

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
VARSTVO OKOLJA

Kandidatka:

KATARINA ZABRET

**VPLIV METEOROLOŠKIH IN VEGETACIJSKIH
PARAMETROV NA PRESTREZANJE PADAVIN**

Doktorska disertacija

**INFLUENCE OF METEOROLOGICAL AND
VEGETATION PARAMETERS ON RAINFALL
INTERCEPTION**

Doctoral thesis

Ljubljana, 20. junij 2018

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Mentorica: izr. prof. dr. Mojca Šraj, UL FGG

Somentor: prof. dr. Jože Rakovec, UL FMF

Poročevalci za oceno doktorske disertacije:

prof. dr. Mitja Brilly, UL FGG

prof. dr. Lučka Kajfež Bogataj, UL BF

prof. dr. Franc Batič, UL BF

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: 556.04:551.578.1:582.091(497.451.1)(043)
Avtorica: Katarina Zabret
Mentorica: izr. prof. dr. Mojca Šraj
Sommentor: prof. dr. Jože Rakovec
Naslov: Vpliv meteoroloških in vegetacijskih parametrov na prestrezanje padavin
Tip dokumenta: Doktorska disertacija
Obseg in oprema: 139 str., 74 sl., 42 pregl., 14 en., 5 pril. (35 str.)
Ključne besede: prestrežene padavine, prepuščene padavine, odtok po deblu, navadna breza, *Betula pendula* Roth., črni bor, *Pinus nigra* Arnold, mikrostruktura padavin

Ob stiku z vegetacijo se padavine razdelijo na prestrežene padavine, ki tal nikoli ne dosežejo, saj takoj po padavinskem dogodku izhlapijo nazaj v ozračje, ter na prepuščene padavine in odtok po deblu, ki tla dosežejo na različne načine. Kakšni so deleži posameznih komponent procesa prestrezanja padavin, je odvisno od meteoroloških spremenljivk, ki opisujejo lastnosti padavinskega dogodka, in od vegetacijskih spremenljivk, ki podajajo lastnosti dreves. Poznavanje in razumevanje vplivov teh spremenljivk je pomembno pri ovrednotenju procesa prestrezanja padavin in njegovega vpliva na ostale naravne procese, kot so površinski odtok, erozivnost padavin, erozija tal, vpliv na višino podtalnice in premeščanje hranil v tleh. Prepuščene padavine in odtok po deblu smo merili v manjšem parku v Ljubljani med 1. januarjem 2014 in 30. junijem 2017 pod navadno brezo (*Betula pendula* Roth.) in črnim borom (*Pinus nigra* Arnold). V tem obdobju smo spremljali tudi meteorološke in vegetacijske spremenljivke.

V prvem delu disertacije smo predstavili proces prestrezanja padavin, opisali, kako se prepuščene padavine spreminjajo v prostoru in kako prestrezanje padavin vpliva na zmanjševanje površinskega odтока. Podrobno smo opisali meteorološke in vegetacijske spremenljivke, ter navedli, kako so bile že vključene v analize procesa prestrezanja padavin v drugih raziskavah. Predstavili smo raziskovalno ploskev, na kateri smo izvajali meritve in opisali uporabljene merske metode ter metode za analizo podatkov.

V drugem delu disertacije smo prikazali rezultate meritev padavin na prostem, prepuščenih padavin in odтока po deblu, izračunane vrednosti prestreženih padavin ter izmerjene vrednosti meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk. Ovrednotili smo tudi vpliv opazovanih dreves na zmanjšanje površinskega odтока v urbanem okolju. Vpliv spremenljivk na proces prestrezanja padavin smo analizirali za prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod drevesnimi krošnjami, za časovno spremenljivost prepuščenih padavin tekom razvoja dogodka in za povprečne vrednosti spremenljivk glede na dogodke.

Ugotovili smo, da so vplivi meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk med seboj tesno povezani. Glede na fenofaze sta bili najbolj vplivni meteorološki spremenljivki količina padavin v obdobju vegetacije in intenziteta padavin v obdobju mirovanja, kar je povezano tudi z indeksom listne površine, skladiščno zmogljivostjo krošnje in skorje ter z razporeditvijo vej. Zaradi tega se je vzorec prostorske porazdelitve prepuščenih padavin pod brezo spremenil v omenjenih fenofazah. Pomemben vpliv pa je imela tudi mikrostruktura padavin; pojav večjih in hitrejših dežnih kapljic je povečal prepuščanje padavin pri boru, v primeru obeh dreves pa je vplival na začetek prepuščanja padavin.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.04:551.578.1:582.091(497.451.1)(043)
Author: Katarina Zabret
Supervisor: Assoc. Prof. Mojca Šraj, PhD
Co-advisor: Prof. Jože Rakovec, PhD
Title: Influence of meteorological and vegetation parameters on rainfall interception
Document type: Doctoral dissertation
Notes: 139 p., 74 fig., 42 tab., 14 eq., 5 ann. (35 p.)
Key words: Rainfall interception, throughfall, stemflow, common silver birch, *Betula pendula* Roth., Austrian pine, *Pinus nigra* Arnold, drop size distribution (DSD)

The rainfall falling above the vegetation is divided into intercepted rainfall not reaching the ground and into throughfall and stemflow reaching the ground in different ways. The share of each rainfall interception component depends on meteorological variables describing properties of rainfall events and vegetation variables giving the properties of the tree. Knowing and understanding the influences of those variables is important for estimation of the rainfall interception process and its influence on other natural processes such as surface runoff reduction, increase of rainfall erosivity, reduction of soil erosion, enrichment of ground water, and nutrient cycle. Throughfall and stemflow were measured in a small park in Ljubljana between 1 January 2014 and 30 June 2017 under the common silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold) trees. In the same period meteorological and vegetation variables were also measured.

In the first part of this dissertation, we described the process of rainfall interception, the changes of throughfall across space and time, and the influence of rainfall interception on surface runoff reduction. Meteorological and vegetation variables were presented in detail and their consideration in other studies was stated. The study plot where the measurements were taken was also described, and the measurement and data analysis techniques were presented.

In the second part of the dissertation, the results of precipitation in the open, throughfall and stemflow were presented, the estimated values of rainfall interception were given, and the measured values of meteorological and vegetation variables were listed. We also estimated the influence of the trees on surface runoff reduction in the urban area. The influence of the variables on the components of rainfall interception was analysed for spatial distribution of throughfall under the canopies, for temporal variability of throughfall with the development of the event, and for the average values of the variables per events.

We have shown that meteorological and vegetation influences interact closely. According to phenoseasons, the most influential meteorological variables were the amount of precipitation in the vegetation period and the rainfall intensity in the dormant period. This depends also on the leaf area index, canopy storage capacity, water bark storage capacity, and branch position. These variables also induced the changes in the spatial pattern of throughfall under the birch tree's canopy in the phenoseasons. Additionally, the rainfall microstructure also significantly affected rainfall partitioning. Larger and faster raindrops initially increased throughfall in the case of the pine tree, and induced the start of throughfall under both tree species.

ZAHVALA

Doktorska disertacije ne obsega le pisanja, ki pravzaprav predstavlja le majhen delček večletnega dela. To med drugim obsega še obsežen pregled literature, spremljanje raziskovalnega dela in napredka na znanstvenem področju, načrtovanje in izvedbo meritev, pobiranje podatkov, njihovo obdelavo in analizo. Pri vsaki stopnji, ki je bila potrebna za nastanek predstavljene disertacije, mi je pomagal marsikdo, za kar bi se vam rada iskreno zahvalila.

Najlepša hvala mentorici, izr. prof. dr. Mojci Šraj. To vlogo je prevzela po spletu zame srečnih naključij, saj mi je to prineslo raziskavo res zanimive teme in možnost meritev na raziskovalni ploskvi, ki je bila prijetna za delo. Poleg tega mi je bila vedno v pomoč; pri iskanju smisla v množici podatkov, pri usmerjanju nadaljevanja raziskave, pri pripravi člankov za objavo in pri pisanju disertacije.

Zahvaljujem se tudi prof. dr. Jožetu Rakovcu, ki je prevzel vlogo somentorja. Poleg uvodnega tečaja o nastanku padavin in njihovih lastnostih, mi je preko zanimivih debat ponudil kar nekaj kosti za glodanje, ki so svoj doprinos pokazale tudi v objavljenih člankih in v disertaciji.

K doktorskemu študiju me je spodbudil prof. dr. Mitja Brilly, prof. dr. Matjaž Mikoš pa mi je z mestom mlade raziskovalke omogočil nadaljevanje študija (ki ga je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS) in pisanje disertacije. Oba sta s svojim širokim znanjem in bogatimi izkušnjami prispevala k razvoju mojega dela in bolj kvalitetnim rezultatom. Hvala tudi ostalima članoma komisije, prof. dr. Francu Batiču in prof. dr. Lučki Kajfež Bogataj za komentarje in predlagane popravke.

Osnova za moje delo je vsekakor obsežna zbirka izmerjenih vrednosti, ki je ne bi imela, če mi pri postavljanju merilnikov, njihovem vzdrževanju in pobiranju podatkov ne bi pomagali tudi drugi. Hvala Rajko za redno pokošeno travo, vse zabite žeblice in ves silikon na drevesu. Hvala Matej za vse popravljene loggerje in posodobitve na disdrometru. Hvala Nejc za pomoč pri pripravi raziskovalne ploskve, pri vzpostavitvi meritev in pri pobiranju podatkov. Hvala Klaudija in Mateja za pobiranje podatkov in čiščenje korit v času moje odsotnosti.

Velika hvala pa še vsem domačim, preprosto za to, ker ste. Navsezadnje pa še ... Rok, ki je večino časa moje delo cenil veliko bolj kot sem ga sama in se je z mojim doktoratom rad pohvalil še preden se je sploh začel pisati. V obdobju intenzivnega pisanja pa je poskrbel, da sem lahko brez skrbi zgodaj odhajala in pozno prihajala ter se v celoti posvetila delu. Vsekakor pa sta mi na koncu največji zagon dala moja dva srčka, brez katerih bi sicer imela več časa in energije za delo, vendar me pri tem ne bi gnala takšna motivacija.

*Ko hodiš, pojdi zmeraj do konca ...
A če ne prideš ne prvič ne drugič
do krova in pravega kova,
poskusi vnovič in zopet in znova.*

T. Pavček

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	II
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	IX
LIST OF TABLES	XI
LIST OF FIGURES	XIII
KAZALO PRILOG	XVI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XVII
1 UVOD	1
1.1 Opis problematike in relevantnost problema	2
1.2 Hipoteze	2
1.3 Cilji	3
2 PREGLED LITERATURE	4
2.1 Proces prestrežanja padavin	4
2.2 Vplivne spremenljivke	5
2.2.1 Meteorološke spremenljivke	5
2.2.2 Vegetacijske spremenljivke	8
2.3 Prostorska porazdelitev prepuščenih padavin	13
2.4 Zmanjšanje površinskega odtoka	13
3 METODE DELA	15
3.1 Opis raziskovalne ploskve	15
3.1.1 Primer zasaditve parkirišča	17
3.2 Merska oprema in merske metode	18
3.2.1 Meritve padavin (P)	18
3.2.2 Meritve prepuščenih padavin (TF)	21
3.2.3 Meritve odtoka po deblu (SF)	22
3.2.4 Ostale meteorološke spremenljivke	23
3.2.5 Določanje vegetacijskih spremenljivk	23
3.3 Metode za analizo podatkov	31
3.3.1 Metoda določanja zmanjšanja površinskega odtoka	31
3.3.2 Regresijska analiza	32
3.3.3 Večdimenzionalni prikaz podatkov	33
3.3.4 Hierarhično razvrščanje	34
3.3.5 Regresijska drevesa (RT)	36

3.3.6	Posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT).....	37
3.3.7	Metoda glavnih komponent (PCA)	38
3.3.8	Multipla korespondenčna analiza (MCA).....	39
4	REZULTATI MERITEV	41
4.1	Padavine, prepuščene padavine, odtok po deblu in prestrežene padavine	41
4.1.1	Padavine na prostem	41
4.1.2	Prepuščene padavine	44
4.1.3	Odtok po deblu	48
4.1.4	Prestrežene padavine	51
4.1.5	Prestrežanje snega	54
4.1.6	Zmanjšanje površinskega odтока	56
4.2	Meteorološke spremenljivke.....	58
4.2.1	Mikrostruktura padavin.....	58
4.3	Vegetacijske spremenljivke.....	61
4.3.1	LAI	61
4.3.2	Skladiščna zmogljivost krošnje	65
4.3.3	Ostale vegetacijske spremenljivke	66
5	ANALIZA IN RAZPRAVA	70
5.1	Prestrežene in prepuščene padavine ter odtok po deblu.....	70
5.2	Prostorska porazdelitev prepuščenih padavin	73
5.2.1	Razprava	79
5.3	Mikrostruktura padavin.....	82
5.3.1	Razprava	91
5.4	Vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na delitev padavin	93
5.4.1	Regresijska drevesa (RT)	94
5.4.2	Posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT).....	97
5.4.3	Metoda glavnih komponent (PCA)	102
5.4.4	Multipla korespondenčna analiza (MCA).....	104
5.4.5	Medsebojni vpliv izbranih meteoroloških spremenljivk	107
5.4.6	Razprava in pregled rezultatov	109
5.5	Potrditev hipotez	112
6	ZAKLJUČKI	114
7	POVZETEK.....	116
8	SUMMARY	118
VIRI		120

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki o razredih hitrosti in velikosti dežnih kapljic, izmerjenih z disdrometrom OTT Parsivel (OTT Hydromet, 2016)	20
Preglednica 2: Vrednosti korekcijskih koeficientov (F), predlagane za bor v drugih študijah	26
Preglednica 3: Meteorološke in vegetacijske spremenljivke, uporabljene v analizah	31
Preglednica 4: Lastnosti padavinskih dogodkov posameznih let (povprečje $\pm$ standardna deviacija)	41
Preglednica 5: Pregled izmerjenih prepuščenih padavin (TF) drugih raziskovalcev	47
Preglednica 6: Pregled izmerjenega odtoka po deblu (SF) drugih raziskovalcev	50
Preglednica 7: Pregled izmerjenega prestrežanja padavin (I) drugih raziskovalcev	52
Preglednica 8: Komponente prestrežanja za pet izbranih dogodkov s snežnimi padavinami	54
Preglednica 9: Zmanjšanje površinskega odtoka, o katerem so poročali drugi raziskovalci	56
Preglednica 10: Stroški izgradnje klasičnega parkirišča in parkirišča z zasaditvijo	57
Preglednica 11: Prednosti zasaditve dreves na parkirišču	58
Preglednica 12: Določanje površine svežih listov iz skeniranih slik	61
Preglednica 13: Podatki o sušenju in masi suhega listja	62
Preglednica 14: Vrednosti LAI določene za brezo in bor s strani drugih raziskovalcev	64
Preglednica 15: Skladiščna zmogljivost krošenj (S) po posameznih fenofazah	66
Preglednica 16: Zastrtost s krošnjo [%] nad točkovnimi merilniki TF	66
Preglednica 17: Določeni datumi začetka in konca definiranih fenofaz	67
Preglednica 18: Projicirana površina drevesne krošnje	68
Preglednica 19: Višina dreves	68
Preglednica 20: Prsni premer debla	68
Preglednica 21: Naklon glavnih vej pri navadni brezi in črnem boru	68
Preglednica 22: Določanje skladiščne zmogljivosti lubja navadne breze in črnega bora	69
Preglednica 23: Povprečne vrednosti komponent delitve padavin za dogodke po posameznih fenofazah ($\pm$ standardna deviacija)	70
Preglednica 24: Koeficienti korelacije (R) za komponente delitve padavin in padavine na prostem	71
Preglednica 25: Pregled vrednosti koeficienta korelacije (R) med TF in padavinami iz drugih primerljivih študij	71
Preglednica 26: Podatki o spremenljivkah izbranih 180 dogodkov (povprečje $\pm$ standardna deviacija)	73
Preglednica 27: Povprečne meteorološke spremenljivke dogodkov, združenih v razrede glede na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod navadno brezo (povprečje $\pm$ standardna deviacija)	78
Preglednica 28: Povprečne meteorološke spremenljivke dogodkov, združenih v razrede glede na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod črnim borom (povprečje $\pm$ standardna deviacija)	78
Preglednica 29: Meteorološke spremenljivke in delež TF izbranih padavinskih dogodkov	82
Preglednica 30: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 13. 6. 2014	83
Preglednica 31: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 3. 7. 2014	85
Preglednica 32: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 26. 6. 2016	86
Preglednica 33: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 21. 8. 2016	88

Preglednica 34: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 22. 5. 2017	90
Preglednica 35: Spremenljivke z največjim vplivom glede na rezultate regresijskih dreves (RT)	94
Preglednica 36: Uteži posameznih meteoroloških spremenljivk za tri glavne komponente z največjo varianco; s krepkim tiskom so označene največje uteži spremenljivk za vsako komponento	102
Preglednica 37: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za I navadne breze in črnega bora	103
Preglednica 38: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za TF pod navadno brezo in črnim borom	104
Preglednica 39: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za SF pri navadni brezi in črnem boru	104
Preglednica 40: Meje vrednosti in kratice spremenljivk, uporabljene v MCA	105
Preglednica 41: Najbolj vplivne spremenljivke po RT in BRT metodah z upoštevanjem nove spremenljivke Št/Kp	108
Preglednica 42: Najbolj vplivne spremenljivke po RT in BRT metodah z upoštevanjem deficita vlažnosti (Dv)	109

KAZALO SLIK

Slika 1: Hidrološki krog s komponentami procesa prestrezanja padavin (označene z rdečo) .	5
Slika 2: Povprečne mesečne vsote padavin za dolgoletni povprečji na postaji Ljubljana Bežigrad	16
Slika 3: Raziskovalna ploskev	16
Slika 4: Lokacija parkirišča Dolgi most	17
Slika 5: Shema parkirišča in načrt zasaditve dreves	18
Slika 6: Shematični prikaz postavitve različnih merilnikov na raziskovalni ploskvi	18
Slika 7: Avtomatski dežemer »na prostem«	19
Slika 8: Disdrometer na strehi	20
Slika 9: Koriti in lijakasti merilniki za merjenje TF pod brezo	21
Slika 10: Postavitev lijakastih točkovnih merilnikov TF v letu 2016	21
Slika 11: Gumijasta polcevka za zbiranje odtoka po deblu breze	22
Slika 12: Primer obdelave slike za določanje površine svežega listja	23
Slika 13: Zaboječek za zbiranje odpadlega listja pod brezo	24
Slika 14: Meritve LAI z optičnim senzorjem LAI-2200c pod brezo	25
Slika 15: Primer korekcije meritev LAI za črni bor v programu FV2200	25
Slika 16: Primer grafa za določitev S po grafični metodi Leytona	26
Slika 17: Originalna in obdelana fotografija za določitev zastrtosti s krošnjo za črni bor	27
Slika 18: Določitev površine krošnje navadne breze 2 (levo) in črnega bora 2 (desno) v programu AutoCad	28
Slika 19: Določitev višine dreves in letve na fotografijah	28
Slika 20: Meritve obsega debla breze 1 na višini 1,3 m od tal	29
Slika 21: Določanje kotov med deblom drevesa in glavnimi vejami za navadno brezo 2 (levo) in črni bor 1 (desno)	29
Slika 22: Jemanje vzorcev skorje črnega bora za določitev njegove debeline	30
Slika 23: Tehtanje in priprava vzorcev skorje na sušenje	30
Slika 24: Primer kart jakosti za prostorsko porazdelitev TF pod drevesi	34
Slika 25: Primer dendrograma hierarhičnega razvrščanja slik prostorske porazdelitve TF pod brezo v programu Orange z izbranimi 4 skupinami	35
Slika 26: Primer regresijskega drevesa za analizo vplivov meteoroloških spremenljivk na TF pod črnim borom v obdobju vegetacije	36
Slika 27: Mesečne padavine 30-letnega povprečja in posameznih let obravnavanega obdobja	42
Slika 28: Odvisnost padavin, izmerjenih z dežemerom od padavin, izmerjenih z disdrometrom	42
Slika 29: Odvisnost padavin, izmerjenih z dežemerom na raziskovalni ploskvi (Hajdrihova) od padavin, izmerjenih na meteorološki postaji Bežigrad (ARSO)	43
Slika 30: Odvisnost padavin na raziskovalni ploskvi, izmerjenih z dežemerom "na prostem" od padavin, izmerjenih z dežemerom "ob stavbi"	43
Slika 31: Odvisnost padavin na prostem in prepuščenih padavin (TF) pod drevesnima vrstama	44
Slika 32: Delež TF pod navadno brezo in črnim borom za posamezno fenofazo	45
Slika 33: TF izmerjen z avtomatskimi koriti glede na meritve z ročnimi koriti	45
Slika 34: TF izmerjen z lijakastimi merilniki glede na TF izmerjen z ročnimi koriti	46
Slika 35: TF izmerjen z lijakastimi merilniki glede na TF izmerjen z avtomatskimi koriti	46
Slika 36: SF pri navadni brezi in črnem boru po posameznih fenofazah	49
Slika 37: Odvisnost padavin na prostem in odtoka po deblu (SF) pod drevesnima vrstama	49
Slika 38: I navadne breze in črnega bora po posameznih fenofazah	52
Slika 39: Prestrezanje snega na raziskovalni ploskvi	54
Slika 40: Primerjava grafov časovnega razvoja padavin in prepuščenih padavin (TF) za dogodek z dežjem (zgoraj) in dogodek s kombinacijo snega in dežja (spodaj)	55
Slika 41: Premer in hitrost dežnih kapljic po posameznih fenofazah	59
Slika 42: Spreminjanje premerov in hitrosti dežnih kapljic tekom razvoja dogodka	60

Slika 43: Vrednosti LAI, izmerjene z optičnim senzorjem LAI2200c	63
Slika 44: Primer določitve S navadne breze v obdobju mirovanja	65
Slika 45: Slikovni prikaz zastrtosti s krošnjo nad točkovnimi merilniki TF	66
Slika 46: Fenofaze navadne breze v letu 2017.....	67
Slika 47: Površina skorje navadne breze (levo) in črnega bora (desno)	69
Slika 48: Odvisnost med TF in količino padavin na prostem (P)	72
Slika 49: Koeficient variacije prepuščenih padavin (CV TF) glede na količino padavin na prostem (P) za posamezen dogodek.....	74
Slika 50: Okviri z ročaji TF glede na količino padavin na prostem (P); rdeča črtkana črta označuje TF enak 100 % padavin na prostem	74
Slika 51: Regresijsko drevo vpliva oddaljenosti od debla in zastrtosti s krošnjo na prostorsko spremenljivost TF pod navadno brezo	75
Slika 52: Regresijsko drevo vpliva oddaljenosti od debla in zastrtosti s krošnjo na prostorsko spremenljivost TF pod črnim borom	76
Slika 53: Prostorska porazdelitev TF v posameznih fenofazah.....	77
Slika 54: Hemisferična fotografija nad merilno točko 1	80
Slika 55: Padavine in TF pod črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 13. 6. 2014.....	84
Slika 56: Padavine in TF pod črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 3. 7. 2014.....	85
Slika 57: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 26. 6. 2016.....	87
Slika 58: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 21. 8. 2016.....	89
Slika 59: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 22. 5. 2017.....	91
Slika 60: Primer regresijskega drevesa prestreženih padavin navadne breze v obdobju mirovanja	95
Slika 61: Primer regresijskega drevesa TF črnega bora v obdobju vegetacije	96
Slika 62: Primer regresijskega drevesa SF navadne breze v obdobju vegetacije	97
Slika 63: RI meteoroloških spremenljivk na I (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI).....	98
Slika 64: Primer grafa delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na prestrezanje padavin navadne breze v obdobju mirovanja glede na BRT	98
Slika 65: RI meteoroloških spremenljivk na TF (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI) ..	99
Slika 66: Primeri grafov delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na TF navadne breze in črnega bora v obdobju celega leta glede na BRT	100
Slika 67: RI meteoroloških spremenljivk na SF (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI) ..	101
Slika 68: Primer grafa delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na SF navadne breze v obdobju vegetacije glede na BRT	101
Slika 69: Delež variance posameznih glavnih komponent – plaziščni diagram.....	102
Slika 70: Rezultati MCA za I za vsa obdobja	106
Slika 71: Rezultati MCA za TF za vsa obdobja.....	106
Slika 72: Rezultati MCA za SF za vsa obdobja	107
Slika 73: 3D graf vpliva količine padavin in števila dežnih kapljic na prepuščanje padavin (TF)	108
Slika 74: 3D graf vpliva vlažnosti in temperature zraka na prepuščanje padavin (TF)	109

LIST OF TABLES

<i>Table 1: The raindrops size and velocity classes measured by the OTT Parsivel disdrometer</i>	20
<i>Table 2: The values of the correction coefficient (F) proposed for pine tree in other studies</i>	26
<i>Table 3: Meteorological and vegetation variables used in the analysis</i>	31
<i>Table 4: Properties of the rainfall events by measurement year (average $\pm$ standard deviation)</i>	41
<i>Table 5: Review of the measured TF values from other researchers</i>	47
<i>Table 6: Review of the measured SF values from other researchers</i>	50
<i>Table 7: Review of the measured I values from other researchers</i>	52
<i>Table 8: Rainfall partitioning for the five selected events with snow precipitation</i>	54
<i>Table 9: Review of the surface runoff reduction values observed by other researchers</i>	56
<i>Table 10: Costs of building a conventional parking lot and a parking lot with trees</i>	57
<i>Table 11: The benefits of planting trees at a parking lot</i>	58
<i>Table 12: Determination of the fresh leaves area from the scanned figures</i>	61
<i>Table 13: Information on leaves drying and of the dry leaves mass</i>	62
<i>Table 14: Review of LAI values for birch and pine trees determined by other researchers</i>	64
<i>Table 15: Canopy storage capacity (S) according to phenoseasons</i>	66
<i>Table 16: Canopy coverage above the funnel type TF gauges</i>	66
<i>Table 17: The start and end dates of the defined phenoseasons</i>	67
<i>Table 18: Projected canopy area</i>	68
<i>Table 19: Tree height</i>	68
<i>Table 20: Diameter at breast height</i>	68
<i>Table 21: Main branch inclination for common silver birch and Austrian pine trees</i>	68
<i>Table 22: Determination of the bark storage capacity for common silver birch and Austrian pine trees</i>	69
<i>Table 23: The average values of rainfall partitioning components for events per phenoseasons ($\pm$ standard deviation)</i>	70
<i>Table 24: Correlation coefficient (R) for each rainfall partitioning component and rainfall in the open</i>	71
<i>Table 25: Review of the correlation coefficient (R) between TF and rainfall calculated in other similar studies</i>	71
<i>Table 26: Values of the variables for the selected 180 events (average $\pm$ standard deviation)</i>	73
<i>Table 27: Average values of meteorological variables for events, grouped in classes with hierarchical clustering according to the TF spatial distribution under the common silver birch tree (average $\pm$ standard deviation)</i>	78
<i>Table 28: Average values of meteorological variables for events, grouped in classes with hierarchical clustering according to the TF spatial distribution under the Austrian pine tree (average $\pm$ standard deviation)</i>	78
<i>Table 29: Meteorological variables and values of TF for selected rainfall events</i>	82
<i>Table 30: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under the Austrian pine tree in a 5-minute time step for 13 June 2014 event</i>	83
<i>Table 31: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under the Austrian pine tree in a 5-minute time step for 3 July 2014 event</i>	85
<i>Table 32: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under Austrian pine and common silver birch trees in a 5-minute time step for 26 June 2016 event</i>	86
<i>Table 33: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under common silver birch and Austrian pine trees in a 5-minute time step for 21 August 2016 event</i>	88
<i>Table 34: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under Austrian pine and common silver birch trees in a 5-minute time step for 22 May 2017 event</i>	90
<i>Table 35: Most influential variables according to the RT results</i>	94

<i>Table 36: Principal component loadings of the meteorological variables for the three selected principal components; the strongest variable loadings for each component are marked in bold</i>	102
<i>Table 37: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for I by common silver birch and Austrian pine trees</i>	103
<i>Table 38: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for TF under common silver birch and Austrian pine trees</i>	104
<i>Table 39: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for SF by common silver birch and Austrian pine trees</i>	104
<i>Table 40: The variables' threshold values and their acronyms used with MCA</i>	105
<i>Table 41: The most influential variables according to RT and BRT taking into account the new variable Št/Kp</i>	108
<i>Table 42: The most influential variables according to RT and BRT taking into account the humidity deficit (Dv)</i>	109

LIST OF FIGURES

Figure 1: Hydrological cycle with components of rainfall interception (in red)	5
Figure 2: Average monthly precipitation sums for two long-term averages at the Ljubljana Bežigrad meteorological station	16
Figure 3: Study plot.....	16
Figure 4: The location of the Dolgi most parking lot	17
Figure 5: The parking lot outline and the design of the potential tree planting	18
Figure 6: Schematic of the location of the different measurement devices at the study plot ..	18
Figure 7: Rain gauge tipping bucket "in the open"	19
Figure 8: The disdrometer at the rooftop	20
Figure 9: Through and funnel type TF gauges under the birch trees	21
Figure 10: The location of the funnel type TF gauges during 2016.....	21
Figure 11: The rubber collar for SF collection under the birch tree	22
Figure 12: An example of image processing for estimation of the fresh leaf area	23
Figure 13: The box for collecting the litter under the birch trees	24
Figure 14: The measurements of LAI with optical sensor LAI-2200c under the birch tree	25
Figure 15: An example of LAI measurement corrections for Austrian pine tree in FV2200 software	25
Figure 16: An example of S determination according to Leyton's graphical method	26
Figure 17: Original and processed photograph for canopy coverage determination in the case of Austrian pine tree	27
Figure 18: Canopy area determination for common silver birch 2 (left) and Austrian pine 2 (right) trees in AutoCad software	28
Figure 19: Determination of the tree and lath height from the photographs	28
Figure 20: Measurements of tree trunk circumference for birch 1 at the height of 1.3 m	29
Figure 21: Determination of the angles between the tree trunk and the main branches for common silver birch 2 (left) and Austrian pine 1 (right)	29
Figure 22: Sampling the Austrian pine tree bark for determination of its thickness	30
Figure 23: Weighing of the bark samples and preparation for drying.....	30
Figure 24: Example of heatmaps of TF spatial distribution under the trees	34
Figure 25: Example of the dendrogram of the hierarchical clustering with four classes of the images presenting TF spatial distribution under the birch tree using Orange software	35
Figure 26: An example of the regression tree for analysis of the influences of the meteorological variables on TF under Austrian pine tree in vegetation period.....	36
Figure 27: 30-year average monthly rainfall and by separate years analysed	42
Figure 28: Rainfall measured with rain gauge as a function of rainfall measured with the disdrometer.....	42
Figure 29: Rainfall measured at the study plot (Hajdrihova) as a function of rainfall measured at Bežigrad station	43
Figure 30: Rainfall measured at the study plot with rainfall gauge in the open as a function of rainfall measured at the study plot with rainfall gauge near the building	43
Figure 31: Rainfall measured in the open as the function of throughfall measured under the tree species	44
Figure 32: Measured TF under common silver birch and Austrian pine trees according to the phenoseasons	45
Figure 33: TF measured with automatic through gauge as a function of TF measured with through gauge with manual collection	45
Figure 34: TF measured with funnel type gauges as a function of TF measured with through gauges with manual data collection	46
Figure 35: TF measured with funnel type gauges as a function of TF measured with automatic through gauges.....	46
Figure 36: SF for common silver birch and Austrian pine trees by phenoseasons.....	49
Figure 37: Rainfall measured in the open as the function of stemflow measured under the tree species	49

Figure 38: <i>I</i> for common silver birch and Austrian pine trees according to the phenoseasons	52
Figure 39: Snow interception at the study plot.....	54
Figure 40: An example of graphs of precipitation and throughfall (TF) development for event with rainfall (upper figure) and mixed rainfall-snow event (lower figure)	55
Figure 41: Drop diameter and velocity according to phenoseasons	59
Figure 42: Changes of drop diameter and velocity at the rainfall event level	60
Figure 43: Values of LAI, measured with optical sensor LAI2200c	63
Figure 44: An example of the estimation of <i>S</i> for common silver birch tree in the dormant period	65
Figure 45: Graphical presentation of canopy coverage above the funnel type TF gauges....	66
Figure 46: Phenoseasons of common silver birch tree during 2017	67
Figure 47: Bark surface of common silver birch (left) and Austrian pine (right) trees	69
Figure 48: TF as a function of rainfall in the open (<i>P</i>).....	72
Figure 49: Event point throughfall coefficient of variation (CV TF) according to the event's amount of rainfall (<i>P</i>).....	74
Figure 50: Box and whisker plots of TF as an amount of rainfall in the open (<i>P</i>); the red line indicates TF equal to 100% of rainfall in the open	74
Figure 51: Regression tree indicating the influence of distance from the stem and canopy coverage on TF spatial variability under the common silver birch tree.....	75
Figure 52: Regression tree indicating the influence of distance from the stem and canopy coverage on TF spatial variability under the Austrian pine tree	76
Figure 53: Spatial distribution of TF according to phenoseasons	77
Figure 54: Hemispheric photography above measurement point 1.....	80
Figure 55: Rainfall and TF under the Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in 1-minute time step for 13 June 2014 event	84
Figure 56: Rainfall and TF under the Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 3 July 2014 event.....	85
Figure 57: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine trees in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 26 June 2016 event	87
Figure 58: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine trees in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 21 August 2016 event.....	89
Figure 59: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 22 May 2017 event	91
Figure 60: An example of the regression tree for rainfall interception by the common silver birch tree in the dormant period	95
Figure 61: An example of the regression tree for TF under the Austrian pine tree in the vegetation period	96
Figure 62: An example of the regression tree for SF under the common silver birch tree in the vegetation period	97
Figure 63: RI of meteorological variables for <i>I</i> (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion)	98
Figure 64: An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on interception loss for common silver birch in the dormant period according to the BRT	98
Figure 65: RI of meteorological variables for TF (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion).....	99
Figure 66: An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on TF for common silver birch and Austrian pine trees for the whole year according to the BRT.....	100

Figure 67: <i>RI of meteorological variables for SF (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion) ...</i>	101
Figure 68: <i>An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on SF for the common silver birch tree for the vegetation period according to the BRT</i>	101
Figure 69: <i>Scree plot for the principal components</i>	102
Figure 70: <i>Results of the MCA for I throughout the year</i>	106
Figure 71: <i>Results of the MCA for TF throughout the year</i>	106
Figure 72: <i>Results of the MCA for SF throughout the year</i>	107
Figure 73: <i>3D plot of influence of rainfall amount and drop number on throughfall (TF)</i>	108
Figure 74: <i>3D plot of influence of air temperature and humidity on throughfall (TF)</i>	109

KAZALO PRILOG

Priloga A: Grafi za določitev skladiščne zmogljivosti krošenj	141
Priloga B: Karte jakosti vseh obravnavanih dogodkov	144
Priloga C: Regresijska drevesa odvisnosti komponent prestrazanja padavin od meteoroloških spremenljivk	148
Priloga D: Grafi delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk glede na BRT	158
Priloga E: Rezultati analize MCA	166

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

BRT	Ojačana posplošena regresijska drevesa (ang. <i>generalized boosted regression trees</i>)
CV	Koeficient variacije (ang. <i>coefficient of variation</i>)
DBH	Prsni premer debla (ang. <i>trunk diameter at breast height</i>)
Dk	Povprečen premer dežnih kapljic dogodka [mm]
DN	Čas pojava dogodka – dan oziroma noč
DSD	Porazdelitev velikosti dežnih kapljic (ang. <i>drop size distribution</i>)
F	Korekcijski koeficient za vrednosti LAI bora, izmerjene z optičnim senzorjem
f	Povprečna vlažnost zraka dogodka [%]
I	Prestrežene padavine (ang. <i>intercepted rainfall</i>)
Ip	Intenziteta padavin dogodka [mm/h]
Kp	Količina padavin dogodka [mm]
LAI	Indeks listne površine (ang. <i>leaf area index</i>)
MCA	Multipla korespondenčna analiza (ang. <i>multiple correspondence analysis</i>)
MRA	Multipla regresijska analiza (ang. <i>multiple regression analysis</i>)
MVD	Mediana volumskega premera (ang. <i>median volume diameter</i>)
P	Padavine na prostem [mm]
PAI	Indeks površine rastline (ang. <i>plant area index</i>)
PC	Glavna komponenta (ang. <i>principal component</i>)
PCA	Metoda glavnih komponent (ang. <i>principal component analysis</i>)
PDP	Graf delne odvisnosti (ang. <i>partail dependence plot</i>)
R	Pearsonov koeficient korelacije
R ²	Koeficient determinacije
RI	Relativni vpliv (ang. <i>relative influence</i>)
RT	Regresijsko drevo (ang. <i>regression tree</i>)
SF	Odtok po deblu (ang. <i>stemflow</i>)
SLA	Specifična površina listja (ang. <i>specific leaf area</i>)
SO	Dolžina suhega obdobja med dvema dogodkoma [h]
Št	Število dežnih kapljic na dogodek
T	Povprečna temperatura dogodka [°C]
TF	Prepuščene padavine (ang. <i>throughfall</i>)
Tp	Trajanje padavin dogodka [h]
VAI	Indeks površine vegetacije (ang. <i>vegetation area index</i>)
Vh	Povprečna hitrost vetra dogodka [m/s]
Vk	Povprečna hitrost dežnih kapljic dogodka [m/s]
Vs	Povprečna smer vetra dogodka

1 UVOD

Pomemben proces hidrološkega kroga je prestrezanje padavin, na katerega v naravnem okolju vpliva predvsem vegetacija. Padavine, ki padejo nad z vegetacijo poraščenimi tlemi, se delijo na prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu. Tiste padavine, ki se zadržijo na vejah in listju ter postopoma izhlapijo v ozračje in tako nikoli ne dosežejo tal, imenujemo prestrežene padavine. Prepuščene padavine lahko dosežejo tla tako, da padejo neposredno skozi vrzeli med vejami in listjem, da prikapljajo do tal kasneje iz zasičene krošnje ali pa jih dosežejo kot škropljenje v krošnji zadržanih padavin zaradi tresljajev, ki jih povzročata veter in padavine (Brandt, 1989; Dunkerley, 2000; Bassette in Bussiere, 2008; Levia in sod., 2017). Odtok po deblu pa opisuje padavine, ki so najprej zadržane v drevesni krošnji, po tem pa zaradi zasičenosti krošnje pritečejo po vejah in deblu do tal.

S prestrezanjem padavin se zmanjšuje količina padavin, ki doseže tla pod vegetacijo, spreminjata pa se tudi čas in način, na katerega padavine dosežejo tla. To vpliva še na številne druge naravne procese, v povezavi s katerimi raziskovalci spremljajo ta pojav. V gozdovih prestrezanje padavin zmanjšuje odtok (Kittredge, 1948; Swank, 1968; Šraj in sod., 2008a; Zehe in sod., 2010; Wang in sod., 2012), povečuje infiltracijo (Mishra in sod., 2002), uravnava evapotranspiracijo rastlin (Cosandey in sod., 2003; Coenders-Gerrits in sod., 2014), vpliva na kroženje hranil in na njihovo dostopnost (Prescott, 2002; Carnol in Bazgir, 2013). Vpliva tudi na razporeditev vode v tleh, ki je večja v točkah, kjer tla doseže večja količina prepuščenih padavin (Eschner, 1976; Joffre in Rambal, 1993). Gozdovi omogočajo tudi zadrževanje in shranjevanje večjih količin vode zaradi razrastlega in gostega koreninskega sistema in manjše evapotranspiracije iz tal v gozdu, zato predstavljajo pomemben vir vode v sušnih mesecih (Bruijnzeel, 2000; Cosandey in sod., 2003; Jackson in sod., 2005; Vose in sod., 2011). Odtok po deblu pa predstavlja neposreden točkovni vnos padavin v podtalnico z minimalnimi izgubami, kar je še posebej pomembno v sušnem podnebju (Levia in Frost, 2003; Swaffer in sod., 2014). Prestrezanje padavin vpliva tudi na erozijo tal, ki jo lahko zmanjšuje zaradi manjše količine padavin, ki dosežejo tla (Cao in sod., 2008), tiste kapljice, ki kapljajo s krošnje, pa jo delno povečujejo (Vis, 1986; Nanko in sod., 2006; Geißler in sod., 2012). Vloga dreves postaja čedalje bolj prepoznana tudi v urbanih območjih, kjer s prestrezanjem padavin vplivajo na ohranjanje vode, zaščito pred poplavami, upravljanje s padavinskim odtokom in njegovo zmanjševanje ter zmanjševanje stroškov obdelave padavinske vode (Dwyer in sod., 1992; McPherson in sod., 1997; Xiao in sod., 1998; McPherson in sod., 2005; Yang in sod., 2015).

Tudi v Sloveniji se je že nekaj raziskovalcev ukvarjalo s procesom prestrezanja padavin. Meritve so večinoma potekale v gozdovih, saj je velik del države pokrit z njimi. Od leta 2004 pod okriljem Gozdarskega inštituta Slovenije na osmih raziskovalnih ploskvah po državi poteka monitoring padavin na prostem, prepuščenih padavin in odtoka po deblu (Vilhar in sod., 2017). Za raziskovalno ploskev na Pohorju sta Vilhar in Simončič (2013) ovrednotila vpliv vrste gozda na prepuščanje padavin pri ekstremnih dogodkih, Vilhar (2016) je spremljala, kako spremembe v mešanosti drevesnih vrst vplivajo na delež prepuščenih padavin in odtoka po deblu, Vilhar in sodelavci (2015) pa so primerjali vpliv prestrezanja padavin na odtoke z dveh gozdnatih porečij. Žlindra in sodelavci (2011) so za 10 raziskovalnih ploskev v gozdovih po celi Sloveniji analizirali kakovost padavin na prostem in prepuščenih padavin. Za raziskovalne ploskve Snežna jama, Rajhenavski Rog in Rog Žaga je Vilhar (2010) ovrednotila padavinski režim v vrzelih in sestojih dinarskih gozdov. Na porečju Dragonje so Šraj in sodelavci (2008a) spremljali razlike v deležu prestreženih padavin med severno in južno usmerjenima raziskovalnima ploskvama listnatega gozda, rezultate meritev pa so analizirali z različnimi metodami (Štravs in sod., 2005; Petan in sod., 2008; Šraj in sod., 2011). Meritve prestrezanja padavin v urbanih območjih Slovenije pa so redkejše. V mešanem urbanem gozdu na območju Tivolija in Rožnika ter v peri-urbanem gozdu ob Savi sta jih spremljala Kermavner in Vilhar (2017), Šraj in sodelavci (2008b) so analizirali prestrezanje padavin posameznih dreves v urbanem okolju Ljubljane, Vilhar in sodelavci (2010) pa so upoštevali vpliv prestrezanja padavin gozdov na kakovost pitne vode v Ljubljani.

Na deleže prestreženih in prepuščenih padavin ter odtoka po deblu vplivajo meteorološke in vegetacijske spremenljivke (Crockford in Richardson, 2000). Meteorološke spremenljivke podajajo lastnosti padavinskega dogodka (Gash, 1979; Van Stan in sod., 2014; Zabret in sod., 2018), vegetacijske spremenljivke pa opisujejo značilnosti vegetacije, ki padavine prestreza (Roberts, 2000; Zabret, 2013). Za prestrezanje padavin v gozdovih se je izkazalo, da samo podatki o vrsti gozda in lastnostih dreves ne morejo podati zadovoljive ocene deleža prestreženih padavin, saj so ti pogojeni tudi z značilnostmi podnebja na določenem območju (Crockford in Richardson, 2000). Zato je pomembno, da pri analizi prestrežanja padavin upoštevamo obe skupini spremenljivk.

1.1 Opis problematike in relevantnost problema

Meritve in analize prestrežanja padavin so se začele v gozdovih (Hoppe, 1896; Horton, 1919), kjer je ta proces zaradi velikega števila dreves najbolj izrazit, prve meritve v urbanem okolju pa so bile izvedene 90 let kasneje (Sanders, 1986). Čeprav postajajo drevesa v urbanem okolju kot del zelene infrastrukture čedalje bolj vključena v raziskave, so te še vedno pogostejše v gozdovih. Rezultati meritev v gozdovih pa ne morejo biti neposredno uporabljeni tudi v urbanih območjih (Guevara-Escobar in sod., 2007; Asadian in Weiler, 2009; Sjöman in Gill, 2014). Drevesa v mestih ne rastejo v tako velikih in strnjenih skupinah kot v gozdovih, prekrivanje njihovih krošenj med seboj je manjše, drevesa pa imajo tudi več prostora in drugačne razmere za rast, zato so njihove vegetacijske lastnosti drugačne. Tudi meteorološke razmere v mestu se od tistih v gozdovih razlikujejo, predvsem zaradi toplotnih otokov in vetrovnih koridorjev (Guevara-Escobar in sod., 2007; Asadian in Weiler, 2009). Poleg tega pa so se raziskave procesa prestrežanja padavin v mestih začele dokaj pozno, ko so bili na voljo že bolj zmogljivi računalniki in so se že začeli razvijati prvi modeli prestrežanja padavin (Rutter in sod., 1971; Morgan, 1985). Posledično je bil sam proces in njegov vpliv na površinski odtok v mestih velikokrat samo modeliran, rezultatov meritev pa je na voljo manj. Če modeli ne temeljijo na dobrih in dovolj številčnih podatkih, njihovi rezultati niso zanesljivi (Armson in sod., 2013). Zato je pomembno, da meritve prepuščenih padavin in odtoka po deblu izvajamo tudi v urbanem okolju (Xiao in sod., 2000; Inkiläinen in sod., 2013; Kermavnar in Vilhar, 2017).

Posamezne raziskave prestrežanja padavin, ne glede na to, ali potekajo v gozdovih ali mestih, vključujejo različne drevesne vrste v različnih podnebnih pasovih. Vsaka nova raziskava, ki upošteva redko ali pogosto vključeno drevesno vrsto in ki se izvaja na novi ali že raziskani lokaciji, upošteva drugačno kombinacijo vplivnih spremenljivk. To pa predstavlja doprinos k celostnemu razumevanju procesa (Van Stan in sod., 2016). Poleg tega pa razvoj sodobne merilne opreme omogoča tudi bolj natančne meritve in spremljanje novih spremenljivk. Tako lahko na primer z disdrometrom spremljamo tudi mikrostrukturo padavin. Poleg osnovnih lastnosti padavinskega dogodka, ki so pogosto vključene v analize, pa je mikrostruktura padavin v študijah prestrežanja še vedno pogosto prezrta. To predstavlja dokaj veliko pomanjkljivost, saj so številni procesi v naravi, kot na primer erozivnost tal (Petan in sod., 2010), pa tudi prestrezanje padavin (Uijlenhoet in Sempere Torres, 2006), s tem tesno povezani. Z mikrostrukturo prepuščenih padavin se je že ukvarjalo nekaj raziskovalcev, ki so spremljali spremembe v lastnostih prepuščenih kapljic in njihov vpliv na erozijo (Levia in sod., 2017), medtem ko vpliv mikrostrukture padavin na prostem na komponente prestrežanja padavin še ni bil ovrednoten.

1.2 Hipoteze

Na podlagi opisane problematike smo postavili naslednje hipoteze:

Hipoteza 1: Lastnosti padavinskega dogodka, kot so vrsta padavin (dež, sneg, led), trajanje in intenziteta, število, velikostna porazdelitev in hitrost hidrometeorjev, vplivajo na količino prestreženih padavin.

Hipoteza 2: Delež prestreženih padavin je odvisen od vegetacijskih parametrov, katerih vpliv je pomemben pri obravnavi različnih drevesnih vrst (listavcev in iglavcev), zanemariti pa jih ne smemo niti za posamezna drevesa iste vrste.

Hipoteza 3: Drevesa v urbanem okolju lahko zakasnjijo površinski odtok in znatno zmanjšajo njegovo količino.

1.3 Cilji

V doktorski disertaciji smo se osredotočili na vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na proces prestrezanja padavin. V okviru meteoroloških spremenljivk bomo v analize vključili tudi mikrostrukturo padavin (hitrost, velikost in število dežnih kapljic), za katero bomo skušali ovrednotiti njen vpliv na prestrezanje in prepuščanje padavin ter na odtok po deblu. Ker se mikrostruktura padavin lahko spreminja v kratkih časovnih intervalih nekaj minut, se bomo poleg obravnave povprečnih vrednosti hitrosti in velikosti kapljic za vse dogodke osredotočili tudi na spremembe lastnosti kapljic tekom razvoja posameznega dogodka. Tako je prvi cilj disertacije v analize meteoroloških vplivov vključiti tudi mikrostrukturo padavin na prostem, kar do sedaj v raziskavah procesa prestrezanja padavin še ni bilo upoštevano.

Pri analizah vpliva vegetacijskih spremenljivk na komponente prestrezanja padavin se običajno upošteva veliko število dreves, za katera se natančno določi različne lastnosti, ali pa se vegetacijske spremenljivke obravnava posplošeno za različne vrste dreves ne glede na velikost vzorca (npr. listavci in iglavci, vrsta z gladko in vrsta z grobo skorjo). V disertaciji pa bomo skušali oba pristopa združiti, tako da bomo za majhen vzorec izrazilo različnih drevesnih vrst točno določili več lastnosti. Glede na to je drugi cilj disertacije ovrednotiti vpliv vegetacijskih spremenljivk z upoštevanjem majhnega vzorca dreves, kar bo mogoče zaradi različnih vrst dreves in točnega ovrednotenja njihovih lastnosti.

Če so vrednosti meteoroloških spremenljivk drugačne za vsak obravnavan dogodek, pa se vrednosti vegetacijskih spremenljivk razlikujejo glede na opazovano drevo. Te se spreminjajo v veliko daljšem časovnem intervalu kot traja en dogodek, na primer glede na fenofaze ali s staranjem drevesa. Kljub različnim časovnim skalam podatkov meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk, pa bomo njihov vpliv poskušali analizirati sočasno. Tako je tretji cilj disertacije analizirati medsebojni vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na komponente prestrezanja padavin.

Poleg časovne spremenljivosti vplivnih spremenljivk in komponent prestrezanja padavin bomo upoštevali tudi njihovo prostorsko spremenljivost. Ugotavljali bomo, katere spremenljivke vplivajo na razporeditev prepuščenih padavin pod krošnjo in na kakšen način. Ker pa se drevesa nahajajo v urbanem okolju, nas bo v okviru dobljenih rezultatov zanimal tudi njihov vpliv na okolje, v katerem rastejo. Tako bomo poskusili ovrednotiti vpliv dreves na zmanjšanje površinskega odtoka, kar je ena izmed najpogostejše izpostavljenih prednosti dreves v urbanem okolju. Za analize vplivov spremenljivk na komponente prestrezanja padavin bomo uporabili več različnih statističnih metod, ki so že bile uporabljene v ta namen. Njihove rezultate bomo med seboj primerjali ter ugotavljali, ali so te do sedaj že uporabljene metode ustrezne, enako praktične in učinkovite. Rezultate meritev in analiz bomo primerjali z ugotovitvami drugih raziskovalcev in ugotovitve disertacije tako umestili v širši okvir.

2 PREGLED LITERATURE

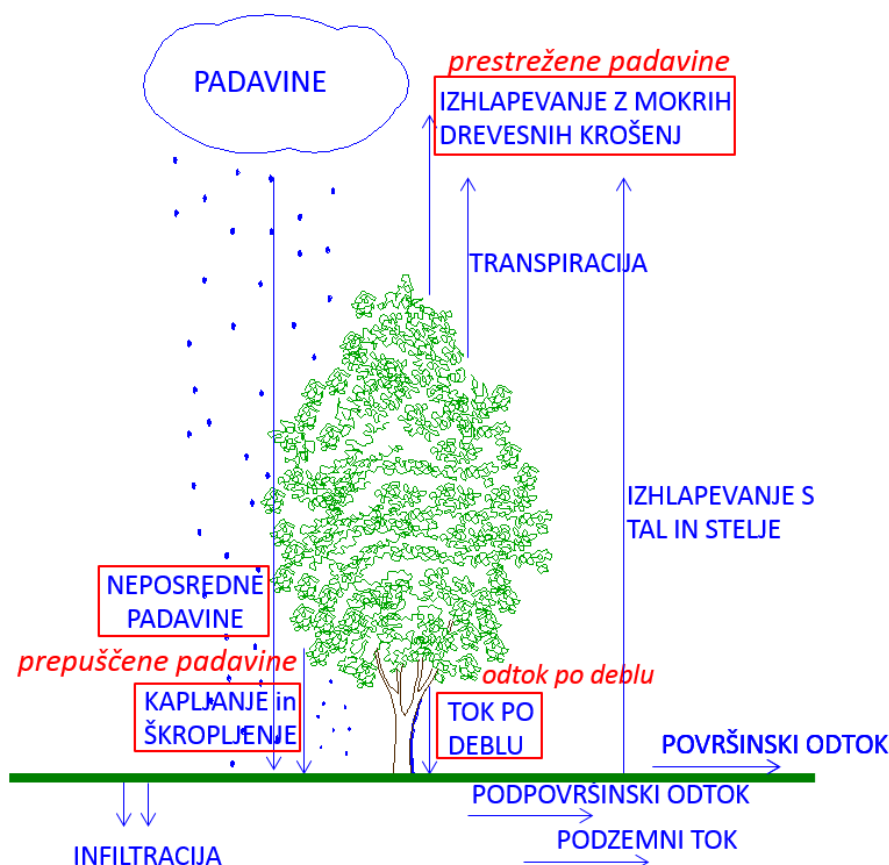
Drevesa so pomemben element v našem okolju, tako v gozdovih in nasadih, kot tudi v urbanih gozdovih in parkih. Ne glede na njihovo lokacijo s procesom prestrezanja padavin pomembno vplivajo na ekološki in hidrološki krog (Šraj in sod., 2008a; Carlyle-Moses in Gash, 2011; Van Stan in sod., 2014).

Prve meritve prepuščenih padavin segajo v 19. stoletje, ko je Hoppe (1896) meril padavine pod drevesno krošnjo. Ene izmed prvih študij so naredili tudi Horton (1919), ki je skušal razložiti vplive nekaterih vegetacijskih in meteoroloških spremenljivk na prestrezanje padavin, Chapman (1948), ki je raziskoval spremembe v porazdelitvi kapljic prepuščenih padavin in njihov vpliv na erozijo, Stout in McMahon (1961), ki sta se ukvarjala z vplivom oddaljenosti in smeri od drevesnega debla na variabilnost prepuščenih padavin, Ford in Deans (1978) pa sta spremljala vpliv strukture krošnje smreke (*Picea sitchensis*) na odtok po deblu, prepuščene in prestrežene padavine. Zanimanje med raziskovalci za proces prestrezanja padavin in njegov vpliv na hidrološki krog, površinski odtok, podtalnico, krog hranil in erozijo tal (Gomez in sod., 2002) narašča iz leta v leto; leta 2000 je bilo objavljenih 28 člankov s ključnima besedama prestrezanje in prepuščanje padavin, v letu 2016 pa jih je bilo že 61 (ScienceDirect, 2018). Proces prerazporeditve padavin zaradi vpliva vegetacije so preučevali številni raziskovalci za različne tipe vegetacije, od poljščin (npr. Parkin in Codling, 1990; Jackson, 2000; Frasson in Krajewski, 2011; Bäse in sod., 2012; Ma in sod., 2015; Fernandes in sod., 2017; Zheng in sod., 2018) in grmovja (npr. Martinez-Meza in sod., 1996; Garcia-Estringana in sod., 2010; Wang in sod., 2012; Zhang in sod., 2015; Zhang in sod., 2017), do najpogostejše obravnavanih dreves, ki rastejo v gozdovih in nasadih (npr. Iroume in Huber, 2002; Dietz in sod., 2006; Šraj in sod., 2008a; Muzylo in sod., 2012; Perez-Suarez in sod., 2014; Sun in sod., 2017) ali kot izolirana drevesa (npr. Xiao in sod., 2000; Gomez in sod., 2002; Guevara-Escobar in sod., 2007; Šraj in sod., 2008b; Livesley in sod., 2014; Zabret in sod., 2015).

2.1 Proces prestrezanja padavin

Prestrezanje padavin je proces, do katerega pride, ko padavine padajo nad tlemi, poraslimi z vegetacijo. Različne vrste vegetacije padavine prestrezajo na različne načine, v disertaciji pa se bomo osredotočili na drevesa. Ko padavine (P) padejo na drevesno krošnjo, jih nekaj pade direktno na tla skozi vrzeli v krošnji (prepuščene padavine, ang. *throughfall*, TF), preostanek pa se zdrži na njej. Te zadržane padavine nato lahko dosežejo tla s kapljanjem z vej in listja (prepuščene padavine, TF) ali s stekanjem po vejah in deblu (odtok po deblu, ang. *stemflow*, SF), lahko pa ostanejo na drevesni krošnji, postopoma izhlapijo v ozračje in nikoli ne dosežejo tal (prestrežene padavine, ang. *interception loss*, I) (slika 1).

Prepuščene padavine lahko razdelimo na tri komponente: neposredne prepuščene padavine, kapljanje in škropljenje (npr. Brandt, 1989; Dunkerley, 2000; Nanko in sod., 2006; Bussiere, 2008). Neposredne prepuščene padavine padejo neposredno skozi vrzeli v drevesni krošnji, nimajo nobenega stika z listi in vejami ter ohranijo porazdelitev velikosti dežnih kapljic padavin na prostem (Brandt, 1989). Kapljanje opisuje dežne kapljice, ki so najprej zadržane v drevesni krošnji, kasneje pa pričnejo kapljati na tla predvsem zaradi zasičenosti drevesne krošnje, ki ne zmore več shranjevati padavin. Pri škropljenju pa v krošnji zadržane padavine tla dosežejo zaradi delovanja zunanjih vplivov kot sta veter in padavine, ki stresajo krošnjo (Levia in sod., 2017). Premeri kapljic škropljenja so po navadi manjši od 1,5 mm, medtem ko imajo tiste, ki tla dosežejo s kapljanjem, večje premere (Nanko in sod., 2006; Nanko in sod., 2016).



Slika 1: Hidrološki krog s komponentami procesa prestrežanja padavin (označene z rdečo)
Figure 1: Hydrological cycle with components of rainfall interception (in red)

Količino prestreženih padavin (I) izračunamo iz preproste bilančne enačbe kot razliko med padavinami, ki padejo na prostem (P), in prepuščenimi padavinami, izmerjenimi pod krošnjo drevesa (TF) ter odtokom po deblu (SF):

$$I = P - TF - SF \quad (1)$$

Delež I , TF in SF pa je definiran kot razmerje med količino posamezne komponente in količino padavin, izmerjenih na prostem.

2.2 Vplivne spremenljivke

Delež prestreženih padavin, ki nikoli ne doseže tal, je odvisen od številnih spremenljivk, ki vplivajo na proces. V osnovi jih delimo na meteorološke in vegetacijske spremenljivke (npr. Crockford in Richardson, 2000; Siegert in Levia, 2014; Zabret in sod., 2018). Meteorološke spremenljivke opisujejo lastnosti padavinskega dogodka kot so količina in trajanje padavin, hitrost vetra in temperatura zraka (Staelens in sod., 2008; Van Stan in sod., 2014; Zabret in sod., 2018). Vegetacijske spremenljivke pa opisujejo lastnosti dreves, kot na primer njihovo višino, premer debla in površino krošnje (npr. Barbier in sod., 2009; Zabret, 2013; Honda in sod., 2014).

2.2.1 Meteorološke spremenljivke

Meteorološke spremenljivke so povezane z geografsko lokacijo in tipom podnebja, vendar pa so zelo spremenljive tudi med dvema posameznima padavinskima dogodkoma ali celo med samim dogodkom. V zvezi s prestrežanjem padavin so najpogostejše obravnavane meteorološke spremenljivke količina padavin, trajanje padavin in njihova intenziteta, hitrost in

smer vetra, vlažnost in temperatura zraka, vrsta padavin ter velikostna porazdelitev kapljic (ang. *drop size distribution*, DSD) (Calder, 1996a; Crockford in Richardson, 2000; Nanko in sod., 2006; Šraj in sod., 2008a). Nekatere izmed teh spremenljivk so že predhodno opredeljene s tipom podnebja, kot na primer letna količina padavin, vlažnost zraka in vrsta padavinskega dogodka (vročinske nevihte, pršenje, monsunske padavine) (Rakovec in Vrhovec, 2000).

Količina padavin predstavlja vsoto vseh padavin, izmerjenih tekom definiranega padavinskega dogodka. Celotna količina padavin lahko znatno vpliva na delež izgub zaradi prestrezanja. Kot najbolj vplivno spremenljivko so jo izpostavili številni raziskovalci, med drugim tudi Xiao in sod. (2000), Šraj in sod. (2008a) ter Siegert in Levia (2014). Z naraščanjem količine padavin se delež I na splošno zmanjšuje, medtem ko se TF in SF povečujeta (Staelens in sod., 2008; Siegert in Levia, 2014; Van Stan in sod., 2014; Zabret in sod., 2018). V primeru rahlih padavin je prestrezanje padavin največje (Llorens in sod., 1997; Staelens in sod., 2008; Zabret in sod., 2016); tako lahko pri količini padavin, manjši od skladiščne zmogljivosti krošnje, drevesa prestrežejo tudi do 100 % padavin (Guevara Escobar in sod., 2007; Šraj in sod., 2008a; Zabret in sod., 2017). Na odvisnost med P in komponentami prestrezanja padavin (I, TF, SF) pa občutno vpliva tudi fenofaza, saj so v različnih študijah v obdobju olistane krošnje med P in I izračunali znatno večji koeficient korelacije kot v obdobju mirovanja (Price in Carlyle-Moses, 2003; Staelens in sod., 2008; Van Stan in sod., 2014; Zabret in sod., 2018).

Trajanje padavin določamo na podlagi podatkov o padavinah, izmerjenih z avtomatičnimi merilniki. Trajanje dogodka se lahko giblje le med nekaj minutami pa vse do par dni (Kumet in sod., 2006; Dohnal in sod., 2014; Zabret in sod., 2018). Z daljšim trajanjem padavin se delež I zmanjšuje, medtem ko se TF in SF povečujeta (Tobon Marin in sod., 2000; Xiao in sod., 2000; Toba in Ohta, 2005; Staelens in sod., 2008; Zabret in sod., 2018). Muzylo in sod. (2012) so v listnatem gozdu ugotovili znaten vpliv trajanja dogodka v obdobju mirovanja, saj je bilo prestrezanje padavin povečano pri krajših dogodkih v primerjavi z daljšimi dogodki, medtem ko v obdobju vegetacije niso izpostavili nobene spremenljivke s tako dominantnim vplivom. Pri dogodkih z daljšim trajanjem je večji delež padavin prestrežen na začetku dogodka, medtem ko v nadaljevanju običajno lahko opazimo skoraj 100 % prepuščanje padavin (Nakayoshi in sod., 2009; Iida in sod., 2017; Zabret in sod., 2017).

Intenziteto padavin določamo na podlagi podatka o količini padavin v določenem časovnem obdobju. Raziskovalci najpogosteje upoštevajo povprečno intenziteto dogodka (Carlyle-Moses, 2004; Buttle in Farnsworth, 2012; Nanko in sod., 2016; Zabret in sod., 2018) ali 5- oziroma 10-minutno intenziteto (Nanko in sod., 2006; Schooling, 2014). Z večjo intenziteto padavin se I zmanjšuje, medtem ko se TF povečuje (Xiao in sod., 2000; Guevara-Escobar in sod., 2007; Zabret in sod., 2018). Večja intenziteta padavin je povezana z dežnimi kapljicami, ki hitreje in močneje, z večjo kinetično energijo dosežejo drevesno krošnjo, kar povzroča škropljenje že prestreženih padavin, zaradi česar se z večjo intenziteto padavin poleg prestrezanja padavin zmanjšuje tudi SF (Calder, 1996a; Price in Carlyle-Moses, 2003; Carlyle-Moses, 2004).

Tudi lastnosti vetra imajo pomemben vpliv na proces prestrezanja padavin (Nanko in sod., 2006; Staelens in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Van Stan in sod., 2014). Hitrost vetra ne vpliva le na kot, pod katerim padajo dežne kapljice, ampak tudi na vibracije drevesne krošnje, ki pospešujejo TF (Šraj, 2008a). Vendar pa se vpliv hitrosti vetra v različnih študijah razlikuje, saj lahko glede na vrsto drevesa in njegovo lokacijo isto komponento prestrezanja padavin zmanjšuje ali povečuje. Tako je na primer večja hitrost vetra povečevala SF v obdobju mirovanja v listnatem gozdu v Belgiji (Andre in sod., 2008) in v primeru dveh listnatih dreves v državi Maryland v ZDA (Van Stan in sod., 2014). Nasprotno pa so povečane hitrosti vetra zmanjševale delež TF v mešanem gozdu na povodju Dragonje v Sloveniji (Šraj in sod., 2008a), pod olistano krošnjo bukve (*Fagus sylvatica* L.) v Belgiji (Staelens in sod., 2008) in v prvi polovici dogodka pod kriptomerijo (*Cryptomeria japonica* D. Don) na Japonskem (Iida in sod.,

2017). Smer vetra ni tako pogosto vključena v analize vplivov na proces prestrezanja padavin in je tudi redko prepoznana kot značilno vplivna (Xiao in sod., 2000; Guevara-Escobar in sod., 2007; Staelens in sod., 2008; Van Stan in sod., 2011). Je pa pričakovati večji vpliv smeri vetra pri drevesih v urbanem okolju kot v gozdovih. V gozdovih namreč drevesa rastejo strnjeno, na njih smer vetra vpliva predvsem na robu, ne pa na raziskovalnih ploskvah znotraj gosto poraslih območij. V mestih pa so drevesa bolj izolirana, vpliv smeri vetra je odvisen tudi od stavb v bližini drevesa. Te lahko nudijo zavetje in zmanjšujejo tresenje krošnje, ali pa ustvarjajo vetrovni koridor, ki še okrepi hitrosti vetra (Blocken in Carmeliet, 2004). Tako so vpliv smeri vetra na prestrezanje padavin v urbanem okolju v fazi omočenja krošnje izpostavili Guevara-Escobar in sodelavci (2007), na izolirana drevesa v nasadu pa Gomez in sodelavci (2002). Stalenes in sodelavci (2008) za drevesa v gozdu niso ugotovili izrazitega vpliva smeri vetra, razen v primeru manjše skupine različno visokih dreves (Van Stan in sod., 2011; Van Stan in sod., 2014). Šraj in sodelavci (2008a) pa so za listnati gozd na povodju Dragonje pokazali na neposreden vpliv vetra, saj je jugovzhodnik, ki je vlažen in topel veter, med dogodkom dvignil temperaturo zraka in s tem povečal izhalpevanje ter občutno zmanjšal prepuščanje padavin.

Vpliv temperature in vlažnosti zraka sta bolj pomembna po koncu padavinskega dogodka, saj poleg vetra in sončnega sevanja pomembneje vplivata na evapotranspiracijo. Hitrejši kot je začetek evapotranspiracije, manjši delež I v obliki kapljanja doseže tla in tvori TF. Na splošno se evapotranspiracija povečuje z višjimi temperaturami in z manjšo vlažnostjo zraka. Ta dva vpliva sta še posebej izrazita v mestih, kjer je temperatura višja zaradi vpliva toplotnih otokov, robovi krošenj pa se med seboj ne prekrivajo tako izrazito kot v gozdovih, kar vpliva tudi na drugačen potek evapotranspiracije (Guevara-Escobar in sod., 2007). Ti dve meteorološki spremenljivki je v raziskave procesa prestrezanja padavin vključilo kar nekaj raziskovalcev, vendar sta se večinoma izkazali za manj vplivni (Xiao in sod., 2000; Nanko in sod., 2006; Staelens in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Zhang in sod., 2015; Lida in sod., 2017).

Tip padavinskega dogodka je redko upoštevana spremenljivka, ki je tesno povezana s podnebjem, kjer se izvajajo meritve. Posledično raziskovalci poleg navedbe lokacije padavinskih dogodkov dodatno ne opredeljujejo. Dva izmed tipov padavinskih dogodkov, ki jih prepoznamo v zmernem celinskem podnebjem, sta na primer rahlo pršenje (rosenje) in naliv (Rakovec in Vrhovec, 2000), ki se ne razlikujeta le po intenziteti, temveč tudi po hitrosti spremljajočega vetra. Taki klasifikaciji so sledili tudi Nanko in sod. (2006), ki so padavinske dogodke razdelili v tri skupine (rahle padavine, močne padavine in močan veter), s katerimi so analizirali vpliv intenzitete padavin in hitrosti vetra na mikrostrukturo prepuščenih padavin.

Lastnosti padavin najpogosteje podajamo z njihovo količino, trajanjem in intenziteto, vendar pa jih lahko opišemo tudi z njihovo mikrostrukture. Mikrostruktura padavin podaja premer, hitrost in število dežnih kapljic (Uijlenhoet in Sempere Torres, 2006). V grobem lahko mikrostrukture padavin podamo z opisom tekočih padavin: pri pršenju prevladujejo kapljice med 0,2 mm in 0,5 mm, za dež pa so značilne debelejšje kapljice s premeri nad 0,5 mm (Rakovec in Vrhovec, 2000). Podatki o mikrostrukture padavin so le redko vključeni v analize procesa prestrezanja padavin, najpogosteje pa so usmerjene v raziskave mikrostrukture prepuščenih padavin (Levia in sod., 2017). Do sedaj so raziskovalci primerjali spremembe v velikostni porazdelitvi kapljic (DSD) prepuščenih padavin glede na DSD padavin na prostem (Vis, 1986; Hall in Calder, 1993; Nanko in sod., 2006; Frasson in Krajewski, 2011), različen DSD TF v posameznih fenofazah (Nanko in sod., 2016) ali glede na raznolike karakteristike listja (Nanko in sod., 2013), preučevali so vpliv DSD TF na erozijo pod drevesi (Chapman, 1948; Calder, 1993; Nanko in sod., 2008; Gießler in sod., 2012; Goebes in sod., 2015a), z uporabo podatkov velikostnih porazdelitev so TF poskušali razdeliti na komponente škropljenja in kapljanja (Brandt, 1989; Nanko in sod., 2006; Bassette in Bussiere, 2008) ali pa so premer dežnih kapljic upoštevali pri modeliranju prestrezanja padavin (Calder, 1996a; Calder, 1996b; Hall in sod., 1996; Hall, 2003; Weber in sod., 2016). Vpliv mikrostrukture padavin na prostem pa smo prvič vključili v analize procesa prestrezanja padavin v disertaciji, v kateri smo preverili vpliv razvoja

mikrostrukture padavin tekom dogodka na dinamiko TF pod drevesi (Zabret in sod., 2017) in vpliv povprečnega premera in hitrosti kapljic dogodka ter vsote njihovega števila na posamezno komponento procesa prestrezanja padavin (I, TF, SF) (Zabret in sod., 2018).

Poleg opisanih meteoroloških spremenljivk smo v obstoječih raziskavah zasledili še upoštevanje kota, pod katerim je padal dež (Van Stan in sod., 2011; Van Stan in sod., 2016), maksimalnih sunkov vetra (Siegert in Levia, 2014; Van Stan in sod., 2016), nihanja temperature med dogodkom (Siegert in Levia, 2014) in povprečnega absolutnega odklona intenzitete tekom dogodka (Van Stan in sod., 2016), vendar pa so te spremenljivke upoštevali le redki raziskovalci, poleg tega pa so se večinoma izkazale za manj vplivne.

2.2.2 Vegetacijske spremenljivke

Indeks listne površine (LAI)

Indeks listne površine (ang. *leaf area index*, LAI) je zelo pomembna lastnost dreves, ki vpliva na številne biološke in fizične procese v drevesni krošnji (Chen in sod., 1997), posredno pa opisuje tudi gostoto listja oziroma iglic drevesne krošnje in je pogosto upoštevana v analizah procesa prestrezanja padavin (npr. Crockford in Richardson, 2000; Fleischbein in sod., 2005; Llorens in Domingo, 2007; Šraj in sod., 2008a; Andre in sod., 2011; Buttle in Farnsworth, 2012; Benyon in Doodey, 2014; Zabret in sod., 2018). Obstaja več definicij indeksa listne površine, ki so med drugim odvisne tudi od metode merjenja in vrste drevesa, za katerega določamo LAI. Prva definicija, ki jo je leta 1947 postavil Watson (1947), pravi, da je LAI celotna enostranska površina fotosintetičnega materiala na enoto površine tal. Smith in sodelavci (1991) so nadalje sklepali, da bi upoštevanje projekcije površine lista omogočalo upoštevanje nepravilnih oblik listov in iglic, s čimer pa se je postavljalo vprašanje, pod katerim kotom narediti projekcijo, saj največje vrednosti ne da samo vertikalna projekcija. Nova definicija, da je LAI enak največji projekciji površine listov na enoto površine tal (Myneni in sod., 1997), je bila dopolnjena s tem, da se upošteva polovico površine na enoto tal (Lang in sod., 1991). Ne glede na različne definicije pa se danes najpogosteje uporablja splošna razlaga, da je indeks listne površine enak skupni enostranski površini zelenih listov na enoto površine [m^2/m^2] (Šraj, 2003a; Fleischbein in sod., 2005). Metode za določanje indeksa listne površine se delijo na neposredne in posredne metode (Levy in sod., 1999; Šraj, 2003b; Zabret, 2013). Bolj natančne in časovno bolj potratne so neposredne metode. Posredne metode pa so hitrejše, bolj primerne za avtomatizacijo in uporabne v večjem obsegu.

Najpogosteje uporabljeni neposredni metodi določanja LAI sta zbiranje količine odpadlega listja (nedestruktivna metoda) in sekanje rastlin za določanje celotne listne površine (destruktivna metoda) (Breda, 2003; Šraj, 2003a; Jonckheere in sod., 2004; Vilhar, 2006; Zabret, 2013). Z zbiranjem odpadlega listja so LAI v listnatih in mešanih gozdovih med drugimi določali tudi Fassnacht in sodelavci (1997), Hölscher in sodelavci (2004), Kubo in sodelavci (2008), Šraj in sodelavci (2008a), Qi in sodelavci (2014) ter Liu in sodelavci (2015), medtem ko so kot eni izmed redkih Stenberg in sodelavci (1994) to metodo uporabili za določanje nihanj vrednosti LAI za iglavce. Destruktivna metoda pa je bolj primerna za druge vrste vegetacije, v primeru dreves pa za manjše in manj številčne vzorce, saj se z drevesa obere vse listje, za katerega se nato natančno izmeri površina. Chen in sodelavci (1997) so za analize posekali 10 iglavcev, Qi in sodelavci (2014) pa so posekali celotno podrast na raziskovalni ploskvi. Zaradi zamudnosti in velikega delovnega obsega se v primeru dreves lahko natančno površino listja določi tudi za le nekaj vej, ki služijo za izdelavo modela celotnega drevesa (Jonckheere in sod., 2004). Na tak način so neposredne vrednosti LAI za bor na primer določili Deblonde in sodelavci (1994), Mencuccini in Grace (1996), Jonckheere in sodelavci (2005) ter Mason in sodelavci (2012).

Posredne metode se za določanje LAI uporabljajo večkrat, na voljo pa je tudi več različnih pristopov. Lahko jih izvajamo s tal ali iz zraka oziroma iz vesolja (Breda, 2003; Jonckheere in

sod., 2004; Šraj, 2004). Največkrat uporabljene so metoda alometričnih tehnik, hemisferično fotografiranje, uporaba optičnih senzorjev in daljinsko zaznavanje (Zabret, 2013). Metoda alometričnih tehnik temelji na razmerju med površino lista in med dimenzijo katerega koli drugega olesenelega dela rastline, ki nosi zeleno listno biomaso, kot sta obseg debla ali višina drevesa (Ryan in sod., 2000; Jonckheere in sod., 2004). Tak pristop pri določanju LAI so med drugimi uporabili tudi Garcia-Estringana in sodelavci (2010) za mediteransko grmičevje (*Cistus ladanifer*, *Lavandula latifolia*) ter Benyon in Doodey (2014) za bor (*Pinus radiata* D. Don) in evakliptus (*Eucalyptus globulus* Labill.). Hemisferično fotografiranje in optične metode temeljijo na prehodu svetlobe skozi drevesno krošnjo. Pri hemisferičnem fotografiranju s polkrogelnim (t.i. ribje oko) objektivom posnamemo fotografijo pod krošnjo usmerjeno v zenit ali nad krošnjo usmerjeno navzdol, z uporabo ustrezne programske opreme pa slike analiziramo in določimo vrednost LAI (Hale in Edwards, 2002; Breda, 2003; Jonckheere in sod., 2004; Šraj, 2004). Primere uporabe hemisferičnega fotografiranja najdemo v številnih raziskavah za vse vrste dreves (npr. Dietz in sod., 2006; Gomez-Peralta in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Buttle in Farnsworth, 2012; He in sod., 2014; Goebes in sod., 2015a; Kowalska in sod., 2016). Optični senzorji (na primer Accupar, Digital Plant Canopy Imager CI 100, Demon, MVI, Licor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer) izmerijo sevanje pod drevesom in na prostem ter na podlagi razlike med izmerjenimi vrednostmi izračunajo vrednost LAI (Jonckheere in sod., 2004; Zheng in sod., 2009). Najbolj razširjena je uporaba senzorja LAI-2000 (Chen, 1996; Fleischbein in sod., 2005; Andre in sod. 2011; Molina in del Campo, 2012; Dohnal in sod., 2014; Li in sod., 2016; lida in sod., 2017; Zabret in sod., 2018). Metode daljinskega zaznavanja pa temeljijo na posnetkih iz zraka in s satelitov, ki so jih za določanje LAI uporabili na primer Zheng in sodelavci (2009) ter Galdos in sodelavci (2012).

Skladiščna zmogljivost krošnje (S)

Skladiščna zmogljivost krošnje (ang. *canopy storage capacity*, S) določa količino vode, ki je zadržana v krošnji po končanem padavinskem dogodku, ko z nje ob odsotnosti vetra preneha kapljati (Leyton in sod., 1967; Rutter in sod., 1971; Klaassen in sod., 1998). Je ena izmed pomembnejših lastnosti dreves, ki vplivajo na ekohidrološke procese povezane z vegetacijo, torej tudi na prestrezanje padavin (Rutter in sod., 1971; Llorens in Gallart, 2000; Dunkerley, 2008; Wang in sod., 2012). Njene vrednosti se razlikujejo glede na rastlinske vrste in fenofaze, za katere v primeru listavcev ločimo maksimalno in minimalno skladiščno zmogljivost (Holder, 2013).

Tudi skladiščno zmogljivost krošnje lahko določamo s posrednimi in neposrednimi metodami, ki so primerne za različno velike vzorce od vej do celih dreves. Neposredne metode so metoda konzolnega upogiba (ang. *cantlivere deflection method*), metoda slabljenja z žarki (ang. *ray-attenuation method*), metoda umetnega vlaženja (ang. *artificial wetting method*) in metoda potapljanja (ang. *immersion method*) (Andre in sod., 2008; Wang in sod., 2012; Zabret, 2013). Za določanje skladiščne zmogljivosti krošnje po prvih dveh metodah potrebujemo posebno opremo, medtem ko sta ostali dve metodi bolj preprosti in cenejši, vendar manj natančni (Andre in sod., 2008). Posredni metodi, ki sta najcenejši, vendar zahtevata dokaj dolg niz meritev, pa sta grafična ocena (Leyton in sod., 1967; Klaassen in sod., 1998) in optimizacija modela (Rutter in sod., 1971; Gash, 1979; Gash in sod., 1995).

Za potrebe analize procesa prestrezanja padavin se najpogosteje uporablja enostavnejše in cenejše metode. Andre in sodelavci (2008) so primerjali skladiščno zmogljivost krošenj v hrastovo-bukovem gozdu, ocenjeno po treh najpogosteje uporabljenih metodah: metodi umetnega vlaženja, grafični oceni po Leytonu in mehanističnem modelu. Tudi Keim in sodelavci (2006) ter Wang in sodelavci (2012) so uporabili metodo umetnega vlaženja, pri kateri so primerjali vpliv intenzitete padavin na skladiščno zmogljivost. Za določanje vpliva skladiščne zmogljivosti na prestrezanje padavin so metodo umetnega vlaženja uporabili še Hutchings in sodelavci (1988), Calder in sodelavci (1996) ter Garcia-Estringana in sodelavci (2010). Po metodi potapljanja se po navadi skladiščno zmogljivost določa ločeno za liste ali

iglice ter veje, iz česar jo nato preračunamo za celotno krošnjo (Liu, 1998; Llorens in Gallart, 2000; Zhang in sod., 2016). Pogosto pa so raziskovalci uporabili tudi grafično oceno po Leytonu (Link in sod., 2004; Bryant in sod., 2005; Deguchi in sod., 2006; Šraj in sod., 2008a) ali kakšno drugo grafično metodo (Pypker in sod., 2005; Muzylo in sod., 2012; Su in sod., 2016; Liu in sod., 2017).

Zastrtost s krošnjo

Zastrtost s krošnjo (ang. *canopy coverage*) opisuje delež neba, ki je nad določeno točko tal zastrt z elementi drevesne krošnje oziroma delež tal, ki je zastrt z vegetacijo (Frasson in Krajewski, 2011). Podobno kot vrednosti LAI se tudi zastrtost s krošnjo spreminja glede na fenofaze in pomembno vpliva na variabilnost skladiščne zmogljivosti krošnje (Staelens in sod., 2006; Gerrits in sod., 2010) ter na deljenje prepuščenih padavin na kapljanje in škropljenje (Frasson in Krajewski, 2011).

Metode, ki se uporabljajo za določitev zastrtosti s krošnjo, so podobne optičnim metodam za določitev LAI. Tako smo v raziskavah, povezanih s prestrezanjem padavin, zasledili določanje zastrtosti s krošnjo z obdelavo hemisferičnih fotografij (Asadian, 2010; Frasson in Krajewski, 2011; Muzylo in sod., 2012; Fang in sod., 2016; Zabret in Šraj, 2018), z obdelavo posnetkov daljinskega zaznavanja (Morsdorf in sod., 2006; Danson in sod., 2007; Wang in sod., 2008; Sander in sod., 2017) ter z uporabo različnih optičnih senzorjev kot sta sferični densiometer (Inkiläinen in sod., 2013) in LAI-2000 (Hedstrom in Pomeroy, 1998).

Fenofaze

Ena izmed spremenljivk, ki predvsem pri listavcih močno vpliva na LAI, skladiščno zmogljivost krošnje in njeno zastiranje, so fenofaze. Fenofaza je periodična biološka faza, ki na primer opisuje olistanje, cvetenje in rumenenje listja (Črepinšek, 2002). Listje v drevesni krošnji ustvari drugačno dinamiko sprejemanja kapljic, zato je tudi vpliv meteoroloških spremenljivk na proces prestrezanja padavin drugačen v posameznih fenofazah (Krämer in Hölscher, 2009; Muzylo in sod., 2012).

Glede na velik vpliv fenofaze na deleža TF in SF, jo raziskovalci pogosto upoštevajo pri analizah procesa prepuščanja padavin v listnatih gozdovih (Keim in sod., 2005; Staelens in sod., 2006; Andre in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Xiao in McPherson, 2011a; Kimbauer in sod., 2013; Van Stan in sod., 2014; Nanko in sod., 2016; Siegert in sod., 2016), redkeje pa pri analizah podatkov, izmerjenih v mešanih gozdovih (Herbst in sod., 2008; Buttle in Farnsworth, 2012; Kowalska in sod., 2016; Kermavnar in Vilhar, 2017; Yousefi in sod., 2018). Ne glede na to, da naj bi fenofaze vplivale tudi na lastnosti krošnje iglavcev (Margolis in sod., 1995), pa v primeru raziskav v iglastih in vednozelenih gozdovih skoraj ne zasledimo njihovega upoštevanja (Van Stan in sod., 2017; Zabret in sod., 2018).

Projicirana površina drevesne krošnje

V ekohidrologiji je pomemben parameter tudi površina drevesne krošnje, saj se preko nje prenašata energija in masa med gozdnim ekosistemom in atmosfero (Song in sod., 2010). Pri procesu prestrezanja padavin površina drevesne krošnje najbolj vpliva na odtok po deblu, saj večja površina krošnje glede na premer debla predstavlja večjo potencialno prispevno količino vode (Aboal in sod., 1999; Steinbuck in sod., 2002). Pri analizi prepuščenih padavin v strnjenem sestoju dreves pa lahko s poznavanjem površine posameznih krošenj določimo tudi vrzeli ali prekrivanje med njimi (Song in sod., 2010).

Površino drevesne krošnje določamo preko projekcije (t.i. projicirana površina) z meritvami na terenu z uporabo laserja ali preslikavo krošnje na tla (Brack, 1999; Song in sod., 2010), z obdelavo slik, posnetih iz zraka, ki morajo imeti dovolj dobro resolucijo in poznano merilo

(Brack, 1999; Zabret, 2013) ali z obdelavo posnetkov daljinskega zaznavanja, pri čemer so najpogosteje uporabljeni Lidar, Ikonos in QuickBird (Asner in sod., 2002; Brown in sod., 2005; Song in sod., 2010). V študijah prestrezanja padavin je površina drevesne krošnje pogosto navedena pri opisu lastnosti dreves, uporabljena metoda za njeno določanje pa ni opisana (npr. Iroume in Huber, 2002; Cao in sod., 2008; Armson in sod., 2013; Buttle in sod., 2014; Swaffer in sod., 2014; Schooling in Carlyle-Moses, 2015; Zabret in sod., 2017). V nadaljnji analizi se površina krošnje običajno uporablja le v povezavi s SF (npr. Tobon Marin in sod., 2000; Friesen in sod., 2013; Honda in sod., 2014; Levia in sod., 2015; Frischbier in Wagner, 2015) ali z evapotranspiracijo (Carlyle-Moses in sod., 2010), medtem ko smo njeno vključitev v analize vplivov na I ali TF zasledili le v primeru obravnave kinetične energije prepuščenih padavin (Goebes in sod., 2015a; Goebes in sod., 2015b).

Prsni premer drevesnega debla (DBH)

Premer drevesnega debla se v Evropi, Avstraliji in Kanadi določa na višini 130 cm od tal, ki se imenuje tudi prsna višina (ang. *diameter at breast height*, DBH) (Nature Conservation Practice Note, 2006; Brack, 2009). DBH je spremenljivka, ki se najpogosteje uporablja za opisovanje velikosti dreves, saj posredno preko alometričnih razmerij nakazuje tudi na višino drevesa, površino krošnje, indeks listne površine ter starost drevesa (Bartelink, 1997; Johansson, 1999; Buba, 2013). Zaradi tega raziskovalci pri opisu raziskovalne ploskve pogosto navajajo vrednosti premera debla dreves (npr. Hölscher in sod., 2004; Fleischbein in sod., 2005; Deguchi in sod., 2006; Cao in sod., 2008; Muzylo in sod., 2012; Fang in sod., 2016; Kowalska in sod., 2016; lida in sod., 2017; Kermavnar in Vilhar, 2017; Liu in sod., 2017; Zabret in sod., 2018). Pri analizah prestrezanja padavin pa se pogosto vključuje tudi vpliv DBH na odtok po deblu (Bryant in sod., 2005; Levia in sod., 2010; Buttle in Farnsworth, 2012; Honda in sod., 2014).

Prsni premer debla se določa na višini 130 cm od tal, ki jo tudi v primeru, da je deblo nagnjeno, krivo ali razcepljeno izmerimo pravokotno na deblo in ne pravokotno na tla, pri tem pa sledimo določenim zahtevam (Nature Conservation Practice Note, 2006; Brack, 2009; Zabret, 2013). DBH se lahko neposredno izmeri z uporabo gozdarskih čeljusti (kaliper) ali posredno z merilnim trakom, s katerim se izmeri obseg, iz katerega se preračuna premer debla (Nature Conservation Practice Note, 2006).

Višina drevesa

Višina drevesa na prestrezanje padavin ne vpliva neposredno, temveč nakazuje na prsni premer drevesnega debla, starost drevesa in površino drevesne krošnje. Poleg tega pa posredno vpliva tudi na količino odtoka po deblu in čas zakasnitve od začetka padavin do začetka SF (Šraj in sod., 2008a). Zaradi tega raziskovalci, ki se ukvarjajo s prestrežanjem padavin, pri opisu raziskovalne ploskve pogosto navedejo tudi višino dreves (npr. Hansen, 1995; Watanabe in Mizutani, 1996; Carlyle-Moses in sod., 2004; Vernimenn in sod., 2007; Cao in sod., 2008; Shachnovich in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Carlyle-Moses in sod., 2014; Shinohara in sod., 2015; Sadeghi in sod., 2016; Siegert in sod., 2016; Zabret in sod., 2018).

