleni strehi. Opravili smo tudi meritve izhlapevanja vode iz različnih debelin substratov in vpliv zasičenosti na hitrost izhlapevanja. Z modelom smo ocenili potencialno korist zelenih streh s simulacijo zadrževanja padavinskih vod pod vplivom treh različnih klimatskih razmer.

Ugotovili smo, da debelina substrata zelene strehe ne vpliva na intenzivnost izhlapevanja. Različna stopnja zasičenosti substrata ima vpliv na hitrost izhlapevanja le pri substratu iz drobljene opeke, za katerega smo izračunali tudi najnižji koeficient izhlapevanja. Z modelom smo pokazali, da je posameznim slojem zelene strehe, z dovolj visokim koeficientom ET smiselno povečevati zadrževalno sposobnost zelene strehe le do določene vrednosti. Povečanje zadrževalne sposobnosti zelene strehe v krajih z nizko evapotranspiracijo nima zelenega vpliva na zmanjšanje padavinskega odtoka. Streha z nizkim koeficientom ET je primerna za vzdrževanje rastlin, da v sušnih poletnih mesecih ne propadejo. Na učinkovitost zadrževanja padavin zelene strehe najbolj vpliva višina evapotranspiracije v določenem podnebnem tipu in koeficient ET zelene strehe. Pomembna ugotovitev je tudi, da se padavinski odtok ne zmanjša vedno s povečanjem zadrževalne sposobnosti zelene strehe.

Glede na rezultate modeliranja smo predstavili konstrukcijo zelene strehe, ki bi ustrezala različnim klimatskim območjem v Sloveniji. Osnovni model zelene strehe smo prilagodili predlagani modro-zeleni strehi. V obravnavanih krajih z različnimi podnebnimi razmerami (celinsko, submediteransko, gorsko) smo z modeliranjem dobili naslednje rezultate zmanjšanja padavinskega odtoka na leto: Celje (96 %), Portorož (98 %), Rateče (80 %). Na osnovi teh rezultatov lahko trdimo, da bi modro-zelena streha učinkovito zmanjšala padavinski odtok.

11 SUMMARY

Managing of stormwater runoff is a growing problem in highly urbanized areas around the world. Stormwaters should be retained to reduce the runoff quantity.

Green roofs are one of the sustainable solutions. Beside urban stormwater managing they have many other advantages. They are often built without considering to specific climate characteristics. In our thesis we studied the evaluation of extensive green roof performance on stormwater runoff quantity in three climatic zones typical of Slovenia.

Based on previous research studies, we presented the main factors that influence the amount of precipitation retained by an individual type of green roof. We performed measurements at three test roofs. The results were used to model the retention of rainwater on a green roof. We also made measurements of evaporation from various thicknesses of substrates and the influence of saturation at the rate of evaporation. With the model, we evaluated the potential benefit of the green roofs to retain the rainwater under the influence of three different climatic conditions.

We have found that the thickness of the green roof substrate does not affect the intensity of evaporation. Different degrees of the substrates' saturation have the impact on the rate of evaporation only on the crushed bricks substrate, which was calculated as the lowest coefficient of evaporation. For the green roofs with enough high evapotranspiration coefficient it is useful to increase their retention capacity only up to a certain value. Increasing the retention capacity of the green roofs in areas with low evapotranspiration do not have a desired effect of reducing the rainfall runoff. Roofs with a low evapotranspiration coefficient are suitable for the maintenance of plants in summer months. Green roof performance on stormwater runoff quantity is most affected by the rate of evapotranspiration in the climate area and of the green roofs' evapotranspiration coefficient. An important finding is that stormwater is not always reduced by increasing the green roofs retention ability.

According to the modeling results, we presented the green roof construction which would correspond to different climate zones in Slovenia. The basic model of the green roof was adapted to the proposed blue-green roof. In the studied areas with different climatic conditions (continental, Mediterranean, mountain), we came to the following results of the annual runoff reduction for the purposed blue-green roof: Celje (96%), Portorož (98%) and Rateče (80%). Based on these results, we can say that our blue-green roof would efficiently reduce stormwater runoff.

