

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Doktorand/ka

**KLAUDIJA LEBAR**

**VPLIV HIDROMETEOROLOŠKIH IN  
VEGETACIJSKIH RAZMER NA DINAMIKO  
SPIRANJA NITRATNEGA DUŠIKA**

Doktorska disertacija

**INFLUENCE OF HYDROMETEOROLOGICAL AND  
VEGETATION CONDITIONS ON THE DYNAMICS OF  
NITRATE FLUSHING**

Doctoral dissertation

Ljubljana, november 2021

Univerza  
v *Ljubljani*  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



**Mentor:** doc. dr. Simon Rusjan, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

**Komisija za spremljanje doktorskega študenta/-tke:**

izr. prof. dr. Mojca Šraj, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

izr. prof. dr. Nataša Atanasova, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

izr. prof. dr. Damijana Kastelec, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta,

prof. dr. Ognjen Bonacci, upok., Univerza v Splitu.

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>546.17:556.51:627.1(497.4)(043)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Klaudija Lebar</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Simon Rusjan</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Vpliv hidrometeoroloških in vegetacijskih razmer na dinamiko spiranja nitratnega dušika</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Doktorska disertacija</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>149 str., 53 sl., 21 pregl., 17 en., 5 pril. (6 str.)</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>nitratni dušik, spiranje NO<sub>3</sub>-N, oblikovanje padavinskega odtoka, porečje vodotoka Kuzlovec, gozdno porečje</b>

### **Izvleček**

Procesi kroženja enega najpomembnejših elementov, dušika, so neposredno odvisni od količine padavin in njihove časovne ter prostorske razporeditve, saj voda predstavlja glavni transportni medij in gonilno silo številnih ekosistemskih procesov. Na manj kot 1 km<sup>2</sup> velikem gozdnatem porečju v občini Polhov Gradec smo med aprilom 2018 in aprilom 2020 izvajali hkratne meritve padavin, pretokov, vsebnosti vode v tleh in kemizma vodotoka Kuzlovec. Meritve smo izvajali s kratkim časovnim korakom 20 minut. V doktorski disertaciji smo se osredotočili na analizo hidrometeoroloških in sezonskih vplivov na spremembe koncentracij in iznose nitratnega dušika s porečja. Za oceno vplivov smo uporabili multivariatne statistične analize, za identifikacijo procesov poti stekanja in virov nitratnega dušika na porečju pa smo uporabili metodo časov zakasnitve na podlagi težišč diagramov in hkratne analize časovnih sprememb obravnavanih procesov. Količine iznesenega nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov so se izkazale kot pomemben člen v izračunih masnih bilanc. Z naraščanjem intenzitete in količine padavin pa lahko pričakujemo tudi večje spremembe koncentracij med dogodki, medtem ko se je pri količinah iznesenega dušika poleg količine padavin kot pomemben dejavnik izkazalo trajanje padavin. Trajanje padavin je tudi eden najpomembnejših kazalnikov časa pojava težišča iznosa nitratnega dušika in hidrograma. S krajšimi in intenzivnejšimi dogodki bi tako lahko pričakovali še hitrejši odziv porečja, kar bi pomenilo večje volumne vode in količine spranega nitratnega dušika v krajšem času. Raziskave na naravnih porečjih, ki pokrivajo širok spekter podnebnih dejavnikov in hidrogeoloških lastnosti porečij, so zato ključnega pomena za oceno vplivov podnebnih sprememb in človekovih dejavnosti na vodni in dušikov krog. Pri tem bodo ključnega pomena predvsem tehnologije, ki omogočajo meritve s kratkim časovnim korakom in ustrezno točnostjo. Kot se je izkazalo v pričujoči nalogi, lahko na podlagi pogostih meritev kemizma vode bolje sklepamo o prevladujočih procesih padavinskega odtoka in transporta snovi ter izboljšamo njihovo konceptualno razumevanje.

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>546.17:556.51:627.1(497.4)(043)</b>
<b>Author:</b>	<b>Klaudija Lebar</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. Prof. Simon Rusjan, Ph.D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Influence of hydrometeorological and vegetation conditions on the dynamics of nitrate flushing</b>
<b>Document type:</b>	<b>Doctoral dissertation</b>
<b>Notes:</b>	<b>149 p., 53 fig., 21 tab., 17 eq., 5 ann. (6 p.)</b>
<b>Keywords:</b>	<b>nitrate nitrogen, NO<sub>3</sub>-N flushing, runoff formation, Kuzlovec river catchment, forested catchment</b>

### **Abstract**

Processes of nitrogen cycling are directly dependent on the amount of precipitation and its temporal and spatial distribution, as water is the main transport medium and the driving force of many ecosystem processes. Between April 2018 and April 2020 we performed simultaneous measurements of precipitation, discharges, soil moisture, and the physico-chemical parameters of the Kuzlovec stream in a forested catchment in Polhov Gradec municipality. The area of the catchment is less than 1 km<sup>2</sup>. The measurements were performed with a short time step of 20 minutes. In the doctoral dissertation, we focused on the analysis of the hydrometeorological and seasonal effects on changes in concentrations and amounts of exported nitrate nitrogen. Multivariate statistical analyses were used to assess the effects. Moreover, the methodology of centroid time lags was used to identify the processes of runoff formation,. The amounts of nitrate nitrogen exported during the rainfall events proved to be an important element in the calculations of mass balances. If the intensity of precipitation increases, we can expect higher absolute changes of concentrations during events, whereas rainfall duration, besides rainfall amount, proved to be important for the amounts of exported nitrogen. The rainfall duration proved to be one of the most important indicators of the time of occurrence of the centroid of nitrate nitrogen export diagram and of the hydrograph. With shorter and more intense events, we could expect an even faster response of the river catchment, which would mean larger volumes of water and amounts of flushed nitrate nitrogen in a shorter time. Research in a natural river catchment, covering a wide range hydrometeorological factors is therefore crucial for assessing the impacts of climate change and human activities on the water and nitrogen cycle in the future. Technologies that enable measurements with a short time step and appropriate accuracy will be of key importance. As shown in this dissertation, based on high-frequency measurements of water chemistry we can better infer the predominant processes of rainfall-runoff and transport of nutrients and improve their conceptual understanding.

*»Ta stran je namenoma prazna«*



## ZAHVALA

Ta naloga ni samo plod mojega dela, ampak se v njej odražajo tudi številne zasluge mnogih izmed vas, ki ste me tako ali drugače podpirali na tej poti.

Zahvaljujem se mentorju, doc. dr. Simonu Rusjanu, ki je svojo vlogo opravljal v pravem pomenu besede. Vrata njegovega kabineta so bila vedno odprta za reševanje problemov, diskusijo različnih vidikov ali zgolj za pogovor.

Hvala Katedri za splošno hidrotehniko UL FGG, ki mi je omogočila raziskave in prva leta študija, še posebej prof. dr. Mitji Brillyju, ki je v meni prepoznal doktorsko kandidatko. Zahvaljujem se tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS, ki je finančno podprla zadnji dve leti doktorskega študija.

Hvala strokovni komisiji, ki me je s konstruktivnimi komentarji in predlogi usmerjala na pravo pot. Še posebej se zahvaljujem izr. prof. dr. Damijani Kastelec za vso poslano literaturo, čas za sestanke na daljavo in dragocene nasvete za analizo podatkov s statističnimi metodami.

Hvala Mojcamu. Izr. prof. dr. Mojci Šraj iskrena hvala za spodbujanje k pisanju člankov in raziskovanju, posojene knjige, poslani članke in vse strokovne ter življenjske nasvete. Hvala Mojci Vilfan za vsa lektorska pojasnila, prevode v angleščino in brezpogojno spodbujanje pri delu.

Hvala viš. pred. dr. Andreju Vidmarju za vse dneve na terenu, ki so me naučili ceniti lastno pridobljene podatke in prenesti inženirsko znanje v prakso.

Hvala vsem mlajšim sodelavcem (po abecednem vrstnem redu): Katarini, Mateji, Nejcju in Tamari. Marsikdaj so problemi po vaši zaslugi izginili in se rešitve pojavile kar ob kavi in sproščenih pogovorih. Prvi trije pa ste mi bili s svojim delom še posebej velik vzor! Tamara, s tvojo pomočjo je pobiranje podatkov in vzdrževanje opreme bilo učinkovitejše in zabavnejše.

Posebna hvala mojim najbližjim. Hvala sestri Mojci in babici Cvetki, ki sta razumeli redkejšje obiske v Prekmurju. Hvala tebi, Marko, za vse spodbudne besede in odrekanja. Vsem trem velika hvala, ker ste s ponosom verjeli vame.

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE .....	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM .....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA .....	VII
KAZALO VSEBINE .....	IX
KAZALO PREGLEDNIC.....	XIII
KAZALO SLIK .....	XV
LIST OF TABLES .....	XIX
LIST OF FIGURES.....	XXI
KAZALO PRILOG .....	XXV
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XXVII
1 UVOD .....	1
1.1 Opis problematike in relevantnost problema .....	1
1.2 Hipoteze .....	4
1.3 Cilji.....	4
2 TEORETIČNE OSNOVE .....	6
2.1 Kroženje dušika v gozdnih ekosistemih.....	6
2.2 Pregled raziskav spremljanja koncentracij hranil v vodotokih .....	9
2.3 Povezanost hidrometeoroloških razmer s spiranjem nitratnega dušika.....	14
2.4 Povezanost sezonskih vegetacijskih razmer s spiranjem nitratnega dušika .....	16
3 METODE DELA.....	17
3.1 Opis eksperimentalnega porečja.....	17
3.2 Merska oprema in merske metode .....	22
3.2.1 Meritve padavin.....	23
3.2.2 Meritve višine vode in pretokov .....	25
3.2.3 Meritve vsebnosti vode v tleh.....	25
3.2.4 Meritve fizikalno-kemijskih lastnosti vode .....	26

---

3.2.5	Meritve sezonske spremenljivosti vegetacije.....	29
3.3	Analiza merjenih spremenljivk.....	30
3.3.1	Določitev režimov iznosa nitratnega dušika s porečja.....	30
3.3.2	Časovna povezanost hidrometeoroloških procesov in procesov spiranja nitratnega dušika 32	
3.3.3	Določitev obdobjev sezonske vegetacijske dinamike .....	34
3.3.4	Razvrščanje enot v skupine.....	37
3.3.5	Analiza glavnih komponent (PCA).....	39
3.3.6	Multipla linearna regresija (MLR).....	41
4	REZULTATI.....	44
4.1	Padavine .....	44
4.2	Pretok.....	47
4.3	Vsebnost vode v tleh .....	48
4.4	Vegetacijske in hidrometeorološke lastnosti dogodkov .....	50
4.5	Koncentracije nitratnega dušika .....	57
4.5.1	Razmere v času baznega odtoka .....	58
4.5.2	Razmere med padavinskimi dogodki.....	60
4.6	Režimi iznosa nitratnega dušika s porečja.....	67
5	ANALIZA IN RAZPRAVA.....	72
5.1	Vpliv lastnosti padavinskih dogodkov, hidroloških in vegetacijskih razmer na spremembe koncentracij NO <sub>3</sub> -N v vodotoku in iznose s porečja .....	72
5.1.1	Rezultati hierarhične metode razvrščanja.....	72
5.1.2	Rezultati razvrščanja z metodo voditeljev .....	73
5.1.3	Rezultati analize glavnih komponent (PCA) .....	76
5.1.4	Vpliv lastnosti padavin brez hidroloških podatkov .....	86
5.1.5	Razprava .....	92
5.2	Identifikacija procesov oblikovanja padavinskega odtoka.....	95
5.2.1	Časovni zamiki procesov .....	95
5.2.2	Podrobnejša in celovita analiza dogodkov.....	102

5.2.3	Razprava .....	112
6	SKLEPI .....	118
7	ZAKLJUČKI .....	120
8	POVZETEK .....	123
9	SUMMARY .....	125
	VIRI .....	128
	PRILOGE .....	150

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pregled študij in glavnih rezultatov meritev koncentracij nitratnega dušika na gozdnatih porečjih.....	12
Preglednica 2: Površine posameznih rab tal na porečju Kuzlovec in njihovi deleži (MKGP, 2018)....	18
Preglednica 3: Opisi horizontov talnega profila na porečju vodotoka Kuzlovec (Agrarius, 2018) .....	20
Preglednica 4: Rezultati laboratorijske analize vzorcev posameznih talnih horizontov (Kmetijski inštitut Slovenije, 2018) .....	21
Preglednica 5: Velikostni razredi premerov in hitrosti delcev, izmerjenih z laserskim disdrometrom Thies Clima .....	24
Preglednica 6: Seznam spremenljivk z oznakami, uporabljenih v analizi podatkov.....	30
Preglednica 7: Osnovni statistični kazalniki padavinskih dogodkov z več kot 10 mm padavin .....	46
Preglednica 8: Lastnosti volumetrične vsebnosti vode v tleh med padavinskimi dogodki z več kot 10 mm padavin (20-minutni podatki).....	50
Preglednica 9: Osnovni statistični kazalniki 20-minutnih meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec za celotno obdobje meritev .....	57
Preglednica 10: Osnovni statistični kazalniki meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec v času baznega odtoka .....	59
Preglednica 11: Osnovni statistični kazalniki 20-minutnih meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec v času padavinskih dogodkov.....	62
Preglednica 12: Razmere koncentracij $\text{NO}_3\text{-N}$ in iznosa $\text{NO}_3\text{-N}$ v času padavinskih dogodkov. V preglednici so prikazane najvišje ( $C_{max}$ ) in srednje koncentracije ( $C_{sr}$ ) med dogodkom, absolutna ( $C_r$ ) in relativna sprememba koncentracije med dogodkom ( $C_{rs}$ ) ter srednji ( $Iznos\_N$ ) in najvišji iznos nitratnega dušika med dogodkom ( $Iznos\_max$ ).....	64
Preglednica 13: Podatki o meritvah dušikovih spojin na vodotokih Gradaščica in Mali Graben v obdobju 2008–2019 (ARSO, 2020c).....	66
Preglednica 14: Naklon $b$ , razmerje $CV_C/CV_Q$ in relativne spremembe koncentracije $C_{rs}$ za posamezni dogodek .....	67
Preglednica 15: Uteži posameznih spremenljivk, upoštevanih v analizi glavnih komponent (PCA). S krepko pisavo so označene najvišje absolutne vrednosti uteži posamezne glavne komponente.....	78
Preglednica 16: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za spremenljivko povprečnega iznosa na časovno enoto $Iznos\_N$ . Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk. ....	80
Preglednica 17: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za spremenljivko najvišjega 20-minutnega iznosa med padavinskim dogodkom $Iznos\_max$ . Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk. ....	81