Danes se za merjenje višine dreves na terenu uporablja različne naprave kot so ultrazvočni hipsometer, ultrazvočni merilec dolžin, laserski merilnik višin in elektronski višinomer, višino pa lahko posredno določimo tudi iz fotografij in posnetkov z znanim merilom (Forestry tools, 2014). Pred razvojem sodobnih orodij in naprav pa so višino dreves določali z upoštevanjem Pitagorovega pravila ali zakonitosti podobnih trikotnikov (Zabret, 2013; Forestry tools, 2014).

Naklon vej

Na gibanje prestreženih padavin znotraj krošnje in posledično na prerazporeditev prestreženih padavin na odtok po deblu in prepuščene padavine znatno vpliva naklon vej, ki ga lahko

opišemo s kotom izražanja vej (Herwitz, 1987; Levia in sod., 2014). Pri opisovanju naklona vej se uporabljajo subjektivne ocene (npr. strm / položen naklon, pozitiven / negativen naklon) ali pa se naklon podaja s kotom med drevesnim deblom in vejo, ki se lahko določa računalniško iz različnih posnetkov (Nadkarni in sod., 2004; Schooling in Carlyle-Moses, 2015; Zabret in sod., 2018) ali na terenu z uporabo naprav kot so protractor (Li in sod., 2016), geološki kompas (Zhang in sod., 2017) ali pomožno kovinsko nihalo (Honda in sod., 2014).

Vpliv naklona vej so raziskovalci največkrat upoštevali v povezavi s SF (Ford in Deans, 1978; Navar, 1993; Garcia-Estringana in sod., 2010; Buttle in sod., 2014; Van Stan in sod., 2014; Levia in sod., 2015; Schooling in Carlyle-Moses, 2015), zanimal jih je vpliv na kinetično energijo TF (Nanko in sod., 2011; Geißler in sod., 2012) in na sam proces prestrezanja padavin, kar so spremljali v laboratoriju s simulatorjem padavin (Li in sod., 2016). V zadnjem času pa so se raziskave osredotočile tudi na vpliv naklona vej na učinkovitost dreves pri reguliranju padavinskega odtoka v urbanih območjih (Bassuk in sod., 2009; Kuehler in sod., 2017).

Lastnosti skorje

Med lastnosti skorje uvrščamo njeno debelino, teksturo, absorptivnost, skladiščno zmogljivost in omočljivost. Vse te značilnosti se razlikujejo glede na vrste dreves pa tudi med drevesi iste vrste predvsem glede na njihovo starost (Levia in sod., 2010; Ahmed in sod., 2015).

Debelina skorje se meri od zunanje površine debla do kambijske plasti, pogojena pa je z drevesno vrsto, starostjo in velikostjo drevesa. Najpogosteje se meri z uporabo posebnega merilnika za skorjo, ki se ga vtiska v deblo dokler se ne doseže trše plasti. Debelino skorje lahko določimo tudi tako, da del skorje odstranimo z debla ali da drevo porušimo (Hood, 2007; Perez-Harguindeguy in sod., 2013). Teksturo drevesne skorje se najpogosteje določa vizualno s subjektivno oceno. Perez-Harguindeguy in sodelavci (2013) so predlagali pet kategorij teksture glede na globino brazd v skorji. Za določanje absorptivnosti, skladiščne zmogljivosti in omočljivosti skorje ne obstajajo standardne metode, zato raziskovalci največkrat uporabijo standardne metode določanja teh lastnosti pri drugih poroznih materialih. Te metode temeljijo na spremljanju nihanja mase vzorcev ob namakanju in kontroliranem sušenju (Liu, 1998; Llorens in Gallart, 2000; Perez-Harguindeguy in sod., 2013).

Komponenta prestrezanja padavin, na katero lastnosti skorje najbolj vplivajo, je odtok po deblu. Gladka in omočljiva skorja omogoča večji SF kot debela in absorptivna skorja, saj se mora pred začetkom odtoka vode ta namočiti in nasičiti (Crockford in Richardson, 2000; Šraj in sod., 2008a). V primeru zelo grobe skorje so Ahmed in sodelavci (2015) poročali o pojavu kapljanja z debla, ko zaradi velikih razlik v reliefu skorje padavine po njem niso mogle enakomerno odtekat in so na določenih točkah kapljale na tla. Voigt (1960) je za tri različne vrste dreves vpliv več lastnosti skorje hkrati raziskoval tako, da je spremljal količino vode, ki je od točke vnosa na deblu pritekla do točke meritve na deblu v več zaporednih ponovitvah. Podoben test so ponovili tudi Buttle in sodelavci (2014), le da so merilno točko namestili v zemljino ter tako spremljali zmanjševanje vnosa vode v tla zaradi večje hrapavosti skorje, pogojene s staranjem dreves. Andre in sodelavci (2008) so z meritvami v laboratoriju ter na terenu in z modeliranjem ovrednotili skladiščno zmogljivost skorje ter izpostavili vpliv meteoroloških razmer na njeno sušenje, ki se pri večji debelini med dogodki sploh ne posuši. Teksturo skorje so Tobon Marin in sodelavci (2000), Honda in sodelavci (2014) ter Schooling in Carlyle-Moses (2015) določili glede na razlike v njenem mikroreliefu, upoštevali pa so jo pri ovrednotenju vplivnih parametrov lastnosti dreves na SF, za kar se je izkazala kot bolj vplivna spremenljivka. Levia in sodelavci (2010) pa so skladiščno zmogljivost skorje, ki se je prav tako izkazala za izredno vplivno na SF, ocenili iz meritev odtoka po deblu. Huang in sodelavci (2017) so pri modeliranju prestrezanja padavin v urbanem okolju upoštevali dva parametra lastnosti skorje: indeks površine skorje in skladiščno zmogljivost skorje. Lida in sodelavci (2017) so določili skladiščno zmogljivost skorje kriptomerije (*Cryptomeria japonica*) in

ovrednotili njen vpliv na razvoj prestrežanja padavin tekom dogodka. Posredno pa so lastnostim skorje razlike v izmerjenih količinah odtoka po deblu pri različnih drevesnih vrstah pripisovali še številni drugi raziskovalci (npr. Jackson, 1975; Xiao in sod., 2000; Šraj in sod., 2008a; He in sod., 2014; Siegert in Levia, 2014; Swaffer in sod., 2014; Kuehler in sod., 2017; Nanko in sod., 2016; Sadeghi in sod., 2016; Keim in Link, 2018).

2.3 Prostorska porazdelitev prepuščenih padavin

Delež prepuščenih padavin se v prostoru spreminja (Keim in sod., 2005; Staelens in sod., 2006; Nanko in sod., 2011). Prostorska porazdelitev TF vpliva na številne naravne procese kot so odlaganje hranil in delcev iz okolja (Hansen, 1995; Zirlwagen in Wilpert, 2001; Kowalska in sod., 2016), razporeditev količine vode v tleh (Raaij in sod., 2002), sestava rastlinskih vrst v podrasti (Falkengren-Grerup, 1989), oblikovanje površinskega odtoka in stopnja erozivnosti padavin (Nanko in sod., 2010). Od tega pa je odvisna tudi zasnova in izvedba meritev prepuščenih padavin ter interpretacija dobljenih rezultatov (Puckett, 1991; Carlyle-Moses in sod., 2004; Zimmermann in sod., 2007; Fang in sod., 2016). Prostorsko porazdelitev TF so raziskovalci največkrat preučevali v gozdovih (npr. Lloyd in Marques, 1988; Herwitz in Slye, 1992; Bryant in sod., 2005; Konishi in sod., 2006; Kato in sod., 2013; He in sod., 2014; Siegert in sod., 2016; Keim in Link, 2018), medtem ko so meritve pod posameznimi, izoliranimi drevesi redkejšje (npr. Gomez in sod., 2002; Staelens in sod., 2006; Guevara-Escobar in sod., 2007; Nanko in sod., 2011; Fang in sod., 2016; Zabret in Šraj, 2018).

Prostorska spremenljivost TF je v glavnem pogojena z vodoravnim premeščanjem prestreženih padavin v drevesni krošnji (Haynes, 1940; Frischbier in Wagner, 2015). Samo premeščanje I pa je odvisno od številnih drugih vplivov, ki jih določajo lastnosti drevesne krošnje (Zabret, 2013) in značilnosti padavinskega dogodka (Crockford in Richardson, 2000). Vpliv meteoroloških spremenljivk na prostorsko porazdelitev TF so upoštevali Gomez in sodelavci (2002), ki so za dogodke z večjo količino padavin zabeležili enakomerne vzorce TF ter Keim in Link (2018), ki sta izmerila, da je v točkah z velikim deležem TF intenziteta le teh podobna intenziteti padavin na prostem. Vpliv vegetacijskih spremenljivk pa je bil obravnavan bolj pogosto. Carlyle-Moses in sodelavci (2004) so različno porazdelitev TF pri dogodkih z manj kot 5 mm padavin pripisali lastnostim dreves, pri čemer so upoštevali zastrtost s krošnjo dreves in podrastjo, indeks površine vegetacije (ang. *vegetation area index*, VAI), oddaljenost od najbližjega debla, površino krošnje in višino drevesa. Dohnal in sodelavci (2014) so poročali o povečanih količinah TF pod deli krošnje z manjšo zastrtostjo. Vpliv strukture krošnje na nihanje v vrednostih TF pa so pri modeliranju opazili tudi Deguchi in sodelavci (2006). Gerrits in sodelavci (2010) so kot najbolj vplivno spremenljivko definirali sezonske vzorce drevesnih krošenj (fenofaze), podobno pa so tudi prostorsko porazdelitev hranil v prepuščenih padavinah Staelens in sodelavci (2006) pripisali prisotnosti listja v obdobju vegetacije in položaju vej v obdobju mirovanja. Položaj vej so izpostavili še nekateri drugi raziskovalci: Nanko in sodelavci (2011), ki so v laboratorijskem eksperimentu spremljali prostorsko porazdelitev TF pod pacipreso (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl.), Fang in sodelavci (2016), ki so izmerili večjo koncentracijo TF na robu krošnje bora (*Pinus tabulaeformis* Carr.), kar so poimenovali »učinek roba« (ang. *edge effect*) in Shachnovich s sodelavci (2008), ki so v točki pod navzdol ukrivljeno vejo v borovem gozdu (*Pinus halepensis* Mill) redno namerili večje deleže TF. He in sodelavci (2014) pa so ugotovili večjo povezanost prostorske porazdelitve TF z indeksom površine rastline (ang. *plant area index*, PAI), ki poleg listja vključuje tudi veje, kot z indeksom listne površine.

2.4 Zmanjšanje površinskega odtoka

Hidrološke lastnosti območij, kamor se širijo mesta, so podvržene urbanizaciji, zato so drugačne od tistih v naravnih območij. Urbanizacija zmanjšuje površine, pokrite z vegetacijo, spreminja razgibanost terena in povečuje delež neprepustnih površin, pokritih z asfaltom in betonom, kar zmanjšuje infiltracijo padavin in podpovršinski odtok spreminja v površinskega,

ki ima hkrati tudi hitrejši odzivni čas in večjo konico (Brun in Band, 2000; Weng, 2001; Konrad in Booth, 2002; Yang in sod., 2010; Sun in sod., 2011). Eden izmed možnih ukrepov za uravnavanje površinskega odtoka v mestih je tudi prestrezanje padavin. Zato so se v zadnjem času drevesa pričela uveljavljati kot pomemben element zelene infrastrukture (McPherson in sod., 2005; Appleton in sod., 2009; Evropska komisija, 2010; McPherson in sod., 2011).

S prestrezanjem padavin drevesa zmanjšujejo količino padavin, ki doseže tla in jih hkrati zakasnijo, da v celoti ne prispevajo h konici površinskega odtoka. V nasprotju s številnimi raziskavami, ki so preučevale vpliv prestrezanja padavin na zmanjševanje odtoka v gozdovih (npr. Jones in Grant, 1996; Guillemette in sod., 2005; Grace in sod., 2006; Šraj in sod., 2008a; Suryatmojo in sod., 2013), so se raziskave samega procesa prestrezanja padavin v urbanem okolju začele šele po letu 1980 (Bernatzky, 1983; Sanders, 1986; Abas in sod., 1992). Armson in sodelavci (2013) so merili odtok s treh raziskovalnih ploskev z drevesi (*Acer campestre*) in brez njih ter tako pokazali, da prisotnost drevesa na parkirišču lahko zmanjša koeficient odtoka z asfalta za 38 % poleti in 43 % pozimi. Meritve I pod iglastimi drevesi (*Pseudotsuga menziesii*, *Thuja plicata*) v Kanadi so pokazale, da drevesa prestrežejo med 50 % in 60 % (Asadian in Weiler, 2009), meritve TF v Avstraliji pa so pokazale, da glede na gostoto krošenj listavcev (*Eucalyptus nicholii*, *Eucalyptus saligna*) ti lahko zmanjšajo odtok med 30 % in 45 % (Livesley in sod., 2014). Kermavnar in Vilhar (2017) sta merila TF in SF v treh urbanih gozdovih na območju Slovenije, ki so prestregli med 4 % in 18 % padavin. Zeleno infrastrukturo v mestih pa predstavljajo tudi drevesa na zasebnih dvoriščih, za katere so Inkiläinen in sodelavci (2013) poročali o vplivu na zmanjšanje odtoka od 9 % do 21 %. Guevara-Escobar in sodelavci (2007) pa so za osamljen smokvovec (*Ficus benjamina*) v mestu Queretaro v Mehiki izmerili 60 % prestrezanje padavin.

Bolj kot meritve prestreženih padavin v urbanem okolju in njihov vpliv na zmanjšanje odtoka pa je pogosto modeliranje tega procesa. Xiao in sodelavci (1998) so z eno dimenzijskim modelom upoštevanja masne in energijske bilance ocenili I urbanega gozda, in sicer od 6 % do 13 % letnih padavin v Sacramentu in 34 % letnih padavin v Santa Moniki v ZDA (Xiao in McPherson, 2002). Isti model so uporabili tudi McPherson in sodelavci (2005) za ovrednotenje I najbolj pogostih drevesnih vrst v petih Ameriških mestih, s čimer so pokazali vpliv na zmanjšanje odtoka med 8 % in 19 %. Podobne rezultate zmanjšanja odtoka med 6,5 % in 27 % so za primer mesta Toronto v Kanadi z modelom i-Tree izračunali tudi Kirnbauer in sodelavci (2013). Za območje mesta München v Nemčiji so Zölch in sodelavci (2017) z uporabo modela MIKE SHE pokazali, da bi zasaditev dreves na 19 % površine testnega območja zmanjšalo odtok za 2 %. Večkrat uporabljena pa je bila tudi metoda SCS-CN, ki je pokazala zmanjšanje odtoka zaradi prestrezanja padavin za 1-5 % na Švedskem (Sjöman in Gill, 2014) ter za 30 % v Pekingu v primeru povečanja površine drevesnih krošenj za 11 % (Yao in sod., 2015). Vpliv povečanja površine dreves na neprepustnih površinah z 12 % na 24 % v Baltimoru pa bi po rezultatih UFORE-Hydro modela zmanjšal odtok za 3 % (Wang in sod., 2008). Huang in sodelavci (2017) pa so združili različne komponente že obstoječih modelov v nov analitični model za ocenjevanje prestrezanja padavin v urbanem okolju. Testirali so ga za štiri listopadna drevesa (*Quercus alba* L., *Acer platanoides* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., *Prunus* sp.) v urbanem okolju mesta Vancouver v Kanadi in ugotovili, da je primeren za oceno učinkovitosti posameznih drevesnih vrst.

3 METODE DELA

3.1 Opis raziskovalne ploskve

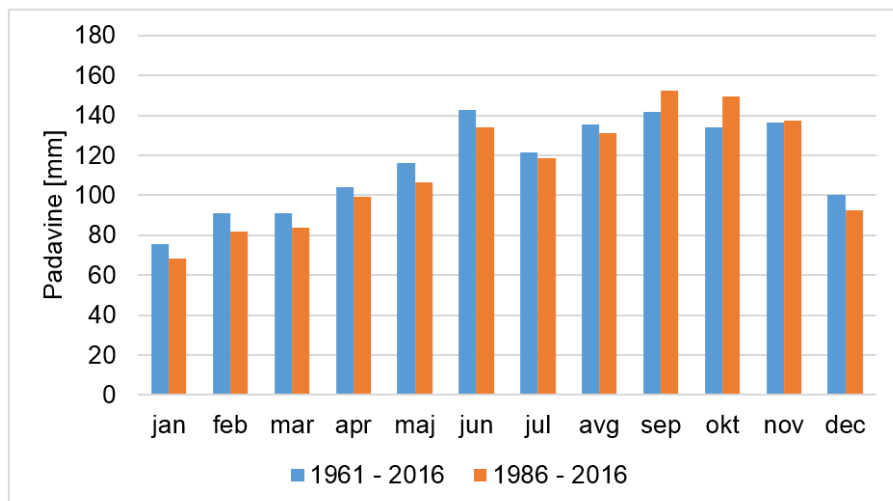
Raziskovalna ploskev se nahaja v Ljubljani. Manjši mestni park leži poleg stavbe Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG (46.04 °N, 14.49 °E), na nadmorski višini 292 m. Območje leži v Ljubljanski kotlini v osrednji Sloveniji.

Ljubljanska kotlina je največja kotlina v Sloveniji, ki je nastala z ugrezanjem v terciarju. Nahaja se v osrednjem delu Slovenije, na prehodu Alpske, Predalpske in Dinarsko kraške pokrajine. Dno je večinoma ravno z nekaterimi dvignjenimi osamelci. V kotlino se z vseh strani stekajo reke, ki razen Ljubljanice tečejo po globokih dolinah. Bohinjski ledenik je v pleistocenu v zgornji del kotline odložil morene. Takrat so Alpe in Predalpske reke v kotlino nasule debele nanose fluvio-glacialnega proda, ki ponekod dosega tudi debelino do 100 m in danes predstavlja pomemben vodonosni sloj. Dno Ljubljanskega barja pa je reka Ljubljanica zapolnila predvsem z glinami in ilovicami. Nanosi starejšega proda so se večinoma že sprijeli v konglomerat, medtem ko je mlajši prod, ki je bil nanešen v zadnji ledeni dobi, večinoma še nesprijet. Za rečne karbonatne nanose v Ljubljanski kotlini so značilne evtrične rjave prsti, ki so ene izmed najbolj rodovitnih in zato tudi primernih za kmetijstvo (Senegačnik, 2012).

Na območju Ljubljanske kotline gozd pokriva kar tretjino površja, kar je več kot na drugih ravninskih delih po Sloveniji. Na splošno ožje območje mesta Ljubljane sestavljajo predvsem pozidane površine, v manjšem obsegu pa še njive in travniki. V zadnjih 150 letih se je Ljubljana močno razširila, pozidava pa je bila najbolj usmerjena proti severnem delu kotline, na Ljubljansko polje. Posledično je bil poglobitveni proces spreminjanja rabe tal urbanizacija (Kladnik in Petek, 2007).

Največja reka v Ljubljanski kotlini je Sava, z levimi pritoki Tržiško Bistrico, Kokro in Kamniško Bistrico ter desnima pritokoma Soro in Ljubljanico (Senegačnik, 2012). Reka Ljubljanica teče preko Ljubljanskega barja in skozi mestno središče Ljubljane. Je zelo vodnata, saj njena zbirna površina obsega skoraj 2.000 km², porečje pa ima predvsem kraški značaj. Pri poplavih, ki so predvsem pogoste na Ljubljanskem barju, se voda zadrži dalj časa. V sušnem obdobju Ljubljanico napajajo kraške podzemne vode. Posledično ima reka Sava, sicer nekoliko večjo površino porečja, na sotočju z Ljubljanico približno štirikrat večje pretoke poplav in skoraj desetkrat večje pretoke nizkih voda.

Za Ljubljano z okolico je značilno zmerno celinsko podnebje osrednje Slovenije, z jasno določenimi letnimi časi (Ogrin, 1996). Zaradi lokacije kotline, obdane z višjimi gorami, je v njej pogost pojav temperaturni obrat. V hladnih mesecih je tako v večjem delu kotline zelo pogosta megla (Senegačnik, 2012). Dolgoletne meritve (1986 – 2016) na meteorološki postaji Ljubljana Bežigrad kažejo, da je v zadnjih tridesetih letih v povprečju padlo 1.355 mm padavin letno, povprečna letna temperatura pa je znašala 11 °C (Arhiv meritev, 2017). Najbolj mokra je bila jesen (439 mm), sledili pa so ji poletje (384 mm), pomlad (289 mm) in zima (243 mm). Glede na 56-letno povprečje (1.380 mm) od leta 1961 do 2016 se povprečna letna količina padavin zmanjšuje, viški padavin pa se iz poletnih vse bolj prenašajo v jesenske mesece (slika 2). Ne glede na to pa sta bili najvišja in najnižja letna količina padavin izmerjeni v zadnjih desetih letih, leta 2011 (998 mm) in leta 2014 (1.851 mm). Srednje letne temperature so v zadnjih tridesetih letih nihale med 0,8 °C januarja in 21,6 °C v juliju. V primerjavi s povprečjem daljšega časovnega obdobja (56 let) se temperature v Ljubljani niso občutno spremenile.



Slika 2: Povprečne mesečne vsote padavin za dolgoletni povprečji na postaji Ljubljana Bežigrad
Figure 2: Average monthly precipitation sums for two long-term averages at the Ljubljana Bežigrad meteorological station

Površina raziskovalne ploskve je približno 600 m², je ravna in porasla z redno košeno travo. Na južni in zahodni strani je omejena s stavbama, na severni in vzhodni pa s parkiriščem (slika 3). Na zahodnem delu raziskovalne ploskve raste dve skupini približno 60 let starih dreves: severo-zahodno črni bori (*Pinus nigra* Arnold), jugo-zahodno pa navadne breze (*Betula pendula* Roth.).



Slika 3: Raziskovalna ploskev
Figure 3: Study plot

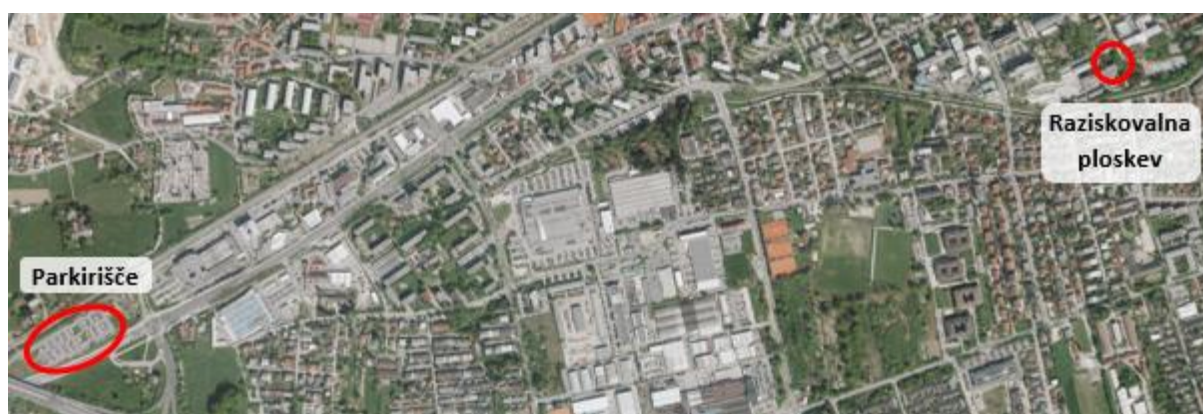
Črni bor je vednozeleno iglasto drevo, ki doseže višino do 40 m, premer debla do 1,3 m in starost do 500 let. Mlajša drevesa imajo široko valjasto krošnjo z navzgor zavihanimi konci vej, oblika krošnje starejših dreves pa je valjasta. Skorja je razbrazdana in debela. Meri lahko tudi do 10 cm, njena barva pa je sivo črna (Kotar in Brus, 1999). Iglice rastejo po dve skupaj, so zašiljene in bodeče, dolge od 8 do 16 cm in debele med 1 in 2 mm, odpadejo pa šele po 4 do 8 letih. Črni bor je enodomna in vetrocvetna vrsta, ki cveti maja, v naravi pa se razmnožuje samo s semenom. V naravi ga najpogosteje najdemo na strmih skalnatih pobočjih, saj uspeva tudi na plitvih kamnitih tleh. Za rast potrebuje precej svetlobe in poletne toplote, je pa odporen proti mrazu, suši in močnemu vetru. Najdemo ga predvsem v južni Evropi, v Sloveniji pa

njegovih naravnih nahajališč ni veliko. Zaradi skromnih rastiščnih potreb so ga v 19. stoletju nasadili na opustošenih goličavah na Krasu. Pogosto raste v mestih, saj je izmed iglavcev eden od najbolj odpornih proti onesnaženemu zraku (Brus, 2012). V preteklosti so ga zasadili ob progi Dunaj-Trst, zato je pogost ob železnicah, večkrat pa ga najdemo tudi v mestnih parkih, saj zaradi temne barve krošnje ustvarja zanimiv kontrast med drevesi (Kotar in Brus, 1999).

Navadna breza je listopadno drevo z nepravilno krošnjo, ki je dokaj redka, pri mladih drevesih ozka, s starostjo pa se širi. V mladosti breza raste zelo hitro, vendar se rast kmalu umiri. Doseže starost do 100 let, v višino zraste do 30 m, premer debla, ki je pokrito z belo skorjo, pa doseže 0,6 m (Kotar in Brus, 1999). Belo obarvane plasti plutastih celic so tanke in slabo raztegljive, zato z rastjo drevesa pokajo in se luščijo, kar ustvarja značilen videz debla breze. Listi so goli, enostavne rombaste oblike, dolgi od 4 do 7 cm in široki od 2 do 4 cm. Rastejo na približno 3 cm dolgem, prav tako gladkem peclju. Tudi breza je enodomna in vetrocvetna vrsta, ki cveti hkrati z olistanjem v aprilu in maju. Razmnožuje se s spomladansko setvijo s semeni, lahko pa tudi vegetativno s potaknjenci in cepljenjem. Njene rastiščne potrebe so skromne, najbolj pa ji ustrezajo rahle, sveže, nekoliko zakisane peščeno ilovnate površine. Za rast potrebuje veliko svetlobe, zato ne raste v strnjenih sestojih, odporna je proti mrazu, slabo pa prenaša sušo in visoke temperature (Brus, 2012). Raste po vsej Evropi, razen v Španiji, na Portugalskem in v Grčiji, prav tako jo, razen v sredozemskem svetu, najdemo po vsej Sloveniji, kjer je naravno razširjena. Cenjena je zaradi bele skorje in nežne krošnje, je priljubljeno okrasno drevo, zato jo pogosto zasledimo, da raste posamezno ali v manjših skupinah (Kotar in Brus, 1999).

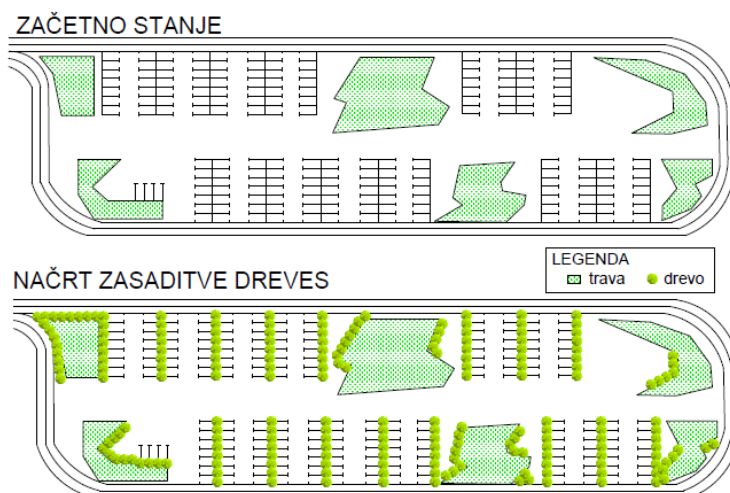
3.1.1 Primer zasaditve parkirišča

Vpliv prestrezanja padavin na zmanjšanje odtoka smo analizirali za primer parkirišča na Dolgem mostu pred njegovo preureditvijo leta 2015, ki se nahaja le 2,3 km jugo-zahodno od raziskovalne ploskve (slika 4) in je veliko 12.677 m². Skupno ponuja 200 parkirnih mest, med njimi pa se na 1.368 m² nahajajo zelene površine, porasle s travo, medtem ko je ostanek parkirišča asfaltiran.



Slika 4: Lokacija parkirišča Dolgi most
Figure 4: The location of the Dolgi most parking lot

Za oceno zmanjšanja površinskega odtoka smo pripravili shematični prikaz parkirišča glede na dejansko stanje in načrt zasaditve dreves (slika 5). Drevesa bi zasadili na robovih in med vsako drugo vrsto parkirnih mest. Površina, ki bi jo pokrila tako zasajena drevesa, bi znašala 1.250 m², kar ustreza 10 % površine celotnega parkirišča.

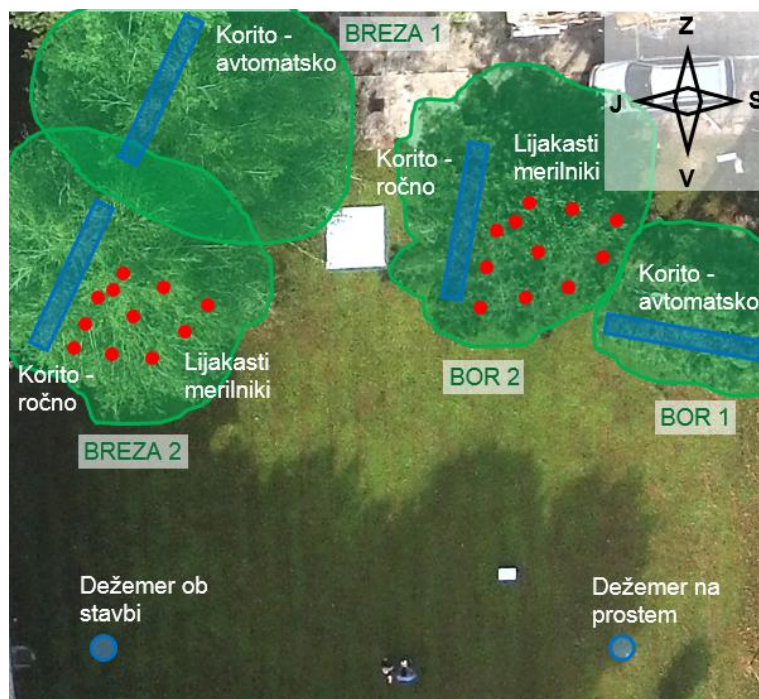


Slika 5: Shema parkirišča in načrt zasaditve dreves

Figure 5: The parking lot outline and the design of the potential tree planting

3.2 Merska oprema in merske metode

Na raziskovalni ploskvi smo merili padavine na prostem (P), prepuščene padavine (TF) pod dvema navadnima brezama in dvema črnima boroma ter odtok po deblu (SF) enega drevesa vsake vrste (slika 6). Za ta drevesa smo določili tudi številne vegetacijske spremenljivke. Mikrostrukturo padavin smo merili na strehi bližnje stavbe.



Slika 6: Shematični prikaz postavitve različnih merilnikov na raziskovalni ploskvi

Figure 6: Schematic of the location of the different measurement devices at the study plot

3.2.1 Meritve padavin (P)

Padavine smo merili na raziskovalni ploskvi z dvema avtomatičnima dežemeroma (Onset RG2-M). Dežemera imata prekucnik, umerjen na 0,2 mm na tip, podatki o datumu in uri pa se ob vsakem tipu shranjujejo na avtomatični zapisovalec podatkov (Onset HOBO Event). Podatki o padavinah, uporabljenih v analizah, so bili izmerjeni z dežemerom »na prostem«,

postavljenim na severo-vzhodnem delu raziskovalne ploskve (slika 7). Ta se nahaja na vogalu med parkiriščema, zato v neposredni bližini ni objektov, ki bi vplivali na meritve padavin. Drugi dežemer »ob stavbi« pa je bil 23. februarja 2017 postavljen na jugo-vzhodnem delu raziskovalne ploskve, na preseku linij prvega dežemera in breze (slika 6). Z njim smo želeli preveriti, kako bližnja stavba vpliva na izmerjeno količino padavin na prostem in s tem prepuščenih padavin pod brezo. Podatke o padavinah smo razdelili na posamezne dogodke, ki jih je ločevalo vsaj 4 urno suho obdobje, to je med koncem prvega in začetkom drugega dogodka je minilo vsaj 4 ure brez padavin. Po potrebi smo dolžino suhega obdobja prilagajali glede na opazovane splošne klimatske razmere ob nastopu dogodka.



Slika 7: Avtomatski dežemer »na prostem«
Figure 7: Rain gauge tipping bucket "in the open"

Na strehi bližnje stavbe je bil postavljen disdrometer OTT Parsivel (slika 8), s katerim smo merili količino padavin, intenziteto, število kapljic, njihov premer in hitrost. Iz izmerjenih vrednosti smo izračunali tudi mediano volumnskega premera (MVD), ki določa premer kapljic dogodka, za katerega velja, da je imela polovica vseh zabeleženih kapljic manjši, polovica pa večji premer. Izračunali smo ga iz podatkov mejnih vrednosti razredov premerov kapljic (b_i), razmerja spektrov vsebnosti tekoče vode posameznega razreda (pro_i) in kumulativnega razmerja tega spektra (cum_i) (Nanko in sod., 2016):

$$MVD = b_i + \left(\frac{(0,5 - cum_{i-1})}{pro_i} \right) \cdot (b_{i+1} - b_i) \quad (2)$$

Razdalja med drevesi in disdrometrom (45 m) je bila dovolj majhna, da je bila mikrostruktura padavin, izmerjena z disdrometrom, reprezentativna tudi na raziskovalni ploskvi (Tapiador in sod., 2010), poleg tega pa je tudi višina dreves približno enaka višini strehe (14,45 m).

Merilna površina disdrometra znaša 54 cm² in je pokrita z laserskim žarkom. Ko dežna kapljica pade skozi laserski žarek, se oddajna amplituda signala za določeno obdobje zmanjša. Iz trajanja oslabiljenega signala in njegove amplitude inštrument določi hitrost in velikost dežne kapljice. Tipične velikosti in hitrosti dežnih kapljic povzročijo oslabiljenje signala med 0,4 in 1,1 ms (Löffler-Mang in Joss, 2000). Vsako minuto so padavinski delci razvrščeni v 32 razredov hitrosti in velikosti, za katere smo v disertaciji upoštevali njihove povprečne vrednosti (preglednica 1). Kapljice s premerom manjšim od 0,25 mm so prav tako uvrščene v najmanjši razred, saj so premajhne, da bi jih inštrument razvrstil ločeno. Potrebno je poudariti tudi, da smo v analizi uporabili podatke disdrometra OTT Parsivel, saj se ocene porazdelitve velikosti dežnih kapljic glede na uporabljen inštrument, na primer OTT Parsivel, POSS, LPM300 ali 2DVD, med seboj lahko razlikujejo (Petan in sod., 2010; You in sod., 2015; Park in sod., 2017).



Slika 8: Disdrometer na strehi
Figure 8: The disdrometer at the rooftop

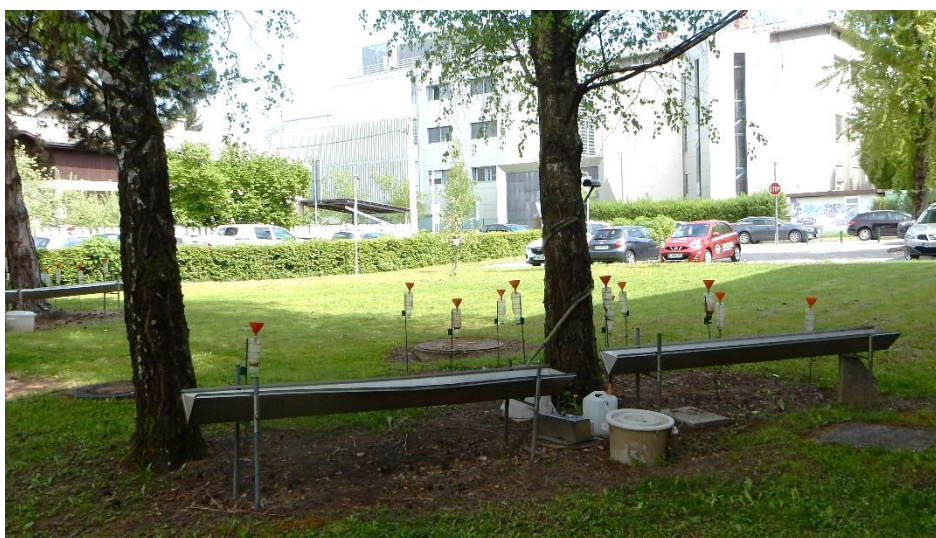
Preglednica 1: Podatki o razredih hitrosti in velikosti dežnih kapljic, izmerjenih z disdrometrom OTT Parsivel (OTT Hydromet, 2016)

Table 1: The raindrops size and velocity classes measured by the OTT Parsivel disdrometer

Razredi premera dežnih kapljic			Razredi hitrosti dežnih kapljic		
Povprečje [mm]	Spodnja meja [mm]	Zgornja meja [mm]	Povprečje [mm]	Spodnja meja [mm]	Zgornja meja [mm]
			0,05	0	0,1
			0,15	0,1	0,2
0,312	0,2495	0,3745	0,25	0,2	0,3
0,437	0,3745	0,4995	0,35	0,3	0,4
0,562	0,4995	0,6245	0,45	0,4	0,5
0,687	0,6245	0,7495	0,55	0,5	0,6
0,812	0,7495	0,8745	0,65	0,6	0,7
0,937	0,8745	0,9995	0,75	0,7	0,8
1,062	0,9995	1,1245	0,85	0,8	0,9
1,187	1,1245	1,25	0,95	0,9	1
1,375	1,25	1,5	1,1	1	1,2
1,625	1,5	1,75	1,3	1,2	1,4
1,875	1,75	2	1,5	1,4	1,6
2,125	2	2,25	1,7	1,6	1,8
2,375	2,25	2,5	1,9	1,8	2
2,75	2,5	3	2,2	2	2,4
3,25	3	3,5	2,6	2,4	2,8
3,75	3,5	4	3	2,8	3,2
4,25	4	4,5	3,4	3,2	3,6
4,75	4,5	5	3,8	3,6	4
5,5	5	6	4,4	4	4,8
6,5	6	7	5,2	4,8	5,6
7,5	7	8	6	5,6	6,4
8,5	8	9	6,8	6,4	7,2
9,5	9	10	7,6	7,2	8
11	10	12	8,8	8	9,6
13	12	14	10,4	9,6	11,2
15	14	16	12	11,2	12,8
17	16	18	13,6	12,8	14,4
19	18	20	15,2	14,4	16
21,5	20	23	17,6	16	19,2
24,5	23	26	20,8	19,2	22,4

3.2.2 Meritve prepuščenih padavin (TF)

Prepuščene padavine (TF) smo merili s kombinacijo nepremičnih korit in premičnih lijakastih merilnikov (sliki 6 in 9), kar je po mnenju mnogih raziskovalcev najbolj reprezentativno (Bruijnzeel, 2000; Šraj in sod., 2008a; Carlyle-Moses in sod., 2014; Zimmermann in sod., 2014). Pod vsako skupino dreves smo od debela proti robu drevesne krošnje postavili dve kovinski koriti (ostrorobi s površino $0,75 \text{ m}^2$). Prepuščene padavine iz enega korita so se stekale v plastični zbiralnik ($10 \text{ l} + 50 \text{ l}$), ki smo ga praznili ročno, če se je le dalo po vsakem padavinskem dogodku. Prepuščene padavine, zbrane v drugem koritu, pa so se stekale na prekucnik (Unidata 6506G; 50 ml/tip) z avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset HOBO Event). Pod vsako skupino dreves smo postavili tudi 11 lijakastih merilnikov (površina 78.5 cm^2 oziroma $0,008 \text{ m}^2$), ki smo jih ročno praznili istočasno kot korita. V povprečju smo jih prestavljali na vsakih 10 dogodkov, v letu 2016 pa njihovega položaja nismo spreminjali, saj smo jih postavili v koncentrično mrežo in z njimi spremljali prostorsko porazdelitev TF (slika 10).



Slika 9: Koriti in lijakasti merilniki za merjenje TF pod brezo
Figure 9: Through and funnel type TF gauges under the birch trees



Slika 10: Postavitev lijakastih točkovnih merilnikov TF v letu 2016
Figure 10: The location of the funnel type TF gauges during 2016

Kowalska in sodelavci (2016) so raziskovali prostorsko spremenljivost TF in ugotovili, da je variabilnost v prostorski razporeditvi količine prepuščenih padavin odvisna od velikosti zbirne površine merilnika ter od trajanja meritev. Razlike so večje, če imajo merilniki majhne površine, saj pokrivajo le manjši del krošnje z zelo specifičnimi lastnostmi. Večje razlike pa lahko opazimo tudi pri krajših obdobjih meritev. Ker smo meritve v primerjavi z ostalimi študijami izvajali daljše obdobje (tri leta in pol), smo splošne vrednosti prepuščenih padavin na dogodek izračunali iz uteženega povprečja rezultatov vseh merilnikov, pri čemer smo kot utež upoštevali njihovo površino. V analizah časovnega poteka TF smo upoštevali podatke s korita z avtomatskim zapisovanjem, v analizah prostorske spremenljivosti TF pa točkovne lijakaste merilnike.

3.2.3 Meritve odtoka po deblu (SF)

Odtok po deblu (SF) smo merili na enem izmed dreves vsake vrste (breza 2 in bor 1 na sliki 6), saj so lastnosti obeh dreves iste vrste med seboj zelo podobne, zaradi česar meritve le na enem drevesu zadostujejo potrebnemu vzorcu. Okrog drevesnega debla na približno 0,5 m visokem odseku smo ovili gumijasto polcevko, zatesnjeno s silikonom in pritrjeno z žebli, v katero so se stekale padavine, ki so pritekale po drevesnem deblu (slika 11). SF bora je zelo majhen, zato smo v tem primeru polcevko povezali z ozkim zbiralnikom (1,5 l) z ročnim praznjenjem. Podatke smo pobirali istočasno kot na lijakastih merilnikih in koritih. V primeru breze pa je SF večji, kar je omogočalo merjenje z avtomatskim merilnikom. Padavine, ki so pritekale po deblu, so se po polcevki stekale na prekucnik (Onset RG2-M, 0,2 mm/tip) z avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset HOBO Event).

Količino izmerjenega odtoka po deblu smo delili s projicirano površino drevesne krošnje posameznega drevesa, da smo dobili vrednost SF, reprezentativno za drevo (Levia in sod., 2010; Livesley in sod., 2014; Siegert in Levia, 2014). Tako izračunani deleži SF so lahko zelo majhni in težko primerljivi s celotno zbrano količino padavin pod drevesnim deblom, ki lahko pri obilnejših dogodkih v primeru gladke skorje drevesa presega več 10 litrov. Glede na to raziskovalci predlagajo drugačne načine izražanja vrednosti SF za prispevno površino drevesa. Namesto celotne površine projicirane drevesne krošnje bi lahko upoštevali prečni prerez debla ali razmerje prelivanja (ang. *funneling ratio*), ki prav tako temelji na površini drevesnega debla (Levia in Frost, 2003). Ker pa se v praksi SF še vedno najpogosteje računa glede na prispevno površino drevesne krošnje, smo se za ta pristop odločili tudi v disertaciji.



Slika 11: Gumijasta polcevka za zbiranje odtoka po deblu breze
Figure 11: The rubber collar for SF collection under the birch tree

3.2.4 Ostale meteorološke spremenljivke

Podatke o vrednostih ostalih meteoroloških spremenljivk smo pridobili z najbližje meteorološke postaje nacionalne merilne mreže Agencije Republike Slovenije za okolje, postaje Ljubljana – Bežigrad (Arhiv meritev, 2017). Od raziskovalne ploskve je oddaljena 3 km v severo-vzhodni smeri. Avtomatska meteorološka postaja beleži zračni pritisk, temperaturo in vlažnost zraka na višini 2 m, temperaturo zraka 5 cm nad tlemi, temperaturo tal na različnih globinah (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 cm), smer in hitrost vetra, stanje tal, vidnost, trajanje sončnega obsevanja, oblačnost, padavine, snežno odejo, meteorološke pojave (npr. meglo, žled, poledico, dež, sneženje, nevihte ...), globalno in difuzno sončno obsevanje, UVB-sevanje, eritemalno uteženo UV-sevanje in radioaktivnost. Postaja leži na dnu Ljubljanske kotline in v središču mesta, zaradi česar je reprezentativna za mesto in bližnjo okolico (Nadbath, 2008).

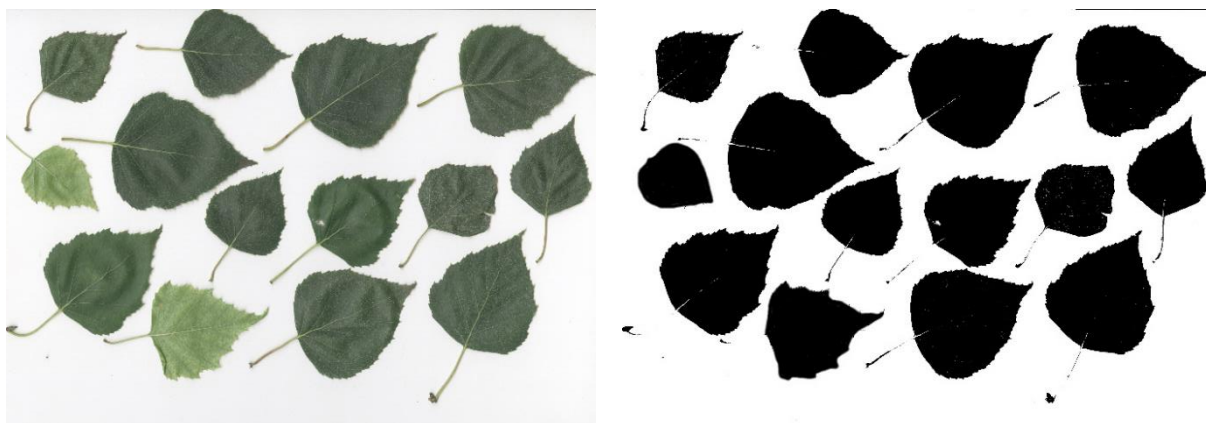
Dnevni meteorološki podatki, zabeleženi s pol urnim časovnim korakom, ki smo jih uporabili v analizi, so: temperatura in vlažnost zraka na 2 m ter smer in hitrost vetra. Čeprav lastnosti vetra niso bile merjene na raziskovalni ploskvi, kjer bi se lahko zaradi vpliva bližnjih stavb razlikovale, smo podatke vseeno uporabili kot pokazatelje splošne vremenske situacije.

3.2.5 Določanje vegetacijskih spremenljivk

Indeks listne površine (LAI)

Indeks listne površine (LAI) smo v disertaciji določili na dva načina: za brezo z neposredno nedestruktivno metodo zbiranja odpadlega listja in za obe drevesni vrsti s posredno nekontaktno metodo meritev z optičnim senzorjem LAI-2200c (LI-COR, Inc.).

Pri določanju LAI iz odpadlega listja je bilo delo razdeljeno na dva sklopa zbiranja in obdelave svežega ter suhega listja. 15. julija 2015 smo z breze nabrali 600 svežih listov, ki smo jih še isti dan skenirali v 37 serijah. Celotna površina slike je bila enaka 623,7 cm² (21 cm x 29,7 cm), kar je enako 8699840 pikslov (2480 x 3508). Kasneje smo z obdelavo teh slik v programu ImageJ (Schneider in sod., 2012) določili površino svežih listov. Pri tem smo barvne slike (8-bitne) pretvorili v črno-bele slike (1-bitne), za katere smo pregledali točnost pretvorbe in jo po potrebi dopolnili (slika 12). Iz histograma posamezne slike smo odčitali število črnih in število belih pikslov, ki so predstavljali delež črne površine (listje) in bele površine (ozadje) na sliki, iz katerega smo preračunali površino listja. Liste smo nato približno dva tedna sušili na zraku in jih med 3. in 4. avgustom 2015 v treh serijah do konca posušili še v peči pri 105 °C (sušilna peč Thermo scientific Function Line, Heraeus Holding) do konstante mase. Maso listja (m_L) smo določili na 0,001 g natančno (laboratorijska tehtnica PL1502-S, Mettler Toledo LLC). SLA smo izračunali iz razmerja določene površine in mase listja.



Slika 12: Primer obdelave slike za določanje površine svežega listja
Figure 12: An example of image processing for estimation of the fresh leaf area

Med 10. oktobrom 2015 in 15. novembrom 2015 smo pod brezo z dvema zabožkoma površine 7.420 cm^2 ($35 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$) zbirali odpadlo listje (slika 13). Zabožka smo spraznili dvakrat v celotni sezoni odpadanja listja. Zbrano listje smo najprej posušili na zraku, nato pa še v petih serijah v peči pri 105°C (sušilna peč Thermo scientific Function Line, Heraeus Holding) do konstante mase. Glede na površino zabožkov in določeno suho maso listja smo izračunali količino odpadlega listja na enoto površine tal $[\text{kg}/\text{m}^2]$. Vrednost LAI $[\text{m}^2/\text{m}^2]$ po metodi zbiranja odpadlega listja smo izračunali kot zmnožek SLA $[\text{m}^2/\text{kg}]$ in količine odpadlega listja $[\text{kg}/\text{m}^2]$.



Slika 13: Zabožek za zbiranje odpadlega listja pod brezo
Figure 13: The box for collecting the litter under the birch trees

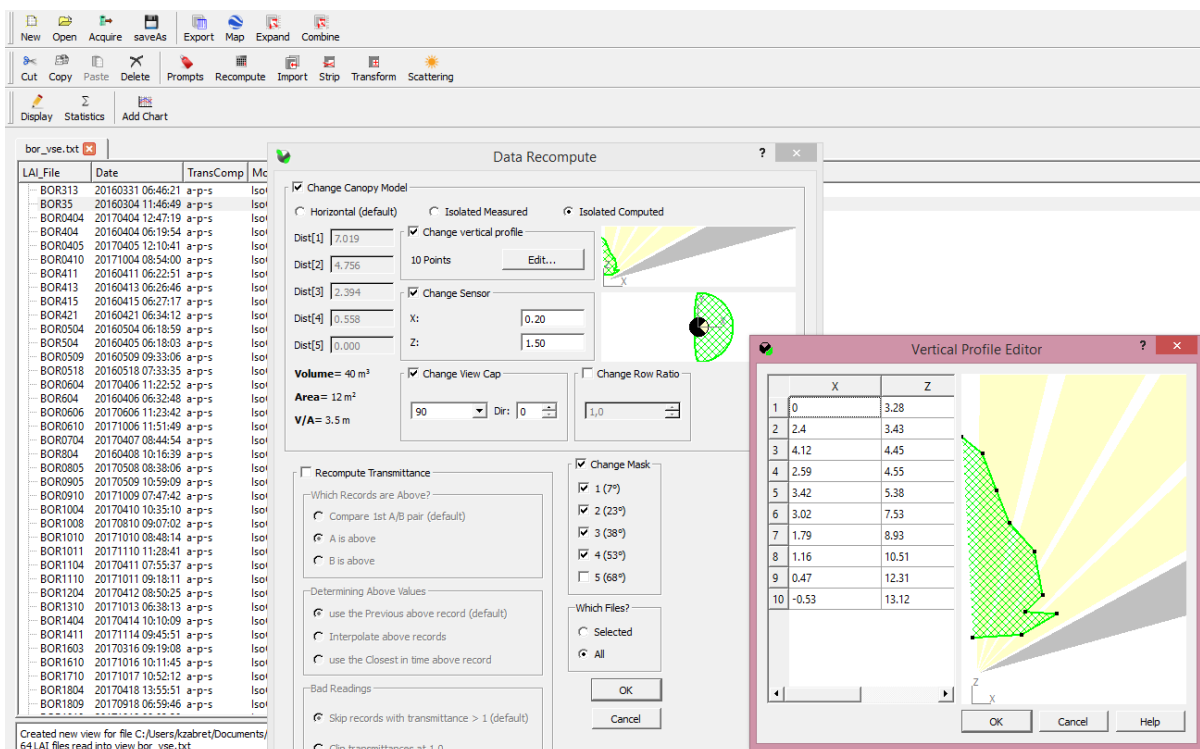
LAI pa smo merili tudi z optičnim senzorjem LAI-2200c Plant canopy Analyzer (LI-COR, Inc.), ki je omogočal določitev vrednosti LAI za obe drevesni vrsti in dnevno spremljanje sprememb v obdobjih rasti in odpadanja listja. Instrument je sestavljen iz konzole in optičnega senzorja v merilni palici. Konzola se uporablja za spremljanje meritev in takojšnje pregledovanje rezultatov, z vgrajenim GPS sistemom pa omogoča sledenje izmerjenim vrednostim LAI na večjem območju. Za izvajanje meritev ni nujno potrebna, saj te lahko potekajo tudi direktno preko merilne palice. Ta je sestavljena iz optičnega senzorja, leč, optičnega filtra in zrcala. Leče tipa »ribje oko« omogočajo hemisferično snemanje drevesne krošnje, pet senzorjev, nameščenih v koncentričnem krogu, pa omogoča širok zajem vrednosti v naslednjih območjih: $0^\circ - 12,3^\circ$; $16,7^\circ - 28,6^\circ$; $32,4^\circ - 43,4^\circ$; $47,3^\circ - 58,1^\circ$ in $62,3^\circ - 74,1^\circ$. Tako senzor LAI-2200c hkrati za pet zenitnih kotov izmeri zmanjšanje difuznega sevanja neba. Meritve je potrebno izvajati na prostem in pod vegetacijo, usmerjeno navzgor. Iz rezultatov meritev naprava avtomatično preračuna zmanjšanje sevanja pod vegetacijo, kar služi kot osnova za določitev vrednosti LAI (LI-COR Inc., 2016).

Z meritvami smo pričeli marca 2016 in nadaljevali do decembra 2017. V prehodnih fenofazah (olistanje in odpadanje listja/iglic) smo meritve izvajali vsak dan, če je to dopuščalo vreme. V obdobjih vegetacije in mirovanja smo meritve izvajali v povprečju enkrat na mesec. Ker smo meritve izvajali pod posameznimi drevesi, smo sledili protokolu meritev za izolirana drevesa (LI-COR Inc., 2016). Meritve smo izvajali v štirih ponovitvah, izmenično na prostem v eni neovirani točki in pod vsakim drevesom v štirih točkah (slika 14). Te točke smo določili pred začetkom meritev, pri čemer smo pazili, da v zajemnem območju leče ni bilo bližnjih stavb in da so krošnje nad merilnimi točkami pripadale le enemu drevesu, torej se med seboj niso prekrivale. Točke smo označili na drevesnem deblu $1,5 \text{ m}$ od tal, kar je omogočalo, da smo meritve vedno ponavljali v istih točkah. Pri tem smo uporabljali 90° zaslonko na leči, da deblo ni bilo vključeno v vidno polje leče. Meritve smo izvajali v suhem vremenu in, če je bilo le mogoče, pri enakomerno oblačnem nebu.



Slika 14: Meritve LAI z optičnim senzorjem LAI-2200c pod brezo
Figure 14: The measurements of LAI with optical sensor LAI-2200c under the birch tree

Izmerjene vrednosti LAI smo naknadno obdelali v programu FV2200 (LI-COR Biosciences, 2010). Za vsako drevo smo iz fotografij (fotoaparati Sony DSC-RX100M2) določili njegov vertikalni profil za del, kjer so se izvajale meritve, in jih vnesli v program (slika 15). Glede na ta profil smo določili število krogov senzorja, ki so bili upoštevani pri korekciji vrednosti LAI. Izolirane drevesne krošnje so določene z robom, do katerega segajo, medtem ko se v gozdu prekrivajo. Senzor, ki zaznava prehajanje svetlobe, lahko glede na obliko krošnje in višino merjenja pri meritvi zajame tudi jasno nebo za robom krošnje, kar vpliva na končne vrednosti. Za brezo in bor smo tako upoštevali 4 kroge merilnih senzorjev. V primeru, da je bilo v času merjenja vreme sončno in nebo jasno, smo izvedli še popravke zaradi sipanja svetlobe (ang. *scattering corrections*).



Slika 15: Primer korekcije meritev LAI za črni bor v programu FV2200
Figure 15: An example of LAI measurement corrections for Austrian pine tree in FV2200 software

Meritve LAI za iglavce je potrebno pri uporabi optičnih senzorjev obravnavati drugače. Pri drevesih, ki imajo namesto listja iglice, je prehajanje svetlobe drugačno, pa tudi iglice so razporejene drugače kot listje. Te največkrat rastejo v šopih in ne prekrivajo olesenelih delov drevesa tako dobro kot listje, zato optični senzori pogosto podcenijo dejanske vrednosti LAI (Stenberg in sod., 1994; Jonckheere in sod., 2005). Izmerjene (efektivne) vrednosti LAI je potrebno naknadno popraviti s korekcijskim koeficientom (F), ki je definiran kot razmerje med dejansko vrednostjo in efektivno vrednostjo LAI (Jonckheere in sod., 2005). Glede na priporočene vrednosti korekcijskih koeficientov (preglednica 2), smo izmerjene vrednosti LAI za bor pomnožili z 1,9. Popravljenе vrednosti smo upoštevali v nadaljnji analizi.

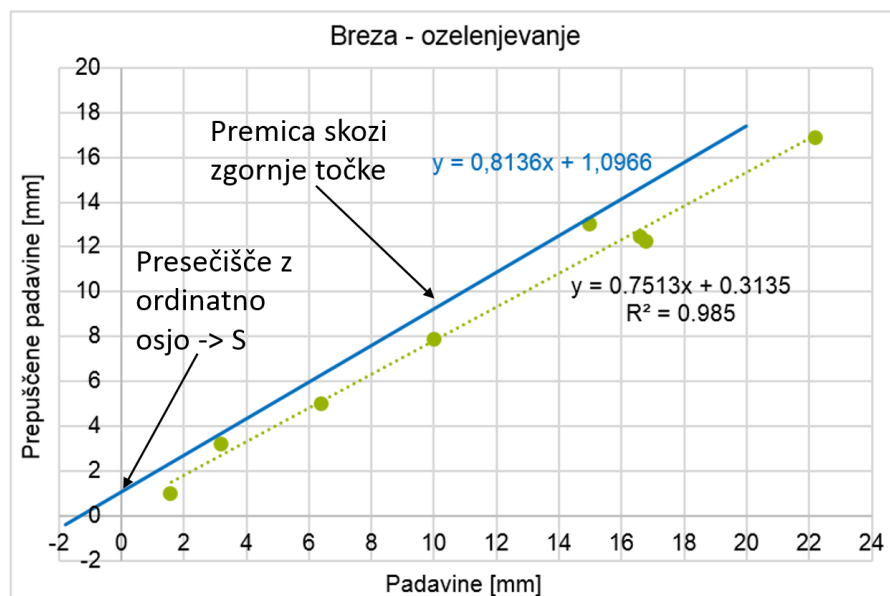
Preglednica 2: Vrednosti korekcijskih koeficientov (F), predlagane za bor v drugih študijah

Table 2: The values of the correction coefficient (F) proposed for pine tree in other studies

Drevesna vrsta	Korekcijski koeficient F	Vir
Rdeči bor (<i>Pinus sylvestris</i>)	1,25 – 2,5	Smolander in sod. (1994)
Rdeči bor (<i>Pinus sylvestris</i>)	1,7	Stenberg in sod. (1994)
Rdeči in črni bor (<i>Pinus nigra</i> , <i>Pinus sylvestris</i>)	1,93 - 2,12	Jonckheere in sod. (2005)
Rdeči bor (<i>Pinus sylvestris</i>)	1,65	Kuusk in sod. (2013)

Skladiščna zmogljivost krošnje (S)

Skladiščno zmogljivost krošnje (S) smo izračunali iz izmerjenih podatkov o padavinah in prepuščenih padavinah po grafični metodi Leytona (Leyton in ostali, 1967). Po tej metodi na grafu prepuščenih padavin v odvisnosti od padavin skozi zgornje točke narišemo premico (lika 16). Te točke naj bi namreč predstavljale dogodke z minimalnimi evaporacijskimi izgubami (nočni dogodki). Padavine, upoštevane pri izrisu grafa, so večje od 1,5 mm oziroma tolikšne, da zapolnijo skladiščno zmogljivost krošnje. S je absolutna vrednost točke, kjer premica seka ordinatno os.



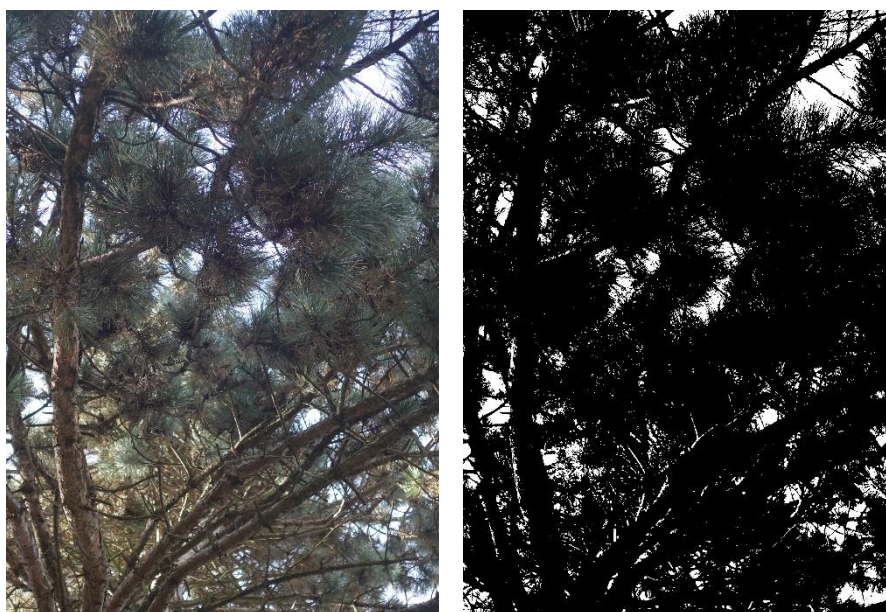
Slika 16: Primer grafa za določitev S po grafični metodi Leytona

Figure 16: An example of S determination according to Leyton's graphical method

Zastrtost s krošnjo

Zastrtost s krošnjo opisuje delež neba, ki je na neki lokaciji pod drevesom prekrit z vejami in listjem (Frasson in Krajewski, 2011). Določali smo jo v točkah, v katerih so tekom leta 2016

stali točkovni lijakasti merilniki prepuščenih padavin (slika 10). Na višini 1,4 m nad tlemi smo v obdobju polno olistane krošnje točno nad merilniki posneli fotografije drevesne krošnje z 1,4-kratno povečavo (fotoaparater Sony DSC-RX100M2). Fotoaparater smo postavili pravokotno na tla in hkrati pravokotno na drevesno deblo ter ga usmerili navzgor. V programu ImageJ (Schneider in sod., 2012) smo slike obrezali na velikost 2200 x 3080 pikslov ter jih pretvorili v 1-bitne (črno-bele) slike (slika 17). Iz histograma slike smo prebrali število belih (nebo) in črnih (elementi krošnje) pikslov na sliki, na podlagi česar smo določili delež neba, zastrtega s krošnjo.



Slika 17: Originalna in obdelana fotografija za določitev zastrtosti s krošnjo za črni bor
Figure 17: Original and processed photograph for canopy coverage determination in the case of Austrian pine tree

Fenofaze

Fenofaze smo določali glede na opazovanje krošnje breze in meritve LAI. Za vsako leto izvajanja meritev smo določili datume začetka poganjanja listja, polne ozelenitve krošnje, začetka odpadanja listja in gole krošnje. Tako smo za brezo določili štiri fenofaze: olistanje, obdobje vegetacije, odpadanje listja in obdobje mirovanja.

Po posameznih fenofazah se spreminjajo tudi lastnosti krošnje bora, kar pa ni tako očitno kot pri brezi. Po naših opazovanjih bolj intenzivno odpadanje iglic sovпада z obdobjem odpadanja listja pri brezi, načeloma pa bor vse iglice zamenja v obdobju 4 - 8 let (Brus, 2012). Da bi bile primerjave rezultatov po fenofazah mogoče za obe drevesni vrsti, smo tudi za bor rezultate meritev razdelili po istih datumih kot za brezo.

Projicirana površina drevesne krošnje

Površino drevesnih krošenj smo določili kot tlorsko projekcijo posamezne krošnje s pomočjo zračnih posnetkov, posnetih z dronom 15. 6. 2015. V času fotografiranja smo na tla raziskovalne ploskve položili 2 x 2 m veliko platno, ki je kasneje služilo kot referenčni element za določanje merila slike. S funkcijo Measure – Area v programu AutoCad (Autodesk Inc.) smo določili površino posamezne drevesne krošnje in površino referenčnega elementa (slika 18). V programu izmerjeno površino drevesne krošnje smo preračunali glede na merilo slike.

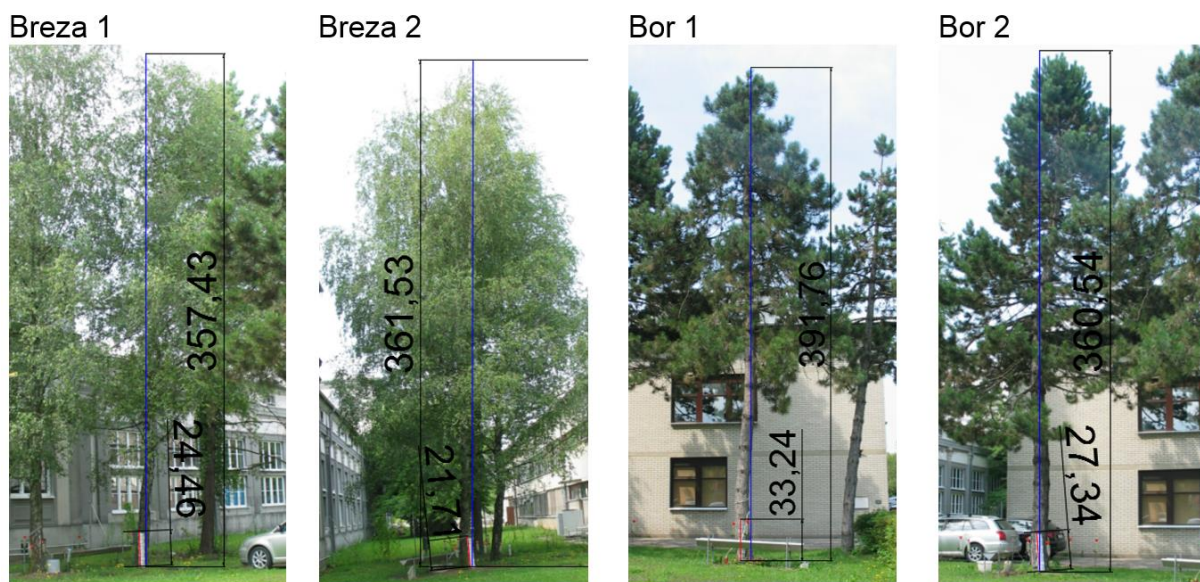


Slika 18: Določitev površine krošnje navadne breze 2 (levo) in črnega bora 2 (desno) v programu AutoCad

Figure 18: Canopy area determination for common silver birch 2 (left) and Austrian pine 2 (right) trees in AutoCad software

Višina drevesa

Tudi pri določanju višine dreves smo uporabili fotografije, ki smo jih posneli v visoki resoluciji (fotoaparat Sony DSC-RX100M2) in taki oddaljenosti, da drevesa niso bila popačena (20 m). Ob drevesnih deblih smo navpično postavili metrske letve, ki so služile za referenčni element poznane višine pri določanju merila. Fotografije smo obdelali v programu AutoCad (Autodesk Inc.), v katerem smo izmerili višino letve in višino drevesa na fotografiji (slika 19). Glede na merilo posnete fotografije, ki smo ga določili iz izmerjene in dejanske višine letve, smo izračunali dejansko višino dreves.



Slika 19: Določitev višine dreves in letve na fotografijah

Figure 19: Determination of the tree and lath height from the photographs

Prsni premer drevesnega debla (DBH)

Prsni premer drevesnega debla (DBH) smo določali na višini 1,3 m od tal (Nature Conservation Practice Note, 2006). Z metrom smo določili potrebno višino, na kateri smo okrog drevesnega debla ovili merilni trak in izmerili njegov obseg (slika 20). Ker so vsa debla skoraj pravilne

okrogle oblike, smo z uporabo enačb za obseg kroga iz izmerjenega obsega izračunali premer drevesnega debla.



Slika 20: Meritve obsega debla breze 1 na višini 1,3 m od tal

Figure 20: Measurements of tree trunk circumference for birch 1 at the height of 1.3 m

Naklon vej

Različen naklon drevesnih vej pri brezi in boru je razviden že na prvi pogled, saj so veje breze usmerjene navzgor, veje bora pa večinoma navzdol. Na fotografijah, ki smo jih uporabili tudi za določanje višine dreves, smo za vsako drevo izmerili kote med drevesnim deblom in vsemi glavnimi vejami, ki iz njega rastejo (slika 21). Glede na poznano merilo fotografij, določeno na podlagi merilnih letev, smo izračunali dejanske vrednosti kotov med vejami in deblom.



Slika 21: Določanje kotov med deblom drevesa in glavnimi vejami za navadno brezo 2 (levo) in črni bor 1 (desno)

Figure 21: Determination of the angles between the tree trunk and the main branches for common silver birch 2 (left) and Austrian pine 1 (right)

Lastnosti skorje

Za obe drevesni vrsti smo določili osnovne lastnosti skorje: hrapavost, debelino in skladiščno zmogljivost.

Hrapavost skorje lahko vpliva na skladiščenje vode, hranil in organskih snovi. Po priporočilih Priročnika za standardizirano merjenje funkcionalnih značilnosti rastlin (Perez-Harguindeguy in sod., 2013) smo upoštevali subjektiven pristop razvrstitve hrapavosti v pet kategorij: (1) gladka tekstura, (2) komaj zaznavna tekstura (amplitude mikroreliefa do 0,5 mm), (3) srednja tekstura (amplitude med 0,5 do 2 mm), (4) izrazita tekstura (amplitude med 2 in 5 mm) ter (5) zelo hrapava tekstura (amplitude večje od 5 mm).

Da bi določili debelino skorje, smo s čevljarским luknjačem premera 8 mm z vsakega drevesa vzeli 5 vzorcev (slika 22). Za skorjo smo upoštevali celotno zunanjo plast, ki sega do lesa (Perez-Harguindeguy in sod., 2013). Za vsak vzorec skorje smo izmerili njegovo debelino na 0,1 cm natančno, iz povprečja vseh vrednosti pa smo določili povprečno debelino skorje vsakega drevesa.



Slika 22: Jemanje vzorcev skorje črnega bora za določitev njegove debeline
Figure 22: Sampling the Austrian pine tree bark for determination of its thickness

Skladiščno zmogljivost skorje smo merili na vzorcih skorje, ki smo jih pridobili ob določanju njene debeline. Za vsako drevo smo izbrali tri najbolj reprezentativne vzorce. Za 24 ur smo jih namočili v vodo, po tem pa smo z njih nežno obrisali površinsko vodo ter določili njihovo maso v zasičenem stanju na 0,001 g natančno (laboratorijska tehtnica PL1502-S, Mettler Toledo LLC, slika 23). Vzorce smo nato sušili v peči pri 40 °C (sušilna peč Thermo scientific Function Line, Heraeus Holding) ter na dve uri ponovno preverili njihovo maso, dokler se ta ni prenehala zmanjševati (Perez-Harguindeguy in sod., 2013). Glede na površino vzorca in maso vode, ki jo je bil ta sposoben akumulirati, smo določili skladiščno zmogljivost skorje [mm].



Slika 23: Tehtanje in priprava vzorcev skorje na sušenje
Figure 23: Weighing of the bark samples and preparation for drying

3.3 Metode za analizo podatkov

V sklopu analize podatkov smo z uporabo različnih statističnih metod analizirali vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk (preglednica 3) na prestrežanje in prepuščanje padavin ter na odtok po deblu.

Preglednica 3: Meteorološke in vegetacijske spremenljivke, uporabljene v analizah
Table 3: Meteorological and vegetation variables used in the analysis

Spremenljivka	Kratica
Količina padavin [mm]	Kp
Intenziteta padavin [mm/h]	Ip
Trajanje padavin [h]	Tp
Povprečen premer dežnih kapljic [mm]	Dk
Povprečna hitrost dežnih kapljic [m/s]	Vk
Mediana volumnskega premera [mm]	MVD
Število dežnih kapljic na dogodek	Št
Povprečna relativna vlažnost zraka [%]	f
Povprečna temperatura zraka [°C]	T
Povprečna smer vetra	Vs
Povprečna hitrost vetra	Vh
Trajanje suhega obdobja med dogodkoma [h]	SO
Čas pojava dogodka (dan ali noč)	DN
Fenofaze – obdobje vegetacije, obdobje mirovanja, vse	
Drevesna vrsta – breza in bor	

Za izmerjene vrednosti komponent prestreženih padavin in meteoroloških spremenljivk smo povprečne vrednosti, standardno deviacijo in koeficient variacije računali v programu Excel. Rezultate smo zapisovali v obliki *povprečna vrednost ($\pm$ standardna deviacija)*. Koeficient variacije (ang. *coefficient of variation*, CV) pa je definiran kot količnik med standardno deviacijo in povprečno vrednostjo vzorca.

3.3.1 Metoda določanja zmanjšanja površinskega odtoka

Zmanjšanje površinskega odtoka s parkirišča Dolgi most zaradi zasaditve z drevesi (slika 5) smo ocenili z uporabo programa Green Values Stormwater Management Calculator (CNT, 2015). Program omogoča hitro oceno in primerjavo učinkovitosti, stroškov in koristi posameznih elementov zelene infrastrukture, kot so drevesa, zelene strehe, deževni vrtovi, tlakovanje s prepustnimi površinami, zbiralniki deževnice in zeleni pasovi. Program zahteva vnos podatkov po posameznih korakih:

- podatki o območju (letna količina padavin, tipi padavinskih dogodkov, površina območja oziroma parcele, prevladujoč tip zemljine),
- situacija pred posegom (deleži rabe tal – neprepustne površine, travnik v dobrem stanju, travnik v slabem stanju, vodne površine, drevesa ...),
- želeno zmanjšanje odtoka (tip površine, kjer želimo zadržati padavine – celotno območje ali le trenutno neprepustne površine; želen volumen zadržanih padavin),
- pričakovan razvoj (detajlni podatki o pričakovanem razvoju na območju po obsegu novih streh, številu in velikosti parkirišč, pločnikih, voziščih in zelenih površinah na ciljnem območju),

- zelene izboljšave (možnost izbire elementa zelene infrastrukture, ki bi ga želeli implementirati ter podrobni podatki o njih; na primer za drevesa podamo število novo zasajenih dreves, povprečno površino krošnje in obseg sadilne jame za njihovo zasaditev),
- dodatne možnosti (želena življenjska doba, možnosti sofinanciranja, vrsta in kvaliteta zemljine).

Glede na vnesene parametre program rezultate poda v sledečih kategorijah:

- nadzor volumna odtoka (volumen padavin, ki se zadrži na območju v primeru začetnega stanja, ciljni delež zmanjšanja volumna in zahtevano zmanjšanje deleža neprepustnih površin),
- koeficienti in odtok (celoten odtok pri povprečnem dogodku in pri 90 % dogodkov glede na začetno stanje ter zmanjšanje odtoka za stanje pričakovanega razvoja in stanje, izboljšano z zeleno infrastrukturo)
- raba tal (podrobno razdeli rabo tal za začetno stanje in stanje, izboljšano z zeleno infrastrukturo),
- stroški (za situacijo, izboljšano z zeleno infrastrukturo, poda stroške izvedbe, vzdrževanja in celotne stroške v predvideni življenjski dobi izboljšav),
- koristi (stroškovno opredeli letne koristi izboljšav in koristi v celotni predvideni življenjski dobi zaradi različnih vplivov kot so zmanjšanje CO₂, dodatno bogatenje podtalnice, zmanjšana poraba energije ...).

Program omogoča izračun zmanjšanja površinskega odtoka, vendar samo za ta element ne poda neposredne vrednosti koristi. Tako smo za oceno zmanjšanja stroškov upravljanja s padavinskimi vodami zaradi zmanjšanja površinskega odtoka uporabili podatke, ki jih navajajo McPherson in sodelavci (2005). Znesek, potreben za gospodarjenje s padavinskimi vodami, je enak 0,005 \$/gal oziroma 0,0012 €/l.

3.3.2 Regresijska analiza

Regresijska analiza je statistična metoda, ki opisuje zvezo med eno ali več neodvisnimi spremenljivkami in odvisno spremenljivko z ustreznim regresijskim modelom. Model je pripravljen tako, da se vrednosti neodvisnih spremenljivk uporabljajo za napovedovanje vrednosti ciljne odvisne spremenljivke. Za razumevanje regresijske analize je pomembno tudi poznavanje korelacijske analize. Korelacija namreč opisuje medsebojno povezanost dveh ali več spremenljivk, medtem ko regresija podaja njihovo medsebojno odvisnost (Brilly in Šraj, 2005).

Korelacijska analiza proučuje povezanost med dvema spremenljivkama X in Y v statistični populaciji. Mero medsebojne povezanosti (korelacije) teh dveh naključnih spremenljivk imenujemo kovarianca (McPherson, 2001). Definirana je kot:

$$K(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y) \quad (3)$$

kjer je $E(X)$ pričakovana vrednost spremenljivke X , $E(Y)$ pa pričakovana vrednost spremenljivke Y . Vrednosti kovariance določajo sledečo povezanost spremenljivk:

- $K(X, Y) > 0$: spremenljivki sta pozitivno povezani,
- $K(X, Y) = 0$: spremenljivki sta nepovezani,
- $K(X, Y) < 0$: spremenljivki sta negativno povezani.

Korelacijski koeficient oziroma Pearsonov koeficient korelacije (R) pa je mera za linearno povezanost naključnih spremenljivk in je definiran kot:

$$R(X, Y) = \frac{K(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (4)$$

kjer $\sigma(X)$ označuje standardni odklon spremenljivke X , $\sigma(Y)$ pa standardni odklon spremenljivke Y (Brvar, 2007). Vrednosti korelacijskega koeficienta se gibljejo med -1 in 1. Ko je njegova vrednost enaka 0, sta spremenljivki nepovezani, če pa je enak ± 1 , med spremenljivkama obstaja linearna funkcijska zveza.

V primeru, da regresijska funkcija predstavlja regresijsko premico, govorimo o linearni regresiji. Če je X neodvisna spremenljivka ($x_1, x_2, \dots, x_n$) in Y odvisna spremenljivka ($y_1, y_2, \dots, y_n$), lahko množico parov meritev (x_1, y_1), (x_2, y_2), ... (x_n, y_n) v ravnini predstavimo z razsevnim diagramom. Ustrezen regresijski model, v primeru da točke v ravnini lahko opišemo s premico, je:

$$Y = a_0 + a_1X + E \quad (5)$$

kjer je E napaka modela (McPherson, 2001). Parametri v regresijskem modelu (a_0, a_1) se v regresijski analizi ocenjujejo z metodo najmanjših kvadratov ali z metodo največje verjetnosti. Linearno povezavo med spremenljivkama X in Y , določeno z regresijsko premico, ovrednotimo s koeficientom determinacije (R^2), ki je definiran kot razmerje med pojasnjeno varianco in skupno varianco (Brvar, 2007):

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \quad (6)$$

V primeru, da je spremenljivka Y odvisna od več kot ene neodvisne spremenljivke X , govorimo o multipli regresiji (Brvar, 2007). V primerjavi z linearno regresijo se spremeni prostor, v katerem lahko predstavimo množico točk meritev, saj postane $k + 1$ dimenzionalen. Tudi model linearne funkcije je posledično večdimenzionalen. Za k neodvisnih spremenljivk X ($X_1, X_2, \dots, X_k$) ima model obliko:

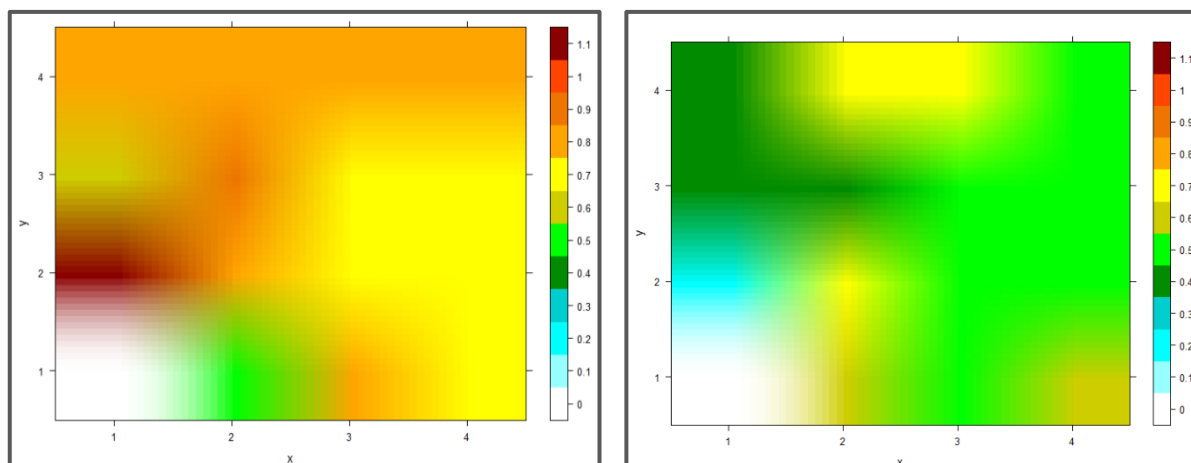
$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k + E \quad (7)$$

pri čemer je E napaka modela, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ pa so regresijski koeficienti, ki so določeni tako, da je napaka modela čim manjša (McPherson, 2001).

Linearno regresijo in račun koeficientov korelacije ter determinacije smo izvedli v Excelu, medtem ko smo za multiplo regresijsko analizo (ang. *multiple regression analysis*, MRA) uporabili funkcijo *lm* v vgrajenem paketu *stats* programskega orodja R (R core team, 2017).

3.3.3 Večdimenzionalni prikaz podatkov

Grafična oziroma slikovna predstavitev podatkov omogoča kvalitetno strukturiranje podatkov, poudari podatke, ki so za nas pomembni in tako izboljša miselne procese (Kogovšek, 2009). Običajen grafičen prikaz podatkov zajema grafe in tabele, ki omogočajo predvsem dvodimenzionalen prikaz podatkov. Pogosto pa so podatki večdimenzionalni in pri izključitvi določene dimenzije iz prikaza del podatkov izgubimo. Za prikaz podatkov v treh dimenzijah smo uporabili karte jakosti (ang. *heatmap / levelplot*) (slika 24. Karte jakosti izhajajo iz geografskega prikaza podatkov z variiranjem jakosti in odtenkov barv (Few, 2009). Vrednosti posameznih podatkov v izhodiščni matriki so na karti prikazane z različnimi barvami.



Slika 24: Primer kart jakosti za prostorsko porazdelitev TF pod drevesi
Figure 24: Example of heatmaps of TF spatial distribution under the trees

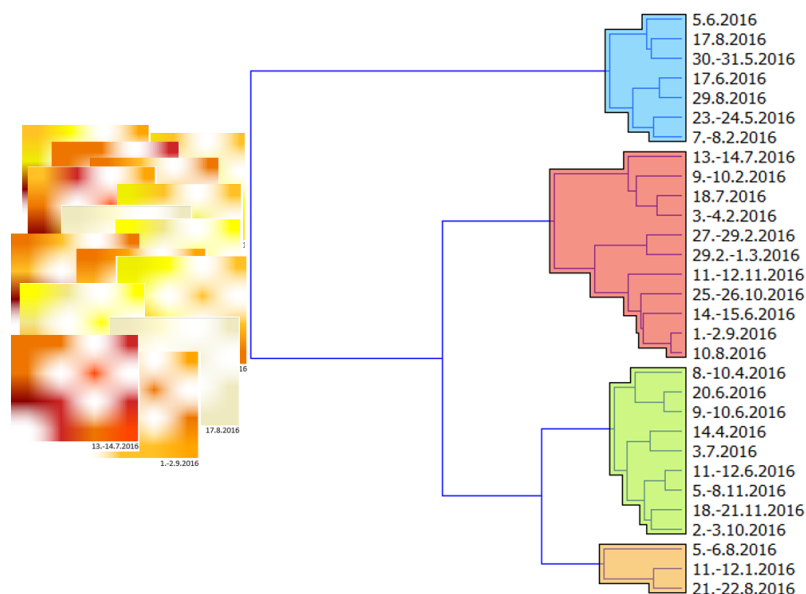
Na kartah jakosti smo prikazali prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora ter spreminjanje števila različno hitrih in velikih dežnih kapljic tekom razvoja padavinskega dogodka (mikrostruktura padavin). Karte smo izrisali v programu R (R core team, 2017) z uporabo paketa *lattice* (Sarkar, 2017) in pripadajoče funkcije *levelplot*. Za prikaz prostorske porazdelitve TF smo podatke o deležih prepuščenih padavin v posamezni merilni točki prenesli v matriko (5 X 5), ki je ponazarjala prostor pod drevesno krošnjo in lokacije točkovnih merilnikov (slika 10). Celica (0, 0) je ustrezala drevesnemu deblu, vodoravne in navpične vrstice pa so podajale oddaljenost od debla proti robu krošnje, ki je bila določena s celicami (1, 5), (5, 5) in (5, 1). Grafična predstavitev mikrostrukture padavin pa je temeljila na podatkih, zapisanih v matrikah velikih približno 32 X 77 celic (odvisno od trajanja dogodka), v katerih je bilo podano število dežnih kapljic v določenem velikostnem oziroma hitrostnem razredu (vodoravno) za vsako minuto trajanja dogodka (navpično).

3.3.4 Hierarhično razvrščanje

Razvrščanje podatkov v smiselne skupine oziroma razrede glede na izbrano podobnost omogočajo metode razvrščanja. V podatkovnem rudarjenju je ena izmed bolj uporabljenih in pomembnih metod hierarhično razvrščanje. Hierarhično razvrščanje poteka po sledečih korakih: nabor in predhodna obdelava podatkov ter tvorba matrike podatkov, izbira ustrezne metode, razvrščanje in določanje želenega števila razredov (Ferligoj, 1989; Zabret in Brilly, 2014).

Podatki, ki jih imamo na voljo, lahko vsebujejo manjkajoče in napačne vrednosti, vrednosti spremenljivk pa se lahko med seboj zelo razlikujejo. V statistiki tako največkrat preverjamo manjkajoče in izstopajoče podatke ter njihovo normalnost in linearnost (Zabret in Brilly, 2014). V primeru, da so razponi vrednosti spremenljivk zelo različni, se lahko zgodi, da imajo tiste spremenljivke z večjimi vrednostmi večjo težo pri razvrščanju v skupine. Da bi se temu izognili, spremenljivke standardiziramo (Hosking in Wallis, 1997).

Najpogostejše uporabljene metode razvrščanja so hierarhične metode, ki jih delimo na metode združevanja in metode cepitve (Ferligoj, 1989). V primeru združevanja izhajamo iz tolikšnega števila skupin, kot je elementov, v vsakem koraku pa skupine združujemo med seboj. Pri metodah cepitve pa začnemo z eno veliko skupino, v kateri so združeni vsi elementi, ki jih v nadaljevanju delimo v skupine (slika 25). Prednost tega načina je, da na začetku še ni potrebno opredeliti končnega števila skupin. Postopek hierarhičnega grupiranja lahko nazorno prikažemo z dendrogramom (Ferligoj, 1989).