VIRI IN LITERATURA

- ARSO, 2016. Referenčna evapotranspiracija.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/etp/> (Pridobljeno 10. 2. 2016.)
- ARSO, 2016a. Podnebni diagram za Celje 1981-2010.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/celje/> (Pridobljeno 18. 3. 2016.)
- ARSO, 2016b. Podnebni diagram za Portorož 1981-2010.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/portoroz/> (Pridobljeno 18. 3. 2016.)
- ARSO, 2016c. Podnebni diagram za Rateče 1981-2010.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/ratece/> (Pridobljeno 18. 3. 2016.)
- ARSO, 2016d. Povratne dobe za ekstremne padavine za Celje.
http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/return-periods/Celje.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2016.)
- ARSO, 2016e. Povratne dobe za ekstremne padavine za Portorož.
http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/return-periods/Letalisce%20Portoroz.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2016.)
- ARSO, 2016f. Povratne dobe za ekstremne padavine za Rateče.
http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/return-periods/Ratece.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2016.)
- ARSO, 2016g. Referenčna evapotranspiracija in padavine za celotno arhivsko obdobje.
http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_etp/ (Pridobljeno 25. 3. 2016.)
- Bass, B., Baskaran, B., 2003. Evaluating Rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. CCAF impacts and adaptation progress report: 106 str.
- Beyerlein, D. 2009. Why single-event modelling doesn't work for LIDs. Clear Creek Solutions, Inc. (prezentacija).
<http://slideplayer.com/slide/8409673/#> (Pridobljeno 11. 3. 2016.)
- Bengtsson, L., Grahn, L., Olsson, J., 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrol*, 36 (3) 259–268.
- Berghage, R., Jarrett, A., Beattie, D., Kelley, K., Husain, S., Rezai, F., Negassi, A., Cameron, R., Hunt, W. 2007. Quantifying evaporation and transpiration water losses from green roof and green roof media capacity for neutralizing acid rain. U.S. EPA. WERF. 94 f.
- Berndtsson, J. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36: 351-360.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik, 1. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Carter, T. L., Rasmussen, T. C. 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 42, 5: 1261–1274.

Carter, T. L., Jackson, C. R. 2006. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape Urban Plan* 80: 84-94.

Connelly, M., Hodgson, M. 2013. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics* 74,10: 1136-1143.

doi:10.1016/j.apacoust.2013.04.003

DeNardo, J. C., Jarrett, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J., Berghage, R. D. 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Trans. ASAE* 48, 4: 1491-1496.

doi: 10.13031/2013.19181

Dunnett, N., Nagase, A., Booth, R., Grime, P. 2008. Influence of vegetation configuration on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* 11, 4: 385-398.

doi: 10.1007/s11252-008-0064-9

Finale, R. 2014. Zelene strehe: mesta z manjšim ogljičnim odtisom in izboljšano mikroklimo. Konferenca VIVUS – s področja kmetijstva, naravovarstva, hortikulture in floristike ter živilstva in prehrane. Prenos inovacij, znanja in izkušenj v vsakdanjo rabo. 538-544.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J., Steen Mikkelsen, P., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal* 12, 7: 525-542.

doi: 10.1080/1573062X.2014.916314

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). 2002. Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof Sites. Bonn. FLL publishing: 95 str.

www.fll.de (Pridobljeno 15.9. 2014.)

Garofalo, G., Palermo, S., Principato, F., Theodosiou, T., Piro, P. 2016. The Influence of Hydrologic Parameters on the Hydraulic Efficiency of an Extensive Green Roof in Mediterranean Area. *Water* 8, 2: 44.

doi:10.3390/w8020044

Getter, K., Rowe, D. B., Andresen, 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

GSA. 2011. The benefits and challenges of green roofs on public and commercial buildings. A report of the United States General Services Administration: 152 str.

http://www.gsa.gov/portal/mediald/158783/fileName/The_Benefits_and_Challenges_of_Green_Roofs_on_Public_and_Commercial_Buildings.action (Pridobljeno 12. 4. 2016.)

Hilten, R. N., Lawrence, T. M., Tollner, E. W. 2008. Modeling Stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of hydrology* 358: 288-293.

doi:10.1016/j.jhydrol.2008.06.010

Hong, T. H., Kim, J. M., Koo, C. W. 2012. LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy and Buildings* 45: 229-239.

doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.006

Hui, S. C. M., Chu, C. H. T. 2009. Green roofs for stormwater mitigation in Hong Kong. *Design for Sustainable Performance*.

<http://web.hku.hk/~cmhui/JS-2009.pdf> (Pridobljeno 15.2. 2015.)

Ilešič, A. 2010. Stroškovna analiza zelene strehe. Diplomna naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba A. Ilešič): 56 str.

Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M., Gusmao, F. 2001. Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. *Technology ressource management & development – Scientific contributions for sustainable development 2*: 151-162.
https://www.researchgate.net/publication/267256824_Urban_Water_Retention_by_Greened_Roofs_in_Temperate_and_Tropical_Climate (Pridobljeno 15. 2. 2016.)

Köhler, M. 2006. Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. *Urban habitats 4*, 1: 1-24.
http://www.urbanhabitats.org/v04n01/berlin_pdf.pdf (Pridobljeno 20. 2. 2016.)

Kompare, B. 1991. Modeliranje deževnega odtoka iz urbaniziranih povodij. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 509 str.

Kompare, B. 2002. Urbana odvodnja v funkciji zaščite voda. Prispevek na konferenci. str. 79-90.