---

Preglednica 18: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za razpon koncentracij $\text{NO}_3\text{-N}$ med padavinskim dogodkom $Cr$ . Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk. ....	81
Preglednica 19: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za $Iznos\_N$ na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk. ....	88
Preglednica 20: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za $Iznos\_max$ na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk. ....	89
Preglednica 21: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za $Cr$ na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin. ....	91



## KAZALO SLIK

Slika 1: Shema kroženja dušika v gozdnih ekosistemih (prirejeno po Schimel in Bennett, 2004) .....	8
Slika 2: Prikaz rabe tal (MKGP, 2018) (levo) in reliefa (desno) porečja Kuzlovec.....	17
Slika 3: Struga vodotoka v času po padavinah (18. november 2019) gledano dolvodno (levo) in po dolgotrajnem obdobju brez padavin (6. januar 2020) gledano gorvodno (desno).....	18
Slika 4: Talni profil z označenimi horizonti (rdeča črte označujejo meje talnih horizontov) .....	19
Slika 5: Lokacije meritev na območju eksperimentalnega porečja Gradaščice .....	22
Slika 6: Dežemer RG3-M (levo zgoraj) in mehanizem dežemera s pomnilnikom (levo spodaj). Disdrometer v Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (desno). .....	23
Slika 7: Senzorji za meritve vsebnosti vode v tleh pred zasutjem talnega profila (levo) in naprava za beleženje podatkov (desno).....	26
Slika 8: Izvajanje kontrolne meritve z uporabo spektrofotometra HACH DR1900 (levo) in pripravljena vzorca (desno) .....	28
Slika 9: Lokacije merskih mest indeksa listne površine (levo), kjer je z rdečo barvo označena lokacija referenčnih meritev na odprtem, z modro pa lokacije v gozdu. Označena lokacija meritve v gozdu (desno).....	29
Slika 10: Shematski prikaz metode določitve časov zakasnitve posameznih spremenljivk (Sapač in sod., 2020) .....	34
Slika 11: Primer rastrskega prikaza vrednosti LAI na porečju vodotoka Kuzlovec, določenih na podlagi satelitskih posnetkov MODIS z dne 30. junija 2015.....	35
Slika 12: Razdelitev letne dinamike vegetacije v štiri fenološke faze: mirovanje, olistanje, obdobje vegetacije in odpadanja listov s karakterističnimi točkami (prirejeno po Wang in sod. (2017) in Caglar in sod. (2018)) .....	36
Slika 13: Mesečne količine padavin na porečju Kuzlovca in povprečne mesečne temperature zraka v dveletnem obdobju meritev .....	44
Slika 14: Histogram pretokov dvoletnih meritev .....	47
Slika 15: Povprečni dnevni pretoki (modra črta) in bazni odtok (rdeča črta) v dvoletnem obdobju meritev .....	48
Slika 16: Volumetrična vsebnost vode v tleh na globinah 15, 40 in 70 cm na porečju Kuzlovca v obdobju med julijem 2019 in aprilom 2020 (20-minutni podatki).....	49
Slika 17: Prikaz porazdelitve izmerjenih 20-minutnih vrednosti volumetrične vsebnosti vode v tleh z okvirjem z ročaji .....	49
Slika 18: Prikaz začetnih (Qz) in najvišjih pretokov (Qmax) za 43 dogodkov med padavinskimi dogodki .....	51
Slika 19: Podatki LAI na podlagi obdelave satelitskih posnetkov (modri krogi) in z dvojno sigmoidno funkcijo prilagojena krivulja (zelena črta). Z rdečo črtkano črto je označena meja med fenološkima	

fazama. Na sliki so prikazani tudi vrednosti LAI, pridobljene z meritvami z merilnikom LAI-2200C (rumeni kvadrati).....	52
Slika 20: Prikaz vrednosti tridnevne kumulativne evapotranspiracije pred padavinskimi dogodki za celotno obdobje, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja vegetacije .....	54
Slika 21: Prikaz števila dni brez padavin pred padavinskimi dogodki za celotno obdobje, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja vegetacije.....	54
Slika 22: Korelogram spremenljivk, uporabljenih v analizah, na podlagi Pearsonovega (levo) in Spearmanovega (desno) koeficienta korelacije.....	55
Slika 23: Primerjava razmer pri baznem odtoku v obdobju vegetacije in obdobju mirovanja z vidika koncentracij v vodotoku (a) in količine iznosa nitratnega dušika s porečja (b) (krogci ponazarjajo najmanjše in največje vrednosti ubežnikov 20-minutnih podatkov) .....	60
Slika 24: Prikaz podatkovnega niza padavin (zgoraj, dnevne vsote), pretokov in koncentracij nitratnega dušika (spodaj, 20-minutni podatki) z označenimi začetki padavinskih dogodkov (rdeče točke) .....	61
Slika 25: Primerjava razmer med padavinskimi dogodki v obdobju vegetacije in obdobju mirovanja z vidika koncentracij v vodotoku (a) in količine iznosa nitratnega dušika s porečja (b) (krogci predstavljajo najmanjše in največje vrednosti ubežnikov 20-minutnih podatkov) .....	65
Slika 26: Določitev režimov iznosov $\text{NO}_3\text{-N}$ s porečja Kuzlovec na podlagi naklona b in razmerja $CV_C/CV_Q$ .....	70
Slika 27: Prikaz standardiziranih vrednosti spremenljivk za opis padavinskih dogodkov z dodanima dendrogramoma. Na vrhu je dendrogram spremenljivk z Wardovo metodo na Spearmanovih koeficientih korelacije, levo pa dendrogram dogodkov z Wardovo metodo na kvadratih evklidskih razdalj. ....	73
Slika 28: Porazdelitev vrednosti nekaterih spremenljivk padavinskih dogodkov po skupinah, dobljenih z metodo voditeljev .....	75
Slika 29: Plaziščni diagram PCA za določitev potrebnega števila glavnih komponent .....	77
Slika 30: Padavinski dogodki v prostoru PC1, PC2 in glede na skupino, dobljeno z metodo voditeljev. Centroidi posameznih skupin so prikazani z večjim simbolom pripadajoče barve in oblike. ....	79
Slika 31: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen $Iznos\_N$ za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent. ....	84
Slika 32: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen $Iznos\_max$ za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent. ....	85
Slika 33: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen $Cr$ za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent. ....	86

Slika 34: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen $Iznos\_N$ za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko ( $Kp$ , $Tp$ ) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu .....	89
Slika 35: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen $Iznos\_max$ za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko ( $Kp$ , $Tp$ ) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu .....	90
Slika 36: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečni $Cr$ za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko ( $Kp$ , $I60$ ) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu .....	91
Slika 37: Povezava med časovnim zamikom težišča hidrograma (LAGQ) in trajanjem padavinskega dogodka .....	96
Slika 38: Linearna regresija med časom zakasnitve težišča diagrama iznosa $NO_3-N$ in težišča hidrograma za celotno obdobje meritev. Zeleni krogi prikazujejo dogodke v obdobju vegetacije, rumeni pa v obdobju mirovanja. ....	97
Slika 39: Frekvenčni histogrami časov zakasnitve LAGQ (zgoraj) in LAGN (spodaj) glede na fenološko fazo .....	98
Slika 40: Prikaz maksimalnih enournih intenzitet padavin z okvirjem z ročaji glede na obdobje vegetacije oziroma mirovanja. Zaradi boljše preglednosti vrednost $I60=52,2$ mm/h v obdobju vegetacije ni zrisana v merilu. ....	99
Slika 41: Linearna regresija med časom zakasnitve težišča diagrama volumetrične vsebnosti vode v tleh za različne globine (a–c) in težišča hidrograma. Zeleni krogi prikazujejo dogodke v obdobju vegetacije, rumeni pa v obdobju mirovanja. ....	100
Slika 42: Časovne spremembe koncentracije nitratnega dušika v odvisnosti od pretoka z označenimi pripadajočimi vrednostmi električne prevodnosti med dvema padavinskima dogodkoma.....	101
Slika 43: Padavine (a), pretok, koncentracija $NO_3-N$ (b), vsebnost vode v tleh in električna prevodnost (c) med padavinskim dogodkom 28.–29. julij 2019.....	102
Slika 44: Padavine (a), pretok, koncentracije $NO_3-N$ (b) in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 30.–31. avgust 2018. ....	103
Slika 45: Padavine (a), pretok, koncentracije $NO_3-N$ (b) in volumetrično vsebnost vode v tleh (c) med padavinskim dogodkom 14. aprila 2020 .....	105
Slika 46: Padavine (a), pretok, koncentracije $NO_3-N$ (b) in volumetrično vsebnost vode v tleh (c) med padavinskim dogodkom 2. septembra 2019 .....	106
Slika 47: Padavine (a), pretok, koncentracije $NO_3-N$ (b), volumetrične vsebnosti vode v tleh in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 22.–23. decembrom 2019 .....	107
Slika 48: Padavine (a), pretok, koncentracije $NO_3-N$ (b) in električna prevodnost (c) med padavinskim dogodkom 8. julija 2018.....	108

---

Slika 49: Padavine (a), pretok, koncentracije NO <sub>3</sub> -N (b), volumetrične vsebnosti vode v tleh in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 2. avgusta 2019 .....	109
Slika 50: Padavine (a), pretok, koncentracije NO <sub>3</sub> -N (b) in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 1. februarja 2019.....	110
Slika 51: Razmere padavin (a), koncentracij NO <sub>3</sub> -N, pretoka (b), električne prevodnosti (c) in iznosa nitratnega dušika (d) med padavinskim dogodkom med 28. in 30. oktobrom 2018.....	111
Slika 52: Količine iznesenega nitratnega dušika med padavinskim dogodkom 28.–30. oktobrom 2018 .....	112
Slika 53: Shematski prikaz procesov tvorbe padavinskega odtoka (velikosti modrih puščic kažejo hitrost tvorbe) in spiranja nitratnega dušika s porečja (velikosti rdečih puščic kažejo delež nitratnega dušika k celotnemu iznosu). Na desni strani je shematski prikaz časovnih sprememb obravnavanih procesov: padavin (P), pretoka (Q), električne prevodnosti (EC), koncentracije NO <sub>3</sub> -N (C) in vsebnosti vode v tleh (SM).....	115

## LIST OF TABLES

Table 1: Overview of studies and main results about measurements of concentrations of nitrate nitrogen in forested catchments.....	12
Table 2: Areas of individual land use type and their proportions in the Kuzlovec river catchment (MKGP, 2018).....	18
Table 3: Description of soil horizons in the Kuzlovec river catchment (Agrarius, 2018) .....	20
Table 4: Results of laboratory analysis of samples taken in individual soil horizon (Kmetijski inštitut Slovenije, 2018) .....	21
Table 5: Class width of particle diameter and speed, measured by laser disdrometer Thies Clima .....	24
Table 6: List of variables with abbreviations used in the data analysis .....	30
Table 7: Basic statistical parameters of precipitation events with more than 10 mm of rainfall .....	46
Table 8: Properties of volumetric soil water content during the events with more than 10 mm of precipitation (20 min data).....	50
Table 9: The basic statistical parameters about 20 min measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream for the whole period of measurements.....	57
Table 10: The basic statistical parameters about measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream during the baseflow period .....	59
Table 11: The basic statistical parameters about 20-min measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream during the inter-event period.....	62
Table 12: NO <sub>3</sub> -N concentration and export conditions during rainfall events. The table shows the maximum concentrations ( <i>C<sub>max</sub></i> ), average concentrations ( <i>C<sub>sr</sub></i> ), absolute ( <i>C<sub>r</sub></i> ) and relative changes in concentration ( <i>C<sub>rs</sub></i> ), and average ( <i>Iznos<sub>N</sub></i> ) and maximum exports of nitrate nitrogen during the event ( <i>Iznos<sub>max</sub></i> )......	64
Table 13: Data about nitrogen compounds measurements on the Gradaščica and Mali Graben rivers in the period 2008–2019 (ARSO, 2020c).....	66
Table 14: Slope <i>b</i> , ratio <i>CV<sub>C</sub>/CV<sub>Q</sub></i> , and relative change in concentration <i>C<sub>rs</sub></i> for an individual event	67
Table 15: Loadings from principal component analysis (PCA) for the individual variable. The highest absolute values of loadings for individual principal component are marked in bold.....	78
Table 16: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for average export per time unit <i>Iznos<sub>N</sub></i> . Shaded rows show results without the identified influential points. ....	80
Table 17: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for the maximum 20-min export during the rainfall event <i>Iznos<sub>max</sub></i> . Shaded rows show results without the identified influential points. ....	81

---

Table 18: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for the range of NO <sub>3</sub> -N concentrations during the rainfall event <i>Cr</i> . Shaded rows show results without the identified influential points.....	81
Table 19: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for <i>Iznos_N</i> based on basic variables describing rainfall characteristics. Shaded rows show results without identified influential points. ....	88
Table 20: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for <i>Iznos_max</i> based on basic variables describing rainfall characteristics. Shaded rows show results without identified influential points .....	89
Table 21: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for <i>Cr</i> based on basic variables describing rainfall characteristics .....	91

## LIST OF FIGURES

Figure 1: Schematic representation of nitrogen cycling in forest ecosystems (adapted after Schimel and Bennett, 2004).....	8
Figure 2: Land use (MKGP, 2018) (left) and relief (right) of the Kuzlovec river catchment.....	17
Figure 3: River bed after the rainfall event (18 November 2019) – downstream view (left) and after a rainless period (6 January 2020) – upstream view (right).....	18
Figure 4: Soil profile with marked soil horizons (red lines show soil horizon boundaries).....	19
Figure 5: Locations of measurements in the experimental Gradaščica river catchment.....	22
Figure 6: Rain gauge RG3-M (left above) and the rain gauge mechanism with a data logger (left below). Disdrometer in Črni Vrh nad Polhovim Gradcem (right). ....	23
Figure 7: Sensors for volumetric soil water content measurements before being buried (left) and the data logger (right).....	26
Figure 8: The control measurement using spectrophotometer HACH DR1900 (left) and the prepared samples (right).....	28
Figure 9: Locations of leaf area index measurements (left), where red markers represent the location of reference measurements in the open while the blue markers represent measurement locations in the forest. A marked measurement location in the forest (right).....	29
Figure 10: Schematic representation of the method for determining lag times of individual variables (Sapač et al., 2020).....	34
Figure 11: Example of raster data representation of LAI values in the Kuzlovec river catchment on 30 June 2015. LAI was determined based on the MODIS satellite images. ....	35
Figure 12: Determination of phenological phases based on the annual vegetation dynamics: dormancy, greenup, maturity, and senescence with characteristic points (adapted from Wang et al. (2017) and Caglar et al. (2018)) .....	36
Figure 13: Monthly precipitation data and average monthly air temperature in the Kuzlovec river catchment over the two-year measurement period.....	44
Figure 14: Histogram of discharges over a two-year measurement period.....	47
Figure 15: Average daily discharge (blue line) and baseflow (red line) over the two-year measurement period.....	48
Figure 16: Volumetric water content in soil at depths of 15, 40, and 70 cm in the Kuzlovec river catchment between July 2019 and April 2020 (20 min data).....	49
Figure 17: Representation of distribution of 20-min volumetric soil water content measurements with a boxplot.....	49
Figure 18: Representation of initial discharges ( $Q_z$ ) and maximum flows ( $Q_{max}$ ) during 43 rainfall events.....	51