Slika 25: Primer dendrograma hierarhičnega razvrščanja slik prostorske porazdelitve TF pod brezo v programu Orange z izbranimi 4 skupinami

Figure 25: Example of the dendrogram of the hierarchical clustering with four classes of the images presenting TF spatial distribution under the birch tree using Orange software

Združevanje enot temelji na podanih značilnostih, ki naj bi bile znotraj skupine čim bolj podobne. Določamo jih z merami podobnosti, ki se razlikujejo glede na tip spremenljivk. Ko so vse spremenljivke podane s številčnimi vrednostmi, je najpogosteje uporabljena mera podobnosti evklidska razdalja, ki jo uporablja večina algoritmov za razvrščanje (Hosking in Wallis, 1997). X in Y naj bosta enoti z m številskimi spremenljivkami:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (8)$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (9)$$

Evklidska razdalja med njima je definirana kot:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

Najbolj pogosto uporabljena metoda hierarhičnega razvrščanja je Wardova metoda. Temelji na izgubi informacij, ki je posledica združevanja dveh skupin v eno, kar poveča vsoto kvadriranih odklonov (VKO) znotraj skupine. VKO se po Wardu upošteva za vrednotenje posamezne razvrstitve, saj Wardova metoda teži k skupinam s primerljivo spremenljivostjo. Odklon za skupino S se določi kot vsota kvadriranih odklonov od povprečja za to skupino (Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006):

$$VKO(S) = \sum_{i \in S} (x_i - \bar{x}_S)^2 \quad (11)$$

Dogodke smo razvrščali na podlagi kart jakosti prostorske porazdelitve prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora. Za razvrščanje grafičnih prikazov podatkov smo uporabili programsko orodje Orange (Demšar in sod., 2013). Program je glede na vizualno podobnost slike razvrstil v razrede, za posamezen razred pa smo analizirali dogodke, ki so bili vanj uvrščeni in preverili, v čem so si podobni (slika 25). Za razvrščanje smo uporabili Wardovo metodo, razdalje pa smo računali s kosinusno metodo. V primeru tekstovnih in grafičnih

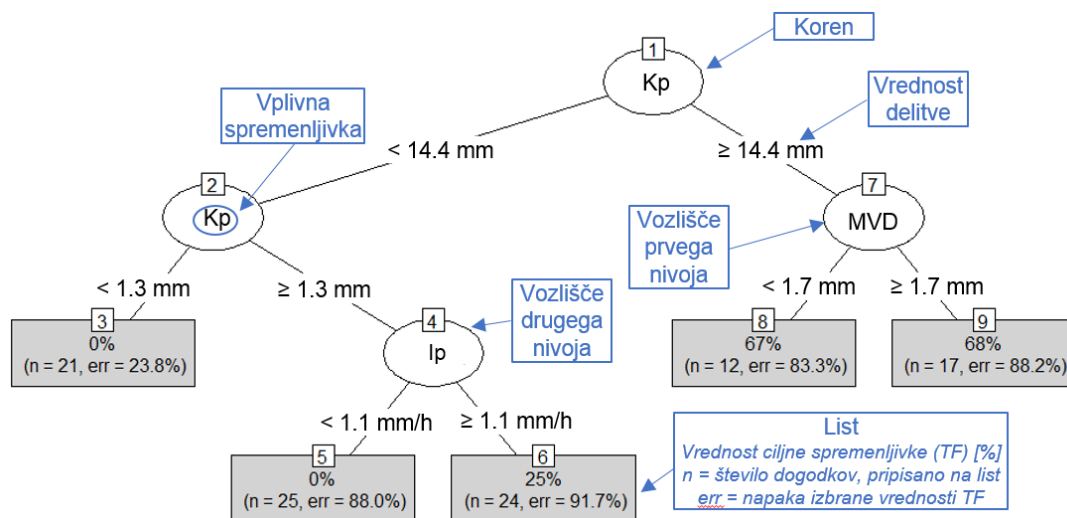
podatkov se je namreč izkazalo, da je bolj kot velikost vektorja pomembna njegova smer. Razliko med smerjo dveh vektorjev X in Y lahko merimo s kotom med njima, ki je proporcionalna kosinusu kotov (Zupan, 2017):

$$\text{sim}(X, Y) = \cos \theta = \frac{X \cdot Y}{\|X\| \cdot \|Y\|} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i \times Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m (Y_i)^2}} \quad (12)$$

Ker računalniki lahko delajo le s številkami, program Orange najprej pretvori slike v številčni zapis z uporabo mrežnih vstavkov. Program pošlje slike na strežnik, ki jih pošlje skozi prednastavljeno nevronske mreže, ki je bila vzpostavljena tako, da lahko sliko razvrsti v eno izmed številnih kategorij. Primer take mreže je Googlov Inception v3, ki prepozna 1.000 razredov slik. Slike v tako preoblikovanem zapisu nato program razvrsti v skupine s hierarhičnim razvrščanjem (Pretnar, 2017).

3.3.5 Regresijska drevesa (RT)

Regresijska drevesa (ang. *regression tree*, RT) so metoda strojnega učenja za izgradnjo modela napovedi glede na vhodne podatke. Modeli so oblikovani s ponavljajočimi se delitvami podatkov glede na spremenljivke in s prilagajanjem preprostega modela napovedi za ciljno spremenljivko znotraj vsake delitve. Rezultat procesa delitve je prikazan grafično z odločitvenim oziroma regresijskim drevesom (Loh, 2011). Drevesa so sestavljena iz vozlišč in listov. V vozliščih drevesa hranijo še dodatne podatke o vrednosti delitve, ki so običajno podani kot testi, ki glede na vrednost izbrane vplivne spremenljivke določajo smer sledenja drevesni strukturi (slika 26). Na listih pa se nahajajo vrednosti ciljne spremenljivke, ki je v primeru odločitvenih dreves določena enoznačno, v primeru regresijskih dreves pa je podana kot ena izmed numeričnih vrednosti ciljne spremenljivke (Osojnik, 2013). Odločitvena drevesa namreč temeljijo na odvisnih spremenljivkah s končnim številom nerazvrščenih vrednosti, ki so po navadi podane opisno, medtem ko regresijska drevesa temeljijo na odvisnih spremenljivkah z nepretrganimi oziroma urejenimi numeričnimi vrednostmi (Loh, 2011).



Slika 26: Primer regresijskega drevesa za analizo vplivov meteoroloških spremenljivk na TF pod črnim borom v obdobju vegetacije

Figure 26: An example of the regression tree for analysis of the influences of the meteorological variables on TF under Austrian pine tree in vegetation period

Za oblikovanje regresijskih dreves obstaja več algoritmov, najpogostejše uporabljeni so AID, CART in M5. AID in CART temeljita na prvem objavljenem algoritmu THAID (Messenger in Mandell, 1972). Podatke razdelimo v dva seta: za testiranje in treniranje modela. Testni set podatkov naj vsebuje m dogodkov s ciljno spremenljivko Y in z p vhodnih spremenljivk:

$X (X_1, X_2, \dots, X_p)$. Algoritem THAID uporablja mero za neskladnost vozlišča, ki je enaka vsoti kvadratov odstopanj med dejanskim povprečjem Y in povprečjem Y , ki je ocenjen glede na model v vozlišču. Vozlišče se nato razdeli glede na temeljito iskanje med vrednostmi X , ki so v danem vozlišču na voljo za delitev in ki minimalizirajo celotno neskladnost novo nastalih vozlišč. Postopek se ponavlja za vse podatke v vsakem izmed novo nastalih vozlišč, vse dokler ni dosežena predhodno nastavljena mejna vrednost v številu elementov na listu oziroma v stopnji neskladnosti. Algoritem M5 pa uporablja bolj konceptualno učinkovito strategijo, saj najprej ustvari konstantno strukturo drevesa in nato za podatke na vsakem listu išče najbolj ustrezen regresijski model (Loh, 2011).

Regresijska drevesa smo izdelali z uporabo funkcije *rpart* v istoimenskem paketu (Therneau in sod., 2017) programa R (R core team, 2017), ki uporablja algoritem CART. Podatke smo razdelili na testni set, v katerega smo vključili 75 % dogodkov in set za treniranje modela, ki je vseboval preostalih 25 % dogodkov. Določili smo, da je bilo za delitev vozlišča potrebnih vsaj 20 dogodkov, končni listi pa so bili določeni z najmanj 6 dogodki. Spremenljivke, ki smo jih upoštevali pri graditvi regresijskih dreves, so bile vse meteorološke spremenljivke (preglednica 3). Algoritem smo pognali osemnajstkrat, za vsako komponento prestrezanja padavin (I, TF, SF) za brezo in za bor, v vsakem izmed treh obdobj (celotno obdobje meritev, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja). V primeru velikih in nepreglednih dreves smo ta obrezali (ang. *pruning*) tako, da smo ohranili vsaj tri stopnje listov.

3.3.6 Posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT)

Posplošena ojačana regresijska drevesa (ang. *generalized boosted regression trees*, BRT) so ena izmed mnogih tehnik, ki se razvijajo z namenom izboljšanja učinkovitosti posameznega modela. Izboljšanje dosegajo s prilagajanjem velikega števila modelov in njihovo kombinacijo za izdelavo napovedi. BRT uporablja dva algoritma: regresijska drevesa in ojačenje (ang. *boosting*) (Elith in sod., 2008). Teoretično ozadje regresijskih dreves smo že razložili v prejšnjem poglavju, zato se bomo v nadaljevanju osredotočili le na postopek ojačenja.

Ojačenje je metoda za izboljšanje natančnosti modela, ki temelji na predpostavki, da je iz povprečja številnih surovih napovedi lažje dobiti končen model kot pa najti eno samo, visoko natančno napoved zanj. Metoda ojačenja uporablja unikatni zaporeden pristop, ki konstantno napreduje korak za korakom. Modele iterativno prilagaja setu podatkov za trening, pri tem pa uporablja ustrezne metode, ki jih postopoma prilagaja, da bi dosegli večji poudarek za modele, ki slabše modelirajo opazovane podatke (Elith in sod., 2008).

Naj bo *funkcija izgube* mera, podobna devianci, ki v tem primeru ponazarja izgubo v učinkovitosti napovedi zaradi slabše optimalnega modela. Ojačenje je tehnika numerične optimizacije za minimaliziranje *funkcije izgube* z dodajanjem novega regresijskega drevesa na vsakem koraku, ki bo najbolj zmanjšal gradient *funkcije izgube*. Pri metodi BRT je prvo regresijsko drevo tisto, ki za izbrano velikost drevesa najbolj zmanjša *funkcijo izgube*. Vsak sledeči korak se osredotoča na preostanek, to je variacija v odzivu modela, ki še ni bila vključena v sam model. Na primer, v drugem koraku se novo regresijsko drevo prilagodi preostanku prvega drevesa, zaradi česar lahko drugo drevo v primerjavi s prvim sestavljajo drugačne spremenljivke in vrednosti v vozliščih. Model se posodobi tako, da vsebuje obe oblikovani drevesi, ostanki teh dveh dreves pa nudijo osnovo za implementacijo tretjega regresijskega drevesa. Proces se nadaljuje korak za korakom, kar pomeni, da se že oblikovana drevesa ne spreminjajo, model pa se le povečuje. V vsakem koraku pa se prispevek novega drevesa upošteva pri ponovnem izračunu prilagojene vrednosti pripadajoče vhodne spremenljivke. Končni BRT model je sestavljen iz linearne kombinacije velikega števila regresijskih dreves, ki ga lahko predstavljamo kot regresijski model, v katerem eno drevo predstavlja vsako stopnjo (Elith in sod., 2008).

Friedman (2001) je predstavil enačbo, s katero lahko ocenimo relativni vpliv (ang. *relative influence*, RI) vsake spremenljivke, vključene v model BRT. RI temelji na tem, kolikokrat je bila spremenljivka v modelu izbrana za delitev regresijskega drevesa. Število izborov je uteženo s kvadratom stopnje izboljšanja modela kot posledice vsake delitve in je izraženo s povprečjem glede na vsa generirana regresijska drevesa (Friedman in Meulman, 2003). RI oziroma prispevek posamezne spremenljivke je prilagojen tako, da je vsota RI vrednosti vseh upoštevanih spremenljivk enaka 100, zaradi česar večje vrednosti neposredno nakazujejo na večji vpliv spremenljivke.

Prilagojene funkcije modela BRT lahko vizualno predstavimo na grafih delne odvisnosti (ang. *partial dependence plot*, PDP). Funkcija delne odvisnosti namreč prikazuje učinek spremenljivke na odziv ciljne spremenljivke z upoštevanjem povprečnega vpliva vseh ostalih spremenljivk, vključenih v model. Čeprav ti grafi ne predstavljajo le vpliva vsake posamezne spremenljivke, služijo kot učinkovita osnova za interpretacijo rezultatov (Elith in sod., 2008).

Posplošena ojačana regresijska drevesa smo izdelali z uporabo *gbm* funkcije istoimenskega paketa (Ridgeway, 2017) v programskem orodju R (R core team, 2017). Podatke smo razdelili na testni set, v katerega smo vključili podatke 75 % dogodkov in set za treniranje modela, ki je vseboval podatke preostalih 25 % dogodkov. Spremenljivke, ki smo jih upoštevali pri graditvi ojačenih regresijskih dreves, so bile vse meteorološke spremenljivke (preglednica 3). Model smo pognali osemnajstkrat, za vsako komponento prestrezanja padavin (I, TF, SF) za brezo in za bor, v vsakem izmed treh obdobj (celotno obdobje meritev, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja). Za prilagajanje BRT modelov smo uporabili Gaussovo porazdelitev, vsaj 10 dogodkov na zadnjem listu regresijskega drevesa, stopnjo učenja 0,005 in 5-kratno navzkrižno vrednotenje. Nastavljeno število regresijskih dreves, ki jih je model uporabil za ojačenje, je bilo 1.500. Po priporočilu Hogleya in sodelavcev (2015) smo za mejno vrednost RI, ki določa pomembnejši vpliv spremenljivke, izbrali vrednost 7,7 %. To število predstavlja delež, ki pri enakomerni delitvi pripada eni spremenljivki (100 % deljeno s 13, kolikor spremenljivk je bilo upoštevanih). Za učinkovito modeliranje z metodo BRT pa morajo biti seti vhodnih podatkov dovolj veliki. Elith in sodelavci (2008) so namreč pokazali, da imajo modeli, v katerih so bili uporabljeni manjši seti podatkov, večje napake napovedi. Zato je v takem primeru, kot smo ga imeli mi za obdobje mirovanja, ko je bil nabor dogodkov dokaj majhen, potrebno upoštevati določene stopnje nezanesljivosti v rezultatih.

3.3.7 Metoda glavnih komponent (PCA)

Metoda glavnih komponent (ang. *principal component analysis*, PCA) je statistična tehnika za iskanje r-dimenzionalnega prostora, ki najbolje zajame varianco v podatkih. To pomeni, da se z analizo medsebojne odvisnosti spremenljivk njihov osnovni nabor preslika v množico novih spremenljivk, imenovanih glavne komponente (ang. *principal component*, PC) z namenom zmanjšanja njihovega števila. Vsaka spremenljivka je v prostoru opisana s svojim lastnim vektorjem, ki opisuje smer in njegovo lastno vrednostjo, ki podaja stopnjo variance podatkov v tej smeri. Vsak podatkovni set ima toliko dimenzij in glavnih komponent, kolikor spremenljivk obsega. Glavne komponente so med seboj pravokotne in izražene kot linearna kombinacija osnovnih spremenljivk (Zaki in Meira, 2014).

Lastni vektorji preslikajo spremenljivke v nov sistem, ki podatke opiše bolje, zato so posamezni lastni vektorji med seboj pravokotni. Smer, katere projekcija variance je največja, se imenuje prva glavna komponenta (PC1). Določena je tako, da pojasni čim večji delež celotne variance osnovnih spremenljivk. Vse ostale glavne komponente (druga, tretja, ...) so neodvisne od prve in med seboj ter določene tako, da pojasnijo čim večji delež variance, ki je še ostala nepojasnjena (Košmelj, 2007). Glavne komponente so razvrščene tako, da večji del variabilnosti osnovnih spremenljivk ohranijo prve glavne komponente (Simčič, 2014).

Pri metodi glavnih komponent torej določimo novo množico spremenljivk $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$, pri katerih za linearno kombinacijo osnovnih spremenljivk $X_1, X_2, \dots, X_p$, določimo uteži $\mathbf{a}_i$ tako, da je varianca linearnih kombinacij čim večja:

$$Y_i = \mathbf{X}\mathbf{a}_i \quad (13)$$

kjer je $\mathbf{X}$ matrika podatkov in $\mathbf{a}_i$ vektor uteži. Po metodi PCA želimo poiskati take uteži, da bo varianca Y čim večja:

$$\text{var}(Y_i) = \text{var}(\mathbf{X}\mathbf{a}_i) = \mathbf{a}_i^T \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{a}_i \quad (14)$$

pri čemer je $\boldsymbol{\Sigma}$ variančno – kovariančna matrika med osnovnimi spremenljivkami $X_1, X_2, \dots, X_p$ (Košmelj, 2007). Ko je izračunana prva glavna komponenta Y_1 z največjo varianco, poiščemo drugo komponento, ki je nekolerirana s prvo in prav tako vsebuje čim večjo varianco. Postopek ponovimo tolikokrat, kolikor je osnovnih spremenljivk. Koeficiente vseh linearnih kombinacij zapišemo v matriko $\mathbf{A}$. Glavne komponente Y se izražajo kot linearna kombinacija izhodiščnih spremenljivk ($Y_i = \mathbf{X}\mathbf{a}_i$), pri tem pa velja (Košmelj, 2007; Simčič, 2014):

- vektorji $\mathbf{a}_i$ so lastni vektorji matrike $\boldsymbol{\Sigma}$, torej rešujemo sistem $|\boldsymbol{\Sigma} - \lambda \mathbf{I}| = 0$,
- varianca posamezne glavne komponente je enaka pripadajoči lastni vrednosti $\text{var}(Y_i) = (\mathbf{X}\mathbf{a}_i)^T \mathbf{X}\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i^T \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i^T \lambda \mathbf{I} \mathbf{a}_i = \lambda_i$,
- zaporedne lastne vrednosti so urejene po velikosti ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \lambda_p \geq 0$).

Cilj PCA je zmanjšati število spremenljivk, ki jih bomo uporabili v nadaljnji analizi. Ker je število glavnih komponent enako številu osnovnih spremenljivk, ne uporabimo vseh, ampak le tiste, ki nosijo največ informacij. Pri odločanju o številu uporabljenih spremenljivk lahko uporabimo nekatere heuristične postopke, ne glede na to pa je odločitev še vedno deloma subjektivna. Najpogostejše uporabljeni metodi sta uporaba plaziščnega diagrama (ang. *scree plot*) in upoštevanje Kaiserjevega pravila (Košmelj, 2007; Siegert in Levina, 2014; Simčič, 2014). Plaziščni diagram prikazuje lastnost lastne vrednosti glede na njeno zaporedno mesto, število potrebnih komponent pa nakazuje prelom na diagramu. Upoštevamo namreč glavne komponente, ki se nahajajo na delu grafa, kjer krivulja strmo pada. Po Kaiserjevem pravilu pa upoštevamo tiste glavne komponente, katerih lastna vrednost je večja ali enaka 1.

Analizo PCA smo izvedli na dveh setih podatkov: za trening, ki je združeval 75 % vseh dogodkov in testnem, ki je združeval preostalih 25 % dogodkov. V programu R (R core team, 2017) smo uporabili funkcijo *prcomp* v osnovnem paketu *stats*. Poleg dvanajstih običajno uporabljenih osnovnih spremenljivk (preglednica 3) smo upoštevali tudi vse štiri fenofaze. Število glavnih komponent, ki smo jih upoštevali v nadaljnji analizi, smo določili po obeh predlaganih metodah, po Kaiserjevem pravilu in z uporabo plaziščnega diagrama.

3.3.8 Multipla korespondenčna analiza (MCA)

Multipla korespondenčna analiza (ang. *multiple correspondence analysis*, MCA) je multivariatna statistična metoda, ki se uporablja za pregled stopnje povezanosti med spremenljivkami z namenom zmanjšanja dimenzije podatkov (Hair in sod., 1995). Glede na to je zelo podobna metodi PCA, le da pri analizi povezanosti spremenljivk namesto stopnje variance upoštevamo tako imenovano povezanost med stolpci in vrsticami podatkov, vrednosti spremenljivk pa so podane opisno. Podobnost med stolpci podatkov se izračuna kot evklidska razdalja med stolpci točk in x-dimenzionalnim prostorom za zmanjšanje obsega podatkov, pri čemer so razdalje med točkami v stolpcih in vrsticah čim večje. Povezanost je izražena kot zmanjšanje χ^2/n , pri čemer je χ^2 vrednost hi-kvadrat testa neodvisnosti spremenljivk in n število pričakovanih vrednosti. χ^2/n imenujemo inercija oziroma vztrajnost, za vsako nadaljnjo pravokotno os izpeljano iz MCA pa se njena vrednost zmanjšuje. Dimenzije torej podajajo statistično vztrajnost spremenljivke (Van Stan in sod., 2016). Večji delež vztrajnosti določene

dimenzije nakazuje, da lahko relativne frekvenčne vrednosti, rekonstruirane v tej dimenziji, dosegajo večje vrednosti hi-kvadrat. Glede na to število dimenzij, ki jih upoštevamo v analizi, določamo z uporabo plaziščnih diagramov vztrajnosti ali s pravilom vrednosti 1 (Van Stan in sod., 2011).

Rezultati MCA so najpogosteje prikazani na diagramih, ki predvsem pri izbiri dveh dimenzij omogočajo najbolj nazoren prikaz rezultatov. Ker so dimenzije med seboj pravokotne in tako neodvisne, moramo oddaljenost med spremenljivkami in njihov predznak obravnavati za vsako dimenzijo posebej. Dimenzije so označene z vodoravnimi črtami, ki jih v dvodimenzionalnem prostoru lahko interpretiramo kot koordinatni osi. Oddaljenost med točkami, ki označujejo spremenljivke, nakazuje na stopnjo njihove medsebojne odvisnosti; manjša kot je razdalja, večja je odvisnost med njimi. Črta, ki označuje dimenzijo, deli prostor na dva dela in s tem določa predznak spremenljivk; tiste, ki se nahajajo v istem delu prostora, so povezane pozitivno, če pa se nahajajo na različnih polovicah, so povezane negativno (Van Stan in sod., 2016).

Za izvedbo metode MCA smo uporabili funkcijo *mca* v paketu *FactoMineR* (Husson in sod., 2017) v programskem orodju R (R core team, 2017). Sicer številčne vrednosti spremenljivk smo pretvorili v opisne vrednosti glede na mejno vrednost. Mejne vrednosti so bile enake povprečni vrednosti spremenljivke. Mejno vrednost prestreženih in prepuščenih padavin smo določili kot mediano vzorca, v primeru odtoka po deblu pa smo definirali, ali je bil ta prisoten ali ne. Tako smo spremenljivke izrazili opisno z njihovo kratico ter podatkom o tem, ali je bila vrednost večja ali manjša od mejne vrednosti (na primer kratica za količino padavin je Kp, določena mejna vrednost pa je bila 10 mm, torej sta bili opisni vrednosti količine padavin enaki $Kp < 10$ – manjše od mejne vrednosti ter $Kp > 10$ – večje od mejne vrednosti). Za boljšo preglednost rezultatov MCA smo spremenljivke razdelili v tri skupine (lastnosti padavin, mikrostruktura padavin in lastnosti vetra). Tako smo analizo ponovili za vsako komponento prepuščanja padavin (I, TF, SF) v obdobju vseh meritev, v obdobju vegetacije in v obdobju mirovanja za vsako izmed treh skupin spremenljivk. Za vse rezultate sta se po obeh omenjenih metodah izkazali za ustrezni dve dimenziji, saj sta vsebovali večino statistične vztrajnosti.

4 REZULTATI MERITEV

4.1 Padavine, prepuščene padavine, odtok po deblu in prestrežene padavine

4.1.1 Padavine na prostem

Padavine na prostem smo merili med 1. januarjem 2014 in 30. junijem 2017. Zabeležili smo 468 padavinskih dogodkov s skupno vsoto padavin 4.877,6 mm. Izmed vseh zabeleženih dogodkov smo jih izločili 55, pri katerih smo opazili sledeče:

- večje napake v delovanju zapisovalnikov podatkov,
- korita ali lijakasti merilniki so bili zamašeni z listjem,
- v koritih ali lijakastih merilnikih je voda zamrznila,
- na drevesih se je nabrala debela plast žledu,
- snežne padavine.

V nadaljnji analizi smo tako upoštevali 413 padavinskih dogodkov, katerih vsota je bila 4.110,8 mm padavin. Povprečno smo na dogodek zabeležili 10,0 mm padavin, ki so se gibale med 0,2 mm in 167,4 mm. V povprečju je bil padavinski dogodek dolg 8,5 ure z dokaj velikim razponom med 6 minut in skoraj 5 dnevi (119 ur). Povprečna intenziteta dogodka je bila 2,3 mm/h ($\pm 3,6$ mm/h).

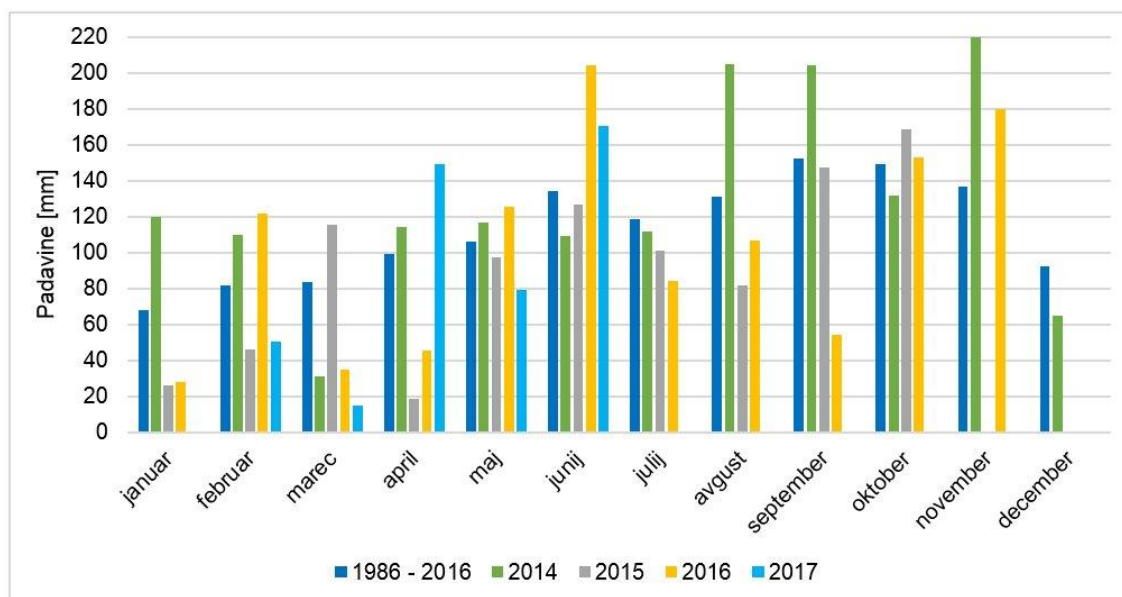
Največje število dogodkov smo zabeležili leta 2014, ki je bilo izmed vseh opazovanih let tudi najbolj mokro (preglednica 4). Število dogodkov je bilo še enkrat večje kot leta 2015, ki je bilo izmed vseh najbolj sušno. Kljub majhnemu številu dogodkov pa so bili ti leta 2015 v povprečju najbolj obilni in najdaljši. Dogodek z največ padavinami smo zabeležili med 5. in 10. novembrom 2014. V 118 urah in 54 minutah je padlo kar 167,4 mm padavin z intenziteto 1,4 mm/h. Dogodek je povzročil poplave po celi Sloveniji (Sektor za analize in prognoze površinskih voda, 2014).

Preglednica 4: Lastnosti padavinskih dogodkov posameznih let (povprečje $\pm$ standardna deviacija)
Table 4: Properties of the rainfall events by measurement year (average $\pm$ standard deviation)

Leto	Število dogodkov	Vsota padavin [mm]	Povprečne padavine [mm]	Povprečno trajanje [h]	Povprečna intenziteta [mm/h]
2014	167	1566	9,4 ($\pm 18,9$)	7,4 ($\pm 12,3$)	2,2 ($\pm 4,4$)
2015	85	931	11,0 ($\pm 17,3$)	10,1 ($\pm 10,9$)	1,9 ($\pm 2,4$)
2016	113	1139	10,1 ($\pm 16,2$)	9,7 ($\pm 12,3$)	1,8 ($\pm 3,3$)
2017	48	466	9,7 ($\pm 12,3$)	7,0 ($\pm 9,1$)	2,7 ($\pm 3,2$)

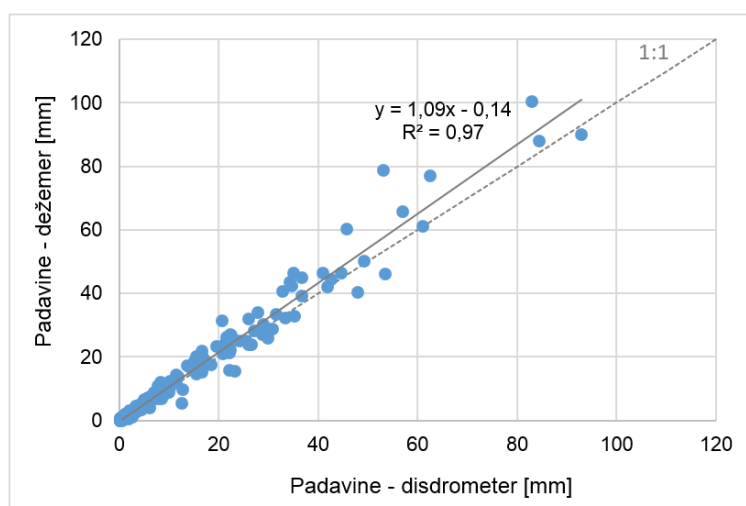
Leto 2014 je bilo zelo mokro tudi v primerjavi s 30-letnim povprečjem (1986–2016), za katerega velja, da na leto pade 1.355 mm padavin (Arhiv meritev, 2017). To je 16 % manj, kot smo izmerili leta 2014. To leto je bilo zaznamovano z žledom, ki je prizadel Slovenijo konec januarja 2014. V februarju so se tako skladiščene padavine sprostile, temu pa je sledil suh mesec marec, v katerem smo zabeležili le 31 mm padavin. Zelo mokri pa so bili meseci avgust, september in november (slika 27). Leto 2015 je bilo zelo sušno leto, v katerem je padlo le slabih 70 % povprečnih dolgoletnih padavin. Z izjemo mokrega marca in oktobra mesečna količina padavin ni presegla dolgoletnih povprečnih mesečnih vrednosti. Kar 19 dogodkov s snegom smo zabeležili v začetku leta 2015, poleg tega pa še 3 v aprilu. Mesec december je bil izredno suh in meglen, zabeležili nismo niti enega deževnega ali sneženega dogodka. Količina padavin v letu 2016 je bila podobna dolgoletnemu povprečju, le razporeditev po mesecih je od njega odstopala (slika 27). Meseca marec in april sta bila dokaj sušna, večino padavin pa smo zabeležili junija, oktobra in novembra. Tudi leto 2016 se je začelo z več sneženimi dogodki, do sredine marca smo jih zabeležili 11. Tega leta pa je sneg padal tudi med 27. aprilom in 2. majem. Tudi leta 2016 je bil december zelo suh, brez zabeleženih

padavinskih dogodkov, vendar s pogosto opaženo gosto meglo. Prvo tromesečje leta 2017 je bilo v primerjavi z dolgoletnim povprečjem zelo suho, medtem ko je bilo v aprilu in juniju izmerjenih več padavin, ki so za 51 % in 27 % presegle dolgoletni povprečji teh dveh mesecev.



Slika 27: Mesečne padavine 30-letnega povprečja in posameznih let obravnavanega obdobja
Figure 27: 30-year average monthly rainfall and by separate years analysed

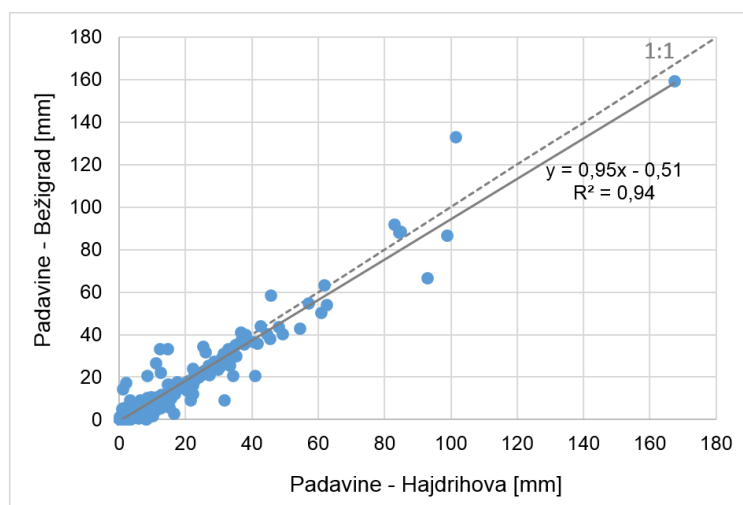
Količino padavin smo merili tudi z disdrometrom, postavljenim na strehi bližnje stavbe. Ker disdrometer zaradi okvare nekaj časa ni deloval, smo z njim zabeležili 239 dogodkov. Za dogodke, ko sta delovali obe merilni napravi, smo z dežemerom skupno izmerili 2.629,8 mm padavin, z disdrometrom pa 2.822,2 mm padavin. Kljub temu, da je vsota padavin, izmerjenih z disdrometrom, nekoliko večja (7 %), regresijska analiza kaže, da je v povprečju količina padavin na dogodek malenkost večja, če je izmerjena z dežemerom (slika 28). Navsezadnje pa je količina padavin, izmerjenih z obema inštrumentoma, podobna, kar kaže tudi velika vrednost Pearsonovega korelacijskega koeficienta ($R = 0,985$).



Slika 28: Odvisnost padavin, izmerjenih z dežemerom od padavin, izmerjenih z disdrometrom
Figure 28: Rainfall measured with rain gauge as a function of rainfall measured with the disdrometer

Regresijska analiza padavin, izmerjenih z dežemerom na raziskovalni ploskvi na Hajdrihovi, in padavin, izmerjenih na meteorološki postaji državne merilne mreže Ljubljana Bežigrad, kaže na malenkost večjo količino padavin (11 %) na Hajdrihovi (slika 29). Razlika med izmerjenimi

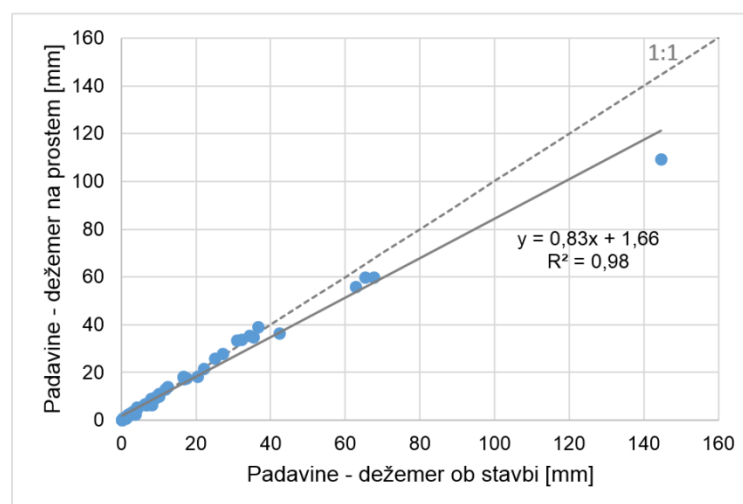
vrednostmi je pričakovana, saj sta postaji oddaljeni približno 3 km, padavinski dogodki pa so predvsem poleti lahko dokaj prostorsko omejeni. Na splošno pa so padavine, izmerjene na obeh postajah, podobne, s korelacijskim koeficientom 0,969.



Slika 29: Odvisnost padavin, izmerjenih z dežemerom na raziskovalni ploskvi (Hajdrihova) od padavin, izmerjenih na meteorološki postaji Bežigrad (ARSO)

Figure 29: Rainfall measured at the study plot (Hajdrihova) as a function of rainfall measured at Bežigrad station

Da bi ovrednotili vpliv bližine stavb ob raziskovalni ploskvi na količino izmerjenih padavin, smo v njihovi neposredni bližini februarja 2017 postavili kontrolni dežemer »ob stavbi«. Do konca septembra 2017 je ta zabeležil 62 padavinskih dogodkov, ki smo jih primerjali z meritvami osnovnega dežemera »na prostem«. Regresijska analiza kaže na minimalno odstopanje izmerjenih padavin obeh dežemerov z velikim korelacijskim koeficientom 0,990. Dežemer ob stavbi je za pet daljših dogodkov z več kot 40 mm padavin, ki so trajali tudi v nočnem obdobju, izmeril približno 15 % večjo količino padavin (slika 30). Za te dogodke pa nismo zabeležili nobenih izstopajočih lastnosti vetra, saj so se povprečne hitrosti gibale med 1,22 m/s in 1,84 m/s, prevladovala pa ni nobena smer vetra.

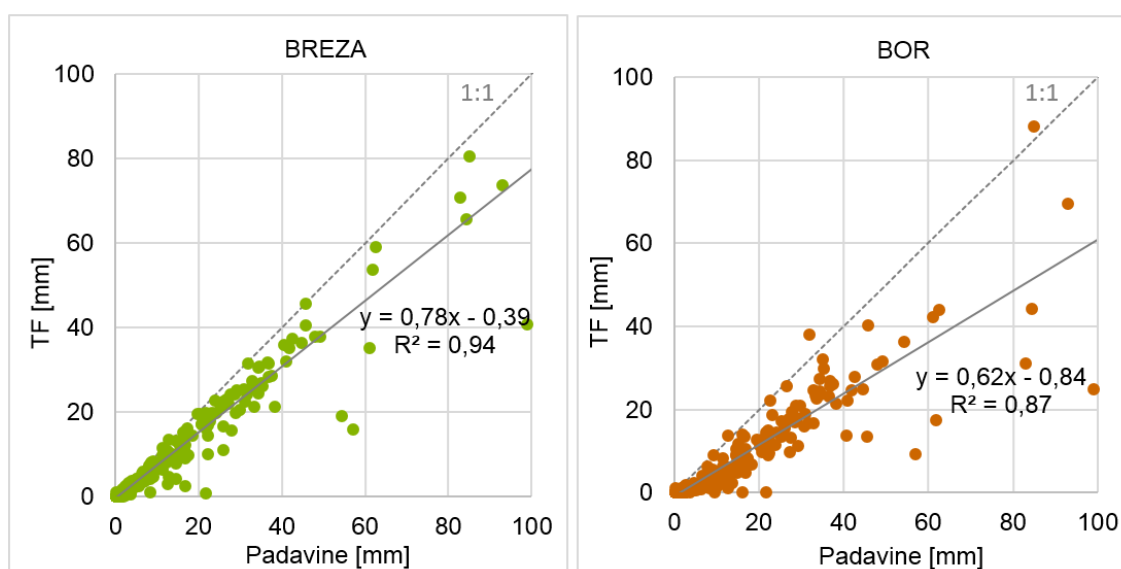


Slika 30: Odvisnost padavin na raziskovalni ploskvi, izmerjenih z dežemerom "na prostem" od padavin, izmerjenih z dežemerom "ob stavbi"

Figure 30: Rainfall measured at the study plot with rainfall gauge in the open as a function of rainfall measured at the study plot with rainfall gauge near the building

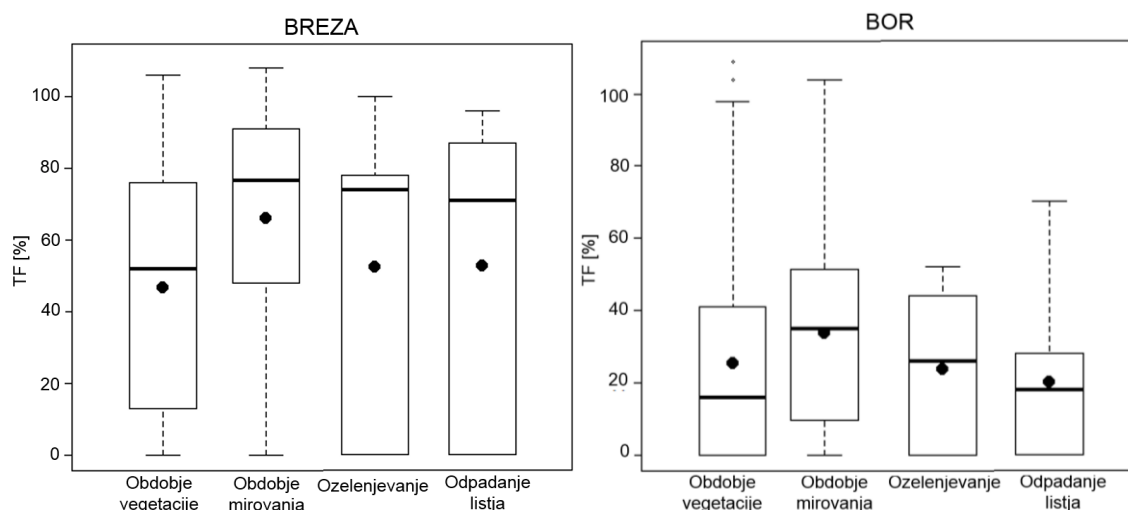
4.1.2 Prepuščene padavine

V celotnem obdobju meritev (1. 1. 2014 – 30. 6. 2017) smo pod brezo izmerili 3.039,0 mm prepuščenih padavin, kar predstavlja 74 % vseh na prostem izmerjenih padavin. V 91 dogodkih s količino padavin od 0,2 mm do 1,4 mm pod brezo nismo zaznali prepuščenih padavin. V 5 dogodkih s padavinami med 2 mm in 13 mm pa je bila količina TF pod brezo večja od količine padavin, izmerjene na prostem (slika 31), kar je najverjetneje posledica premeščanja prestreženih padavin znotraj krošnje in povečanega kapljanja v določenih točkah kapljanja (ang. *drip points*). Povprečno na dogodek je delež TF znašal 52 % (± 34 %) padavin na prostem, od začetka padavin na prostem do začetka prepuščanja padavin pa je v povprečju minilo 42 min. V obdobju vegetacije smo pod brezo v povprečju na dogodek izmerili najmanj prepuščenih padavin (46 % ± 32 % oziroma med 0 mm pri manj kot 1,4 mm padavin in 80,4 mm pri 85 mm padavin), pričakovano največ pa jih je bilo, ko je bila krošnja gola (66 % ± 31 % oziroma med 0 mm pri manj kot 0,8 mm padavin in 144,2 mm pri 167,4 mm padavin). V obdobju olistanja in odpadanja listja so bile povprečne prepuščene padavine na dogodek približno enake celoletnemu povprečju, in sicer 52 % padavin na prostem (slika 32).



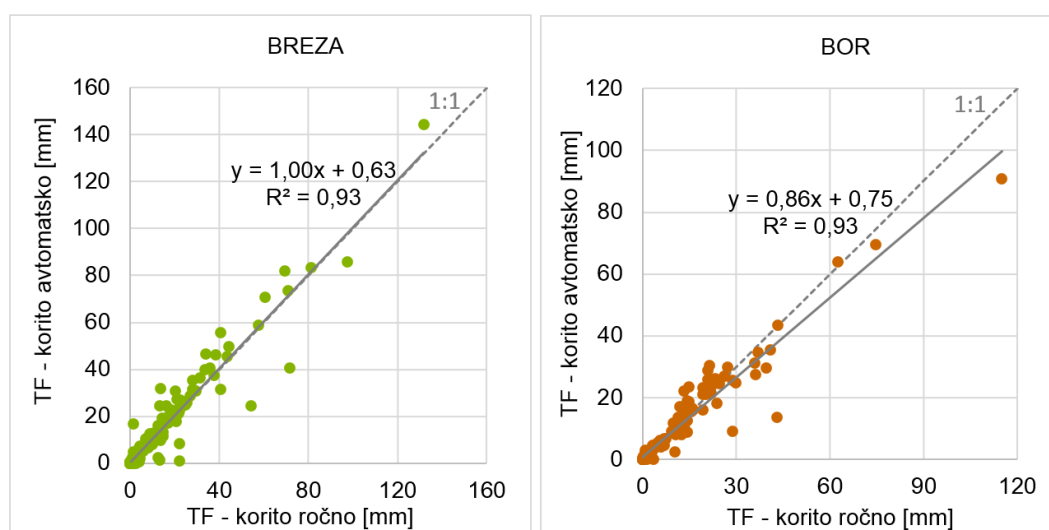
Slika 31: Odvisnost padavin na prostem in prepuščenih padavin (TF) pod drevesnima vrstama
Figure 31: Rainfall measured in the open as the function of throughfall measured under the tree species

Pod črnim borom smo prepuščene padavine zaznali v 292 dogodkih, skupaj pa so znašale 2.192,7 mm oziroma 53 % vseh na prostem izmerjenih padavin. V 119 dogodkih, katerih količina padavin na prostem se je gibala med 0,2 mm in 2,6 mm, so merilniki pod borom ostali suhi. Večjo vrednost TF kot padavin na prostem smo verjetno zaradi točk kapljanja zabeležili v 3 dogodkih s padavinami med 12 in 85 mm (slika 31). Povprečno na dogodek je delež TF pod borom znašal 27 % (± 26 %), z majhnimi razlikami glede na fenofaze: 26 % (± 27 %) v obdobju vegetacije in 32 % (± 26 %) v obdobju mirovanja (slika 32). Od začetka padavin na prostem do začetka prepuščanja padavin pod borom je v povprečju minilo 42 min.

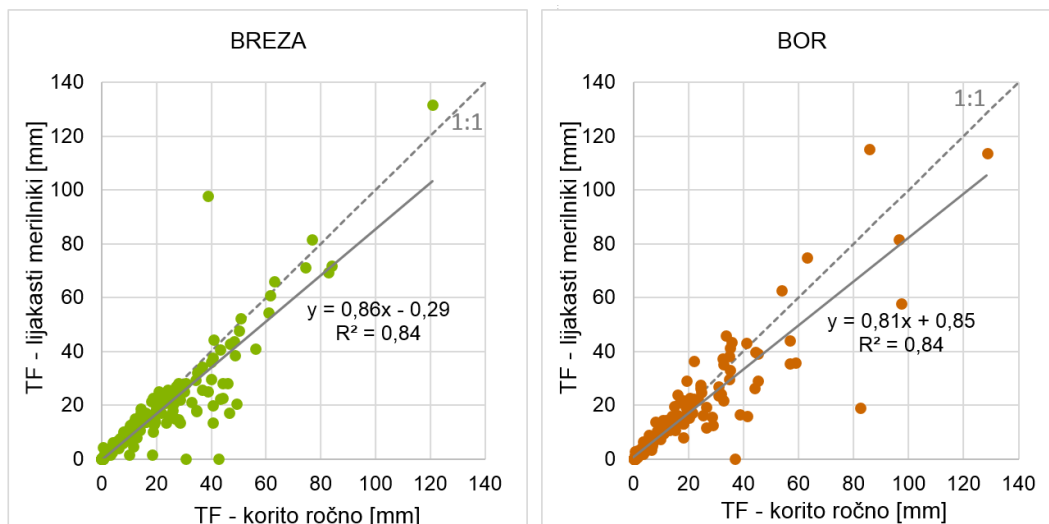


Slika 32: Delež TF pod navadno brezo in črnim borom za posamezno fenofazo
Figure 32: Measured TF under common silver birch and Austrian pine trees according to the phenoseasons

Prepuščene padavine pod posamezno drevesno vrsto smo merili na tri načine: s koritom z avtomatskim zapisovanjem podatkov (avtomatsko korito), koritom z ročnim pobiranjem podatkov (ročno korito) in z 11 premičnimi lijakastimi merilniki z ročnim pobiranjem podatkov. Površina korit je bila enaka, razlikovali sta se le v načinu beleženja podatkov, poleg tega pa sta bili nameščeni pod različnima drevesoma iste vrste. Količine TF, izmerjene s koriti z različnima metodama beleženja podatkov, se med seboj ujemajo (slika 33), koeficient korelacije (R) za obe drevesi je znašal 0,962. Količina prepuščenih padavin, izmerjena z lijakastimi merilniki in koriti z ročnim pobiranjem podatkov, je podobna, s koeficientoma korelacije 0,916 v primeru breze in 0,915 v primeru bora (slika 34). Enako je tudi pri primerjavi TF, izmerjenega z lijakastimi merilniki in z avtomatskimi koriti (slika 35). Izmerjene vrednosti so med seboj podobne, s korelacijskima koeficientoma 0,924 pod brezo in 0,928 pod borom. Kljub velikim koeficientom korelacije, se izmerjene prepuščene padavine bolj razlikujejo pri primerjavi katerega izmed korit in lijakastih merilnikov, kot pri primerjavi obeh korit med seboj. Razlika je posledica tega, da sta imeli koriti enako površino, medtem ko je površina posameznega lijakastega merilnika manjša, zaradi občasnega prestavljanja pa z njimi ujamemo tudi prostorsko porazdelitev TF in točke kapljanja (ang. *drip point*).

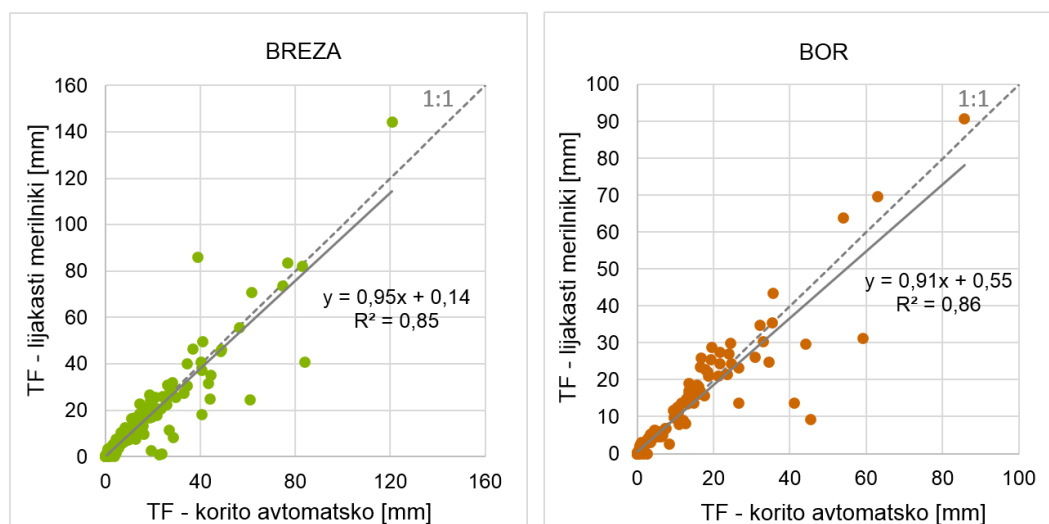


Slika 33: TF izmerjen z avtomatskimi koriti glede na meritve z ročnimi koriti
Figure 33: TF measured with automatic through gauge as a function of TF measured with through gauge with manual collection



Slika 34: TF izmerjen z lijakastimi merilniki glede na TF izmerjen z ročnimi koriti

Figure 34: TF measured with funnel type gauges as a function of TF measured with through gauges with manual data collection



Slika 35: TF izmerjen z lijakastimi merilniki glede na TF izmerjen z avtomatskimi koriti

Figure 35: TF measured with funnel type gauges as a function of TF measured with automatic through gauges

Izmerjene vrednosti prepuščenih padavin (74 % pod navadno brezo in 53 % pod črnim borom) so primerljive z vrednostmi, izmerjenimi za podobne drevesne vrste v urbanem okolju. V Kaliforniji so pod okrasno hruško izmerili TF enak 77 % padavin (Xiao in sod., 2000), pod dvokrpim ginkom 74,8 % (Xiao in McPherson, 2011a) in v urbanem listnatem gozdu med 78,1 % in 88,9 % (Inkiläinen in sod., 2013). Prepuščene padavine pod iglastimi drevesi v Kanadi pa so znašale 50 % za navadno ameriško duglazijo in 46 % za orjaški klek (Asadian in Weiler, 2009). Prepuščene padavine v nasadih listnatih dreves in listnatih gozdovih se gibljejo med 63,3 % in 83,9 % in so tako približno enake tistim, izmerjenim v urbanem okolju (preglednica 5). Nasprotno pa so deleži TF, izmerjeni v nasadih in gozdovih iglavcev, za približno 20 % večji od tistih v urbanem okolju. Pod ameriško duglazijo v urbanem okolju Kanade sta Asadian in Weiler (2009) izmerila TF enak 50 % padavin, v nasadu te drevesne vrste v Čilu pa sta Iroume in Huber (2002) izmerila TF enak 72 % padavin. Poleg tega smo v Ljubljani izmerili TF enak 53 % padavin pod črnim borom, medtem ko so ostali raziskovalci v borovih nasadih in gozdovih izmerili med 77,2 % (Bryant in sod., 2005) in 89 % (Buttle in Farnsworth, 2012) padavin (preglednica 5).

Preglednica 5: Pregled izmerjenih prepuščenih padavin (TF) drugih raziskovalcev

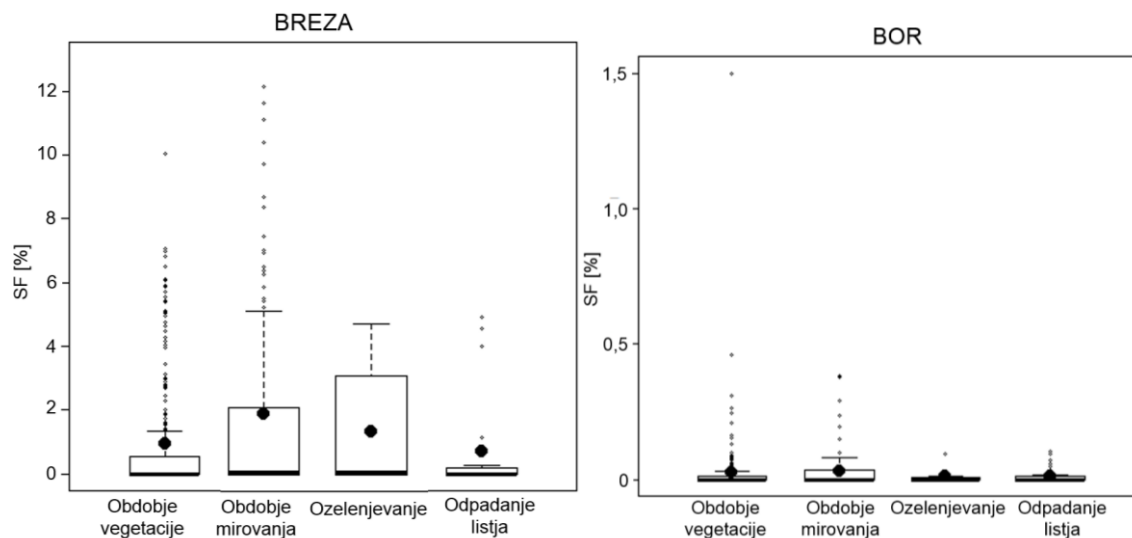
Table 5: Review of the measured TF values from other researchers

	Vrsta vegetacije	TF [%]	Lokacija	Vir
Urbano okolje, listavci	Okrasna hruška (<i>Pyrus calleryana</i> Decne)	77	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Hrast plutovec (<i>Quercus suber</i> L.)	58	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Drobnolistni smokovec (<i>Ficus benjamina</i> L.)	38,1	Queretaro City, Mehika	Guevara – Escobar in sod., 2007
	Dvokrpi ginko (<i>Ginkgo biloba</i> L.)	74,8	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Ameriški ambrovec (<i>Liquidambar styraciflua</i> L.)	85,7	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Limonovec (<i>Citrus limon</i> (L.) Osbeck)	73	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Urbani listnati gozd	78,1 - 88,9	Raleigh, Kalifornija, ZDA	Inkiläinen in sod., 2013
	Sidnejski modri evkalipt (<i>Eucalyptus saligna</i> Sm.)	71	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
	Ozkolistni evkalipt (<i>Eucalyptus nicholii</i> Maiden & Blakely)	56	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
	Urbani listnati gozd (hrast, kostanj, smreka)	78,3	Ljubljana, Slovenija	Kermavnar in Vilhar, 2017
Urbano okolje, iglavci	Navadna ameriška duglazija (<i>Pseudotsuga</i> <i>menziesii</i> (Mirb.) Franco)	50	Vancouver, Kanada	Asadian in Weiler, 2009
	Orjaški klek (<i>Thuja plicata</i> Donn ex D. Don.)	46	Vancouver, Kanada	Asadian in Weiler, 2009
Gozdovi in nasadi, iglavci	Borov gozd (<i>Pinus taeda</i> L., <i>Pinus echinata</i> Mill.)	77,2	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Borov nasad (<i>Pinus echinata</i> Mill.)	80,5	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Nasad rdečega bora (<i>Pinus resinosa</i> Aiton)	80 - 89	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in Farnsworth, 2012
	Iglasti gozd (bela smreka, skalna jelka, bor)	59,4	British Columbia, Kanada	Carlyle-Moses in sod., 2014
	Iglasti gozd - kriptomerija (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don.)	76,9	Tsukuba, Japonska	Iida in sod., 2017
	Nasad navadne ameriške duglazije (<i>Pseudotsuga</i> <i>menziesii</i> (Mirb.) Franco)	72	Malalcahuello Forest, Čile	Iroume in Huber, 2002
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	76	Zahodni Pireneji, Španija	Llorens in sod., 1997
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	71,3	Yakutsk, Sibirija, Rusija	Toba in Ohta, 2005
	Borov gozd (<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.)	82,6	Morioka, Japonska	Toba in Ohta, 2005

	Nasad obmorskega bora (<i>Pinus radiata</i> D. Don)	69,5	Mount Gambier, Avstralija	Benyon in Doody, 2014
	Nasad rdečega bora (<i>Pinus resinosa</i> Aiton)	57 - 74	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in sod., 2014
	Nasad navadne smreke (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	57,2	Saška, Nemčija	Frischbier in Wagner, 2005
Gozdovi in nasadi, listavci	Listnati gozd (<i>Quercus pubescens</i> Wild.)	77	Zahodni Pireneji, Španija	Muzylo in sod., 2012
	Listnati gozd (hrast dob, navadna bukev)	71	Ghent, Belgija	Staelens in sod., 2008
	Hrastov gozd (<i>Quercus acutissima</i> Carruth)	72,4	Nagoya, Japonska	Toba in Ohta, 2005
	Listnati gozd (hrast in breza)	73	Berkshire, Velika Britanija	Herbst in sod., 2008
	Listnati gozd (gaber, hrast, jesen, javor)	67 - 72	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
	Nasad vrste evkalipta (<i>Eucalyptus diversifolia</i> Bonpl.)	66,4	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Nasad avstralske obalne kazaurine (<i>Allocasuarina</i> <i>verticillata</i> (Lam.) L.A.S.Johnson)	65,9	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Listnati gozd (javor, breza, bukve, hrast)	75 – 83,9	Fair Hill, Maryland, ZDA	Siegert in sod., 2016
	Nasad navadne bukve (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	63,3	Saška, Nemčija	Frischbier in Wagner, 2005
	Listnati gozd (<i>Quercus serrata</i> Murray, <i>Clethra barbinervis</i> Siebold & Zucc.)	77,1	Toyota, Aichi Prefecture, Japonska	Deguchi in sod., 2006

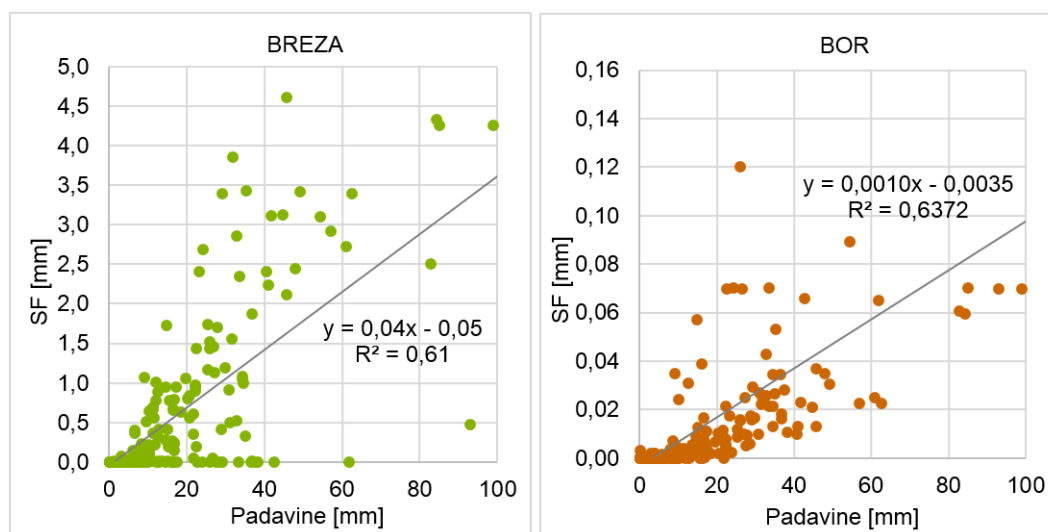
4.1.3 Odtok po deblu

V celotnem obdobju meritev smo pod brezo zabeležili 130,9 mm odtoka po deblu, kar predstavlja 3,2 % vseh padavin. V 196 dogodkih s količino padavin med 0,2 mm in 29,0 mm odtoka po deblu nismo zabeležili (slika 37). Na splošno je bilo za začetek SF breze potrebnih vsaj 2 mm padavin, ta pa je znašal največ 12,1 %. SF je bil v povprečju največji v obdobju gole krošnje (1,9 % $\pm$ 3,3 %), ko je dosegel 4,3 mm pri 84,4 mm padavin, najmanjši pa v času odpadanja listja (0,7 % $\pm$ 1,5 %), ko je dosegel 1,6 mm pri 31,6 mm padavin (slika 36).



Slika 36: SF pri navadni brezi in črnem boru po posameznih fenofazah
Figure 36: SF for common silver birch and Austrian pine trees by phenoseasons

Odtok po deblu pod črnim borom je v treh letih in pol meritev skupaj znašal le 2,7 mm (0,07 % padavin na prostem) in je kot tak zanemarljiv. Do odtoka po deblu ni prišlo v 252 dogodkih, vsaj 0,01 mm odtoka po deblu pa smo izmerili pri dogodkih z več kot 9,2 mm padavin. Največja izmerjena količina je bila 0,3 mm pri dogodku z 167,4 mm padavin. Povprečno na dogodek je bil SF največji v obdobju mirovanja (0,031 % $\pm$ 0,069 %) in najmanjši v obdobju vegetacije (0,011 % $\pm$ 0,026 %) (slika 36).



Slika 37: Odvisnost padavin na prostem in odtoka po deblu (SF) pod drevesnima vrstama
Figure 37: Rainfall measured in the open as the function of stemflow measured under the tree species

Odtok po deblu se običajno začne z določenim časovnim zamikom glede na začetek padavin. Glede na zadostno količino odtoka po deblu pri brezi, smo septembra 2014 tam namestili merilnik z avtomatskim beleženjem podatkov. V povprečju se je SF začel 2 uri ($\pm$ 2,8 h) po zabeleženem začetku padavin na prostem. V 17 dogodkih smo SF zabeležili prej kot v 10 minutah, pri 15 dogodkih pa po več kot 5 urah.

Izmerjene vrednosti SF (3,2 % pod navadno brezo in 0,07 % pod črnim borom) se nahajajo znotraj vrednosti, ki so jih za podobne drevesne vrste izmerili v drugih študijah. Odtok po deblu breze je primerljiv z 2,4 % padavin, ki so jih v Mehiki izmerili za drobnolisti smokvovec (Guevara-Escobar in sod., 2007) in 2,1 % ter 4,1 % izmerjenih v Kaliforniji za limonovec in

ameriški ambrovec (Xiao in McPherson, 2011a). Tudi SF v hrastovem gozdu na Japonskem (Toba in Ohta, 2005) in bukovem gozdu v Nemčiji (Levia in sod., 2015) znaša približno toliko kot pri brezi v Ljubljani (preglednica 6). V edini študiji, ki je do sedaj pri meritvah obravnavala iglavce v urbanem okolju, so odtok po deblu zanemarili (Asadian, 2010). V večini primerov pa so tudi drugi raziskovalci izmerili majhen delež SF pri iglavcih v gozdovih in nasadih (preglednica 6).

Preglednica 6: Pregled izmerjenega odtoka po deblu (SF) drugih raziskovalcev

Table 6: Review of the measured SF values from other researchers

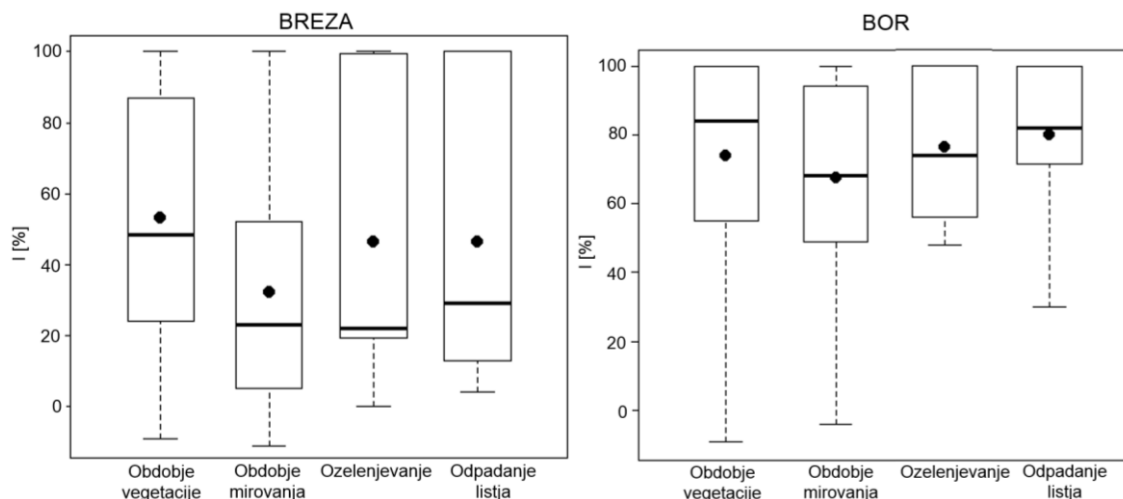
	Vrsta vegetacije	SF [%]	Lokacija	Vir
Urbano okolje, listavci	Okrasna hruška (<i>Pyrus calleryana</i> Decne.)	8	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Hrast plutovec (<i>Quercus suber</i> L.)	15	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Drobnolistni smokvovec (<i>Ficus benjamina</i> L.)	2,4	Queretaro City, Mehika	Guevara – Escobar in sod., 2007
	Dvokrpi ginko (<i>Ginkgo biloba</i> L.)	1	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Ameriški ambrovec (<i>Liquidambar styraciflua</i> L.)	4,1	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Limonovec (<i>Citrus limon</i> (L.) Osbeck)	2,1	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Evkalipt (<i>Eucalyptus saligna</i> Sm.)	1,7	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
	Evkalipt (<i>Eucalyptus nicholii</i> Maiden & Blakely)	0,3	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
	Listnati urbani gozd (bukev, sliva, hrast)	1,5	British Columbia, Kanada	Schooling in sod., 2017
Urbano okolje, iglavci	Navadna ameriška duglazija (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)	zanemarljiv	Vancouver, Kanada	Asadian, 2010
	Orjaški klek (<i>Thuja plicata</i> Donn ex D.Don)	zanemarljiv	Vancouver, Kanada	Asadian, 2010
Gozdovi in nasadi, iglavci	Borov gozd (<i>Pinus taeda</i> L., <i>Pinus echinata</i> Mill.)	0,54	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Borov nasad (<i>Pinus echinata</i> Mill.)	1,96	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Nasad rdečega bora (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	0,1 – 0,8	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in Farnsworth, 2012
	Iglasti gozd (smreka, jelka, bor)	zanemarljiv	British Columbia, Kanada	Calrlyle-Moses in sod., 2014
	Iglasti gozd - kriptomerija (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don)	3,2	Tsukuba, Japonska	Iida in sod., 2017
	Nasad navadne ameriške duglazije (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)	6	Malalcahuello Forest, Čile	Iroume in Huber, 2002
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,7	Zahodni Pireneji, Španija	Llorens in sod., 1997
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	0,03	Yakutsk, Sibirija, Rusija	Toba in Ohta, 2005

Gozdovi in nasadi, listavci	Borov gozd (<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.)	3,3	Morioka, Japonska	Toba in Ohta, 2005
	Borov nasad (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	0,1 – 0,8	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in sod., 2014
	Listnati gozd (hrast dob, navadna bukev)	8	Ghent, Belgija	Staelens in sod., 2008
	Hrastov gozd (<i>Quercus acutissima</i> Carruth.)	2,5	Nagoya, Japonska	Toba in Ohta, 2005
	Listnati gozd (hrast in breza)	16,5	Berkshire, Velika Britanija	Herbst in sod., 2008
	Listnati gozd (gaber, hrast, jesen, javor)	2,9 – 4,5	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
	Nasad evkalipta (<i>Eucalyptus diversifolia</i> Bonpl.)	3,1	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Nasad avstralskega hrasta (<i>Allocasuarina verticillata</i> (Lam.) L.A.S.Johnson)	7,9	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Listnati gozd (<i>Quercus serrata</i> Murray, <i>Clethra barbinervis</i> Siebold & Zucc.)	6	Toyota, Aichi Prefecture, Japonska	Deguchi in sod., 2006
	Bukov gozd (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	2,4	Jena, Thuringia, Nemčija	Levia in sod., 2015

4.1.4 Prestrežene padavine

Rezultati meritev kažejo, da je črni bor v obdobju meritev prestregel več padavin kot navadna breza, kar je zaradi vednozelenosti krošnje bora pričakovano. Črni bor je prestregel 47 % padavin, navadna breza pa 23 % padavin. Bor je vse padavine prestregel v 120 dogodkih, katerih količina padavin je znašala do 2,6 mm. 100 % prestrežanje se je pri brezi pojavilo v 81 dogodkih, katerih količina padavin ni preseгла 1,8 mm.

Povprečno na dogodek je navadna breza prestregla 45 % (± 44 %) padavin. Prestrežanje je bilo pričakovano največje v obdobju vegetacije (51 % ± 47 %) in najmanjše v obdobju neolistane krošnje (32 % ± 32 %) (slika 38). Tudi povprečno na dogodek je bor prestregel več padavin kot breza (72 % ± 35 %). Največja razlika v količini prestreženih padavin se je pojavila v obdobju mirovanja, ko je bor povprečno na dogodek prestregel kar 35 % padavin več kot breza. Tudi pri boru pa opazimo razliko med deleži prestrežanja po posameznih fenofazah (slika 38). V obdobju vegetacije je bor prestregel povprečno na dogodek 72 % (± 40 %) padavin, medtem ko v obdobju mirovanja 67 % (± 26 %) padavin.



Slika 38: I navadne breze in črna bora po posameznih fenofazah

Figure 38: I for common silver birch and Austrian pine trees according to the phenoseasons

Delež prestreženih padavin navadne breze (23 %) se nahaja znotraj vrednosti, ki so jih pri listavcih v urbanem okolju izmerili drugi raziskovalci: 27 % za hrast plutovec (Xiao in sod., 2000), 25,5 % za dvokrpi ginko (Xiao in McPherson, 2011a) in 29 % za evkaliptus (Livesley in sod., 2014). Podobni pa so tudi deleži prestreženih padavin v listnatih gozdovih (preglednica 7). V primeru bora pa je delež prestreženih padavin (47 %) podoben 49,1 %, izmerjenih za navadno ameriško duglazijo v Kanadskem mestu Vancouver (Asadian in Weiler, 2009), medtem ko so vrednosti izmerjene v iglastih gozdovih manjše (preglednica 7).

Preglednica 7: Pregled izmerjenega prestrezanja padavin (I) drugih raziskovalcev

Table 7: Review of the measured I values from other researchers

	Vrsta vegetacije	I [%]	Lokacija	Vir
Urbano okolje, listavci	Okrasna hruška (<i>Pyrus calleryana</i> Decne.)	15	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Hrast plutovec (<i>Quercus suber</i> L.)	27	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
	Drobnolistni smokvovec (<i>Ficus benjamina</i> L.)	59,5	Queretaro City, Mehika	Guevara – Escobar in sod., 2007
	Dvokrpi ginko (<i>Ginkgo biloba</i> L.)	25,5	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Ameriški ambrovec (<i>Liquidambar styraciflua</i> L.)	14,3	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Limonovec (<i>Citrus limon</i> (L.) Osbeck)	27	Oakland, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011a
	Urbani listnati gozd	9,1-21,4	Raleigh, Kalifornija, ZDA	Inkiläinen in sod., 2013
	Evkalipt (<i>Eucalyptus saligna</i> Sm.)	29	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
	Evkalipt (<i>Eucalyptus nicholii</i> Maiden & Blakely)	44	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
Urbano okolje, iglavci	Urbani listnati gozd (hrast, kostanj, smreka)	3,9-18	Ljubljana, Slovenija	Kermavnar in Vilhar, 2017
	Navadna ameriška duglazija (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)	49,1	Vancouver, Kanada	Asadian in Weiler, 2009

	Orjaški klek (<i>Thuja plicata</i> Donn ex D. Don)	60,9	Vancouver, Kanada	Asadian in Weiler, 2009
Gozdovi in nasadi, iglavci	Borov gozd (<i>Pinus taeda</i> L., <i>Pinus echinata</i> Mill.)	22,3	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Borov nasad (<i>Pinus echinata</i> Mill.)	17,4	Georgia, ZDA	Bryant in sod., 2005
	Nasad rdečega bora (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	11-20	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in Farnsworth, 2012
	Iglasti gozd (bela smreka, skalna jelka, bor)	40,6	British Columbia, Kanada	Calrlyle-Moses in sod., 2014
	Iglasti gozd - kriptomerija (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don)	19,9	Tsukuba, Japonska	Iida in sod., 2017
	Nasad navadne ameriške duglazije (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)	22	Malalcahuello Forest, Čile	Iroume in Huber, 2002
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	24	Zahodni Pireneji, Španija	Llorens in sod., 1997
	Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	36	Yakutsk, Sibirija, Rusija	Toba in Ohta, 2005
	Borov gozd (<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.)	13-17	Morioka, Japonska	Toba in Ohta, 2005
	Nasad obmorskega bora (<i>Pinus radiata</i> D. Don)	31	Mount Gambier, Avstralija	Benyon in Doody, 2014
	Nasad rdečega bora (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	25-43	Ganaraska Forest, Ontario, Kanada	Buttle in sod., 2014
	Nasad navadne smreke (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	42,8	Saška, Nemčija	Frischbier in Wagner, 2005
Gozdovi in nasadi, listavci	Listnati gozd (hrast dob, navadna bukev)	21	Ghent, Belgija	Staelens in sod., 2008
	Hrastov gozd (<i>Quercus acutissima</i> Carruth.)	18-24	Nagoya, Japonska	Toba in Ohta, 2005
	Listnati gozd (hrast in breza)	29 + 20 -	Berkshire, Velika Britanija	Herbst in sod., 2008
	Listnati gozd (gaber, hrast, jesen, javor) – J ploskev	25,4	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
	Listnati gozd (gaber, hrast, jesen, javor) – S ploskev	28,4	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
	Nasad evkalipta (<i>Eucalyptus diversifolia</i> Bonpl.)	30,9	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Nasad avstralskega hrasta (<i>Allocasuarina verticillata</i> (Lam.) L.A.S. Johnson)	31,4	Eyer Peninsula, Avstralija	Swaffer in sod., 2014
	Listnati gozd (javor, breza, bukev, hrast)	16,1-25	Fair Hill, Maryland, ZDA	Siebert in sod., 2016
	Nasad navadne bukve (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	36,7	Saška, Nemčija	Frischbier in Wagner, 2005

Listnati gozd (*Quercus serrata* Murray, *Clethra barbinervis* Siebold & Zucc.)

17,6 +
14,3 -

Toyota, Aichi
Prefecture,
Japonska

Deguchi in sod., 2006

+ obdobje vegetacije, - obdobje mirovanja

4.1.5 Prestrežanje snega

Snežnih padavin v analizi nismo upoštevali, saj je potrebno meritve snežnih dogodkov izvajati drugače (Brilly in Šraj, 2005). Voda v merilnikih je pri takih dogodkih večkrat zamrznila, kar ni omogočalo sprotnih meritev, poleg tega pa je bil vzorec teh dogodkov v obravnavanem obdobju majhen, kar ni omogočalo zanesljive statistične analize. Kljub vsemu pa smo z opazovanjem dogodkov s snegom na raziskovalni ploskvi ugotovili, da drevesa na začetku dogodka prestrežejo veliko snega, ki se zadržuje na vejah v debelih plasteh. Posledično je bilo prepuščanje snega med samim dogodkom predvsem pod borom zanemarljivo, kar je razvidno tudi na sliki 39, kjer bod borovci praktično ni snega. Izmed dvanajst zabeleženih snežnih dogodkov pa je kar v primeru desetih sneg prehajal v dež že med dogodki ali v roku 24 ur po prenehanju sneženja. Glede na to, da je bilo ob začetku dežja na vejah uskladiščenega še kar nekaj snega, ni bilo mogoče opredeliti, kolikšno je bilo prepuščanje staljenih snežnih padavin in kolikšno prepuščanje dežja. Zato izmerjene vrednosti prepuščenih padavin in odtoka po deblu v primeru snežnih dogodkov predstavljamo le v okviru rezultatov meritev za pet izbranih dogodkov, za katere smo imeli na voljo vse izmerjene vrednosti (preglednica 8).

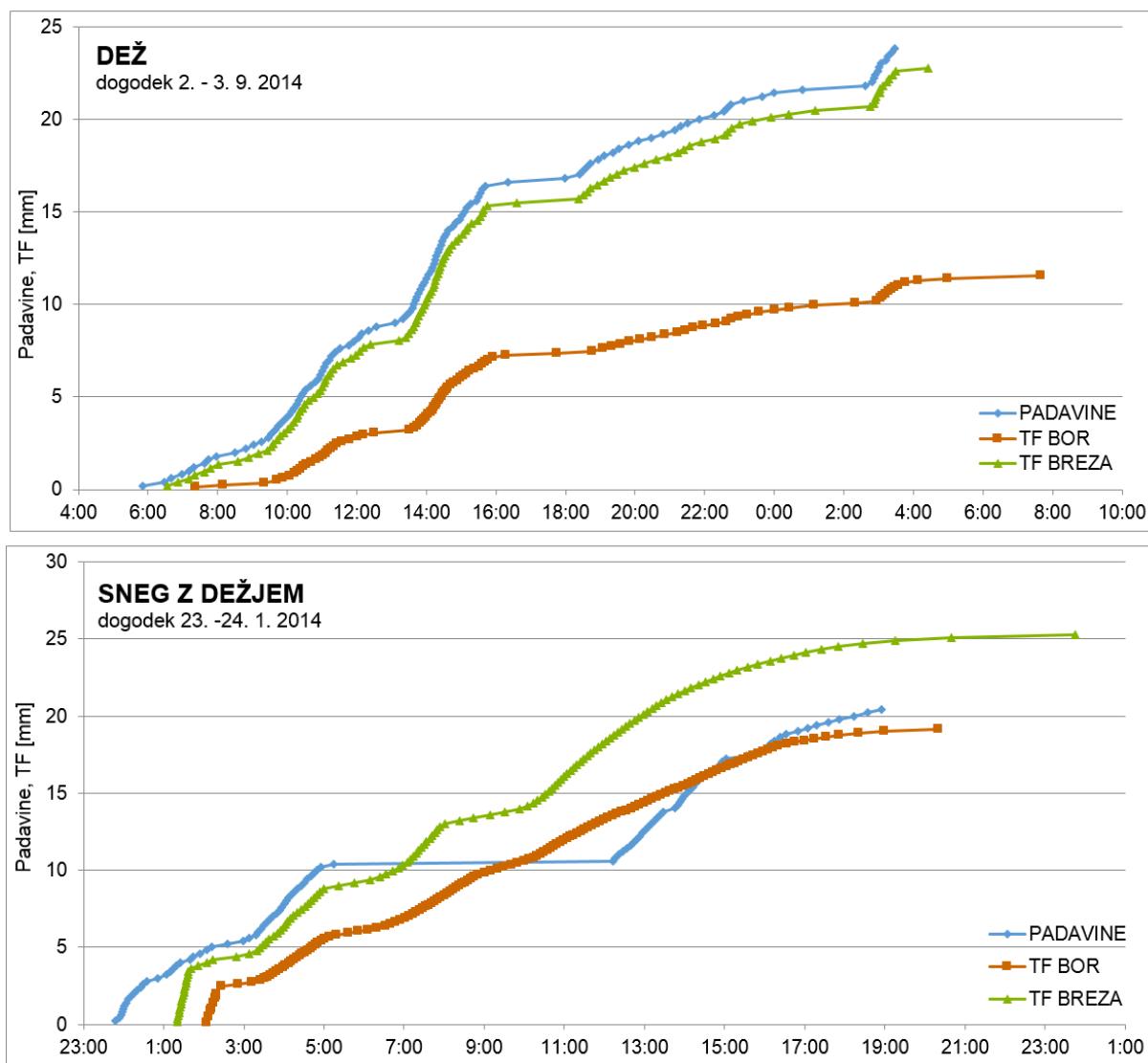


Slika 39: Prestrežanje snega na raziskovalni ploskvi
Figure 39: Snow interception at the study plot

Preglednica 8: Komponente prestrežanja za pet izbranih dogodkov s snežnimi padavinami
Table 8: Rainfall partitioning for the five selected events with snow precipitation

Datum	Padavine [mm]	breza		bor		prestrežene padavine	
		TF [mm]	SF [mm]	TF [mm]	SF [mm]	breza	bor
23.-24.1.2014	20,6	25,3	3,1	19,1	0,043	-38%	7%
18.4.2015	24,6	22,3	2,7	20,1	0,015	-1%	18%
20.-22.11.2015	53,4	36,7	8,31	50,0	0,063	16%	6%
8.-10.1.2016	50,2	35,0	1,6	43,4	0,000	27%	13%
12.-13.2.2016	28,6	24,9	0,6	13,5	0,016	11%	53%

Prestrežanje snega v kombinaciji z dežjem je bilo manjše kot prestrežanje samo dežja, saj je breza v povprečju pri petih dogodkih prestregla le 3 % (± 22 %), bor pa 20 % (± 17 %) padavin na prostem. Pri dveh dogodkih z manjšimi količinami padavin je bilo prestrežanje padavin breze celo negativno, kar pomeni, da je tla pod brezo doseglo več padavin kot tla na prostem. Merilniki na prostem omogočajo le merjenje tekočih padavin, zato še ne staljen sneg ni bil izmerjen in v vsoti padavin ni bil upoštevan. To je prispevalo k presežkom izmerjenih prepuščenih padavin v času dogodka, saj se je sneg na drevesu ob stiku z dežjem talil hitreje.



Slika 40: Primerjava grafov časovnega razvoja padavin in prepuščenih padavin (TF) za dogodek z dežjem (zgoraj) in dogodek s kombinacijo snega in dežja (spodaj)

Figure 40: An example of graphs of precipitation and throughfall (TF) development for event with rainfall (upper figure) and mixed rainfall-snow event (lower figure)

Nizki deleži prestrežanja padavin ali celo negativne vrednosti so posledica drugačnega poteka procesa prestrežanja padavin ob prisotnosti snega. Sneg se namreč v večjih količinah najprej zadrži na drevesnih krošnjah, kasneje pa zaradi taljenja ob dežju skoraj v celoti doseže tla. To je razvidno tudi iz primerov grafov časovnega razvoja padavin na prostem in TF (slika 40). V primeru dežja se je prepuščanje padavin pod drevesoma začelo z manjšim časovnim zamikom in postopoma. Količina TF je sledila naraščanju količine padavin na prostem, vendar jih ni preseгла (razen v posameznih točkah). Pri kombinaciji snežnih in dežnih padavin pa je zamik med začetkom padavin na prostem in TF večji. V večini primerov je na začetku dogodka prevladoval sneg, ki se je v večji meri zadržal na drevesni krošnji (slika 39). Ko se je po

približno dveh urah od začetka padavin med snegom pričel obilneje pojavljati dež, se je prvotno prestrežen sneg pričel taliti in kapljati z drevesnih krošenj, kar se vidi v hitrem odzivu TF na sliki 40 spodaj, kar ni bila značilnost dežnih dogodkov (slika 40 zgoraj). Kapljanje s krošenj se je neprekinjeno nadaljevalo tudi v daljšem obdobju brez padavin (med 5:00 in 12:00), ko je količina TF pod obema drevesoma presegla do takrat zapadlo količino padavin na prostem. Kapljanje z drevesnih krošenj se je nadaljevalo še kar nekaj časa po koncu padavin.

4.1.6 Zmanjšanje površinskega odtoka

S procesom urbanizacije se spreminja pokrivnost tal, kar v veliki meri vpliva na hidrološke značilnosti območja. Infiltracija padavin se zmanjša, količina in hitrost površinskega odtoka pa se povečata. Urbana drevesa s prestrezanjem zmanjšajo količino padavin, ki dosežejo tla in tako prispevajo k manjšemu površinskemu odtoku, ki ga poleg tega tudi zakasnijo. Drevesa v urbanem okolju tako postajajo čedalje bolj prepoznana kot učinkovit način nadzorovanja padavinske vode, zmanjševanja površinskega odtoka in z njim povezanih stroškov.

Učinek dreves v urbanem okolju na zmanjšanje površinskega odtoka smo analizirali za primer parkirišča Dolgi most (slika 4). Z uporabo programa Green Values Stormwater Management Calculator (CNT, 2015) smo odtok izračunali za vsak tip površine, ki ga najdemo na obravnavanem parkirišču (asfalt, travnate površine in površine, prekrte z drevesi). Glede na izmerjeno količino padavin v letu 2014 (1672 mm), bi odtok s parkirišča pred zasaditvijo v tem letu znašal 19565 m³. Če obstoječe travnate površine (11 % celotne površine parkirišča pred zasaditvijo) odtok v primerjavi s povsem asfaltiranim parkiriščem zmanjšajo za 7,7 %. Zasaditev dreves bi zmanjšala asfaltno površino v povprečju še za nadaljnjih 10 % (slika 5). V primeru zasaditve breze bi drevesa prispevala 7 % k zmanjšanju površinskega odtoka (18187 m³), zasaditev črnega bora pa bi vplivala na 17 % manjši površinski odtok (16154 m³), kar potrjuje tretjo hipotezo disertacije.

Preglednica 9: Zmanjšanje površinskega odtoka, o katerem so poročali drugi raziskovalci

Table 9: Review of the surface runoff reduction values observed by other researchers

Obravnavan primer	Zmanjšanje odtoka [%]	Lokacija	Vir
Drevesa in inženirski pas zemlje na parkirišču	89	Davis, Kalifornija, ZDA	Xiao in McPherson, 2011b
Raziskovalne ploskve: trava, asfalt, asfalt + drevo	38 - 43	Manchester, Velika Britanija	Armson in sod., 2013
Drevesa na zasebnih dvoriščih	9 - 21	Raleigh, Severna Karolina, ZDA	Inkiläinen in sod., 2013
Drevesa ob cesti	20	Melbourne, Avstralija	Livesley in sod., 2014
Obstoječa drevesa v soseskah mesta Dayton	7	Dayton, Ohio	Sanders, 1986
10 % povečanje površin, pokritih z drevesi	1 - 3	Mesta v porečju reke Höjeå, Švedska	Sjöman in Gill, 2014
11 % povečanje površin, pokritih z drevesi	30	Peking, Kitajska	Yao in sod., 2015
8,5 % povečanje površin, pokritih z drevesi	1,6	München, Nemčija	Zölch in sod., 2017
18,9 % povečanje površin, pokritih z drevesi	2,8	München, Nemčija	Zölch in sod., 2017

Odstotek zmanjšanja površinskega odtoka z zasaditvijo dreves se ujema z vrednostmi drugih raziskovalnih študij (preglednica 9). Drevesa na zasebnih dvoriščih v Severni Karolini bi lahko

zmanjšala odtok med 9 % in 21 % (Inkiläinen in sod., 2013), obcestna drevesa v Avstraliji bi zmanjšala odtok za 20 % (Livesley in sod., 2014) in drevesa v soseskah mesta Dayton v Ohio za 7 % (Sanders, 1986).