Krishnan, R., Ahmad, H. 2012. Stormwater runoff mitigation on extensive green roof: a review on trends and factors. *South East Asian Technical Universities Consortium (SEATUC), OS No. 3*: 1-5.
http://www.academia.edu/2976777/stormwater_runoff_mitigation_on_extensive_green_roof_a_review_on_trends_and_factors (Pridobljeno 15.2. 2016.)

Krishnan, R., Ahmad, H. 2014. Influence of Low Growing Vegetation in Reducing Stormwater Runoff on Green Roofs. *International Journal of High-Rise Buildings 3*, 4: 1-6.
www.ctbuh-korea.org/ijhrb/index.php (Pridobljeno 15. 2. 2016.)

Kunič, R. 2008a. Vrste ozelenjenih streh in napotki projektantom. *Gradbenik 5*: 12-14.
<http://www.fragmat.si/download/clanki/Vrste%20ozelenjenih%20streh%20in%20napotki%20projektantom.pdf> (Pridobljeno 15. 9. 2015.)

Kunič, R. 2008b. Sestavni elementi ozelenjenih streh. *Gradbenik 6*: 42-44.
<http://www.fragmat.si/download/clanki/Sestavni%20elementi%20ozelenjenih%20streh.pdf> (Pridobljeno 15. 9. 2015.)

Kunič, R. 2008c. Ozelenjene strehe. Dobre izkušnje kot vzor pravilnega projektiranja. *Gradbenik 7-8*: 30-32.
<http://www.fragmat.si/download/clanki/Ozelenjene%20strehe%202.pdf> (Pridobljeno 15. 9. 2015.)

Kunič, 2012. Ozelenjene strehe – vrste, sestava in primeri dobre prakse (prezentacija)
<https://www.youtube.com/watch?v=vo9GDElpzdl> (Pridobljeno 15. 2. 2016.)

Maclvor, J.S., Lundholm, J. 2011. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering 37*: 407-417.
doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.10.004

Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., Clergeau, P. 2014. Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning 122*: 100–107.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012>

McGar, J. 2015. The new green roof is blue. *Engineering News* (13. jul. 2015).
<https://sourceable.net/new-green-roof-blue/> (Pridobljeno 10. 5. 2016.)

Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006. Green roofs as tool for solving rainwater runoff in the urbanized 21st century. *Landscape and Urban Planning* 77: 217-226.
doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.010

Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2003. Effect of orientation on the water balance of green roofs. *Greening rooftops for sustainable communities*. 1-9.
<http://www.agr.kuleuven.ac.be/lbh/lbnl/ecology/pdf-files/pdf-art/jeroen/procgreenroofs.pdf>
(Pridobljeno 14. 2. 2016.)

Mickovski, S. B., Buss, K., McKenzie, B. M., Sökmener, B. 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering* 61: 706-714.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015>

Mirt, B. 2012. Ozelenjene strehe.
http://www.energap.si/uploads/Zelene%20strehe_b__SL.pdf (Pridobljeno 10. 3. 2016.)

Musa, S., Arshad, N. A. M. A., Jalil, M. R., Kasmin, H., Ali, Z., Mansor, M. S. 2011. Potential of storm water capacity using vegetated roofs in Malaysia. *International Conference on Civil Engineering Practice*.
<https://core.ac.uk/download/files/434/12005644.pdf> (Pridobljeno 20. 2. 2016.)

Nagase, A., Dunnett, N. 2010. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning* 97, 4: 318-327.
doi:10.1016/j.landurbplan.2010.07.005

Nawaz, R., McDonald A., Postoyko, S. 2015. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering* 82: 66-80.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>

Panjan, J. 2002. *Osnove zdravstveno hidrotehnične infrastrukture*. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 289 str.

Panjan, J., Bogataj, M., Kompare, B. 2005. Statistična analiza gospodarsko enakovrednih nalivov = Statistical Analysis of the Equivalent Design Rainfall. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 51, 9: 600-611.
http://drugg.fgg.uni-lj.si/3785/1/SV-JME_51%282005%2909_600-611_Panjan.pdf
(Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Poë, S., Stovin, V., Berretta, C. 2015. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of hydrology* 523: 356-367.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.002>

Primc, B. 2011. Ravne naj bodo ozelenjene. *Delo in dom* (3. jul. 2011).
<http://www.deloindom.si/ravne-naj-bodo-ozelenjene> (Pridobljeno 29. 2. 2016.)

Roy, S., Quigley, M., Chuck, R. 2014. From Green to Blue: Making Roof Systems Sustainable in Urban Environments.
<http://www.roofingmagazine.com/green-blue-making-roof-systems-sustainable-urban-environments/> (Pridobljeno 10. 5. 2016.)

Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S., Tinsley, J. 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339-348. doi:10.1007/s11252-008-0069-4

Simonič, T., Dobrilovič, M. 2005. Vloga ozelenjevanja streh in fasad pri prenovi objektov. *Revija AR Arhitektura, raziskave*. 2: 44-49. <http://www.objemnarave.si/downloads/ar2005-2-ClanekRevijaAR.pdf>(Pridobljeno 5. 3. 2016.)

Stovin, V. 2010. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal* 24, 3: 192-199. doi: 10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x

Stovin, V., Poe, S., Berretta, C. 2013. A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management* 131: 206-215. doi:10.1016/j.jenvman.2013.09.026

Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414-415: 148-191. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022

Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., Berretta, C. 2015. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering* 85: 159-172. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.09.076

Takebayashi, H., Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42, 8: 2971-2979. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.017

Teemusk, A., Mander, Ü. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering* 30, 3: 271–277. doi:10.1016/j.ecoleng.2007.01.009

UN Habitat. 2013. State of the world's cities 2012/2013. <http://www.unhabitat.org> (Pridobljeno 11. 2. 2016.)

VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., Xiao, L. 2005. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality* 34: 1036–1044. doi:10.2134/jeq2004.0364

Versini, P. A., Jouve, P., Ramier, D., Berthier, E., De Gouvello, B. 2013. Hydrological impact of green roofs on urban runoff at the watershed scale – Case studies in the Hauts-de-Seine county (France). International conference Novatech, Planing & technologies for sustainable urban water management. France. <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/51384/2B44141VER.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Pridobljeno 19. 2. 2015.)

Vesuviano, G., M. 2014. A two-stage runoff detention model for a green roof. Doctoral Dissertation. University of Sheffield. Departmen of Civil and Structural Engineering: 292 f.

Vičar, Z. 2016. 5 minutni padavinski podatki za Celje, Rateče in Portorož, za zadnjih 30 let. Osebna komunikacija. (21. 3. 2016.)

Vijayaraghavan, K., Joshi, U. M. 2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution* 194: 121-129.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021>

Villarreal, E. L., Bengtsson, L. 2005. Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering* 25: 1-7.

doi:10.1016/j.ecoleng.2004.11.008

Voyde, E., Fassman, E., Simcock, R. 2010. Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology* 394, 3-4: 384-395.

doi:10.1016/j.jhydrol.2010.09.013

Wolf, D., Lundholm, J. 2008. Water uptake in green roof microcosms: effects of plants species and water availability. *Ecological Engineering* 33: 179-186.

https://www.researchgate.net/publication/223190519_Water_uptake_in_green_roof_microcosms_Effects_of_plant_species_and_water_availability (Pridobljeno 2. 3. 2016.)

Wong, G. K. L., Jim, C. Y. 2015. Identifying keystone meteorological factors of green-roof stormwater retention to inform design and planning. *Landscape and Urban Planning* 143: 173-182.

doi:10.1016/j.landurbplan.2015.07.001

Yang, J., Yu, Q., Gong, P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42, 31: 7266-7273.

doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003

Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., Sun, J., Liu, J. 2015. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning* 144: 142-150.

doi:10.1016/j.landurbplan.2015.08.017

OSTALI VIRI:

Bellingham Green Roofs. 2016.

<http://www.bellinghamgreenroofs.com/> (Pridobljeno 2. 3. 2016.)

Lešnik. 2016.

<http://user.spletnik.si/P002260112/zelene-strehe.html> 29.2.2016 (Pridobljeno 29. 2. 2016.)

MG zelene strehe. 2016.

www.zelenestrehe-mg.si (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Morrison, M., Vaterlaus, A. 2016. Green Builder magazine.

<http://www.greenbuildermedia.com/an-island-in-the-sky> (Pridobljeno 29. 2. 2016.)

Sustainable designs. 2016.

<http://sustainabledesigns.org/> (Pridobljeno 2. 3. 2016.)

Technical Preservation Services. 2016.

<https://www.nps.gov/tps/sustainability/new-technology/green-roofs/benefits.htm> (Pridobljeno 29. 2. 2016.)

The Vermont rain garden manual. 2013.

<http://www.uvm.edu:8889/~seagrant/communications/assets/VtRainGardenManual.pdf>

(Pridobljeno 25. 9. 2013.)

Urbanscape, 2014.

<http://www.knaufinsulation.si/sites/si.knaufinsulation.net/files/URBANSCAPE-PROSPEKT-Sistem-zelenih-streh.pdf> (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

Vegetalid. 2016.

<http://www.vegetalid.com/> (Pridobljeno 10. 5. 2016)

Xeroflor, 2016.

<http://www.zelenastreha.si/xeroflor-zelene-strehe/prospekti> (Pridobljeno 15. 3. 2016.)