Figure 19: LAI data based on the satellite images (blue dots) and fitted curve obtained by double-sigmoidal function (green line). The red dashed line shows the border between the phenological phases. LAI values obtained by measurements with LAI-2200C are also indicated (yellow squares).....	52
Figure 20: Representation of the three-day cumulative evapotranspiration before rainfall events for the entire period, the vegetation period and the dormant period .....	54
Figure 21: Representation of the number of days without precipitation before rainfall events for the entire period, the vegetation period, and the dormant period .....	54
Figure 22: Correlogram of variables used in the analyses based on the Pearson (left) and Spearman (right) correlation coefficient.....	55
Figure 23: Comparison of baseflow conditions between the vegetation period and dormancy from the in-stream NO <sub>3</sub> -N concentration (a) and export flux (b) points of view (dots represent the lowest and the highest values of outliers of 20 min data).....	60
Figure 24: Representation of data series of rainfall (above, daily sums), discharge, and concentration of nitrate nitrogen (below, 20 min data) with marked beginnings of the rainfall events (red dots).....	61
Figure 25: Comparison of inter-event conditions between the vegetation period and dormancy from in-stream NO <sub>3</sub> -N concentration (a) and export flux (b) points of view (dots represent the lowest and the highest values of outliers of 20 min data, respectively) .....	65
Figure 26: Determination of NO <sub>3</sub> -N export regimes from the Kuzlovec river catchment based on the slope $b$ and ratio $CV_C/CV_Q$ .....	70
Figure 27: Representation of standardized values of variables for description of rainfall events with added dendrograms. On the top of the graph is a dendrogram for the variables based on the Ward method and Spearman correlation coefficient, on the left hand side of the graph, there is a dendrogram of the events based on the Ward method and squared Euclidean distances. ....	73
Figure 28: Distribution of values of some variables of rainfall events by groups obtained by the k-means method .....	75
Figure 29: Scree plot of PCA for determining the adequate number of principal components.....	77
Figure 30: Rainfall events in PC1, PC2 space, coloured based on the k-means clusters. Centroids of individual group are represented by larger symbol of corresponding colour and shape. ....	79
Figure 31: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $I_{znos\_N}$ for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components. ....	84
Figure 32: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $I_{znos\_max}$ for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components. ....	85



Figure 33: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $Cr$ for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components.....	86
Figure 34: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $Iznos\_N$ for the log-log model without influential points based on individual variable ( $Kp, Tp$ ) and taking into account average values of others variables in the model .....	89
Figure 35: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $Iznos\_max$ for the log-log model without influence points based on individual variable ( $Kp, Tp$ ) and taking into account the average values of others variables in the model .....	90
Figure 36: Predicted values and 95% confidence intervals for the average $Cr$ for the log-log model without influence points based on an individual variable ( $Kp, I60$ ) and taking into account the average values of others variables in the model .....	91
Figure 37: Relationship between the time lag of the hydrograph centroid and the duration of a rainfall event.....	96
Figure 38: Linear regression between time lags of centroid of $NO_3$ -N flux graph and hydrograph centroid for the entire period of measurements. Green dots represent events in the vegetation period, the yellow dots represent events in the dormancy. ....	97
Figure 39: Frequency histograms of time lags LAGQ (above) and LAGN (below) based on the phenology.....	98
Figure 40: Presentation of maximum one hour rainfall intensities with box-plot based on the time of vegetation or dormancy. For better representation purpose, value $I60=52.2$ mm/h during vegetation period is not shown in scale. ....	99
Figure 41: Linear regression between the time lags of the centroid of the volumetric soil water content graph for different depths (a–c) and the hydrograph centroid. Green dots represent events in the vegetation period, the yellow dots represent events in the dormancy.....	100
Figure 42: Temporal variability of nitrate nitrogen concentration and discharge with marked corresponding values of electrical conductivity during two rainfall events.....	101
Figure 43: Precipitation (a), discharge, $NO_3$ -N concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 28–29 July 2019.....	102
Figure 44: Precipitation (a), discharge, $NO_3$ -N concentration (b), and electrical conductivity during the rainfall event 30–31 August 2018 .....	103
Figure 45: Precipitation (a), discharge, $NO_3$ -N concentration (b), and volumetric soil water content (c) during the rainfall event on 14 April 2020.....	105
Figure 46: Precipitation (a), discharge, $NO_3$ -N concentration (b), and volumetric soil water content (c) during the rainfall event on 2 September 2019 .....	106
Figure 47: Precipitation (a), discharge, $NO_3$ -N concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event between 22–23 December 2019.....	107

---

Figure 48: Precipitation (a), discharge, NO <sub>3</sub> -N concentration (b), and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 8 July 2018 .....	108
Figure 49: Precipitation (a), discharge, NO <sub>3</sub> -N concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 2 August 2019 .....	109
Figure 50: Precipitation (a), discharge, NO <sub>3</sub> -N concentration (b), and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 1 February 2019.....	110
Figure 51: Precipitation (a), NO <sub>3</sub> -N concentration conditions, discharge (b), electrical conductivity conditions (c), and nitrate nitrogen export (d) during the rainfall event between 28 and 30 October 2018 .....	111
Figure 52: Amounts of exported nitrate nitrogen during the rainfall event of 28–30 October 2018...	112
Figure 53: Schematic representation of runoff formation (size of blue arrows represents runoff formation rate) and nitrate nitroge flushing from the catchment (size of the red arrows shows the proportion of the total export) during rainfall events. The right side of the scheme shows the temporal changes of the processes under consideration precipitation (P), discharge (Q), electrical conductivity (EC), NO <sub>3</sub> -N concentration (C), and soil water content (SM).....	115

## KAZALO PRILOG

Priloga A: Dogodki z več kot 10 mm padavin v obdobju med aprilom 2018 in aprilom 2020 .....	151
Priloga B: Preglednica s karakterističnimi vrednostmi spremenljivk posameznih padavinskih dogodkov za opis hidroloških in vegetacijskih razmer. ....	153
Priloga C: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Pearsonov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi odtenki zelene barve.....	154
Priloga D: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Spearmanov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi odtenki zelene barve.....	155
Priloga E: Časovni zamiki težišč posameznih procesov glede na težišče hietografa. Rezultati so podani v minutah.....	156

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

C	Koncentracija (angl. <i>concentration</i> )
C <sub>max</sub>	Najvišja izmerjena koncentracija NO <sub>3</sub> -N med dogodkom
C <sub>sr</sub>	Povprečna vrednost koncentracije NO <sub>3</sub> -N med padavinskim dogodkom
C <sub>r</sub>	Razlika med najvišjo in začetno koncentracijo NO <sub>3</sub> -N med dogodkom
C <sub>rs</sub>	Relativna sprememba koncentracije NO <sub>3</sub> -N med dogodkom
C:N	Razmerje med količinama ogljika in dušika
DIN	Raztopljeni anorganski dušik (angl. <i>dissolved inorganic nitrogen</i> )
DON	Raztopljeni organski dušik (angl. <i>dissolved organic nitrogen</i> )
E	Kinetična energija padavin
EC	Električna prevodnost (angl. <i>electrical conductivity</i> )
EI60	Indeks erozivnosti padavinskega dogodka
ET3	Skupna tridnevna evapotranspiracija
I60	Najvišja enourna intenziteta padavin
I <sub>sr</sub>	Srednja intenziteta padavin
I <sub>znos_max</sub>	Najvišja 20-minutna količina iznesenega NO <sub>3</sub> -N med dogodkom
I <sub>znos_N</sub>	Iznos NO <sub>3</sub> -N na časovno enoto (srednji iznos)
K <sub>p</sub>	Količina padavin med dogodkom
LAI	Indeks listne površine (angl. <i>leaf area index</i> )
MLR	Multipla linearna regresija
N <sub>dni</sub>	Število predhodnih dni brez padavin, višjih od 10 mm
NO <sub>3</sub> -N	Nitratni dušik
PCA	Analiza glavnih komponent (angl. <i>principal component analysis</i> )
Q	Pretok
SM	Volumetrična vsebnost vode v tleh (angl. <i>volumetric soil water content</i> )
T <sub>p</sub>	Trajanje padavin
T <sub>d</sub>	Trajanje padavinskega dogodka

*»Ta stran je namenoma prazna«*

## 1 UVOD

### 1.1 Opis problematike in relevantnost problema

Ekstremni vremenski pojavi tako v Sloveniji kot drugje v Evropi in po svetu kažejo na podnebno spremenljivost (Seneviratne in sod., 2012; Whitehead in sod., 2009). V zadnjih desetletjih je namreč pogosto mogoče opaziti ekstremnejše vremenske dogodke, med katerimi prevladujejo dogodki, povezani z ekstremnimi padavinami. Zanje je po eni strani značilno, da v relativno kratkem času padejo velike količine padavin, kar povzroča naraščanje pogostosti poplav, po drugi strani pa se vse pogosteje pojavljajo dolgotrajna obdobja brez padavin, zaradi katerih narašča število sušnih obdobj (Pauling in Paeth, 2006; Sousa in sod., 2011; Zambrano in sod., 2016; Mathbout in sod., 2018). Takšno vremensko dogajanje za sabo pušča veliko škode, s katero se v zadnjem času lahko soočamo tudi večkrat letno. Vpliv spremenjenega režima padavin se neposredno odraža v bilanci vode na prostorskem nivoju porečja kot osnovni hidrološki enoti, seže pa tudi na različna gospodarska področja in dejavnosti, ki so odvisne od razpoložljivih količin in kakovosti vode (npr. kmetijstvo, oskrba s hrano in pitno vodo, turizem) (Bostan in Akyürek, 2007; IPCC, 2014). Spremenljivost vremenskih vzorcev potrjujejo tudi zadnje modelske simulacije podnebnih sprememb (scenariji RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5), ki za območje Slovenije napovedujejo naraščanje temperature zraka v prihodnosti, z najbolj izrazitimi spremembami v zimskem času in najmanj izrazitimi spomladi, medtem ko so napovedi časovne in prostorske spremenljivosti padavin manj gotove (ARSO, 2017a; EEA, 2017). Zaradi napovedane spremenljivosti podnebja, ki je obenem tudi eden ključnih regulatorjev terestričnih biogeokemičnih procesov, je pričakovati tudi spremembe v biogeokemičnem kroženju snovi, ki je močno povezano s hidrološkimi razmerami (Campbell in sod., 2009).

Procesi kroženja snovi (med najpomembnejše štejemo različna hranila, predvsem dušikove in fosforjeve spojine) so neposredno odvisni od količine padavin in njihove časovne ter prostorske razporeditve, saj je voda glavni transportni medij in gonilna sila številnih ekosistemskih procesov. Za razumevanje naravnega ozadja biogeokemičnih procesov in transporta njihovih produktov je zato potrebno poznavanje hidroloških kontrolnih mehanizmov, predvsem tvorbe padavinskega odtoka (Rusjan in sod., 2008; Schwab in sod., 2017). To lahko dosežemo z raziskavami na naravnih, z vidika človekovih posegov (ki bi lahko vplivali na spremembo naravnih procesov na porečju) relativno nemotenih območjih, kot so na primer manjša gozdnata porečja (Hedin in sod., 1995). Doprinosov dolgotrajnih opazovanj v okviru raziskav na eksperimentalnih porečjih je torej več: izboljšanje razumevanja procesov, opazovanje trendov in sprememb v procesih ter ne nazadnje razvoj modelskih orodij in njihovo preskušanje (Tezlaff in sod., 2017).

Na manjših porečjih, ki se hitro odzovejo na padavinske dogodke (čas zakasnitve in koncentracije v razponu nekaj ur), so za razumevanje povezav med hidrologijo porečja (potmi stekanja) in kemizmom vodotoka potrebne meritve z visoko časovno frekvenco beleženja podatkov, ki omogočajo vpogled v dinamiko sprememb na porečju na časovnem nivoju dogodka (Kirchner in sod., 2004; Rusjan in Mikoš, 2008). V Sloveniji in tudi drugje po svetu zaradi same kompleksnosti tovrstnih meritev ni vzpostavljenega monitoringa za zvezno oziroma neprekinjeno spremljanje koncentracije hranil v površinskih vodah z večjo časovno frekvenco zajema podatkov (npr. na dnevnem ali celo nekajurnem časovnem koraku). Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) sicer izvaja meritve koncentracij hranil v sklopu monitoringa ekološkega in kemijskega stanja površinskih voda, ki je urejeno s Pravilnikom o monitoringu stanja površinskih voda (Uradni list RS, št. 10/09, 81/11 in 73/16). Meritve nitratov na primer potekajo z jemanjem vzorcev nekajkrat na leto in njihovo poznejšo analizo v laboratoriju. Program monitoringa za obdobje 2016–2021 (ARSO, 2017b) določa minimalno število opravljenih meritev posameznega parametra na leto ter tudi standarde, po katerih se vrednosti parametrov določijo. Tak način monitoringa kakovosti vode je sicer enostaven in hiter ter je osnova za oceno ekološkega in kemijskega stanja voda, ki jo zahteva vodna direktiva (Direktiva 2000/60/ES), njegova slabost pa je predvsem v tem, da rezultati analiz kažejo stanje vode samo v trenutku odvzema vzorca. Tako se ne upošteva dejstvo, da se koncentracija v vodi raztopljenih snovi lahko s časom zelo hitro spreminja, kar je še posebej izrazito v obdobjih spremenljivih hidroloških razmer, kot npr. v času konic pretoka v vodotoku (Kronvang in Bruhn, 1996; Jordan in Cassidy, 2011).