Analizo stroškov in koristi zasaditve dreves smo naredili v programu Green Values Stormwater Management Calculator (CNT, 2015). Predpostavili smo, da je povprečna površina posamezne drevesne krošnje enaka 20 m², življenjska doba pa je vsaj 50 let. Ostale potrebne informacije so površina neprepustnih in prepustnih površin (zelenica v dobrem stanju), podatki o padavinah in podatki o potrebnih dimenzijah sadilnih jam (ang. *tree box*). Analiza stroškov ureditve parkirišča zajema polaganje sistema za odvodnjavanje in polaganje travne ruše. V primeru zasaditve dreves pa so kot dodatni stroški obravnavani še cena dreves, material in izkop sadilnih jam ter dodatna prst za zasipanje. Izgradnja klasičnega parkirišča (začetna situacija, slika 5) bi v celoti stala skoraj 700.000 €, medtem ko bi strošek izgradnje parkirišča z zasaditvijo dreves znašal skoraj 890.000 € oziroma 30 % več (preglednica 10). Največji dodatni strošek predstavlja material za sadilne jame, kjer bodo zasajena drevesa, in njihova postavitvev. Ne glede na to pa je samo izgradnja parkirišča in kanalizacijskega sistema ob predhodni načrtovani zasaditvi dreves cenejša za 33 %.

Preglednica 10: Stroški izgradnje klasičnega parkirišča in parkirišča z zasaditvijo
Table 10: Costs of building a conventional parking lot and a parking lot with trees

Strošek	Klasično parkirišče	Parkirišče z zasaditvijo	Razlika
Izgradnja parkirišča	600,486 €	387,783 €	35 %
Kanalizacijski sistem	94,249 €	76,103 €	19 %
Travna ruša	2,818 €	2,818 €	0 %
Drevesa	/	49,376 €	/
Sadilne jame	/	249,372 €	/
Dodatna zemlja	/	123,440 €	/
Skupaj	697,553 €	888,892 €	27 %

Po podatkih, ki jih navajajo McPherson in sodelavci (2005) je znesek, potreben za gospodarjenje s padavinskimi vodami enak 0,005 \$/gal oziroma 0,0012 €/l. Glede na to stroški povezani s padavinsko vodo za obstoječe parkirišče znašajo 23.478 € na leto, z zasaditvijo dreves pa bi jih lahko zmanjšali za 4.000 € (17 %) letno. V 50 letih, kolikor je pričakovana življenjska doba dreves, bi tako le zaradi zmanjšanja površinskega odтока privarčevali 200.000 € in s tem povrnili višjo investicijo v parkirišče z zasaditvijo.

Poleg zmanjšanja površinskega odтока in s tem povezanih stroškov, pa drevesa nudijo še številne druge prednosti: zmanjšanje onesnaženosti zraka in koncentracije ogljikovega dioksida, bogatenje podtalnice ter druge ugodnosti. Med slednje štejemo na primer zmanjšano porabo električne energije (na primer poleti za hlajenje), pomoč pri uravnavanju hrupa, prednosti pri urejanju krajine, vpliv na javno zdravje in povečanje vrednosti nepremičnin (Dwyer in sod., 1992; Price, 2003; Soares in sod., 2011; Shackleton in sod., 2015). Zaradi številnih prednosti, ki jih je pogosto tudi težko finančno ovrednotiti, je ocena celotnega doprinosu dreves dokaj zahtevna. Nekatere izmed prednosti pa so kljub temu obravnavne v uporabljenem programskem orodju. Rezultati kažejo, da bi zasaditev 200 dreves v enem letu nudila koristi v vrednosti 55.000 €, kar pokrije že četrtno dodatnih stroškov zasaditve dreves. V predpostavljani življenjski dobi dreves (50 let) bi skupen znesek koristi znašal več kot 1.5 milijona € (preglednica 11). Največji delež prednosti dreves predstavljajo druge nadomestne ugodnosti, kot na primer povečanje vrednosti nepremičnin. Znano je, da ima stanovanjski ali poslovni objekt višjo vrednost v bližini zelenih površin ali ob vodi kot pa nekje, kjer teh ugodnosti ni. Pri računu nadomestne vrednosti dreves zaradi dodatnih ugodnosti so v

uporabljenem programskem orodju uporabljeni podatki iz zavarovalništva, ki se uporabljajo za oceno stroška zamenjave drevesa (Watson, 2002).

Preglednica 11: Prednosti zasaditve dreves na parkirišču

Table 11: The benefits of planting trees at a parking lot

Prednosti	1 leto	50 let	Delež celotnih prednosti
Zmanjšanje onesnaženosti zraka	32 €	947 €	0,06 %
Zmanjšanje ogljikovega dioksida	22 €	628 €	0,04 %
Nadomestne ugodnosti dreves	49,376 €	1,439,198 €	92 %
Bogatenje podtalnice	14 €	421 €	0,03 %
Zmanjšanje površinskega odtoka	4,093 €	214,898 €	7,7 %
Skupaj	53,538 €	1,656,093 €	/

Vrednost dreves za urbano okolje in njihove prednosti je skušal ovrednotiti tudi McPherson s sodelavci (1997). Vrednost posameznega drevesa so ocenili na 340 €, njihove dolgoročne koristi pa naj bi za več kot dvakrat presegale začetne stroške zasaditve in sprotne stroške vzdrževanja. McPherson in sodelavci (2005) so ocenili, da letne koristi vseh dreves v petih ameriških mestih znašajo med 570.000 € in 2.730.000 €, pri tem pa so upoštevali zmanjšano porabo energije, zmanjšano koncentracijo ogljikovega dioksida, izboljšano kakovost zraka, zmanjšane stroške odvodnje padavinske vode in povečanje vrednosti nepremičnin. Vpliv zmanjšanja površinskega odtoka je predstavljal med 6 % in 51 % vseh koristi dreves. Podobno pa so za zasaditev milijon dreves v Los Angelesu ovrednotili koristi zaradi zmanjšanja površinskega odtoka v deležu 8 % celotnih koristi dreves (McPherson in sodelavci, 2011).

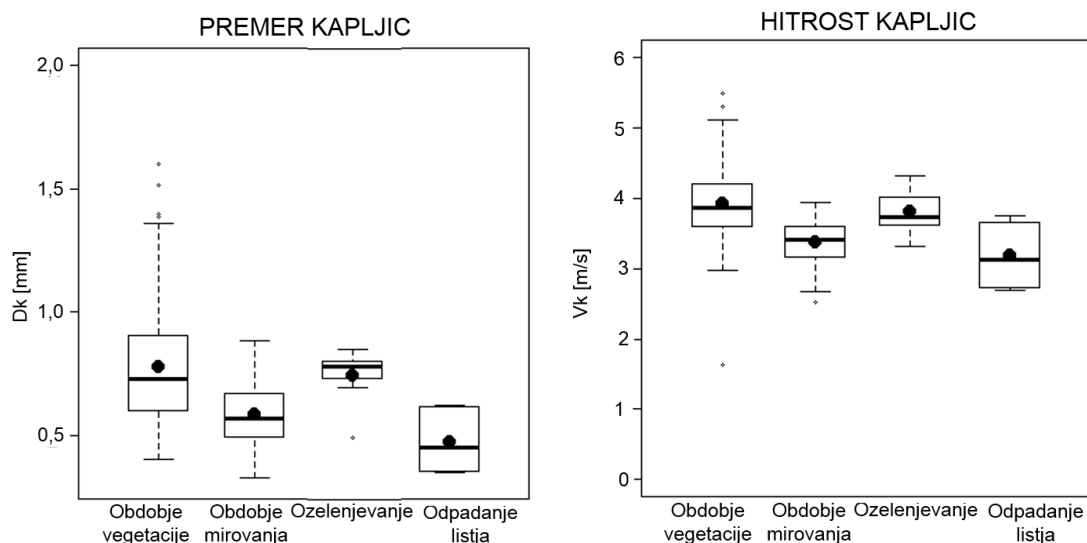
4.2 Meteorološke spremenljivke

V 413 obravnavanih dogodkih je skupno padlo 4110,8 mm padavin s povprečno intenziteto 2,7 mm/h ($\pm 3,6$ mm/h) in s povprečnim trajanjem dogodka 8,5 ure ($\pm 11,7$ h). Največ dogodkov smo zabeležili čez dan (151 dogodkov), 118 dogodkov je bilo nočnih, 144 pa se jih je raztezalo čez oba dela dneva. Spremljajoča povprečna hitrost vetra je nihala med 0 m/s in 14,1 m/s, s povprečno hitrostjo 1,3 m/s. Prevladujoče smeri vetra so bile južna (18 % dogodkov), jugovzhodna (22 % dogodkov) in vzhodna (15 % dogodkov). Povprečna zabeležena temperatura dogodkov je bila enaka 13,3 °C ($\pm 5,6$ °C), povprečna vlažnost zraka pa je znašala 85,8 % ($\pm 11,7$ %). Dolžina suhega obdobja med dvema dogodka je v povprečju znašala 49,5 ur ($\pm 72,9$ h).

4.2.1 Mikrostruktura padavin

Poleg osnovnih meteoroloških spremenljivk smo spremljali tudi mikrostrukturo padavin (število dežnih kapljic, njihovo hitrost in velikost). Število dežnih kapljic se je na dogodek gibalo med 5/cm² in 13.478/cm², povprečno na dogodek pa smo jih zabeležili 1.508/cm². Povprečne hitrosti dežnih kapljic so bile 3,74 m/s ($\pm 0,51$ m/s), povprečen premer pa je znašal 0,72 mm ($\pm 0,22$ mm).

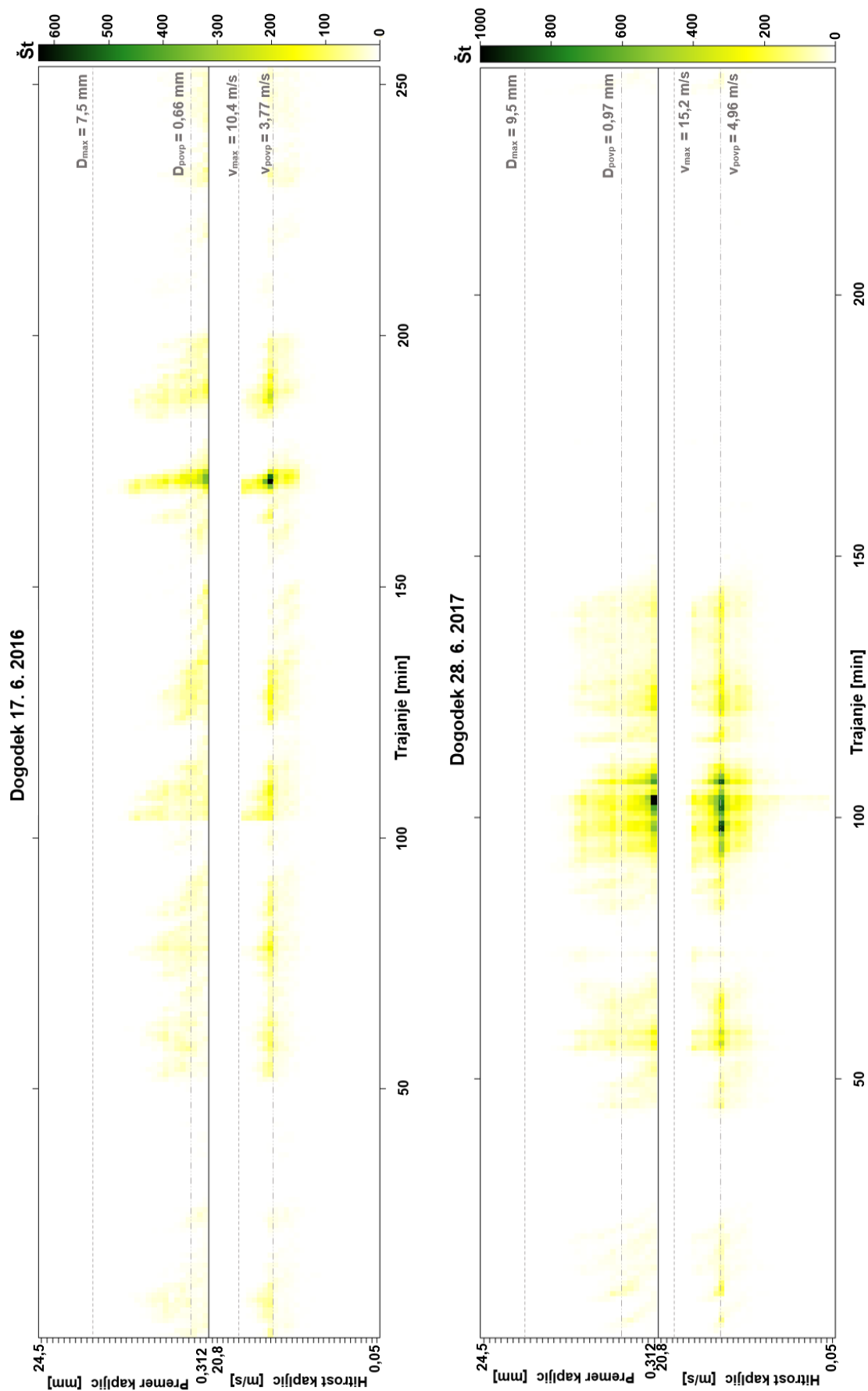
Povprečni premeri in hitrosti dežnih kapljic so bili največji v obdobju vegetacije in v obdobju olistanja (slika 41). V obdobju vegetacije so dogodki dosegli tudi največje vrednosti povprečnih premerov (1,6 mm) in hitrosti kapljic (5,5 m/s). V povprečju so bile tako hitrosti kot velikosti kapljic najmanjše v obdobju odpadanja listja oziroma iglic, glede na posamezni dogodek pa so bile najmanjše povprečne vrednosti izmerjene v obdobju mirovanja (0,3 mm in 1,6 m/s).



Slika 41: Premer in hitrost dežnih kapljic po posameznih fenofazah
Figure 41: Drop diameter and velocity according to phenoseasons

Na sliki 41 so predstavljene povprečne vrednosti premerov in hitrosti dežnih kapljic posameznega dogodka. Hitrosti in velikosti posameznih dežnih kapljic pa so se tekom samega dogodka tudi dokaj spreminjale (slika 42 in slike 55 - 59). Najmanjši povprečen premer, ki ga še zazna disdrometer, je enak 0,312 mm, največji izmerjeni premeri kapljic pa so bili 9,5 mm. Obe ekstremni vrednosti sta bili lahko doseženi v enem samem dogodku.

Razpon v lastnostih dežnih kapljic posameznih dogodkov smo prikazali za dva dogodka s podobno dolžino, vendar z različno količino padavin in intenzitetama (slika 42). Šibek dogodek 17. 6. 2016 je bil manj intenziven (2,03 mm/h), saj je v 3,94 h padlo le 8 mm padavin. Močan in intenziven pa je bil dogodek 28. 6. 2017, ko je v 3,81 h padlo 32,8 mm padavin z intenziteto 8,61 mm/h. Ne glede na različne lastnosti dogodka so bile dosežene največje hitrosti in premeri dežnih kapljic v obeh dogodkih podobne. Pri šibkem dogodku so maksimalne vrednosti znašale 7,5 mm in 10,4 m/s, pri intenzivnem dogodku pa so bile kapljice velike do 9,5 mm in hitre do 15,2 m/s (slika 42).



Slika 42: Spreminjanje premerov in hitrosti dežnih kapljic tekom razvoja dogodka
Figure 42: Changes of drop diameter and velocity at the rainfall event level

4.3 Vegetacijske spremenljivke

4.3.1 LAI

Indeks listne površine (LAI) smo določali na dva načina: z metodo zbiranja in določanja količine odpadlega listja in z meritvami prepuščanja svetlobe s senzorjem LAI2200c.

Pri določanju LAI iz odpadlega listja je bilo delo razdeljeno na dva sklopa: poleti 2015 smo nabrali sveže listje in določili njegovo specifično površino (SLA), jeseni 2015 pa smo zbirali odpadlo listje in določili njegovo količino. Zmnožek obeh dobljenih vrednosti je enak LAI za brezo.

Za določanje SLA smo 15. 7. 2015 z breze nabrali 600 svežih listov, ki smo jih skenirali v 37 serijah. Iz slik smo določili skupno površino svežih listov, ki je bila enaka 9.842,71 cm² (preglednica 12). Liste smo nato sušili na zraku in jih med 3. in 4. avgustom v treh serijah do konca posušili še v peči (preglednica 13). Masa suhega listja je znašala 55,69 g. Izračunana vrednost SLA je znašala 17,674 m²/kg.

Preglednica 12: Določanje površine svežih listov iz skeniranih slik

Table 12: Determination of the fresh leaves area from the scanned figures

Serija	Št. listov	Piksli (bela)	Piksli (črna)	Delež črnih pikslov	Površina listja [cm ²]
1	14	3437193	5262647	0,605	377,284
2	16	5567570	3132270	0,360	224,555
3	18	4866736	3833104	0,441	274,799
4	14	5666189	3033651	0,349	217,485
5	14	5410167	3289673	0,378	235,840
6	14	5441602	3258238	0,375	233,586
7	16	5268028	3431812	0,394	246,030
8	16	5462525	3237315	0,372	232,086
9	18	5388621	3311219	0,381	237,385
10	14	5156893	3542947	0,407	253,997
11	18	4748161	3951679	0,454	283,300
12	16	5093956	3605884	0,414	258,509
13	15	5161803	3538037	0,407	253,645
14	17	5210565	3489275	0,401	250,150
15	18	5193679	3506161	0,403	251,360
16	17	5580461	3119379	0,359	223,631
17	17	4987351	3712489	0,427	266,152
18	20	5053063	3646777	0,419	261,441
19	18	4694489	4005351	0,460	287,148
20	18	4941952	3757888	0,432	269,407
21	15	5302499	3397341	0,391	243,559
22	13	5004301	3695539	0,425	264,937
23	16	4892430	3807410	0,438	272,957
24	16	4831220	3868620	0,445	277,345

25	17	5189390	3510450	0,404	251,668
26	19	5212394	3487446	0,401	250,018
27	18	4625393	4074447	0,468	292,101
28	17	4996454	3703386	0,426	265,499
29	17	4867136	3832704	0,441	274,770
30	18	5050819	3649021	0,419	261,602
31	16	5223003	3476837	0,400	249,258
32	14	5288674	3411166	0,392	244,550
33	18	4831213	3868627	0,445	277,346
34	19	4889124	3810716	0,438	273,194
35	18	4966836	3733004	0,429	267,623
36	15	5502345	3197495	0,368	229,232
37	6	1596306	7103534	0,817	509,259
Vsota	600	/	/	/	9.842,707

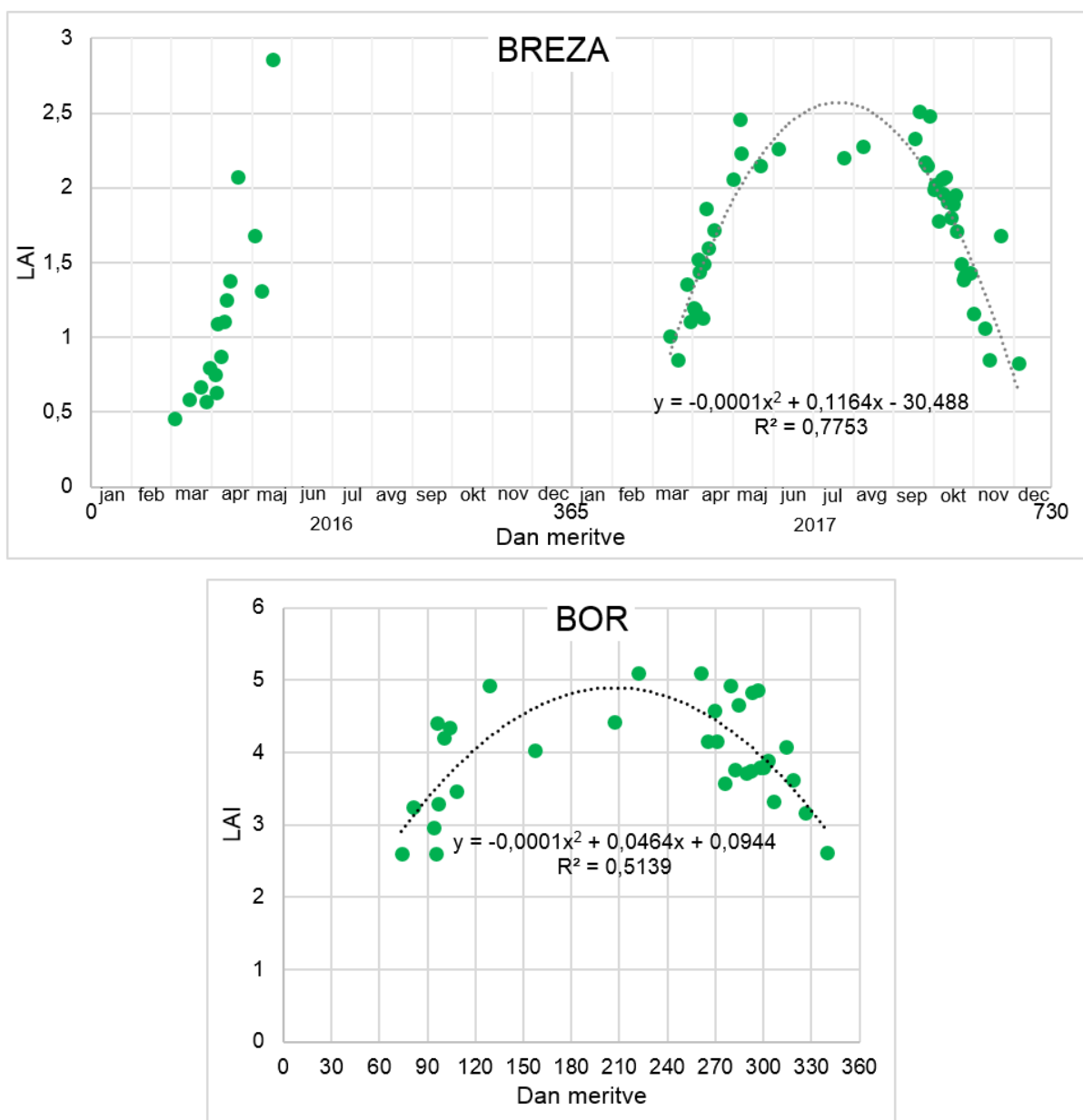
Preglednica 13: Podatki o sušenju in masi suhega listja

Table 13: Information on leaves drying and of the dry leaves mass

Začetek sušenja	Konec sušenja	Masa po sušenju [g]
3.8.2015 14:00	4.8.2015 7:30	20,96
4.8.2015 7:30	4.8.2015 14:30	17,35
4.8.2015 15:00	5.8.2015 7:30	17,38
SVEŽE LISTJE - vsota		55,69
28.10.2015 14:30	30.10.2015 7:30	25,52
5.11.2015 16:00	6.11.2015 7:30	40,77
23.11.2015 15:00	24.11.2015 8:30	30,15
30.11.2015 15:30	1.12.2015 7:45	39,46
1.12.2015 15:30	2.12.2015 7:30	30,10
SUHO LISTJE - vsota		166,00

Med 10. 10. 2015 in 15. 11. 2015 smo pod brezo z dvema zaboječkom površine 7.420 cm² (35 cm x 55 cm) zbirali odpadlo listje. Zabojevka smo spraznili dvakrat v obdobju meritev. Zbrano listje smo najprej posušili na zraku, nato pa še v petih serijah v peči (preglednica 13). Skupna masa suhega listja je znašala 166 g. Glede na izračunano vrednost SLA in količino suhega listja smo izračunali vrednost LAI za brezo, ki je znašala 3,81.

Indeks listne površine smo pričeli meriti marca 2016 s senzorjem LAI2200c, z meritvami pa smo nadaljevali do konca leta 2017. Meritve smo izvajali v vseh fenofazah, predvsem intenzivno v obdobjih olistanja in odpadanja listja oziroma iglic, ko so spremembe LAI največje. Vrednosti LAI pri brezi so se gibale med 0,46 in 2,86. V povprečju je LAI pri brezi v obdobju vegetacije znašal 2,3, v obdobju mirovanja pa 0,8. Vrednosti LAI, izmerjene pod črnim borom, so se brez popravkov gibale med 1,4 in 2,7, s popravki zaradi stikanja iglic in večjega vpliva olesenelih površin pa med 2,6 in 5,1. V povprečju je LAI pri boru v obdobju vegetacije znašal 4,3, v obdobju mirovanja pa 3,4. Spreminjanje vrednosti LAI za obe drevesi med obdobjema olistanja in odpadanja listja oziroma iglic lahko opišemo s kvadratno funkcijo (slika 43).



Slika 43: Vrednosti LAI, izmerjene z optičnim senzorjem LAI2200c
Figure 43: Values of LAI, measured with optical sensor LAI2200c

Vrednosti LAI za različne vrste bora, izmerjene v drugih študijah, se gibljejo v velikem razponu med 0,8 in 8,9 (preglednica 14). Tako popravljene, kot tudi nepopravljene vrednosti, ki smo jih izmerili s senzorjem LAI2200c, se nahajajo znotraj tega okvirja. Vrednosti pred popravki (1,4 – 2,7) so podobne nepopravljenim vrednostim, izmerjenim s senzorjem LAI-2200 v drugih študijah, kot na primer 1,61 (Jonckheere in sod., 2005), 1,75 (Kuusk in sod., 2009) in 2,6 (Molina in Campo, 2012). Popravljene vrednosti meritev (2,6 – 5,1) pa so podobne rezultatom 3,1 – 5,6, dobljenim iz alomteričnega razmerja (Mencuccini in Grace, 1996), 2,26 – 8,92 ocenjenih na podlagi poseka drevesa (Mason in sod., 2012) in 1,98-5,41 popravljenih meritev senzorja (Stenberg in sod., 1994). Različne vrednosti LAI pri boru v posameznih fenofazah pa so izmerili tudi Deblonde in sod. (1994) ter Liu in sod. (2015).

Vrednosti LAI pri brezi, izmerjene s senzorjem LAI2200c, so se v povprečju gibale med 0,8 in 2,3, medtem ko smo za obdobje vegetacije po metodi zbiranja listja ocenili LAI enak 3,81. Prav tako so obe metodi uporabili tudi Kubo in sod. (2008) ter po metodi zbiranja listja dobili večje vrednosti (5,56) kot z meritvami s senzorjem LAI-2200 (3,43). Vrednosti, izmerjene s

senzorjem, so podobne vrednostim, izmerjenim v ostalih študijah (preglednica 14), predvsem vrednostim 2,94 - 0,8, izmerjenim za brezo v Estoniji (Kuusk in sod., 2009).

Preglednica 14: Vrednosti LAI določene za brezo in bor s strani drugih raziskovalcev
Table 14: Review of LAI values for birch and pine trees determined by other researchers

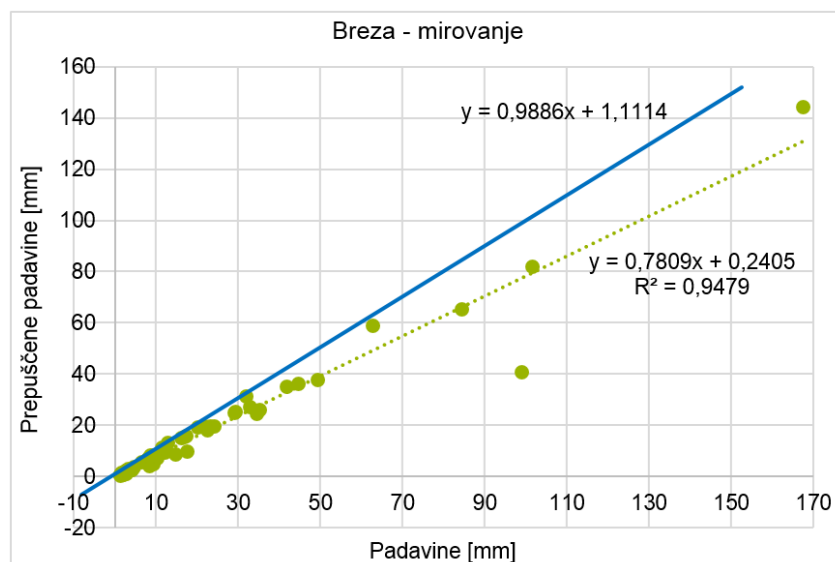
Drevesna vrsta	LAI	Metoda določanja LAI	Lokacija	Vir
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	2,2 - 4	Simulacija	Skandinavija	Lintunen in sod., 2013
Bor (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.)	1,4 - 2,3	Delta-T Image Analyzer	Wisconsin, ZDA	Fassnacht in sod., 1997
Bor (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	2,5	Delta-T Image Analyzer	Wisconsin, ZDA	Fassnacht in sod., 1997
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,46 3,53 - 3,57 1,61 1,94 - 3,22	Hemisferična fotografija Alometrična metoda LAI-2000 (brez pop.) LAI-2000 (s pop.)	Limburg, Belgija	Jonckheere in sod., 2005
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	3,1 - 5,6	Alometrična metoda	Thetford Forest, VB	Mencuccini in Grace, 1996
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,86 1,75	Alometrična metoda LAI-2000 (brez pop.)	Järvselja, Estonija	Kuusk in sod., 2009
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,3 - 1,5	LAI-2000 (s pop.)	Hyytiälä, Finska	Majasalmi in sod., 2012
Bor (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	0,77 - 3,09	Hemisferična fotografija	Ontario, Kanada	Buttle in sod., 2014
Bor (<i>Pinus halepensis</i> Miller)	2,6	LAI-2000 (brez pop.)	Valencia, Španija	Molina in Campo, 2012
Bor (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	1,5 - 3,17	Hemisferična fotografija	Ontario, Kanada	Buttle in Farnsworth, 2012
Bor (<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton)	1,75 - 3,17 ⁰⁷ 1,53 - 3,02 ¹⁰	LAI-2000 (s pop.)	Ontario, Kanada	Deblonde in sod., 1994
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,08 - 2,79 1,98 - 5,41	LAI-2000 (brez pop.) LAI-2200 (s pop.)	Jadraas, Švedska	Stenberg in sod., 1994
Bor (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,18 - 2,77	Hemisferična fotografija	Alsace, Francija	Soudani in sod., 2002
Bor (<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc.)	4,2 ⁰⁵ - 7,7 ⁰⁸ 3,3 ⁰⁵ - 6,8 ⁰⁸ 3,0 ¹¹ - 5,2 ⁰⁸ 4,3 ⁰⁵ - 8,2 ⁰⁸	Zbiranje odpadlih iglic Hemisferična fotografija LAI-2200 (brez pop.) LAI-2200 (s pop.)	Liangshui, Kitajska	Liu in sod., 2015
Bor (<i>Pinus radiata</i> D. Don)	2,26 - 8,92 0,9 - 4,98 0,91 - 3,20	Porušitev drevesa LAI-2000 (brez pop.) Hemisferična fotografija	Canterbury, Nova Zelandija	Mason in sod., 2012
Breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	1,2 - 3	Simulacija	Skandinavija	Lintunen in sod., 2013
Breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	3,93 2,94 ⁰⁷ - 0,8 ¹¹	Alometrična metoda LAI-2000	Järvselja, Estonija	Kuusk in sod., 2009
Breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	0,66 - 4,09	LAI-2000	Švedska	Johansson, 1999
Breza (<i>Betula pubescens</i> Ehrh.)	1,35 - 5,12	LAI-2000	Švedska	Johansson, 1999

15-letna breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	1,2 – 2,01	Hemisferična fotografija	Vosges, Francija	Schnitzler in Closset, 2003
50-letna breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	1,1 – 1,59	Hemisferična fotografija	Vosges, Francija	Schnitzler in Closset, 2003
Breza (<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.)	6,3	Zbiranje suhega listja	Wisconsin, ZDA	Fassnacht in sod., 1997
Breza (<i>Betula pendula</i> Roth.)	2,2 – 2,6	LAI-2000	Hyytiälä, Finska	Majasalmi in sod., 2012
Breza (<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew)	2,35	Zbiranje suhega listja	Xiaoxing'an Mountains, Kitajska	Qi in sod., 2014
Breza (<i>Betula ermanii</i> Cham.)	3,43 5,56 2,00 4,54	LAI-2000 Zbiranje suhega listja Ocena z modelom HFC Ocena z modelom GFC	Hokkaido Prefecture, Japonska	Kubo in sod., 2008

Nadpisane številke označujejo mesec meritev (⁰⁵ maj, ⁰⁷ julij, ⁰⁸ avgust, ¹⁰ oktober, ¹¹ november)

4.3.2 Skladiščna zmogljivost krošnje

Skladiščno zmogljivost krošnje (S) smo izračunali iz izmerjenih podatkov o padavinah in prepuščenih padavinah po metodi Leytona (Leyton in ostali, 1967). Padavine, upoštevane pri izrisu grafa, so bile večje od 1,5 mm oziroma tolikšne, da zapolnijo skladiščno zmogljivost krošnje. S je absolutna vrednost točke, kjer modra premica, ki okvirja točke na grafu, seka ordinatno os (slika 44, priloga A).



Slika 44: Primer določitve S navadne breze v obdobju mirovanja

Figure 44: An example of the estimation of S for common silver birch tree in the dormant period

Ocenjene vrednosti S navadne breze za posamezne fenofaze se gibljejo med 1,1 in 3,5 (preglednica 14, priloga A). Glede na izrazite razlike v količini listja in vrednostih LAI v obdobju vegetacije in mirovanja (slika 43) je to pričakovano. Je pa S breze v obdobjih mirovanja, olistanja in odpadanja listov približno enaka, kar nakazuje na to, da je polna skladiščna zmogljivost krošnje dosežena le, ko je krošnja povsem olistana.

S črnega bora v obdobju mirovanja in vegetacije je dokaj podobna (preglednica 15, priloga A). V obdobju vegetacije je S sicer malenkost večja, kar se odraža tudi pri primerjavi deleža

prestreženih padavin, ki je v tem obdobju v povprečju večji za 5 % kot v obdobju mirovanja (slika 38). Ocenjeni vrednosti S bora v obdobjih začetka vegetacije, pa tudi odpadanja iglic, pa sta dosti manjši; v primerjavi z obdobjem vegetacije za 28 % v obdobju odpadanja iglic in kar za 68 % v obdobju začetka vegetacije. Glede na to, da pri meritvah LAI pri boru v tem obdobju nismo opazili manjših vrednosti (slika 43), je to lahko posledica majhnega števila dogodkov (8 za obdobje začetka vegetacije in 19 v obdobju odpadanja iglic), ki so bili na voljo za oceno S.

Preglednica 15: Skladiščna zmogljivost krošenj (S) po posameznih fenofazah

Table 15: Canopy storage capacity (S) according to phenoseasons

Fenofaza	Breza [mm]	Bor [mm]
Obdobje mirovanja	1,1	2,7
Olistanje/začetek vegetacije	1,1	0,93
Obdobje vegetacije	3,5	2,9
Odpadanje listja/iglic	1,3	2,1

4.3.3 Ostale vegetacijske spremenljivke

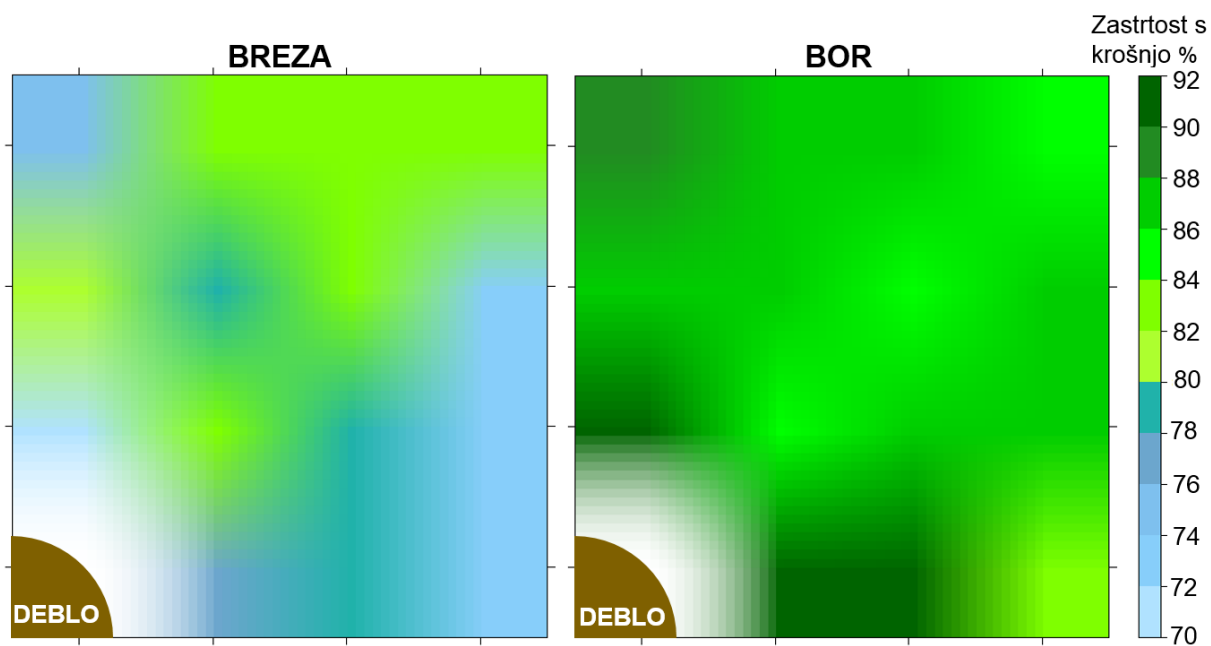
Zastrtost s krošnjo

Zastrtost s krošnjo podaja delež neba, ki je nad določeno točko pokrit z elementi krošnje (listjem in vejami). Zastrtost s krošnjo smo določili v obdobju vegetacije za 11 točk, v katerih so se nahajali točkovni lijakasti merilniki v letu 2016 (preglednica 16, slika 45). V omenjenem letu jih zaradi spremljanja prostorske porazdelitve prepuščenih padavin nismo premikali in so bili ves čas postavljeni v istih točkah (slika 10).

Preglednica 16: Zastrtost s krošnjo [%] nad točkovnimi merilniki TF

Table 16: Canopy coverage above the funnel type TF gauges

Točka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Breza	76.6	82.6	69.9	79.2	83.0	80.4	73.7	83.2	74.8	73.5	83.9
Bor	90.5	85.5	92.7	90.3	85.9	87.8	83.2	85.5	89.9	87.4	87.2



Slika 45: Slikovni prikaz zastrtosti s krošnjo nad točkovnimi merilniki TF

Figure 45: Graphical presentation of canopy coverage above the funnel type TF gauges

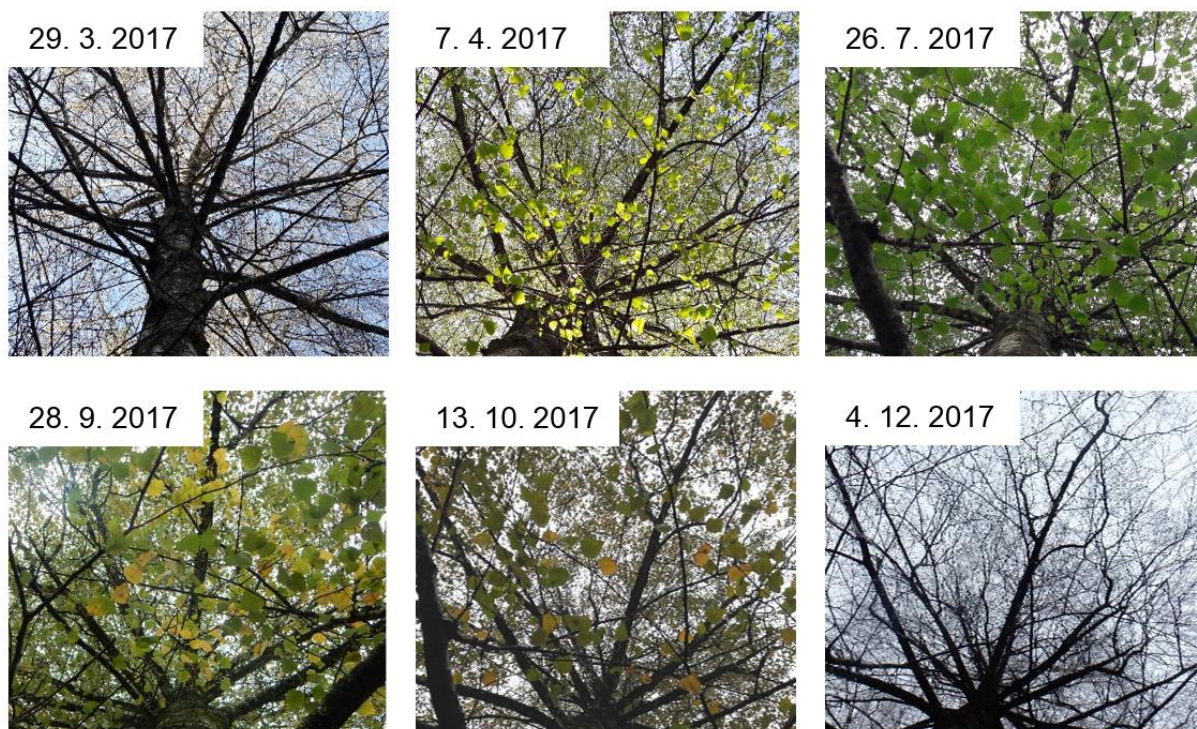
Fenofaze

Fenofaze smo določali na osnovi opazovanja krošnje navadne breze (slika 46), na podlagi katerih smo določili naslednje fenofaze: olistanje oziroma začetek vegetacije, obdobje vegetacije, odpadanje listja oziroma iglic in obdobje mirovanja (preglednica 17).

Preglednica 17: Določeni datumi začetka in konca definiranih fenofaz

Table 17: The start and end dates of the defined phenoseasons

	Fenofaza	Začetek	Konec
2014	Obdobje mirovanja	1. 1. 2014	26. 3. 2014
	Olistanje/začetek vegetacije	27. 3. 2014	10. 4. 2014
	Obdobje vegetacije	11. 4. 2014	31. 8. 2014
	Odpadanje listja in iglic	1. 9. 2014	21. 10. 2014
	Obdobje mirovanja	22. 10. 2014	12. 4. 2015
2015	Olistanje/začetek vegetacije	13. 4. 2015	18. 4. 2015
	Obdobje vegetacije	19. 4. 2015	16. 10. 2015
	Odpadanje listja in iglic	17. 10. 2015	29. 10. 2015
	Obdobje mirovanja	30. 10. 2015	3. 4. 2016
2016	Olistanje/začetek vegetacije	4. 4. 2016	15. 4. 2016
	Obdobje vegetacije	16. 4. 2016	20. 10. 2016
	Odpadanje listja in iglic	21. 10. 2016	3. 11. 2016
	Obdobje mirovanja	4. 11. 2016	28. 3. 2017
2017	Olistanje/začetek vegetacije	29. 3. 2017	12. 4. 2017
	Obdobje vegetacije	13. 4. 2017	26. 9. 2017



Slika 46: Fenofaze navadne breze v letu 2017

Figure 46: Phenoseasons of common silver birch tree during 2017

Projicirana površina drevesne krošnje

Projicirano površino drevesnih krošenj smo določili iz zračnih posnetkov, posnetih z dronom 15. 6. 2015. V programu AutoCad smo določili površino posamezne drevesne krošnje in površino referenčnega elementa (slika 18) ter izračunali dejansko površino projicirane tlorisne drevesne krošnje (preglednica 18).

Preglednica 18: Projicirana površina drevesne krošnje

Table 18: Projected canopy area

	Breza 1	Breza 2	Bor 1	Bor 2
Projicirana površina drevesne krošnje [m²]	21,9	20,3	7	15,7

Višina drevesa

Tudi pri določanju višine dreves smo uporabili fotografije, iz katerih smo v programu AutoCad, določili višino letve (referenčnega elementa) in višino drevesa (slika 19) ter izračunali višino dreves (preglednica 19).

Preglednica 19: Višina dreves

Table 19: Tree height

	Breza 1	Breza 2	Bor 1	Bor 2
Višina drevesa [m]	14,6	16,7	12	13,1

Prsni premer drevesnega debla (DBH)

Prsni premer drevesnega debla smo določali na višini 1,3 m od tal (Nature Conservation Practice Note, 2006), kjer smo izmerili obseg debla (slika 20). Iz izmerjenega obsega smo izračunali premer drevesnega debla (preglednica 20).

Preglednica 20: Prsni premer debla

Table 20: Diameter at breast height

	Breza 1	Breza 2	Bor 1	Bor 2
Prsni premer debla [cm]	17,5	18,3	16,7	21,3

Naklon vej

Za vsako drevo smo na fotografijah v znanem merilu izmerili kote med drevesnim deblom in glavnimi vejami, ki iz njega rastejo (slika 21). Povprečje vseh izmerjenih kotov je za brezo znašalo 49,8° in 53,3°, za bor pa 95,2° in 99,8° (preglednica 21).

Preglednica 21: Naklon glavnih vej pri navadni brezi in črnem boru

Table 21: Main branch inclination for common silver birch and Austrian pine trees

Drevo		Naklon glavnih vej [°]														Povp. [°]
Breza 1	45	62	38	92	41	43	35	47	104	52	11	40	37			49,8
Breza 2	47	21	62	68	59	85	31	43	53	17	55	63	69	53	74	53,3
Bor 1	121	97	85	89	94	69	133	108	81	105	86	89	86	103	98	95,2
Bor 2	79	85	83	122	106	131	120	108	79	108	72	116	90	78	120	99,8

Lastnosti skorje

Za vsako drevesno vrsto smo vzeli pet vzorcev skorje, za katere smo izmerili njegovo debelino, za tri izmed njih pa smo določili še skladiščno zmogljivost. Debelina skorje navadne breze je v povprečju znašala 3 mm, črnega bora pa 9 mm. Skladiščna zmogljivost skorje breze je bila v povprečju enaka 0,73 mm, bora pa 3,45 mm, vsi vzorci skorje pa so se skoraj v celoti posušili že po dveh urah (preglednica 22).

Preglednica 22: Določanje skladiščne zmogljivosti lubja navadne breze in črnega bora

Table 22: Determination of the bark storage capacity for common silver birch and Austrian pine trees

Masa vzorca [g]	Breza			Bor		
	1	2	3	1	2	3
Začetna masa 1.12.2017, 16:00	0,10	0,06	0,05	0,14	0,15	0,16
Namočeni vzorci 4.12.2017, 10:00	0,14	0,10	0,07	0,28	0,28	0,34
Prvo tehtanje 4.12.2017, 12:00	0,10	0,07	0,05	0,15	0,16	0,18
Drugo tehtanje 4.12.2017, 14:00	0,09	0,06	0,05	0,12	0,14	0,15
Tretje tehtanje 4.12.2017, 16:00	0,09	0,06	0,05	0,12	0,14	0,14
Četrto tehtanje 6.12.2017, 10:00	0,09	0,06	0,05	0,11	0,13	0,14
Razlika	0,05	0,04	0,02	0,17	0,15	0,20
Skladiščna zmogljivost [mm]	0,99	0,80	0,40	3,38	2,98	3,98

Površino oziroma strukturo skorje smo določili s subjektivno oceno ob vizualnem pregledu skorje na drevesih (slika 47). Skorja navadne breze je gladka (srednja tekstura), skorja črnega bora pa groba (zelo hrapava tekstura).



Slika 47: Površina skorje navadne breze (levo) in črnega bora (desno)
Figure 47: Bark surface of common silver birch (left) and Austrian pine (right) trees

5 ANALIZA IN RAZPRAVA

5.1 Prestrežene in prepuščene padavine ter odtok po deblu

Črni bor je prestregel več padavin kot navadna breza, saj je v povprečju na dogodek prestregel kar 72 % padavin, breza pa 45 % (preglednica 23). Največji delež padavin je črni bor prestregel v obdobju odpadanja iglic ter v obdobju začetka vegetacije. Odtok po deblu bora je bil v vseh fenofazah zelo majhen in je v povprečju znašal manj kot en procent padavin na prostem, še največje vrednosti pa so bile izmerjene v obdobju mirovanja, ko je bilo največje tudi prepuščanje padavin. Tudi pri brezi sta bila deleža prepuščenih padavin in odtoka po deblu največja v obdobju mirovanja (preglednica 23). Prestrezanje padavin navadne breze je bilo največje v obdobju vegetacije, medtem ko so bile vrednosti izmerjene v kratkih prehodnih obdobjih odpadanja in olistanja enake.

Razlike med prepuščenimi oziroma prestreženimi padavinami v obdobjih vegetacije in mirovanja znašajo za brezo 18 % in za bor 4 % (preglednica 23). Te razlike so dokaj velike v primerjavi s 3,6 %, ki so jih v listnatem gozdu v Španiji izmerili Muzylo in sod. (2012), 2 % - 6 %, izmerjenih v starejšem listnatem gozdu v osrednji Nemčiji (Krämer in Hölscher, 2009) in 3,1 % opaženih na južni ploskvi listnatega gozda v Sloveniji (Šraj in sod., 2008a). Kljub temu pa so raziskovalci poročali tudi o večjih razlikah: 22,3 % na severni ploskvi listnatega gozda v Sloveniji (Šraj in sod., 2008a), 17 % v brezovem gozdu v Belgiji (Staelens in sod., 2008) in 13,2 % na severni, 12,1 % na zahodni ter 9,4 % na južni ploskvi listnatega gozda v državi Maryland, ZDA (Siegert in sod., 2016).

Preglednica 23: Povprečne vrednosti komponent delitve padavin za dogodke po posameznih fenofazah ($\pm$ standardna deviacija)

Table 23: The average values of rainfall partitioning components for events per phenoseasons ($\pm$ standard deviation)

Fenofaza	Število dogodkov	Bor			Breza		
		TF	SF	I	TF	SF	I
Obdobje vegetacije	258	28 % (± 40 %)	0,02 % ($\pm 0,11$ %)	72 % (± 40 %)	48 % (± 46 %)	0,9 % ($\pm 1,9$ %)	51 % (± 47 %)
Obdobje mirovanja	108	32 % (± 26 %)	0,03 % ($\pm 0,07$ %)	67 % (± 26 %)	66 % (± 31 %)	1,9 % ($\pm 3,3$ %)	32 % (± 32 %)
Olistanje/začetek vegetacije	12	24 % (± 21 %)	0,01 % ($\pm 0,03$ %)	76 % (± 21 %)	52 % (± 38 %)	1,4 % ($\pm 1,9$ %)	46 % (± 39 %)
Odpadanje listja/iglic	35	20 % (± 21 %)	0,01 % ($\pm 0,03$ %)	80 % (± 21 %)	53 % (± 39 %)	0,7 % ($\pm 1,5$ %)	46 % (± 39 %)
Skupaj	413	28 % (± 35 %)	0,02 % ($\pm 0,09$ %)	72 % (± 35 %)	53 % (± 43 %)	1,2 % ($\pm 2,4$ %)	45 % (± 44 %)

Vse tri komponente delitve padavin so odvisne od količine padavin posameznega dogodka. Največjo medsebojno odvisnost s padavinami na prostem izkazujejo prepuščene padavine (preglednica 24). V primeru breze za celotno obdobje meritev koeficient korelacije med TF in padavinami znaša 0,97, medtem ko je bil v obdobju olistanja in odpadanja listja skoraj enak 1. Tudi v primeru bora so vrednosti koeficienta korelacije med TF in padavinami največje izmed vseh treh komponent, podobno pa je bila odvisnost največja v obdobju začetka vegetacije, kar pa je lahko povezano tudi z majhnim številom dogodkov, zabeleženih v tem obdobju (preglednica 23). Koeficienta korelacije SF in padavin za obe drevesi v celotnem obdobju sta dokaj podobna, z največjimi vrednostmi v obdobju odpadanja listja (preglednica 24). Najnižja je bila korelacija med SF in padavinami pri brezi v obdobju vegetacije, kar je pričakovano, saj listje prekriva veje in vpliva na pretakanje prestreženih padavin v krošnji. Najmanjši koeficienti korelacije pa so bili na splošno med prestreženimi padavinami in padavinami, kar je verjetno

posledica tega, da prestreženih padavin nismo merili neposredno ampak smo jih preračunali iz ostalih izmerjenih vrednosti (enačba 1).

Preglednica 24: Koeficienti korelacije (R) za komponente delitve padavin in padavine na prostem
Table 24: Correlation coefficient (R) for each rainfall partitioning component and rainfall in the open

Fenofaza		I	TF	SF
Navadna breza	Obdobje vegetacije	0,659	0,959	0,798
	Odpadanje listja/iglic	0,928	0,996	0,973
	Obdobje mirovanja	0,716	0,977	0,825
	Olistanje	0,967	0,996	0,855
	Skupaj	0,680	0,970	0,820
Črni bor	Obdobje vegetacije	0,783	0,928	0,736
	Odpadanje listja/iglic	0,948	0,924	0,904
	Obdobje mirovanja	0,907	0,955	0,850
	Začetek vegetacije	0,975	0,969	0,618
	Skupaj	0,580	0,940	0,800

Podobno so tudi drugi raziskovalci izračunali velike koeficiente korelacije med TF in padavinami na prostem (preglednica 25). Koeficienti korelacije med ostalima dvema komponentama in padavinami pa so bili tudi v drugih študijah manjši. Za SF je koeficient korelacije s padavinami pri ameriški bukvi znašal 0,79 v obdobju mirovanja in 0,45 v obdobju vegetacije, pri navadnem tulipanovcu pa 0,91 v obdobju mirovanja ter 0,87 v obdobju vegetacije (Siegert in Levia, 2014). Za posamezne fenofaze pa so koeficient korelacije ocenjevali tudi Staelens in sod. (2008) za bukev v Belgiji (0,94 v obdobju vegetacije in 0,95 v obdobju mirovanja) in Muzylo in sod. (2012) za listnati gozd v Španiji (0,86 v obdobju vegetacije in 0,93 v obdobju mirovanja). Velike vrednosti koeficienta korelacije med SF in padavinami pa znašajo 0,92 za kriptomerijo na Japonskem (Iida in sod., 2017), 0,97 za mešan gozd v Mehiki (Perez-Suarez in sod., 2014), 0,98 za nasad pacipres (*Chamaecyparis obtusa*) na Japonskem (Nanko in sod., 2015) ter 0,95 za listopadni gozd v Čilu (Iroume in Huber, 2002). Tudi v ostalih študijah pa so bili koeficienti korelacije najmanjši med prestreženimi padavinami in padavinami: 0,79 v nasadu kriptomerij na Japonskem (Iida in sod., 2017), 0,76 v hrastovem gozdu v Mehiki (Carlyle-Moses in sod., 2014), 0,64 v listnatem gozdu v Čilu (Iroume in Huber, 2002), 0,74 in 0,71 v obdobju vegetacije in v obdobju mirovanja v listnatem gozdu v Španiji (Muzylo in sod., 2012) ter prav tako v teh fenofazah 0,84 in 0,37 za bukev v Belgiji (Staelens in sod., 2008).

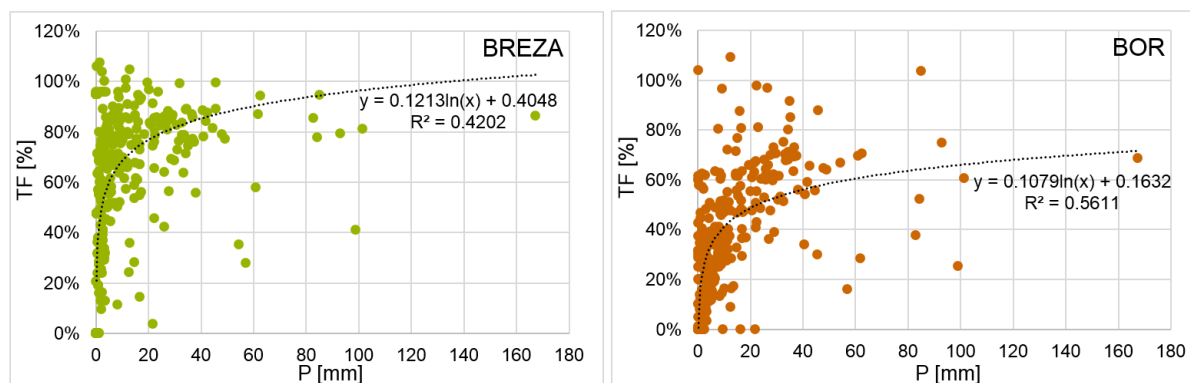
Preglednica 25: Pregled vrednosti koeficienta korelacije (R) med TF in padavinami iz drugih primerljivih študij

Table 25: Review of the correlation coefficient (R) between TF and rainfall calculated in other similar studies

Drevesna vrsta	R	Lokacija	Vir
Borov gozd (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	0,990	Hebei, Kitajska	Wei in sod., 2017
Borov gozd (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	0,980	Loess Plateau, Kitajska	Fang in sod., 2016
Borov gozd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	1,000	Heilongjiang, Kitajska	Li in sod., 2015
Smrekov gozd (<i>Picea crassifolia</i> Kom.)	0,970	Gansu, Kitajska	He in sod., 2014
Borov gozd (<i>Pinus halepensis</i> Mill.)	0,998	Izrael	Schachnovich, in sod., 2008

Listnati gozd	0,999	Mehika	Carlyle-Moses in sod., 2004
Listnati gozd, olistano	0,995	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
Listnati gozd, mirovanje	0,960	Dragonja, Slovenija	Šraj in sod., 2008a
Bukev (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	0,990	Ghent, Belgija	Staelens in sod., 2008
Gozd kriptomerij (<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don)	0,995	Tsukuba, Japonska	Iida in sod. (2017)
Mešan gozd	0,990	Osrednja Mehika	Perez-Suarez in sod., 2014
Iglasti gozd	0,954	British Columbia	Carlyle-Moses in sod., 2014
Nasad pacipres (<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl.) pred in po redčenju	0,995 0,999	Kochi prefecture, Japonska	Nanko in sod., 2015
Širokolistni gozd	0,986	Čile	Iroume in Huber, 2002
Listnati gozd, olistano	0,995	Pireneji, Španija	Muzylo in sod., 2012
Listnati gozd, mirovanje	1	Pireneji, Španija	Muzylo in sod., 2012
Hrast (<i>Quercus suber</i> L.)	0,984	Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000
Hruška (<i>Pyrus calleryana</i> Decne.)	0,995	Kalifornija, ZDA	Xiao in sod., 2000

Delež prepuščenih padavin narašča s količino padavin, vendar pa se njegove vrednosti pri večjih količinah padavin stabilizirajo; pri brezi pri približno 90 % in 55 mm padavin, pri boru pa pri TF enakem 60 % in 40 mm padavin (slika 48). V borovem gozdu na severu Kitajske se je naraščanje deleža TF stabiliziralo pri padavinah enakih 75 % in 30 mm (Wei in sod., 2017), v nasadu kriptomerije na Japonskem pri 70 % in 10 mm padavin (Kato in sod., 2013), v mešanem gozdu na Kitajskem pa pri 90 % in 80 mm padavin (Su in sod., 2016).



Slika 48: Odvisnost med TF in količino padavin na prostem (P)

Figure 48: TF as a function of rainfall in the open (P)

Zaradi zamažitve merilnikov prepuščenih padavin in okvare disdrometra nismo mogli za vse izmerjene dogodke določiti časovnega poteka prepuščanja padavin in mikrostrukture padavin. Popolne podatke smo imeli na voljo za 180 dogodkov (preglednica 26).

Preglednica 26: Podatki o spremenljivkah izbranih 180 dogodkov (povprečje $\pm$ standardna deviacija)
Table 26: Values of the variables for the selected 180 events (average $\pm$ standard deviation)

Fenofaza	Število dogodkov	Kp [mm]	Tp [h]	Ip [mm/h]	Vk [mm/h]	Dk [mm]	T [°C]	f [%]	Vh [m/s]
Obdobje vegetacije	133	1530	7,2 ($\pm 9,6$)	3,4 ($\pm 7,2$)	3,9 ($\pm 0,5$)	0,8 ($\pm 0,2$)	15,2 ($\pm 4,5$)	84,6 ($\pm 9,9$)	1,4 ($\pm 0,7$)
Odpadanje listja/iglic	5	72	11,9 ($\pm 5,3$)	1,2 ($\pm 1,1$)	3,2 ($\pm 0,4$)	0,5 ($\pm 0,1$)	11,8 ($\pm 2,1$)	94,6 ($\pm 2,1$)	0,8 ($\pm 0,4$)
Obdobje mirovanja	36	450	10,9 ($\pm 13,2$)	0,9 ($\pm 0,6$)	3,4 ($\pm 0,3$)	0,6 ($\pm 0,1$)	7,3 ($\pm 2,4$)	88,6 ($\pm 5,9$)	1,4 ($\pm 0,7$)
Olistanje/začetek vegetacije	6	80	12,3 ($\pm 11,1$)	1,6 ($\pm 0,8$)	3,7 ($\pm 0,3$)	0,7 ($\pm 0,1$)	11,7 ($\pm 1,2$)	86,9 ($\pm 3,1$)	1,3 ($\pm 0,2$)
Vse	180	2132	8,3 ($\pm 10,5$)	2,8 ($\pm 6,3$)	3,8 ($\pm 0,5$)	0,7 ($\pm 0,2$)	13,4 ($\pm 5,1$)	85,8 ($\pm 9,2$)	1,4 ($\pm 0,7$)

5.2 Prostorska porazdelitev prepuščenih padavin

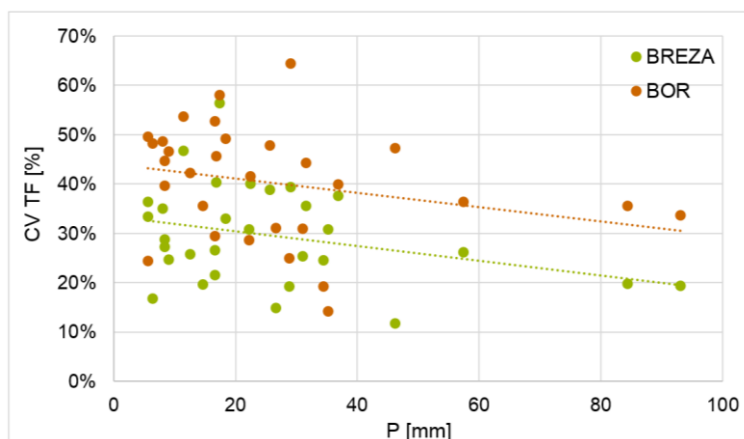
Prepuščene padavine se po prostoru spreminjajo. Do raznolike prostorske spremenljivosti TF pride zaradi različne gostote krošnje, vodoravnih premikov prestreženih padavin znotraj drevesne krošnje, oddaljenosti od debla, s čimer sta povezana debelina in naklon vej ter spremenljivega indeksa listne površine (Gomez in sod. 2002; Carlyle-Moses in sod., 2004; Fang in sod., 2015).

V letu 2016 smo pod del krošnje navadne breze in črnega bora v koncentrični mreži namestili 11 točkovnih lijakastih merilnikov prepuščenih padavin (slika 10). Del krošnje, kjer so bili merilniki postavljeni, je bil izbran tako, da je bil čim bolj oddaljen od bližnjih stavb in da se krošnje sosednjih dreves med seboj niso prekrivale. Za vsako točko smo določili njeno zastrtost s krošnjo (zastrt odstotek površine neba nad točko) (preglednica 16, slika 45) in oddaljenost od debla.

Prostorsko spremenljivost TF smo analizirali za 30 dogodkov, pri katerih je padlo vsaj 5 mm padavin. Pri manjših količinah padavin je tudi prepuščanje padavin majhno (povprečno 0,6 mm pod brezo in 0,2 mm pod borom), zaradi česar bi pri ročnem pobiranju podatkov lahko prišlo do večjih napak. Čeprav smo podatke pobirali kar se da redno, včasih zaradi vikenda, praznikov ali nočnih padavin ni bilo mogoče vrednosti odčitati samo za en posamezen dogodek. Take primere smo izločili in za analizo prostorske spremenljivosti TF izbrali le dogodke, ko smo imeli na voljo posamezne podatke o dogodku tako z avtomatskega dežemera kot iz ročno pobranih lijakastih merilnikov.

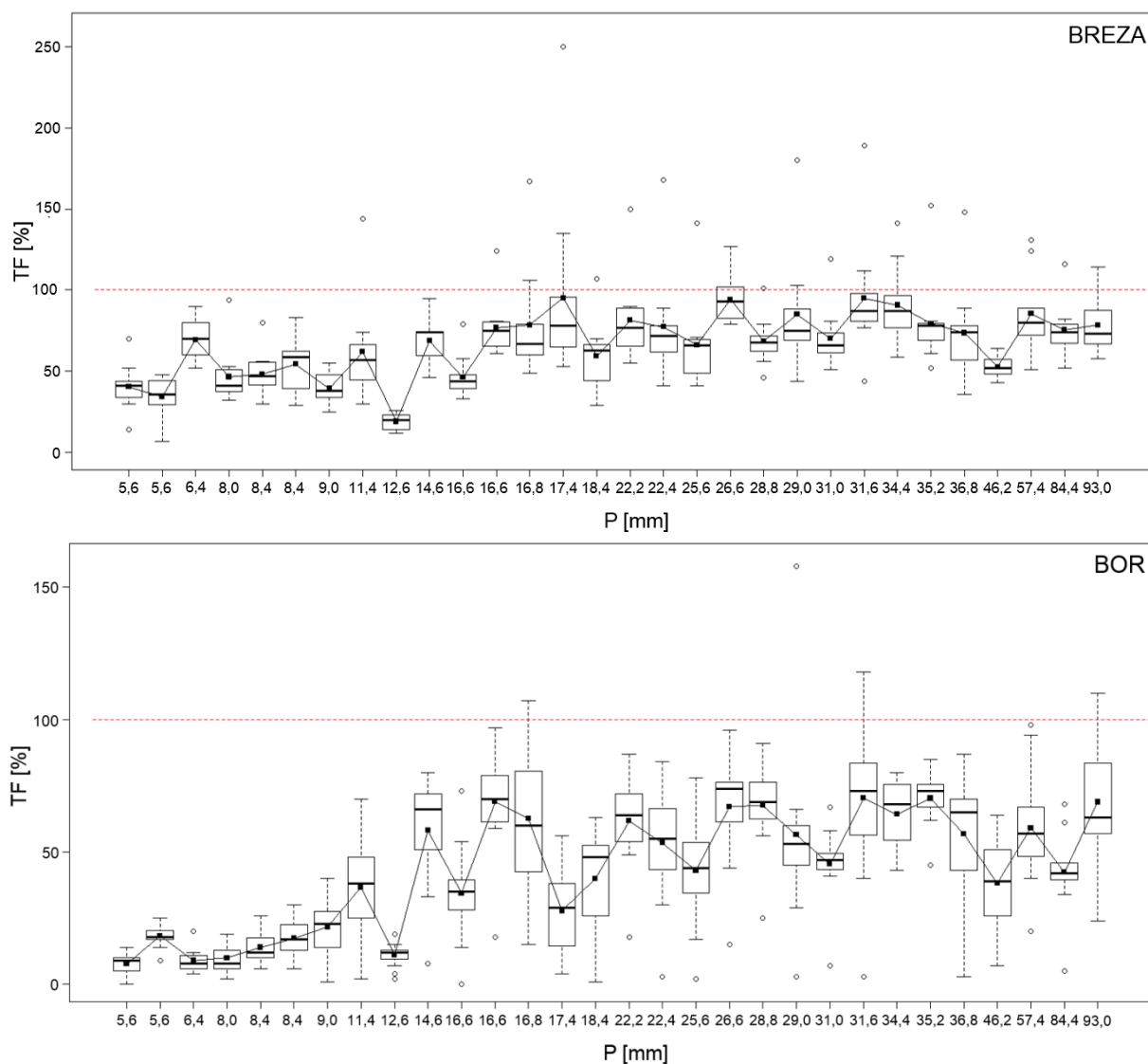
V analiziranih 30 dogodkih je skupno padlo 738,8 mm padavin, katerih količina se je gibala med 5,6 mm in 93 mm na dogodek. Intenziteta dogodkov je bila med 0,4 mm/h in 7,3 mm/h, njihovo povprečno trajanje pa je bilo enako 16,1 ur ($\pm 13,7$ h). Povprečna hitrost vetra se je gibala med 0,7 m/s in 3,4 m/s, povprečna temperatura dogodkov pa je bila med 2,8 °C in 23,9 °C. Povprečna hitrost dežnih kapljic dogodkov je bila 3,85 m/s ($\pm 0,37$ m/s), premer kapljic 0,69 mm ($\pm 0,14$ mm) in število kapljic 3.143 (± 2.999)/cm². Količina prepuščenih padavin pod brezo je za izbrane dogodke znašala 71 % padavin na prostem (± 15 %), pod borom pa 48 % padavin na prostem (± 23 %).

Koeficient variacije (CV) točkovnega prepuščanja padavin za posamezni dogodek se je zmanjševal s količino padavin v primeru obeh dreves (slika 49). Povprečna vrednost CV za brezo je znašala 31 %, medtem ko je bila najmanjša vrednost (12 %) opažena v obdobju vegetacije, največja (59 %) pa v odboju mirovanja. V primeru bora je bila povprečna vrednost CV enaka 42 %, gibala pa se je med 15 % in 68 % za dogodka v obdobju mirovanja.



Slika 49: Koefficient variacije prepuščenih padavin (CV TF) glede na količino padavin na prostem (P) za posamezen dogodek

Figure 49: Event point throughfall coefficient of variation (CV TF) according to the event's amount of rainfall (P)



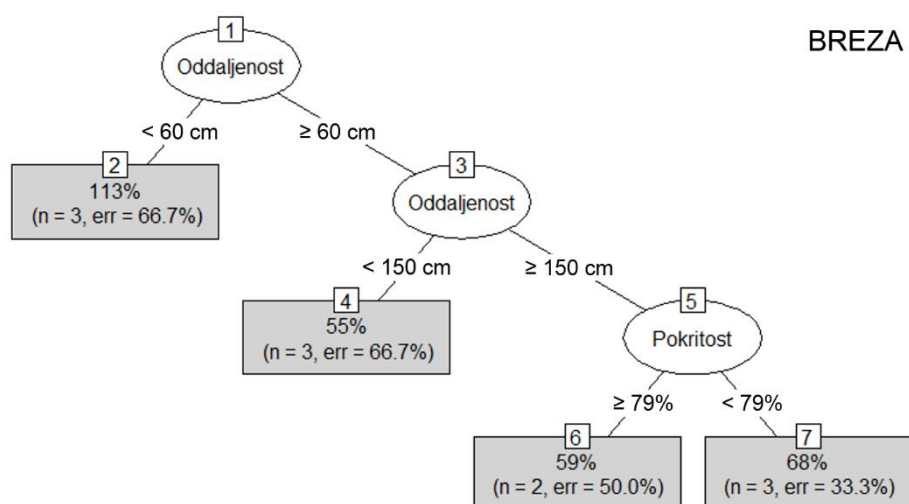
Slika 50: Okviri z ročaji TF glede na količino padavin na prostem (P); rdeča črtkana črta označuje TF enak 100 % padavin na prostem

Figure 50: Box and whisker plots of TF as an amount of rainfall in the open (P); the red line indicates TF equal to 100% of rainfall in the open

Povprečje točkovnih vrednosti prepuščenih padavin na dogodek je naraščalo s količino padavin in se pri obeh drevesih ustalilo za padavine večje od 28 mm (slika 50). V primeru breze je bila vrednost, pri kateri se je delež TF ustalil, odvisna od fenofaze, saj je v obdobju vegetacije znašala 70 %, v obdobju mirovanja pa 85 % padavin. Količina TF v določenih točkah je kar nekajkrat presegla količino padavin na prostem. Pod brezo smo ta pojav zabeležili v primeru 19 dogodkov z vsaj 10 mm padavin, pod borom pa le za 4 dogodke z vsaj 16,8 mm padavin (slika 50). Prostorska spremenljivost prepuščanja padavin glede na količino padavin na prostem je odvisna od drevesne vrste. Pod borom smo na splošno v posameznih točkah izmerili manjše vrednosti TF, ki so le redko presegle 100 %. Pod brezo so bili razponi TF po posameznih točkah večji, saj je najmanjša vrednost znašala 12 %, največja pa kar 250 % padavin na prostem.

Prostorska porazdelitev padavin je odvisna od lastnosti drevesa, izmed katerih smo upoštevali zastrtost s krošnjo, oddaljenost od drevesnega debla in LAI. Vpliv lastnosti, ki smo jih lahko določili za vsako merilno točko, smo analizirali z regresijskimi drevesi, vpliv LAI, ki smo ga določili za celotno krošnjo in se spreminja po fenofazah, pa smo analizirali za posamezna obdobja z grafičnim prikazom na karti jakosti.

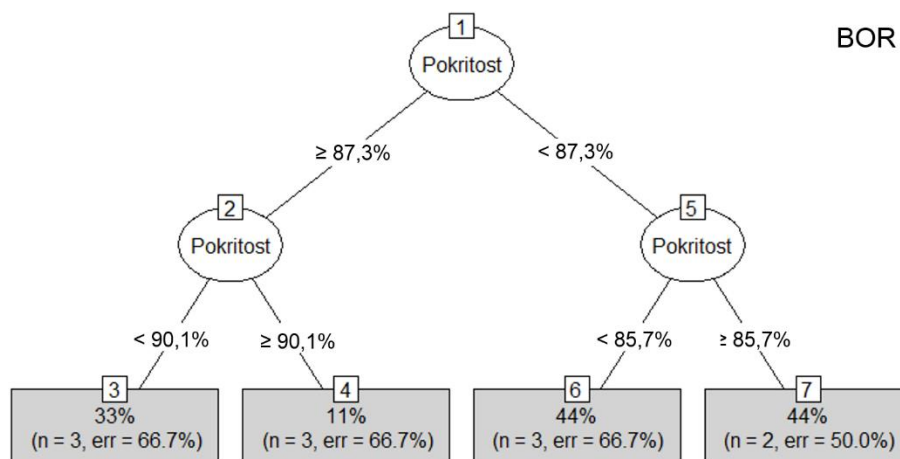
Na prostorsko porazdelitev TF pod brezo najbolj vpliva oddaljenost od debla in šele v tretjem koraku delitve regresijskega drevesa (RT) zastrtost s krošnjo (slika 51). Merilne točke so bile razdeljene v tri skupine glede na oddaljenost od debla (slika 10). Največje količine TF pod brezo smo v povprečju izmerili v točkah, najbližje drevesnemu deblu (točke 1, 2 in 3) (sliki 10 in 53). Povprečen delež TF breze za te točke je znašal 74 % (± 42 %), za točke v sredinskem krogu (točke 4, 5 in 6) (slika 53) pa je bil v povprečju enak 62 % padavin (± 26 %). Za merilne točke pod brezo v zunanjem krogu se je kot pomemben izkazal tudi vpliv zastrtosti s krošnjo (slika 51). Točki 8 in 11 (slika 53) sta imeli večji delež zastrtosti s krošnjo, v povprečju pa sta prepustili malo manj padavin (65 % ± 21 %) kot ostale tri točke z manjšo zastrtostjo s krošnjo (67 % ± 18 %).



Slika 51: Regresijsko drevo vpliva oddaljenosti od debla in zastrtosti s krošnjo na prostorsko spremenljivost TF pod navadno brezo

Figure 51: Regression tree indicating the influence of distance from the stem and canopy coverage on TF spatial variability under the common silver birch tree

Oddaljenost od debla pa v nasprotju z brezo nima vpliva na prostorsko spremenljivost TF pod borom, na katero vpliva predvsem zastrtost s krošnjo (slika 52). Delež TF je bil manjši (38 % ± 27 % padavin) v merilnih točkah z zastrtostjo s krošnjo večjo od $87,3$ % in večji (50 % ± 28 % padavin) v točkah z manjšo zastrtostjo (preglednica 16).



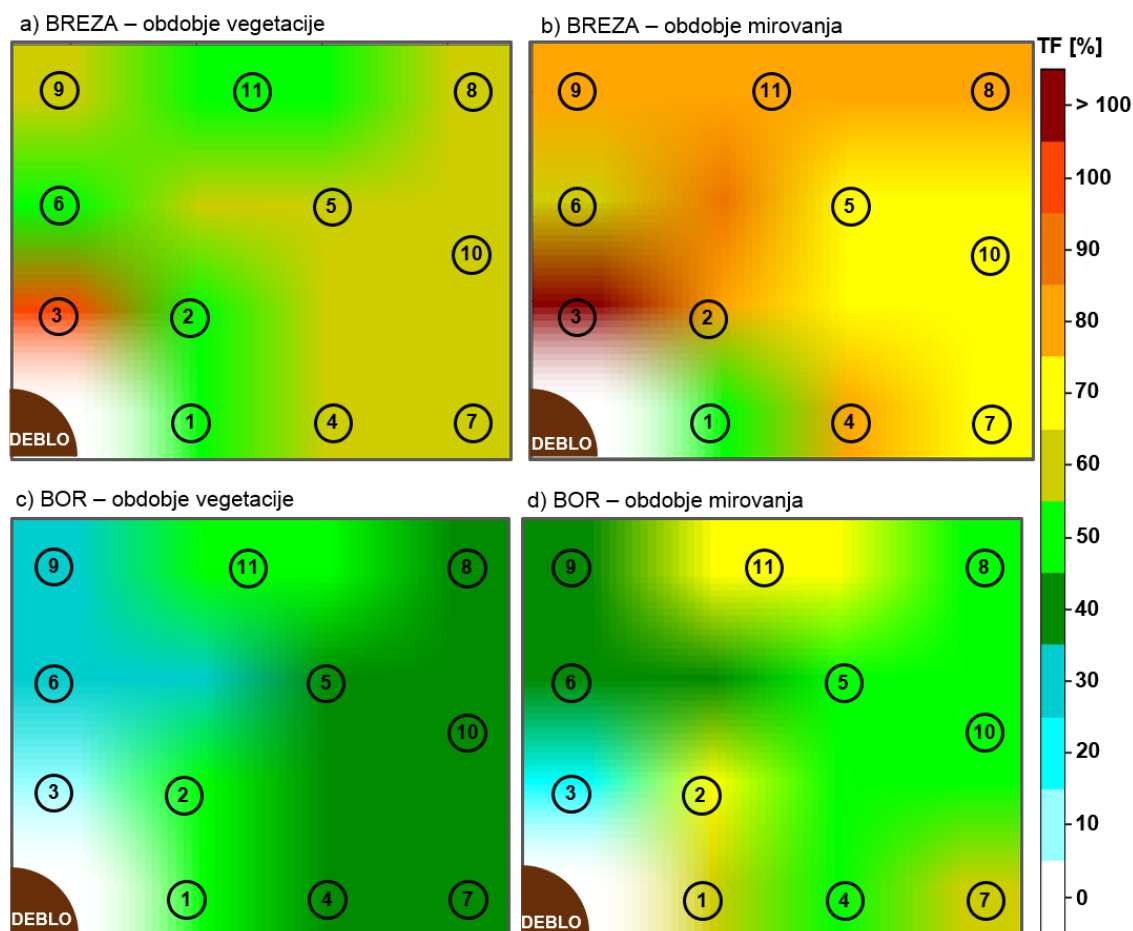
Slika 52: Regresijsko drevo vpliva oddaljenosti od debla in zastrtosti s krošnjo na prostorsko spremenljivost TF pod črnim borom

Figure 52: Regression tree indicating the influence of distance from the stem and canopy coverage on TF spatial variability under the Austrian pine tree

LAI dreves se spreminja glede na fenofaze in ima ustaljene vrednosti v obdobju vegetacije in v obdobju mirovanja. S tem vpliva na sezonske lastnosti krošenj in na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin. Največje količine TF pod brezo smo v obdobju vegetacije in v obdobju mirovanja izmerili v točki 3 (slika 53 a in b). V obdobju vegetacije je delež TF v tej točki v povprečju znašal 96 % padavin, v obdobju mirovanja pa 141 %. Najmanjše deleže TF pod brezo pa smo prav tako v obeh obdobjih izmerili v točki 1 (slika 53 a in b), v povprečju 51 % padavin v obdobju mirovanja in 46 % padavin v obdobju vegetacije. Ne glede na to pa se je vzorec manjših in večjih vrednosti točkovnega TF med posameznima obdobjema spremenil. V obdobju vegetacije so bile na splošno manjše vrednosti TF izmerjene v bližini drevesnega debla in na levi strani merilne mreže (svetlo zelena barva, slika 53 a), medtem ko smo manjše vrednosti prepuščenih padavin v obdobju mirovanja izmerili na desnem robu merilne mreže (rumena barva, slika 53 b).

Podobno kot v primeru breze smo tudi pod borom v obeh fenofazah največje in najmanjše vrednosti prepuščenih padavin zabeležili v istih točkah. Največji delež TF pod borom je prejela točka 11 (slika 53 c in d), 70 % padavin v obdobju mirovanja in 51 % padavin v obdobju vegetacije. Najmanjši deleži TF pod borom pa so dosegli točko 3 (slika 53 c in d), 20 % padavin v obdobju mirovanja in 8 % padavin v obdobju vegetacije. Čeprav so bili deleži TF pod borom v posameznih fenofazah različni, pa se njihova porazdelitev ni spremenila: manjše vrednosti TF so bile izmerjene na levi strani merilne mreže (turkizna barva, slika 53 c; temno zelena barva, slika 53 d), večje vrednosti pa v sredinski liniji od debla proti robu krošnje (svetlo zelena barva, slika 53 c; rumena barva, slika 53 d)

Prostorsko porazdelitev TF smo grafično predstavili na kartah jakosti za vsak dogodek (priloga B). Karte smo s hierarhičnim razvrščanjem glede na podobnosti v vzorcih prepuščenih padavin združili v razrede z uporabo programa Orange (Demšar in sod., 2013). Za tako oblikovane razrede smo analizirali povprečne meteorološke spremenljivke dogodkov, razvrščenih v posamezen razred.



Slika 53: Prostorska porazdelitev TF v posameznih fenofazah
Figure 53: Spatial distribution of TF according to phenoseasons

Dogodki prepuščenih padavin pod brezo so bili razvrščeni v šest razredov (preglednica 27). V razred 1 je bil uvrščen le en dogodek, in sicer 17. avgust 2016 (priloga B). Delež TF je bil pri tem dogodku znatno manjši kot pri vseh preostalih analiziranih dogodkih, saj v nobeni merilni točki ni presegel 30 %. Ne glede na to pa sta dogodek zaznamovali zmerna količina padavin (12,6 mm) in zmerna intenziteta (3,4 mm/h). Štirje dogodki iz obdobja vegetacije so bili združeni v razredu 2. Padavine pri teh dogodkih so bile rahle, z intenziteto manj kot 1,5 mm/h, količina padavin ni presegla 20 mm, dežne kapljice pa so bile majhne (MVD manj kot 2 mm). Vseeno pa so bile izmerjene vrednosti prepuščenih padavin dokaj velike, saj so v povprečju na dogodek znašale več kot 75 %, za dva dogodka pa so v točki 3 presegle 100 %. Kratki in majhni padavinski dogodki (med 5,6 in 9 mm padavin) so bili razporejeni v razred 3. Delež TF je bil majhen (v povprečju manj kot 68 % na dogodek) in v nobeni merilni točki ni presegel količine padavin na prostem. Nasprotno pa je za dogodke, uvrščene v razred 4, delež prepuščenih padavin v točki 3 za skoraj vse dogodke znašal več kot 100 % padavin na prostem. Vsi ti dogodki pa so bili tudi dokaj intenzivni, saj so dostavili več kot 20 mm padavin v manj kot 15,5 urah. V razredu 5 so bili združeni skoraj vsi dogodki, zabeleženi v obdobju mirovanja. Količina padavin, trajanje in intenziteta teh dogodkov se med seboj zelo razlikujejo, vendar pa so bili izmerjeni deleži prepuščenih padavin med največjimi in so pri vsakem dogodku v vsaj eni točki presegli 100 %. Tudi za dogodke, razvrščene v razred 6, smo izmerili različne vrednosti padavin (od 17,4 do 93 mm), trajanja (od 3,7 do 21,5 ur) in intenzitete (od 1,3 do 7,3 mm/h), vendar pa smo pri vseh zabeležili velike dežne kapljice (MVD večji kot 1,6 mm). Prepuščene padavine so pri vsakem izmed teh dogodkov presegle količino padavin na prostem v vsaj dveh merilnih točkah.

Preglednica 27: Povprečne meteorološke spremenljivke dogodkov, združenih v razrede glede na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod navadno brezo (povprečje $\pm$ standardna deviacija)
Table 27: Average values of meteorological variables for events, grouped in classes with hierarchical clustering according to the TF spatial distribution under the common silver birch tree (average $\pm$ standard deviation)

Razred	Število dogodkov	Fenofaza	Kp [mm]	Tp [h]	Ip [mm/h]	MVD [mm]	TF [%]
1	1	Obdobje vegetacije	12,6	3,7	3,4	1,78	24 %
2	4	Obdobje vegetacije	13,7 ($\pm$ 4,0)	20,7 ($\pm$ 9,9)	0,8 ($\pm$ 0,4)	1,33 ($\pm$ 0,42)	81 % ($\pm$ 4 %)
3	6	Obdobje vegetacije	8,2 ($\pm$ 1,4)	8,5 ($\pm$ 7,6)	1,5 ($\pm$ 0,7)	1,81 ($\pm$ 0,17)	58 % ($\pm$ 6 %)
4	6	Obdobje vegetacije	26,5 ($\pm$ 6,9)	11,4 ($\pm$ 3,8)	2,5 ($\pm$ 0,5)	1,80 ($\pm$ 0,49)	72 % ($\pm$ 10 %)
5	8	Obdobje mirovanja	32,5 ($\pm$ 24,0)	27,3 ($\pm$ 21,1)	1,5 ($\pm$ 0,9)	1,55 ($\pm$ 0,37)	79 % ($\pm$ 8 %)
6	5	Mešano	40,6 ($\pm$ 26,8)	12,0 ($\pm$ 5,6)	3,8 ($\pm$ 2,0)	2,24 ($\pm$ 0,69)	74 % ($\pm$ 10 %)

Dogodki prepuščanja padavin, izmerjenih pod borom, so bili razvrščeni v pet razredov (preglednica 28). V primeru bora fenofaza ni imela vidnejšega vpliva na hierarhično razvrščanje dogodkov. V razredu 1 so bili združeni dogodki z najmanjšimi izmerjenimi deleži TF, ki v nobeni merilni točki niso presegli 30 % padavin. Ti dogodki so imeli majhne količine padavin (do 13 mm) in majhne intenzitete. V razredu 2 so bili združeni dogodki z največjimi povprečnimi vrednostmi TF. Ne glede na to, da so bile njihove intenzitete največje (med 2 in 7,3 mm/h) in dežne kapljice največje (MVD je dosegel vrednosti 3,4 mm), je delež TF v vseh merilnih točkah ostal manjši kot 100 % padavin. Dogodki, ki so bili razvrščeni v razreda 3 in 4, so bili zelo obilni, saj so se količine padavin gibale med 16,6 in 93 mm. Vendar pa so bili dogodki, združeni v razredu 3 krajši, intenzivnejši (do 4,3 mm/h) in z večjimi dežnimi kapljicami (MVD do 2,5 mm), kar je vplivalo na večje deleže TF. Vsi dogodki, pri katerih je delež TF pod borom v posameznih točkah presegel 100 % padavin, so bili uvrščeni v razred 3. Dogodki v razredu 4 pa so bili daljši, z zmernimi intenzitetami (do 2,8 mm/h) in manjšimi dežnimi kapljicami (MVD do 1,5 mm). To se je odražalo tudi v manjših vrednostih TF, ki so v povprečju na dogodek dosegle 75 % padavin v posamezni merilni točki. Še trije dogodki z majhnimi povprečnimi deleži TF pa so bili razvrščeni v razred 5. Glede na količino padavin so bili dokaj podobni dogodkom, uvrščenim v razred 2, vendar pa so bile največje izmerjene vrednosti TF v posameznih točkah manjše od 65 % padavin in posledično niso presegle količine padavin na prostem.