SEZNAM PRILOG

Priloga A: POV RATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA CELJE

Priloga B: POV RATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA PORTOROŽ

Priloga C: POV RATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA RATEČE

Priloga D: OBRAČANJE VRSTIC 5-MINUTNIH PADAVINSKIH PODATKOV V STOLPCE

Priloga E: NADOMEŠČANJE MANJKAJOČIH PADAVINSKIH PODATKOV Z
VREDNOSTJO -33

Priloga F: RAČUNANJE ZA MODEL ZELENE STREHE

Priloga G: MODELIRANJE ZELENE STREHE

Priloga H: MODELIRANJE MODRO-ZELENE STREHE

Priloga I: PODATKI RAZVRŠČENI PO POSAMEZNIH LETIH

Priloga A: POVRATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA CELJE

Višina padavin [mm]

Trajanje padavin	Celje POVRATNA DOBA					
	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let
5 min	8	10	12	14	16	17
10 min	11	15	18	21	24	26
15 min	14	20	24	29	32	36
20 min	17	23	28	34	38	42
30 min	20	29	35	42	48	53
45 min	23	34	41	50	57	64
60 min	25	37	45	55	62	69
90 min	28	41	49	59	67	75
120 min	31	44	53	64	72	80
180 min	35	48	56	66	74	82
240 min	38	51	59	70	77	85
300 min	41	54	62	73	81	89
360 min	44	57	66	76	85	93
540 min	50	64	74	86	94	103
720 min	54	70	80	94	104	113
900 min	57	75	86	101	111	122
1080 min	60	79	91	107	118	130
1440 min	65	85	98	114	127	139

Vir: ARSO, 2016d.

Priloga B: POVRATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA PORTOROŽ

Višina padavin [mm]

Trajanje padavin	Portorož POVRATNA DOBA					
	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let
5 min	9	13	15	18	20	23
10 min	14	19	23	27	30	33
15 min	18	24	28	33	37	41
20 min	22	30	35	41	46	51
30 min	26	35	41	49	54	60
45 min	30	41	48	57	64	71
60 min	32	45	54	64	72	80
90 min	36	53	65	79	89	100
120 min	40	58	71	86	98	110
180 min	43	64	77	94	107	120
240 min	47	68	82	99	112	125
300 min	49	70	84	101	114	127
360 min	52	73	87	105	118	131
540 min	56	79	94	114	128	142
720 min	58	82	97	117	131	146
900 min	60	83	98	118	132	146
1080 min	63	86	101	121	136	150
1440 min	66	91	107	127	142	157

Vir: ARSO, 2016e.

Priloga C: POVRATNE DOBE ZA EKSTREMNE PADAVINE ZA RATEČE

Višina padavin [mm]

Trajanje padavin	Rateče POVRATNA DOBA					
	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let
5 min	6	8	9	10	11	13
10 min	9	12	14	16	18	20
15 min	12	16	18	22	24	27
20 min	14	18	21	25	28	31
30 min	17	22	26	30	34	37
45 min	20	27	31	37	41	46
60 min	22	31	37	44	50	55
90 min	26	38	46	57	64	72
120 min	29	43	52	64	72	81
180 min	36	52	62	75	85	94
240 min	41	59	71	86	97	108
300 min	46	67	80	97	109	122
360 min	51	73	88	107	121	135
540 min	61	85	101	121	136	151
720 min	70	96	114	137	154	170
900 min	75	104	123	147	164	182
1080 min	80	108	128	152	170	188
1440 min	87	116	135	160	178	196

Vir: ARSO, 2016f.

Priloga D: OBRAČANJE VRSTIC 5-MINUTNIH PADAVINSKIH PODATKOV V STOLPCE

```
<?php
```

```
$sriporoc = $mysqli->query("select * FROM 3reme order by id");
```

```
echo "  
leto;mesec;dan;ura;minuta;vrednost;  
</br>  
";
```

```
while($row = $srip->fetch_assoc()) {
```

```
$a05 = $row["ura_st"]+'5'/'24'/'60';  
$a10 = $row["ura_st"]+'10'/'24'/'60';  
$a15 = $row["ura_st"]+'15'/'24'/'60';  
$a20 = $row["ura_st"]+'20'/'24'/'60';  
$a25 = $row["ura_st"]+'25'/'24'/'60';  
$a30 = $row["ura_st"]+'30'/'24'/'60';  
$a35 = $row["ura_st"]+'35'/'24'/'60';  
$a40 = $row["ura_st"]+'40'/'24'/'60';  
$a45 = $row["ura_st"]+'45'/'24'/'60';  
$a50 = $row["ura_st"]+'50'/'24'/'60';  
$a55 = $row["ura_st"]+'55'/'24'/'60';
```

```
echo $row["ura_st"]. " ; ". $row["m1"]. " ; </br>";  
echo $a05. " ; ". $row["m2"]. " ; </br>";  
echo $a10. " ; ". $row["m3"]. " ; </br>";  
echo $a15. " ; ". $row["m4"]. " ; </br>";  
echo $a20. " ; ". $row["m5"]. " ; </br>";  
echo $a25. " ; ". $row["m6"]. " ; </br>";  
echo $a30. " ; ". $row["m7"]. " ; </br>";  
echo $a35. " ; ". $row["m8"]. " ; </br>";  
echo $a40. " ; ". $row["m9"]. " ; </br>";  
echo $a45. " ; ". $row["m10"]. " ; </br>";  
echo $a50. " ; ". $row["m11"]. " ; </br>";  
echo $a55. " ; ". $row["m12"]. " ; </br>";
```

```
}
```

```
mysql_close($povezi);
```

```
?>
```