Začetki spremljanja koncentracij hranil in kemijskih analiz kakovosti vode v površinskih vodah na splošno segajo v konec 19. stoletja, ko se je povečala skrb prebivalstva glede kakovosti pitne vode (Myers, 2015). Do 70. let prejšnjega stoletja, ko je bil uporabljen prvi in-situ instrument oziroma instrument, ki izmeri vrednost na lokaciji (ionsko selektivni senzor; Langmuir in Jacobson, 1970), je monitoring koncentracij hranil v vodi potekal zgolj z jemanjem vzorcev na terenu in poznejšo analizo vzorcev v laboratoriju, glavna raziskava po svetu pa še danes poteka na tak način (Pellerin in sod., 2016). Poleg ionsko selektivnih senzorjev so se v zadnjih 20 letih za terenske meritve koncentracij hranil v vodi uporabljali instrumenti, ki koncentracijo izmerijo potem, ko je vzorcu vode dodan reagent (angl. *wet chemical analyzers*). Zadnjih nekaj let so vse pogostejše raziskave z optičnimi senzorji, katerih prednost je predvsem v tem, da za izvedbo meritev kemijski reagenti niso potrebni in da omogočajo meritve s kratkim časovnim korakom (Vaughan in sod., 2017). Razpoložljiva oprema zadnjih nekaj let tako omogoča časovno zvezne meritve kakovosti vode, vendar pa za pogostejšo uporabo opreme obstajajo še nekatere omejitve, kot so npr. cenovna (ne)dostopnost instrumentov, višina vzdrževalnih stroškov in potreben čas za vzdrževanje opreme za zagotavljanje kakovostnih meritev (Pellerin in sod., 2016). Posledično je raziskava, ki obravnavajo rezultate istočasnih meritev kemizma vode v posameznih komponentah padavinskega odtoka in hidrometeoroloških meritev, razmeroma malo oziroma so



obdobja hkratnih meritev razmeroma kratka, vendar imajo take raziskave z vidika znanstvenega doprinosa zelo veliko vrednost (Likens in Bormann, 2013). Pri tem velja poudariti, da instrumenti, ki omogočajo neposredne zvezne meritve kemizma vode, (za zdaj še) ne morejo nadomestiti laboratorijskih analiz, omogočajo pa opazovanje časovno zelo dinamičnih procesov, laboratorijske analize pa so nujne za kontrolo opravljenih meritev.

Medsebojni vpliv hidroloških in biogeokemijskih dejavnikov na prostorskem nivoju porečij je že bil predmet raziskav v preteklosti (npr. Rusjan in sod., 2008; Verweij in sod., 2010; Moravcová in sod., 2013), pri čemer so glavni vir informacij predstavljala časovno usklajena opazovanja in meritve hidroloških, hidrometeoroloških in biogeokemičnih spremenljivk na porečju. Na izbiro spremenljivk, ki kažejo na spremenljivo odzivnost porečja na padavinske dogodke, vplivajo predvsem dobra topnost snovi in s tem njihova velika mobilnost, pojavnost na obravnavanem območju v koncentracijah znotraj merilnega območja razpoložljive merske opreme in dovolj velika stopnja kemijske stabilnosti v okolju (Rusjan in sod., 2008). Moravcová in sod. (2013) so na dveh čeških porečjih raziskovali odvisnost med biogeokemičnimi in hidrološkimi parametri, ki opisujejo naravne razmere in vzajemne interakcije med spremembami koncentracije izbranih kazalnikov kakovosti vode ter dinamike tvorbe padavinskega odtoka med različnimi vrstami ekstremnih padavinskih dogodkov. Razmerje med koncentracijami in odtokom so razložili s histereznimi zankami, do katerih pride, ko je razmerje med koncentracijo in pretokom na naraščajočem delu hidrograma drugačno od tistega na padajočem delu hidrograma. Verweij in sod. (2010) so z raziskavami na reki Meuse pokazali, da so koncentracije makro ionov (npr. bromida, sulfata, magnezija) v obdobju zelo vročega poletja leta 2003 narasle kot posledica manjšega razredčenja. Razlog za to so lahko nižji pretoki. Povišane so bile tudi koncentracije hranil, pri čemer so bili izjema nitrati ( $\text{NO}_3^-$ ), za katere so bile izmerjene nižje koncentracije. Slednje pa je lahko posledica zmanjšanega površinskega odtoka s kmetijskih površin in povečane denitrifikacije zaradi višjih temperatur vode (Verweij in sod., 2010).

Pretekle raziskave, ki so potekale na manjših gozdnatih porečjih, so bile prepoznane kot zelo pomembne v smislu doprinosa k razumevanju odzivov ekosistemov na spremembe, ki jih povzročajo naravne (ekstremni vremenski pojavi kot npr. žled, vetrolom, intenzivni erozijski procesi, povezani s procesi tvorbe padavinskega odtoka) ali umetne motnje, povezane pretežno s spremenjeno rabo tal (Likens, 2013). Kljub temu še vedno ostaja odprtih veliko vprašanj predvsem z vidikov vplivov napovedanih podnebnih sprememb in z njimi povezanih spremenjenih lastnosti hidroloških ter hidrometeoroloških pojavov na kroženje hranil (npr. Bernal in sod., 2012). Poznavanje naravnega ozadja povezanosti omenjenih procesov in njihove dinamike je ključnega pomena za identifikacijo in ovrednotenje vplivov človekovih dejavnosti (kmetijstva, urbanizacije, industrije) na spremembe kroženja hranil (Rodríguez-Blanco in sod., 2018). Poleg tega so opazovanja procesov na referenčnih naravnih porečjih (angl. *benchmark catchments*) pomembna za zaznavanje sprememb procesov, ki so posledica podnebnih

vplivov (Harrigan in sod., 2018). Številni avtorji so proučevali vpliv umeščanja zelene infrastrukture, na primer drevesnih nasadov, parkov in zelenih streh, na padavinski odtok z urbaniziranih površin (npr. Clausen, 2003; Oberndorfer in sod., 2007; Shuster in sod., 2008; Zabret in Šraj, 2015) ter prišli do zaključkov, da se lahko s takšnimi ukrepi prostorskega načrtovanja zmanjša ali vsaj zakasni padavinski odtok. S tem se lahko vpliva na dinamiko raztapljanja in kemijsko pretvorbo v vodi raztopljenih oblik hranil ter njihov nadaljnji transport po odvodnikih. Ne nazadnje ima lahko (ne)ustrezno načrtovani ukrep velik gospodarski učinek, ki se odraža v stroških za doseganje in ohranjanje dobrega stanja vodnih teles, ki je temeljni cilj vodne direktive (Direktiva 2000/60/ES). S spoznanji o povezanosti hidroloških in biogeokemičnih procesov z vidika lastnosti padavinskih dogodkov in z njimi povezane dinamike sproščanja hranil lahko pomembno pripomoremo k premišljenemu prostorskemu načrtovanju v smislu umeščanja ukrepov za blaženje posledic in izboljšanje prilagodljivosti grajenega okolja na napovedane podnebne spremembe (Whitehead in sod., 2009).

## 1.2 Hipoteze

Izhajajoč iz opisa problematike in relevantnosti problema smo postavili naslednje hipoteze, ki jih bomo v sklopu naloge testirali:

1. Lastnosti padavinskih dogodkov imajo velik vpliv na časovno dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku.
2. Z meritvami časovne spremenljivosti kemizma vode lahko identificiramo poglobitne procese oblikovanja padavinskega odtoka.
3. Vpliv vegetacijskih razmer na koncentracije nitratnega dušika v vodotoku je pogojen s hidrometeorološkimi razmerami.

## 1.3 Cilji

Cilj naloge je izboljšanje razumevanja medsebojnega delovanja hidroloških in sezonskih biogeokemičnih procesov na dinamiko sproščanja hranil. To je možno prepoznati v časovni dinamiki spreminjanja vrednosti koncentracij in količin hranil v določenem vodnem telesu pod vplivom spremenljivih hidroloških (npr. trajanje, intenziteta in količina padavin) in sezonskih vremenskih razmer. Preveriti želimo, kako se manjše naravno porečje s homogeno, naravno rabo tal (npr. gozdnato območje) odziva na različne vrste padavinskih dogodkov v različnih delih leta (vpliv sezonskosti) in kako se ta odziv odraža na kemizmu vode, ki ga bomo spremljali v vodotoku. S pomočjo zbranih

podatkov o koncentracijah hranila v vodotoku bomo poskušali ovrednotiti masno bilanco hranila, ki se v izbranem časovnem obdobju spere z obravnavanega območja.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

Dušik (N) je bistvenega pomena za obstoj vseh živih bitij, saj je pomemben gradnik aminokislin, genetskega materiala (DNK) in klorofila. Dušik v obliki  $N_2$  sicer predstavlja največji del ozračja (78 %), vendar je v tej obliki nedostopen živim bitjem, zaradi česar ga lahko opredelimo tudi kot omejevalni element primarne produkcije v ekosistemih (npr. Likens in Bormann, 2013). Dušik postane dostopen živim organizmom s procesi, ki sestavljajo t. i. dušikov krog, znotraj katerega dušikove spojine prehajajo iz ene oblike v drugo. Dušik v plinasti obliki iz ozračja se pretvori v dostopnejše oblike s procesom fiksacije, ki ga v naravnem okolju opravljajo bakterije in drugi mikroorganizmi (prokarionti). Manjši del pretvorbe dušika v reaktivno obliko predstavlja fiksacija, do katere pride zaradi velikih količin sproščene energije pri strelah. Po ocenah Fowler in sod. (2013) na globalni ravni z naravno fiksacijo v kopenske in vodne ekosisteme vsako leto vstopi približno 203 Tg N. Od razvoja Haber-Boschevega procesa v začetku 20. stoletja, s katerim so začeli industrijsko pridobivati reaktivni dušik iz  $N_2$  predvsem za potrebe kmetijstva, se je količina antropogeno vnesenega dušika v ekosisteme bistveno povečala in že preseгла količino naravno fiksiranega dušika (Stevens, 2019).

V nadaljevanju so najprej predstavljeni procesi dušikovega kroga v gozdnih ekosistemih. Gozdni ekosistemi brez antropogenih vplivov ali z zanemarljivimi antropogenimi vplivi predstavljajo na področju raziskav spiranja hranil nekakšno referenčno »naravno« stanje. Informacije, pridobljene pri teh raziskavah, pa so izjemnega pomena predvsem za razumevanje procesov in stanj na območjih z antropogenimi dejavnostmi, ki vplivajo na kroženje in količino hranil (Lewis in sod., 1999; Rodríguez-Blanco in sod., 2018). Nato sledijo pregledi ugotovitev dosedanjih raziskav, ki so obravnavale povezanost hidroloških procesov, lastnosti padavinskih dogodkov in letnih ciklov vegetacije s procesi spiranja nitratnega dušika.

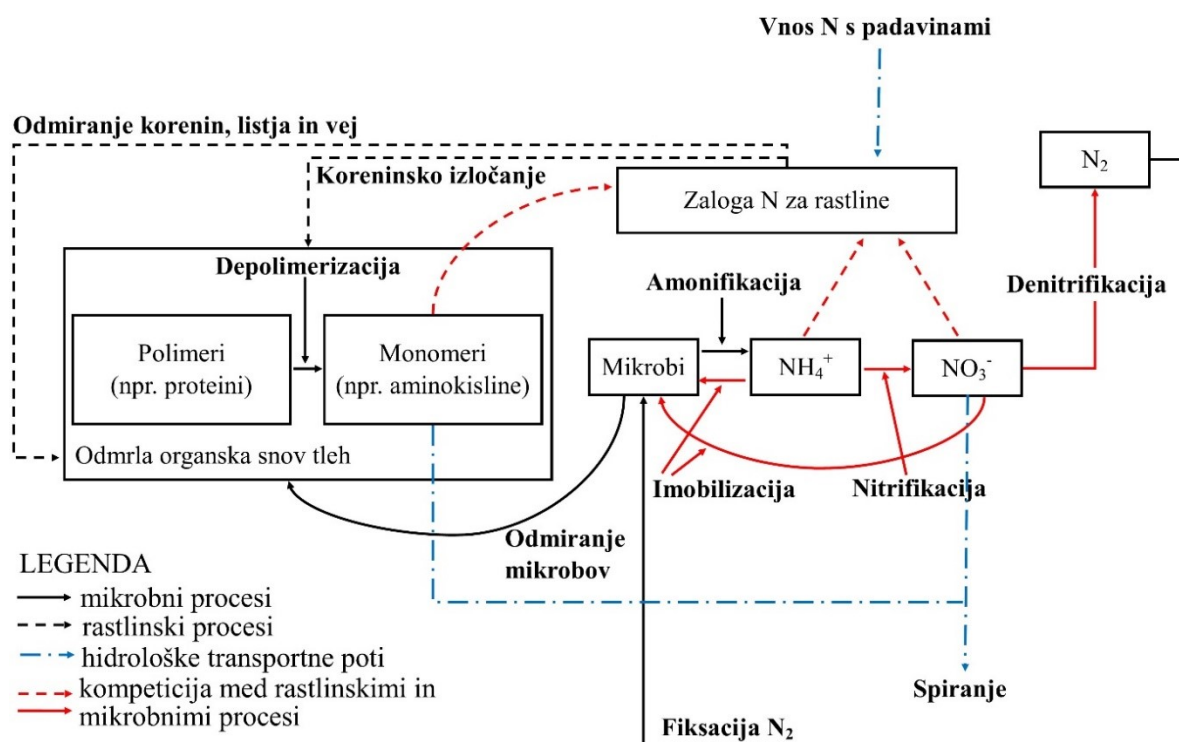
### 2.1 Kroženje dušika v gozdnih ekosistemih

Johnson in Turner (2014) sta v pregledu literature o študijah bilanc dušika v gozdnih ekosistemih zapisala, da »kljub desetletjem poglobljenih raziskav dušikov krog v gozdovih še vedno ostaja eden od najmanj pojasnenih izmed vseh krogov glavnih hranil«. Za večino ekosistemov zmernega podnebnege pasu velja, da so sposobni akumulirati do 10.000 kg N/ha (Johnson in Turner, 2014), po ocenah Stahr in sod. (1994) pa je v tleh zmernege podnebnege pasu shranjenih med 2.000 in 25.000 kg dušika na hektar površine. Količine so odvisne od debeline tal, podnebja, zrnavostne sestave (npr. vsebnosti gline) in stabilnosti organskega materiala. Približno 95–98 % dušika v teh zalogah je vezanih v frakcijah humusa in odmrli biomas, od koder se dušik ne more niti mobilizirati niti ni neposredno dostopen rastlinam. Preostali delež dušika je porazdeljen med živo biomaso kot amonijak, vezan pretežno na glinene delce,

in kot amonijak in nitrat, ki sta neposredno dosegljiva primarnim producentom (Lennon in sod., 2004). Med omenjenimi oblikami dušika v tleh neprestano potekajo transformacije iz ene oblike v drugo, to pa predstavlja t. i. dušikov cikel oziroma krog.