Preglednica 28: Povprečne meteorološke spremenljivke dogodkov, združenih v razrede glede na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod črnim borom (povprečje $\pm$ standardna deviacija)
Table 28: Average values of meteorological variables for events, grouped in classes with hierarchical clustering according to the TF spatial distribution under the Austrian pine tree (average $\pm$ standard deviation)

Razred	Število dogodkov	Fenofaza	Kp [mm]	Tp [h]	Ip [mm/h]	MVD [mm]	TF [%]
1	7	Obdobje vegetacije	7,9 ($\pm$ 2,2)	10,5 ($\pm$ 8,4)	1,5 ($\pm$ 1,1)	1,76 ($\pm$ 0,17)	19 % ($\pm$ 8 %)
2	4	Mešano	27,7 ($\pm$ 8,3)	9,3 ($\pm$ 5,6)	3,9 ($\pm$ 2,0)	2,48 ($\pm$ 0,89)	81 % ($\pm$ 11 %)
3	7	Mešano	34,0 ($\pm$ 24,7)	18,1 ($\pm$ 10,9)	2,3 ($\pm$ 1,3)	1,72 ($\pm$ 0,38)	61 % ($\pm$ 9 %)

4	9	Mešano	33,8 (± 22,0)	26,1 (± 20,7)	1,6 (± 0,8)	1,34 (± 0,22)	50 % (± 10 %)
5	3	Mešano	24,2 (± 15,9)	10,6 (± 2,6)	2,2 (± 1,3)	1,94 (± 0,15)	39 % (± 9 %)

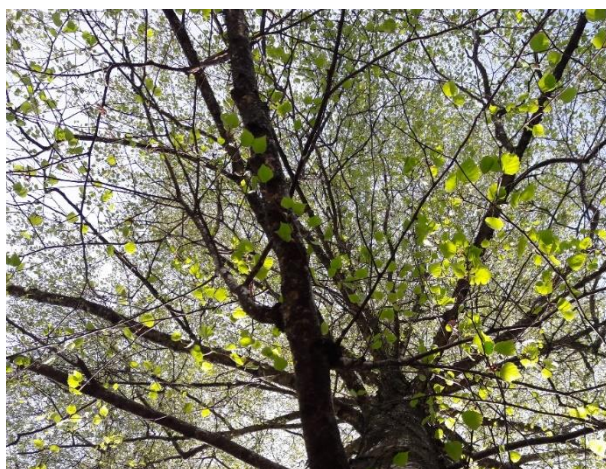
5.2.1 Razprava

Deleži prepuščenih padavin pod krošnjama obeh drevesnih vrst so se med posameznimi merilnimi točkami dokaj razlikovali, saj je povprečen koeficient variacije (CV) med merilnimi točkami za brezo znašal 30 % in za bor 40 % (slika 49). Vrednosti CV, ki so jih izmerili ostali raziskovalci v gozdovih, so bile manjše: 15,9 % - 20,1 % za listnati gozd v Marylandu, ZDA (Siegert in sod., 2016), 14,6 % za mešani gozd na Poljskem (Kowalska in sod., 2016) in 21 % za gozd navadne ameriške duglazije na Nizozemskem (Raat in sod., 2002). Podobne vrednosti CV, kot smo jih opazili mi, pa so podali tudi Keim in sod. (2005), ki so vrednosti podali ločeno za mlajši (19 %) in starejši (54 %) iglasti gozd ter listnati gozd v obdobju vegetacije (34 %) in v mirujočem obdobju (24 %). Razlike v vrednostih CV so lahko posledica velikosti zbiralne površine merilnikov in dolžine meritev, saj večja prispevna površina in daljše obdobje merjenja zmanjšujeta zabeležena nihanja v vrednostih TF (Kowalska in sod., 2016). V primerjavi z zbiralno površino točkovnih merilnikov, ki smo jih uporabili v disertaciji (78.5 cm²), so Siegert in sod. (2016), Kowalska in sod. (2016) ter Raat in sod. (2002) uporabili večje (324 cm², 201 cm² in 320 cm²), Keim in sod. (2005) pa manjše (9.2 cm²) merilnike. Poleg tega so Keim in sod. (2005) meritve opravljali le 5,5 mesecev, medtem ko so te v ostalih raziskavah trajale med 9 in 13 mesecev. Odstopanja v vrednostih CV pa so lahko pogojena tudi z lokacijo meritev, ki je bila v našem primeru pod krošnjo prosto rastočega drevesa, v ostalih primerih pa v množici dreves v gozdu. V primerjavi z opaženimi manjšimi vrednostmi CV v gozdu (Raat in sod., 2002; Kowalska in sod., 2016; Siegert in sod., 2016), so Fang in sod. (2016) izračunali 35,5 % CV pod posamično krošnjo bora. Gomez in sod. (2002) pa so opazili raztros 160 % med izmerjenimi vrednostmi TF v merilnih točkah pod posameznimi oljkami, medtem ko smo v disertaciji pod brezo zabeležili raztros 197 % in pod borom 155 % (slika 50).

V določenih merilnih točkah smo za nekaj dogodkov izmerili količino prepuščenih padavin, ki je bila večja od količine padavin na prostem. Te točke predvidoma nastanejo zaradi pretakanja prestreženih padavin po listih, vejah in deblu do določenih mest pod krošnjo (Carlyle-Moses in sod., 2004). Razlage in pojasnila o tem, kje se take točke najverjetneje pojavijo, se med seboj razlikujejo in so neskladne, saj naj bi bil njihov pojav povezan z lastnostmi drevesne krošnje vsakega posameznega drevesa (Gomez in sod., 2002; Fang in sod., 2016). Število takih dogodkov s prepuščenimi padavinami, ki so presegle količino padavin na prostem, je bilo večje v primeru breze (19), zabeležili pa smo jih, ko so bile padavine večje od 10 mm. Pod borom pa smo takih dogodkov zabeležili manj (4), potrebnih pa je bilo vsaj 16,8 mm padavin (slika 50). Vrednosti TF, večje od 100 % padavin na prostem, so v določenih merilnih točkah izmerili tudi v drugih študijah. Zabeležili so jih na robu krošnje oljke pri več kot 4,9 mm padavin (Gomez in sod., 2002), na robu krošnje posameznega bora pri več kot 13,3 mm padavin (Fang in sod., 2016), v listnatem gozdu na oddaljenosti 2 do 6 m od dreves pri padavinah večjih od 3,3 mm (Yousefi in sod., 2018), v hrastovem gozdu po zapadlih vsaj 1,3 mm padavin (Carlyle-Moses in sod., 2004) in v smrekovem gozdu pod robovi krošenj z majhnimi vrednostmi indeksa vegetacijske površine (ang. *plant area index*, PAI) za več kot 5,1 mm padavin (He in sod., 2014). Točke, v katerih prepuščene padavine presežejo padavine na prostem, se imenujejo točke kapljanja (ang. *drip points*) (Bruijnzeel, 2000; Šraj in sod., 2008a; Carlyle-Moses in sod., 2004; Gerrits in sod., 2010).

Glede na rezultate regresijskih dreves (slika 51), na prostorsko porazdelitev TF pod brezo najbolj vpliva oddaljenost od debla, pa tudi zastrtost s krošnjo. Največje povprečne vrednosti TF so bile izmerjene v bližini debla, kar je lahko posledica navzgor rastočih vej navadne breze (preglednica 21), po katerih se prestrežene padavine stekajo proti deblu (Gerrits in sod., 2010;

He in sod., 2014). Poleg tega pa smo v točki 3 za kar 63 % vseh analiziranih dogodkov izmerili TF večji kot 100 % padavin na prostem, kar pa je lahko povezano s točkami kapljanja. Te lahko nastanejo ne le na robu krošnje temveč tudi v točkah z najmanjšo zastrtostjo s krošnjo (preglednica 16). Večje deleže TF so pod bolj odprtimi ali manj gostimi deli krošenj zabeležili tudi Gomez in sod. (2002), He in sod. (2014), Fang in sod. (2016) ter Dohnal in sod. (2014). Ne glede na to pa smo pod brezo najmanjše deleže TF v prav tako 63 % dogodkov izmerili v točki 1, ki se nahaja ob drevesnem deblu, vendar nima največje zastrtosti s krošnjo. Podroben pregled hemisferičnih fotografij drevesne krošnje nad posameznimi merilnimi točkami je pokazal, da nad to merilno točko raste debelejša veja (slika 54), ki je lahko vplivala na majhne vrednosti TF. Llorens in Gallart (2000) sta namreč pokazala, da ima pri prestrezanju padavin veliko vlogo večja skladiščna zmogljivost vej in debla v primerjavi z iglicami, He in sod. (2014) pa so ugotovili, da na prostorsko porazdelitev vpliva PAI, ki vključuje tako veje kot tudi listje, medtem ko LAI, ki podaja le površino listja, nima večjega učinka. Nanko in sod. (2011) pa so porazdelitev prepuščenih padavin blizu debla pripisali razporeditvi vej.



Slika 54: Hemisferična fotografija nad merilno točko 1

Figure 54: Hemispheric photography above measurement point 1

Fang in sod. (2016) so za posamezni bor z navzdol rastočimi vejami kot pomemben vplivni dejavnik na prostorsko porazdelitev TF navedli robni učinek (ang. *edge effect*; premeščanje prestreženih padavin proti robu krošnje). Tudi obravnavan bor ima veje, ki so nagnjene navzdol (preglednica 21), vendar pa v tem primeru nismo opazili povečane koncentracije TF na robu krošnje. S tem lahko potrdimo del druge hipoteze, da so vegetacijske lastnosti pomembne tudi pri posameznih drevesih iste vrste. Bolj kot oddaljenost od debla in s tem vpliv roba krošnje, na prostorsko porazdelitev v našem primeru vpliva zastrtost s krošnjo, kar so pokazali rezultati regresijskega drevesa RT (slika 52) in velika vrednost koeficienta korelacije med točkovnimi vrednostmi prepuščenih padavin in pripadajočo zastrtostjo s krošnjo (-0,49) v primerjavi s koeficientom korelacije med točkovnimi vrednostmi TF in oddaljenostjo od debla (0,17). Prav tako odvisnosti porazdelitve TF od oddaljenosti od debla v borovih gozdovih niso opazili niti Loustau (1992) niti Kowalska in sod. (2016), v smrekovem gozdu pa so Dohnal in sod. (2014) večje deleže TF izmerili pod deli krošenj z manjšo zastrtostjo in obratno. Ne glede na to, pa so Nanko in sod. (2011) našli odvisnost med prostorsko porazdelitvijo TF in oddaljenostjo od debla pod posamezno pacipreso, vendar so opazili tudi manjše vrednosti TF v osrednjem območju med deblom in robom krošnje ter kot prevladujoči vpliv na prostorsko porazdelitev navedli obliko drevesne krošnje in položaj vej.

V analizah prostorske porazdelitve TF je bil pogosto upoštevan tudi vpliv LAI (Carlyle-Moses in sod., 2004; Dohnal in sod., 2014; Fang in sod., 2016; Siegert in sod. 2016). Fenofaza z značilnimi vrednostmi LAI je v naši raziskavi vplivala na količino prepuščenih padavin pod borom predvsem zaradi sezonskih vzorcev skladiščne zmogljivosti krošnje, kar omenjajo tudi Link in sod. (2004), Pypker in sod. (2005) ter Gerrits in sod. (2010), ne pa tudi na njihovo

prostorsko porazdelitev (slika 53 c in d). Podobne razlike v deležih TF za posamezna vegetacijska obdobja so za iglavce opazili tudi Shachnovich in sod. (2008), He in sod. (2014) ter Kowalska in sod. (2016). Poleg razlik v deležih TF pa smo v primeru breze opazili še drugačno prostorsko porazdelitev TF po posameznih fenofazah (slika 53 a in b), s čimer smo potrdili drugo hipotezo. Točke, v katerih smo zabeležili največje in najmanjše deleže TF se med fenofazami niso spremenile, vmesne vrednosti pa so oblikovale drugačne vzorce. V obdobju vegetacije smo manjše vrednosti TF opazili na levi strani (točke 1, 2, 6 in 11), večje vrednosti pa na desni strani merilne mreže (točke 4, 5, 7 in 10) (slika 53 a in b), v obdobju mirovanja pa se je vzorec obrnil. Spremembe v vzorcu prostorske porazdelitve TF med obdobjema vegetacije in mirovanja so opazili tudi drugi raziskovalci (Gerrits in sod., 2010; Kowalska in sod., 2016; Yousefi in sod., 2018). Pripisali so jih vplivu listja, saj takrat, ko je to prisotno, prekriva določene točke in omejuje prepuščanje padavin, medtem ko drugje spodbuja nastanek točk kapljanja (Helvey in Patric, 1965; Kowalska in sod., 2016). Glede na bolj izrazite vzorce pretakanja prestreženih padavin v krošnji v obdobju vegetacije so Yousefi in sod. (2018) zabeležili več točk kapljanja v obdobju vegetacije kot v obdobju mirovanja, Siegert in sod. (2016) so za merilne točke izračunali večji CV ob prisotnosti listja, Gerrits in sod. (2010) pa so glede na ostale sezone poleti opazili bolj heterogene vzorce prostorske porazdelitve TF.

Za potrebe dodatnih analiz prostorske razporeditve TF smo za vsak dogodek rezultate izmerjenih prepuščenih padavin v posamezni točki grafično prikazali s kartami jakosti. Glede na podobnost med tako oblikovanimi vizualnimi vzorci smo dogodke s hierarhičnim razvrščanjem razvrstili v razrede z uporabo programskega orodja Orange (Demšar in sod., 2013). Razvrstitev je v primeru breze temeljila na fenofazah in količini padavin (preglednica 27). V razred 1 je bil uvrščen le en dogodek (17. 8. 2016), ki so ga zaznamovali zelo majhni deleži TF. Večina študij ugotavlja, da je prepuščanje padavin najbolj odvisno od količine padavin na prostem (Xiao in sod., 2000; Staelens in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Siegert in Levia, 2014), vendar pa smo za ta dogodek izmerili zmerne količine padavin. Kljub temu pa je bilo število dežnih kapljic dogodka najmanjše, kar, kot so pokazali tudi Nanko in sod. (2006), zmanjšuje prepuščanje padavin. Dežne kapljice omenjenega dogodka so bile posledično velike in hitre, kar je v primeru breze vplivalo na manjše prepuščanje padavin (preglednica 35, Zabret in sod., 2018) in potrdilo prvo hipotezo.

Glede na fenofaze je bila večina dogodkov prepuščanja padavin pod brezo iz obdobja vegetacije razvrščenih v razrede od 1 do 4, ki se med seboj razlikujejo po količini padavin na prostem (preglednica 27). Med dogodki, ki so bili uvrščeni v razred 3, je padlo manj kot 10 mm padavin, prepuščene padavine pa v nobeni od merilnih točk niso presegle 100 % padavin. Podobno kot so za dogodke z malo padavinami poročali Gomez in sod. (2002), med dogodki nismo opazili ponavljajočega se vzorca prostorske porazdelitve TF. Pri majhni količini padavin skladiščna zmogljivost krošnje namreč še ni povsem zapolnjena, zato prepuščene padavine tvorijo predvsem dežne kapljice, ki padajo skozi vrzeli v krošnji neposredno na tla (Gomez in sod., 2002; Nanko in sod., 2011). Večji padavinski dogodki (15 mm – 31 mm padavin) so bili razvrščeni v razred 4. Vzorec prostorske porazdelitve TF je bil pri vseh teh dogodkih podoben, z večjimi deleži zabeleženimi na robu krošnje. Podoben vzorec se je pojavljal tudi pri dogodkih s padavinami med 10 in 20 mm, ki so bili združeni v razredu 2. Večja koncentracija TF na robu krošnje breze pri teh dogodkih je posledica tanjšanja vej in večanja površine listja proti robu krošnje, kar vpliva na prerazporeditev prestreženih padavin v krošnji (Nanko in sod., 2011; Fang in sod., 2016).

Poleg rezultatov regresijskih dreves (slika 52) je tudi metoda hierarhičnega grupiranja pokazala, da prostorska porazdelitev TF pod borom ni odvisna od fenofaze (preglednica 28, slika 53), temveč predvsem od količine in intenzitete padavin. Dogodki, ki so bili uvrščeni v razred 1, so bili zelo majhni, prepuščene padavine v nobeni merilni točki niso presegle 30 % padavin. Dogodki, uvrščeni v razreda 2 in 5 so si bili podobni po količini padavin, vendar so se razlikovali po intenzitetah. Prepuščene padavine dogodkov z večjimi intenzitetami, uvrščene v razred 2, so bile večje (povprečni TF dogodka večji kot 70 % padavin) kot tiste pri manj

intenzivnih dogodkih iz razreda 5 (povprečni TF dogodka manjši kot 50 % padavin). Vpliv večje intenzitete na naraščanje deleža TF so med drugimi zabeležili tudi Xiao in sod. (2000), Staelens in sod. (2008) ter Kermavnar in Vilhar (2017). Poleg tega pa se je razlikoval tudi vzorec prostorske porazdelitve TF dogodkov, uvrščenih v posamezen razred. Pri dogodkih v razredu 2 smo na splošno večje deleže TF izmerili na desni strani (točke 1, 2, 4 in 11) in manjše na levi strani (točke 3, 6, 9) merilne mreže (slika 53), medtem ko so dogodki iz razreda 5 tvorili ravno obratni vzorec. Tudi dogodki, ki so bili združeni v razreda 3 in 4 so si bili med seboj podobni po količini padavin, razlikovali pa so se po intenziteti, ki je bila večja za dogodke v razredu 3 (preglednica 28). Ne glede na to pa so bili vzorci prostorske porazdelitve TF v tem primeru podobni za oba razreda: manjši deleži TF na levi (točke 3, 6 in 9) in večji na desni strani (točke 1, 2, 4, 7 in 11) merilne mreže (slika 53). Kljub temu pa je bila razlika med razredoma v tem, da so deleži TF pri dogodkih z večjimi intenzitetami (razred 3) v določenih točkah presegli 100 % padavin, medtem ko tega nismo zabeležili pri nobenem dogodku v razredu 4.

Med seboj podobne vzorce prostorske porazdelitve TF smo torej opazili za dogodke z večjimi količinami padavin ali z močnejšimi intenzitetami, medtem ko se je vzorec za dogodke z manj padavinami ali manjšimi intenzitetami razlikoval. O podobnih razlikah so poročali tudi drugi raziskovalci. Fang in sod. (2016) so pri dogodkih z manj padavinami opazili izrazit vpliv strukture krošnje na prostorsko porazdelitev TF, medtem ko so pri bolj obilnih dogodkih imele večjo vlogo spremenljivke, ki se ne spreminjajo po prostoru. Gomez in sod. (2002) so poročali o stalnem prostorskem vzorcu TF pri močnejših padavinah, medtem ko so se pri dogodkih z majhnimi količinami padavin razlikovali. Carlyle-Moses in sod. (2004) pa so zaznali vpliv določenih lastnosti dreves le pri dogodkih z majhnimi količinami padavin.

5.3 Mikrostruktura padavin

Ker med padavinskim dogodkom hitrosti in velikosti posameznih dežnih kapljic lahko zelo nihajo, smo njihov vpliv na prepuščanje padavin analizirali na ravni dogodka z minutnim oziroma pet-minutnim korakom. Vpliv velikosti in hitrosti dežnih kapljic na prepuščanje padavin pod brezo in borom smo bolj detajlno analizirali za 5 izbranih padavinskih dogodkov: 13. 6. 2014, 3. 7. 2014, 26. 6. 2016, 21. 8. 2016. in 22. 5. 2017 (preglednica 29). Trajanje teh dogodkov je podobno, vendar pa se razlikujejo po količinah padavin z raznolikimi porazdelitvami padavinskih delcev. Prav tako se dogodki med seboj razlikujejo po deležu prepuščenih padavin in drugih meteoroloških spremenljivkah. Za dogodka iz leta 2014 zaradi okvare avtomatskega merilnika nimamo časovnih podatkov o razvoju prepuščenih padavin pod brezo, vendar smo dogodka zaradi njunih lastnosti vseeno vključili v analizo.

Preglednica 29: Meteorološke spremenljivke in delež TF izbranih padavinskih dogodkov

Table 29: Meteorological variables and values of TF for selected rainfall events

Dogodek	Pa [mm]	Tp [min]	Ip [mm/h]	Vh [m/s]	TF breza	TF bor	Vk [m/s]	Dk [mm]
13. 6. 2014	10,2	75	8,2	1,77 ($\pm 0,17$)	68 %	47 %	4,45 ($\pm 0,55$)	1,11 ($\pm 0,25$)
3. 7. 2014	5,6	72	4,7	1,73 ($\pm 0,49$)	44 %	35 %	4,61 ($\pm 0,36$)	1,20 ($\pm 0,17$)
26. 6. 2016	15,2	69	13,2	2,28 ($\pm 1,00$)	62 %	77 %	4,54 ($\pm 0,69$)	0,99 ($\pm 0,32$)
21. 8. 2016	33,4	71	28,2	0,97 ($\pm 0,39$)	64 %	70 %	4,52 ($\pm 0,55$)	0,92 ($\pm 0,23$)
22. 5. 2017	8,0	54	8,89	2,67 ($\pm 0,90$)	69 %	31 %	4,85 ($\pm 0,65$)	1,11 ($\pm 0,30$)

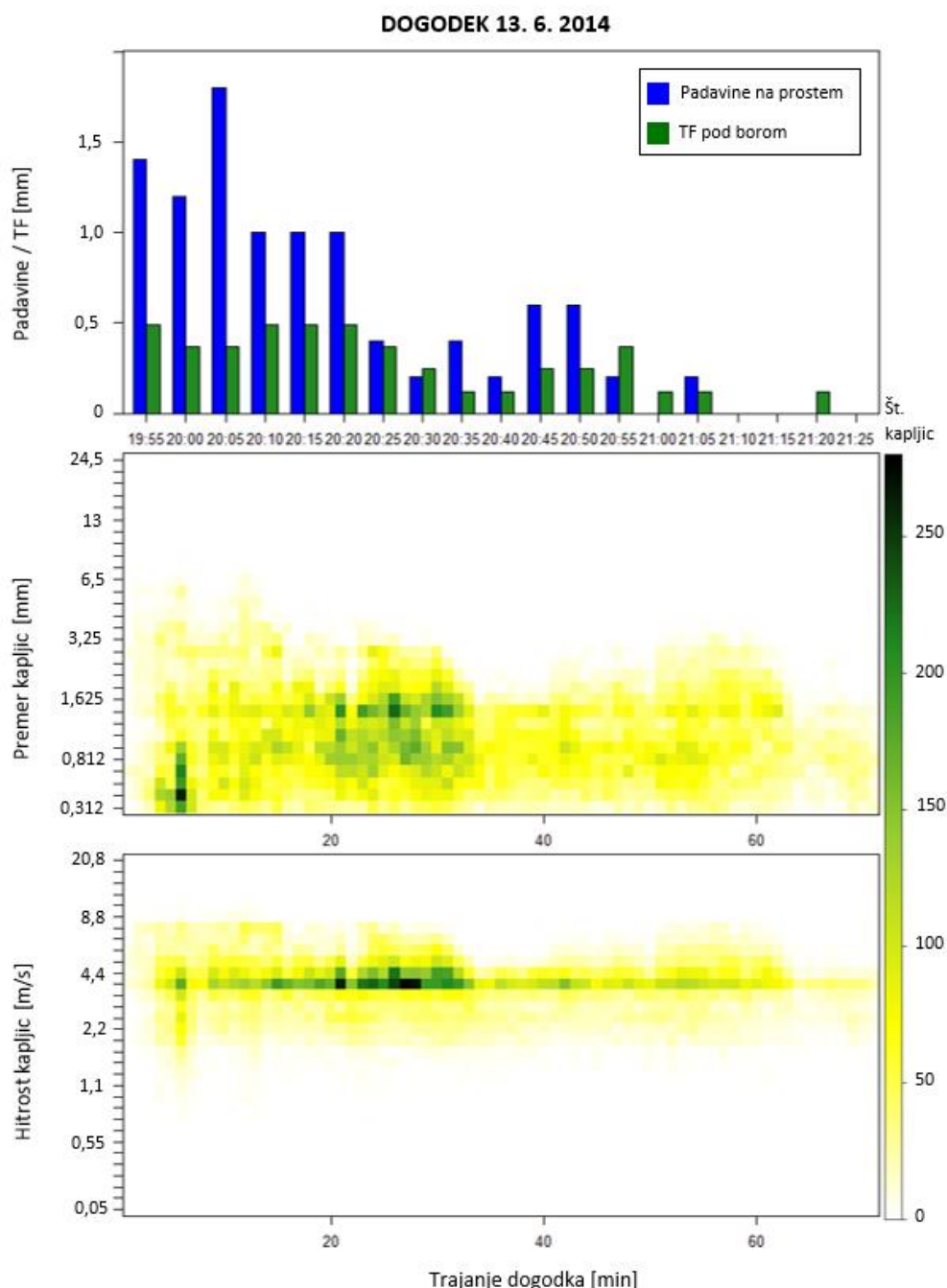
Večina padavin (70 %) je v dogodku 13. 6. 2014 padla v prvi polovici trajanja, do 20:55 (slika 55), kljub temu pa so bile dosežene velikosti in hitrosti dežnih kapljic tekom dogodka dokaj konstantne z dvema izrazitima konicama. Prva, z doseženimi premeri do 8,5 mm in hitrostmi do 13,6 m/s, se je pojavila že po 5 minutah od začetka dogodka in je trajala 10 minut (20:00 – 20:10). Drugič pa smo povečanje premerov in hitrosti do 5,5 mm in 12 m/s zabeležili med 20:45 in 20:55 (slika 55).

Prepuščene padavine pod borom so se začele hkrati s padavinami in so na začetku dogodka znašale 30 % padavin (slika 55, zgoraj). Hkrati s povečanjem premerov in hitrosti dežnih kapljic, je narastel tudi delež TF, ki je po 15 minutah od začetka dogodka (20:10) znašal 50 % padavin. Ob prisotnosti velikih premerov in hitrosti dežnih kapljic, je delež prepuščenih padavin pod borom še naprej naraščal in celo presegel količino padavin na prostem (preglednica 30, slika 55). Po tem so se premeri in hitrosti dežnih kapljic zmanjšali in obdržali velikostni razred vse do 60 minute dogodka (20:55), ko se je pojavil drugi oblak z večjimi vrednostmi. Takrat lahko opazimo hipen odziv in povečanje količine prepuščenih padavin, ki so presegle količino padavin na prostem (slika 55).

Preglednica 30: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 13. 6. 2014

Table 30: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under the Austrian pine tree in a 5-minute time step for 13 June 2014 event

Čas	Ip [mm/5min]	Dk [mm]	Vk [m/s]	TF bor [%]
20:20	1,0	1,19	4,57	49
20:25	0,4	1,21	4,76	92
20:30	0,2	0,98	4,08	123



Slika 55: Padavine in TF pod črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 13. 6. 2014

Figure 55: Rainfall and TF under the Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in 1-minute time step for 13 June 2014 event

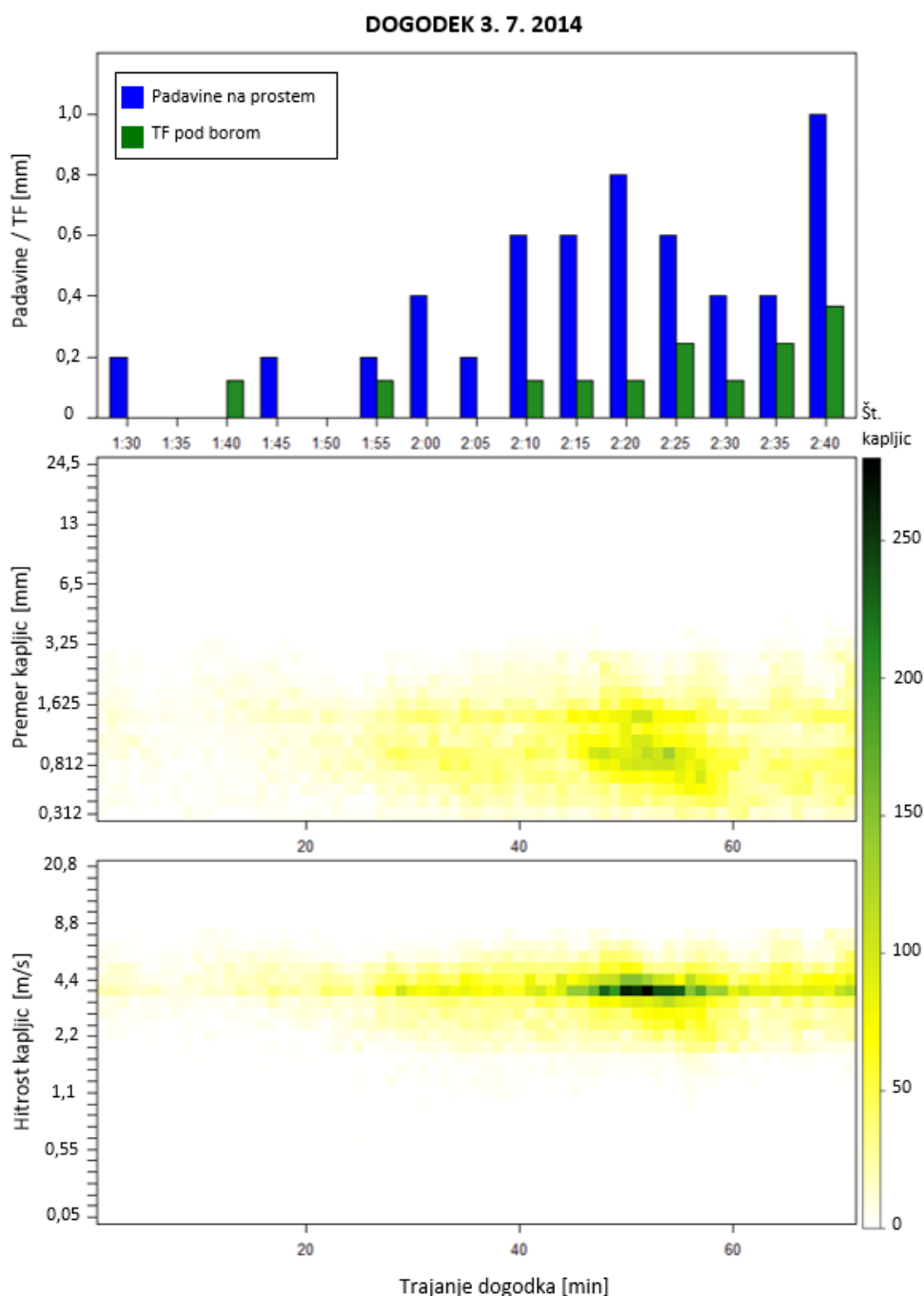
Dogodek 3. 7. 2014 se je začel postopoma, padavine pa so bile skoncentrirane v drugem delu dogodka (slika 56). V prvih 40 minutah je padlo le 32 % padavin, vendar pa so bili premeri in hitrosti kapljic dokaj raznoliki, saj so se gibali med 0,312 mm in 5,5 mm ter 0,05 m/s in 10,4 m/s. Izrazitih odstopanj v strukturi dežnih kapljic tekom dogodka nismo opazili niti v prvi, niti v drugi polovici (slika 56).

Prepuščene padavine pod borom so se začele z 10 minutnim zamikom glede na začetek padavin na prostem (slika 56 zgoraj). Vse do 55 minute dogodka (2:10), ko je število dežnih kapljic začelo naraščati, je bilo prepuščanje padavin pod borom neznatno. S povečanjem števila kapljic pa se je povečal tudi delež TF, ki je znašal največ 60 % (preglednica 31). V tem primeru količina prepuščenih padavin pod borom ni presegla količine padavin na odprtem.

Preglednica 31: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 3. 7. 2014

Table 31: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under the Austrian pine tree in a 5-minute time step for 3 July 2014 event

Čas	Ip [mm/5min]	Dk [mm]	Vk [m/s]	TF bor [%]
2:25	0,6	1,04	4,23	41
2:30	0,4	1,03	4,20	31
2:35	0,4	1,12	4,57	61



Slika 56: Padavine in TF pod črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 3. 7. 2014

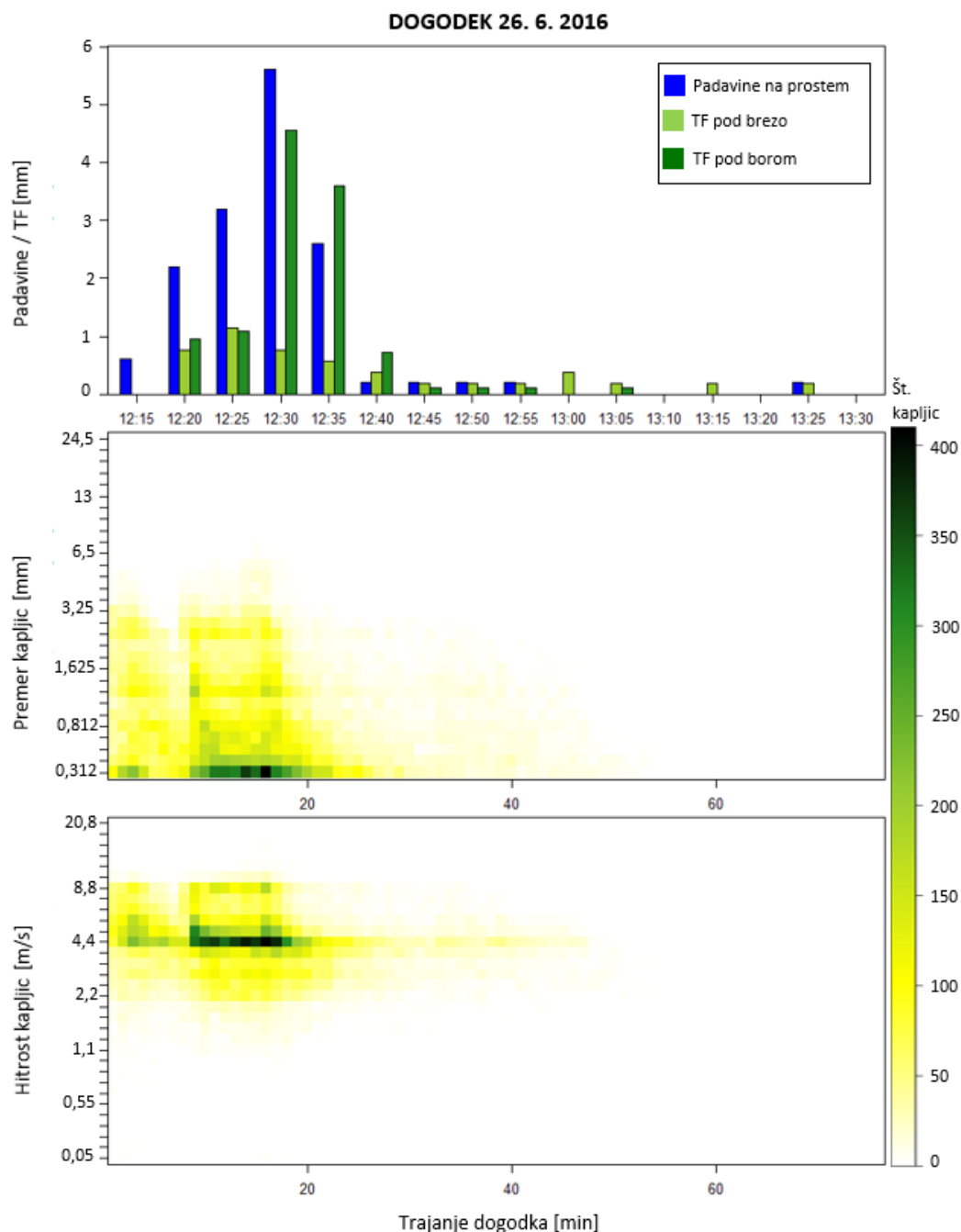
Figure 56: Rainfall and TF under the Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 3 July 2014 event

Padavine dogodka 26. 6. 2016 so bile skoncentrirane na začetku dogodka, saj je v prvih 30 minutah padlo kar 95 % vseh izmerjenih padavin. Poleg tega so bile kapljice v prvih 20 minutah večje in hitrejšje kot v nadaljevanju dogodka (slika 57). V povprečju je premer dežnih kapljic znašal 1,09 mm v prvem in 0,78 mm v drugem delu dogodka, povprečna hitrost kapljic pa je bila 4,76 m/s in 4,11 m/s v prvem in drugem delu dogodka. Dodatno povečanje premerov kapljic, ki so dosegli 9,5 mm, in hitrosti kapljic, ki so znašale vse do 15,2 m/s, pa smo zaznali še med 13 in 18 minuto dogodka (slika 57).

Konica doseženih premerov in hitrosti kapljic po 13 minuti je hipno povečala količino prepuščenih padavin pod borom (slika 57). V prvih 5 minutah (12:25 – 12:30) se je dvignila s 34 % na 81 % padavin na prostem, v nadaljnjih 5 minutah (do 12:35) pa je celo presegla količino padavin na prostem (preglednica 32). Ob tem pa za TF pod brezo nismo opazili nikakršnega vidnega odziva (slika 57). V drugem delu dogodka s pojemajočimi padavinami (po 12:40), je količina TF pod brezo ostala približno enaka in posledično presegla količino padavin na prostem.

Preglednica 32: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 26. 6. 2016
Table 32: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under Austrian pine and common silver birch trees in a 5-minute time step for 26 June 2016 event

Čas	Ip [mm/5min]	Dk [mm]	Vk [m/s]	TF bor [%]	TF breza [%]
12:30	1,12	1,10	4,37	81	14
12:35	0,52	0,94	4,11	138	22
12:40	0,04	0,77	4,11	360	190



Slika 57: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 26. 6. 2016

Figure 57: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine trees in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 26 June 2016 event

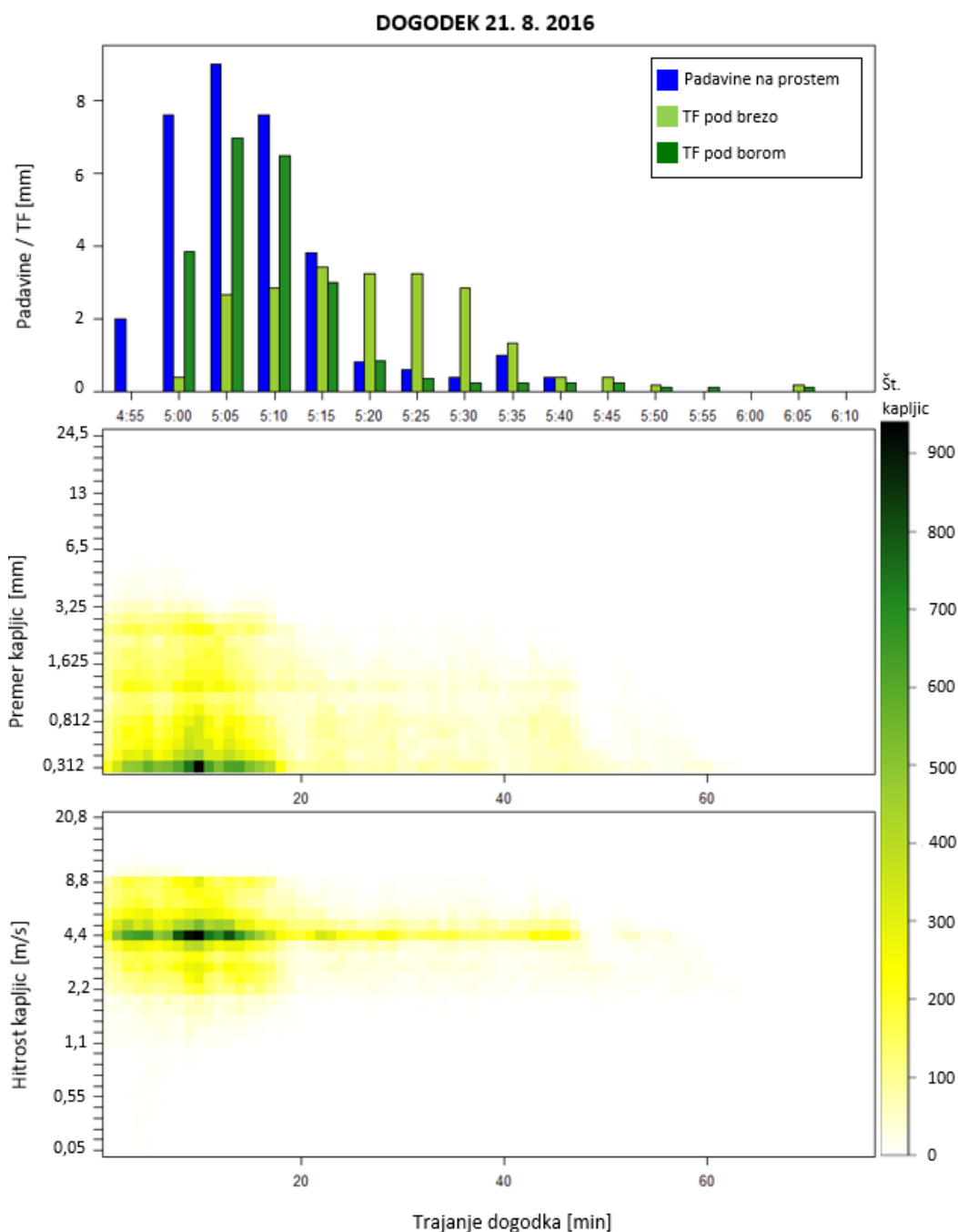
Izmed vseh izmerjenih dogodkov (preglednica 4) je bil dogodek 21. 8. 2016 najbolj intenziven. Glede na premere in hitrosti, ki so jih dosegle kapljice, ga lahko razdelimo na dva dela (slika 58). V prvih 20 minutah smo izmerili 26,2 mm padavin, kar predstavlja 78 % vseh padavin dogodka. Premer dežnih kapljic je v prvem delu dogodka v povprečju znašal 1,06 mm, kapljice pa so dosegle premere v velikosti 7,5 mm. Največja izmerjena hitrost kapljic je bila 15,2 m/s, v povprečju pa je hitrost kapljic znašala 4,73 m/s. Največje vrednosti so bile zabeležene v kratkem intervalu med 4. in 7. minuto od začetka dogodka (slika 58). V drugi polovici dogodka

so bili doseženi premeri in hitrosti manjši, v povprečju so znašali 0,75 mm in 4,17 m/s, največje izmerjene vrednosti pa so dosegle 3,75 mm in 10,4 m/s.

Prepuščene padavine pod borom so se začele s 5 minutnim zamikom glede na padavine na prostem (5:00), že takoj pa so dosegle 51 % padavin na prostem (slika 58). Tekom razvoja dogodka je količina TF naraščala, vendar ni presegla količine padavin na prostem. Prepuščene padavine pod borom so sledile trendu padavin; v prvi polovici dogodka so naraščale, v drugi polovici pa upadale (slika 58). Odziv breze na intenzivne padavine z velikimi in hitrimi kapljicami je bil počasnejši kot pri boru, saj je TF naraščal postopoma. V prvem delu dogodka (do 5:10) je tako količina TF pod brezo znašala le 5,9 mm (28 % vseh prepuščenih padavin, izmerjenih pod brezo v tem dogodku). Ne glede na to pa je količina TF pod brezo ostala nespremenjena tudi nadaljnjih 15 minut (5:15 – 5:30) v drugem delu dogodka ko je količina padavin že pričela upadati. Tako je po tem mejniku količina TF pod brezo presegla količino padavin na prostem (preglednica 33).

Preglednica 33: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 21. 8. 2016
Table 33: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under common silver birch and Austrian pine trees in a 5-minute time step for 21 August 2016 event

Čas	Ip [mm/5min]	Dk [mm]	Vk [m/s]	TF bor [%]	TF breza [%]
5:15	0,76	0,99	4,64	79	90
5:20	0,16	0,85	4,44	105	404
5:25	0,12	0,83	4,41	60	538



Slika 58: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 21. 8. 2016

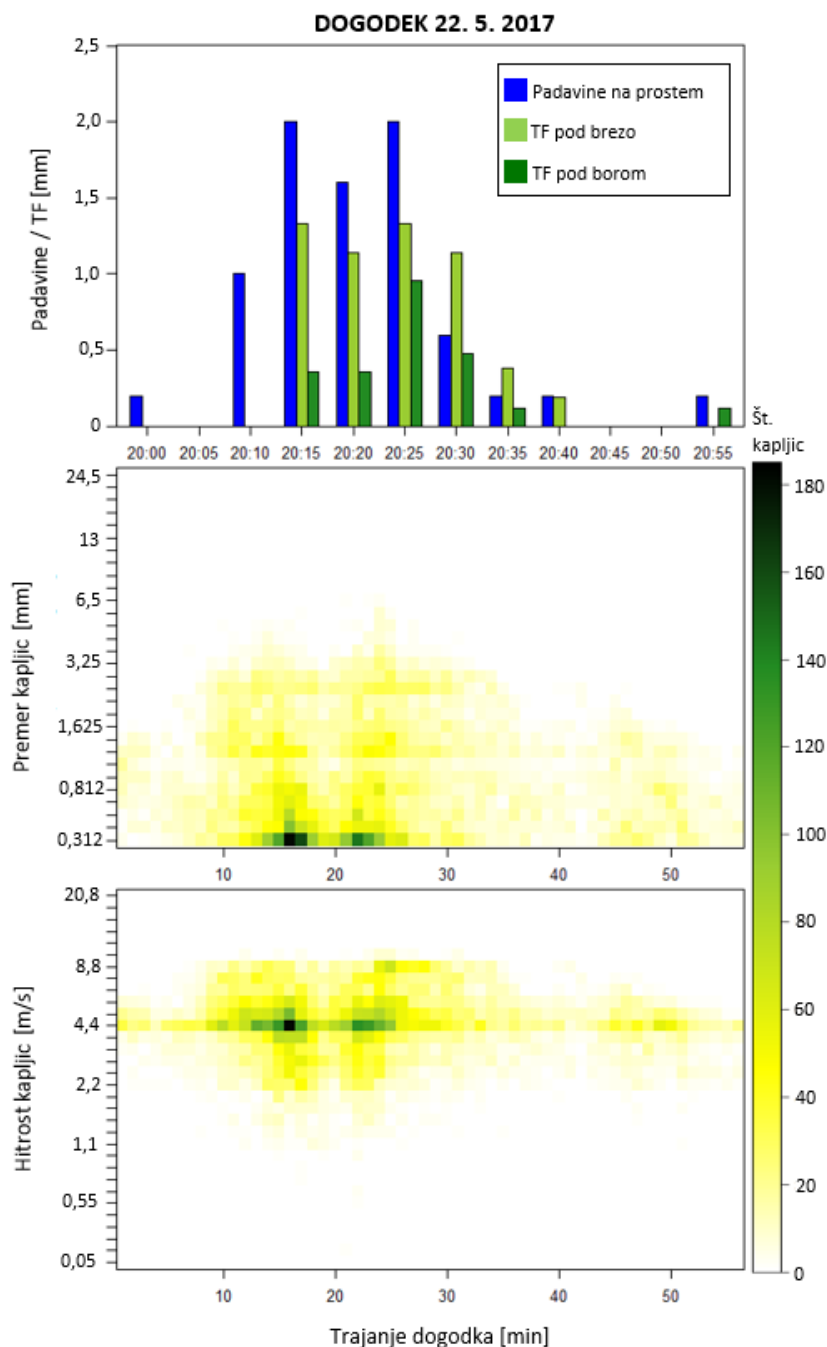
Figure 58: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine trees in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 21 August 2016 event

Izmed vseh izbranih dogodkov pa je bil tisti 22. 5. 2017 najkrajši (preglednica 29). Padavine, ki so prevladoval v sredini dogodka, so imele stalno porazdelitev padavinskih delcev (slika 59). Ta se je skladala s porazdelitvijo padavin; v prvih 10 minutah (20:00 – 20:10) je naraščala, ohranjala približno enake vrednosti do 30. minute (20:10 – 20:30) in nato upadala. Opazili pa smo tudi dva intervala povečanih premerov in hitrosti kapljic: med 13. in 17. minuto ter med 20. in 25. minuto od začetka dogodka. V teh dveh intervalih so premeri kapljic dosegli 7,5 mm, hitrosti pa 12 m/s.

Prepuščene padavine pod borom smo zabeležili po 15 minutah od začetka dogodka (20:15), ko smo opazili tudi prvi porast v premerih in hitrostih kapljic (slika 59). Že takoj je delež TF znašal 23 % padavin, po drugem intervalu večjih in hitrejših kapljic pa je njegova vrednost v sledečih 5-minutnih intervalih narasla na 48 % in 80 % (preglednica 34). Ne glede na to hipno povečanje pa TF pod borom ni presegel količine padavin na prostem (slika 59). Podobno kot pod borom smo tudi začetek prepuščanja padavin pod brezo zabeležili po prvem pojavu večjih in hitrejših kapljic (20:15). Delež TF pod brezo je takoj dosegel 67 % padavin na prostem in ostal iste vrednosti vse do precejšnega zmanjšanja padavin, velikosti in hitrosti kapljic (20:35). V tem trenutku je tudi delež TF pod brezo pričel upadati, vendar počasneje kot padavine na prostem. Posledično so bile prepuščene padavine pod brezo v tem intervalu (20:30 – 20:35) večje kot padavine na prostem (preglednica 34).

Preglednica 34: Spreminjanje intenzitete padavin, povprečnega premera in hitrosti dežnih kapljic ter deleža TF pod črnim borom in navadno brezo s 5 minutnim časovnim korakom za dogodek 22. 5. 2017
Table 34: Changes in rainfall intensity, average drop diameter and velocity and TF under Austrian pine and common silver birch trees in a 5-minute time step for 22 May 2017 event

Čas	Ip [mm/5min]	Dk [mm]	Vk [m/s]	TF bor [%]	TF breza [%]
20:25	0,4	1,26	5,04	48	67
20:30	0,12	1,35	5,34	80	67
20:35	0,04	1,11	4,94	60	190



Slika 59: Padavine in TF pod navadno brezo in črnim borom v 5-minutnih intervalih (zgornja slika) ter premer kapljic (srednja slika) in hitrost kapljic (spodnja slika) v 1-minutnih intervalih za dogodek 22. 5. 2017

Figure 59: Rainfall and TF under the common silver birch and Austrian pine tree in 5-minute time steps (upper figure), drop diameter (middle figure) and drop velocity (bottom figure) in a 1-minute time step for 22 May 2017 event

5.3.1 Razprava

Delež TF pod brezo za vseh pet izbranih dogodkov (preglednica 29) je bil manjši od povprečne vrednosti vseh meritev (74 %), medtem ko je bil delež TF pod borom za dogodka 26. 6. 2016 in 21. 8. 2016 večji od povprečja (53 %), v preostalih dogodkih pa prav tako nižji. Ta dva dogodka sta imela izmed vseh največjo intenziteto, za katero so tudi v drugih raziskavah poročali, da povečuje prepuščanje padavin (Bellot in Escarre, 1998; Xiao in sod., 2000; Toba and Ohta, 2005; Staelens in sod., 2008; Van Stan in sod., 2016; Kermavnar and Vilhar, 2017).

Poleg tega je bila večina padavin skoncentrirana na začetku teh dveh dogodkov, kar vpliva na hitrejšo zasičenost drevesne krošnje. Čeprav se odtok in kapljanje s krošnje začeta že pred njeno popolno zasičenostjo (Klaassen in sod., 1998), se po tem še povečata, kar vodi v večje prepuščanje padavin v nadaljevanju dogodka (Andre in sod., 2008).

Podrobna analiza mikrostrukture padavin na ravni dogodka kaže, da pojavljanje kapljic z večjimi premeri in hitrostmi spodbudi spremembe v TF pod borom (slike 55 - 59), kar potrjuje prvo hipotezo. Da je prepuščanje padavin večje pri kapljicah z večjimi premeri, je poročal tudi Calder (1996a, 1996b). V primeru dogodkov 26. 6. 2016 in 22. 5. 2017 smo 5-minutno povečanje premerov in hitrosti kapljic zabeležili več kot 10 minut po začetku dogodka. To je vplivalo na povečanje deleža TF pod borom za 57 % (preglednica 32) in 32 % (preglednica 34) za posamezni dogodek v tem vrstnem redu. Povečanje mikrostrukture padavin tekom dogodka 21. 8. 2016 smo opazili prej, med 4. in 7. minuto od začetka dogodka, kar je povzročilo povečanje TF za 26 % (preglednica 33). Daljši 10-minutni interval večjih in hitrejših kapljic 5 minut po začetku dogodka pa smo zabeležili za dogodek 13. 6. 2014, pri katerem je to vplivalo na dvig TF za 29 %. Vpliva spremembe mikrostrukture padavin na TF pod brezo pa v podrobnejši analizi nismo zasledili, s čimer smo potrdili drugo hipotezo.

Analiza dogodkov 3. 7. 2014 in 22. 5. 2017 kaže, da povečanje premerov in hitrosti kapljic lahko spodbudi začetek prepuščanja padavin pod obema drevesnima vrstama. Prepuščanje padavin pod brezo in borom se je 26. 6. 2016 začelo 5 minut po začetku dogodka, ko je padlo 2 mm padavin. V primeru dogodka 21. 8. 2016 se je TF pod borom začel po 4 minutah, v katerih je zapadlo 3 mm padavin, pod brezo pa po 7 minutah in 7,8 mm padlih padavin. V primerjavi s temi dogodki pa se je 3. 7. 2014 TF pod borom začel šele po 40 minutah od začetka dogodka, 22. 5. 2017 pa po 12 minutah pod brezo in po 14 minutah pod borom. Začetek TF se pri obeh dogodkih ujema s prvo zabeleženo konico premerov in hitrosti kapljic (slike 56 in 59). Količina padavin, ki je bila potrebna za začetek TF v teh dveh primerih, je znašala le 1,2 mm za brezo in 1,8 mm za bor pri obeh dogodkih. O podobnem pojavu začetka TF hkrati s povečanjem premera kapljic je poročal tudi Nanko s sodelavci (2006).

Trajanje in razporeditev padavin dogodkov 13. 6. 2014, 26. 6. 2016 in 21. 8. 2016 sta podobna, saj so bili dogodki dolgi 75, 69 in 71 minut, večina padavin pa je padla v prvih 20 minutah. Vendar pa se dogodki razlikujejo po količini padavin, saj je 13. 6. 2014 padlo 10,2 mm, 26. 6. 2016 15,2 mm, in 21. 8. 2016 33,4 mm padavin. Po pojavu večjih in hitrejših dežnih kapljic se je delež TF pod borom v hipu povečal, 13. 6. 2014 in 26. 6. 2016 pa je celo presegel količino padavin na odprtem (slike 55 in 57). To je lahko posledica zamika v pojavu konice mikrostrukture kapljic in količine padavin, ki je do takrat padla. Za dogodek 21. 8. 2016, pri katerem TF ni presegel količine padavin na odprtem, smo porast v premeru in hitrosti kapljic zabeležili 4 minute po začetku dogodka, ko je padlo 2 mm padavin in drevesna krošnja še ni bila povsem zasičena. Ocenili smo namreč, da je skladiščna zmogljivost drevesne krošnje bora v obdobju vegetacije enaka 2,9 mm (preglednica 15), kar je podobno skladiščni zmogljivosti ostalih iglastih dreves, v drugih študijah ocenjene na 2,7 mm za rdeči bor (Llorens in Gallart, 2000) in 2,8 mm za smreko sitko (Hutchings in sod., 1988). Dvig vrednosti v spektru kapljic smo za dogodek 13. 6. 2014 zabeležili po 15 minutah, ko je padlo 4,6 mm padavin, za dogodek 26. 6. 2016 pa po 13 minutah, ko je padlo 6 mm padavin. V tem času pa je bila skladiščna zmogljivost krošnje že zapolnjena. Pojav večjih in hitrejših dežnih kapljic spodbuja vibracije drevesne krošnje (Nanko in sod., 2006), ki so podobne tistim, ki jih povzroča veter in ki pospešijo kapljanje prestreženih padavin ter znatno povečajo delež TF (Xiao in sod., 2000; Nanko in sod., 2004; Nanko in sod., 2006; Andre in sod., 2008).

Za vsakega izmed obravnavanih dogodkov (preglednica 29) je porast v premeru in hitrosti kapljic spodbudil prepuščanje padavin pod borom, česar pa nismo opazili za primer breze (preglednice 30, 31 in 34). Prepuščanje padavin pod brezo je tekom vseh treh dogodkov ohranjalo svoj delež od začetka, pa tudi po tem, ko so padavine pričele pojenjati (slike 57 – 59). V tem trenutku je TF pod brezo presegel količino padavin na prostem. Posledično lahko

sklepamo, da je bilo večji delež TF v tem delu dogodka posledica zasičenosti krošnje in ne sprememb v spektru kapljic. Različna odziva prepuščanja padavin pod brezo in borom sta najverjetneje posledica različnih vegetacijskih lastnosti obravnavanih drevesnih vrst. Listavci, kot je na primer hrast (*Quercus acutissima*), imajo večjo listno zadrževalno površino za vodo kot iglasta drevesa (Nanko in sod., 2006). Poleg tega so raziskovalci izmerili, da je skladiščna zmogljivost listja večja v primeru večjih dežnih kapljic, kot pa v primeru majhnih (Keim in sod., 2006; Bassette in Bussiere, 2008). Tako navadna breza kot listnato drevo na listih zadrži večje kapljice, medtem ko se odziv bora na povečane premere kapljic kaže v povečanem TF. Poleg tega pa na večji TF vpliva tudi večji naklon vej (Van Elewijck, 1989). Veje v krošnji breze so usmerjene navzgor, medtem ko se veje bora nagibajo proti tlom (preglednica 21). Lastnosti vej in debla so namreč prav tako pomembne, saj je njihova specifična zadrževalna kapaciteta vode do šestkrat večja kot zadrževalna kapaciteta iglic (Llorens in Gallart, 2000).

5.4 Vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na delitev padavin

Ko padavine pridejo v stik z vegetacijo, se delijo na tri komponente: prestrežene padavine (I), prepuščene padavine (TF) in odtok po deblu (SF). Kolikšni so deleži posameznih komponent pa je odvisno od meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk (Crockford in Richardson, 2000). Za določitev spremenljivke z največjim vplivom na delitev padavin so raziskovalci do sedaj že uporabili različne metode: multipla regresijska analiza (Staelens in sod., 2008; Van Stan in sod., 2014; Schooling in Carlyle-Moses, 2015), odločitvena drevesa (Šraj in sod., 2008a; Štravs in sod., 2008), posplošena ojačana regresijska drevesa (Tanaka in sod., 2015; Nanko in sod., 2016), metoda glavnih komponent (Siegert in Levia, 2014) in multipla korespondenčna analiza (Van Stan in sod., 2016). Vsaka uporaba nove ali že uporabljene metode na novi lokaciji ali za druge drevesne vrste predstavlja pomemben doprinos k tvorjenju celostne slike vplivov različnih spremenljivk na delitev padavin (Van Stan in sod., 2016).

Vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu smo za obe drevesni vrsti analizirali z različnimi metodami. Metode, ki smo jih uporabili, so multipla linearna regresijska analiza (MRA), regresijska drevesa (RT), posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT), metoda glavnih komponent (PCA) in multipla korespondenčna analiza (MCA). Pri tem smo upoštevali meteorološke in vegetacijske spremenljivke (preglednica 3). Rezultate smo primerjali po posameznih drevesnih vrstah, po komponentah delitve padavin in glede na uporabljeno metodo.

Za analizo vpliva spremenljivk na komponente prestrezanja padavin smo upoštevali 180 dogodkov (preglednica 26), za katere smo imeli na voljo popolne podatke z vseh merilnikov (dežemer, korita in lijakasti merilniki pod drevesom, odtok po deblu, disdrometer in podatki s postaje Ljubljana Bežigrad). Vrednosti nekaterih meteoroloških spremenljivk (f , T , V_s , V_h) so bile izmerjene na postaji Ljubljana Bežigrad, zato morda niso povsem reprezentativne na raziskovalni ploskvi. Vlaga in temperatura zraka se ne spreminjata znatno med bližnjimi lokacijami z isto nadmorsko višino. Zaradi urbanega okolja pa bi bila mogoča odstopanja v izmerjenih lastnostih vetra, ki smo jih vseeno upoštevali kot splošna pokazatelja vremenskega stanja. Vpliv smeri in hitrosti vetra zaradi bližine stavb pa smo izključili s primerjavo izmerjenih padavin na prostem in tik ob stavbi (slika 30). V obdobju vegetacije smo izmerili več dogodkov kot v obdobju mirovanja, tudi zaradi izključitve snežnih padavin. Ker smo v analizah za celotno obdobje meritev upoštevali vse dogodke skupaj, so rezultati lahko bolj odvisni od dogodkov iz obdobja vegetacije in so jim posledično lahko tudi dokaj podobni. Kljub temu smo analize izvedli za vsa tri definirana obdobja, saj to omogoča primerjavo z drugimi študijami, v katerih raziskovalci meritve pogosto analizirajo skupaj ne glede na fenofazo.

Rezultati multiple linearne regresijske analize so se izkazali za nezanesljive zaradi majhnih vrednosti prilagojenega koeficienta determinacije modela. Poleg tega so vrednosti koeficientov neodvisnih spremenljivk prikazovali nesmiselne povezave med njimi, kot na primer negativno korelacijo med velikostjo in hitrostjo dežnih kapljic. Spekter hitrosti dežnih kapljic je namreč v

veliki meri odvisen prav od velikostnega spektra dežnih kapljic. Gunn in Kinzer (1949) sta namreč pokazala, da je hitrost kapljic s premerom manjšim od 0,3 mm linearno odvisna od premera kapljic, med tem ko za večje kapljice velja korenska funkcija med njihovo hitrostjo in velikostjo. Zato smo rezultate te metode iz nadaljnje analize izločili.

5.4.1 Regresijska drevesa (RT)

Z regresijskimi drevesi na pregleden način razvrstimo dogodke po ciljnem parametru glede na najbolj vplivne spremenljivke. Podatke smo razdelili na testni set, v katerega smo vključili 75 % dogodkov in set za treniranje modela, ki je vseboval preostalih 25 % dogodkov. Za prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu smo za brezo in za bor izrisali regresijska drevesa po posameznih fenofazah (obdobje vegetacije, obdobje mirovanja in vse – celotno obdobje meritev). Obdobje olistanja in odpadanja listja oziroma iglic nismo upoštevali zaradi premajhnega števila dogodkov. Vsa regresijska drevesa so prikazana v prilogi C. Meteorološke spremenljivke, ki vplivajo na prestrezanje padavin, se razlikujejo glede na drevesno vrsto (preglednica 35).

Preglednica 35: Spremenljivke z največjim vplivom glede na rezultate regresijskih dreves (RT)

Table 35: Most influential variables according to the RT results

Drevo	Fenofaza	I		TF		SF	
		Koren (vrednost delitve)	Vozlišče prvega nivoja	Koren (vrednost delitve)	Vozlišče prvega nivoja	Koren (vrednost delitve)	Vozlišče prvega nivoja
Navadna breza	Obdobje vegetacije	Tp (6,7 h)	Kp Št	Kp (4,0 mm)	Vh	Kp (10,7 mm)	Št Vh
	Obdobje mirovanja	Ip (0,5 mm/h)	Vk	f (88 %)	MVD	Št (210826)	Kp
	Vse	Št (311.365)	Kp	Kp (3,6 mm)	T Vh	Kp (10,8 mm)	Tp f
Črni bor	Obdobje vegetacije	Kp (1,1 mm)	Kp	Kp (14,4 mm)	Kp MVD	Kp (12,7 mm)	Kp T
	Obdobje mirovanja	Ip (0,7 mm/h)	Dk	Št (78331)	f Vh	Kp (8,7 mm)	Ip
	Vse	Kp (14,1 mm)	Ip Kp	Kp (10,1 mm)	Kp T	Kp (13,1 mm)	Kp

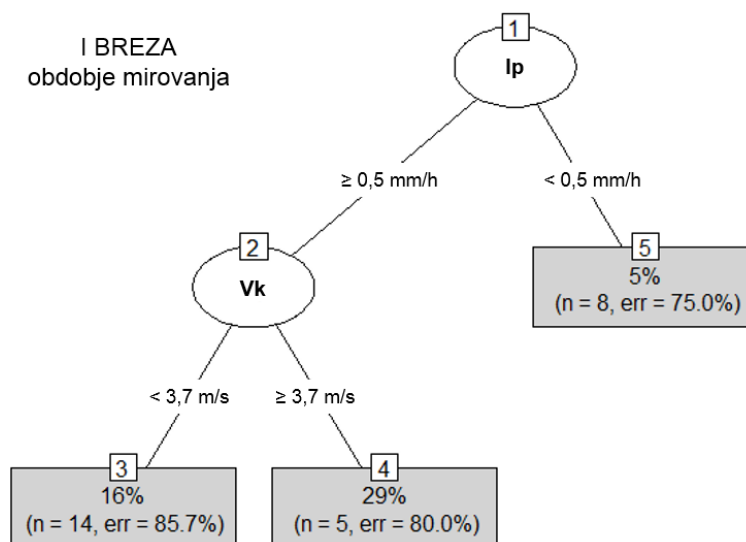
Prestrežene padavine (I)

Iz rezultatov regresijskih dreves je razvidno, da je v celotnem obdobju meritev na prestrezanje padavin v primeru breze najbolj vplivalo število dežnih kapljic. Ko je bilo število kapljic večje od 311365, je bilo prestrezanje padavin v povprečju manjše za 26 %. V primeru dogodkov z manjšim številom dežnih kapljic so šibkejšje padavine povečale prestrezanje. Na prestrezanje padavin bora pa je najbolj vplivala količina padavin z mejno vrednostjo 1,1 mm. Manjše količine padavin so bile namreč v celoti prestrežene. Pri padavinskih dogodkih s padavinami med 1,1 mm in 14,1 mm pa je bil pomemben tudi vpliv premera dežnih kapljic z mejno vrednostjo 0,57 mm, saj so povprečno manjše dežne kapljice povečale prestrezanje padavin.

V obdobju vegetacije je na prestrezanje padavin pri brezi najbolj vplivalo trajanje padavin (preglednica 35). Dogodki, daljši od 400 minut (6,7 ur), so v povprečju prestregli manj (31 % padavin na prostem) kot krajši dogodki (50 % padavin na prostem). Za drugo najbolj vplivno spremenljivko se je izkazala količina padavin (mejna vrednost 6,3 mm), za tretjo pa število kapljic (mejna vrednost 59203) (priloga C). Podobno kot v celotnem obdobju merjenja je bilo

prestrezanje bora tudi v obdobju vegetacije najbolj odvisno od količine padavin z mejno vrednostjo 1,1 mm. Manjše količine padavin so bile v celoti prestrežene, na delež prestrezanja v primeru večjih količin pa sta pomembneje vplivala še intenziteta padavin in MVD (priloga C). Prestrezanje padavin se je zmanjševalo z večanjem MVD in z večjimi intenzitetami.

V obdobju mirovanja je v primeru obeh dreves na prestrezanje padavin najbolj vplivala intenziteta padavin (slika 60). V primeru breze je mejna vrednost znašala 0,5 mm/h, v primeru bora pa 0,7 mm/h (preglednica 35). Ko je bila intenziteta padavin manjša od mejnih vrednosti, je bilo prestrezanje padavin večje in je v primeru breze v povprečju znašalo 37 % padavin na prostem, v primeru bora pa 79 %.

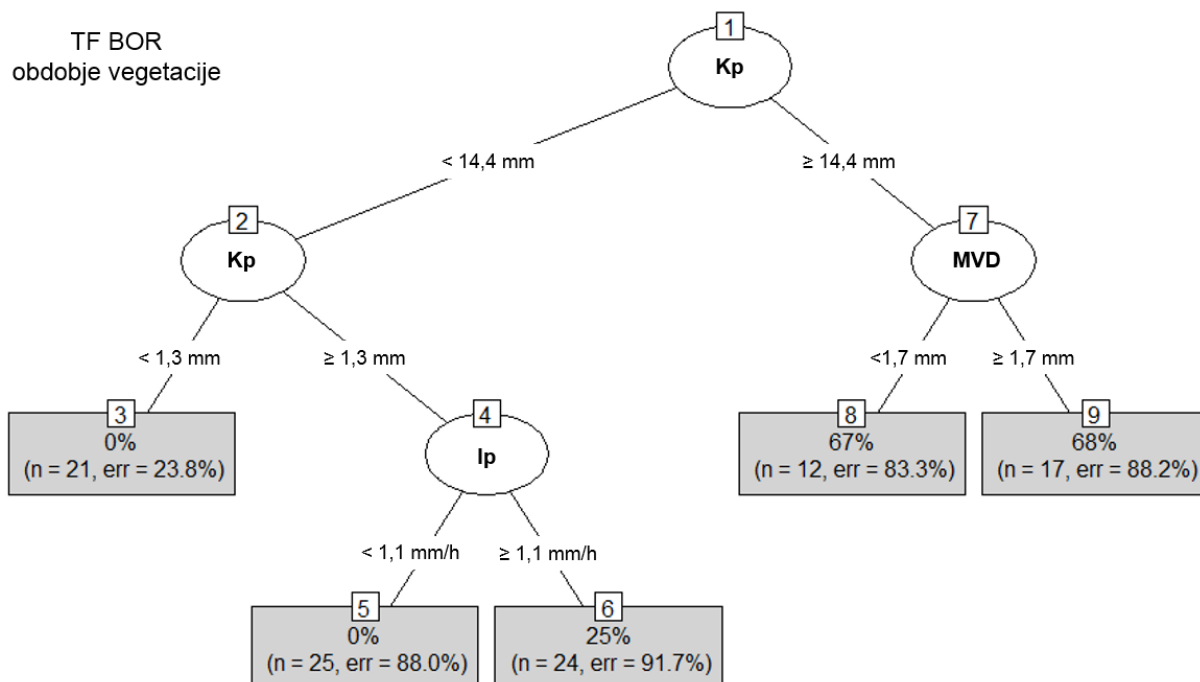


Slika 60: Primer regresijskega drevesa prestreženih padavin navadne breze v obdobju mirovanja
Figure 60: An example of the regression tree for rainfall interception by the common silver birch tree in the dormant period

Prepuščene padavine (TF)

Metoda regresijskega drevesa je pokazala, da je bil delež prepuščenih padavin v celotnem obdobju merjenja v primeru obeh dreves najbolj odvisen od količine padavin (preglednica 35). Delež TF pod brezo je bil v povprečju manjši (41 % padavin) pri dogodkih z manjšimi količinami padavin, nanj pa je vplivala tudi temperatura. Pri padavinah, večjih od 3,6 mm, so večje hitrosti vetra zmanjševale TF pod brezo. Tudi v primeru bora je večja količina padavin povečevala TF, poleg tega pa se je prepuščanje padavin začelo šele, ko je zapadlo vsaj 1,3 mm padavin.

Količina padavin je bila najbolj vplivna spremenljivka na prepuščanje padavin za obe drevesi tudi v obdobju vegetacije (priloga C). Mejna vrednost padavin, pri kateri se je TF pod brezo začel, je bila v tem obdobju večja (4 mm) kot na splošno v celotnem obdobju merjenja (3,6 mm). Naslednja pomembna spremenljivka pa je bila hitrost vetra; manjše hitrosti so povečevale delež TF. Tudi v primeru bora je bila mejna vrednost količine padavin v obdobju vegetacije večja (14,4 mm) kot v celotnem obdobju meritev (10,1 mm), vendar pa je bila potrebna količina padavin za začetek TF enaka (1,3 mm). Dodatno pa je ob bolj obilnih padavinah na TF vplival še MVD. Izmerjene vrednosti TF pod borom so z večanjem vrednosti MVD naraščale (slika 61).



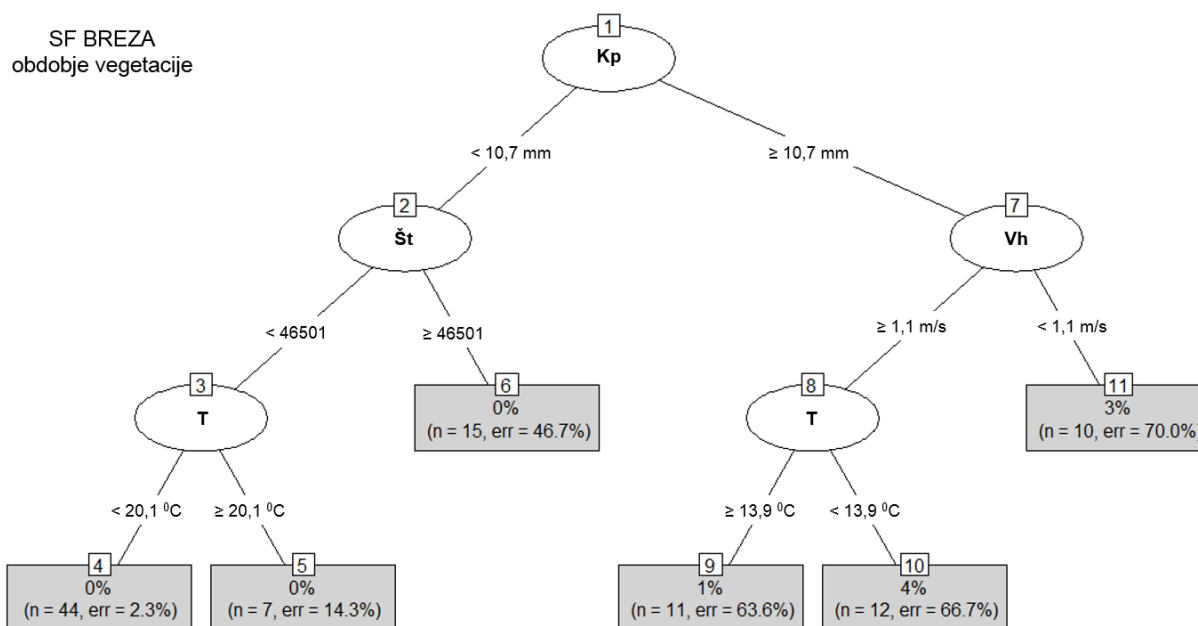
Slika 61: Primer regresijskega drevesa TF črnega bora v obdobju vegetacije
Figure 61: An example of the regression tree for TF under the Austrian pine tree in the vegetation period

V obdobju mirovanja sta na delež TF pod brezo najbolj vplivala vlaga v zraku in MVD. Če je bila vlažnost zraka manjša od 88 %, je delež TF v povprečju znašal 49 % padavin, pri večjih vlažnostih pa je bil večji (v povprečju 80 % padavin), nanj pa je dodatno vplival še MVD (priloga C). Manjše vrednosti MVD so povečevale delež TF. Za prepuščanje padavin pod borom pa je bila najbolj vplivna spremenljivka v obdobju mirovanja število kapljic. Večje število kapljic je povečalo povprečne vrednosti deleža TF, ki so v tem primeru znašale 49 % padavin na prostem. Pri manjšem številu dežnih kapljic pa je bila pomembna tudi vlažnost zraka s podobno mejno vrednostjo kot v primeru breze (90 %). Tudi v primeru bora je večja vlažnost zraka vplivala na povečanje deleža TF.

Odtok po deblu (SF)

Rezultati regresijskih dreves so pokazali, da je na odtok po deblu najbolj vplivala količina padavin, ki je bila določena za izhodiščno spremenljivko RT pri obeh drevesih v obdobju vegetacije in mirovanja, razen za primer breze v obdobju mirovanja (preglednica 35). V primeru bora se je SF v celotnem obdobju meritev pričel pri 13,1 mm padavin, v primeru breze pa pri 10,8 mm. Pri dogodkih z večjo količino padavin je SF pri brezi v povprečju na dogodek znašal 4 % padavin, nanj pa je izdatno vplivala vlažnost zraka, saj je bil odtok po deblu pri vlažnosti nad 95 % večji.

V obdobju vegetacije je bilo za začetek SF potrebnih 10,7 mm padavin pri brezi in 12,7 mm padavin pri boru. Največji deleži SF pri brezi v obdobju vegetacije (v povprečju 4,5 % padavin) so bili pogojeni s padavinami, večjimi od 10,7 mm in hitrostmi vetra, manjšimi od 1,1 m/s (slika 62). V primeru bora pa je bil SF v tem obdobju največji (v povprečju 0,1 % padavin) pri padavinah, večjih od 12,7 mm in temperaturah zraka, višjih od 15,7 °C.



Slika 62: Primer regresijskega drevesa SF navadne breze v obdobju vegetacije
Figure 62: An example of the regression tree for SF under the common silver birch tree in the vegetation period

Odtok po deblu se je pri brezi v obdobju mirovanja začel že pri 3 mm padavin, vendar pa je nanj kljub temu bolj kot količina padavin vplivalo število kapljic. Ko je bilo število kapljic celotnega dogodka večje od 210826, so bile povprečne dosežene vrednosti deleža SF enake kar 7 % padavin na prostem. V primeru bora pa je bila tudi v tem obdobju najbolj vplivna spremenljivka količina padavin; za začetek SF je bilo potrebnih vsaj 8,7 mm (priloga C).

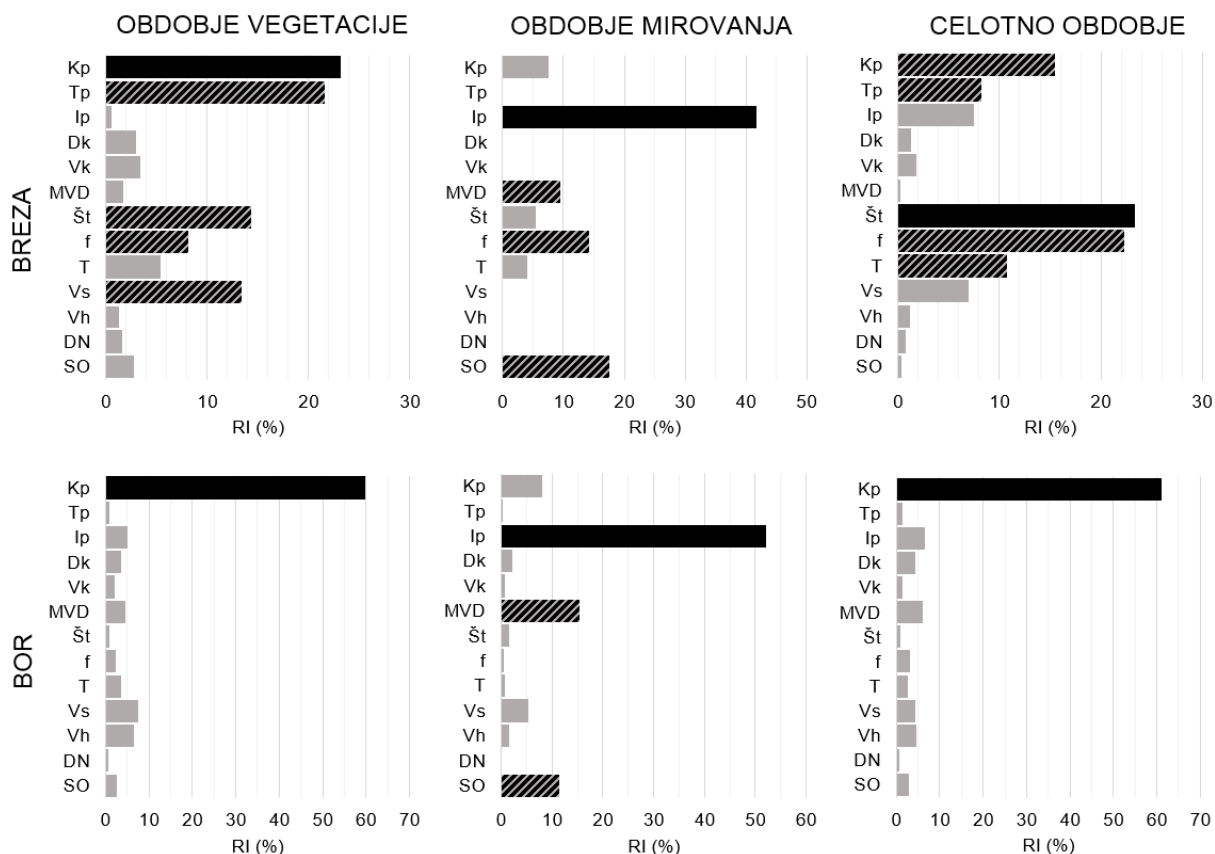
5.4.2 Posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT)

Metoda BRT temelji na metodi regresijskih dreves, ki pa jih s ponavljanjem ojačamo (ang. *boosted*). Tako smo v tem procesu ustvarili 1500 regresijskih dreves, pri katerih se po postopku strojnega učenja izpostavijo najbolj vplivne spremenljivke. Podatke smo razdelili na testni set, v katerega smo vključili podatke 75 % dogodkov in set za treniranje modela, ki je vseboval podatke preostalih 25 % dogodkov. Rezultat metode so vrednosti relativnega vpliva (ang. *relative influence*, RI) za vsako spremenljivko, ki opisujejo, kakšen vpliv ima neodvisna spremenljivka na odvisno spremenljivko. Večja vrednost RI nakazuje na večji vpliv odvisne spremenljivke.

Prestrežene padavine (I)

Rezultati BRT modelov so v primeru prestrezanja padavin bora izpostavili le eno spremenljivko z izrazito največjim vplivom, medtem ko ima več spremenljivk vidnejši vpliv na prestrezanje padavin pri brezi (slika 63). Prestrezanje padavin bora tekom celega leta in v obdobju vegetacije je bilo najbolj odvisno od količine padavin. V obdobju mirovanja pa je imela največji vpliv intenziteta padavin, vrednosti RI večje od 10 % pa v tem obdobju nakazujejo še na nezanemarljiv vpliv MVD in trajanja suhega obdobja.

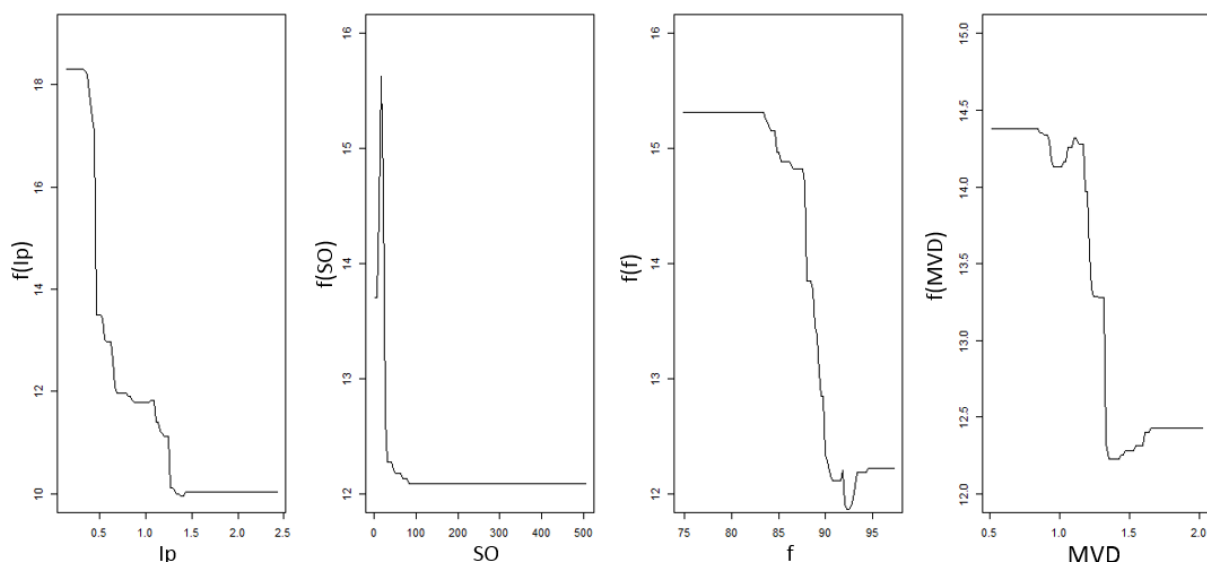
Tekom celotnega obdobja meritev so na prestrezanje padavin breze najbolj vplivali število kapljic, vlažnost zraka in količina padavin (slika 63). V obdobju vegetacije so imeli največji vpliv količina padavin in njihovo trajanje ter število kapljic. V obdobju mirovanja pa je imela največji vpliv intenziteta padavin, medtem ko sta bila vlažnost zraka in trajanje suhega obdobja z manjšimi vrednostmi RI manj vplivna (slika 63).



Slika 63: RI meteoroloških spremenljivk na *I* (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI)

Figure 63: RI of meteorological variables for *I* (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion)

BREZA



Slika 64: Primer grafa delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na prestrezanje padavin navadne breze v obdobju mirovanja glede na BRT

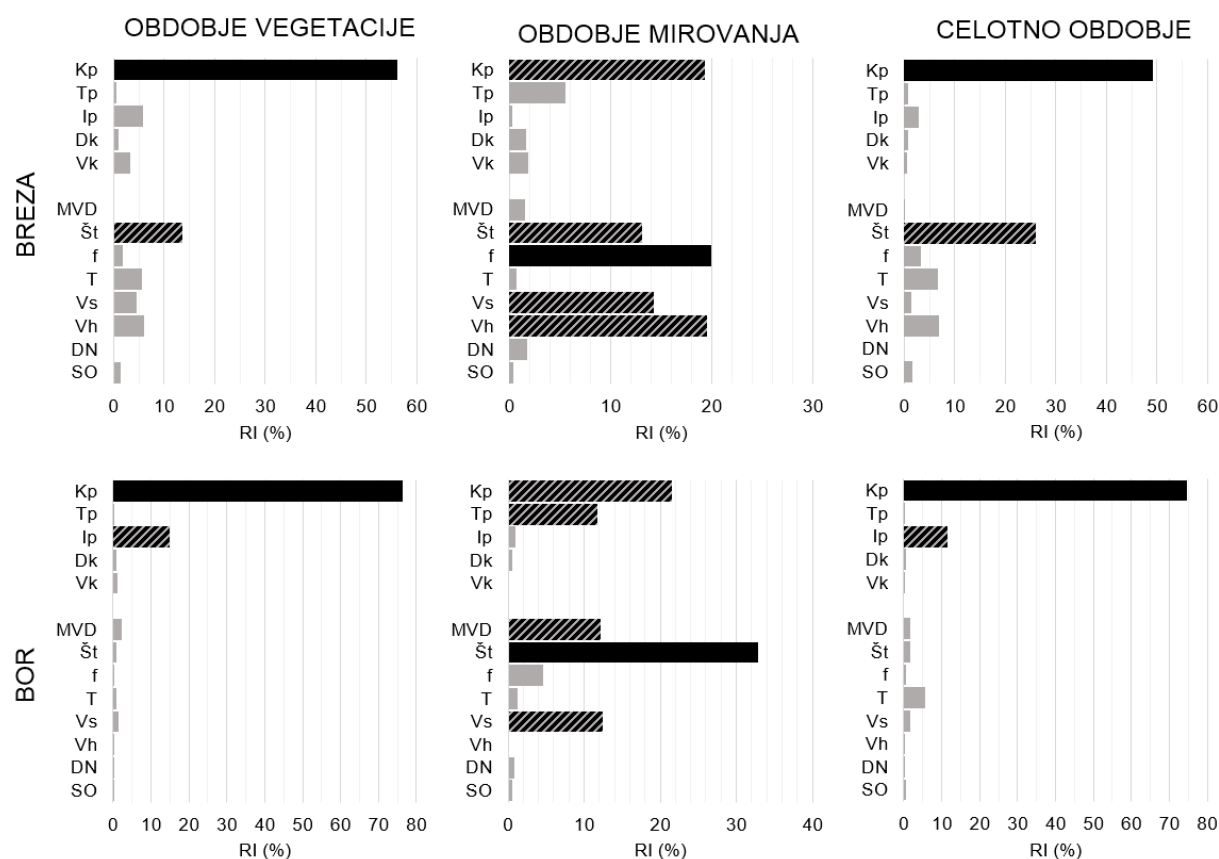
Figure 64: An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on interception loss for common silver birch in the dormant period according to the BRT

Vpliv posameznih spremenljivk, ki so se po rezultatih BRT izkazale za najbolj vplivne na prestrezanje padavin v posameznih fenofazah, smo prikazali še na grafih delne odvisnosti (priloga D). Z njimi lahko ovrednotimo še spreminjanje ciljne spremenljivke glede na vrednosti

vplivne spremenljivke. Tako v obdobju vegetacije kot v celotnem obdobju meritev se prestrezanje padavin breze zmanjšuje s številom kapljic do približno 200.000 kapljic in s količino padavin do 30 mm; po teh vrednostih se delež prestrezanja padavin stabilizira. Prestrezanje padavin bora se prav tako zmanjšuje s količino padavin vendar do nižjih vrednosti kot v primeru breze, do 25 mm. Prestrezanje padavin breze se zmanjšuje do konstantne vrednosti tudi s trajanjem padavin v obdobju vegetacije do 18 ur, v celotnem obdobju meritev pa do 20 ur. Tudi povečevanje vlažnosti zraka do 90 % vpliva na zmanjševanje prestrezanje padavin v vseh treh obravnavanih obdobjih (slika 64). V celotnem obdobju meritev je prestrezanje padavin manjše pri temperaturah, nižjih od 15 °C, pri višjih temperaturah zraka pa se povečuje. V obdobju mirovanja se prestrezanje padavin breze in bora zmanjšuje z dolžino trajanja suhega obdobja med dogodki do 50 ur, po daljšem obdobju pa ta nima več vpliva (slika 64). Z večanjem MVD se v obdobju mirovanja prestrezanje padavin breze in bora zmanjšuje do vrednosti pri 3 mm, pri kateri se zmanjševanje umiri.