**Priloga E: NADOMEŠČANJE MANJKAJOČIH PADAVINSKIH PODATKOV Z
VREDNOSTJO -33**

```
<?php

$pre = $mysqli->query("select * FROM vremeportoroz order by ura_st");

"ura;vredn;</br>";

while($row = $pre->fetch_assoc()) {
$a=$row["id"];
>"

    echo $row["ura_st"]. " ;". $row["m1"]. "/</br>"
;
    $x = 1;

while($x <= $row["preskok"]) {

    $preskok1 = $row["ura_st"]+$x*'0.041666666667';
    $preskok2 = $row["preskok"]-$x;

    echo $preskok1. " ;-33/</br>"
;

    $x++;
}
}
mysql_close($povezi);

?>
```


Priloga F: RAČUNANJE ZA MODEL ZELENE STREHE

Obdelava podatkov v Excelu:

B	D	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	Padavine	ET ₂	Streha	Odtok	Skupni odtok	Skupne padavin	Koeficient	1,670352	
																			Streha		35,1
12.3.1986 14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,1	40,5	41,2	
12.3.1986 15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,08862	0	40,5	41,2		
12.3.1986 16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,07723	0	40,5	41,2		
12.3.1986 17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,06583	0	40,5	41,2		
12.3.1986 18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,05443	0	40,5	41,2		
12.3.1986 19:00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,1	40,6	41,3	
12.3.1986 20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,08862	0	40,6	41,3		
12.3.1986 21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,1	40,7	41,4	
12.3.1986 22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,08862	0	40,7	41,4		
12.3.1986 23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,07723	0	40,7	41,4		
13.3.1986 0:00	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0,5	0,060484	33,1	0,5	41,2	41,9	
13.3.1986 1:00	2	1	1	2	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0,060484	33,1	1,5	42,2	42,9	
13.3.1986 2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	1,6	42,3	43	
13.3.1986 3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,08862	0	42,3	43		
13.3.1986 4:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,1	42,4	43,1	
13.3.1986 5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,2	42,5	43,2	
13.3.1986 6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,08862	0	42,5	43,2		
13.3.1986 7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,060484	33,07723	0	42,5	43,2		
13.3.1986 8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,1	42,6	43,3	
13.3.1986 9:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,1	0,060484	33,1	0,2	42,7	43,4	
13.3.1986 10:00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0,2	0,060484	33,1	0,4	42,9	43,6	
13.3.1986 11:00	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0,4	0,060484	33,1	0,8	43,3	44	
13.3.1986 12:00	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0,6	0,060484	33,1	1,4	43,9	44,6	
13.3.1986 13:00	1	0	3	3	2	1	1	1	0	0	2	3	1	1	1,7	0,060484	33,1	3,1	45,6	46,3	
13.3.1986 14:00	4	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1,8	0,060484	33,1	4,9	47,4	48,1	

Padavine

Ker so padavinski podatki podani v desetinah, smo vrednosti delili z deset, da smo dobili mm v 5 minutah.

$$= \text{SUM}(O1689:Z1689)/10$$

Priloga G: MODELIRANJE ZELENE STREHE

	D	E	F	G	J	K	L
1	Datum	Padavine	ET ₀	Zadrževanje strehe	Kumul. odtok na dogodek	Kumulativni odtok	Kumulativne padavine
17834	28.10.2009	0	1,1	11,949	0	42	901,1
17835	29.10.2009	0	0,9	10,446	0	42	901,1
17836	30.10.2009	0	1,7	7,607	0	42	901,1
17837	31.10.2009	0	0,8	6,271	0	42	901,1
17838	1.11.2009	0	0,8	4,935	0	42	901,1
17839	2.11.2009	0	0,4	4,267	0	42	901,1
17840	3.11.2009	29,1	0,3	32,866	0	42	930,2
17841	4.11.2009	6,1	0,3	33,1	0	42	936,3
17842	5.11.2009	10,5	0,6	33,1	0	42	946,8
17843	6.11.2009	1	0,4	33,1	0	42	947,8
17844	7.11.2009	11,1	0,6	33,1	0	42	958,9
17845	8.11.2009	0	0,4	32,432	0	42	958,9
17846	9.11.2009	12,4	0,5	33,1	0	42	971,3
17847	10.11.2009	0	0,5	32,265	0	42	971,3
17848	11.11.2009	0,4	0,7	31,496	0	42	971,7
17849	12.11.2009	0	0,5	30,661	0	42	971,7
17850	13.11.2009	0	1,1	28,824	0	42	971,7
17851	14.11.2009	0	0,9	27,321	0	42	971,7
17852	15.11.2009	0	0,8	25,985	0	42	971,7
17853	16.11.2009	0	1,4	23,647	0	42	971,7
17854	17.11.2009	0	1,7	20,808	0	42	971,7
17855	18.11.2009	0	1,2	18,804	0	42	971,7