Biogeokemične cikle poganjajo kompleksni procesi, naše razumevanje ciklov pa še vedno temelji predvsem na terenskih opazovanjih (Schulze, 2000). Shema procesov, ki sestavljajo dušikov krog v gozdnih ekosistemih, je v poenostavljeni obliki prikazana na sliki 1. Glavni procesi, ki sestavljajo dušikov krog v gozdnih ekosistemih, so: fiksacija, asimilacija, mineralizacija ali amonifikacija, nitrifikacija, denitrifikacija, vnos dušika s padavinami in spiranje dušika s porečja (slika 1). Dušik vstopi v biogeokemični krog z biološko fiksacijo plinaste oblike atmosferskega dušika, ki jo opravljajo prokariotski organizmi. Pri procesu nastane biološko uporabna spojina dušika, tj. amonijak, ki ga lahko rastline neposredno uporabijo. Poleg tega so vir dušika tudi nitrati, amonij in spojine organskega dušika, ki vstopijo v sistem z mokro ali suho atmosfersko depozicijo. Dušik iz depozicije lahko v vodne sisteme vstopi neposredno z depozicijo na površino vodnih teles ali posredno z depozicijo na kopenske dele porečja, kjer je podvržen procesom transformacije in potencialnega transporta do vodnih teles (Stoddard, 1994). S procesom mineralizacije se s pomočjo mikrobov organske oblike dušika, ki izvirajo iz odmrlih rastlinskih in živalskih delov ali atmosferske depozicije, pretvorijo v neorganske oblike, natančneje v amonij, ki prav tako predstavlja pomemben vir dušika za rastline. S procesom nitrifikacije, pri katerem gre za biološko oksidacijo amonijaka, nastane nitrat ( $\text{NO}_3$ ), ta pa se v procesu denitrifikacije s pomočjo mikroorganizmov pretvori v plinasti dušik  $\text{N}_2$ . Dušik se torej v okolju pojavlja v različnih oblikah in količinah, ki niso stalne niti v prostoru niti v času.

V kakšni obliki in meri bo dušik prisoten v ekosistemu, ni odvisno le od hidroloških transportnih mehanizmov, temveč tudi od številnih drugih dejavnikov, kot so prisotnost ogljika oziroma razmerje med ogljikom in dušikom (razmerje C : N) (Lovett in sod., 2002), temperatura in vlažnostne razmere tal (De Neve in sod., 2003), vnos dušikovih spojin z mokro ali suho depozicijo (Pan in sod., 2004), sezonska aktivnost vegetacije (Nadelhoffer in sod., 1984; Machacova in sod., 2019) ipd. Pri ugotavljanju v kakšni obliki se bo dušik naposled pojavil v vodnem telesu, je ključnega pomena prepoznavanje procesov transformacije (npr. v tleh, rastlinah, mikrobiološka aktivnost), ki so jim podvržene dušikove spojine na nekem porečju. Stoddard (1994) je v razpravi o dolgotrajnih spremembah zadrževanja dušika na porečju in posledicah na vodne ekosisteme zapisal, da kroženje dušika znotraj kopenskega dela porečja uravnava pojavnost in količine dušikovih spojin v vodnem ekosistemu, medtem ko procesi kroženja dušika v vodnih telesih (npr. jezerih, rekah) vplivajo na to, ali bodo učinki merljivi.



Slika 1: Shema kroženja dušika v gozdnih ekosistemih (prirejeno po Schimel in Bennett, 2004)

Figure 1: Schematic representation of nitrogen cycling in forest ecosystems (adapted after Schimel and Bennett, 2004)

Odvisnost količine spranega dušika z gozdnih porečij od razmerja med ogljikom in dušikom v gozdnih tleh (razmerje C : N) je bila prepoznana kot pomemben kazalnik statusa gozdnih ekosistemov in biogeokemični kontrolni mehanizem (Gundersen in sod., 1998b). V raziskavi Gundersen in sod. (1998a), kjer so bili analizirani različni podatkovni nizi razmerij C : N in količin iznesenega dušika iz gozdnatih porečij, so ugotovili, da so tako koncentracije nitratnega dušika ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) kot njegove količine negativno povezane z razmerjem med ogljikom in dušikom v tleh. Za območja, kjer je bilo razmerje C : N manjše od 25, so bile značilne višje koncentracije in iznosi nitratnega dušika (Gundersen in sod., 1998a). Dodatno so Dise in sod. (1998) ugotovili, da je spiranje nitratov z območij iglastih gozdov nizko ne glede na vrednost razmerja C : N v organskem horizontu tal, če je bil letni vnos dušika manjši od kritične obremenitve. To ne velja za območja z višjo atmosfersko depozicijo, kjer so podobno kot Gundersen in sod. (1998a) ugotovili, da se z višanjem razmerja C : N količina spranega nitrata zmanjšuje. Kritična obremenitev (angl. *critical load*) pomeni kvantitativno oceno količine vnosa neke snovi (navadno onesnaževala), pod katero naj ne bi prišlo do škodljivih učinkov na določenih občutljivih elementih okolja. Kritične vrednosti se razlikujejo od ekosistema do ekosistema, v splošnem pa se v študijah gozdov, kjer proučujejo presežene količine vnosov dušika, upošteva vrednost 10 kg N na leto na hektar (Bobbink in sod., 2003). Za gozdove zmernega podnebnege pasu so ocenili, da na letni ravni porabijo približno 100 kg N/ha (Kreutzer in sod., 2009; Rennenberg in Dannenmann, 2015). Dodatno so študije z uporabo stabilnih izotopov v vodnih telesih in tleh, opravljene na severovzhodu ZDA,

pokazale, da je bil izneseni dušik z gozdnih porečij podvržen mikrobnim procesom (nitrifikaciji) (Burns in Kendall, 2002; Templer in sod., 2015), kar kaže na to, da so povečane količine iznesenega dušika posledica procesov dušikovega kroga in ne toliko neposrednega iznosa zaradi večje depozicije (Niu in sod., 2016).

## 2.2 Pregled raziskav spremljanja koncentracij hranil v vodotokih

70. leta prejšnjega stoletja so poleg prvega in-situ instrumenta prinesla tudi razvoj prvih avtomatskih vzorčevalnikov, s katerimi se je pogostost vzorčenja sicer lahko povečala, vendar je analiza še vedno potekala naknadno v laboratoriju. Laboratorijske analize še vedno zagotavljajo najbolj zanesljive in točne podatke, vendar pa se njihova pomanjkljivost pokaže pri analizi vzorcev na kemijske in biološke parametre, ki niso stabilni in zahtevajo precej hitro analizo po vzorčenju (npr. Rode in sod., 2016), dokaj zamudnih postopkih in bistveno višjih stroškov glede na druge metode (npr. Kirchner in sod., 2004). Spremljanje dušikovih spojin v vodnih ekosistemih se je razmahnilo po izdaji prelomnega članka Meybecka (1982). Dušikove spojine, ki jih najdemo v vodnih okoljih, lahko razdelimo na raztopljeni organski dušik (angl. *dissolved organic nitrogen*, DON), organski dušik v delcih (angl. *particulate organic nitrogen*, PON) in raztopljeni anorganski dušik (angl. *dissolved inorganic nitrogen*, DIN), ki ga nadalje razdelimo na amonij ( $\text{NH}_4$ ), nitrit ( $\text{NO}_2$ ) in nitrat ( $\text{NO}_3$ ). Voda kot medij vpliva na transport topnih snovi znotraj, kakor tudi na vnos in iznos. Med najbolj topnimi oblikami dušika sta nitrat ( $\text{NO}_3$ ) in nitrit ( $\text{NO}_2$ ), vendar v hidroloških in biogeokemijskih raziskavah prevladujejo opazovanja nitrata (npr. Judd in sod., 2007; Rusjan in Vidmar, 2017; van Verseveld in sod., 2008), saj se nitrit v naravnih vodah pojavlja v zanemarljivih koncentracijah, poleg tega pa je spojina nitrata zelo neobstoja, kar pomeni, da se večina nitrata z oksidacijo pretvori v nitrat, ob odsotnosti kisika pa se pretvori v amonijak (Wieben in sod., 2013).

Čeprav so nekatere študije pokazale, da raztopljeni organski dušik lahko predstavlja precejšnji delež iznesenega celotnega dušika z gozdnatih porečij (npr. Perakis in Hedin, 2002), pa večina preteklih in sedanjih študij obravnava predvsem spojine raztopljenega anorganskega dušika, še posebej nitrata in nitrita. To še posebej velja za študije, katerih namen je proučevanje hidroloških mehanizmov iznosa snovi s porečij (Rusjan in Vidmar, 2017) in/ali identifikacija transportnih poti po padavinskih dogodkih oziroma glavnih virov na porečju (Yevenes in Mannaerts, 2012). Med anorganskimi oblikami raztopljenega dušika prevladujejo študije nitratnega dušika ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), in sicer zaradi dobre topnosti in mobilnosti. Poleg tega se nitriti v naravnih vodah pojavljajo v zelo nizkih koncentracijah in se v postopku izračunov masne bilance pogosto zanemarijo.

Večina dosedanjih dejstev in ugotovitev v povezavi s spiranjem  $\text{NO}_3\text{-N}$  (npr. količine iznosa, koncentracije) še vedno temelji na tradicionalnih postopkih in metodah meritev in obdelavi podatkov

meritev s statističnimi metodami in modeliranjem (Pellerin in sod., 2016). Po navedbi Kirchner in sod. (2004) pa lahko opazovanja v merilih ter z natančnostmi in pogostostmi, ki prej niso bile mogoče, vedno doprinesejo nova znanja in informacije. Veliko študij je zato namenjenih tudi proučevanju merilne opreme. Pellerin in sod. (2016) so primerjali prednosti in slabosti razpoložljivih merilnikov hranil v vodi z vidika cenovne dostopnosti, enostavnosti uporabe, točnosti in natančnosti meritev ter lezenja (angl. *drift*). Med seboj so primerjali optični UV senzor, senzor z mokro kemično analizo (angl. *wet-chemical sensor*) in ionsko selektivne elektrode. Optični senzori delujejo po načelu spektralne absorpcije, na podlagi katere se izračuna koncentracija obravnavanega parametra, ki deluje kot absorbent, fotometer pa dejansko meri količino vpadne svetlobe pri določeni valovni dolžini, ki se prenese na detektor. V raztopinah z nizko koncentracijo absorbenta bo količina prenesene vpadne svetlobe na detektor višja kot pri raztopinah z visokimi koncentracijami (Pellerin in sod., 2013). Senzor z mokro kemično analizo določi koncentracijo snovi na podlagi fotometrije z dodajanjem reagenta vzorcu, ki povzroči kolorimetrično reakcijo. Ionsko selektivne elektrode pa določijo koncentracijo na podlagi neposrednih meritev potenciala na zaznavni in referenčni elektrodi. Medtem ko so glavne prednosti optičnih senzorjev in senzorjev z mokro kemično analizo predvsem v visoki točnosti in natančnosti meritev, pa so glavne slabosti povezane z visoko ceno opreme, razmeroma veliko potrebo energije za delovanje instrumentov in visokimi stroški vzdrževanja (Pellerin in sod., 2016). Glavne pripisane prednosti ionsko selektivnim elektrodom se nanašajo na relativno enostavno uporabnost in cenovno dostopnost, hiter odzivni čas ter neodvisnost kakovosti rezultata od barve in motnosti medija (Pellerin in sod., 2016). Motnost ima največji vpliv na absorpcijo svetlobe pri optičnih senzorjih, saj lahko prisoten suspendiran material, kot so organski delci ali sediment, povzroči učinek raztrosa, zaradi katerega izmerjene vrednosti koncentracij ne odražajo dejanskega stanja (Huebsch in sod., 2015). Posledično je vprašljiva uporaba optičnih merilnikov v naravnih vodotokih (Pellerin in sod., 2013). Med slabostmi ionsko selektivnih elektrod pa Pellerin in sod. (2016) izpostavljajo lezenje reference, potrebno menjavanje ionsko selektivne membrane senzorja, ki je ključnega pomena za oblikovanje potenciometričnega odziva, in manjšo točnost v primerjavi z optičnimi merilniki.

Z razvojem novih senzorjev, ki imajo možnost izvedbe meritve na mestu ter shranjevanja podatkov na ustrezne pomnilniške enote, se je izboljšalo spremljanje kakovosti vode z vidika pogostosti zabeleženih podatkov. Prednosti uporabe teh merilnikov za določitev lastnosti dogodkov spiranja snovi s porečja v primerjavi s tradicionalnimi pristopi (avtomatsko ali ročno vzorčenje ter naknadna analiza) obsegajo: meritve s kratkim časovnim korakom (manj kot ena ura), s katerimi lahko zaznamo hitre spremembe v kakovosti vode; meritve brez uporabe kemičnih snovi za analizo koncentracij, ki predstavljajo tveganje za okolje; meritve brez težav, povezanih s prevozom in shranjevanjem vzorcev, ki lahko vplivajo na rezultate laboratorijske analize; meritve, ki omogočajo neprekinjeno spremljanje kemizma vode, s katerim lahko opredelimo lastnosti redkih in sporadičnih dogodkov (Vaughan in sod., 2017). Dhillon in



Inamdar (2013) pa med prednosti prištevatva še zmanjševanje napake, povezane z oceno količine iznosa snovi na podlagi podatkov o pretokih, zaradi možnosti prekinitve razmerja med pretokom in topljencem med izjemnimi padavinskimi dogodki ali spremenljivosti histereznih zank od dogodka do dogodka.