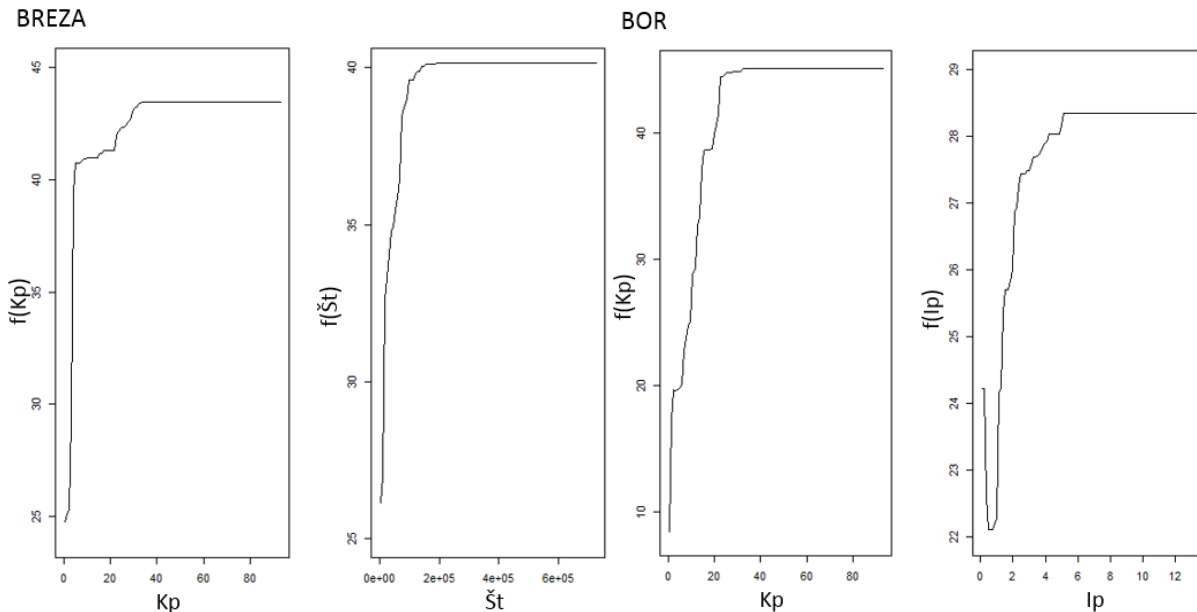
Prepuščene padavine (TF)

BRT modeli so pokazali, da je bila v primeru prepuščanja padavin v celotnem obdobju meritev in v obdobju vegetacije pod obema drevesoma prevladujoča vplivna spremenljivka količina padavin (slika 65). V teh dveh obdobjih je na TF pod borom vplivala tudi intenziteta padavin, pod brezo pa število dežnih kapljic. V obdobju mirovanja vpliv nobene posamezne spremenljivke ni bil tako izstopajoč. Prepuščanje padavin pod borom je bilo odvisno predvsem od števila kapljic, količine padavin in smeri vetra. Vlažnost zraka, količina padavin in hitrost vetra pa so skoraj enakovredno vplivali na TF v primeru breze.



Slika 65: RI meteoroloških spremenljivk na TF (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI)

Figure 65: RI of meteorological variables for TF (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion)



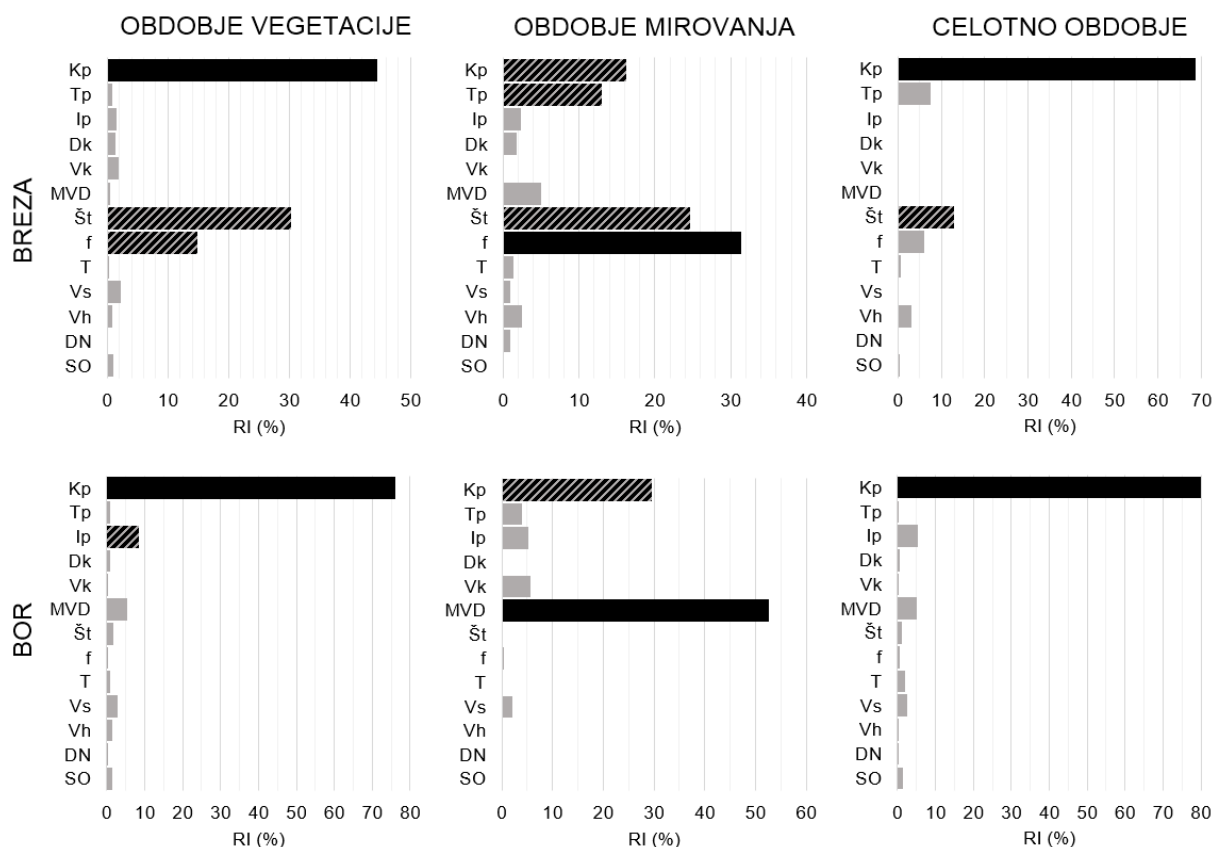
Slika 66: Primeri grafov delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na TF navadne breze in črnega bora v obdobju celega leta glede na BRT

Figure 66: An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on TF for common silver birch and Austrian pine trees for the whole year according to the BRT

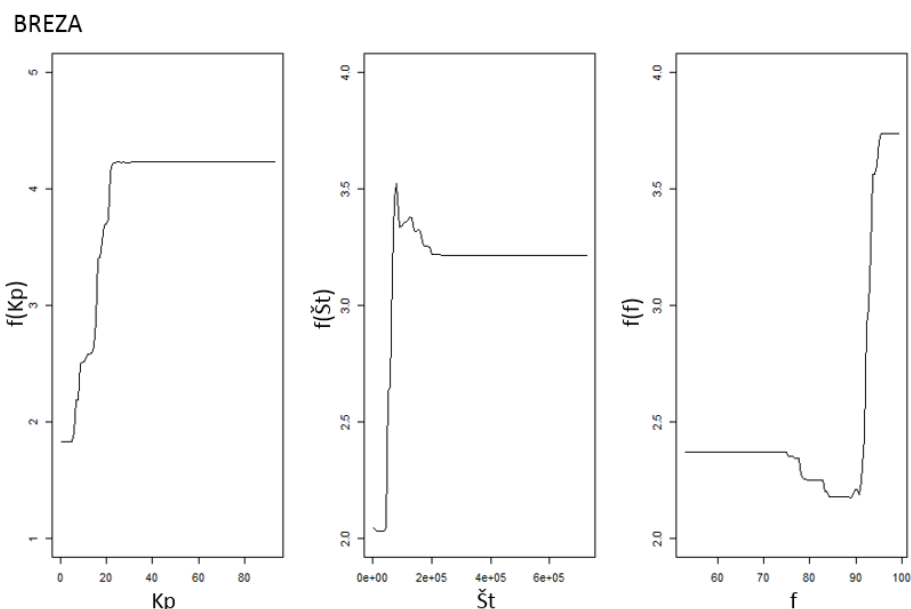
Grafi delne odvisnosti za najbolj vplivne spremenljivke za prepuščene padavine (priloga D) kažejo, da delež TF v primeru obeh drevesnih vrst narašča s količino padavin, vendar pa so vrednosti, pri kateri se naraščanje preneha, različne: za obe drevesi znašajo 35 mm v obdobju celotnih meritev (slika 66) in 30 mm v obdobju vegetacije, v obdobju mirovanja pa so za bor enake 30 mm, za brezo pa 20 mm padavin. V vseh obravnavanih primerih, ko se je kot spremenljivka z večjim vplivom izkazalo tudi število dežnih kapljic, je prepuščanje padavin z večjim številom kapljic naraščalo vse do števila 200.000 kapljic. Zanimivo se vpliv intenzitete padavin na TF pod borom razlikuje, saj v celotnem obdobju meritev TF upada za intenzitete do 1 mm/h in narašča za intenzitete do 5 mm/h (slika 66), med tem ko v obdobju vegetacije konstantno narašča do intenzitete 5 mm/h. V obdobju mirovanja na TF pod borom vpliva še MVD (za vrednosti med 1 mm in 1,5 mm TF narašča), na TF pod brezo pa v tem obdobju vplivata še vlažnost zraka (do 95 % vlažnosti zraka TF narašča) in hitrost vetra (do hitrosti vetra 1,7 m/s se TF zmanjšuje).

Odtok po deblu (SF)

Rezultati BRT modela so izpostavili, da je bil tudi odtok po deblu tekom celega leta in v obdobju vegetacije najbolj odvisen od količine padavin poleg intenzitete padavin pri boru in števila kapljic pri brezi (slika 67). Ne glede na to pa na SF v obdobju mirovanja vplivajo druge spremenljivke. Za SF pri boru so bile največje vrednosti RI ocenjene za MVD in količino padavin, pri brezi pa za vlažnost zraka, število kapljic in količino padavin.



Slika 67: RI meteoroloških spremenljivk na SF (črni stolpci označujejo spremenljivko z največjim vplivom, šrafirani stolpci pa ostale vplivne spremenljivke glede na kriterij po RI)
Figure 67: RI of meteorological variables for SF (black bars indicates the most influential variable and the patterned ones other influential variables according to the RI criterion)



Slika 68: Primer grafa delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na SF navadne breze v obdobju vegetacije glede na BRT
Figure 68: An example of the partial dependence plots (PDP) of the overall most influential variables on SF for the common silver birch tree for the vegetation period according to the BRT

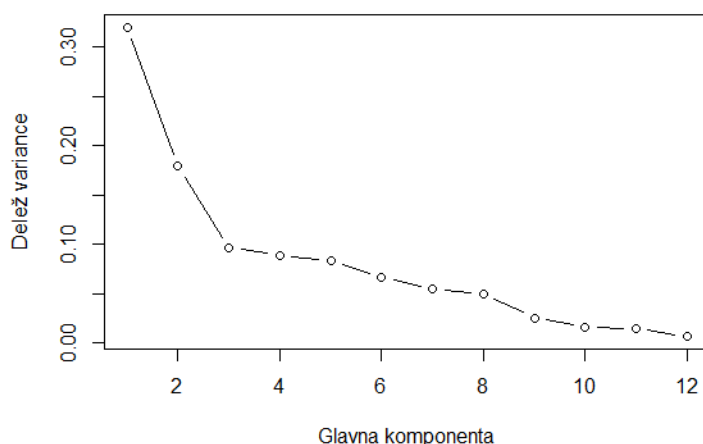
Zaradi izredno majhnih deležev odtoka po deblu pri boru smo vplive spremenljivk z največjimi vrednostmi RI z grafi delne odvisnosti prikazali le za brezo (priloga D). Odtok po deblu breze

narašča s količino padavin do 30 mm v celotnem obdobju meritev in v obdobju mirovanja ter do 22 mm v obdobju vegetacije, v katerem se njegovi deleži torej prej stabilizirajo. V obdobjih vegetacije in mirovanja SF narašča tudi ob povečevanju vlažnosti zraka nad 90 % (slika 68). V obdobju mirovanja pa SF narašča tudi z daljšim trajanjem padavin, katerega vpliv se kaže do 20 ur. Podobno kot pri vplivu prepuščenih padavin, število kapljic povečuje tudi delež odtoka po deblu do vrednosti 200.000 kapljic v obdobju celotnih meritev. V obdobjih vegetacije in mirovanja pa se je pokazal drugačen vpliv števila dežnih kapljic. Z naraščanjem števila kapljic do približno 50.000 SF narašča, po tem pa se do pojava 200.000 kapljic zmanjšuje (slika 68).

5.4.3 Metoda glavnih komponent (PCA)

PCA je metoda, s pomočjo katere lahko v množici neodvisnih spremenljivk izberemo tiste, ki vsebujejo največ informacij. Tako lahko v velikih podatkovnih nizih zmanjšamo število spremenljivk, ne da bi pri tem izgubili informacije. Posamezne glavne komponente (PC) so opisane z utežmi posameznih spremenljivk, varianco, ki jo zajamejo, pa podajajo njihove lastne vrednosti.

PCA smo izvedli na setu podatkov, ki je vključeval le meteorološke spremenljivke (preglednica 3) in je bil razdeljen na set za učenje (75 %) in set za treniranje (25 %) modela. Glede na rezultate smo v nadaljnji analizi upoštevali tri glavne komponente (PC1, PC2 in PC3) z največjo varianco, večjo od 1 (slika 69).



Slika 69: Delež variance posameznih glavnih komponent – plaziščni diagram
Figure 69: Scree plot for the principal components

Uteži posameznih spremenljivk so pokazatelji njihovega vpliva (preglednica 36). Prva komponenta PC1 je bila najbolj obtežena s povprečnim premerom dežnih kapljic (-0,38) in s trajanjem padavin (0,37). Glede na to jo lahko interpretiramo kot merilo za trajanje padavin in velikost dežnih kapljic, ki sta med seboj negativno povezani. Rezultati PCA metode torej kažejo, da PC1 opisuje dolge dogodke z majhnimi kapljicami (z majhno hitrostjo), ob veliki vlažnosti zraka in hladnem vremenu (preglednica 36). PC2 je merilo za količino padavin (-0,54) v povezavi z njihovim trajanjem (-0,4), ne glede na lastnosti kapljic. Značilne dogodke s takimi lastnostmi lahko opišemo kot pršenje (trajajo malo časa, padavine so šibke z majhnimi premeri in hitrostmi kapljic). PC3 pa ima največji uteži pri hitrosti (-0,49) in smeri vetra (-0,58), medtem ko trajanje dogodka nima velikega vpliva. Glede na izpostavljeni lastnosti vetra lahko povzamemo, da v brezvetrju smer vetra seveda ni pomembna, njen vpliv pa narašča s hitrostjo vetra.

Preglednica 36: Uteži posameznih meteoroloških spremenljivk za tri glavne komponente z največjo varianco; s krepkim tiskom so označene največje uteži spremenljivk za vsako komponento
Table 36: Principal component loadings of the meteorological variables for the three selected principal components; the strongest variable loadings for each component are marked in bold

Spremenljivka	PC1	PC2	PC3
Kp [mm]	0,26	-0,54	0,02
Ip [mm/h]	-0,23	-0,23	-0,07
TP [h]	0,37	-0,40	-0,15
Vh [m/s]	-0,27	-0,24	-0,49
Vs [°]	-0,15	0,05	-0,58
T [°C]	-0,31	-0,19	0,18
f [%]	0,35	0,09	0,29
SO [h]	-0,01	-0,02	-0,32
Vk [m/s]	-0,33	-0,31	0,31
Dk [mm]	-0,38	-0,28	0,24
MVD [mm]	-0,19	-0,18	0,09

Vpliv izbranih treh glavnih komponent in fenofaze na prestrežanje in prepuščanje padavin ter na odtok po deblu smo dodatno analizirali z modelom multiple regresije (ang. *multiple regression model*). Rezultati modelov so bili statistično značilni ($p < 0,001$) in so vključevali 27 % ter 39 % variance v primeru prestrežanja padavin breze in bora, 23 % in 39 % variance v primeru prepuščanja padavin pod brezo in pod borom ter 32 % in 18 % variance v primeru odtoka po deblu breze in bora. Presek za vse modele je bil statistično značilen s p vrednostjo manjšo od 0,001 (preglednice 37 – 39). Tudi fenofaza je bila statistično značilna ($p < 0,01$) za vse tri komponente prestrežanja v primeru obeh dreves in je nanje pomembno vplivala. Prva glavna komponenta PC1 je bila najbolj statistično značilna ($p < 0,001$) v primeru prestrežanja in prepuščanja padavin ter odtoka po deblu pri brezi, za drugo glavno komponento PC2 je bila statistična značilnost večja od 0,001 le v primeru prepuščanja padavin pod brezo, medtem ko tretja glavna komponenta PC3 za odtok po deblu pri brezi ni bila statistično značilna, medtem ko je bila za vse tri komponente v primeru bora manjša od 0,01.

Prestrežene padavine (I)

Analize modela multiple regresije za izbrane tri glavne komponente PC in fenofaze so pokazale, da je bilo prestrežanje padavin breze in bora statistično značilno ($p < 0,001$) povezano s količino in trajanjem padavin (PC2). Na proces v primeru breze pa je imela velik vpliv tudi PC3, ki kategorizira vpliv vetra (preglednica 37).

Preglednica 37: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za I navadne breze in črnega bora

Table 37: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for I by common silver birch and Austrian pine trees

	Breza					Bor				
	Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹		Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹	
Konstanta	25,08	4,80	5,23	< 0,001	***	54,89	4,32	12,70	< 0,001	***
Fenofaza	17,72	5,74	3,08	0,0025	**	13,65	5,17	2,64	0,0093	**
PC1	-4,15	1,11	-3,74	0,0003	***	-2,09	1,00	-2,09	0,0385	*
PC2	5,20	1,38	3,77	0,0002	***	10,70	1,24	8,60	< 0,001	***
PC3	-5,15	1,98	-2,60	0,0104	*	-5,17	1,78	-2,90	0,0044	**

¹Statistična značilnost: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Prepuščene padavine (TF)

Podobno je tudi na delež prepuščenih padavin pod obema drevesnima vrstama najbolj vplivala količina padavin in njihovo trajanje (PC2), pri brezi pa so imele velik vpliv tudi lastnosti vetra (PC3) (preglednica 38).

Preglednica 38: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za TF pod navadno brezo in črnim borom

Table 38: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for TF under common silver birch and Austrian pine trees

	Breza					Bor				
	Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹		Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹	
Konstanta	72,23	4,74	15,24	< 0,001	***	45,12	4,32	10,46	< 0,001	***
Fenofaza	-16,24	5,67	-2,86	0,0049	**	-13,68	5,17	-2,65	0,0091	**
PC1	3,74	1,09	3,42	0,0008	***	2,08	1,00	2,08	0,0391	*
PC2	-4,40	1,36	-3,22	0,0016	**	-10,66	1,24	-8,59	< 0,001	***
PC3	5,10	1,96	2,61	0,0102	*	5,14	1,78	2,88	0,0046	**

¹Statistična značilnost: *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05

Odtok po deblu (SF)

Veter (PC3) pri brezi ni imel pomembnejšega vpliva na odtok po deblu, saj sta bili v tem primeru statistično značilno vplivni PC1 in PC2, ki zajemata trajanje in količino padavin ter lastnosti dežnih kapljic (preglednica 39). V primeru bora pa tudi na odtok po deblu najbolj vpliva PC2.

Preglednica 39: Koeficienti modela multiple regresije z upoštevanjem PC za SF pri navadni brezi in črnem boru

Table 39: Coefficients of the MRA model taking into account PCs for SF by common silver birch and Austrian pine trees

	Breza					Bor				
	Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹		Ocena	Std. Napaka	t vrednost	Pr(> t) ¹	
Konstanta	2,73	0,46	5,91	< 0,001	***	54,89	4,32	12,70	< 0,001	***
Fenofaza	-1,52	0,55	-2,75	0,0068	**	13,65	5,17	2,64	0,0093	**
PC1	0,39	0,11	3,70	0,0003	***	-2,09	1,00	-2,09	0,0385	*
PC2	-0,78	0,13	-5,85	< 0,001	***	10,70	1,24	8,60	< 0,001	***
PC3	0,06	0,19	0,32	0,7515		-5,17	1,78	-2,90	0,0044	**

¹Statistična značilnost: *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05

5.4.4 Multipla korespondenčna analiza (MCA)

Multipla korespondenčna analiza (MCA) je podobna metodi glavnih komponent (PCA), vendar so v tem primeru vhodni podatki opisni. Dimenzije rezultatov MCA, ki podajajo statistično vztrajnost spremenljivke, so pravokotne ena na drugo, zato lahko razmerje med točkami (spremenljivkami) analiziramo le za vsako dimenzijo posebej. Za vsako komponento prestrežanja padavin (I, TF, SF) v posamezni fenofazi smo analizo MCA ponovili trikrat: za podatke o padavinah, o mikrostrukturi padavin ter o vetru. Za vsako spremenljivko smo določili mejno vrednost, ki je bila enaka povprečni vrednosti spremenljivke za vseh 180 obravnavanih dogodkov. Glede na mejno vrednost smo številčno vrednost spremenljivke pretvorili v opisno (preglednica 40). Mejno vrednost prestreženih in prepuščenih padavin smo določili kot

mediano vzorca, v primeru odtoka po deblu pa smo definirali le, ali je do odtoka prišlo ($> 0 \%$) oziroma se ta ni začel ($= 0 \%$).

Preglednica 40: Mejne vrednosti in kratice spremenljivk, uporabljene v MCA
Table 40: The variables' threshold values and their acronyms used with MCA

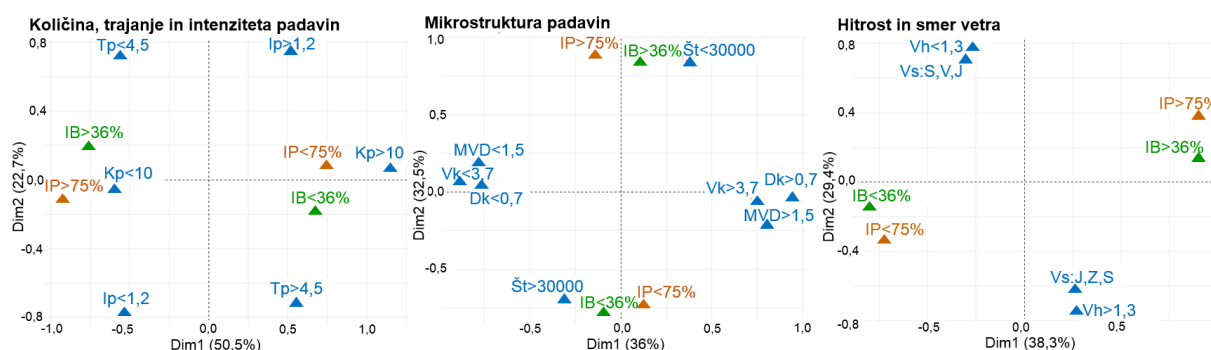
Spremenljivka	Mejna vrednost	Kratika (manjše od mejne vrednosti)	Kratika (večje od mejne vrednosti)
I breza (birch)	36 %	IB<36%	IB>36%
I bor (pine)	75 %	IP<75%	IP>75%
TF breza	62 %	TFB<62%	TFB>62%
TF bor	25 %	TFP<25%	TFP>25%
SF breza	0 %	SFB0	SFB1
SF bor	0 %	SFP0	SFP1
Celotna količina padavin	10 mm	Kp<10	Kp>10
Povprečna intenziteta padavin	1,2 mm/h	Ip<1.2	Ip>1.2
Trajanje dogodka	4,5 h	Tp<4.5	Tp>4.5
Povprečen premer kapljic	0,7 mm	Dk<0.7	Dk>0.7
Povprečna hitrost kapljic	3,7 mm/h	Vk<3.7	Vk>3.7
Mediana volumskega premera	1,5 mm	MVD<1.5	MVD>1.5
Število kapljic dogodka	30.000	Št<30000	Št>30000
Povprečna hitrost vetra	1,3 m/s	Vh<1.3	Vh>1.3
Prevladujoča smer vetra	S-SV-V-JV J-JZ-Z-SZ		Vs:S,V,J Vs:J,Z,S

V vseh analiziranih primerih sta bili statistično značilni dve dimenziji, za kateri se je statistična vztrajnost gibala med 60,9 % in 80 %. Lokacija glede na koordinatni osi in bližina med točkami določata odvisnost in stopnjo medsebojne korelacije za posamezne spremenljivke. Izhodiščna oziroma nulta os dimenzije 1 je navpična os, dimenzije 2 pa vodoravna os (slike 70 – 72).

Prestrežene padavine (I)

Multipla korespondenčna analiza (MCA) je pokazala, da je bilo prestrezanje padavin breze in bora v vseh upoštevanih fenofazah manjše od povprečja (IB<36% in IP<75%) pri količinah padavin, večjih od 10 mm (Kp>10), intenzitetah, večjih od 1,2 mm/h (Ip>1,2) in trajanju, daljšem od 4,5 h (Tp>4,5) (slika 70 levo). Glede na dimenzijo 2 pa je bilo prestrezanje breze večje od 36 % (IB>36%) za bolj intenzivne padavinske dogodke, z intenziteto večjo od 1,2 mm/h (Ip>1,2) in s količino padavin večjo od 10 mm (Kp>10), ki pa so krajši od 4,5 ur (Tp>4,5). Glede na razdalje med točkami v dimenziji 2 na delež prestrezanja padavin pri obeh drevesih v celotnem obdobju meritev in v obdobju vegetacije najbolj vpliva količina padavin (slika 70, priloga E). V obdobju mirovanja je v dimenziji 1 bolj izrazit vpliv trajanja padavin, v dimenziji 2 pa na prestrezanje padavin breze vpliva predvsem intenziteta padavin (priloga E). Pri analizi vpliva mikrostrukture padavin se za vsa obravnavana obdobja v obeh dimenzijah kaže največji vpliv števila dežnih kapljic (Št) na prestrezanje padavin breze in bora (slika 70 sredina, priloga E). Sama mikrostruktura padavin ima tudi najbolj raznolike vplive na prestrezanje padavin glede na fenofaze. Prestrezanje breze in bora je v obdobju vegetacije večje od 36 % in 75 % (IB>36%, IP>75%) pri velikem številu majhnih kapljic (dimenzija 1) ali pri manjšem številu velikih kapljic (dimenzija 2), medtem ko je v obdobju mirovanja glede na obe dimenziji za večje prestrezanje padavin pomembno predvsem, da je število kapljic manjše od 30.000 (Št<30000) (priloga E). V obdobju mirovanja so v dimenziji 2 razdalje med lastnostmi kapljic in večjim

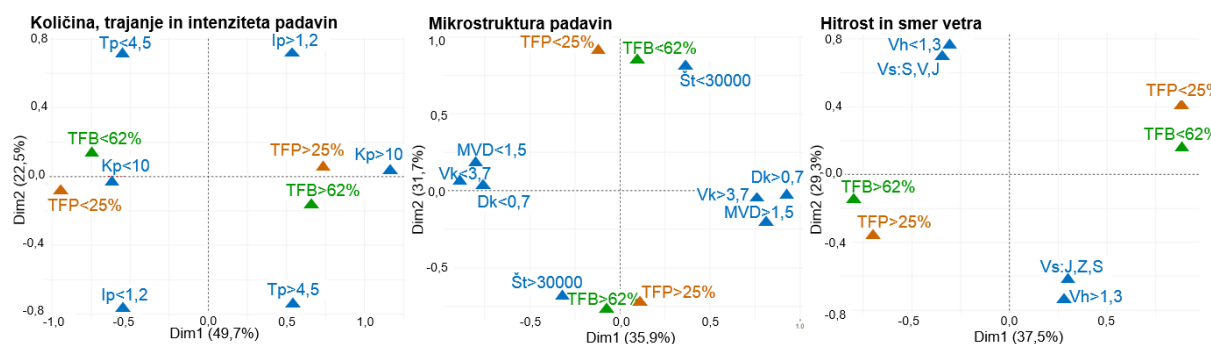
prestrezanjem manjše, kar kaže na večji vpliv premera, hitrosti in MVD kapljic v primerjavi z izstopajočim vplivom števila kapljic v obdobju vegetacije. Vpliv smeri in hitrosti vetra na prestrezanje se ne spreminja glede na fenofaze. Prestrezanje padavin obeh drevesnih vrst je večje pri dogodkih z vetrom hitrejšim od 1,3 m/s ($V_h > 1,3$), ki piha iz J, JZ, Z ali SZ smeri (dimenzija 1) oziroma s počasnejšim vetrom ($V_h < 3,1$), ki piha iz S, SV, V ali JV smeri (dimenzija 2) (slika 70 desno). V primerjavi z obdobjem vegetacije (priloga E) pa manjša razdalja med prestrezanjem padavin bora in hitrostjo vetra v prvi dimenziji ter prestrezanjem padavin breze in smerjo vetra v drugi dimenziji nakazuje na večji vpliv posameznih lastnosti vetra na določeno drevesno vrsto.



Slika 70: Rezultati MCA za I za vsa obdobja
Figure 70: Results of the MCA for I throughout the year

Prepuščene padavine (TF)

Prepuščanje padavin je zelo tesno povezano s prestrezanjem padavin (Enačba 1), kar kažejo tudi rezultati MCA za prepuščene padavine obeh dreves (slika 71, priloga E). Vpliv obravnavanih spremenljivk na delež TF je ravno obraten kot na delež prestreženih padavin (slika 71). Le v obdobju mirovanja se vpliv vetra na prepuščanje in prestrezanje padavin razlikuje. V obdobju mirovanja je glede na dimenzijo 2 vpliv smeri vetra na delež TF pod brezo manjši kot vpliv na delež prestreženih padavin, saj so za primer prestrezanje padavin vse štiri točke skoraj poravnane na horizontalni osi (priloga E). Poleg tega pa dimenzija 2 za manjši TF v obdobju mirovanja opisuje drugačne pogoje za brezo in bor. Pri brezi bo TF manjši (in posledično prestrezanje padavin večje) pri vetru, hitrejšem od 1,3 m/s ($V_h > 1,3$) iz S, SV, V in JV smeri, medtem ko bo prestrezanje padavin večje pri počasnejšem vetru ($V_h < 1,3$) iz istih smeri. Prepuščanje padavin pod borom pa bo manjše pri počasnejšem vetru iz J, JZ, Z in SZ smeri, medtem ko se delež prestrezanja povečuje pri hitrejšem vetru iz teh smeri.

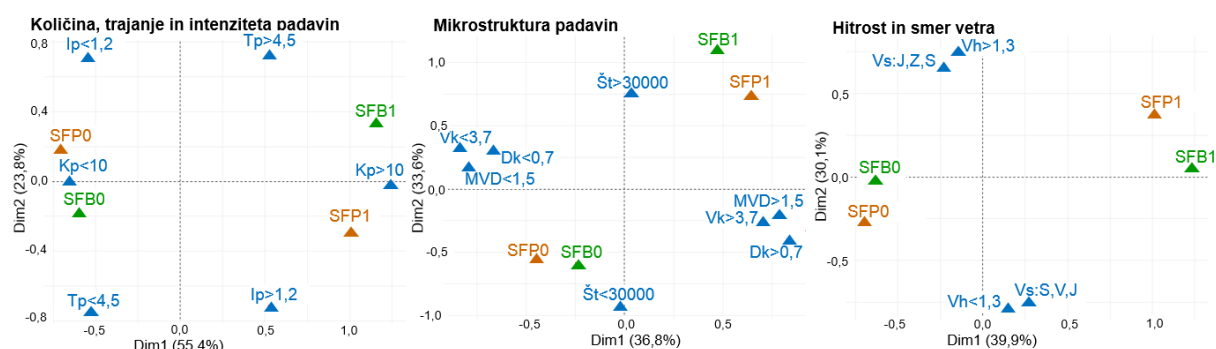


Slika 71: Rezultati MCA za TF za vsa obdobja
Figure 71: Results of the MCA for TF throughout the year

Odtok po deblu (SF)

Odtok po deblu je v nekaterih točkah podoben odzivu prestrezanja oziroma prepuščanja padavin na meteorološke spremenljivke, medtem ko rezultati MCA nakazujejo tudi na

določene razlike. Odtok po deblu se ne glede na fenofazo pri obeh drevesih pojavi pri dogodkih s količino padavin, večjo od 10 mm ($K_p > 10$), trajanjem, daljšim od 4,5 h ($T_p > 4,5$) in intenziteto, večjo od 1,2 mm/h ($I_p > 1,2$) (slika 72 levo, priloga E). Glede na dimenzijo 2 sta za začetek SF pri boru najbolj pomembna količina padavin, večja od 10 mm ($K_p > 10$) in njihova intenzivnost, ki naj bo večja od 1,2 mm/h ($I_p > 1,2$), medtem ko se v tej dimenziji SF pri brezi prične tvoriti tudi pri padavinah z manj kot 10 mm ($K_p < 10$), ki trajajo več kot 4,5 h ($T_p > 4,5$) in imajo intenzivnost manjšo od 1,2 mm/h ($I_p < 1,2$) (slika 72 levo, priloga E). Odtok po deblu pri obeh drevesih se v celotnem obdobju meritev začne pri dogodkih, ki imajo število kapljic večje od 30.000 ($\dot{S}t > 30000$) ne glede na njihove ostale lastnosti (slika 72 sredina). V obdobju mirovanja se glede na krajše razdalje med točkami sicer kaže še večji vpliv premera, hitrosti in MVD kapljic, medtem ko v obdobju vegetacije vpliv spremenljivk v drugi dimenziji zaradi njihove bližine horizontalni osi ni jasno opredeljen (priloga E). Pogoji vetra, pri katerih opazimo pojav SF v obdobju mirovanja in v celotnem obdobju meritev so podobni tistim, pri katerih se prestrezanje padavin povečuje (slika 70), prepuščanje pa zmanjšuje (slika 71). Za bor ti pogoji veljajo v vseh fenofazah, medtem ko pri brezi v obdobju vegetacije odtok po deblu spodbujajo le dogodki s hitrostmi vetra manjšimi od 1,3 m/s ($V_h < 1,3$) iz S, SV, V in JV smeri (priloga E).

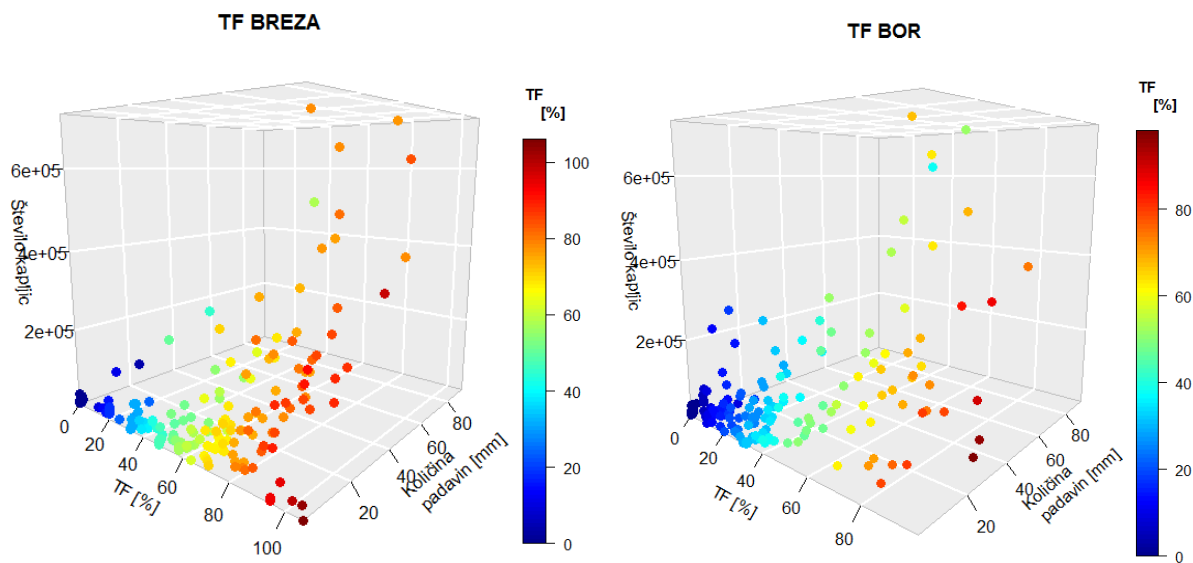


Slika 72: Rezultati MCA za SF za vsa obdobja
Figure 72: Results of the MCA for SF throughout the year

5.4.5 Medsebojni vpliv izbranih meteoroloških spremenljivk

Meteorološke spremenljivke so med seboj odvisne, povezave med nekaterimi pa so opazne tudi v rezultatih uporabljenih statističnih metod. Da bi lahko ovrednotili njihovo medsebojno odvisnost in posledično vpliv tega na proces prestrezanja padavin, smo ločeno preverili še medsebojni vpliv izbranih meteoroloških spremenljivk: količine padavin in števila dežnih kapljic ter temperature in vlažnosti zraka (deficit vlažnosti).

Pomembnejša vplivna spremenljivka, ki je bila večkrat izpostavljena v rezultatih različnih uporabljenih statističnih metod, je bila tudi število kapljic dogodka. Kot smo pričakovali, so obilnejši padavinski dogodki povečevali deleže prepuščanja padavin in odtoka po deblu, delež prestrezanja padavin pa se je zmanjševal. Čeprav smo število dežnih kapljic obravnavali kot ločeno spremenljivko, se ta dobro ujema tudi s količino padavin. Koeficient korelacije med številom dežnih kapljic na dogodek in pripadajočo količino padavin je namreč znašal 0,82. To pomeni, da v primeru enako velikih kapljic večje število kapljic daje več padavin, kar je seveda logično. Ob taki predpostavki sledi, da če se prepuščanje padavin povečuje s količino padavin, se povečuje tudi s številom dežnih kapljic, kar so v naših analizah pokazali že rezultati RT, BRT in MCA. Povezava med količino padavin in številom dežnih kapljic ter vplivom na prepuščanje padavin pa je razvidna tudi na 3D grafih (slika 73). Posledično je težko ločiti vpliv posameznih spremenljivk, zato smo ponovili analizi z regresijskimi drevesi (RT) in ojačenimi regresijskimi drevesi (BRT), pri katerih smo izločili spremenljivki količino padavin (K_p) in število kapljic ($\dot{S}t$) ter ju nadomestili z novo spremenljivko, ki podaja število kapljic na količino padavin dogodka ($\dot{S}t/K_p$).



Slika 73: 3D graf vpliva količine padavin in števila dežnih kapljic na prepuščanje padavin (TF)
Figure 73: 3D plot of influence of rainfall amount and drop number on throughfall (TF)

Ponovljeni analizi z RT in BRT metodama za celotno obdobje meritev sta pokazali, da nova spremenljivka Št/Kp nima vidnega vpliva na katero izmed komponent prestrežanja padavin. Pri regresijskih drevesih, katerih koren je bila prvotno količina padavin, sta bila v primeru upoštevanja nove spremenljivke kot koren večinoma izbrani spremenljivki intenziteta ali trajanje padavin, na prvih dveh ravneh drevesa pa v nobenem primeru ni bila uvrščena nova spremenljivka (preglednica 41). Podobno tudi v primeru analize z BRT metodo nova spremenljivka Št/Kp ni nikjer izbrana za vplivno spremenljivko z vrednostjo RI večjo od 7,7 %, količino padavin pa ob izločitvi iz analize prav tako najpogosteje zamenjata intenziteta ali trajanje padavin (preglednica 41).

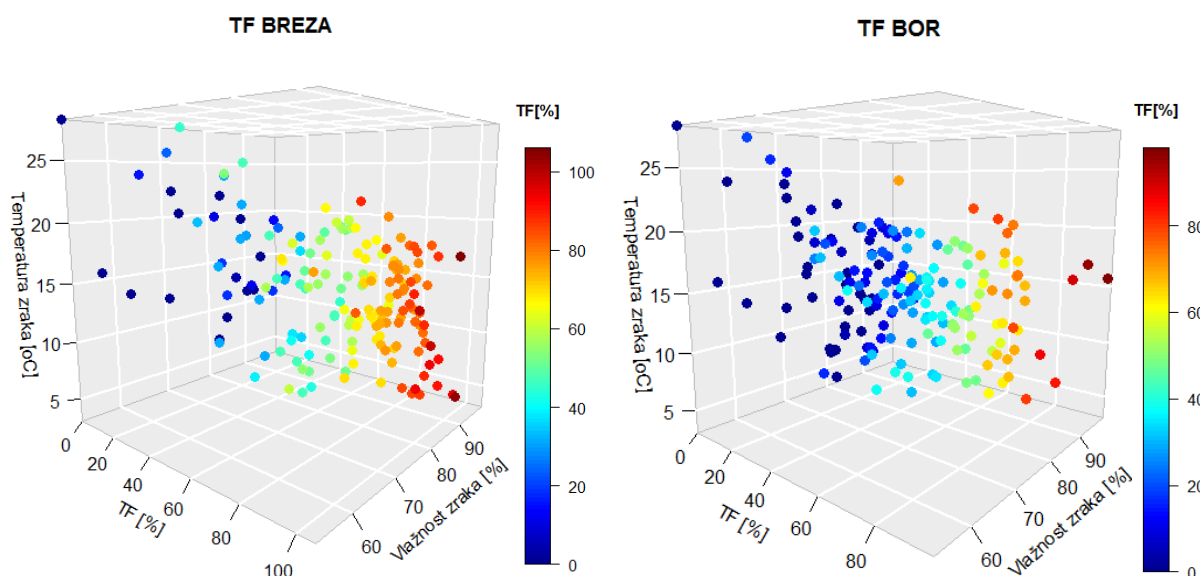
Preglednica 41: Najbolj vplivne spremenljivke po RT in BRT metodah z upoštevanjem nove spremenljivke Št/Kp

		TF		SF		I	
spremenljivka		Kp in Št	Št/Kp	Kp in Št	Št/Kp	Kp in Št	Št/Kp
RT koren 1. nivo	Breza	Kp T, f	f Tp, T	Kp Tp, f	Tp Ip	Št Kp	Tp T
	Bor	Kp Kp, T	Ip T, Tp	Kp Kp	Ip Tp	Kp Ip, Kp	Ip Vs, Dk
BRT	Breza	Kp, Št	Tp, f, Ip	Kp, Št	Tp, Ip, f	Št, f, Kp	Tp, f, T
	Bor	Kp, Ip	Ip, Tp	Kp	Ip, Tp	Kp	Ip, Vh, f

Čeprav sta količina padavin in število dežnih kapljic med seboj odvisna, pa na proces prestrežanja padavin vplivata drugače. Verjetno je razlog v drugačnih lastnostih različno velikih dežnih kapljic. Enaka količina padavin je lahko dosežena z manjšim številom večjih dežnih kapljic ali z velikim številom majhnih dežnih kapljic (slika 73), ki pa se ob stiku z listjem tako zaradi velikosti kot tudi zaradi hitrosti obnašajo drugače.

Statistične analize so pokazale tudi na vpliv temperature in vlažnosti zraka na komponente prestrežanja padavin. Prepuščanje padavin pod brezo in pod borom je večje pri večjih vlažnostih zraka, med tem ko vpliv temperature pri večdimenzionalnem prikazu teh dveh spremenljivk ni tako očiten (slika 74). Medsebojni vpliv relativne vlažnosti in temperature zraka

na prestrezanje padavin smo zato z uporabo RT in BRT metod ponovno analizirali še z upoštevanjem deficita vlažnosti, ki smo ga izračunali po Penman-Montheitovi enačbi (Cesar, 2011). Deficit vlažnosti podaja količino vodne pare, ki jo do popolne zasičenosti še lahko sprejme zrak (Šraj in Brilly, 2005).



Slika 74: 3D graf vpliva vlažnosti in temperature zraka na prepuščanje padavin (TF)
Figure 74: 3D plot of influence of air temperature and humidity on throughfall (TF)

Deficit vlažnosti (Dv) se v ponovljenih analizah ni izkazal za pretirano vplivno spremenljivko. Glede na ponovljena regresijska drevesa (RT) lahko opazimo vpliv Dv na drugem nivoju delitve v primeru prepuščanja padavin pod brezo, kjer je nadomestil vpliv temperature zraka. Kljub manjšim vplivom temperature in vlažnosti zraka na prestrezanje padavin bora glede na prvotno analizo (preglednica 35), pa se je s ponovljeno RT metodo deficit vlažnosti izkazal za bolj vplivno spremenljivko (preglednica 42). V analizi z BRT metodo pa vrednost RI za deficit vlažnosti ni nikoli presegla mejne vrednosti, ki bi nakazovala na večji vpliv te spremenljivke. Glede na predstavljene analize rezultatov so temperatura in vlažnost zraka ter deficit vlažnosti pomembne vplivne spremenljivke, katerih učinek pa bi bilo smiselno analizirati še na ravni dogodka z nekaj minutnim časovnim korakom.

Preglednica 42: Najbolj vplivne spremenljivke po RT in BRT metodah z upoštevanjem deficita vlažnosti (Dv)

Table 42: The most influential variables according to RT and BRT taking into account the humidity deficit (Dv)

		TF		SF		I	
spremenljivka		T in f	Dv	T in f	Dv	T in f	Dv
RT koren 1. nivo	Breza	Kp T, Vh	Kp Dv, Vh	Kp Tp, f	Kp Kp, Vk	Št Kp	Št Kp
	Bor	Kp Kp, T	Kp Kp	Kp Kp	Kp Kp	Kp, Ip, Kp	Kp Dv, Kp
BRT	Breza	Kp, Št	Kp, Št	Kp, Št	Kp, Št	Št, f, Kp, T, Tp	Št, Kp, Tp, Vs
	Bor	Kp, Ip	Kp, Ip	MVD, Kp	Kp	Kp	Kp

5.4.6 Razprava in pregled rezultatov

Vpliv lastnosti dreves in meteoroloških spremenljivk (neodvisne spremenljivke) na prestrezanje (I) in prepuščanje (TF) padavin ter na odtok po deblu (SF) (odvisne spremenljivke) smo

ocenjevali na podlagi merjenih podatkov z uporabo različnih statističnih metod. Uporabili smo regresijska drevesa (RT), posplošena ojačana regresijska drevesa (BRT), metodo glavnih komponent (PCA) in multiplo korespondenčno analizo (MCA).

Vse uporabljene statistične metode kažejo na največji vpliv količine, trajanja in intenzitete padavin ter fenofaze na vse tri komponente prestrezanja padavin, kar potrjuje prvo in drugo hipotezo. Količina padavin se je izkazala za najbolj vplivno spremenljivko, o čemer so poročali že drugi raziskovalci (Xiao in sod., 2000; Staelens in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Siegert in Levina, 2014). V obdobju vegetacije in v vseh obdobjih meritev se z večjo količino padavin zmanjšuje delež prestrezanja padavin in povečuje delež prepuščanja padavin obeh obravnavanih drevesnih vrst glede na rezultate vseh uporabljenih statističnih metod. Vse metode pa kažejo na povečevanje odtoka po deblu s količino padavin ne glede na fenofazo.

Druga uporabljena metoda so regresijska drevesa (RT), ki obravnavane primere razvršča glede na odločilne vrednosti neodvisnih spremenljivk. Analiza rezultatov RT je pokazala, da je za delitev regresijskega drevesa za primer prepuščanja padavin breze potrebna manjša količina padavin (3,6 mm) kot za primer bora (10,1 mm). Količina padavin kot mejna vrednost za delitev RT se je razlikovala glede na fenofaze za obe drevesni vrsti, saj je bila večja v obdobju vegetacije kot v celotnem obdobju meritev (preglednica 35, priloga C). Do podobnih zaključkov so prišli tudi Šraj in sod. (2008a) in Staelens in sod. (2008). Poleg tega pa se je po fenofazah razlikovala tudi količina padavin, potrebna za začetek odtoka po deblu. Otok po deblu pri boru se je v obdobju vegetacije pričel z 12,7 mm padavin, v obdobju mirovanja pa z 8,7 mm, medtem ko je bilo za začetek odtoka po deblu pri brezi potrebnih 10,7 mm padavin v obdobju vegetacije in 3 mm v obdobju mirovanja. Manjše potrebne količine padavin pri brezi sovpadajo z različnimi skladiščnimi zmogljivostmi skorje (preglednica 22) in krošnje (preglednica 15) breze in bora. Te vrednosti so večje kot količine padavin, ki so sprožile otok po deblu pri drevesih z gladko skorjo v gozdovih: 4,6 mm (Perez-Suarez in sod., 2014), 5 mm (Chang in Matzner, 2000; Siegert in Levina, 2014), 2,1 mm in 3,4 mm v obdobju vegetacije ter 1,5 mm v obdobju mirovanja (Andre in sod., 2008; Staelens in sod., 2008).

V primerjavi s količino padavin pa intenziteta padavin vpliva predvsem na sam delež prestrezanja v obdobju mirovanja. Za obe drevesni vrsti tako rezultati vseh uporabljenih statističnih metod nakazujejo, da se vplivne spremenljivke v različnih fenofazah razlikujejo. Ta ugotovitev se ujema z rezultati Staelensa in sodelavcev (2008), ki so poročali, da je količina padavin najbolj vplivna spremenljivka na prestrezanje padavin bukve v obdobju vegetacije, njen vpliv pa v obdobju mirovanja lahko zanemarimo. To bi lahko razložili tudi z vplivom različne skladiščne zmogljivosti krošnje po fenofazah (preglednica 15). Ko je v krošnji prisotno listje, se del padavin v njej zadrži, dokler ta ni povsem zasičena, kar se pri majhnih količinah padavin sploh ne zgodi. Kadar pa listja ni, je površina, ki bi padavine zadrževala, veliko manjša, saj se same veje zmožijo dosti hitreje, od takrat dalje pa drevo padavin ne prestreže več. Število padavinskih dogodkov, izmerjenih v obdobju mirovanja, je bilo manjše kot v obdobju vegetacije, kar bi lahko vplivalo na naše rezultate v celotnem obdobju meritev (preglednica 23). Ne glede na to pa različnih vplivov po posameznih fenofazah ne moremo zanemariti. Razlike po obdobjih so sicer pričakovane za listopadna drevesa, kot je navadna breza, ne pa v enaki meri tudi za vednozelenke iglavce, kot je bor. Vseeno pa so podoben pojav v primeru vednozelenih iglavcev opazili tudi Iroume in Huber (2002), Deguchi in sodelavci (2006), Barbier in sodelavci (2009) ter Zabret in sodelavci (2016). Iroume in Huber (2002) sta predpostavila, da so razlike med vzorci prestrezanja in prepuščanja padavin v različnih fenofazah v primeru vednozelenih dreves bolj povezane z različnimi meteorološkimi razmerami v posameznih obdobjih kot pa z lastnostmi krošnje, kar smo delno potrdili tudi v disertaciji. Poleg tega pa je to lahko povezano tudi z manjšimi vrednostmi LAI, ki jih v zimskih mesecih lahko izmerimo pri iglavcih (slika 43, Margolis in sod., 1995).

V obdobju mirovanja je bilo prestrezanje padavin torej bolj kot od skupne količine padavin odvisno od njihove intenzitete, z večanjem katere se delež prestrezanja padavin zmanjšuje, o

čemer so poročali tudi Bellot in Escarre (1998), Xiao in sodelavci (2000), Toba in Ohta (2005), Staelens in sodelavci (2008), Van Stan in sodelavci (2016) ter Kermavnar in Vilhar (2017). Najverjetneje je to posledica tega, da padavine pri velikih intenzitetah povzročajo škropljenje zadržanih (prestreženih) padavin v drevesni krošnji in jih preusmerjajo v prepuščene padavine (Herwitz, 1987). Intenziteta padavin pa ima različen vpliv na brezo in bor, kar so pokazali rezultati BRT (slika 64). Tudi glede na rezultate RT sta bili za posamezni drevesni vrsti določeni drugačni mejni vrednosti intenzitete padavin, pri katerih se začne prestrezanje: 0,7 mm/h za bor in 0,5 mm/h za brezo. To nakazuje, da je začetek prestrezanja padavin pri boru zaradi vegetacijskih lastnosti (lastnosti skorje - preglednica 22, skladiščna zmogljivost krošnje - preglednica 15) manj občutljiv na vpliv intenzitete padavin, saj se v primerjavi z brezo pojavi pri večjih vrednostih. Možen vpliv lastnosti skorje sta izpostavila tudi Siegert in Levia (2014), ki sta ugotovila, da zaradi grobe skorje navadnega tulipanovca (*L. Tulipifera*) intenziteta padavin ni vplivala na odtok po deblu pri tem drevesu, medtem ko je imela znaten vpliv na odtok po bolj gladkem deblu ameriške bukve (*F. grandifolia*).

Trajanje padavin ima glede na vse metode največji vpliv na prestrezanje padavin breze v obdobju vegetacije, ko se delež prestrezanja s trajanjem zmanjšuje. V določenih obdobjih vpliva tudi na odtok po deblu breze, ki se z daljšim trajanjem padavin povečuje. Pri boru trajanje padavin na nobeno komponento prestrezanja ne vpliva pomembneje. Tudi v tem primeru je verjeten razlog za različen vpliv trajanja padavin drugačna skladiščna zmogljivost krošnje breze in bora (preglednica 15). Ob prisotnosti listja v krošnji breze je za njeno popolno omočenost potrebna večja količina padavin, ki je običajno dosežena po daljšem času kot pri goli krošnji. Zaradi manjših razlik v skladiščni zmogljivosti krošnje bora po fenofazah pa vpliv trajanja padavin za to drevo ni izrazit. Muzylo in sodelavci (2012) so prav tako opazili vpliv trajanja padavin na vse tri komponente prestrezanja v listnatem gozdu, vendar pa je bil vpliv bolj izrazit v obdobju mirovanja kot v obdobju vegetacije.

Količina padavin, njihova intenziteta in trajanje so bistveni podatki za padavinski dogodek. Padavine pa lahko opišemo tudi s številom kapljic, njihovo velikostjo in hitrostjo padanja; na ta način predstavimo mikrostrukturo padavinskih dogodkov. Pomembnejša vplivna spremenljivka, ki je bila večkrat izpostavljena v rezultatih RT, BRT in MCA, je tako tudi število kapljic dogodka. Dodatna analiza je pokazala, da je kljub odvisnosti med količino padavin in številom kapljic ti dve spremenljivki smiselno obravnavati ločeno. Ostale lastnosti dežnih kapljic namreč pomembno vplivajo na proces prestrezanja padavin. Vpliv drugih lastnosti dežnih kapljic je bil izpostavljen manjkrat kot vpliv njihovega števila, vendar pa so bili premer in hitrost kapljic ter MVD vsaj nekajkrat izbrani kot pomembni vplivni dejavniki z vsemi modeli razen s PCA. Calder (1996a) je pri modeliranju prestrezanja padavin za dogodke z enako količino padavin opazil, da je prestrezanje večje, če so premeri dežnih kapljic manjši. V naši raziskavi se je pokazalo, da so manjše vrednosti MVD povečevale delež prestrezanja padavin in zmanjševale delež prepuščanja padavin pri boru v obdobju vegetacije. Poleg tega je manjši premer dežnih kapljic povečeval delež prestrezanja in zmanjševal delež prepuščanja padavin pri boru v obdobju mirovanja in tekom celotnega obdobja meritev. Podoben pojav smo opazili tudi pri analizi mikrostrukture padavin, pri kateri smo opazili povečan delež prepuščanja padavin pod borom tekom padavinskega dogodka po pojavu večjih dežnih kapljic (poglavje 5.3; Zabret in sod., 2017). Za primer breze pa rezultati RT nakazujejo drugače. Kapljice z manjšim premerom in manjše vrednosti MVD zmanjšujejo delež prestrezanja padavin. Drugačna odziva obravnavanih drevesnih vrst na vpliv mikrostrukture padavin sta najverjetneje posledica različnih vegetacijskih lastnosti dreves, kot so listi oziroma iglice, različni nakloni vej (preglednica 21) in drugačne lastnosti skorje (preglednica 22), kar so opazili tudi ostali raziskovalci (Nanko in sod., 2006; Holder, 2013; Nanko in sod., 2013).

Izmed drugih obravnavanih makro-meteoroloških spremenljivk je imela precejšen vpliv na proces prestrezanja padavin tudi hitrost vetra. Kot bolj vplivna spremenljivka je bila že večkrat prepoznana v različnih študijah (Staelens in sod., 2008; Šraj in sod., 2008a; Van Stan in sod., 2014; Nanko in sod., 2016; Iida in sod., 2017). Tudi v naši raziskavi se je vpliv vetra na vsako

komponento prestrezanja breze izkazal kot relativno vpliven z vsemi uporabljenimi statističnimi metodami. Hitrost vetra vpliva na prestrezanje predvsem v obdobju vegetacije in tekom celega obdobja meritev, ko povečuje delež prestreženih padavin, zmanjšuje pa deleža prepuščenih padavin in odtoka po deblu. Podoben vpliv hitrosti vetra za listavce so potrdili tudi Toba in Ohta (2005), Staelens in sodelavci (2008) in Šraj in sodelavci (2008a). Vpliv hitrosti vetra v primeru bora pa je bil izpostavljen le po metodi MCA v obdobju mirovanja za prepuščanje in prestrezanje padavin, ne pa za odtok po deblu. Odziv breze ustreza razlagi enačbe Penman-Monteith, ki predpostavlja, da večje hitrosti vetra povečujejo evaporacijo, kar zmanjšuje prepuščanje padavin, o čemer so za različne drevesne vrste poročali tudi drugi raziskovalci (Hörmann in sod., 1996; Klaassen in sod., 1998; Herbst in sod., 2008; Reid in sod., 2009). Povečevanje deleža prepuščenih padavin pri večjih hitrostih vetra, kot v primeru bora, pa so zabeležili tudi Xiao in sodelavci (2000), Andre in sodelavci (2008), Van Stan in sodelavci (2014) in lida in sodelavci (2017). Tak odziv je najverjetneje posledica zmanjšanja skladiščne zmogljivosti krošnje zaradi sunkov vetra, ki krošnjo tresejo in povzročajo kapljanje že prestreženih padavin (Xiao in sod., 2000; Nanko in sod., 2006; Andre in sod., 2008). Tudi v tem primeru je različen odziv obravnavanih drevesnih vrst na hitrost vetra najverjetneje povezan z različnimi vegetacijskimi lastnostmi, saj sta bili skladiščni zmogljivosti krošnje in skorje bora večji kot pri brezi (preglednici 15 in 22). Poleg tega je večina raziskovalcev, ki so s hitrostjo vetra opazili povečevanje deleža prestreženih padavin, proces spremljali pod listopadnimi drevesi, medtem ko so raziskovalci, ki so opazili obraten odziv dreves, spremljali predvsem vednozeleno drevesno vrsto.

Pogoji vetra, ki so se po metodi MCA izkazali za povzročitelje odtoka po deblu v obdobju mirovanja in v celotnem obdobju meritev so podobni tistim, pri katerih se prestrezanje padavin povečuje (slika 70), prepuščanje pa zmanjšuje (slika 71). Glede na to lahko sklepamo, da se pri večjem deležu prestrezanja padavin več padavin zadrži v drevesni krošnji, kar predstavlja večji volumen padavin, ki bi potencialno lahko odtekle po vejah in deblu. Za bor ti pogoji veljajo v vseh obdobjih, medtem ko pri brezi v obdobju vegetacije odtok po deblu spodbujajo le dogodki z majhnimi hitrostmi vetra iz S, SV, V in JV smeri. Večje hitrosti vetra lahko povzročajo tresenje krošnje, zaradi prisotnosti listja pa ob vibracijah več zadržanih padavin kaplja z listja na tla, zato je manj padavin na voljo za odtok po deblu.

5.5 Potrditev hipotez

Na podlagi rezultatov, prikazanih v poglavjih 4 in 5, lahko potrdimo zastavljene hipoteze.

Hipoteza 1: Lastnosti padavinskega dogodka, kot so vrsta padavin (dež, sneg, led), trajanje in intenziteta, število, velikostna porazdelitev in hitrost hidrometeorjev, vplivajo na količino prestreženih padavin.

Vpliv lastnosti padavinskega dogodka (meteoroloških spremenljivk) na prestrezanje padavin smo analizirali na več različnih načinov. Že osnovna linearna regresija je z velikimi vrednostmi Pearsonovih koeficientov korelacije potrdila, da ima količina padavin velik vpliv na vse tri komponente prestrezanja padavin (poglavje 5.1). Količina padavin je imela velik vpliv tudi na prostorsko porazdelitev TF pod obema drevesnima vrstama, v primeru bora pa je izstopal še vpliv intenzitete padavin (poglavje 5.2). Različne statistične analize (regresijska drevesa, posplošena ojačana regresijska drevesa, metoda glavnih komponent, multipla korespondenčna analiza) vpliva povprečnih vrednosti spremenljivk na I, TF in SF so prav tako izpostavile vpliv količine padavin v obdobju vegetacije in intenzitete padavin v obdobju mirovanja, med ostalimi spremenljivkami pa so bile v rezultatih analiz izpostavljene kot vplivnejše še trajanje padavin, hitrost vetra in mikrostruktura padavin (število kapljic, njihov premer in hitrost) (poglavje 5.4). Izrazit vpliv mikrostrukture padavin na prepuščanje padavin smo pokazali tudi z minutnim časovnim korakom razvoja dogodka (poglavje 5.3). Povečanje premerov in hitrosti dežnih kapljic je spodbudilo začetek TF pod obema drevesnima vrstama, v primeru bora pa se je delež TF po pojavu večjih in hitrejših dežnih kapljic hipoma povečal. Iz

statističnih analiz smo izključili dogodke s snežnimi padavinami in žledom, saj je bil vzorec teh dogodkov oziroma meritev premajhen za statistično zanesljivo analizo. Ne glede na to pa lahko na podlagi opazovanj raziskovalne ploskve in meritev potrdimo, da je vrsta padavin pomemben vplivni dejavnik na prestrežanje. V primeru snežnih padavin so drevesa na začetku prestregla znatno večje količine snega v primerjavi s količino dežja, kasneje ob taljenju snega pa je večina prvotno prestreženega snega tla dosegla v obliki prepuščenih padavin. Časovni zamik med začetkom padavin na prostem in TF je bil v primeru snežnih padavin večji, poleg tega pa se je pri dogodkih, pri katerih je sneg prešel v dež, zaradi pospešenega taljenja pojavil hiter in nenaden porast TF, kar ni bila značilnost dežnih dogodkov.

Hipoteza 2: Delež prestreženih padavin je odvisen od vegetacijskih parametrov, katerih vpliv je pomemben pri obravnavi različnih drevesnih vrst (listavcev in iglavcev), zanemariti pa jih ne smemo niti za posamezna drevesa iste vrste.

Najbolj vplivne vegetacijske spremenljivke so bile fenofaze, LAI, skladiščna zmogljivost krošnje in skorje ter naklon vej. Fenofaze so znatno vplivale na deleže I, TF in SF pri obeh drevesnih vrstah (poglavje 4.1), vplivi pa so se, tako kot tudi v primeru drugih vegetacijskih spremenljivk, razlikovali med brezo (listavcem) in borom (iglavcem). Ker se vegetacijske spremenljivke, razen fenofaz, indeksa listne površine in skladiščne zmogljivosti krošnje, v obravnavanem obdobju niso opazno spreminjale, smo njihov vpliv analizirali v okviru razprav rezultatov. Pod krošnjo navadne breze smo v obdobju vegetacije zabeležili drugačen vzorec prostorske porazdelitve TF kot v obdobju mirovanja (poglavje 5.2). Zaradi odziva iglic v krošnji bora se je TF pod drevesom hipno povečal ob večjih in hitrejših dežnih kapljicah, česar pri brezi nismo opazili (poglavje 5.3). Večji skladiščni zmogljivosti krošnje in skorje bora pa sta vplivali na kasnejši začetek TF in SF pod borom, za katerega so bile potrebne tudi večje intenzitete padavin, ter na drugačen odziv bora na povečano hitrost vetra v primerjavi z odzivom navadne breze (poglavje 5.4). Da pa vegetacijske spremenljivke različno vplivajo tudi na posamezna drevesa iste vrste, se je izkazalo pri analizi prostorske spremenljivosti TF. Tako bor na naši raziskovalni ploskvi (*Pinus nigra*), kot bor na raziskovalni ploskvi na Japonskem (*Pinus tabulaeformis*) (Fang in sod., 2015) sta imela navzdol usmerjene veje, zaradi česar so pod borom na Japonskem opazili večjo koncentracijo TF na robu krošnje, česar pa mi nismo zabeležili (poglavje 5.2).

Hipoteza 3: Drevesa v urbanem okolju lahko zakasnjajo površinski odtok in znatno zmanjšajo njegovo količino.

Na raziskovalni ploskvi v mestnem parku v Ljubljani smo s pomočjo meritev in analiz izračunali, da navadna breza v povprečju prestreže 23 %, črni bor pa 47 % letnih padavin na prostem. Prestrežene padavine nikoli ne dosežejo tal in tako ne prispevajo k površinskemu odtoku. Površinski odtok tvorijo prepuščene padavine, ki tla pod drevesom dosežejo šele po določenem času, ko se krošnja drevesa zasiči in z nje prične kapljati. Prepuščanje padavin pod brezo se je v povprečju začelo 42 minut po začetku padavin na prostem, pod borom pa po 69 minutah. Izračunane vrednosti prestreženih padavin smo upoštevali pri analizi vpliva zasaditve parkirišča z drevesi na zmanjšanje površinskega odtoka v programu Green Values Storm Water Management Calculator. Z zasaditvijo 200 dreves na parkirišču bi delež neprepustnih površin zmanjšali za približno 10 %. Če bi bila zasajena drevesa navadne breze, bi se letni odtok s parkirišča zmanjšal za 7 %, v primeru zasaditve črnih borovih dreves pa kar za 17 % (poglavje 4.1.6).

6 ZAKLJUČKI

V urbanem parku v centru Ljubljane smo pod navadnimi brezami (*Betula pendula* Roth.) in črnimi borovci (*Pinus nigra* Arnold) tri leta in pol merili prepuščene padavine in odtok po deblu. Izmerjeni deleži prepuščenih padavin (TF) so v celotnem obdobju merjenja za brezo znašali 74 %, za bor pa 53 %, odtok po deblu (SF) pa je bil enak 3,2 % za brezo in 0,07 % za bor. Ocenili smo, da je prestrezanje padavin (I) pri brezi znašalo 23 %, med tem ko bor prestreže 47 % padavin. Največji delež padavin so vsa drevesa prestregla v obdobju vegetacije, najmanjšega pa v obdobju mirovanja (poglavje 4.1). Učinek prestrezanja padavin na odtok v urbanem okolju smo ocenili za primer bližnjega parkirišča, kjer bi z zasaditvijo dreves zmanjšali asfaltirano površino za 10 %. Ob upoštevanju izmerjenih rezultatov prestrezanja, bi se odtok s parkirišča ob zasaditvi navadne breze zmanjšal za 7 %, ob zasaditvi črnega bora pa za 17 %, s čimer smo potrdili tretjo hipotezo.

V disertaciji smo se osredotočili na analizo vpliva meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na prestrezanje padavin. Izvedli smo jo s tremi različnimi pristopi vpliva spremenljivk na prostorsko spremenljivost prepuščanja padavin (TF) (poglavje 5.2), na razvoj TF z minutnim korakom tekom dogodka (poglavje 5.3) in na povprečne vrednosti posameznega dogodka (poglavje 5.4). Vsi trije pristopi analize so pokazali na medsebojni vpliv obeh skupin spremenljivk na delitev padavin s prestrezanjem.

Glede na analize lahko zaključimo, da je ena izmed najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk na prestrezanje količina padavin. Izkazala se je za spremenljivko z največjim vplivom na prostorsko porazdelitev TF pod obema drevesnima vrstama (poglavje 5.2), posredno je določala posledice sprememb mikrostrukture padavin tekom razvoja dogodka (poglavje 5.3), vse uporabljene statistične metode pa so jo izpostavile kot eno najbolj vplivnih spremenljivk za obe drevesni vrsti v obdobju vegetacije (poglavje 5.4). S povečevanjem količine padavin delež prestrezanja padavin (I) upada, deleža TF in odtoka po deblu (SF) pa se povečujeta. Pri količinah padavin, manjših od skladiščne zmogljivosti krošnje (S), so prestrežene vse padavine. TF in SF se tako začneta šele pri zadostni količini padavin, kar pa je pogojeno tudi z njihovo mikrostrukture. Povečanje premerov in hitrosti kapljic je spodbudilo začetek TF v primeru obeh dreves, sicer pa je za začetek TF potrebna večja količina padavin v primeru bora kot pri brezi zaradi večjih vrednosti LAI in skladiščne zmogljivosti krošnje (S) ter skorje bora, kar potrjuje drugo hipotezo (poglavje 4.3).

V obdobju mirovanja se je za najbolj vplivno spremenljivko na prestrezanje padavin izkazala intenziteta padavin (poglavje 5.4), ki je imela velik vpliv tudi na prostorsko porazdelitev TF pod borom (poglavje 5.2). Z večjo intenziteto padavin se je delež prestrezanja padavin zmanjševal, deleža TF in SF pa sta se povečevala. Prav tako pa je bil tudi vpliv intenzitete padavin pogojen z vegetacijskimi lastnostmi dreves. Na to nakazuje že razlika med najbolj vplivnima spremenljivkama glede na obdobji vegetacije in mirovanja. Odziv dreves na povečano količino padavin je drugačen kot na povečano intenziteto. Padavine se nabirajo na vejah in listju ter začnejo kapljati na tla, ko se ne morejo več zadrževati v krošnji. Intenziteta padavin pa vpliva na to, kako hitro se padavine skladiščijo v krošnji in s kakšno energijo krošnjo dosežejo. Večja intenziteta padavin povzroča tudi škropljenje, ki spodbuja sicer zadržane padavine, da padejo na tla. V obdobju vegetacije ima krošnja večjo površino, po kateri se energija padavin lahko razporedi, zato je vpliv intenzitete manjši. V obdobju mirovanja pa, predvsem v primeru navadne breze, padavine padajo neposredno na veje, katerih površina je manjša od površine listja. Tako samo veje že v začetku dogodka zadržijo manj padavin, zato ima v tem obdobju količina padavin manjši pomen kot intenziteta, ki vpliva na vibracije vej, s katerih se stekajo že prestrežene padavine. Zaradi večje hrapavosti in skladiščne zmogljivosti skorje pa je vpliv intenzitete padavin na proces prestrezanja malo manjši za bor kot za brezo.

Poleg pomembnega vpliva količine in intenzitete padavin na proces prestrezanja padavin, kar so izpostavili že številni drugi raziskovalci, pa smo pokazali tudi na nezanemarljiv vpliv

mikrostrukture padavin in tako potrdili prvo hipotezo. Poleg števila kapljic dogodka, ki je povezano tudi s količino padavin, smo z različnimi statističnimi metodami dokazali še vpliv premera in hitrosti dežnih kapljic ter mediane volumskega premera (MVD - določena tako, da ima polovica zabeleženih kapljic premer manjši in polovica premer večji od MVD). Prepuščene padavine pod brezo se z večjimi in hitrejšimi dežnimi kapljicami zmanjšujejo, kar smo pokazali za povprečne vrednosti dogodka (poglavji 5.2 in 5.4), medtem ko med razvojem TF s padavinami tekom dogodka vpliv mikrostrukture za brezo ni bil izrazit. Vpliv lastnosti kapljic na TF pod borom pa je drugačen. Rezultati analiz povprečnih vrednosti (poglavje 5.4) kažejo, da se v obdobju vegetacije TF povečuje z večanjem MVD, v obdobju mirovanja pa se TF povečuje z večjim premerom kapljic. Ker je vrednost MVD pokazatelj velikosti kapljic, lahko zaključimo, da se z večjim premerom dežnih kapljic TF pod borom povečuje. Ta vpliv pa smo potrdili še z detajlno minutno analizo vpliva mikrostrukture na razvoj TF pod borom (poglavje 5.3). Pokazali smo, da pojav večjih in hitrejših dežnih kapljic v trenutku vpliva na povečanje deleža TF, ki lahko v primeru že zasičene krošnje preseže količino padavin na prostem. Različen odziv dreves na mikrostrukture padavin prav tako lahko pripišemo njihovim vegetacijskim lastnostim. Drugi raziskovalci so namreč pokazali, da je skladiščna zmogljivost listja večja kot skladiščna zmogljivost iglic ter da se skladiščna zmogljivost listja poveča pri dežnih kapljicah z večjim premerom v primerjavi s tisto pri bolj drobnih kapljicah. Te sklepe smo z opisanimi ugotovitvami posredno potrdili tudi v disertaciji.

Vpliv vegetacijskih parametrov, ki se znatno razlikujejo med obravnavanimi drevesnimi vrstama, smo izpostavili v sklopu analize vpliva meteoroloških spremenljivk in tako potrdili drugo hipotezo. Izmed vegetacijskih spremenljivk je imela največji vpliv fenofaza, ki je posredno določala tudi velika vpliva indeksa listne površine in skladiščne zmogljivosti krošnje. Fenofaza je bila poleg količine padavin najbolj vplivna spremenljivka na prostorsko porazdelitev TF pod brezo (poglavje 5.2). V obdobju vegetacije je bil namreč prostorski vzorec TF drugačen kot v obdobju mirovanja. To je povezano s spremembami v vzorcu S krošnje in poteku prerazporeditve I ob prisotnosti in odsotnosti listja. Kljub temu, da o takih spremembah v primeru vednozelenega črnega bora ne moremo govoriti, pa smo pokazali, da je vpliv fenofaze potrebno upoštevati tudi v primeru tega drevesa. Tako za brezo kot za bor sta se vrednosti S in LAI (poglavje 4.3) ter izmerjeni deleži I, TF in SF (poglavje 5.1) razlikovali po fenofazah. Poleg tega smo za obe drevesi opazili še različno pomemben vpliv količine in intenzitete padavin v obdobjih vegetacije in mirovanja. V teh dveh fenofazah pa so bile za začetek TF in SF pri brezi in boru potrebne tudi različne količine padavin.

Proces prestrezanja padavin je pomemben in vpliven element hidrološkega kroga. Njegov pomen je že kar nekaj časa priznan za območja gozdov in nasadov, v zadnjem obdobju pa se uveljavlja tudi za drevesa v urbanih območjih. Na delež prestreženih padavin imajo velik vpliv različne spremenljivke, ki so med seboj povezane. Tako lahko določen odziv v procesu prestrezanja padavin zaradi enega vpliva razložimo z upoštevanjem več spremenljivk. Izolirana analiza le ene vplivne spremenljivke ni smiselna, saj upoštevanje različnih vplivov pomaga pri oblikovanju celostne slike. Za boljše razumevanje njihovih vplivov pa se je poleg upoštevanja povprečnih vrednosti dogodka izkazala tudi analiza z minutnim korakom na nivoju razvoja dogodka. Po nam znanih podatkih pa je bila v analize prvič vključena tudi mikrostruktura padavin, za katero smo v raziskavi potrdili, da pomembno vpliva na prestrezanje padavin. Vplivi meteoroloških spremenljivk so se razlikovali za posamezni drevesni vrsti, glede na fenofaze in tudi po komponentah prestrezanja padavin (I, TF, SF). Pokazali smo, da za ovrednotenje teh razlik potrebujemo dolge nize merjenih podatkov v posameznih fenofazah za različne drevesne vrste.

7 POVZETEK

Prestrezanje padavin je pomemben element hidrološkega kroga, ki se pojavlja na območjih, pokritih z vegetacijo. Padavine se ob stiku z vegetacijo delijo na prestrežene padavine (I), ki nikoli ne dosežejo tla, in na prepuščene padavine (TF) ter odtok po deblu (SF), ki tla dosežejo. S prepuščanjem padavin se tako spreminjata količina in način, na katerega padavine dosežejo tla pod vegetacijo, kar vpliva tudi na druge naravne procese, kot so površinski odtok, erozija tal, razporeditev vlage v tleh in kroženje hranil. Zato je poznavanje procesa prestrezanja padavin in deležev, ki se zadržijo v krošnji ali dosežejo tla, pomembno za razumevanje hidrološkega kroga in odločanje o posegih v naravno okolje.

V uvodnem delu je na kratko predstavljen proces prestrezanja padavin, naštetni so njegovi vplivi v naravnem okolju ter meteorološke in vegetacijske spremenljivke, ki na proces vplivajo. Pripravljen je tudi pregled raziskav, ki so bile na tem področju že narejene v Sloveniji. V nadaljevanju smo opisali problematiko in relevantnost problema, iz česar smo izhajali pri postavitvi treh hipotez in pri zastavljanju opisanih ciljev.

V nadaljevanju smo proces in njegove vplive podrobneje opisali v pregledu literature. Shematično smo prikazali posamezne komponente procesa prestrezanja padavin (I, TF, SF) in razložili tri načine, na katere prepuščene padavine dosežejo tla (neposredno, kapljanje, škropljenje). Na delitev padavin pri procesu prestrezanja vplivajo meteorološke spremenljivke, ki opisujejo lastnosti padavinskega dogodka, in vegetacijske spremenljivke, ki opisujejo lastnosti vegetacije, ki padavine prestreza. V okviru meteoroloških spremenljivk smo obravnavali količino, intenziteto in trajanje padavin, hitrost in smer vetra, temperaturo in vlažnost zraka ter število dežnih kapljic, njihovo velikost, hitrost in mediano volumnskega premera. Opisali pa smo tudi vegetacijske spremenljivke, ki se najpogosteje upoštevajo v povezavi s procesom prestrezanja padavin, to so indeks listne površine, skladiščna zmogljivost krošnje, zastrtost s krošnjo, fenofaze, projicirana površina drevesne krošnje, prsni premer drevesnega debla, višina drevesa, naklon vej ter debelina, tekstura in skladiščna zmogljivost skorje. Vsako spremenljivko smo opisali in navedli nekaj primerov njihovega upoštevanja v raziskavah. Predstavili smo tudi prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod krošnjami dreves. Zaradi prej opisanih spremenljivk se prestrežene padavine v krošnji prerazporejajo in tla pod krošnjo v posameznih točkah dosežajo v različnih količinah. S širjenjem urbanizacije in prepoznavnostjo procesa prestrezanja padavin pa postajajo drevesa kot element zelene infrastrukture čedalje bolj zaželeni pri uravnavanju površinskega odtoka v mestih, kar je še en vidik, ki smo ga predstavili v tem poglavju.

V okviru doktorske disertacije smo od 1. 1. 2014 do 30. 6. 2017 pod navadnimi brezami (*Betula pendula* Roth.) in črnimi bori (*Pinus nigra* Arnold) v manjšem mestnem parku v Ljubljani merili prepuščene padavine in odtok po deblu. Na raziskovalni ploskvi smo z dežemerom in disdrometrom merili tudi padavine na prostem, za opazovana drevesa smo določili vrednosti vegetacijskih spremenljivk, vrednosti nekaterih drugih meteoroloških spremenljivk pa smo privzeli z avtomatske postaje državne merilne mreže Ljubljana Bežigrad. Raziskovalno ploskev, metode dela in uporabljene merilne inštrumente smo tudi podrobno opisali. Predstavili in razložili pa smo še vse uporabljene statistične metode (regresijska analiza, hierarhično razvrščanje, regresijska drevesa, posplošena ojačana regresijska drevesa, metoda glavnih komponent in multipla korespondenčna analiza) in programska orodja (R, Orange, FV2200, Green Values Storm Water Management Calculator) za analizo izmerjenih podatkov.

V drugem, praktičnem delu disertacije, smo najprej predstavili rezultate meritev padavin na prostem, prepuščenih padavin in odtoka po deblu pod brezo in borom. Iz izmerjenih komponent smo izračunali vrednosti padavin, ki so jih drevesa prestregla, kar smo upoštevali še pri oceni zmanjšanja površinskega odtoka z bližnjega parkirišča v primeru zasaditve obravnavanih dreves. V nadaljevanju smo navedli še izmerjene vrednosti vseh meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk.

Vpliv meteoroloških in vegetacijskih spremenljivk na prestrezanje in prepuščanje padavin ter na odtok po deblu smo analizirali na tri načine. Najprej smo analizirali prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin (TF) pod krošnjama navadne breze in črnega bora. Izkazalo se je, da izmed vegetacijskih spremenljivk na prostorsko porazdelitev TF pod borom vpliva zastrtost s krošnjo, pod brezo pa oddaljenost od debla ter fenofaze. V obdobju vegetacije smo namreč pod brezo zabeležili drugačen vzorec razporeditve TF kot v obdobju mirovanja. Poleg tega je v primeru navadne breze velik vpliv imela še količina padavin, v primeru bora pa količina in intenziteta padavin. Spremljali smo tudi delež prepuščenih padavin v odvisnosti od mikrostrukture padavin tekom razvoja dogodka s 5-minutnim korakom. Izkazalo se je, da večje in hitrejše dežne kapljice spodbujajo začetek TF pod obema drevesoma. Odziv dreves na pojav večjih in hitrejših kapljic tekom dogodka pa je bil drugačen zaradi vpliva vegetacijskih spremenljivk, kot so različne lastnosti listov in iglic, hrapavost in skladiščna zmogljivost skorje ter naklon vej. V primeru bora so večje in hitrejše kapljice namreč hipno povečale TF, pri brezi pa odziva nismo opazili. Na koncu pa smo z različnimi statističnimi metodami analizirali še vpliv povprečnih vrednosti meteoroloških spremenljivk dogodka na deleže I, TF in SF po posameznih fenofazah. Za najbolj vplivno meteorološko spremenljivko v obdobju vegetacije se je izkazala količina padavin, v obdobju mirovanja pa intenziteta padavin. Tudi po tem pristopu se je upoštevanje mikrostrukture padavin izkazalo za pomembno, saj so večje kapljice zmanjševale delež prestrezanja padavin črnega bora, v primeru navadne breze pa so ga povečevale. Poleg izrazitega vpliva fenofaze pa so bili različni odzivi navadne breze in črnega bora pogojeni tudi s skladiščno zmogljivostjo krošnje in skorje, indeksom listne površine, naklonom vej, lastnostmi listja oziroma iglic ter teksturo skorje.

V doktorski disertaciji smo pokazali, da imajo tako meteorološke kot tudi vegetacijske spremenljivke velik vpliv na proces prestrezanja padavin. Ker pa so spremenljivke med seboj povezane, lahko proces smiselno razložimo le s hkratnim upoštevanjem več spremenljivk. Pokazali smo, da na proces prestrezanja padavin pomembno vpliva mikrostruktura padavin in da je fenofaze smiselno upoštevati tudi pri analizah vednozelenih dreves.

8 SUMMARY

Rainfall interception is an important element of the hydrological cycle and can be observed in the areas covered with vegetation. When rainfall reaches the vegetation, it is divided on intercepted rainfall (I) never reaching the ground and throughfall (TF) and stemflow (SF) reaching the ground eventually. Rainfall interception alters the amount and the way of rainfall reaching the ground under the vegetation which influences other natural processes such as surface runoff, soil erosion, soil moisture distribution, and nutrient cycle. Therefore knowledge about the rainfall interception process and the amounts of rainfall kept in the canopy or reaching the ground is very important for understanding the hydrological cycle and for decision making on spatial interventions.

Rainfall interception is briefly presented in the introduction, where also its influence on the natural processes and the influences of meteorological and vegetation variables on this process are described. Additionally, an overview of the research done in Slovenia on this topic is provided. We have also described the problems and relevance of this research topic, which was used as a basis for the hypotheses and the goals of the dissertation.

As part of the literature review the process and its influences were described in detail. The components of rainfall interception (I, TF, SF) were schematically shown and the three ways of throughfall reaching the ground were described (directly, dripping, splash). The shares of the rainfall partitioning components depend on the meteorological variables describing rainfall event properties and the vegetation variables giving the characteristics of the vegetation. The meteorological variables included in this research were the amount, intensity, and duration of rainfall, wind velocity and direction, air temperature and humidity, number of raindrops, their diameter, velocity, and median volume diameter. The vegetation variables which are commonly analysed in relation to rainfall interception were also described. These are leaf area index, canopy storage capacity, canopy coverage, phenoseasons, projected canopy area, diameter at breast height, tree height, branch inclination, and bark thickness, texture and storage capacity. Each variable was described and a few examples of its use in research were given. We also described the throughfall spatial variability under the tree canopies. Due to the previously mentioned variables the intercepted rainfall translocates in the canopy which leads to different amounts of throughfall reaching the ground in various points. Due to urbanization and recognition of the rainfall interception, trees are becoming increasingly important as part of the green infrastructure, regulating the surface runoff, which was also presented.

As part of this doctoral dissertation, measurements of throughfall and stemflow under common silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold) trees were taken from 1 January 2014 to 30 June 2017 in a small urban park in Ljubljana. At the study plot also rainfall in the open was measured with a rain gauge and with a disdrometer. The values of vegetation variables were determined for the observed trees. Additionally data on other meteorological variables were adopted from the Ljubljana Bežigrad automatic station of the national measurement network. The study plot, methods, and the measurement equipment were described. Also the statistical methods used (regression analysis, hierarchical clustering, regression trees, generalized boosted regression trees, principal components analysis, and multiple correspondence analysis) and software (R, Orange, FV2200, Green Values Storm Water Management Calculator) were presented.

In the second, practical part of the dissertation, the results of measured rainfall in the open, and throughfall and stemflow under the trees were presented. The intercepted rainfall was calculated from the measured components. It was further used for estimation of the surface runoff reduction at the nearby parking lot after planting the considered trees. Additionally, all the measured values of meteorological and vegetation variables were listed.

The influences of meteorological and vegetation parameters on rainfall interception, throughfall, and stemflow were analysed using three approaches. First, we analysed the

throughfall (TF) spatial variability under the birch and pine tree canopies. Among all vegetation parameters, the canopy coverage was the most influential for the TF spatial variability under the pine tree, while the distance from the stem and the phenophase were the most influential in the case of the birch tree. During the vegetation period the pattern of TF spatial variability under the birch tree was different than that during the dormant period. Additionally, high influence of rainfall amount was observed for birch, while for pine the rainfall amount and intensity were the most influential. Also, the amount of throughfall in correlation to the rainfall microstructure was analysed during the event with a 5-minute time step. We have shown that larger and faster raindrops initiate TF under both observed tree species. However, the response of the trees to the changes in the microstructure during the event was different due to specific properties of leaves and needles, texture and storage capacity of bark, and branch inclination. In the case of the pine tree the faster and larger raindrops initially increased TF, while no response was observed for the birch tree. Finally, the influence of the average event's values of meteorological variables on I, TF, and SF according to phenoseasons was analysed using various statistical methods. The most influential meteorological variable in the vegetation period was the amount of rainfall, while in the dormant period it was the rainfall intensity. Also this type of analysis confirmed that the rainfall microstructure importantly influences rainfall interception, as larger raindrops reduced the rainfall interception by the pine tree and increased the rainfall interception by the birch tree. In addition to the distinct influence of the phenoseasons, the response of the birch and pine trees was also related to the storage capacity of canopy and bark, leaf area index, branch inclination, properties of the leaves and needles, and bark texture.