Zadrževanje zelene strehe:

=MIN(\$R\$1;MAX(0;E17834+G17833-IF(G17833<13;F17834*\$T\$1/\$V\$1;F17834*\$T\$1)))

Kumulativni odtok za padavinski dogodek:

=IF(E17834>0;J17833+I17834;0)

Kumulativni letni odtok z začetkom 1.1.:

=IF(AND(DAY(D17834)=1;MONTH(D17834)=1);0;I17834+K17833)

Kumulativne letne padavine z začetkom 1.1.:

=IF(AND(DAY(D17834)=1;MONTH(D17834)=1);0;L17833+E17834)

Priloga H: MODELIRANJE MODRO-ZELENE STREHE

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Datum	Padavine	ET ₀	Zadrževanje vegetac. sloja	Zadrževanje zbiralnika	Trenutni odtok	Kumul. odtok na dogodek	Kumulativni odtok	Kumulativne padavine
17834	28.10.2009	0	1,1	11,949	0	0	0	42	901,1
17835	29.10.2009	0	0,9	10,446	0	0	0	42	901,1
17836	30.10.2009	0	1,7	7,607	0	0	0	42	901,1
17837	31.10.2009	0	0,8	6,271	0	0	0	42	901,1
17838	1.11.2009	0	0,8	4,935	0	0	0	42	901,1
17839	2.11.2009	0	0,4	4,267	0	0	0	42	901,1
17840	3.11.2009	29,1	0,3	32,866	27,3	0	0	42	930,2
17841	4.11.2009	6,1	0,3	33,1	31,6	0	0	42	936,3
17842	5.11.2009	10,5	0,6	33,1	38,5	0	0	42	946,8
17843	6.11.2009	1	0,4	33,1	37,1	0	0	42	947,8
17844	7.11.2009	11,1	0,6	33,1	44,6	0	0	42	958,9
17845	8.11.2009	0	0,4	32,432	42,2	0	0	42	958,9
17846	9.11.2009	12,4	0,5	33,1	51,6	0	0	42	971,3
17847	10.11.2009	0	0,5	32,265	48,6	0	0	42	971,3
17848	11.11.2009	0,4	0,7	31,496	44,8	0	0	42	971,7
17849	12.11.2009	0	0,5	30,661	41,8	0	0	42	971,7
17850	13.11.2009	0	1,1	28,824	35,2	0	0	42	971,7
17851	14.11.2009	0	0,9	27,321	29,8	0	0	42	971,7
17852	15.11.2009	0	0,8	25,985	25	0	0	42	971,7
17853	16.11.2009	0	1,4	23,647	16,6	0	0	42	971,7
17854	17.11.2009	0	1,7	20,808	6,4	0	0	42	971,7
17855	18.11.2009	0	1,2	18,804	0	0	0	42	971,7

Zadrževanje vegetacijskega sloja s substratom:

$$=MIN(\$R\$1;MAX(0;E17834+G17833-F17834*\$T\$1))$$

Zadrževanje zbiralnika vode:

$$=MIN(\$V\$1;MAX(0;E17834+H17833-F17834*\$X\$1))$$

Trenutni odtok iz zadrževalnika vode:

$$=MIN(\$V\$1;MAX(0;E17828+H17827-F17828*\$X\$1))$$

Kumulativni odtok za posamezni padavinski dogodek:

$$=IF(E17834>0;J17833+I17834;0)$$

Kumulativni letni odtok z začetkom 1.1.:

=IF(AND(DAY(D17834)=1;MONTH(D17834)=1);0;I17834+K17833)

Kumulativne letne padavine z začetkom 1.1.:

=IF(AND(DAY(D17834)=1;MONTH(D17834)=1);0;L17833+E17834)