Od konca 90. let prejšnjega stoletja, še izraziteje pa po letu 2000, se je število raziskav predvsem v Evropi in Severni Ameriki na področju spremljanja koncentracije hranil v površinskih vodah povečalo. Kljub prvotnemu namenu raziskav, da se oceni kakovost vode in določijo morebitni ukrepi v primeru slabih ocen, kar je značilno predvsem za območja z intenzivnimi človekovimi vplivi (npr. kmetijska in urbana območja), je bilo kar nekaj študij opravljenih tudi na območjih, kjer je gozd prevladujoča ali delna raba tal (preglednica 1). Koncentracije nitratnega dušika v vodotokih na porečjih, kjer prevladuje gozd, so relativno nizke v primerjavi z območji, na katerih prevladuje kmetijstvo z dodatnimi vnosi dušika. Snyder in sod. (2018) so primerjali razmere koncentracij nitratnega dušika na 10 porečjih, ki se med seboj razlikujejo po velikosti, rabi tal in kakovosti vode. Povprečne koncentracije nitratnega dušika glede na kontinuirane 15-minutne meritve z optičnim merilnikom od leta 2012 dalje so se na gozdnatih porečjih gibale okoli 0,1 mg/l z maksimalnimi vrednostmi do 0,9 mg/l, medtem ko so bile povprečne koncentracije na urbanih in kmetijskih območjih višje od 2 mg/l, z maksimalnimi koncentracijami več kot 6 oziroma 8 mg/l. Enak velikostni razred povprečnih koncentracij nitratnega dušika (do 0,5 mg/l) na območjih, ki so v celoti ali delno pokriti z gozdom, so na podlagi mesečnih oziroma tedenskih vzorčenj ugotovili tudi Bernal in sod. (2002) in Judd in sod. (2007). Ne glede na to so lahko koncentracije na pretežno gozdnatih ali celo popolnoma gozdnatih območjih tudi višje, predvsem v času padavinskih dogodkov. Na porečju Padeža v Sloveniji so bile med padavinskimi dogodki med marcem in novembrom 2006 na podlagi zveznih meritev s 15-min časovnim korakom ugotovljene povprečne koncentracije okoli 1,5 mg/l (Rusjan in sod., 2008). Povprečne koncentracije med padavinskimi dogodki v velikostnem razredu med 1 in 2 mg/l sta izmerila tudi Aguilera in Melack (2018).

Preglednica 1: Pregled študij in glavnih rezultatov meritev koncentracij nitratnega dušika na gozdnatih porečjih

Table 1: Overview of studies and main results about measurements of concentrations of nitrate nitrogen in forested catchments

Država ali regija	Povprečna koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Prevladujoča raba tal	Velikost porečja [km <sup>2</sup> ]	Delež gozda [%]	Vrsta gozda	Merska oprema	Pogostost meritve	Obdobje meritev	Vir
Padež, Slovenija	1,5 (±0,30)	gozd	42,1	81	97 % listnati, 3 % mešani	ionsko selektivni senzor	15 min	marec–november 2006	Rusjan in sod. (2008)
SV ZDA	0,5–2	gozd	0,41	-	listnati	avtomatski vzorčevalnik, ionska kromatografija	dnevno, tedensko	2003–2004	Sebestyen in sod. (2008)
Maryland, ZDA	0,04–0,14	gozd	0,37	-	listnati	optični merilnik	15 min	junij–december 2011	Duncan in sod. (2015)
Barcelona, Španija	0,04–0,08	gozd	16,2	90	iglasti in listnati	avtomatski vzorčevalnik, kolorimetrija	30 min–5 ur	september 1998–junij 2001	Bernal in sod. (2002)
Oregon, ZDA	0,07–2,04	gozd	200	95	iglasti in mešani gozd	ročni odvzem vzorca, kolorimetrija	mesečno	januar–december 2000	Compton in sod. (2003)
New Hampshire, ZDA	0,06–0,43	gozd	0,13	-	listnati	ročni odvzem vzorca	tedensko	december–april 1997–1999	Judd in sod. (2007)
Vermont, ZDA	-	gozd	16,7	95	mešani in listnati	optični merilnik, spektrofotometer	15 minut	junij 2014–december 2015	Vaughan in sod. (2017)
SZ Luksemburg	0,5–1	gozd	0,45	-	mešani	optični merilnik, spektrofotometer	15 min	december 2013–november 2015	Schwab in sod. (2017)
osrednja Nemčija	-	gozd, kmetijstvo	3,7	48	-	optični merilnik, spektrofotometer	15 min	marec 2013–oktober 2014	Aubert in sod. (2016)
Francija, Gers	9,15	kmetijstvo	3,5	-	-	Ionsko selektivni senzor	10 min	maj 2006–julij 2008	Ferrant in sod. (2013)

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 1

Riera Major, Španija	0,25–2,1	gozd	15,8	100	listnati (zimzeleni)	avtomatski vzorčevalnik	30 min–2 uri	oktober 1997–januar 1998	Butturini in sod. (2006)
Fuirosos, Španija	0,01–1,5	gozd	10,5	90	listnati in iglasti	avtomatski vzorčevalnik	30 min–2 uri	oktober 2002–januar 2003	Butturini in sod. (2006)
Pensilvanija, ZDA	0,03–4,45	kmetijstvo, gozd	7,25	23	listnati	avtomatski vzorčevalnik	1 ura	2001–2012	Rose in sod. (2018)
V Nizozemska	3,5–5	kmetijstvo	6,64	-	-	avtomatski vzorčevalnik, ionsko selektivni senzor	tedensko in 10 min	november 2007–oktober 2008	Rozemeijer in sod. (2010)
Kalifornija, ZDA	1,1 (±2,5)	grmičevje in travinje	10 porečij; 5,4–49,6	-	-	avtomatski vzorčevalnik, ročno vzorčenje	1 ura–1 dan	2002–2015	Aguilera in Melack (2018)
New Hampshire, ZDA	2,95	kmetijstvo	0,33	-	-	optični merilnik	15 min	2012–	Snyder in sod. (2018)
New Hampshire, ZDA	2,55	urbano območje	0,44	-	-	optični merilnik	15 min	2012–	Snyder in sod. (2018)
New Hampshire, ZDA	0,07	gozd	13,74	-	-	optični merilnik	15 min	2012–	Snyder in sod. (2018)
Severna Karolina, ZDA	0,48–0,75	gozd, urbanizirano območje	15700	-	-	optični merilnik	15 min	2007–2016	Baker in Showers (2019)
Hampshire Avon, Združeno kraljestvo	2–8*	kmetijstvo	4 porečja; 1,7–50,2	-	-	avtomatski vzorčevalnik, optični senzor	dnevno in 30 min	marec 2012–marec 2014	Lloyd in sod. (2016)
Birmingham, Združeno kraljestvo	6,01	kmetijstvo	3,1	-	-	optični merilnik	15 min	marec–november 2016	Blaen in sod. (2017)

\*ocena glede na grafične podatke

### 2.3 Povezanost hidrometeoroloških razmer s spiranjem nitratnega dušika

Nitratni dušik ima pomembno vlogo v ekosistemih, saj predstavlja pomemben del življenjskega kroga organizmov, poleg tega pa je ključnega pomena za trajnostno upravljanje kakovosti podzemnih in površinskih voda. Za slednje je še posebej pomembno poznavanje povezav med procesi oblikovanja padavinskega odtoka in iznosom nitratnega dušika s porečja, kar pa pripomore tudi k razumevanju, kako se posamezni procesi padavinskega odtoka oblikujejo (Schwab in sod., 2017). Nitrati se na porečju prenašajo in transformirajo (slika 1) v kompleksnem, prepletenem sistemu, ki obsega stičišče med tlemi in zrakom, tla, podzemne in površinske vode. Pri tem je prenašanje nitratov pomembnejše s hidrološkega vidika, transformacije pa z biogeokemičnega zornega kota (Lohse in sod., 2009). Ne glede na to pa med biogeokemičnimi in hidrološkimi procesi težko potegnemo ločnico, saj so procesi med seboj prepleteni. Na eni strani iznos hranil uravnavajo procesi oblikovanja odtoka (omejujoč dejavnik prenašanja hranil), na drugi strani pa je omejujoči dejavnik razpoložljivost prenosljivih snovi na porečju (Lohse in sod., 2009). Poznavanje procesov, ki vplivajo na spremembe koncentracij v vodotoku med padavinskimi dogodki, je pomembno za razumevanje tako kratkotrajnih kot dolgotrajnih sprememb v kroženju snovi in za uspešnejše modeliranje ter izračune masnih bilanc (Bernal in sod., 2002).

Enačba vodne bilance temelji na zakonu o ohranitvi mase in jo v poenostavljeni obliki lahko zapišemo kot:

$$Q = P - ET - \Delta S, \quad (1)$$

kjer je  $Q$  odtok,  $P$  padavine,  $ET$  evapotranspiracija in  $\Delta S$  spremembe v zalogi vode na porečju. Iz enačbe (1) je razvidno, da so v tej obliki zapisa enačbe padavine glavni (edini) člen v sistemu, preko katerega voda vstopa v sistem. Padavine na oblikovanje odtoka ne vplivajo samo s količino, ampak tudi z drugimi lastnostmi, kot so porazdelitev padavin znotraj dogodka, intenziteta padavin, trajanje padavin ipd. Posledično imajo lastnosti padavin pomemben vpliv tudi na iznašanje nitratnega dušika in drugih snovi s porečja, o čemer priča dejstvo, da se razmere koncentracij nitratnega dušika med padavinskimi dogodki razlikujejo od tistih v času baznega odtoka.

Higashino in Stefan (2014) sta proučevala vpliv intenzitete padavin na količino iznosa hranil z riževih polj na Japonskem. Ugotovila sta, da z naraščanjem pretoka skoraj proporcionalno in z manjšim časovnim zamikom narašča tudi količina iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Ob predpostavki nespremenljive koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku sta z modeliranjem pokazala tudi linearno odvisnost med intenziteto padavin in količino iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Blaen in sod. (2017a) so z modeliranjem iznosa hranil s kmetijskega porečja, podkrepjenim z meritvami hranil v vodotoku z majhnim časovnim korakom, potrdili pomemben vpliv intenzitete padavin na količino iznosa s porečja. Poleg intenzitete padavin so kot pomemben dejavnik opredelili tudi predhodne razmere (vlažnost in količino padavin). Količina iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  je bila močno,

negativno povezana s temperaturo zraka in zmerno, pozitivno povezana s trajanjem padavin ter 7-dnevnimi predhodnimi razmerami. Najvišja izmerjena koncentracija  $\text{NO}_3\text{-N}$  je bila najmočneje povezana z najvišjo intenziteto dogodka. Pomembno, vendar z nekoliko manjšo stopnjo povezanosti, pa so na razlago najvišjih koncentracij vplivale tudi predhodne padavinske, vlažnostne in pretočne razmere in čas od predhodnega dogodka. Odvisnost koncentracij v vodotoku od razmer predhodne namočenosti in intenzitete padavin so ugotovili tudi Moravcová in sod. (2013). Ne glede na to pa po nam znanih podatkih ni nobena študija celovito obravnavala vplivov na razmere dušika v vodotoku z vidika večjega števila lastnosti padavin in hidroloških ter sezonskih razmer pred in med dogodkom na naravnem porečju. Celovita analiza morebitnih vplivnih dejavnikov na iznos in časovno dinamiko iznosov nitratnega dušika na porečjih brez vplivov človekovih dejavnosti zato predstavlja referenco za primerjavo procesov na območjih z drugačnimi rabami tal in tudi za oceno vplivov podnebnih sprememb in človekovih posegov v prostor na kroženje vode in dušika.

Podatki o koncentraciji hranil (ali drugih snovi) v vodotoku kot posledica padavinskih dogodkov, pridobljeni z neprekinjenimi meritvami z relativno kratkim časovnim korakom, so pomemben vir informacij o kratkotrajnih spremembah koncentracij, ki lahko bistveno vplivajo na oceno količine iznosa hranil s porečja (Blaen in sod., 2017). Razlogi za kratkotrajne spremembe koncentracij, ki so neredne in nepredvidljive, so različni, njihov vpliv pa je pogosto težko neločljivo določiti. Dosedanje raziskave so pokazale odvisnost sprememb od intenzitete padavin in predhodne vsebnosti vode v tleh (Blaen in sod., 2017), lastnosti porečja (npr. raba tal, nadmorska višina, topografija) (Musolff in sod., 2015) in sezonskosti bioloških procesov, ki se odvijajo na porečju. Omenjene in številne druge raziskave (preglednica 1) kažejo, da je lahko spremenljivost razmer koncentracij velika tako s časovnega kot prostorskega vidika. V nekaterih študijah, ki so obravnavale različno velika porečja, so zaznali vzorce sezonskosti koncentracij dušikovih spojin v vodotokih, z višjimi koncentracijami v zimskih in nižjimi v poletnih mesecih. Razlog za sezonskost ni enoten. Nekateri raziskovalci so takšne razmere pripisali večjemu rastlinskemu privzemanju (angl. *uptake*) hranil v poletnem času glede na zimsko obdobje (npr. Peterson in sod., 2001). Drugi raziskovalci so razloge pripisali večjemu spiranju zaradi sprememb vegetacije in mikrobiološkega delovanja v povezavi z določenimi viri vode (npr. Holloway in Dahlgren, 2001). Tretji so sezonsko spremenljivost pripisali zgolj hidrološkemu razlogom oziroma povezanosti s podzemnimi viri vode brez značilnega vpliva biogeokemijskih procesov ali privzemanja vegetacije (Pionke in sod., 1999; Martin in sod., 2004). Pri slednjem velja izpostaviti, da rezultati omenjenih študij temeljijo na opazovanjih na kmetijskih porečjih. Kot četrti možni razlog za sezonsko spremenljivost hranil v vodotokih pa Exner-Kittridge in sod. (2016) navajajo sezonsko pogojene aktivnosti v kmetijstvu, povezane z gnojenjem in časom obiranja pridelkov. Dodatno velja poudariti, da zaključki teh študij temeljijo na večinoma mesečnih ali še redkejših enkratnih vzorčenjih vode v površinskih vodah, ki pa ne razkrivajo morebitnih informacij o vzorcih sezonskosti glede dinamike sprememb koncentracij med posameznimi dogodki.

Temelj za razumevanje raznolikosti odzivov porečij, ki se odražajo v koncentracijah, izmerjenih v vodotoku, predstavljajo proučevanja interakcij med viri opazovane snovi, hidrološkimi transportnimi procesi ter transformacijami snovi (Sebestyen in sod., 2008).

#### **2.4 Povezanost sezonskih vegetacijskih razmer s spiranjem nitratnega dušika**

Raziskave, ki so bile opravljene na različno velikih porečjih ter tako na povirnih območjih kot na območjih glavnih vodotokov, pripisujejo pojav sezonske spremenljivosti koncentracij dušikovih spojin v vodotoku in iznosa s porečja različnim dejavnikom. Ohte (2012) med glavne dejavnike, ki vplivajo na oblikovanje sezonskih vzorcev koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotokih, uvršča potrebo ekosistemov po hranilih, sposobnost hidrološko pogojenega transporta raztopljenih snovi in porabo ter zalogo hranil v vodotoku.