We have shown that meteorological and vegetation parameters have a significant influence on the rainfall interception. Due to the correlation between the variables, the process can be logically explained only when the variables are taken into account at the same time. Furthermore, we have demonstrated that rainfall interception is significantly influenced also by rainfall microstructure and that in the case of evergreen trees it is reasonable to take phenoseasons into account as well.

VIRI

- Abas, M.R., Ahmad-Shah, A., Nor Awang, M. 1992. Fluxes of ions in precipitation, throughfall and stemflow in an urban forest in Kuala Lumpur, Malaysia. *Environmental Pollution* 75: 209–213.
- Aboal, J.R., Jimenez, M.S., Morales, D., Hernandez, J.M. 1999. Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. *Agricultural and Forest Meteorology* 97: 73–86.
- Ahmed, A., Tomar, J.M.S., Mehta, H., Alam, N.M., Chaturvedi, O.P. 2015. Influence of canopy architecture on stemflow in agroforestry trees in Western Himalayas. *Current Science* 109: 759–764.
- Andre, F., Jonard, M., Ponette, Q. 2008. Precipitation water storage capacity in a temperate mixed oak–beech canopy. *Hydrological Processes* 22: 4130–4141.
- Andre, F., Jonard, M., Jonard, F., Ponette, Q. 2011. Spatial and temporal patterns of throughfall volume in a deciduous mixed-species stand. *Journal of Hydrology* 400: 244–254.
- Appleton, B., Horsley, J., Harris, V., Eaton, G., Fox, L., Orband, J. 2009. Trees for parking lots and paved areas. <https://pubs.ext.vt.edu/430/430-028/430-028.html> (Pridobljeno 10. 9. 2015)
- Arhiv meritev. 2017. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje. <http://www.meteo.si/met/si/archive/> (Pridobljeno 9. 8. 2017)
- Armson, D., Stringer, P., Ennos, A.R. 2013. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening* 12: 282–286.
- Asadian, Y. 2010. Rainfall interception in an urban environment. Magistrsko delo. British Columbia, University of British Columbia, Faculty of Graduate Studies: 84 str.
- Asadian, Y., Weiler, M. 2009. A new approach in measuring rainfall interception by urban trees in coastal British Columbia. *Water Quality Research Journal of Canada* 44: 16–25.
- Asner, G.P., Palace, M., Keller, M., Pereira, J., Silva, J.N.M., Zweede, J.C. 2002. Estimating canopy structure in an Amazon forest from laser range finder and IKONOS satellite observations. *Biotropica* 34: 483–492.
- Barbier, S., Balandier, P., Gosselin, F. 2009. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. *Annals of Forest Science* 66: 602p1–602p11.
- Bartelink, H.H. 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* 54: 39–50.
- Bäse, F., Elsenbeer, H., Neill, C., Krusche, A.V. 2012. Differences in throughfall and net precipitation between soybean and transitional tropical forest in the southern Amazon, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 159: 19–28.
- Bassette, C., Bussiere, F. 2008. Partitioning of splash and storage during raindrop impacts on banana leaves. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 991–1004.
- Bassuk, N., Curtis, D.F., Marranca, B.Z., Neal, B. 2009. Recommended urban trees: site assessment and tree selection for stress tolerance. Urban Horticulture Institute, New York. www.hort.cornell.edu/uhi/outreach/recurbtree/pdfs/~recurbtrees.pdf (Pridobljeno 10. 9. 2015)
- Bellot, J., Escarre, A. 1998. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest. *Annals of Forest Science* 55: 847–865.

- Benyon, R.G., Doody, T.M. 2014. Comparison of interception, forest floor evaporation and transpiration in *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydrological Processes* 29: 1173–1187.
- Bernatzky, A. 1983. The effects of trees on the urban climate. V: *Trees in the 21st century: based on the first International Arboricultural Conference / sponsored by the Arboricultural Association in conjunction with the International Association of Arboriculture*. Berkhamsted, Herts., A.B. Academic Publishers: p. 59-76.
- Blocken, B., Carmeliet, J. 2004. Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples. *Journal of Building Physics* 28: 107–159.
- Brack, C. 1999. Tree crown: forest measurement and modelling. <http://fennerschool-associated.anu.edu.au/mensuration/crown.htm> (Pridobljeno 8. 7. 2014)
- Brack, C. 2009. Standard point on tree bole for measurement. <https://fennerschool-associated.anu.edu.au/mensuration/dob.htm> (Pridobljeno 11. 1. 2018)
- Brandt, C.J. 1989. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena* 16: 507–524.
- Breda, N.J.J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54: 2403–2417.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. *Osnove hidrologije*. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Brown, S., Pearson, T., Slaymaker, D., Ambagis, S., Moore, N., Novelo, D., Sabido, W. 2005. Creating a virtual tropical forest from three dimensional aerial imagery to estimate carbon stocks. *Ecological Applications* 15: 1083–1095.
- Buijnzeel, L.A. 2000. Forest hydrology. V: Evans, J.S. (ur.) *The Forestry Handbook*. Oxford, Blackwell: p. 301–343.
- Brun, S.E., Band, L.E. 2000. Simulating runoff behaviour in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems* 24: 5–22.
- Brus, R. 2012. *Drevesne vrste na Slovenskem*. 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana, samozaložba R. Brus: 406. str.
- Brvar, B. 2007. *Statistika*. Ljubljana, Fakulteta za varnostne vede: 352 str.
- Bryant, M.L., Bhata, S., Jacobs, J.M. 2005. Measurements and modelling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology* 312: 95–108.
- Buba, T. 2013. Relationships between stem diameter at breast height (DBH), tree height, crown length, and crown ratio of *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn in the Nigerian Guinea Savanna. *African Journal of Biotechnology* 12: 3441–3446.
- Buttle, J.M., Farnsworth, A.G. 2012. Measurement and modelling of canopy water partitioning in a reforested landscape: The Ganaraska Forest, southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology* 466–467: 103–114.
- Buttle, J.M., Toye, H.J., Greenwood, W.J., Bialkowski, R. 2014. Stemflow and soil water recharge during rainfall in a red pine chronosequence on the Oak Ridges Moraine, southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology* 517: 777–790.
- Calder, I.R., Hall, R.L., Prasanna, K.T. 1993. Hydrological impact of *Eucalyptus* plantation in India. *Journal of Hydrology* 150: 635–648.

- Calder, I.R. 1996a. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. *Journal of Hydrology* 185: 363–378.
- Calder, I.R. 1996b. Rainfall interception and drop size - development and calibration of the two-layer stochastic interception model. *Tree Physiology* 16: 727 – 732.
- Calder, I.R., Hall, R.L., Rosier, P.T.W., Bastable, H.G., Prasanna, K.T. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 2. Experimental determination of the wetting functions and two-layer stochastic model parameters for five tropical tree species. *Journal of Hydrology* 185: 379–388.
- Cao, Y., Ouyang, Z.Y., Zheng, H., Huang, Z.G., Wang, X.K., Miao, H. 2008. Effects of forest plantations on rainfall redistribution and erosion in the red soil region of southern China. *Land Degradation & Development* 19: 321–330.
- Carlyle-Moses, D.E., Park, A.D., Cameron, J.L. 2010. Modelling rainfall interception loss in forest restoration trials in Panama. *Ecohydrology* 3: 272–283.
- Carlyle-Moses, D.E., Flores Laureano, J.S., Price, A.G. 2004. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology* 297: 124–135.
- Carlyle-Moses, D.E., Lishman, C.E., McKee, A. 2014. A preliminary evaluation of throughfall sampling techniques in a mature coniferous forest. *Journal of Forestry Research* 25: 407–413.
- Carlyle-Moses, D.E., Gash, J.H.C. 2011. Rainfall interception loss by forest canopies. V: Levia, D.F. (ur.), Carlyle-Moses, D.E. (ur.), Tanaka, T. (ur.). *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Ecological Series 216. Heidelberg, Springer-Verlag: 407–424.
- Carnol, M., Bazgir, M. 2013. Nutrient return to the forest floor through litter and throughfall under 7 forest species after conversion from Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 309: 66–75.
- Cesar, P. 2011. Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cesar): 133 str.
- Chang, S.C., Matzner, E. 2000. The effect of beech stemflow on spatial pattern of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes* 14: 135–144.
- Chapman, G. 1948. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation. *Transactions, American Geophysical Union* 29: 664 670.
- Chen, J.M. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80: 135– 163.
- Chen, J.M., Rich, P.M., Gower, S.T., Norman, J.M., Plummer, S. 1997. Leaf area index of boreal forests - Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research* 102: 29429–29443.
- CNT. 2015. Green Values Stormwater Toolbox. <http://greenvalues.cnt.org/> (Pridobljeno 7. 9. 2015).
- Coenders-Gerrits, A.M.J., van der Ent, R.J., Bogaard, T.A., Wang-Erlandsson, L., Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G. 2014. Uncertainties in transpiration estimates. *Nature* 506: E1–E2.
- Cosandey, C., Martin, C., Savina, L., Didon-Lescot, J.F. 2003. The impact of interception losses on the water balance in forested mountains range. V: Holko, L. (ur.), Miklanek, P. (ur.).

Interdisciplinary approaches in small catchment hydrology: monitoring and research. Proceedings of 9th ERB conference. Paris, UNESCO's workshops: pp.79-84.

Crockford, R.H., Richardson, D.P. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903–2920.

Črepinšek, Z. 2002. Napovedovanje fenološkega razvoja rastlin na osnovi agrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (samozaložba Z. Črepinšek): 135 str. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=54806&lang=slv>

Danson, F.M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., Allgöwer, B. 2007. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *Geoscience and Remote Sensing Letters* 4: 157-160.

Deblonde, G., Penner, M., Royer, A. 1994. Measuring leaf area index with the Li-Cor LAI-2000 in pine stands. *Ecology* 75: 1507-1511.

Deguchi, A., Hattori, S., Park, H. 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* 318: 80–102.

Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hočevár, T., Milutinović, M., Možina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Starič, A., Stajdohar, M., Umek, L., Žagar, L., Žbontar, J., Žitnik, M., Zupan, B. 2013. Orange: data mining toolbox in Python. *Journal of Machine Learning Research* 14: 2349–2353.

Dietz, J., Hölscher, D., Leuschner, C., Hendrayanto. 2006. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 237: 170–178.

Dohnal, M., Černý, T., Votrubová, J., Tesar, M. 2014. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62: 277–284.

Dunkerley, D. 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: A brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes* 14: 669–678

Dwyer, J.F., McPherson, E.G., Schroeder, H.W., Rowntree, R.A. 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture* 18: 227–234.

Elith, J., Leathwick, J.R., Hastie, T. 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77: 802 –813.

Eschner, A.R. 1967. Interception and soil moisture distribution. V: Sopper, W.E. (ur.), Lull, H.W. (ur.). Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, August 29–September 10. New York, Pergamon Press: 191–200.

Evropska komisija. 2010. Zelena infrastuktura. http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/green_infra/sl.pdf (Pridobljeno 30. 1. 2018)

Falkengren-Grerup, U. 1989. Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in Southern Sweden. *Journal of Applied Ecology* 26: 341–352.

Fang, S., Zhao, C., Jian, S. 2016. Spatial variability of throughfall in a *Pinus tabulaeformis* plantation forest in Loess Plateau, China. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31: 467-476.

- Fassnacht, K.S., Gower, S.T., MacKenzie, M.D., Nordheim, E.V., Lillesand, T.M. 1997. Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment* 61: 229-245.
- Ferligoj, A. 1989. Razvrščanje v skupine. Teorija in uporaba v družboslovju. Ljubljana, Jugoslovansko združenje za sociologijo, Sekcija za metodologijo in statistiko: 182 str. http://dk.fdv.uni-lj.si/metodoloskizvezki/Pdfs/Mz_4Ferligoj.pdf (Pridobljeno 3. 3. 2013)
- Fernandes, R.P., Silva, R.W.C., Salemi, L.F., Andrade, T.M.B., Moraes, J.M., Van Dijk, A.I.J.M., Martinelli, L.A. 2017. The influence of sugarcane crop development on rainfall interception losses. *Journal of Hydrology* 551: 532–539.
- Few, S., Edge, P. 2009. Introduction to geographical data visualization. *Visual Business Intelligence* 6: 1–11.
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W., Knoblich, K. 2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes* 19: 1355–1371.
- Ford, E.D., Deans, J.D. 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology* 15: 905-917.
- Forestry tools. 2014. <http://www.forestrytools.com.au/index.php?id=28> (Pridobljeno 10. 7. 2014.).
- Frasson, R., Krajewski, W. 2011. Characterization of the drop-size distribution and velocity – diameter relation of the throughfall under the maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1244-1251.
- Friedman, J.H. 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics* 29: 1189–1232.
- Friedman, J.H., Meulman, J.J. 2003. Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine* 22: 1365–1381.
- Friesen, P., Park, A., Sarmiento-Serrud, A.A. 2013. Comparing rainfall interception in plantation trials of six tropical hardwood trees and wild sugar cane *Saccharum spontaneum* L. *Ecohydrology* 6: 765–774.
- Frischbier, N., Wagner, S. 2015. Detection, quantification and modelling of small-scale lateral translocation of throughfall in tree crowns of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Journal of Hydrology* 522: 228–238.
- Galdos, F.V., Alvarez, C., Garcia, A., Revilla, J. 2012. Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Hydrology* 468–469: 213–228.
- Garcia-Estringana, P., Alonso-Blazquez, N., Alegre, J. 2010. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology* 389: 363–372.
- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105: 43–55.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., Lachaud, G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology* 170: 79–86.
- Gerrits, A.M.J., Pfister, L., Savenije, H.H.G. 2010. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest *Hydrological Processes* 24: 3011–3025.
- Geißler, C., Lang, A.C., von Oheimb, G., Härdtle, W., Baruffol, M., Scholten, T. 2012. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall - The importance of stand density, species

identity and tree architecture in subtropical forests in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 156: 31 - 40.

Goebes, P., Seitz, S., Kühn, P., Li, Y., Niklaus, P.A., von Oheimb, G., Scholten, T. 2015a. Throughfall kinetic energy in young subtropical forests: Investigation on tree species richness effects and spatial variability. *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 148 - 159.

Goebes, P., Bruelheide, H., Härdtle, W., Kröber, W., Kühn, P., Li, Y., Seitz, S., von Oheimb, G., Scholten, T. 2015b. Species-specific effects on throughfall kinetic energy in subtropical forest plantations are related to leaf traits and tree architecture. *PLoS ONE* 10: e0128084.

Gomez, J.A., Vanderlinden, K., Giraldez, J.V., Fereres, E. 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management* 55: 53-70.

Gomez-Peralta, D., Oberbauer, S.F., McClain, M.E., Philippi, T.E. 2008. Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management* 255: 1315–1325.

Grace, J.M., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M. 2006. Hydrologic and water quality effects of thinning Loblolly Pine. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 49: 645– 654.

Guevara-Escobar, A., Gonzalez-Sosa, E., Veliz-Chavez, C., Ventura-Ramos, E., Ramos-Salinas, M. 2007. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area. *Journal of Hydrology* 333: 532–541.

Guillemette, F., Plamondon, A.P., Prevost, M., Levesque, D. 2005. Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: peak flow comparison with 50 world-wide basin studies. *Journal of Hydrology* 302: 137–153.

Gunn, R., Kinzer, G. D. 1949. The terminal fall velocity for water droplets in stagnant air. *Journal of the Atmospheric Sciences* 6, 243-248.

Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C. 1995. *Multivariate Data Analysis*. Četrta izdaja. New Jersey, Prentice Hall College Division: 745 str.

Hale, S.E., Edwards, C. 2002. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology* 112: 51–56.

Hall, R.L., Calder, I.R. 1993. Drop size modification by forest canopies - measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research* 90: 465–470.

Hall, R.L., Calder, I.R., Nimal Gunawardena, E.R., Rosier, P.T.W. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 3. Implementation and comparative performance of the stochastic model using data from a tropical site in Sri Lanka. *Journal of Hydrology* 185: 389-407.

Hall, R.L. 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology* 280: 1–12.

Hansen, K. 1995. In-canopy throughfall measurements in Norway spruce: water flow and consequences for ion fluxes. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 2259–2264.

Haynes, J.L. 1940. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. *Journal of the American Society of Agronomy* 32:176-184.

He, Z., Yang, J., Du, J., Zhao, W., Liu, H., Chang, X. 2014. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology* 188: 58–63.

Hedstrom, N.R., Pomeroy, J.W. 1998. Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes* 12: 1611–1625.

- Helvey, J.D., Patric, J.H. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. *Water Resources Research* 1: 193–206.
- Herbst, M., Rosier, P.T.W., McNeil, D.D., Harding, R.J., Gowing, D.J. 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1655–1667.
- Herwitz, S.R. 1987. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surface Processes and Landforms* 12: 425–432.
- Herwitz, S.R., Slye, R.E. 1992. Spatial variability in the interception of inclined rainfall by a tropical rainforest canopy. *Selbyana* 13: 62–71.
- Hobely, E., Wilson, B., Wilkie, A., Gray, J., Koen, T. 2015. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. *Plant Soil* 390: 111–127.
- Holder, C.D. 2013. Effects of leaf hydrophobicity and water droplet retention on canopy storage capacity. *Ecohydrology* 6: 483–490.
- Hölscher, D., Köhler, L., van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A. 2004. The importance of epiphytes to total rainfall interception by a tropical montane rain forest in Costa Rica. *Journal of Hydrology* 292: 308–322.
- Honda, E.A., Mendonça, A.H., Durigan, G. 2014. Factors affecting the stemflow of trees in the Brazilian Cerrado. *Ecohydrology* 8: 1351–1362.
- Hood, S. 2007. Bark thickness. http://www.firewords.net/definitions/bark_thickness.htm (Pridobljeno 10. 7. 2014).
- Hoppe, E. 1896. Precipitation measurements under tree crowns. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchswesen Österreichs* 21: 1–75. (Prevod iz nemščine Krappe, A.H. 1935. Division of Silvics, U.S.Forest Serv., Trans. No. 291).
- Hörmann, G., Brandig, A., Clemen, T., Herbst, M., Hinrichs, A., and Thamm, F. 1996. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 131–148.
- Horton, R.E. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review* 47: 603–623.
- Hosking, J.R.M., Wallis, J.R. 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge, Cambridge University Press: 224 str.
- Huang, J.Y., Black, T.A., Jassal, R.S., Les Lavkulich, L.M. 2017. Modelling rainfall interception by urban trees. *Canadian Water Resources Journal* 42: 336–348.
- Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J. 2017. FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining. <https://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR> (Pridobljeno 20. 11. 2017)
- Hutchings, N.J., Milne, R., Crowther, J.M. 1988. Canopy storage capacity and its vertical distribution in a Sitka spruce canopy. *Journal of Hydrology* 104: 161–171.
- Iida, S., Levia, D.F., Shimizu, A., Shimizu, T., Tamai, K., Nobuhiro, T., Kabeya, N., Noguchi, S., Sawano, S., Araki, M. 2017. Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. *Journal of Hydrology* 548: 770–783.
- Inkiläinen, N.M., McHale, M.R., Blank, G.B., James, A.L., Nikinmaa, E. 2013. The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA. *Landscape & Urban Planning* 119: 91–103.

- Iroume, A., Huber, A. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Processes* 16: 2347–2361.
- Jackson, I.J. 1975. Relationships between rainfall variables and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology* 24: 215–238.
- Jackson, N.A. 2000. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 323–336.
- Jackson, R.B., Jobbagy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., le Maitre, D.C., McCarl, B.A., Murray, B.C. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310: 1944–1947.
- Joffre, R., Rambal, S. 1993. How tree cover influences the water balance of Mediterranean Rangelands. *Ecology* 74: 570–582.
- Johansson, T. 1999. Biomass equations for determining fractions of pendula and pubescent birches growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy* 16: 223–238.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19–35.
- Jonckheere, I., Muys, B., Coppin, P. 2005. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree Physiology* 25: 723–732.
- Jones, J.A., Grant, G.E. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 32: 959–974.
- Kato, H., Onda, Y., Nanko, K., Gomi, T., Yamanaka, T., Kawaguchi, S. 2013. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations. *Journal of Hydrology* 504: 1–11.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Weiler, M. 2005. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology* 314: 263–274.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Weiler, M. 2006. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity. *Advances in Water Resources* 29: 974–986.
- Keim, R.F., Link, T.E. 2018. Linked spatial variability of throughfall amount and intensity during rainfall in a coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 248: 15–21.
- Kermavnar, J., Vilhar, U. 2017. Canopy precipitation interception in urban forests in relation to stand structure. *Urban Ecosystems* 20: 1373–1387.
- Kirnbauer, M.C., Baetz, B.W., Kenney, W.A. 2013. Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and underutilized urban land parcels. *Urban Forestry & Urban Greening* 12: 401–407.
- Kittredge, J. 1948. *Forest Influences*. New York, Dover Publications Inc.: 394 str.
- Klaassen, W., Bosveld, F., de Water, E. 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology* 212–213: 36–50.
- Kladnik, D., Petek, F. 2007. Kmetijstvo in spreminjanje rabe tal na Ljubljanskem polju. *Geografski vestnik* 79: 25–40.
- Kogovšek, J. 2009. Vizualizacija informacij. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta (samozaložba J. Kogovšek): 44 str.

- Konishi, S., Tani, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Sahat, M.M., Nik, A.R., Niiyama, K., Okuda, O. 2006. Characteristics of spatial distribution of throughfall in a lowland tropical rainforest, Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management* 224: 19-25.
- Konrad, C.P., Booth, D.B. 2002. Hydrologic trends associated with urban development for selected streams in the Puget Sound basin, western Washington. *Water-Resources Investigations Report* 02-4040. <https://pubs.usgs.gov/wri/wri024040/pdf/WRIR02-4040.pdf> (Pridobljeno 6. 9. 2014)
- Košmelj, K. 2007. Metoda glavnih komponent: osnove in primer. *Acta agriculturae Slovenica* 89: 159-172.
- Košmelj, K., Breskvar Žaucer, L. 2006. Metode za razvrščanje enot v skupine; osnove in primer. *Acta agriculturae Slovenica* 87: 299–310.
- Kotar, M., Brus, R. 1999. Naše drevesne vrste. Ljubljana, Slovenska matica: 320 str.
- Kowalska, A., Boczon, A., Hildebrand, R., Polkowska, Z. 2016. Spatial variability of throughfall in a stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with deciduous admixture as influenced by canopy cover and stem distance. *Journal of Hydrology* 538: 231–242.
- Krämer, I., Hölscher, D. 2009. Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. *Ecohydrology* 2: 102–114.
- Kubo, T., Kobayashi, T., Kato, K., Nishimura, S., Uemura, S., Ono, K., Sumida, A., Hara, T. 2008. Estimating the three-dimensional structure of canopy foliage based on the light measurements in a *Betula ermanii* stand. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1293-1304.
- Kuehler, E., Harhaway, J., Tirpak, A. 2017. Quantifying the benefits of urban forest systems as a component of the green infrastructure stormwater treatment network. *Ecohydrology* 10: e1813.
- Kume, T., Kuraji, K., Yoshifuji, N., Morooka, T., Sawano, S., Chong, L., Suzuki, M. 2006. Estimation of canopy drying time after rainfall using sap flow measurements in an emergent tree in a lowland mixed-dipterocarp forest in Sarawak, Malaysia. *Hydrological Processes* 20: 565–578.
- Kuusk, A., Kuusk, J., Lang, M. 2009. A dataset for the validation of reflectance models. *Remote Sensing of Environment* 113: 889–892.
- Kuusk, A., Lang, M., Kuusk, J. 2013. Database of optical and structural data for the validation of forest radiative transfer models. *Light Scattering Reviews* 7. Berlin Heidelberg, Springer: 109–148.
- Lang, A.R.G., McMurtrie, R.E., Benson, M.L. 1991. Validity of surface area indices of *Pinus radiata* estimated from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 157–170.
- Levia, D.F., Frost, E.E. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology* 274: 1–29.
- Levia, D.F., Van Stan, J.T., Mage, S.M., Kelley-Hauske, P.W. 2010. Temporal variability of stemflow volume in a beech-yellow poplar forest in relation to tree species and size. *Journal of Hydrology* 380: 112–120.
- Levia, D.F., Germer, S. 2015. A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics* 53: 673–714.
- Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K. 2017. Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. *WIREs Water* 4: e1225.

- Levy, P.E., Jarvis, P.G. 1999. Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in HAPEX-Sahel. *Agricultural and Forest Meteorology* 97: 199–212.
- Leyton, L., Reynolds, E.R.C., Thompson, F.B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. V: Sopper, W.E. (ur.), Lull, H.W. (ur). *Forest Hydrology*. Oxford, Pergamon: 163–178.
- Li, X., Xiao, Q., Niu, J., Dymond, S., van Doorn, N.S., Yu, X., Xie, B., Lv, X., Zhang, K., Li, J. 2009. Process-based rainfall interception by small trees in Northern China: The effect of rainfall traits and crown structure characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology* 218–219: 65–73.
- Li, Y., Cai, T., Man, X., Sheng, H., Ju, C. 2015. Canopy interception loss in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest of Northeast China. *Journal of Arid Land* 7: 831–840.
- LI-COR Biosciences. 2010. LAI-2200C Software.
https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/software.html (Pridobljeno 9. 5. 2016)
- LI-COR Inc. 2016. LAI-2200c Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual.
<https://licor.app.boxenterprise.net/s/fqjn5mlu8c1a7zir5qel> (Pridobljeno 6. 1. 2016)
- Link, E.T., Unsworth, M., Marks, D. 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 171–191.
- Lintunen, A., Kaitaniemi, P., Perttunen, J., Sievänen, R. 2013. Analysing species-specific light transmission and related crown characteristics of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* using a shoot-level 3D model. *Canadian Journal of Forest Research* 43: 929–938
- Liu, S. 1998. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. *Journal of Hydrology* 207: 32–41.
- Liu, Z., Chen, J.M., Jin, G., Qi, Y. 2015. Estimating seasonal variations of leaf area index using litterfall collection and optical methods in four mixed evergreen–deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 209–210: 36–48.
- Liu, Z., Wang, Y., Tian, A., Liu, Y., Webb, A.A., Wang, Y., Zuo, H., Yu, P., Xiong, W. Xu, L. 2017. Characteristics of canopy interception and its simulation with a revised Gash model for a larch plantation in the Liupan Mountains, China. *Journal of Forestry Research* 29: 187–198.
- Livesley, S.J., Baudinette, B., Glover, D. 2014. Rainfall interception and stemflow by Eucalypt Street trees – The impacts of canopy density and bark type. *Urban Forestry & Urban Greening* 13: 192–197.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., Gallart, F. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch in a Mediterranean mountainous abandoned area: I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology* 199: 331–345.
- Llorens, P., Gallart, F. 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology* 240: 131–144.
- Llorens, P., Domingo, F. 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: a review of studies in Europe. *Journal of Hydrology* 335: 37–54.
- Lloyd, C.R., Marques, A., 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 63–73.
- Löffler-Mang, M., Joss, J. 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17: 130–139.

- Loh, W. 2011. Classification and regression trees. *Data Mining and Knowledge Discovery* 1: 14-23.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A., El Hadj Moussa, F. 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology* 138: 449-467.
- Ma, B., Liu, Y., Liu, X., Ma, F., Wu, F., Li, Z. 2015. Soil splash detachment and its spatial distribution under corn and soybean cover. *Catena* 127: 142-151.
- Majasalmi, T., Rautiainen, M., Stenberg, P., Rita, H. 2012. Optimizing the sampling scheme for LAI-2000 measurements in a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 154– 155: 38– 43.
- Margolis, H., Oren, R., Whitehead, D., Kaufmann, M. 1995. Leaf area dynamics of conifer forests. V: Smith, W. (ur.), Roy, J. (ur.), Hinckley, T. (ur.). *Ecophysiology of Coniferous Forests*. San Diego, Academic Press; 181-216.
- Martinez-Meza, E., Whitford, W.G. 1996. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments* 32: 271-287.
- Mason, E.G., Diepstraten, M., Pinjuv, G.L., Lasserre, J.P. 2012. Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology* 166–167: 113–119.
- McPherson, E.G., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., Rowntree, R. 1997. Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosystems* 1: 49–61.
- McPherson, G. 2001. *Applying and Interpreting statistics*. New York, Springer-Verlag: 641 str.
- McPherson, G., Simpson, J.R., Peper, P.J., Maco, S.E., Xiao, Q. 2005. Municipal forest benefits and costs in five US cities. *Journal of Forestry* 103: 411–416.
- McPherson, E.G., Simpson, J.R., Xiao, Q., Wu, C. 2011. Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment. *Landscape and Urban Planning* 99: 40–50.
- Mencuccini, M., Grace, J. 1996. Hydraulic conductance, light interception and needle nutrient concentration in Scots pine stands and their relations with net primary productivity. *Tree Physiology* 16: 459-468.
- Messenger, R., Mandell, L. 1972. A modal search technique for predictive nominal scale multivariate analysis. *Journal of the American Statistical Association* 67: 768–772.
- Mishra, A., Sharma, S.D., Khan, G.H. 2002. Rehabilitation of degraded sodic lands during a decade of *Dalbergia sissoo* plantation in Sultanpur District of Uttar Pradesh, India. *Land Degradation and Development* 13: 375–386.
- Molina, A.J., del Campo, A.D. 2012. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management* 269: 206–213.
- Morgan, R.P.C. 1985. Establishment of plant cover parameters for modelling splash detachment. V: El-Swaify, S.A. (ur.), Moldenhauer, W.C. (ur.), Lo, A. (ur.). *Soil Erosion and Conservation*. Ankeny, Soil Conservation Society of America: 377-383.
- Morsdorf, F., Kötz, B., Meier, E., Itten, K.I., Allgöwer, B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment* 104: 50-61.

- Muzylo, A., Llorens, P., Domingo, F. 2012. Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods. *Ecohydrology* 5: 759–767.
- Myneni, R.B., Nemani, R.R., Running, S.W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35: 1380–1393.
- Nadbath, M. 2008. Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad. Naše okolje, posebna izdaja marec 2018: 1-7.
- Nadkarni, N.M., Schaefer, D., Matelson, T.J., Solano, R. (2004). Biomass and nutrient pools of canopy and terrestrial components in a primary and a secondary montane cloud forest, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 198: 223–236.
- Nakayoshi, M., Moriwaki, R., Kawai, T., Kanda, M. 2009. Mechanism on urban rainfall interception. http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/375677-1-090514201655-009.pdf (Pridobljeno 15. 6. 2016)
- Nanko, K., Hotta, N., Suzuki, M. 2004. Assessing raindrop impact energy at the forest floor in a mature Japanese cypress plantation using continuous raindrop-sizing instruments. *Journal of Forest Research* 9: 157–164.
- Nanko, K., Hotta, N., Suzuki, M. 2006. Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution. *Journal of Hydrology* 329: 422–431.
- Nanko, K., Mizugaki, S., Onda, Y. 2007. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. *Catena* 72: 348–361.
- Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Ito, S., Mizugaki, S., Moriwaki, H. 2010. Variability of surface runoff generation and infiltration rate under a tree canopy: indoor artificial rainfall experiment using a stand of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *Hydrological Processes* 24: 567–575.
- Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Moriwaki, H. 2011. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1173–1182.
- Nanko, K., Watanabe, A., Hotta, N., Suzuki, M. 2013. Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 169: 74–84.
- Nanko, K., Onda, Y., Kato, H., Gomi, T. 2015. Immediate change in throughfall spatial distribution and canopy water balance after heavy thinning in a dense mature Japanese cypress plantation. *Ecohydrology* 9: 300-314.
- Nanko, K., Hudson, S.A., Levina, D.F. 2016. Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage. *Hydrological Sciences Journal* 61: 620–627.
- Nature Conservation Practice Note. 2006. Measurement of Diameter at Breast Height (DBH). http://www.afcd.gov.hk/english/conservation/cons_tech/files/common/NCPN_No.02_measurement_of_DBH_ver.2006.pdf (Pridobljeno 6. 9. 2014)
- Navar, J., Bryan, R.B. 1994. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 68: 133–143.
- Ogrin, D. 1996. Podnebni tipi v Sloveniji. *Geografski vestnik* 68: 39-56.

Osojnik, A. 2013. Modeliranje dinamičnih sistemov z rudarjenjem podatkovnih tokov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko (samozaložba A. Osojnik): 88 str.

OTT Hydromet. 2016. Operating instructions. Present weather sensor OTT Parsivel. <http://www.ott.com/en-us/products/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott-parsivel2/> (Pridobljeno 8. 11. 2017)

Park, S.G., Kim, H., Ham, Y., Jung, S. 2017. Comparative Evaluation of the OTT PARSIVEL using a collocated two-dimensional video disdrometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 34: 2059–2082.

Parkin, T.B., Codling, E.E. 1990. Rainfall distribution under a corn canopy: implication for managing agrochemicals. *Agronomy Journal* 82: 1166–1169.

Perez-Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E. et al. 2013. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61: 167–234.

Perez-Suarez, M., Arredondo-Moreno, J.T., Huber-Sannwald, E., Serna-Perez, A. 2014. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine–oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology* 7: 532–543.

Petan, S., Padežnik, M., Zorn, M., Šraj, M., Vidmar, A., Mikoš, M., Brilly, M. 2008. Measurements and modelling of rainfall interception and soil erosion processes on the Dragonja experimental river basin. Conference on Water observation and information system for decision support. Skopje, Gradežen fakultet.

Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., Mikoš, M. 2010. The rainfall kinetic energy–intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the Mediterranean part of Slovenia. *Journal of Hydrology* 391: 314–321.

Prescott, C.E. 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology* 22: 1193–1200.

Pretnar, A. 2017. Image Analytics: Clustering. <https://blog.biolab.si/2017/04/03/image-analytics-clustering/> (Pridobljeno 12. 1. 2018)

Price, C. 2003. Quantifying the aesthetic benefits of urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening* 1: 123–133.

Price, A.G., Carlyle-Moses, D.E. 2003. Measurement and modelling of growing season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 69–85.

Puckett, L.J. 1991. Spatial variability and collector requirements for sampling throughfall volume and chemistry under a mixed hardwood canopy. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 1581–1588.

Pypker, T.G., Bond, B.J., Link, T.E., Marks, D., Unsworth, M.H. 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 130: 113–129.

Qi, Y., Li, F., Liu, Z., Jin, G. 2014. Impact of understorey on overstorey leaf area index estimation from optical remote sensing in five forest types in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology* 198–199: 72–80.

R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Dunaj, Avstrija. <http://www.R-project.org/> (Pridobljeno 4. 10. 2017).

Raat, K.J., Draaijers, G.P.J., Schaap, M.G., Tietema, A., Verstraten, J.M. 2002. Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. *Hydrology and Earth System Sciences* 6: 363-374.

Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000. *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: 329 str.

Reid, L.M., Lewis, J. 2009. Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest. *Journal of Hydrology* 375: 459–470.

Ridgeway, G. 2017. Generalized Boosted Regression Models. <https://cran.r-project.org/web/packages/gbm/gbm.pdf> (Pridobljeno 10. 8. 2017)

Roberts, J. 2000. The influence of physical and physiological characteristics of vegetation on their hydrological response. *Hydrological Processes* 14: 2885-2901.

Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. and Morton, A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests: I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9: 367-384.

Ryan, M.G., Bond, B.J., Law, B.E., Hubbard, R.M., Woodruff, D., Cienciala, E., Kucera, J. 2000. Transpiration and whole-tree conductance in ponderosa pine trees of different heights. *Oecologia* 124: 553–560.

Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Van Stan, J.T., Pypker, T.G. 2016. The importance of considering rainfall partitioning in afforestation initiatives in semiarid climates: A comparison of common planted tree species in Tehran, Iran. *Science of the Total Environment* 568: 845–855.

Sander, H.A., Ghosh, D., Hodson, C.B. 2017. Varying age-gender associations between body mass index and urban greenspace. *Urban Forestry & Urban Greening* 26: 1–10.

Sanders, R.A. 1986. Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio. *Urban Ecology* 9: 361–376.

Sarkar, D. 2017. Package 'lattice'. <http://lattice.r-forge.r-project.org/> (Pridobljeno 25. 10. 2017)

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9: 671-675.

Schnitzler, A., Closset, D. 2003. Forest dynamics in unexploited birch (*Betula pendula*) stands in the Vosges (France): structure, architecture and light patterns. *Forest Ecology and Management* 183: 205–220.

Schooling, J.T. 2014. The influence of tree traits and storm event characteristics on stemflow production from isolated deciduous trees in an urban park. Doktorska disertacija. British Columbia, Thompson Rivers University: 103 str.

Schooling, J.T., Carlyle-Moses, D.E. 2015. The influence of rainfall depth class and deciduous tree traits on stemflow production in an urban park. *Urban Ecosystems* 18: 1261–1284.

Schooling, J.T., Levia, D.F., Carlyle-Moses, D.E., Dowtin, A.L., Brewer, S.E., Donkor, K.K., Borden, S.A., Gyrzbowski, A.A. 2017. Stemflow chemistry in relation to tree size: A preliminary investigation of eleven urban park trees in British Columbia, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening* 21: 129–133.

ScienceDirect. 2018. <https://www.sciencedirect.com/> (Pridobljeno 21. 2. 2018)

Sektor za analize in prognoze površinskih voda. 2014. Hidrološko poročilo o poplavah od 5. do 20. novembra 2014. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje. http://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Porocilo%20poplave%205%2020nov%202014_splet_popravek.pdf (Pridobljeno 11. 10. 2017)

- Senegačnik, J. 2012. Slovenija in njene pokrajine. Ljubljana, Modrijan: 471 str.
- Shachnovich, Y., Berliner, P.R., Bar, P. 2008. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *Journal of Hydrology* 349: 168–177.
- Shackleton, S., Chinyimbaa, A., Hebinckb, P., Shackletona, C., Kaomaa, H. 2015. Multiple benefits and values of trees in urban landscapes in two towns in northern South Africa. *Landscape & Urban Planning* 136: 76–86.
- Shinohara, Y., Levia, D.F., Komatsu, H., Nogata, M., Otsuki, K. 2015. Comparative modelling of the effects of intensive thinning on canopy interception loss in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest of western Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 214–215: 148–156.
- Siegert, C.M., Levia, D.F. 2014. Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology* 519: 446–454.
- Siegert, C.M., Levia, D.F., Hudson, S.A., Downtin, A.L., Zhang, F., Mitchell, M.J. 2016. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management* 359: 109–17.
- Simčič, B. 2014. Metoda glavnih komponent in manjkajoči podatki. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za družbene vede (samozaložba B. Simčič): 119 str.
- Sjöman, J.D., Gill, S.E. 2014. Residential runoff – The role of spatial density and surface cover, with a case study in the Højeå river catchment, southern Sweden. *Urban Forestry & Urban Greening* 13: 304–314.
- Smith, F.W., Sampson, D.A., Long, J.N. 1991. Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *Forest Science* 37: 1682–1688.
- Smolander, H., Stenberg, P. and Linder, S. 1994. Dependence of light interception efficiency of Scots pine shoots on structural parameters. *Tree Physiology* 14: 971–980.
- Soares, A.L., Rego, F.C., McPherson, E.G., Simpson, J.R., Peper, P.J., Xiao, Q. 2011. Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban Forestry & Urban Greening* 10: 69–78.
- Song, C., Dickinson, M.B., Su, L., Zhang, S., Yaussey, D. 2010. Estimating average tree crown size using spatial information from Ikonos and QuickBird images: Across-sensor and across-site comparisons. *Remote sensing of Environment* 14: 1099–1107.
- Soudani, K., Trautmann, J., Walter, J.M.N. 2002. Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *International Journal of Remote Sensing* 23: 3605–3618.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N.E.C. 2006. Spatial variability and temporal stability of throughfall deposition under beech (*Fagus sylvatica* L.) in relationship to canopy structure. *Environmental Pollution* 142: 254–263.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N.E.C. 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes* 22: 33–45.
- Steinbuck, E. 2002. The influence of tree morphology on stemflow in a redwood region second-growth forest. Magistrsko delo. Kalifornija, California State University: 50 str.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., Flower-Ellis, J. 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of Scots pine stands. *Tree physiology* 14: 981–995.

- Stout, B.B., McMahon, R.J. 1961. Throughfall variation under tree crowns. *Journal of Geophysical Research* 66: 1839–1843.
- Su, L., Zhao, C., Xu, W., Xie, Z. 2016. Modelling interception loss using the revised Gash model: a case study in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest in China. *Ecohydrology* 9: 1580-1589.
- Sun, Z., Guo, H., Li, X., Huang, Q., Zhang, D. 2011. Effect of LULC change on surface runoff in urbanization area. ASPRS 2011 Annual Conference, 1. – 5. Maj 2011, Milwaukee, Wisconsin. www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/Sun.pdf (Pridobljeno 11. 10. 2014)
- Sun, X., Onda, Y., Kato, H., Gomi, T., Liu, X. 2017. Estimation of throughfall with changing stand structures for Japanese cypress and cedar plantations. *Forest Ecology and Management* 402: 145-156.
- Suryatmojo, H., Masamitsu, F., Kosugi, K., Mizuyama, T. 2013. Effects of selective logging methods on runoff characteristics in paired small headwater catchment. *Procedia Environmental Sciences* 17: 221 – 229.
- Swaffer, B.A., Holland, K.L., Doody, T.M., Hutson, J. 2014. Rainfall partitioning, tree form and measurement scale: a comparison of two co-occurring, morphologically distinct tree species in a semi-arid environment. *Ecohydrology* 7: 1331-1344.
- Swank, W.T. 1968. The influence of rainfall interception on streamflow. V: Proceedings, hydrologic water resource management conference, 28-29 March 1968, Clemson, SC. Rep. 4. Clemson, Clemson University Water Resources Research Institute: 101-112.
- Šraj, M. 2003a. Modeliranje in merjenje prestreženih padavin. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šraj): 142 str.
- Šraj, M. 2003b. Določanje indeksa listne površine listnatega gozda na povodju Dragonje – 1. del: Metode in meritve. *Acta hydrotechnica* 21: 105–128.
- Šraj, M. 2004. Določanje indeksa listne površine listnatega gozda na povodju Dragonje – 2. del: Rezultati in diskusija. *Acta hydrotechnica* 22: 1–15.
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008a. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 121–134.
- Šraj, M., Lah, A., Brilly, M. 2008b. Meritve in analiza prestreženih padavin navadne breze (*Betula pendula* Roth.) in rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.) v urbanem okolju. *Gozdarski vestnik* 66: 406-433.
- Šraj, M., Mikoš, M., Brilly, M. 2011. Rainfall interception by deciduous Mediterranean forests in Slovenia, Europe. *Advances in environmental research*, str. 153-182. New York: Nova Science Publishers.
- Štravs, L., Šraj, M., Brilly, M. 2005. Precipitation interception modelling using machine learning methods at the experimental river basin. V: Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly 2005. Vienna, Austria, 24-29 April 2005. meetings.copernicus.org/www.cosis.net/.../EGU05-J-00353.pdf (Pridobljeno 1. 2. 2018)
- Štravs L., Brilly M., Šraj M. 2008. Precipitation interception modelling using machine learning methods – the Dragonja river basin case study. V: Abrahart R.J. (ur.), See L.M. (ur.), Solomatine D.P. (ur.). *Practical Hydroinformatics*. Water Science and Technology Library, 68. Berlin, Heidelberg, Springer: 347-358.
- Tanaka, N., Levia, D., Igarashi, Y., Nanko, K., Yoshifuji, N., Tanaka, K., Tantasirin, C., Suzuki, M., Kumagai, T. 2015. Throughfall under a teak plantation in Thailand: a multifactorial analysis

on the effects of canopy phenology and meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology* 59: 1145–1156.

Tanaka, N., Levia, D., Igarashi, Y., Yoshifuji, N., Tanaka, K., Tantasirin, C., Nanko, K., Suzuki, M., Kumagai, T. 2017. What factors are most influential in governing stemflow production from plantation-grown teak trees? *Journal of Hydrology* 544: 10–20.

Tapiador, F.J., Checa, R., de Castro, M. 2010. An experiment to measure the spatial variability of rain drop size distribution using sixteen laser disdrometers. *Geophysical Research Letters* 37: L16803.

Therneau, T., Atkinson, B., Ripley, B. 2017. Recursive Partitioning and Regression Trees. <https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/rpart.pdf> (Pridobljeno 10. 8. 2017)

Toba, T., Ohta, T. 2005. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology* 313: 208–220.

Tobon Marin, C., Bouten, W., Sevink, J. 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237: 40–57.

Uijlenhoet, R., Sempere Torres, D. 2006. Measurement and parameterization of rainfall microstructure. *Journal of Hydrology* 328: 1–7.

Van Elewijck, L. 1989. Influence of leaf and branch slope on stemflow amount. *Catena* 16: 525–533.

Van Stan, J.T., Siegert, C.M., Levia, D.F., Scheick, C.E. 2011. Effects of wind-driven rainfall on interception and stemflow generation between two codominant tree species with differing crown characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1277–1286.

Van Stan, J.T., Van Stan, J.H., Levia, D.F. 2014. Meteorological influences on stemflow generation across diameter size classes of two morphologically distinct deciduous species *International Journal of Biometeorology* 58: 2059–2069.

Van Stan, J.T., Gay, T.E., Lewis, E.S. 2016. Use of multiple correspondence analysis (MCA) to identify interactive meteorological conditions affecting relative throughfall. *Journal of Hydrology* 533: 452–460.

Van Stan, J.T., Coenders-Gerrits, M., Dibble, M., Bogeholz, P., Norman, Z. 2017. Effects of phenology and meteorological disturbance on litter rainfall interception for a *Pinus elliotii* stand in the Southeastern United States. *Hydrological Processes* 31: 3719–3728.

Vernimenn, R.R.E., Bruijnzeel, L.A., Romdoni, A., Proctor, J. 2007. Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology* 340: 217–232.

Vilhar, U. 2006. Vodna bilanca dinarskega jelovo-bukovega gozda v Kočevskem rogu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (samozaložba U. Vilhar): 250 str.

Vilhar, U. 2010. Padavinski režim v izbranih vrzelih in sestojih dinarskega jelovo-bukovega gozda. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva* 91: 43–58.

Vilhar, U., Planinšek, Š., Ferreira, A. 2010. Vpliv gozdov na kakovost virov pitne vode mestne občine Ljubljana. *Gozdarski vestnik* 68: 310–320.

Vilhar, U., Simončič, P. 2013. The role of forest type on throughfall during extreme precipitation events: a comparison of methods using data from Pohorje mountains (NE Slovenia). V: *Geophysical research abstracts* Vol. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..15.8359V> (Pridobljeno 1. 2. 2018)

- Vilhar, U., Kestnar, K., Vidmar, A., Šraj, M. 2015. Measuring and modelling of runoff from two forested watersheds in Pohorje. *Acta hydrotechnica* 28: 49-64.
- Vilhar, U. 2016. Sestojne padavine v mešanih sestojih smreke in bukve na Pohorju. *Gozdarski vestnik* 74: 28-45.
- Vilhar, U., Zupin, R., Diaci, J. 2017. Sestojne padavine v mešanih sestojih smreke in bukve na Pohorju. *Gozdarski vestnik* 75: 59-74.
- Vis, M. 1986. Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four Colombian forest ecosystems. *Earth Surface Processes and Landforms* 11: 591-603.
- Voigt G.K. 1960. Distribution of rainfall under forest stands. *Forest Science* 6: 2-10.
- Vose, J.M., Sun, G., Ford, C.R., Bredemeier, M., Otsuki, K., Wei, X., Zhang, Z., Zhang, L. 2011. Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs? *Ecohydrology* 4: 146-158.
- Wang, J., Endreny, T.A., Nowak, D.J. 2008. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. *Journal Of The American Water Resources Association* 44: 75-85.
- Wang, X., Zhang, Y., Hu, R., Pan, Y., Berndtsson, R. 2012. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. *Journal of Hydrology* 454-455: 152-159.
- Watanabe, T., Mizutani, K. 1996. Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 80: 195-214.
- Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11: 41-76
- Watson, G. 2002. Comparing formula methods of tree appraisal. *Journal of Arboriculture* 28: 11-18.
- Weber, Y., Jolivet, V., Gilet, G., Nanko, K., Ghazanfarpour, D. A phenomenological model for throughfall rendering in real-time. *Computer Graphics Forum* 35: 13-23.
- Wei, X., Bi, H., Liang, W. 2017. Factors controlling throughfall in a *Pinus tabulaeformis* forest in North China. *Scientific reports* 7: 14060.
- Weng, Q. 2001. Modelling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management* 28: 737-748.
- Xiao, Q., McPherson, E.G., Simposn, J.R., Ustin, S.L. 1998. Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24: 235-244.
- Xiao, Q., McPherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E., Simpson, J.R. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14: 763-784.
- Xiao, Q., McPherson, G.E. 2002. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems* 6: 291-302.
- Xiao, Q., McPherson, G.E. 2011a. Performance of engineered soil and trees in a parking lot bioswale. *Urban Water Journal* 8: 241-253.
- Xiao, Q., McPherson, G.E. 2011b. Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystems* 14: 755-769.

- Yang, G., Bowling, L.C., Cherkauer, K.A., Pijanowski, B.C., Niyogi, D. 2010. Hydroclimatic response of watersheds to urban intensity: an observational and modelling-based analysis for the White River basin, Indiana. *Journal of Hydrometeorology* 11: 122–138.
- Yang, L., Zhang, L., Li, Y., Wu, S. 2015. Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China). *Landscape & Urban Planning* 136: 40–51
- Yao, L., Chen, L., Wei, W., Sun, R. 2015. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. *Urban Forestry & Urban Greening* 14: 300–308.
- You, C., Lee, D. 2015. Decadal variation in raindrop size distributions in Busan, Korea. *Advances in Meteorology* 2015: 329327.
- Yousefi, S., Sadeghi, S.H., Mirzaee, S., van der Ploeg, M., Keesstra, S., Cerda, A. 2018. Spatio-temporal variation of throughfall in a hyrcanian plain forest stand in Northern Iran. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 66: 97–106.
- Zabret, K. 2013. The influence of tree characteristics on rainfall interception. *Acta hydrotechnica* 26: 99–116.
- Zabret, K., Brilly, M. 2014. Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji. *Acta Hydrotechnica* 27: 139–156.
- Zabret, K., Šraj, M. 2015. Can urban trees reduce the impact of climate change on storm runoff? *Urbani izziv* 26: 165–178.
- Zabret, K., Mikoš, M., Rakovec, J., Šraj, M. 2016. Proces prestrezanja padavin: vpliv vegetacijske dobe, trajanja padavinskega dogodka ter mikrostrukture padavin V: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2016/SZGG_Zbornik_2015.pdf (Pridobljeno 8. 5. 2017)
- Zabret, K., Rakovec, J., Mikoš, M., Šraj, M. 2017. Influence of raindrop size distribution on throughfall dynamics under pine and birch trees at the rainfall event level. *Atmosphere* 8: 240.
- Zabret, K., Šraj, M. 2018. Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree canopy. *Acta Hydrotechnica* 31/54, 1–20.
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. 2018. Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *Journal of Hydrology* 558: 29–41.
- Zaki, M., Meira, W. 2014. *Data Mining and Analysis*. New York, Cambridge University Press: 593 str.
- Zehe, E., Graeff, T., Morgner, M., Bauer, A., Bronstert, A. 2010. Plot and field scale soil moisture dynamics and subsurface wetness control on runoff generation in a headwater in the Ore Mountains. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 873–889.
- Zhang, Y., Wanga, X., Hu, R., Pan, Y., Paradeloc, M. 2015. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China. *Journal of Hydrology* 527: 1084–1095.
- Zhang, Y., Wang, X., Hu, R., Pan, Y. 2016. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems. *Journal of Hydrology* 539: 406–416.
- Zhang, Y., Li, X.Y., Li, W., Wu, X.C., Shi, F.Z., Fang, W.W., Pei, T.T. 2017. Modelling rainfall interception loss by two xerophytic shrubs in the Loess Plateau. *Hydrological Processes* 31: 1926–1937.

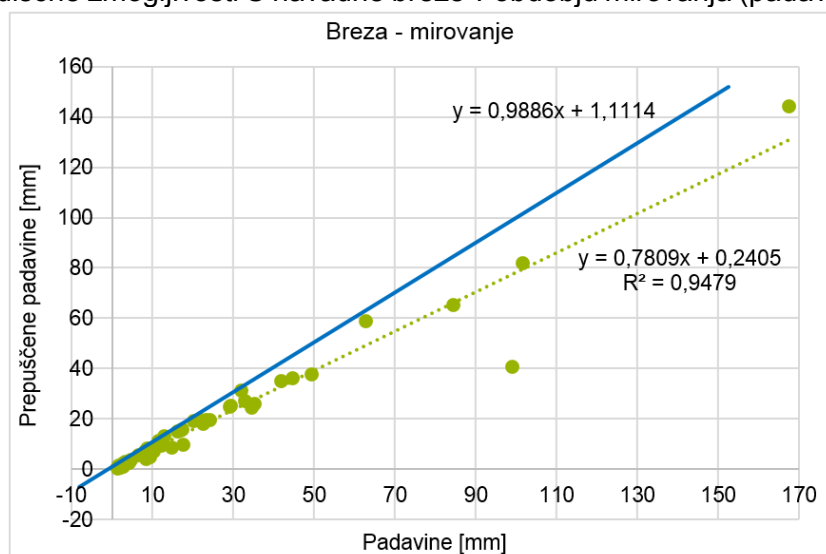
- Zheng, G., Moskal, L.M. 2009. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors* 9: 2719-2745.
- Zheng, J., Fan, J., Zhang, F., Yan, S., Xiang, Y. 2018. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management* 195: 25–36.
- Zimmermann, A., Wilcke, W., Elsenbeer, H. 2007. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology* 343: 80– 96.
- Zimmermann, A., Zimmermann, B. 2014. Requirements for throughfall monitoring: The roles of temporal scale and canopy complexity. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190: 125–139.
- Zirlewagen, D., von Wilpert, K. 2001. Modelling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand. *Forest Ecology and Management* 143: 27–37.
- Zölch, T., Henzeb, L., Keilholz, P., Pauleit, S. 2017. Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – An assessment at the micro-scale. *Environmental Research* 157: 135–144.
- Zupan, B. 2017. Uvod v odkrivanje znanj iz podatkov. *Zapiski predavanja*. file.biolab.si/textbooks/uozp/odkrivanje-skupin.pdf (Pridobljeno 9. 1. 2018).
- Žlindra, D., Skudnik, M., Rupel, M., Simončič, P. 2011. Meritve kakovosti padavin na prostem in v sestoju na ploskvah intenzivnega spremljanja gozdnih ekosistemov. *Gozdarski vestnik* 69: 279-288.

PRILOGE

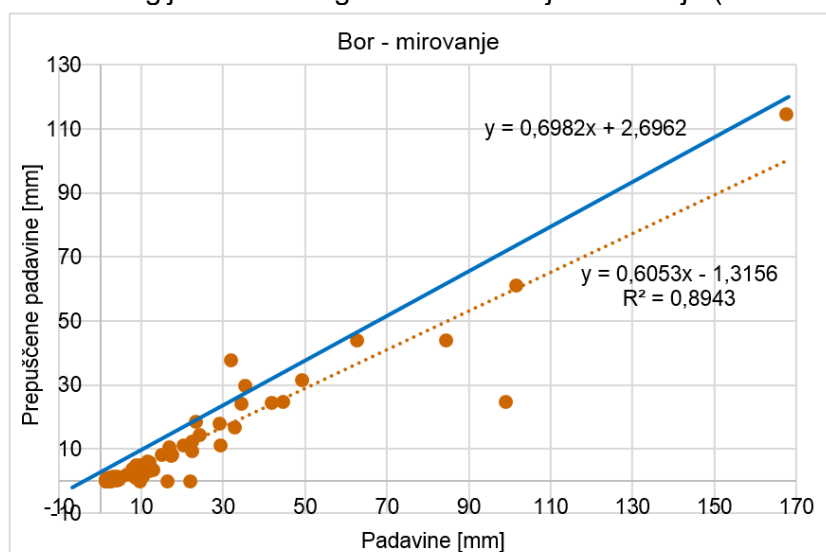
Priloga A: Grafi za določitev skladiščne zmogljivosti krošenj	141
Priloga B: Karte jakosti vseh obravnavanih dogodkov	144
Priloga C: Regresijska drevesa odvisnosti komponent prestrezanja padavin od meteoroloških spremenljivk	148
Priloga D: Grafi delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk glede na BRT	158
Priloga E: Rezultati analize MCA	166

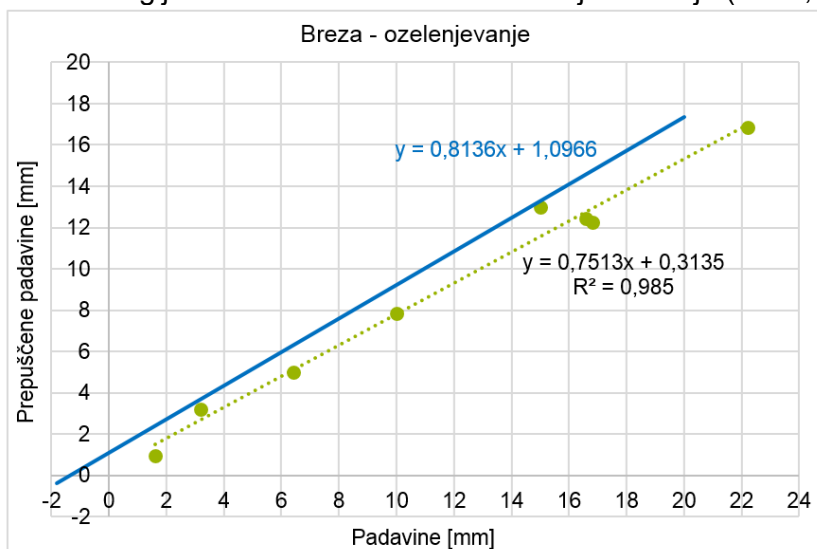
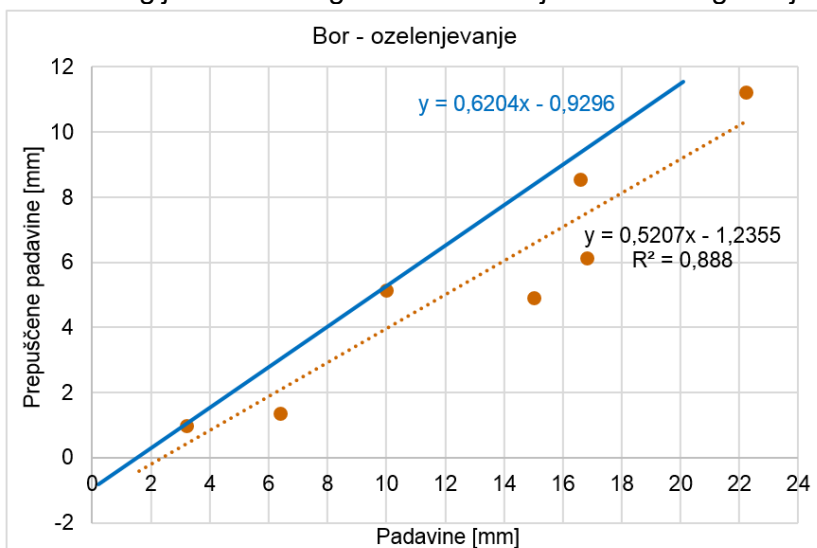
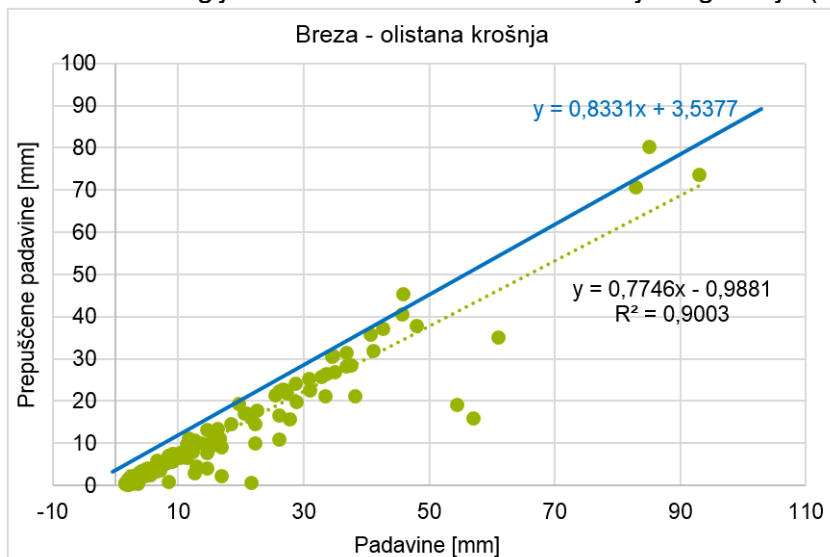
Priloga A: Grafi za določitev skladiščne zmogljivosti krošenj

Določitev skladiščne zmogljivosti S navadne breze v obdobju mirovanja (padavine (P) > 1 mm)

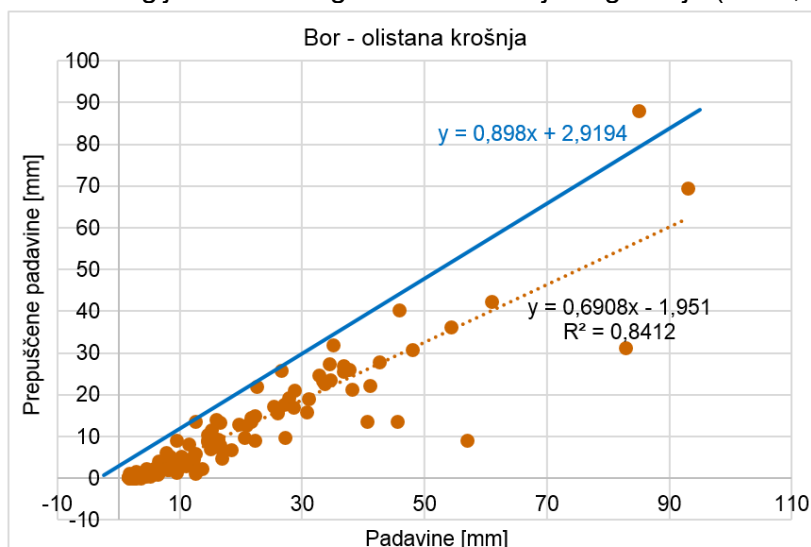


Določitev skladiščne zmogljivosti S črnega bora v obdobju mirovanja (P > 1 mm)

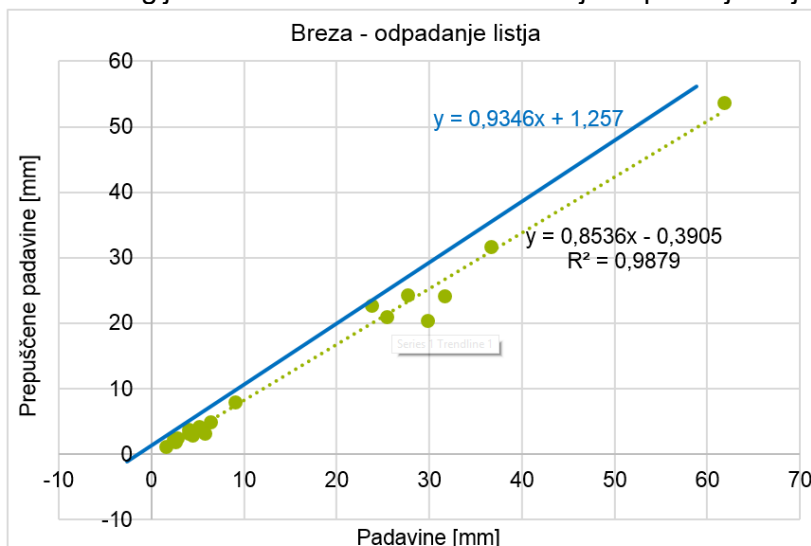


Določitev skladiščne zmogljivosti S navadne breze v obdobju olistanja ($P > 1,2$ mm)Določitev skladiščne zmogljivosti S črnega bora v obdobju začetka vegetacije ($P > 1,2$ mm)Določitev skladiščne zmogljivosti S navadne breze v obdobju vegetacije ($P > 1,5$ mm)

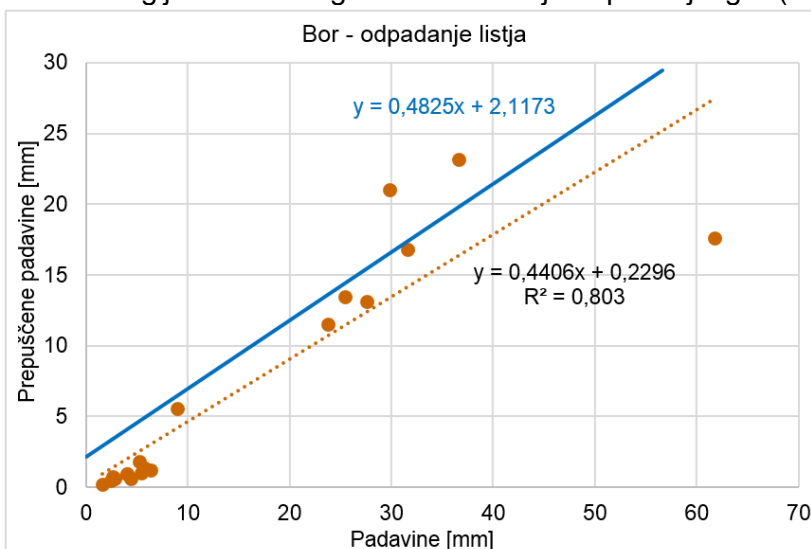
Določitev skladiščne zmogljivosti S črnega bora v obdobju vegetacije ($P > 1,5$ mm)

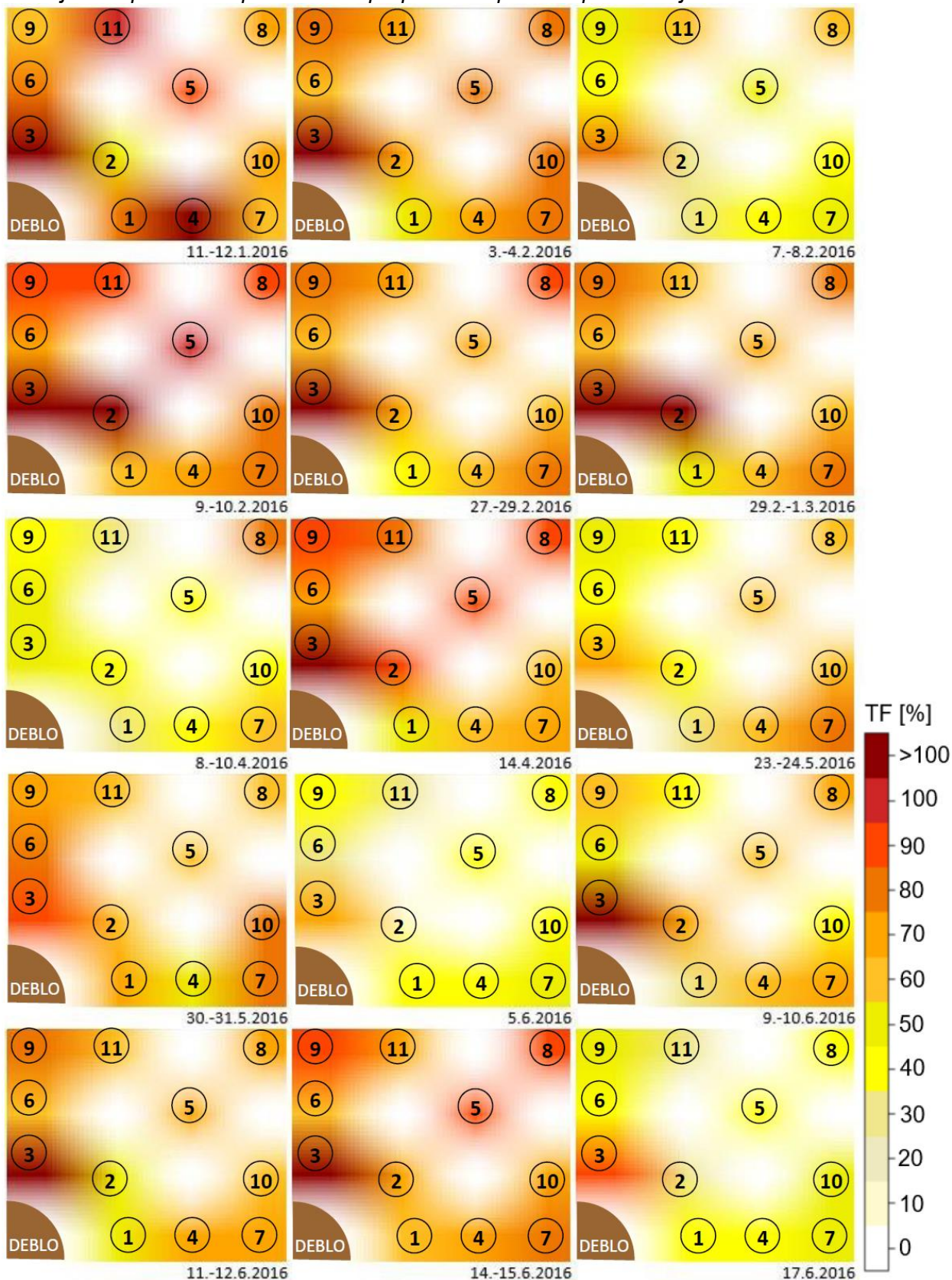


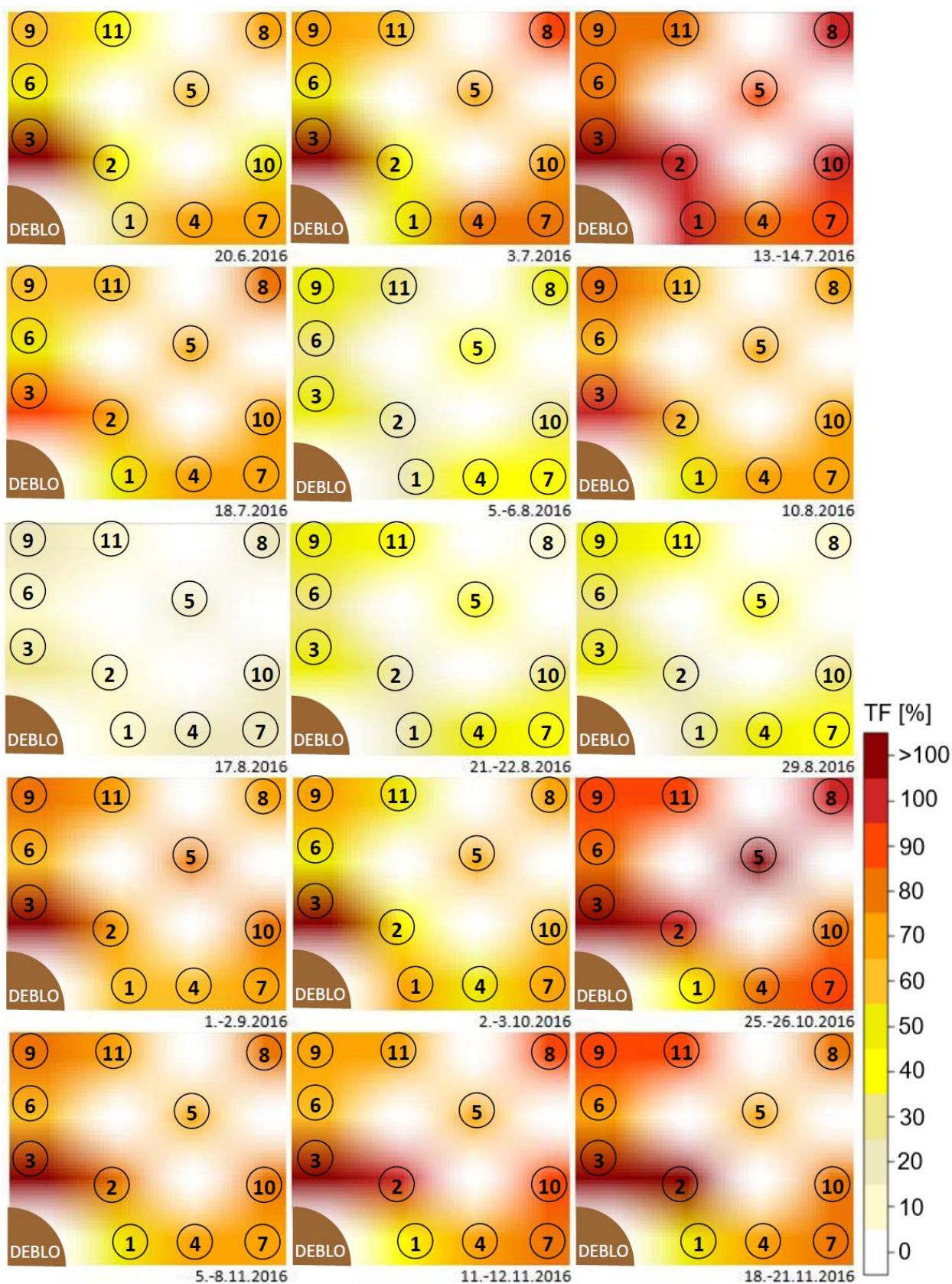
Določitev skladiščne zmogljivosti S navadne breze v obdobju odpadanja listja ($P > 1,2$ mm)

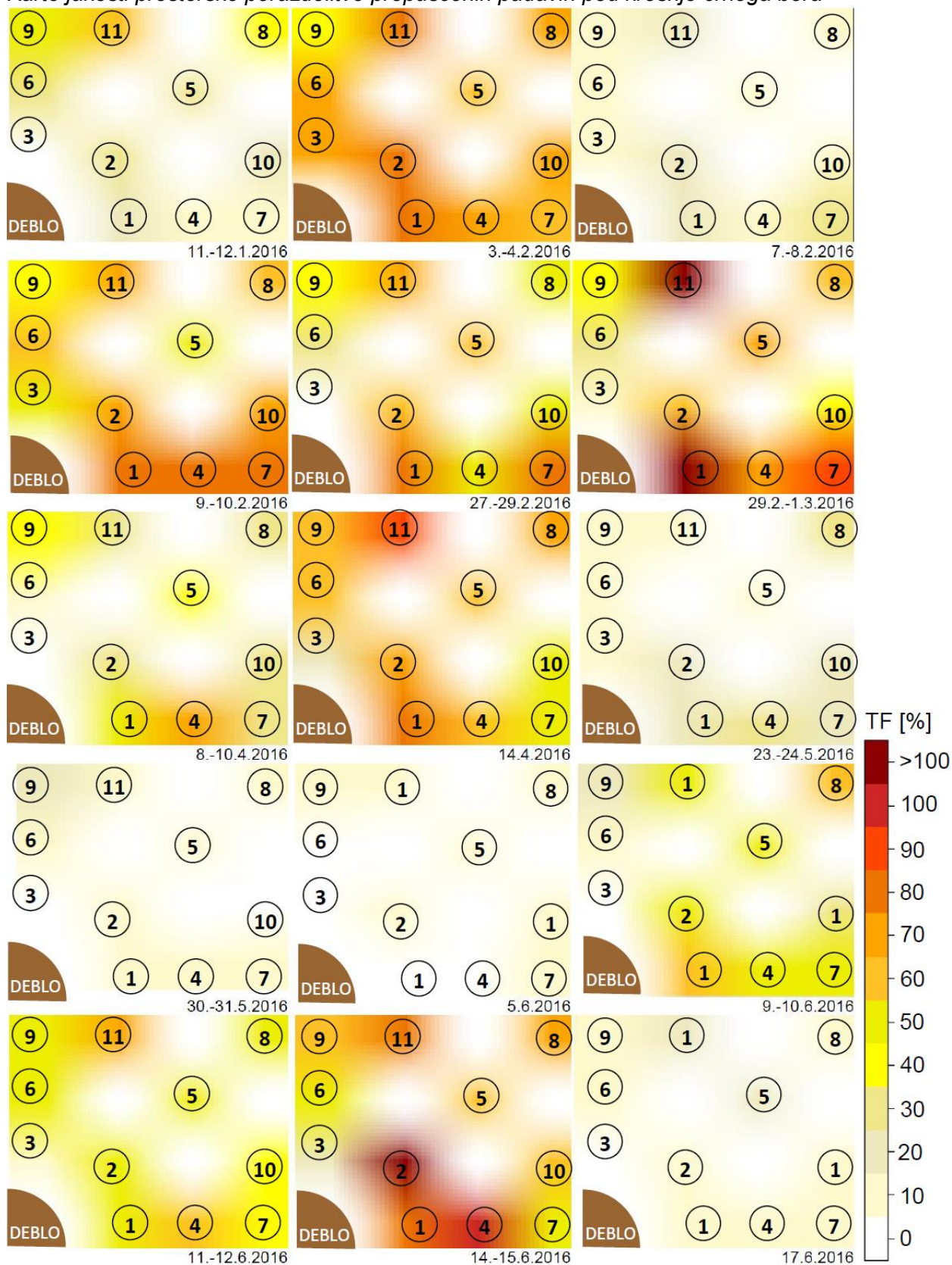


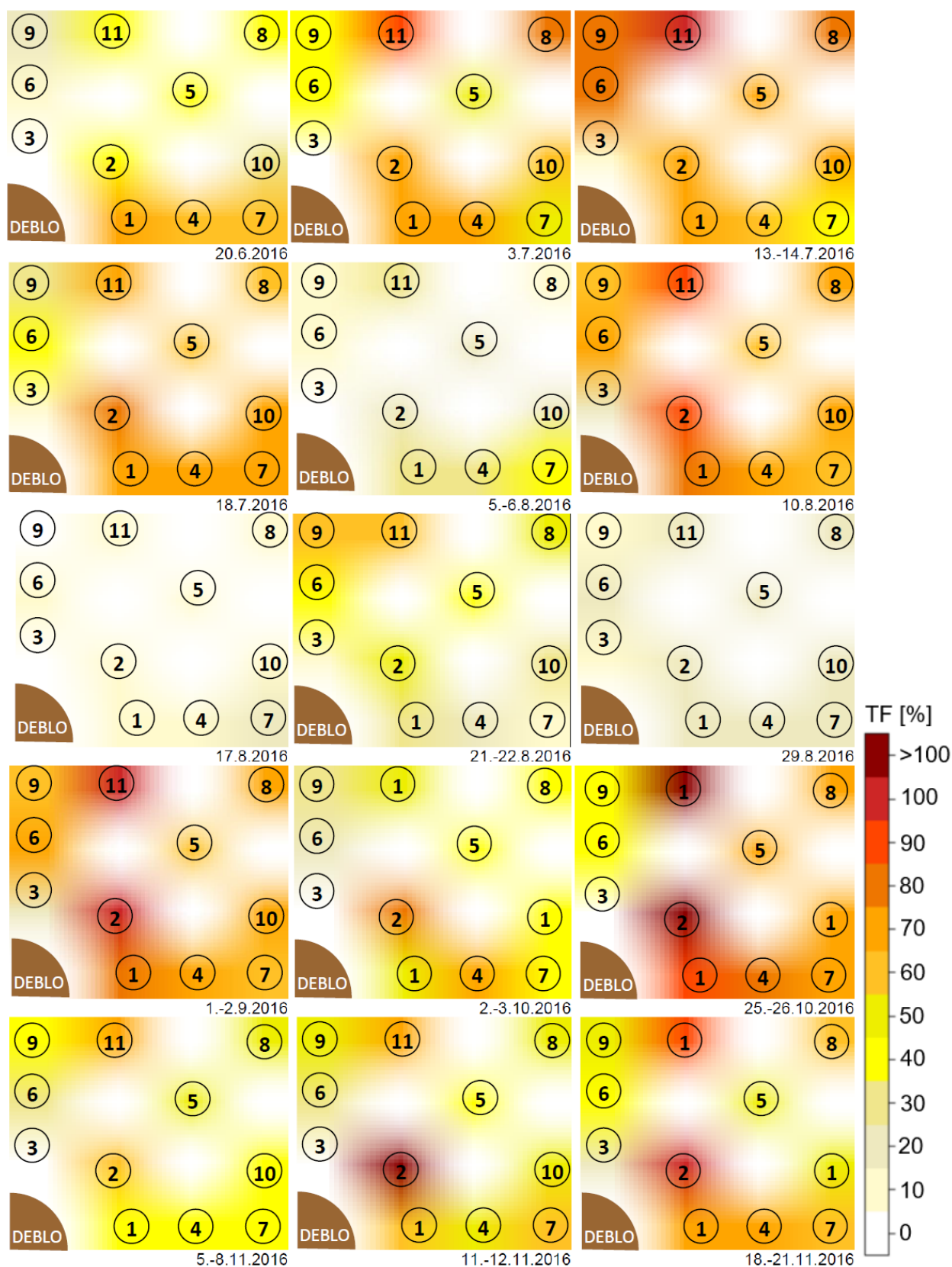
Določitev skladiščne zmogljivosti S črnega bora v obdobju odpadanja iglic ($P > 1,2$ mm)



Priloga B: Karte jakosti vseh obravnavanih dogodkov*Karte jakosti prostorske porazdelitve prepuščenih padavin pod krošnjo navadne breze*

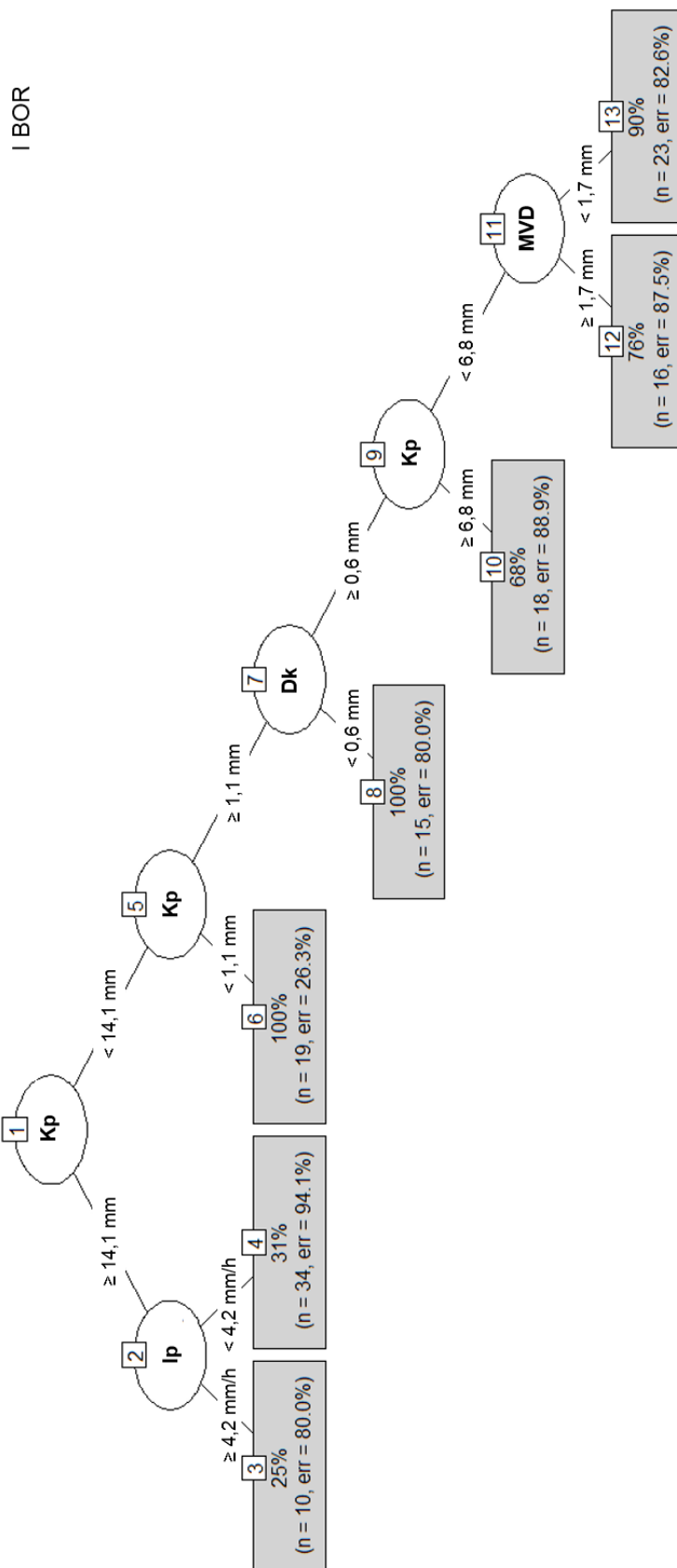


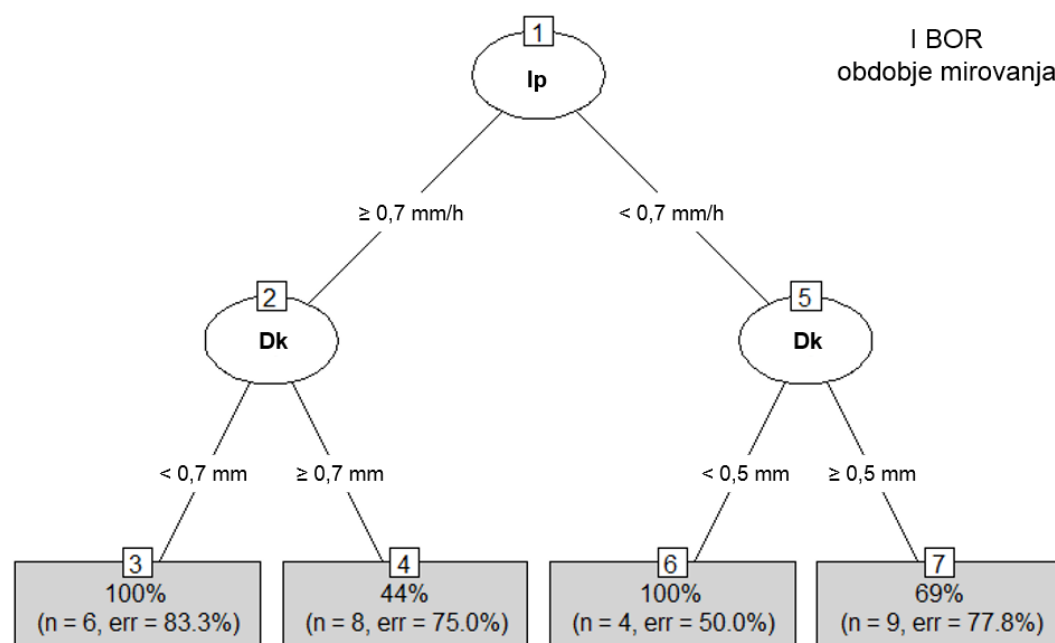
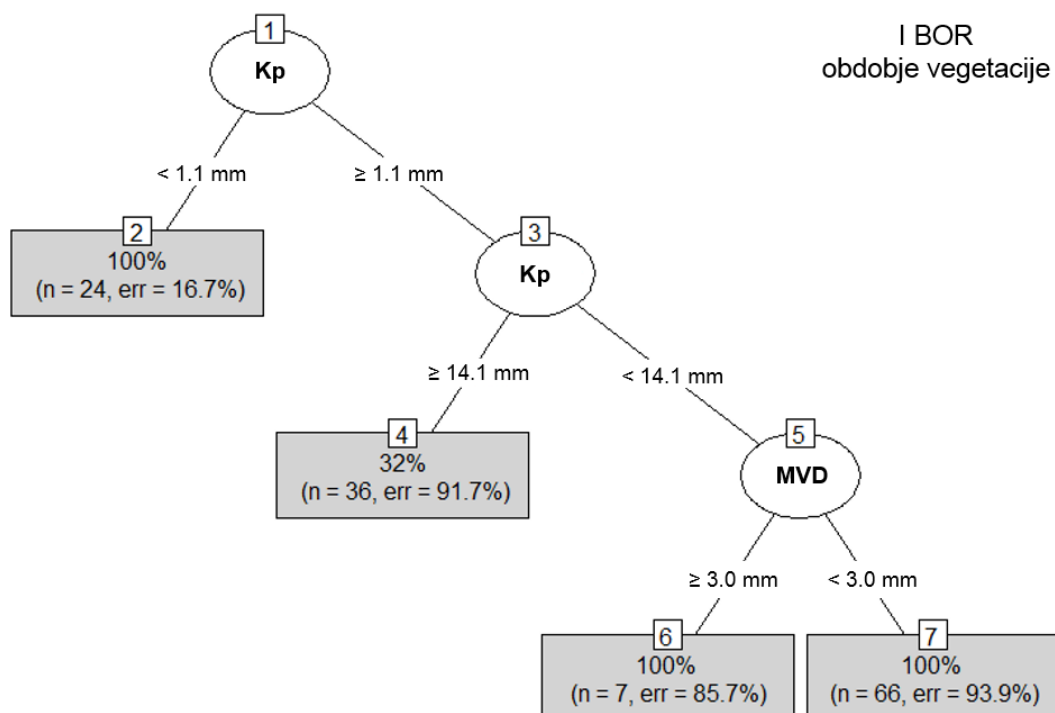
Karte jakosti prostorske porazdelitve prepuščenih padavin pod krošnjo črnega bora