Priloga I: PODATKI RAZVRŠČENI PO POSAMEZNIH LETIH

	A	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HR	HS	HT	HU
1		2013	2013	2013	2013	2014	2014	2014	2014	2015	2015	2015	2015	Povprečje	Povprečje	Povprečje	Povprečje
2		Padavine	Streha	Kumulativni odtok	Kumulativne padavine	Padavine	Streha	Maksimalni odtok	Padavine	Padavine	Streha	Kumulativni odtok	Kumulativne padavine	padavin	Streha	kumulativnega odtoka	kumulativnih padavin
347	11.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	3,717857	0	434,3737321	1058,84643
348	12.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	2,367857	0	436,0856429	1061,21429
349	13.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	2,319643	0	437,961875	1063,53393
350	14.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	1,596429	0	439,4265	1065,13036
351	15.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	1,882143	0	440,5660893	1067,0125
352	16.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1394,5	0	0	467,085	1032,4	1,6	0	441,6389821	1068,6125
353	17.12.	0	0	522,635	1114,1	9,2	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	2,778571	0	443,7878393	1071,39107
354	18.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	2,1625	0	445,3607321	1073,55357
355	19.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	2,967857	0	447,7840357	1076,52143
356	20.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	4,383929	0	451,4347679	1080,90536
357	21.12.	0	0	522,635	1114,1	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	2,1375	0	453,1434107	1083,04286
358	22.12.	0,1	0	522,635	1114,2	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	2,930357	0	455,4125714	1085,97321
359	23.12.	0	0	522,635	1114,2	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	1,664286	0	456,752625	1087,6375
360	24.12.	0	0	522,635	1114,2	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	1,373214	0	457,77875	1089,01071
361	25.12.	1	0	522,635	1115,2	0	0	751,179	1403,7	0	0	467,085	1032,4	1,6625	0	459,2816607	1090,67321
362	26.12.	7,3	0	522,635	1122,5	3,2	0	751,179	1406,9	0	0	467,085	1032,4	1,821429	0	460,6273929	1092,49464
363	27.12.	20,8	0	522,635	1143,3	0	0	751,179	1406,9	0	0	467,085	1032,4	3,219643	0	462,76925	1095,71429
364	28.12.	0,1	0	522,635	1143,4	26	0	770,04	1432,9	0	0	467,085	1032,4	2,957143	0	465,0257679	1098,67143
365	29.12.	0	0	522,635	1143,4	2,6	0	772,64	1435,5	0	0	467,085	1032,4	2,110714	0	466,8801429	1100,78214
366	30.12.	18,2	0	536,133	1161,6	0	0	772,64	1435,5	0	0	467,085	1032,4	2,823214	0	469,1020357	1103,60536
367	31.12.	0,9	0	537,033	1162,5	0	0	772,64	1435,5	0	0	467,085	1032,4	2,103571	0	471,0086607	1105,70893
368					46,20%				53,82%				45,24%				42,60%

Povprečje streha:

=AVERAGE(HO367;HK367;HG367;HC367;GY367;GU367;GQ367;GM367;GI367;GE367;GA367;FW367;FS367;FO367;FK367;FG367;FC367;EY367;EU367;EQ367;EM367;EI367;EE367;EA367;DW367;DS367;DO367;DK367;DG367;DC367;CY367;CU367;CQ367;CM367;CI367;CE367;CA367;BW367;BS367;BO367;BK367;BG367;BC367;AY367;AU367;AQ367;AM367;AI367;AE367;AA367;W367;S367;O367;K367;G367;C367)

Povprečje kumulativnega odtoka:

=AVERAGE(HP356;HL356;HH356;HD356;GZ356;GV356;GR356;GN356;GJ356;GF356;GB356;FX356;FT356;FP356;FL356;FH356;FD356;EZ356;EV356;ER356;EN356;EJ356;EF356;EB356;DX356;DT356;DP356;DL356;DH356;DD356;CZ356;CV356;CR356;CN356;CJ356;CF356;CB356;BX356;BT356;BP356;BL356;BH356;BD356;AZ356;AV356;AR356;AN356;AJ356;AF356;AB356;X356;T356;P356;L356;H356;D356)

Povprečje kumulativnih padavin:

=AVERAGE(HQ356;HM356;HI356;HE356;HA356;GW356;GS356;GO356;GK356;GG356;GC356;FY356;FU356;FQ356;FM356;FI356;FE356;FA356;EW356;ES356;EO356;EK356;EG356;EC356;DY356;DU356;DQ356;DM356;DI356;DE356;DA356;CW356;CS356;CO356;CK356;CG356;CC356;BY356;BU356;BQ356;BM356;BI356;BE356;BA356;AW356;AS356;AO356;AK356;AG356;AC356;Y356;U356;Q356;M356;I356;E356)

Minimalni odtok:

=MIN(BF368;HU368)

Minimalni letni odtok:

=INDEX(IB348:IB402;MATCH(HW353;IA348:IA402;0))

Maksimalni odtok:

=MAX(BF368:HU368)

Maksimalni letni odtok:

=INDEX(IB348:IB402;MATCH(HX353;IA348:IA402;0))