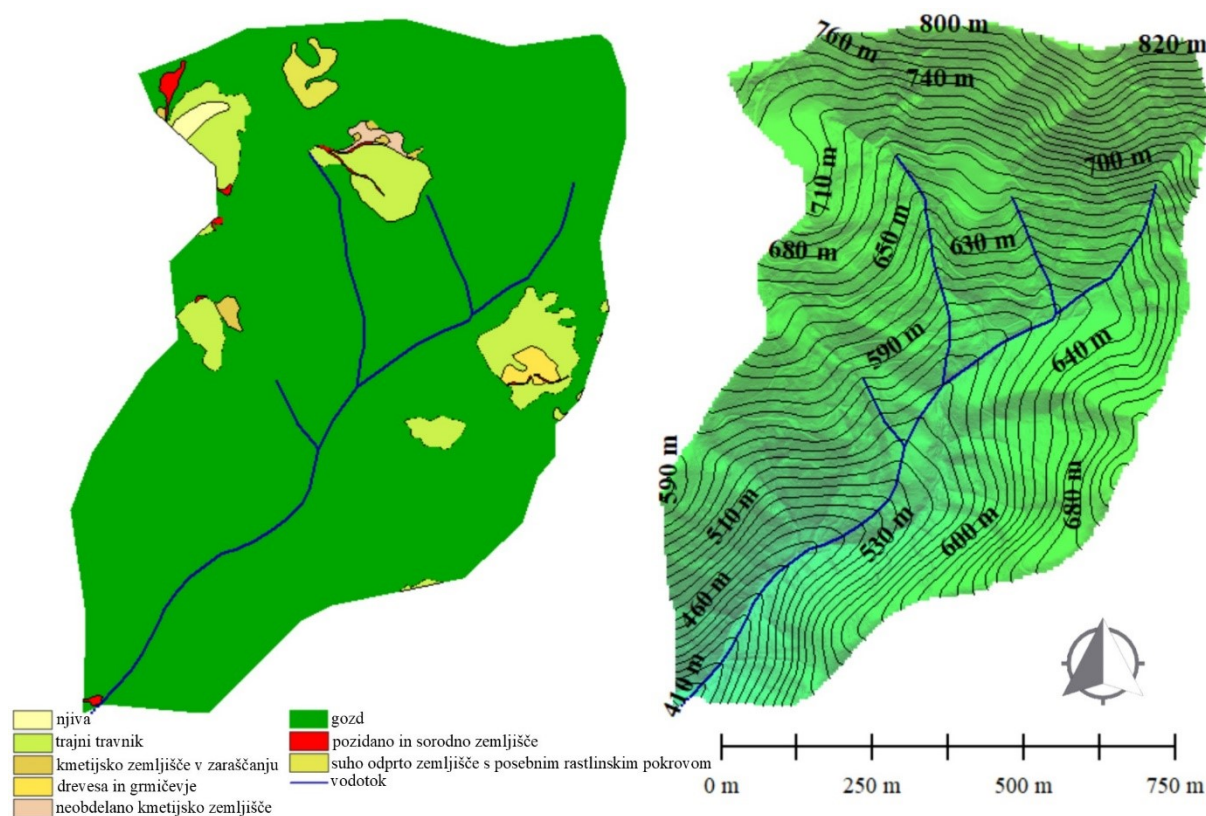
Vpliv hidroloških pogojev na sezonsko spremenljivost koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku je bil ugotovljen predvsem na porečjih z bistvenim doprinosom k površinskim vodam iz podzemnih virov, ki so pod globino biološko aktivnega območja (območja korenin), medtem ko se v primerih, ko se glavnina odtoka vode oblikuje v plitvih horizontih tal, v sezonski spremenljivosti koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  bolj izrazito odraža vpliv dinamike dušikovih procesov v tleh (Ohte, 2012). Tla so namreč najpomembnejši vir hranil v gozdu, ki jih potrebujejo rastline za svojo rast in razvoj. Številne študije so pokazale, da pokritost porečja z vegetacijo in lastnosti padavin (npr. intenziteta) pomembno vplivajo na erozijo tal in s tem iznos hranil, shranjenih v tleh, s porečja. Gozdnata porečja so bila prepoznana kot porečja z rabo tal, ki ima največji potencial pri uravnavanju izgube hranil, ki so posledica procesov padavine–odtok–erozija (npr. García-Ruiz in sod., 2008; Suescún in sod., 2017).

Vplivi vegetacije na hidrološke procese so bili predmet številnih študij, vendar pa je številčnost takih s poudarkom na sezonski majhna. Ovrednotenje sezonskih fenoloških vplivov vegetacije na odtok in druge hidrološke procese je obenem prav tako eden pomembnih ciljev ekohidrologije (Newman in sod., 2006; Voepel in sod., 2011).

### 3 METODE DELA

#### 3.1 Opis eksperimentalnega porečja

Izbrano eksperimentalno porečje vodotoka Kuzlovec je del večjega porečja reke Gradaščice. Glavna struga vodotoka Kuzlovec je dolga 1,3 km in ima 22-odstotni povprečni naklon. Kuzlovec se kot levi pritok izliva v Veliko Božno, ta pa se v Polhovem Gradcu združi z Malo vodo in skupaj tečeta naprej kot Gradaščica, ki se v Trnovem izliva v Ljubljano. Prispevno območje obsega 0,7 km<sup>2</sup> predvsem gozdnatih in relativno strmih površin (slika 2). Povprečni naklon porečja znaša 51,6 %, medtem ko nakloni največjih strmin znašajo tudi več kot 105 %.



Slika 2: Prikaz rabe tal (MKGP, 2018) (levo) in reliefa (desno) porečja Kuzlovec

Figure 2: Land use (MKGP, 2018) (left) and relief (right) of the Kuzlovec river catchment

Glede na rabo tal (preglednica 2) lahko porečje uvrstimo med naravno, nedotaknjeno porečje z zanemarljivo malo antropogenimi vplivi. Delež pokritosti porečja z gozdom presega 90 %. Po velikosti deleža sledi gozdu raba tal v obliki trajnih travnikov. Ostale rabe tal predstavljajo manj kot 1 % površine porečja. Pri tem velja poudariti, da se raba pozidanih in sorodnih zemljišč na porečju nanaša predvsem na neurtjene gozdne poti (slika 2, levo). Zanemarljivost antropogenih vplivov dopolnjuje dejstvo, da glavna rečna mreža vodotoka ni nikjer v neposrednem stiku z antropogeno rabo, kar je posledica

morfologije struge, ki je globoko vrezana v teren. Gozd, ki je poglavitna raba tal ob vodotoku, opravlja nalogo varovalnega pasa in posledično vpliva na tvorbo padavinskega odtoka, pretočne razmere v vodotoku in ne nazadnje na fizikalno-kemijske razmere vode. Med listnatimi drevesnimi vrstami prevladuje bukev, med iglastimi pa smreka.

Preglednica 2: Površine posameznih rab tal na porečju Kuzlovec in njihovi deleži (MKGP, 2018)

Table 2: Areas of individual land use type and their proportions in the Kuzlovec river catchment (MKGP, 2018)

Raba ID	Opis rabe	Površina [ha]	Delež površine [%]
2000	Gozd	63,30	90,13
1300	Trajni travnik	4,99	7,11
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0,25	0,35
1500	Drevesa in grmičevje	0,37	0,52
1600	Neobdelano kmetijsko zemljišče	0,22	0,32
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0,30	0,43
1100	Njive	0,25	0,36
5000	Odrpto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0,55	0,79



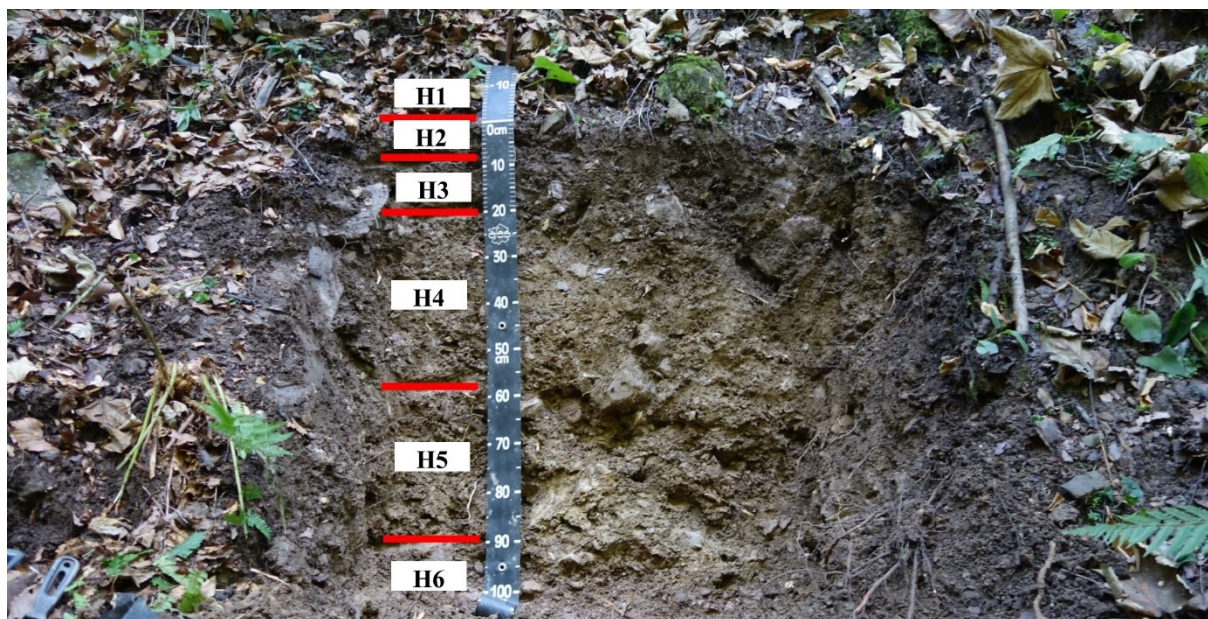
Slika 3: Struga vodotoka v času po padavinah (18. november 2019) gledano dolvodno (levo) in po dolgotrajnem obdobju brez padavin (6. januar 2020) gledano gorvodno (desno)

Figure 3: River bed after the rainfall event (18 November 2019) – downstream view (left) and after a rainless period (6 January 2020) – upstream view (right)



Glede na geološko klasifikacijo porečje sestavljajo enote lapornih apnencev, dolomita in peščenega skrilavca, temno siv apnenec in dolomit, grödenski skladi rdečega peščenjaka in konglomerata ter neplastovit dolomit (Osnovna geološka karta 1:100.000). V pedološkem smislu pa je celotno porečje klasificirano kot rendzina na apnencu in dolomitu (Pedološka karta 1:250.000). Struga vodotoka je globoko vrezana in z obeh strani omejena s strmim terenom (slika 3). Glavna struga se tudi po daljših obdobjih brez padavin ne izsuši, v času obilnejših padavin pa se lahko oblikujejo tudi dodatne poti stekanja padavinskega odtoka.

Lastnosti tal smo podrobneje opredelili z določitvijo talnih horizontov (slika 4) in laboratorijsko analizo vzorcev, odvzetih v posameznih talnih horizontih, ki jo je opravil Kmetijski inštitut Slovenije. Glede na splošne talne lastnosti, določene na terenu v času vzorčenja, so tla dobro prepustna za vodo, vendar redko nasičena in brez podtalne vode. Dostopnost vode za glavne rastlinske vrste je ocenjena kot zadostna (Agrarius, 2018). Določenih je bilo šest talnih horizontov (H1–H6), za katere so podrobneje določene lastnosti glede globine, skeleta, strukture, vlage, konsistence, prisotnosti biološke aktivnosti, korenin in drugih materialov ter lastnosti, kot sta barva in tekstura (preglednica 3).



Slika 4: Talni profil z označenimi horizonti (rdeča črte označujejo meje talnih horizontov)

Figure 4: Soil profile with marked soil horizons (red lines show soil horizon boundaries)

Preglednica 3: Opisi horizontov talnega profila na porečju vodotoka Kuzlovec (Agrarius, 2018)

Table 3: Description of soil horizons in the Kuzlovec river catchment (Agrarius, 2018)

Številka	Oznaka	Globina horizonta [cm]	Opis horizonta
H1	Ol	3–0	Opad zlasti listja in vejic. Redek opad zaradi erozije (strm naklon).
H2	Ah	0–4	<u>Meja</u> : jasna. <u>Skelet</u> : 1 %, 2 cm povprečne velikosti, 5 cm maksimalne velikosti, ostrorob. <u>Struktura</u> : grudičasta, dobro izražena. <u>Vlaga</u> : vlažen. <u>Konsistenca</u> : drobljiv, lahko. <u>Biološka aktivnost</u> : ni opaziti. <u>Korenine</u> : goste. <u>Barva</u> : 10YR 3/2. <u>Tekstura</u> : MI. <u>Organska snov</u> : močno humozen. <u>Drugi materiali</u> : niso opazni. <u>Marmoracije</u> : niso opazne.
H3	A2	4–15/20	<u>Meja</u> : jasna. <u>Skelet</u> : 3 %, 2 cm povprečne velikosti, 5 cm maksimalne velikosti, ostrorob. <u>Struktura</u> : oreškasta, srednje izražena. <u>Vlaga</u> : vlažen. <u>Konsistenca</u> : drobljiv, mazav, nekoliko. <u>Biološka aktivnost</u> : ni opaziti. <u>Korenine</u> : srednje goste. <u>Barva</u> : 10YR 4/2. <u>Tekstura</u> : I. <u>Organska snov</u> : humozen. <u>Drugi materiali</u> : niso opazni. <u>Marmoracije</u> : niso opazne.
H4	B	15/20–55	<u>Meja</u> : postopna. <u>Skelet</u> : 5 %, 5 cm povprečne velikosti, 10 cm maksimalne velikosti, ostrorob. <u>Struktura</u> : oreškasta, poliedrična, srednje izražena. <u>Vlaga</u> : vlažen. <u>Konsistenca</u> : mazav, srednje. <u>Biološka aktivnost</u> : ni opaziti. <u>Korenine</u> : posamezne. <u>Barva</u> : 10YR 5/4. <u>Tekstura</u> : GI. <u>Organska snov</u> : slabo humozen do mineralen. <u>Drugi materiali</u> : niso opazni. <u>Marmoracije</u> : niso opazne.
H5	CB	55–90	<u>Meja</u> : jasna. <u>Skelet</u> : 60 %, 5 cm povprečne velikosti, 15 cm maksimalne velikosti, ostrorob. <u>Struktura</u> : oreškasta, poliedrična, slabo izražena. <u>Vlaga</u> : vlažen. <u>Konsistenca</u> : mazav, nekoliko. <u>Biološka aktivnost</u> : ni opaziti. <u>Korenine</u> : posamezne. <u>Barva</u> : 10YR 5/4. <u>Tekstura</u> : I. <u>Organska snov</u> : zelo slabo humozen do mineralen. <u>Drugi materiali</u> : niso opazni. <u>Marmoracije</u> : niso opazne.
H6	C	90–100+	Grödenski peščenjaki