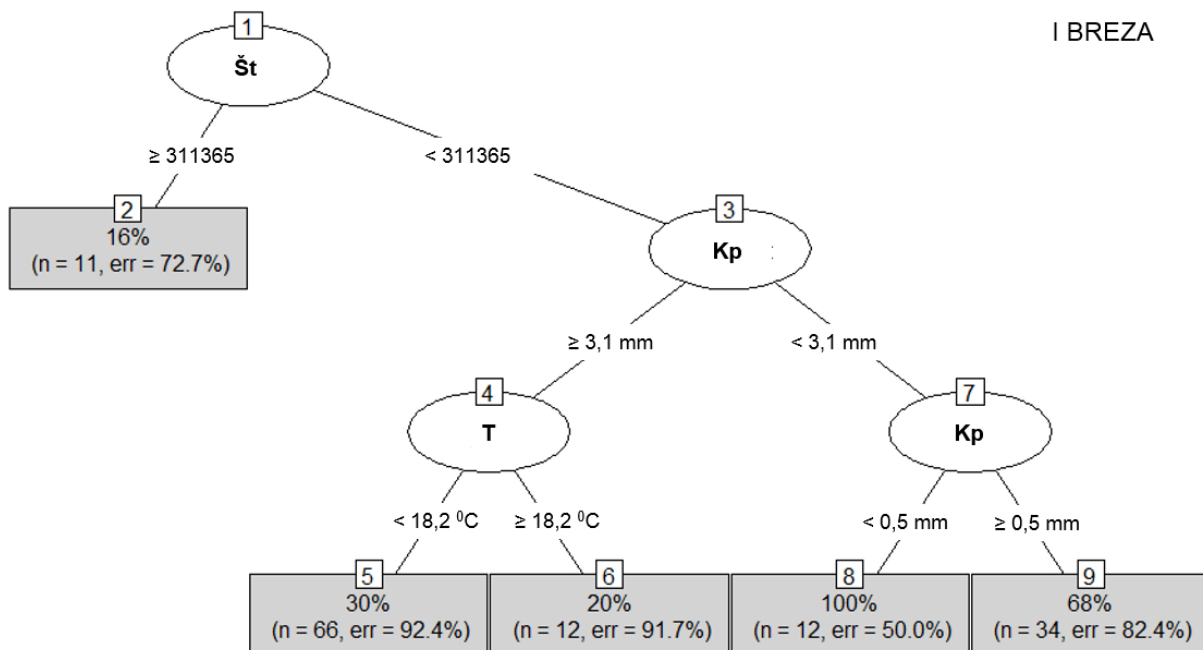
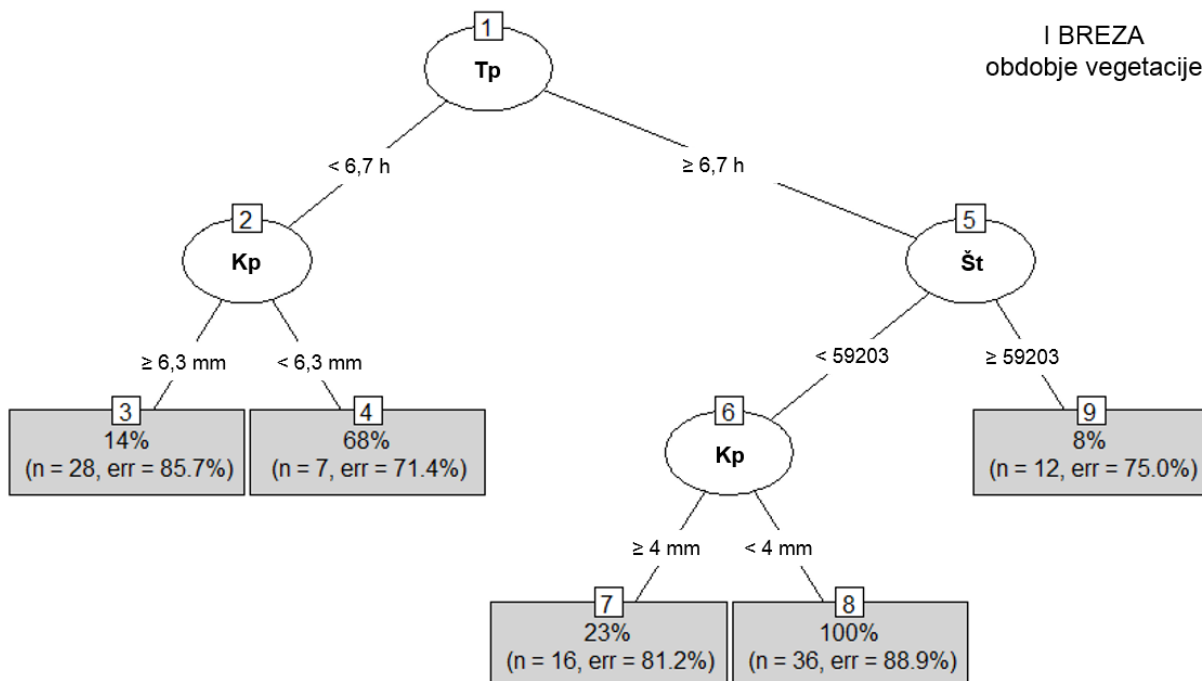
Priloga C: Regresijska drevesa odvisnosti komponent prestrezanja padavin od meteoroloških spremenljivk

Prestrezanje padavin (I)

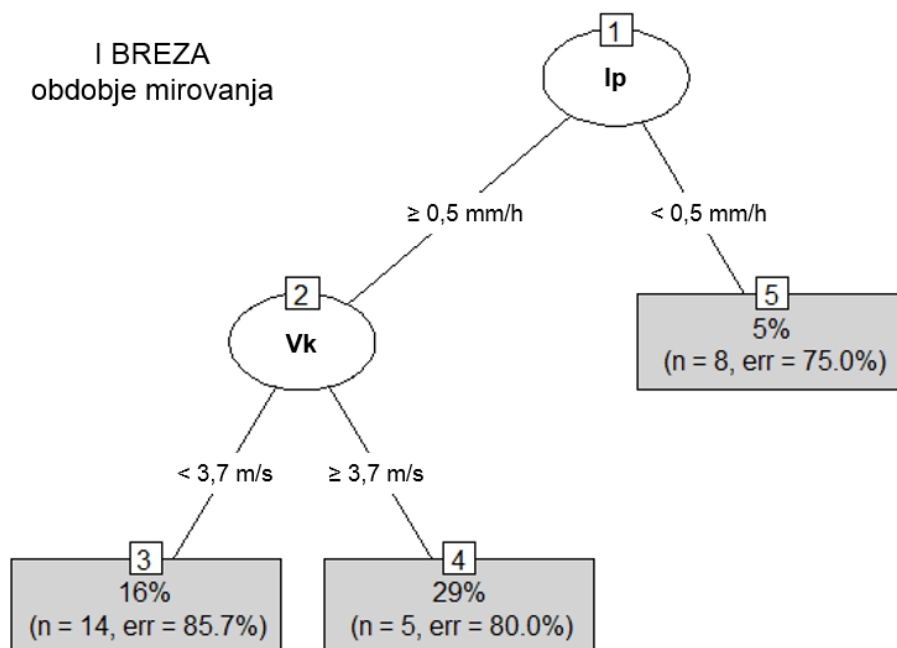




I BREZA

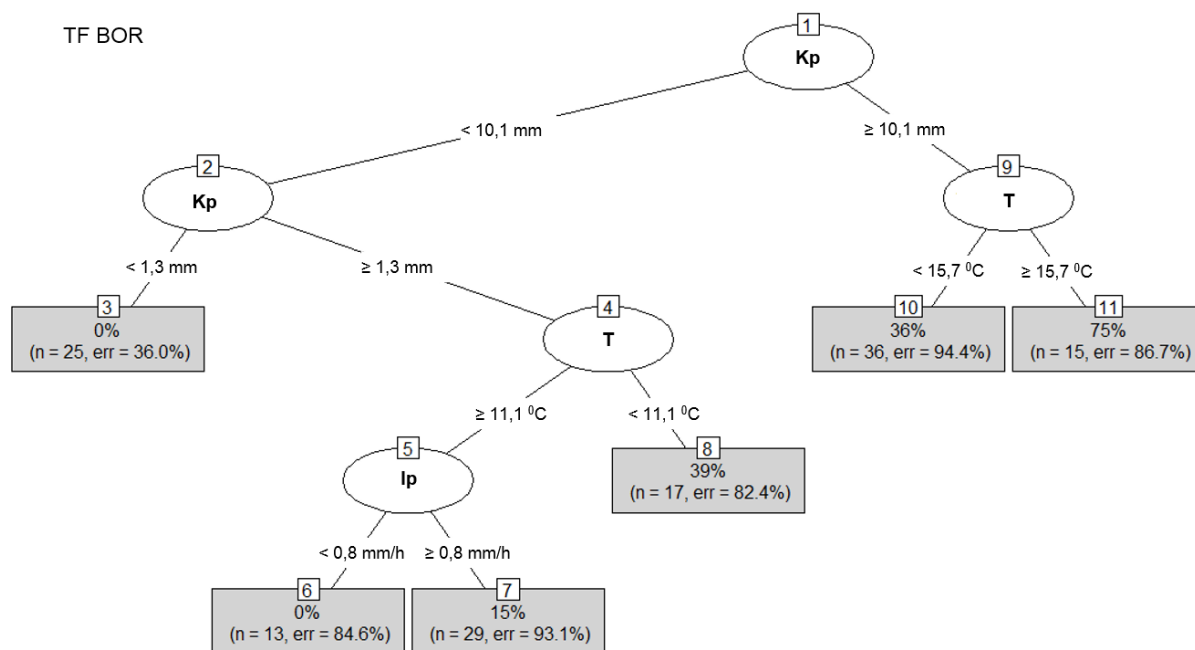
I BREZA
obdobje vegetacije

I BREZA
obdobje mirovanja

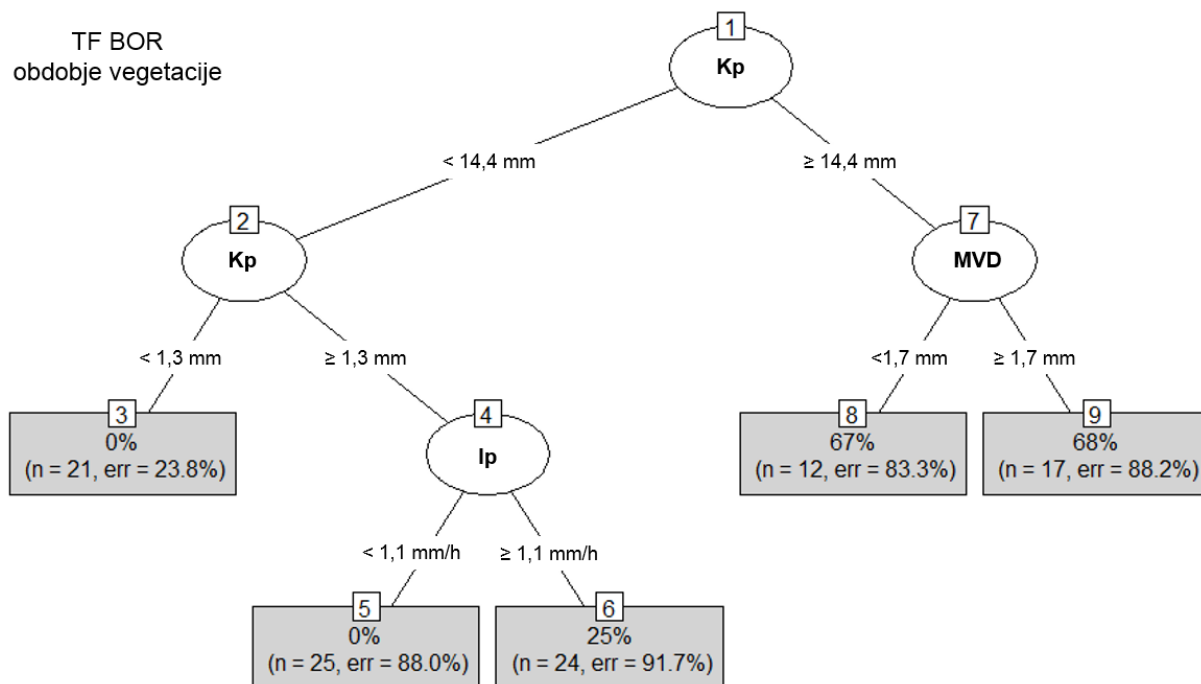


Prepuščanje padavin (TF)

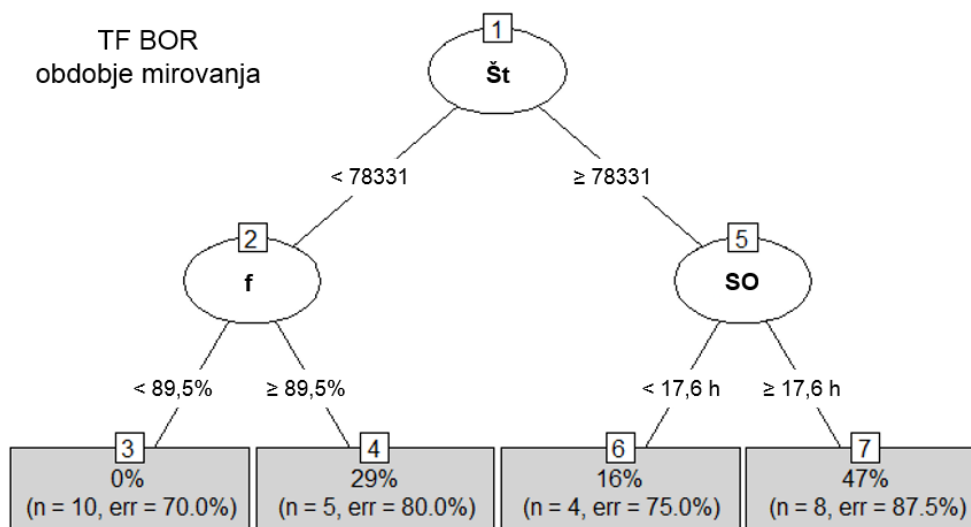
TF BOR



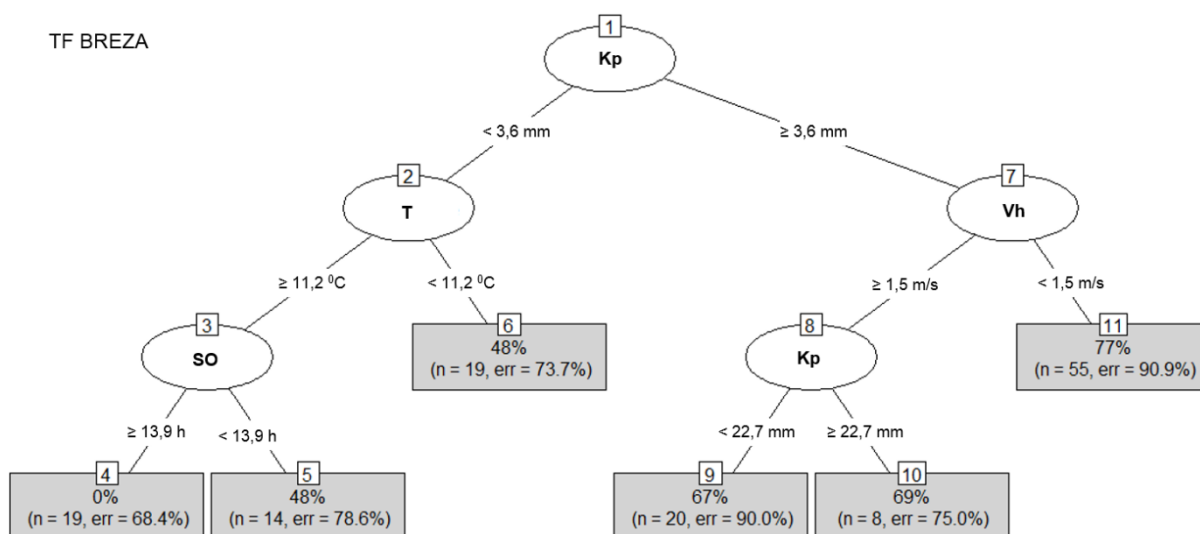
TF BOR
obdobje vegetacije



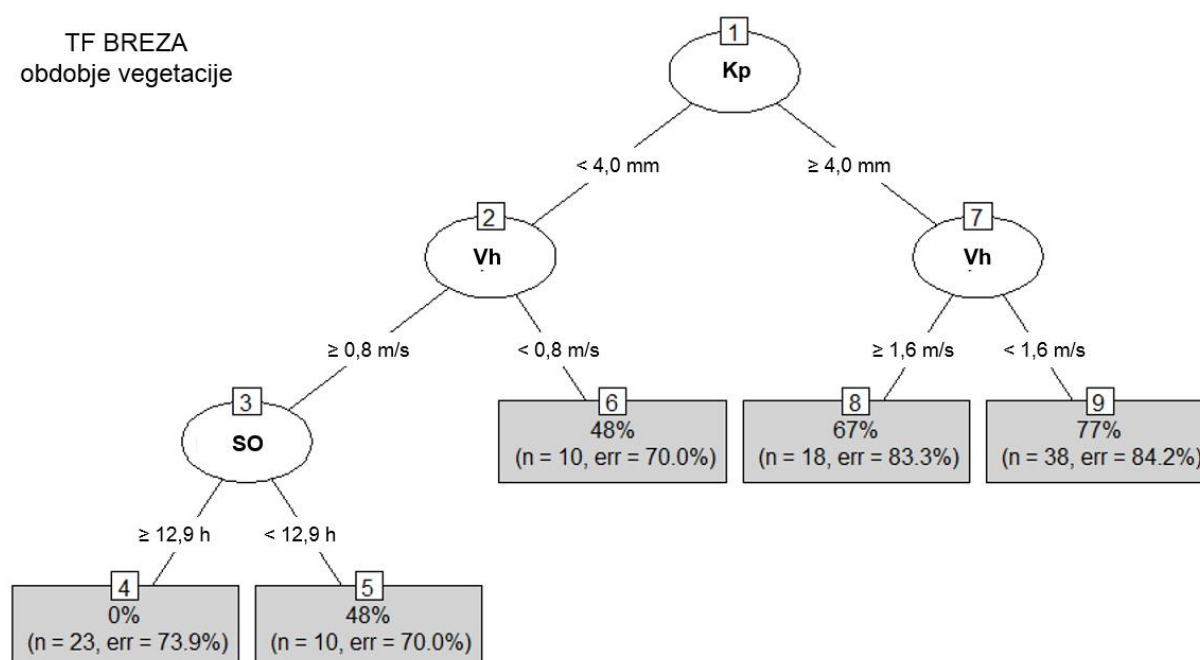
TF BOR
obdobje mirovanja

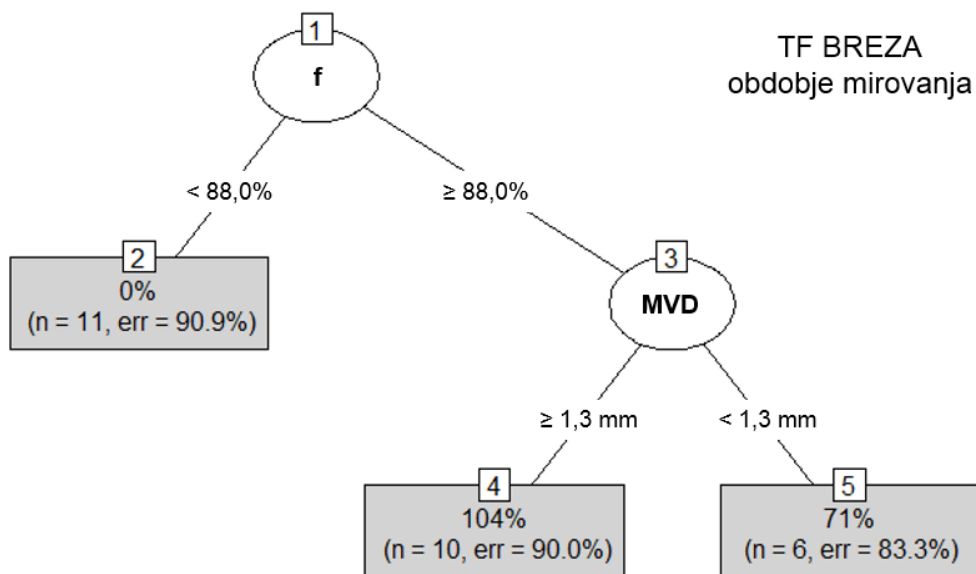
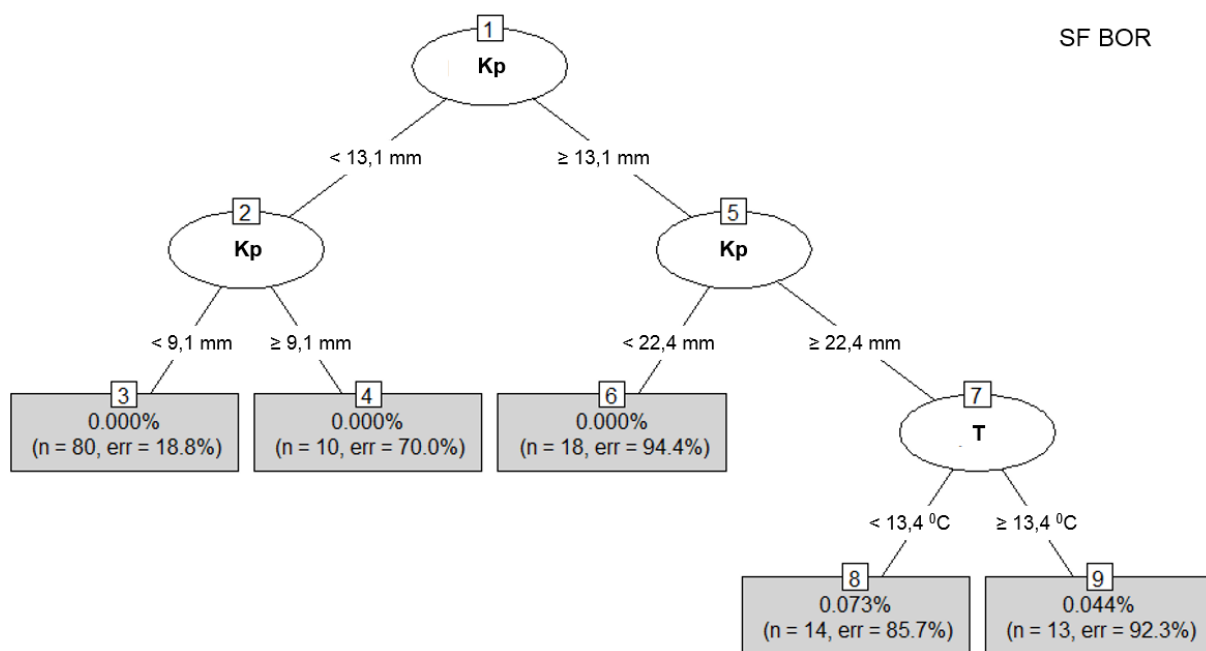


TF BREZA

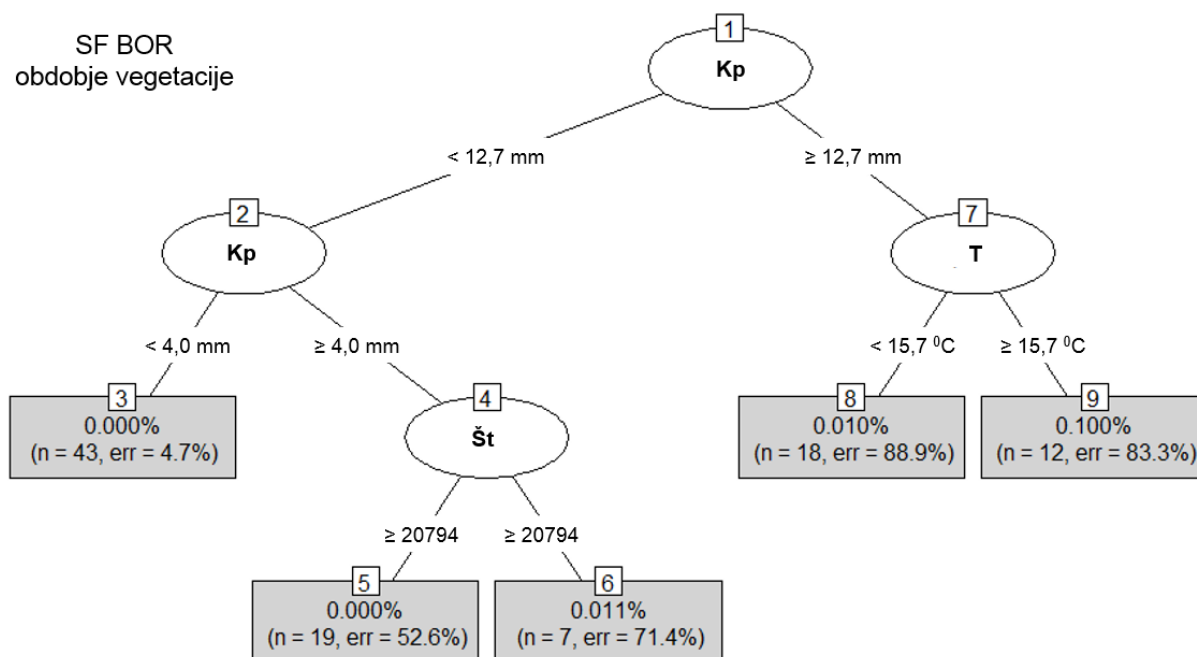


TF BREZA
obdobje vegetacije

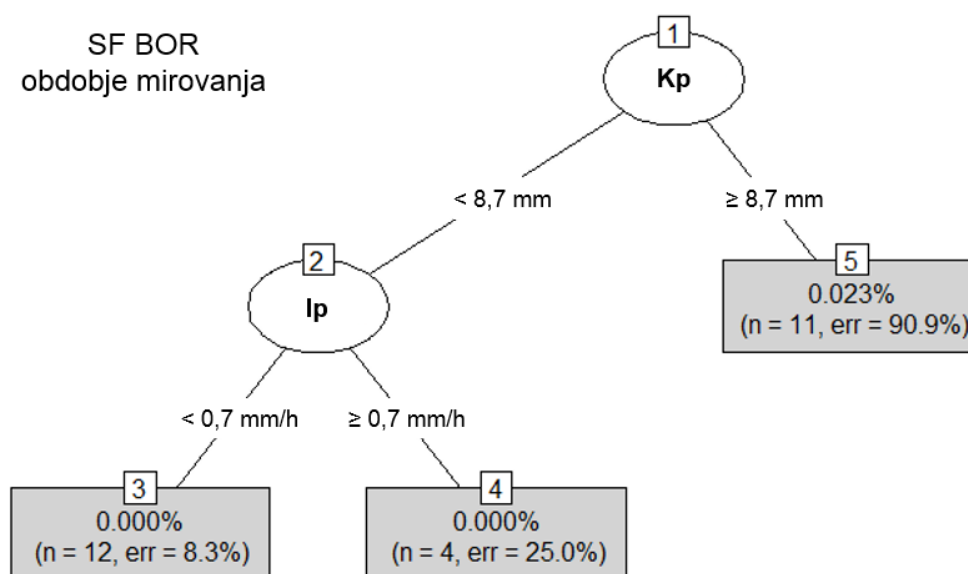


**Odtok po deblu (SF)**

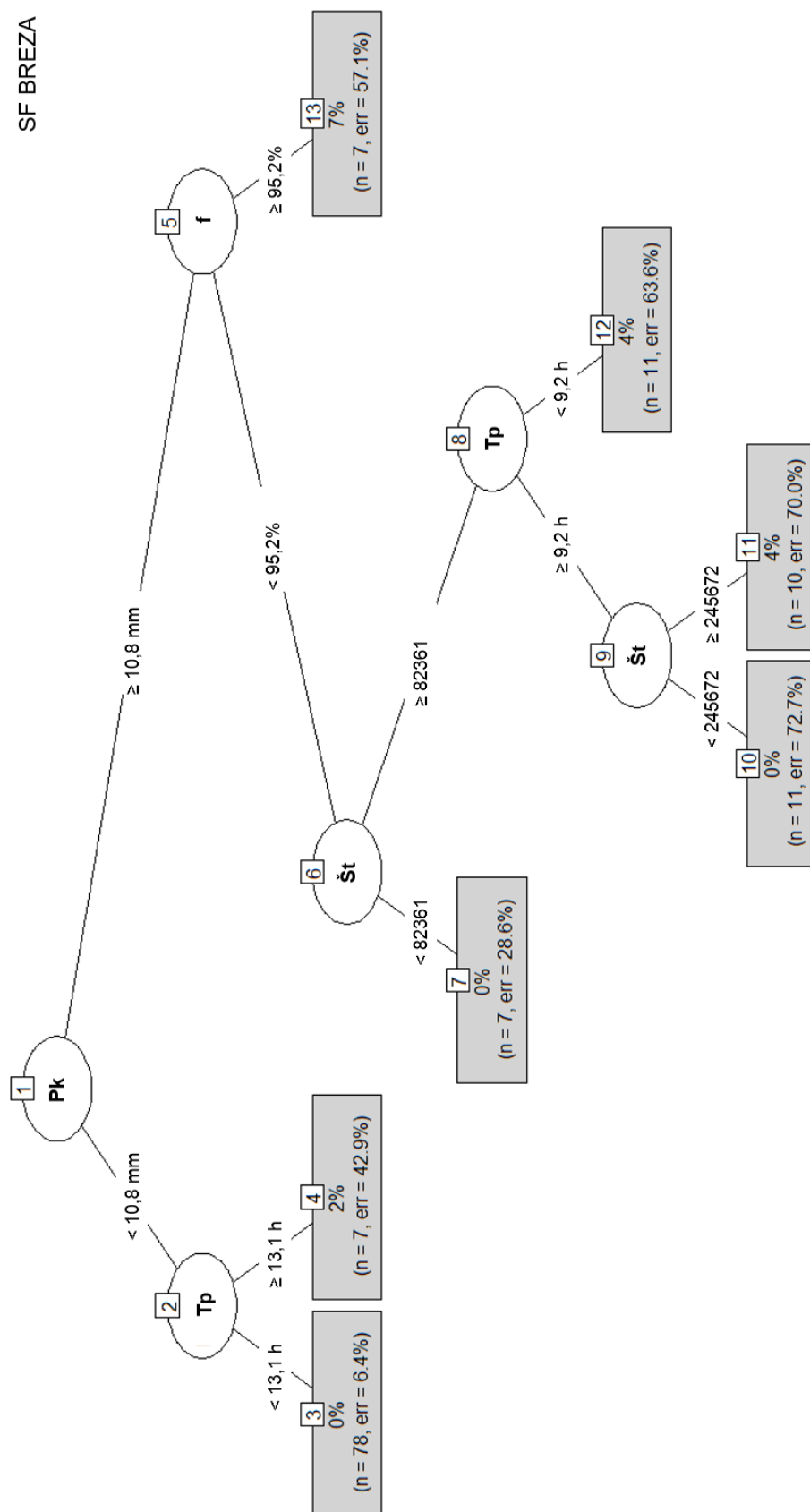
SF BOR
obdobje vegetacije



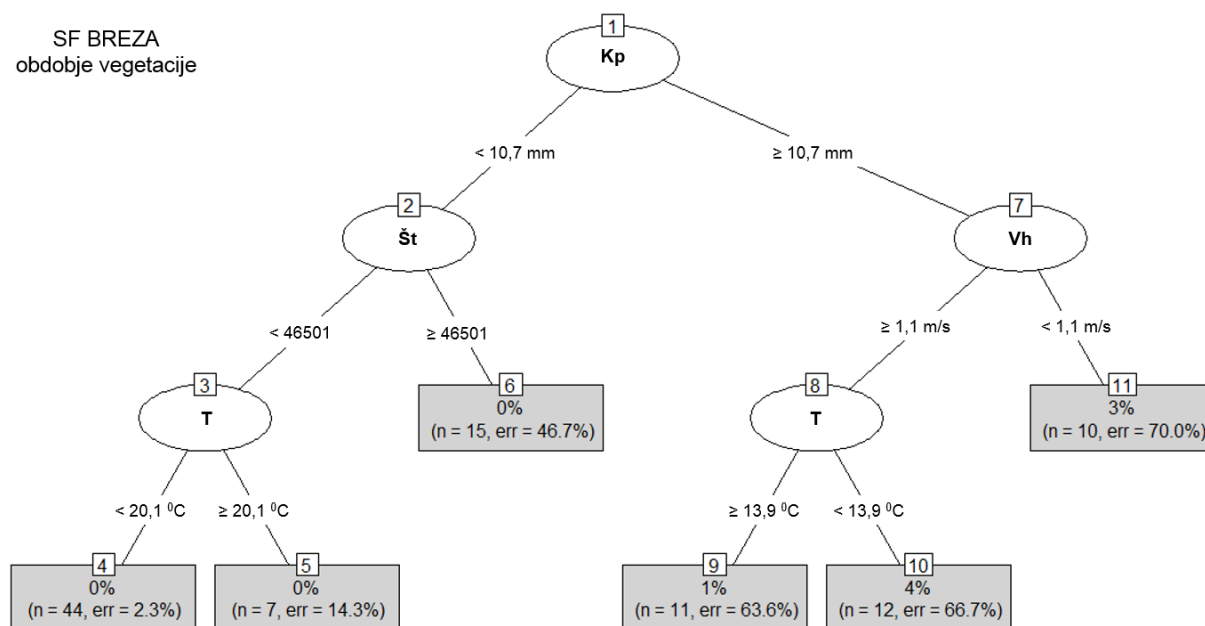
SF BOR
obdobje mirovanja



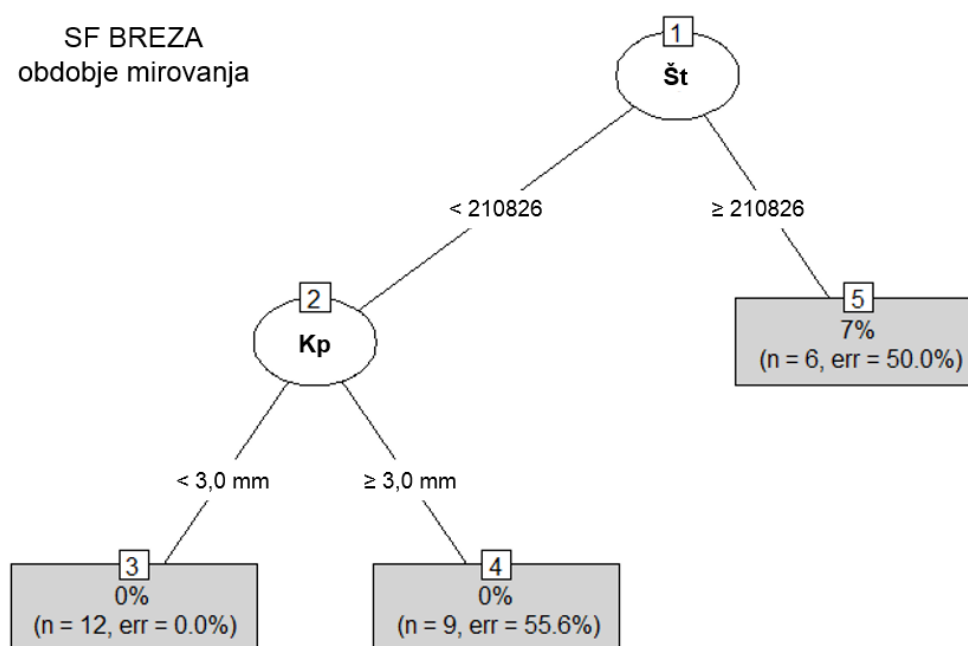
SF BREZA



SF BREZA
obdobje vegetacije



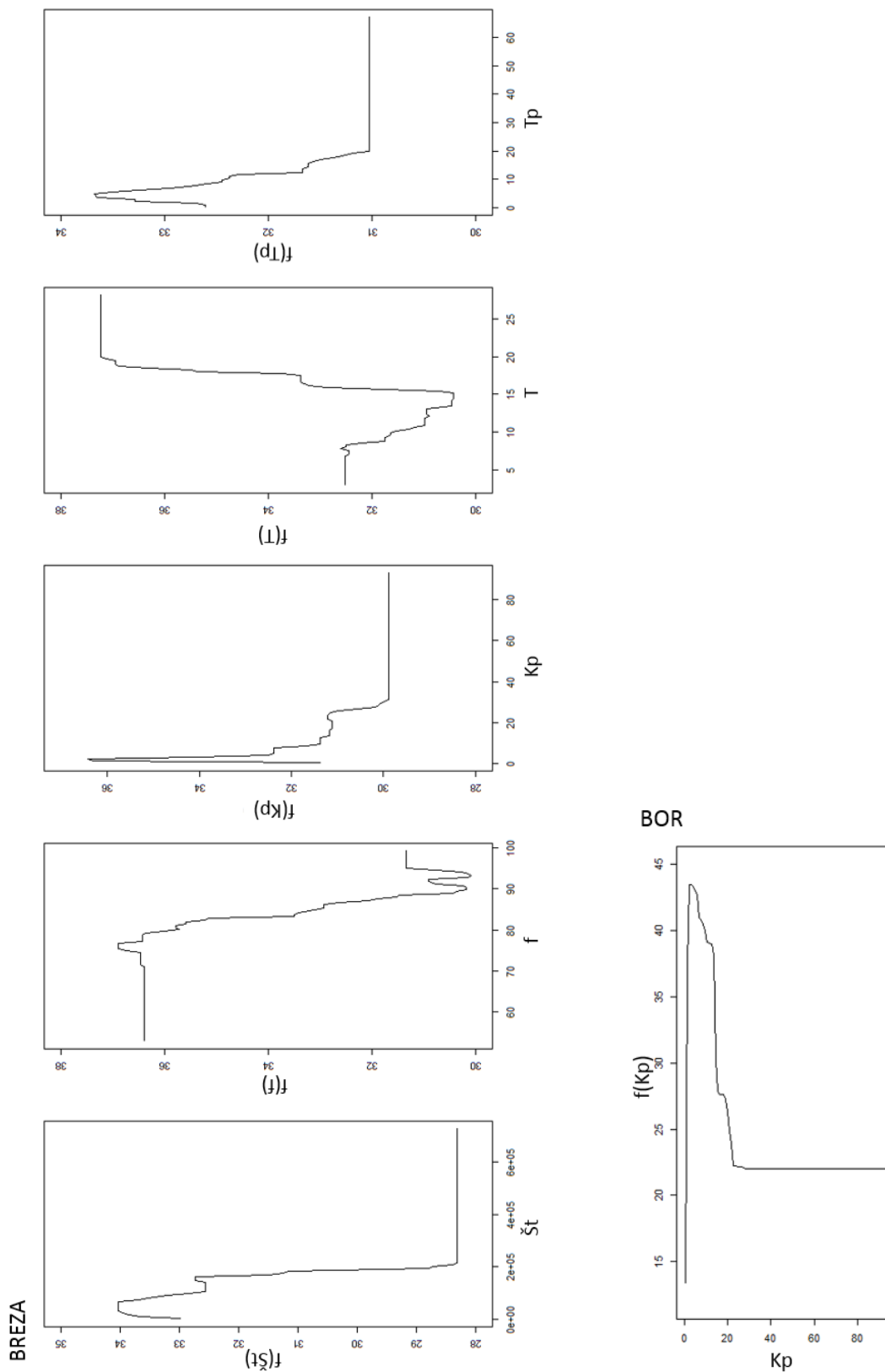
SF BREZA
obdobje mirovanja



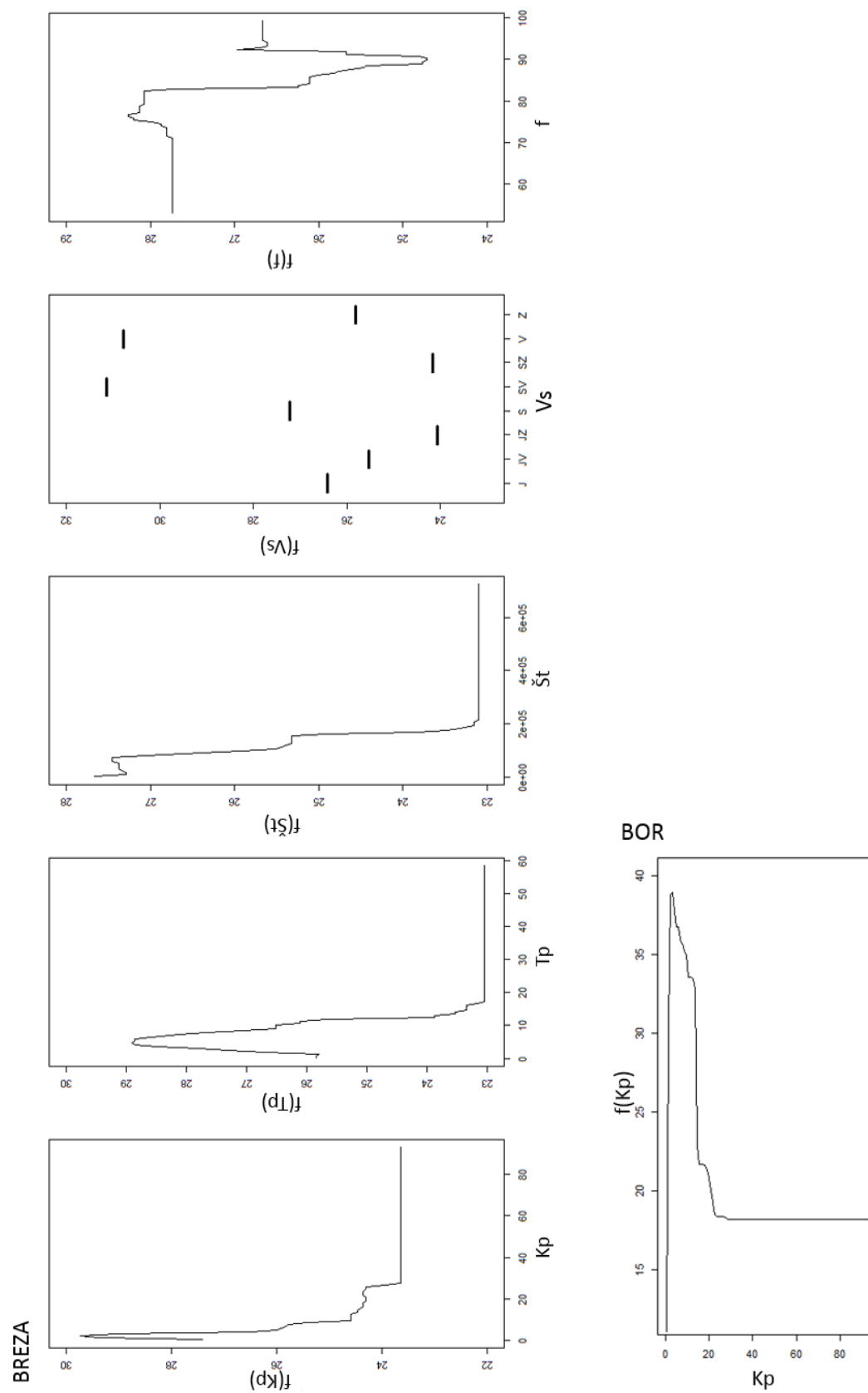
Priloga D: Grafi delne odvisnosti (PDP) najbolj vplivnih meteoroloških spremenljivk glede na BRT

PRESTREZANJE PADAVIN (I)

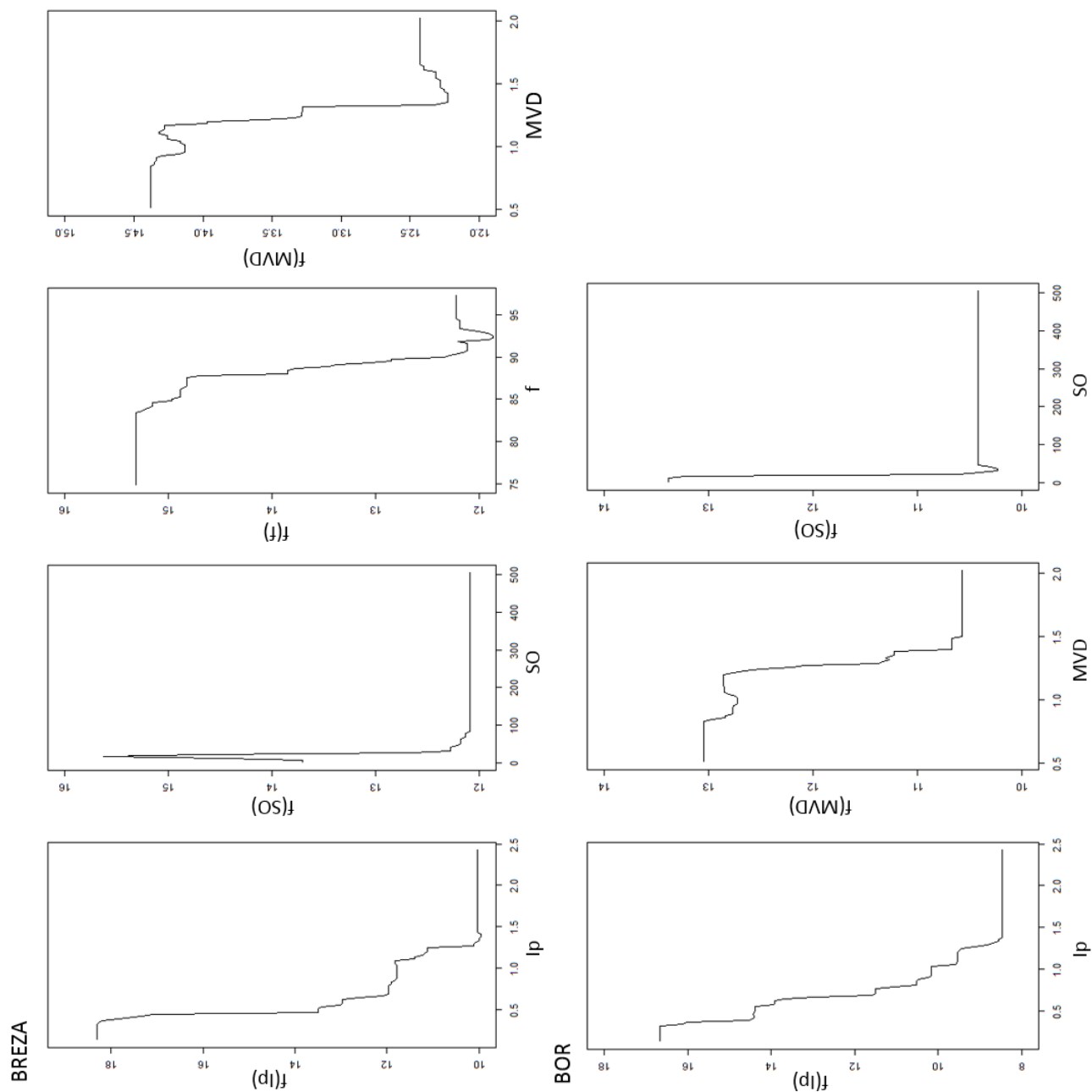
Celotno obdobje meritev



Obdobje vegetacije



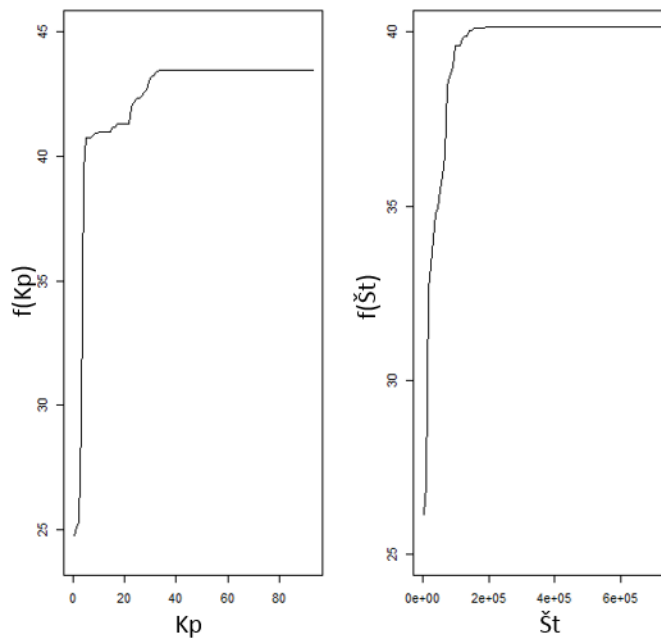
Obdobje mirovanja



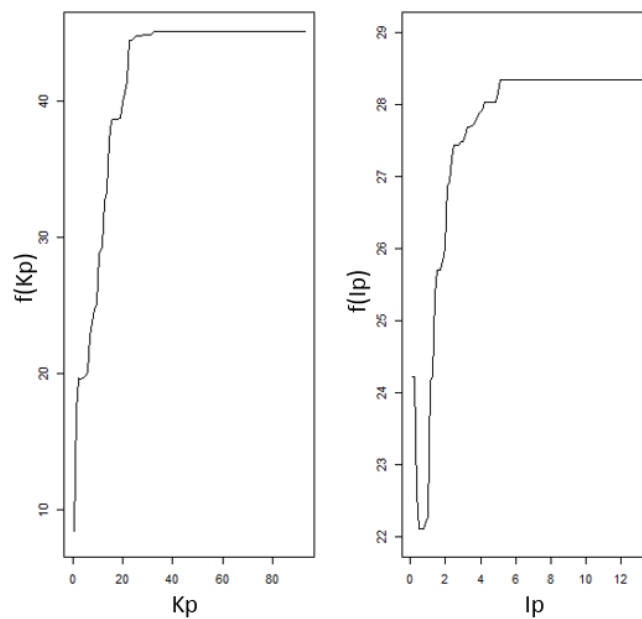
PREPUŠČANJE PADAVIN (TF)

Celotno obdobje meritev

BREZA

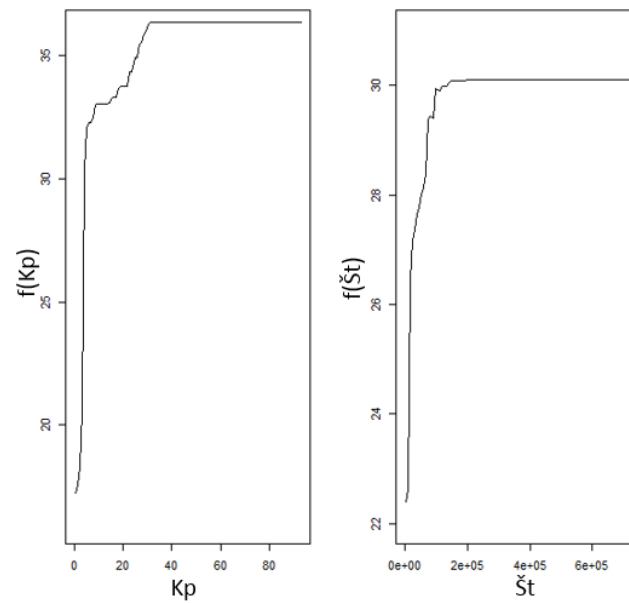


BOR

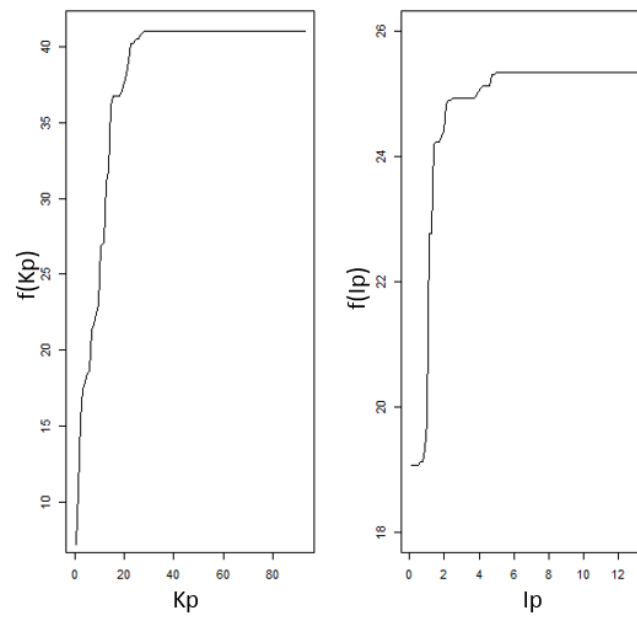


Obdobje vegetacije

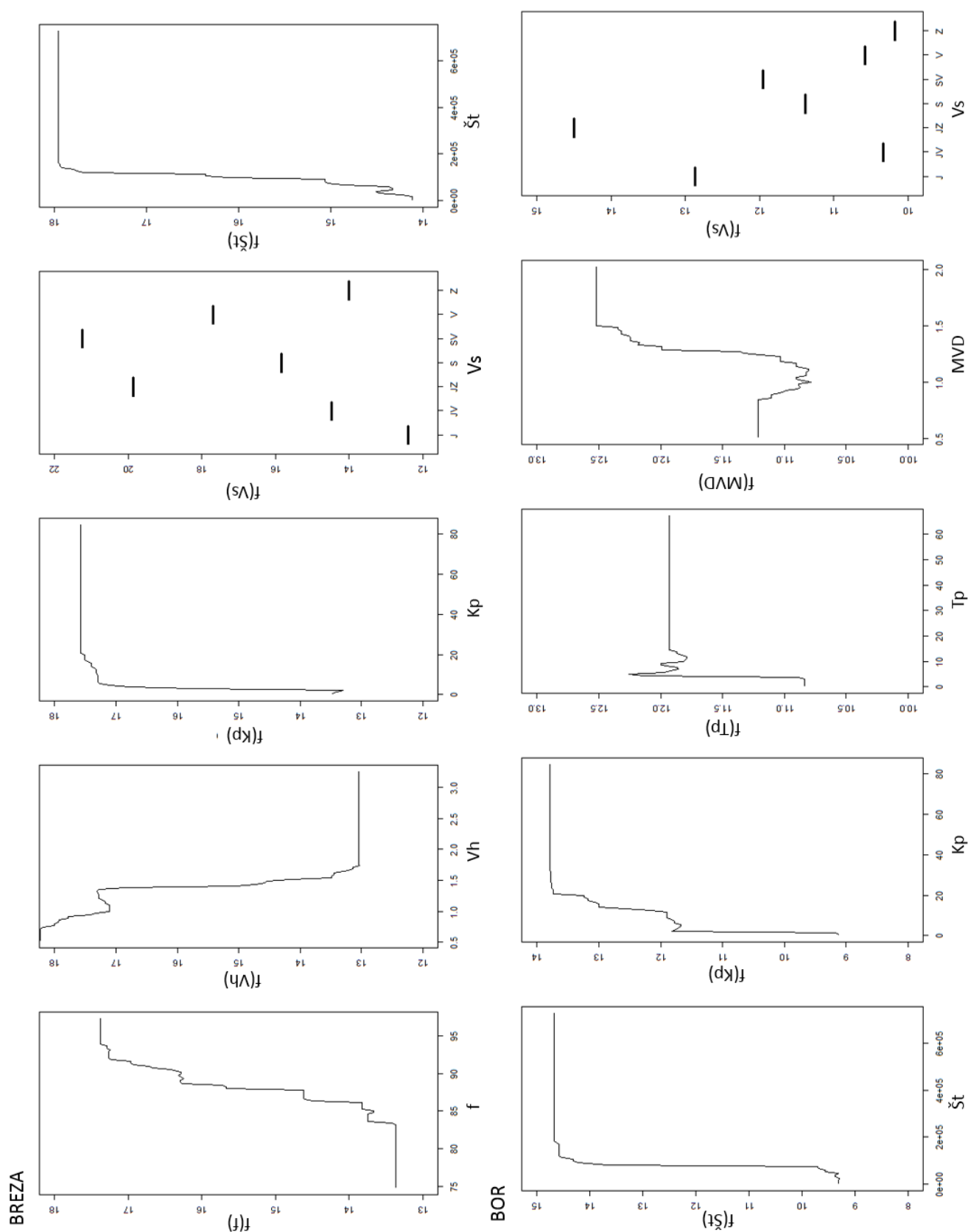
BREZA



BOR



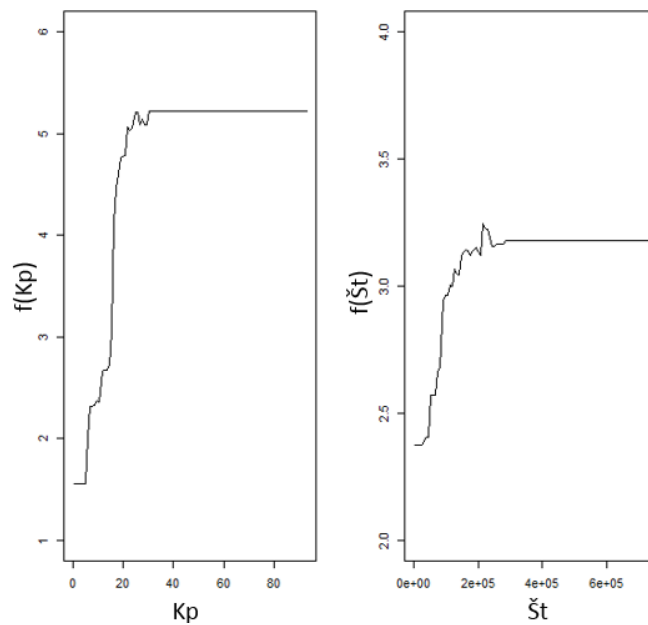
Obdobje mirovanja



ODTOK PO DEBLU (SF)

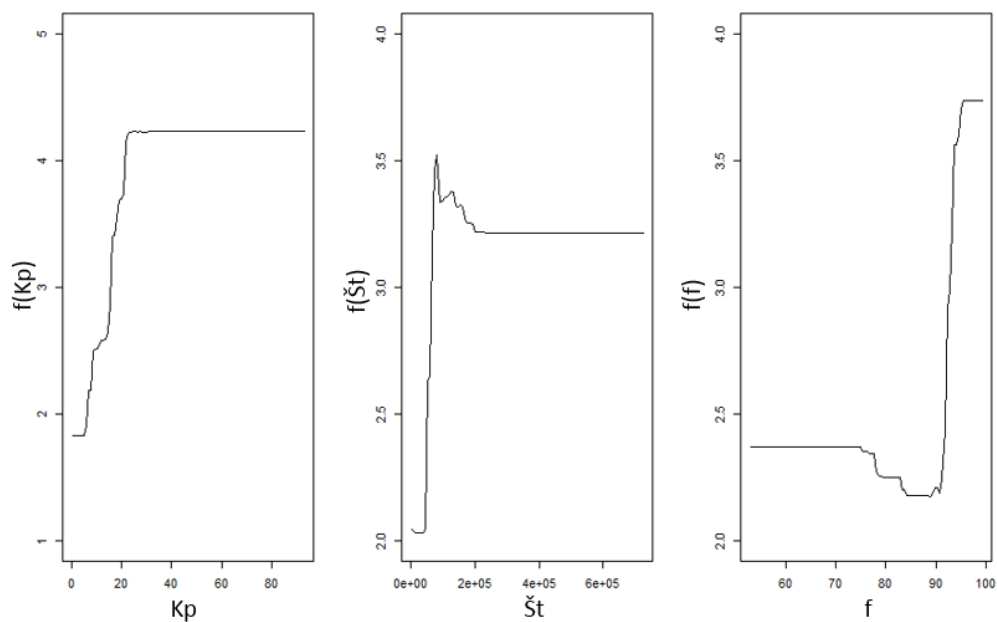
Celotno obdobje meritev

BREZA

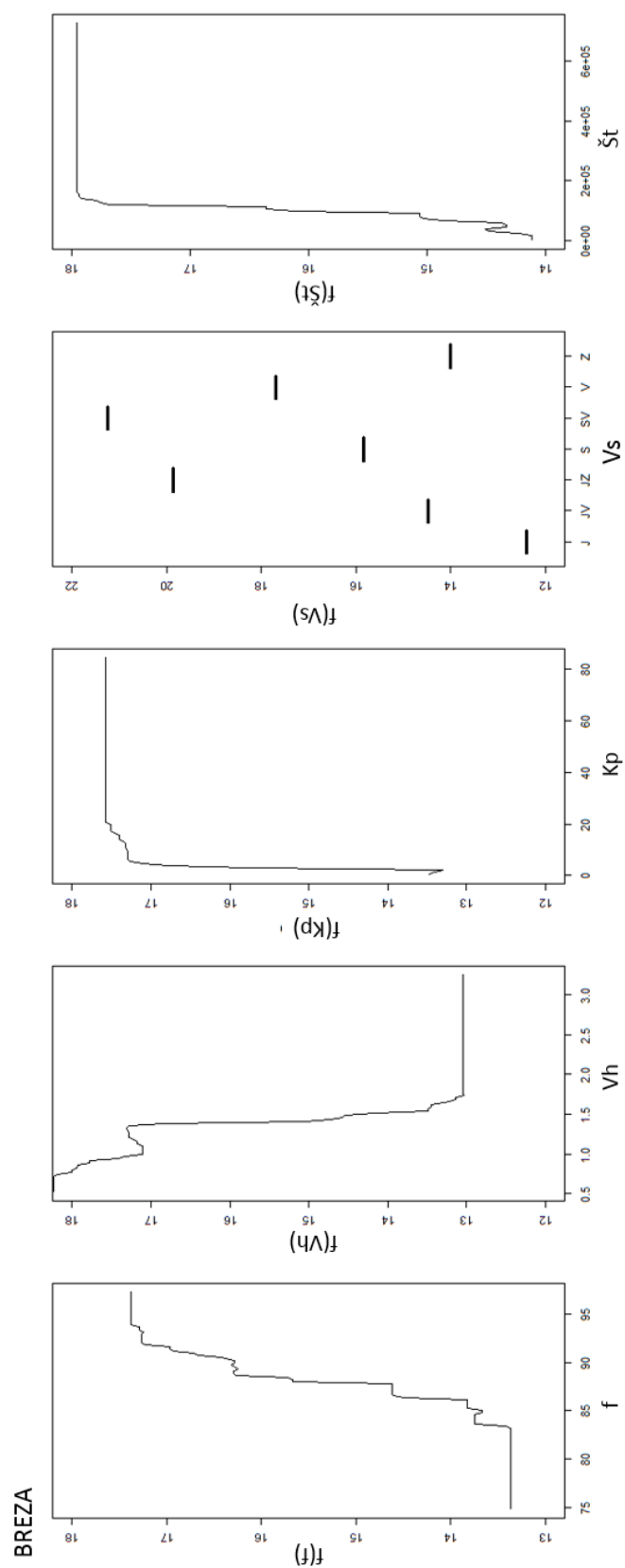


Obdobje vegetacije

BREZA



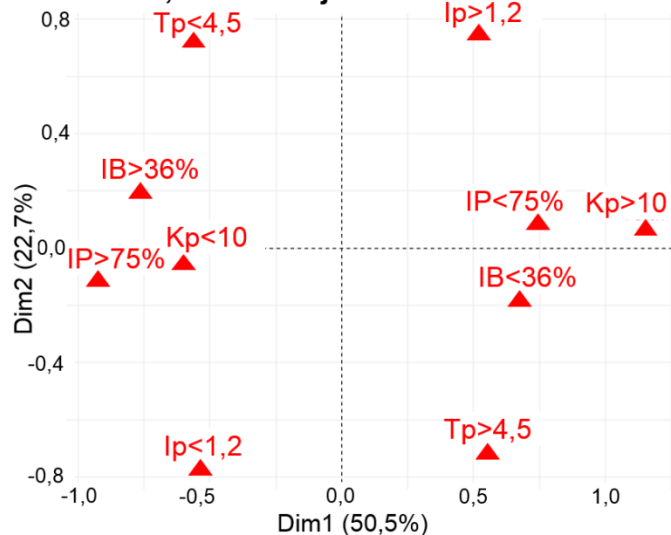
Obdobje mirovanja



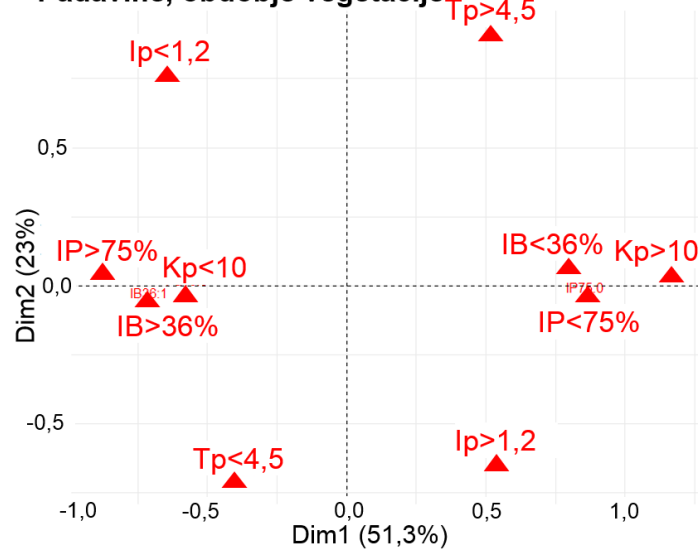
Priloga E: Rezultati analize MCA

Prestrezanje padavin (I)

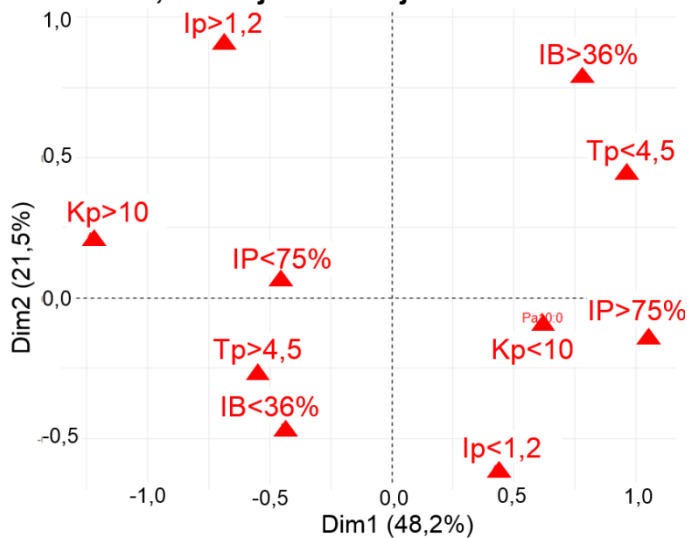
Padavine, vsa obdobja

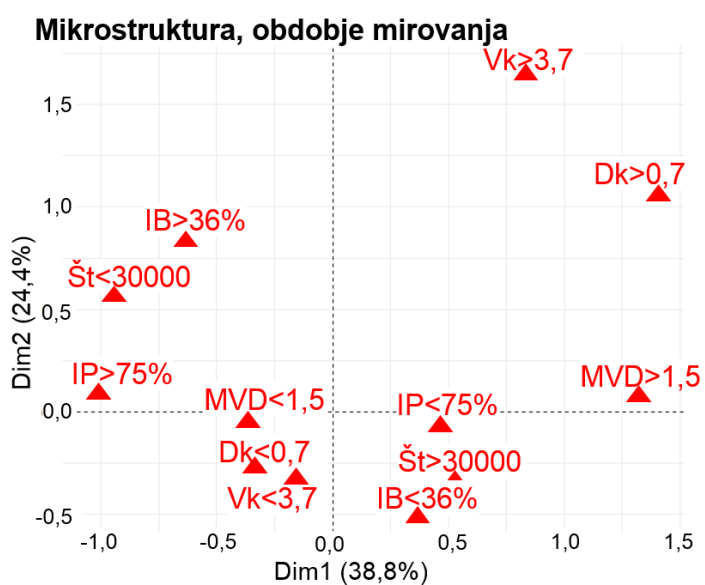
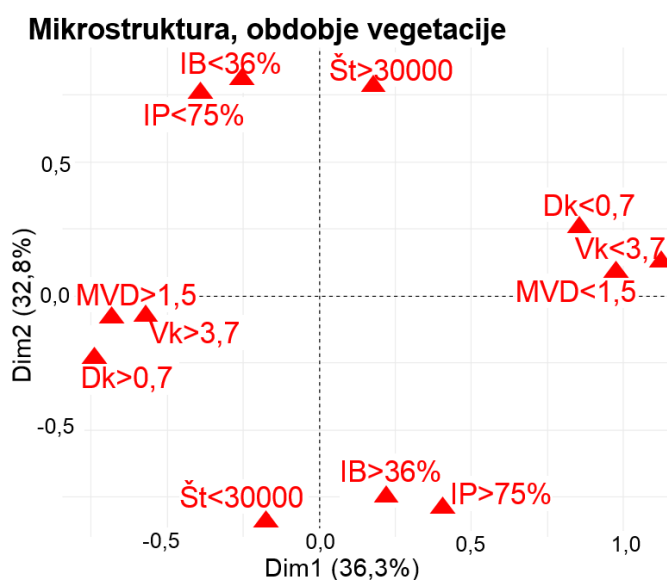
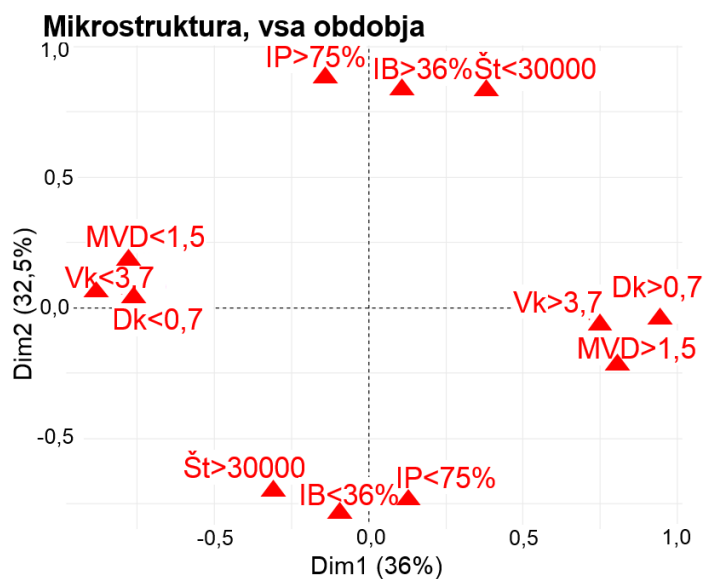


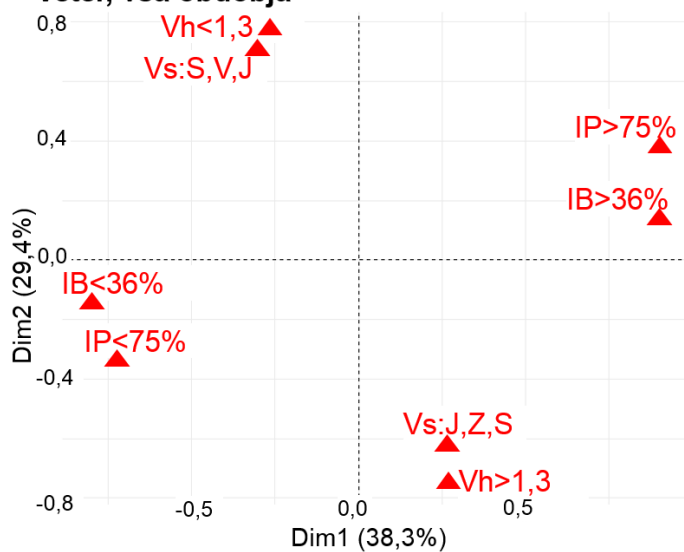
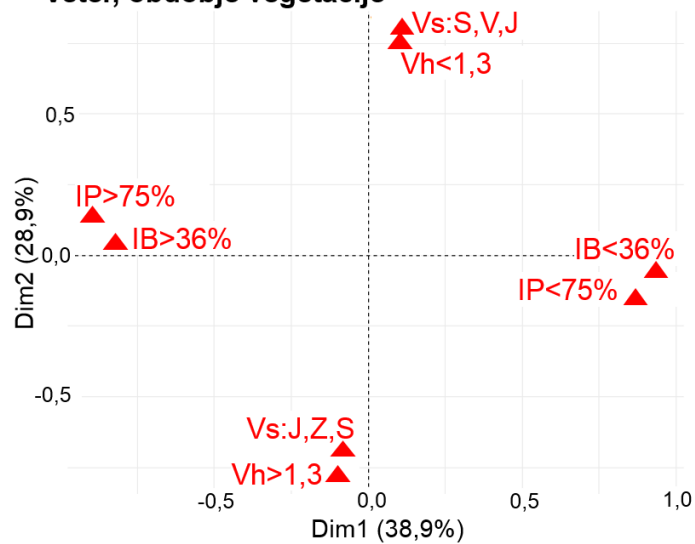
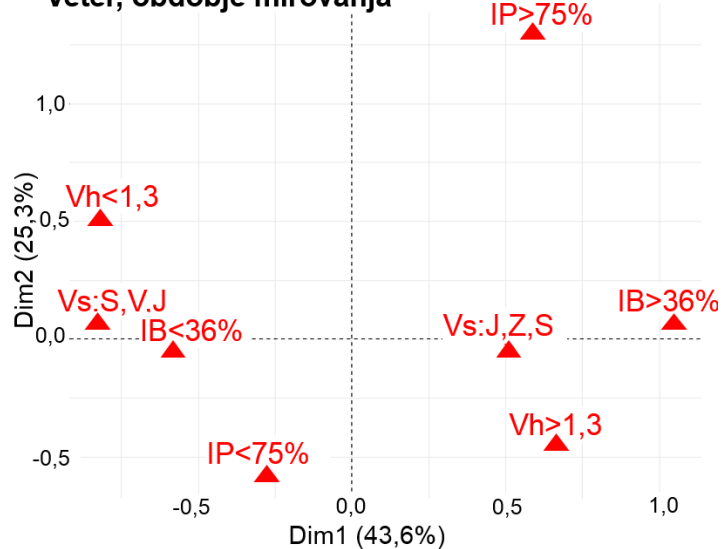
Padavine, obdobje vegetacije



Padavine, obdobje mirovanja

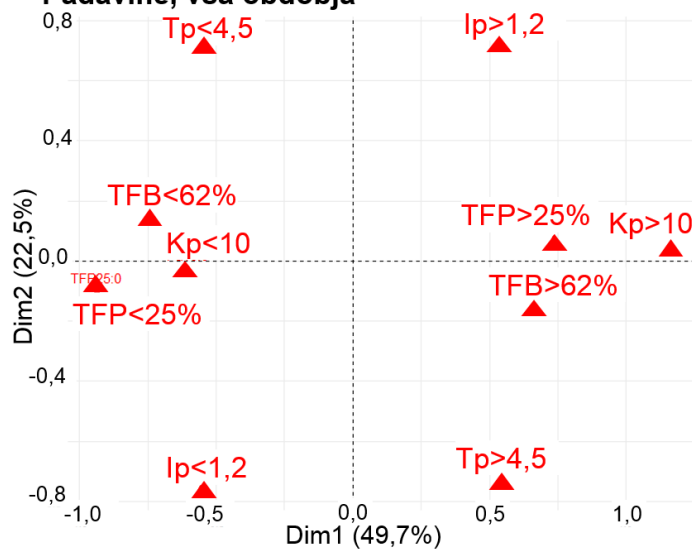




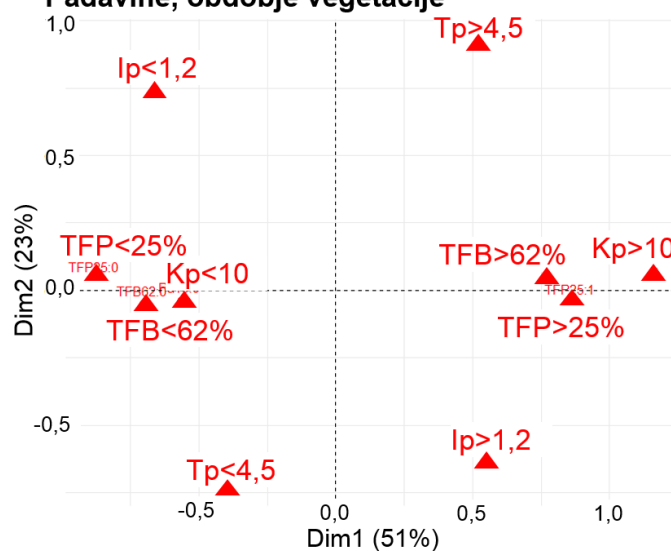
Veter, vsa obdobja**Veter, obdobje vegetacije****Veter, obdobje mirovanja**

Prepuščanje padavin (TF)

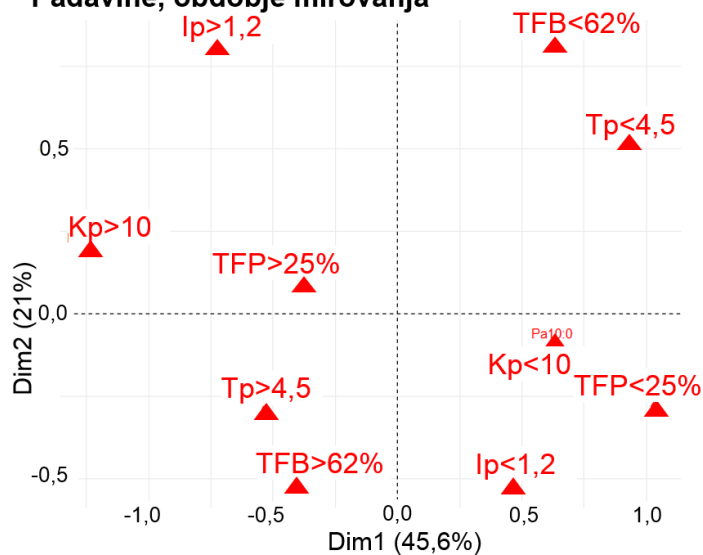
Padavine, vsa obdobja

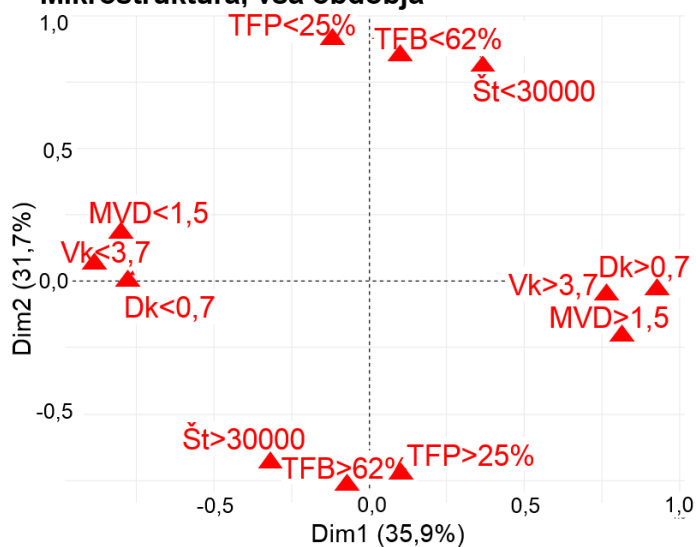
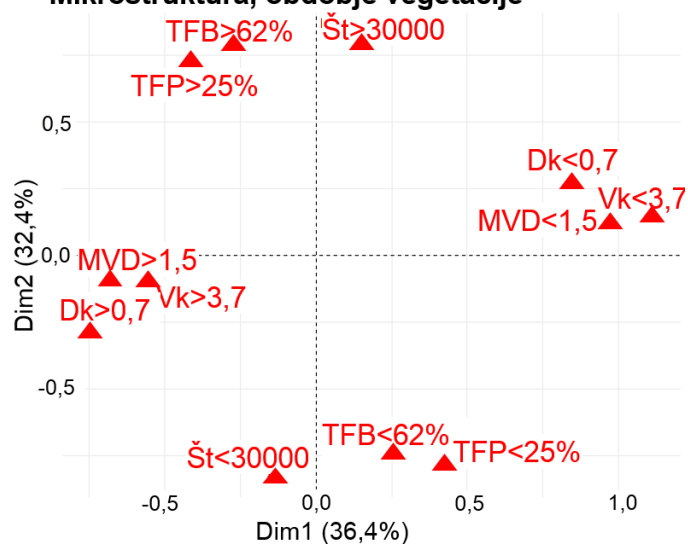
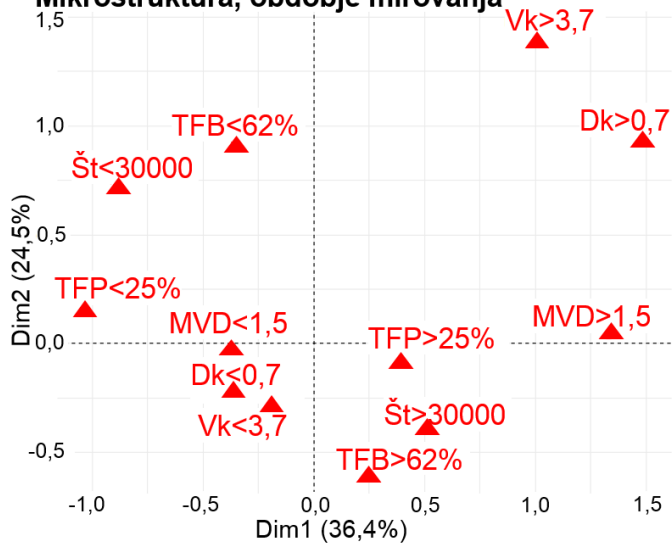


Padavine, obdobje vegetacije

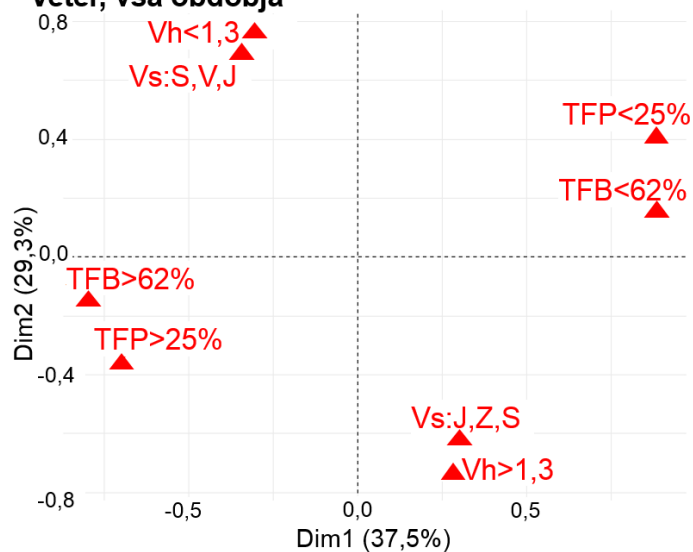


Padavine, obdobje mirovanja

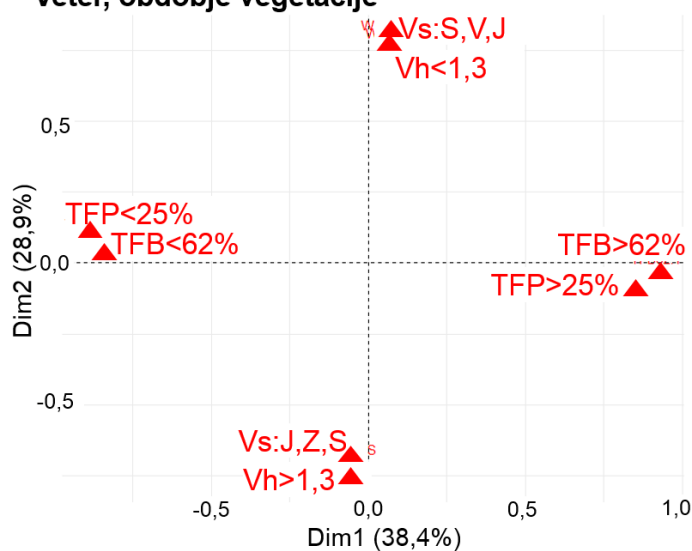


Mikrostruktura, vsa obdobja**Mikrostruktura, obdobje vegetacije****Mikrostruktura, obdobje mirovanja**

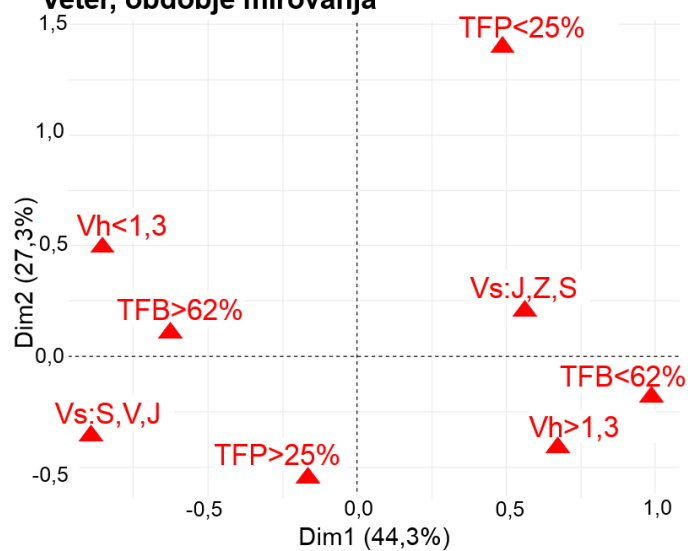
Veter, vsa obdobja



Veter, obdobje vegetacije

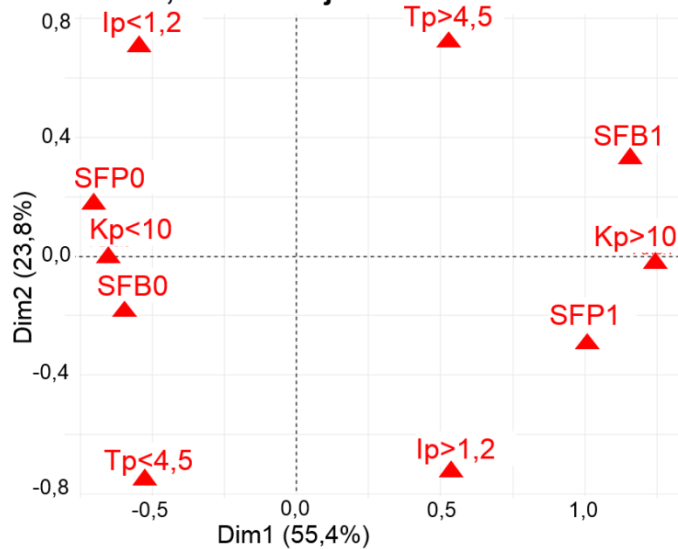


Veter, obdobje mirovanja

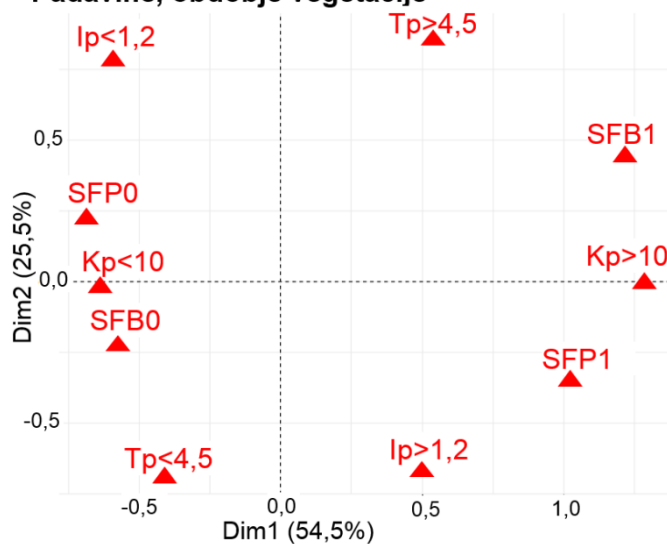


Odtok po deblu (SF)

Padavine, vsa obdobja



Padavine, obdobje vegetacije



Padavine, obdobje mirovanja