V talnih profilih z oznakami H2–H5, smo odvzeli vzorce tal, ki smo jih poslali v laboratorijsko analizo na Kmetijski inštitut Slovenije. Vzorcem so bili določeni pH, količina organskega in skupnega ogljika, količina dušika v posameznih dušikovih spojinah (v nitratu, nitritu in amoniju) in skupni dušik ter tekstura vzorcev (preglednica 4). Glede na ameriško teksturno klasifikacijo so vzorci opredeljeni kot različne oblike ilovice. Teksture po slojih od vrha navzdol so opredeljene kot: meljasta ilovica–ilovica, ilovica, glinena ilovica–ilovica, ilovica. Zgornja sloja tal (H2 in H3), ki sta bogata s humusom, imata rahlo kisel pH, medtem ko sta globlja sloja nevtralna do rahlo bazična. Prisotnost humusa se odraža tudi v količini organskega in skupnega ogljika. Količina organskega ogljika v sloju H2 je znašala 43,9 g/kg suhe snovi (s. s.), v sloju H3 30,3 g/kg, medtem ko je bila v spodnjih dveh slojih (H4 in H5) izrazito

nižja (11,8 in 7,3 g/kg s. s.). Organski ogljik predstavlja glavnino skupnega ogljika v zgornjih treh slojih, medtem ko je delež organskega ogljika v skupni količini ogljika v sloju H5 približno 50 %. Podobno kot količina skupnega ogljika upada z globino tudi količina skupnega dušika (od 3,2 g/kg s. s. v sloju H2 do 0,6 g/kg s. s. v sloju H5). Med analiziranimi dušikovimi spojinami je pričakovano največ nitratnega dušika (NO<sub>3</sub>-N), katerega vir sta predvsem razgradnja organske snovi in padavine. Izmerjene vrednosti znašajo 23,0 mg/kg s. s. v zgornjem sloju do 1,3 mg/kg s. s. v najglobljem sloju. Razmerje med ogljikom in dušikom (C : N razmerje) je v slojih H2–H4 v približno enakem velikostnem razredu (12,6–15,1), medtem ko je razmerje v spodnjem sloju približno enkrat večje, tj. 24,5. Razmerje C : N v tem talnem horizontu je posledica relativno majhne vsebnosti dušika glede na ostale horizonte, kar potrjujejo tudi izračunana razmerja med skupnim organskim ogljikom in dušikom (C<sub>org</sub> : N), ki odražajo enak velikostni razred razmerij (10,7–13,7).

Preglednica 4: Rezultati laboratorijske analize vzorcev posameznih talnih horizontov (Kmetijski inštitut Slovenije, 2018)

Table 4: Results of laboratory analysis of samples taken in individual soil horizon (Kmetijski inštitut Slovenije, 2018)

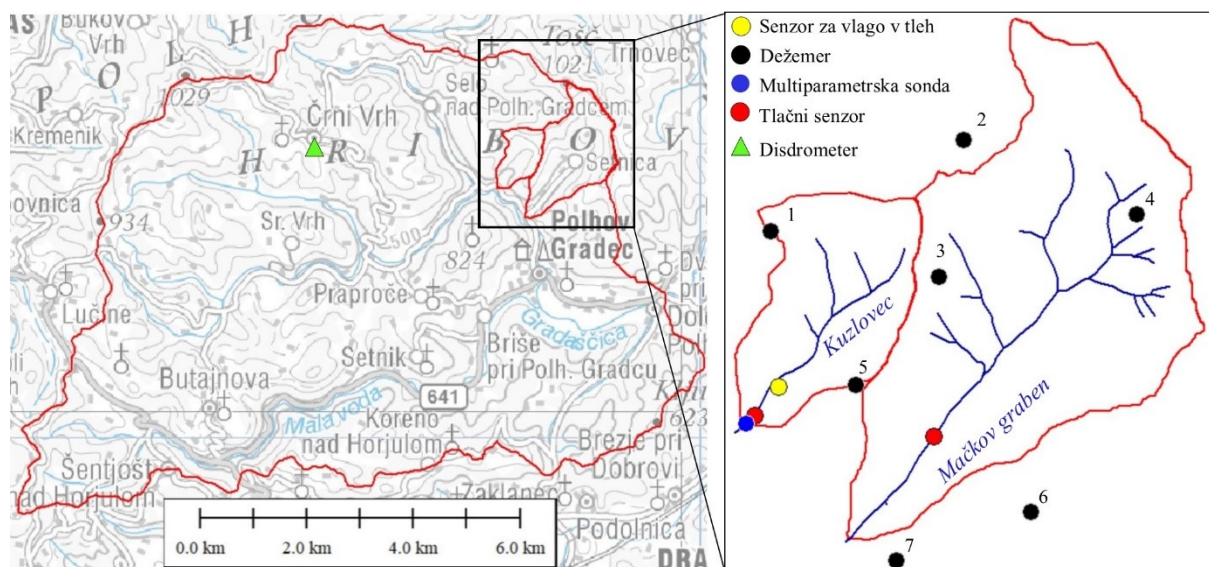
Parameter	Rezultat po horizontih				Enota	Referenca
	H2	H3	H4	H5		
pH v CaCl <sub>2</sub>	6,5	6,4	7,2	7,7	-	ISO 10390:2005
Organski ogljik (C <sub>org</sub> )	43,9	30,3	11,8	7,3	g/kg s. s.	SIST ISO 14235:1999 mod.
Skupni ogljik (C)	48,3	30,3	13,9	14,7	g/kg s. s.	SIST ISO 10694:1996
Nitratni dušik (NO <sub>3</sub> -N)	23,0	13	3,4	1,3	mg/kg s. s.	SIST ISO 14255:1999 mod.
Nitritni dušik (NO <sub>2</sub> -N)	0,1	0,1	0,1	<0,1	mg/kg s. s.	SIST ISO 14255:1999 mod.
Amonijski dušik (NH <sub>4</sub> -N)	5,0	2,1	1	0,6	mg/kg s. s.	SIST ISO 14255:1999
Skupni dušik (N)	3,2	2,4	1,1	0,6	g/kg s. s.	ISO 11261:1995 mod.
Razmerje C : N	15,1	12,6	12,6	24,5	-	izračun
Razmerje C <sub>org</sub> : N	13,7	12,6	10,7	12,2	-	izračun
Glina (< 2 μm)	17,1	21,8	27,3	23	%	ISO 11277: 2009 mod.
Fini melj (2–20 μm)	37,6	35,9	29,4	23,1	%	ISO 11277: 2009 mod.
Grobi melj (20–50 μm)	12,8	11,5	12,3	21,2	%	ISO 11277: 2009 mod.
Fini pesek (50–200 μm)	20,4	17,8	15,8	15,1	%	ISO 11277: 2009 mod.
Grobi pesek (200–2000 μm)	12,1	12,9	15,2	17,5	%	ISO 11277: 2009 mod.

S strani Gozdarskega inštituta Slovenije (GOZDIS, 2018) smo pridobili podrobnejše podatke o gozdnih sestojih na eksperimentalnem porečju, ki obsegajo podatke o razvojnih fazah gozdnih sestojev oz. starosti gozdnih sestojev, površinah gozdnih sestojev, sklenjenosti krošenj v gozdnem sestoju (tesna, normalna, rahla in vrzelasta do pretrgana) in lesni zalogi listavcev in iglavcev. Gozd na porečju vodotoka Kuzlovec je v povirnem delu razvrščen v 3. in 4. razvojno fazo gozdnih sestojev, tj. med debeljake in sestoj v obnovi, medtem ko na osrednjem in spodnjem delu porečja prevladujejo gozdni sestoji 1. in 2. razvojne faze, tj. mladovje in drogovnjaki. Na povirnem delu porečja prevladujejo rahle do normalne

sklenjenosti krošenj, na osrednjem delu porečja se v največjem obsegu pojavljajo vrzelaste do pretrgane in rahle sklenjenosti krošenj, najdemo pa na tem delu tudi nekaj manjših območij s tesnimi in normalnimi sklenjenostmi krošenj. Za celotni spodnji del porečja pa so značilne normalne sklenjenosti krošenj, kar pomeni, da se krošnje dotikajo, vendar niso deformirane. Po podatkih lesne zaloge iglavcev in listavcev v posameznih gozdnih sestojih listavci predstavljajo glavnino lesne zaloge na porečju (približno 80 %), medtem ko je iglavcev za približno eno petino.

### 3.2 Merska oprema in merske metode

Večina meritev, predstavljenih v tej nalogi, je bila izvedenih z mersko opremo, ki je na razpolago na Katedri za splošno hidrotehniko UL FGG. Merska oprema, kot so dežemeri, disdrometer, tlačne sonde in multiparameterska sonda, so bili nameščeni in uporabljeni že v sklopu projekta SedAlp (2012–2015), kjer je bil poudarek na spremljanju erozijskih procesov na porečju ter procesov premeščanja in odlaganja rečnih plavin. Ostala oprema za zvezno spremljanje hidrometeoroloških procesov je bila za potrebe te naloge nameščena v letih 2018 in 2019. Podatki, uporabljeni v tej nalogi, so bili pridobljeni v obdobju april 2018–april 2020. Podatki zveznih meritev so bili pridobljeni ali preračunani na 20-minutni časovni korak. Izbrani časovni korak lahko z vidika študij spiranja hranil opredelimo med manjše časovne korake. Meritve z manjšim časovnim korakom so ključnega pomena za vpogled v časovne spremembe posameznih količin, kot so sedimenti in hranila, in njihovo zanesljivejšo oceno (Bartley in sod., 2012; Piniewski in sod., 2019). Lokacije merilnih naprav, kjer se izvajajo zvezne meritve, so prikazane na sliki 5.



Slika 5: Lokacije meritev na območju eksperimentalnega porečja Gradaščice

Figure 5: Locations of measurements in the experimental Gradaščica river catchment

### 3.2.1 Meritve padavin

Na širšem območju porečij vodotokov Kuzlovec in Mačkov graben je nameščenih 7 dežemerov (Onset HOBO RG3-M), ki jih imenujemo tudi prekucniki (angl. *tipping bucket rain gauge*) (slika 6, levo). Posamezni dežemer je sestavljen iz aluminijaste posode valjčne oblike s premerom odprtine 15,24 cm in spominskega modula (model Onset HOBO Event), na katerega se shranjujejo podatki o padavinskih dogodkih. Dežemeri so umerjeni na 0,3 mm, kar pomeni, da se za vsakih 0,3 mm padavin mehanizem prekucne in posamezni prekuc zapiše na spominski modul z datumom in uro dogodka. Prekucniki ne potrebujejo zunanjega napajanja, za spominski modul pa je potrebna samo gumbna baterija z napetostjo 3 V, kar je za meritve na oddaljenem in težje dostopnem terenu bistvenega pomena z vidika vzdrževanja in pobiranja podatkov. S številčnostjo dežemerov na območju se povečuje gostota merskih mest, na podlagi katere lahko opazujemo prostorsko in časovno spremenljivost padavin, po drugi strani pa se zmanjšuje negotovost zaradi izpada podatkov ob nedelovanju katerega od dežemerov. Dežemeri so nameščeni skladno s priporočili Svetovne meteorološke organizacije (WMO, 2008a).



Slika 6: Dežemer RG3-M (levo zgoraj) in mehanizem dežemera s pomnilnikom (levo spodaj). Disdrometer v Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (desno).

Figure 6: Rain gauge RG3-M (left above) and the rain gauge mechanism with a data logger (left below). Disdrometer in Črni Vrh nad Polhovim Gradcem (right).

Za meritve lastnosti padavin, kot je porazdelitev velikosti kapljic in njihova velikost, je na porečju Gradaščice v Črnem Vrhu pri Polhovem Gradcu dodatno nameščen laserski disdrometer Thies Clima (slika 6, desno). Disdrometer sestavljata oddajnik in sprejemnik laserskega signala, ki poteka v vodoravni ravnini. Padavinski delec, ki pade skozi območje laserskega signala ( $45,6 \text{ cm}^2$ ), za določeno časovno obdobje zmanjša amplitudo oddanega signala. Na podlagi zmanjšane amplitude nato instrument določi hitrost padajočega delca in njegovo velikost (premer) (Löffler-Mang in Joss, 2000). Meritve se izvajajo s časovnim korakom 1 min, kar pomeni, da se delci, ki so padli skozi mersko območje v intervalu 1 minute, razvrstijo v razrede velikosti (premera) in hitrosti (preglednica 5). Za delovanje disdrometra je potrebna priključitev na električni tok, podatki pa se shranjujejo na spominsko kartico.

Preglednica 5: Velikostni razredi premerov in hitrosti delcev, izmerjenih z laserskim disdrometrom Thies Clima

Table 5: Class width of particle diameter and speed, measured by laser disdrometer Thies Clima

Razred velikosti delca			Razred hitrosti delca		
Razred	Premer [mm]	Velikost razreda [mm]	Razred	Hitrost [m/s]	Velikost razreda [m/s]
1	$\geq 0,125$	0,125	1	$\geq 0,000$	0,200
2	$\geq 0,250$	0,125	2	$\geq 0,200$	0,200
3	$\geq 0,375$	0,125	3	$\geq 0,400$	0,200
4	$\geq 0,500$	0,250	4	$\geq 0,600$	0,200
5	$\geq 0,750$	0,250	5	$\geq 0,800$	0,200
6	$\geq 1,000$	0,250	6	$\geq 1,000$	0,400
7	$\geq 1,250$	0,250	7	$\geq 1,400$	0,400
8	$\geq 1,500$	0,250	8	$\geq 1,800$	0,400
9	$\geq 1,750$	0,250	9	$\geq 2,200$	0,400
10	$\geq 2,000$	0,500	10	$\geq 2,600$	0,400
11	$\geq 2,500$	0,500	11	$\geq 3,000$	0,400
12	$\geq 3,000$	0,500	12	$\geq 3,400$	0,800
13	$\geq 3,500$	0,500	13	$\geq 4,200$	0,800
14	$\geq 4,000$	0,500	14	$\geq 5,000$	0,800
15	$\geq 4,500$	0,500	15	$\geq 5,800$	0,800
16	$\geq 5,000$	0,500	16	$\geq 6,600$	0,800
17	$\geq 5,500$	0,500	17	$\geq 7,400$	0,800
18	$\geq 6,000$	0,500	18	$\geq 8,200$	0,800
19	$\geq 6,500$	0,500	19	$\geq 9,000$	1,000
20	$\geq 7,000$	0,500	20	$\geq 10,000$	10,000
21	$\geq 7,500$	0,500			
22	$\geq 8,000$	$\infty$			

### 3.2.2 Meritve višine vode in pretokov

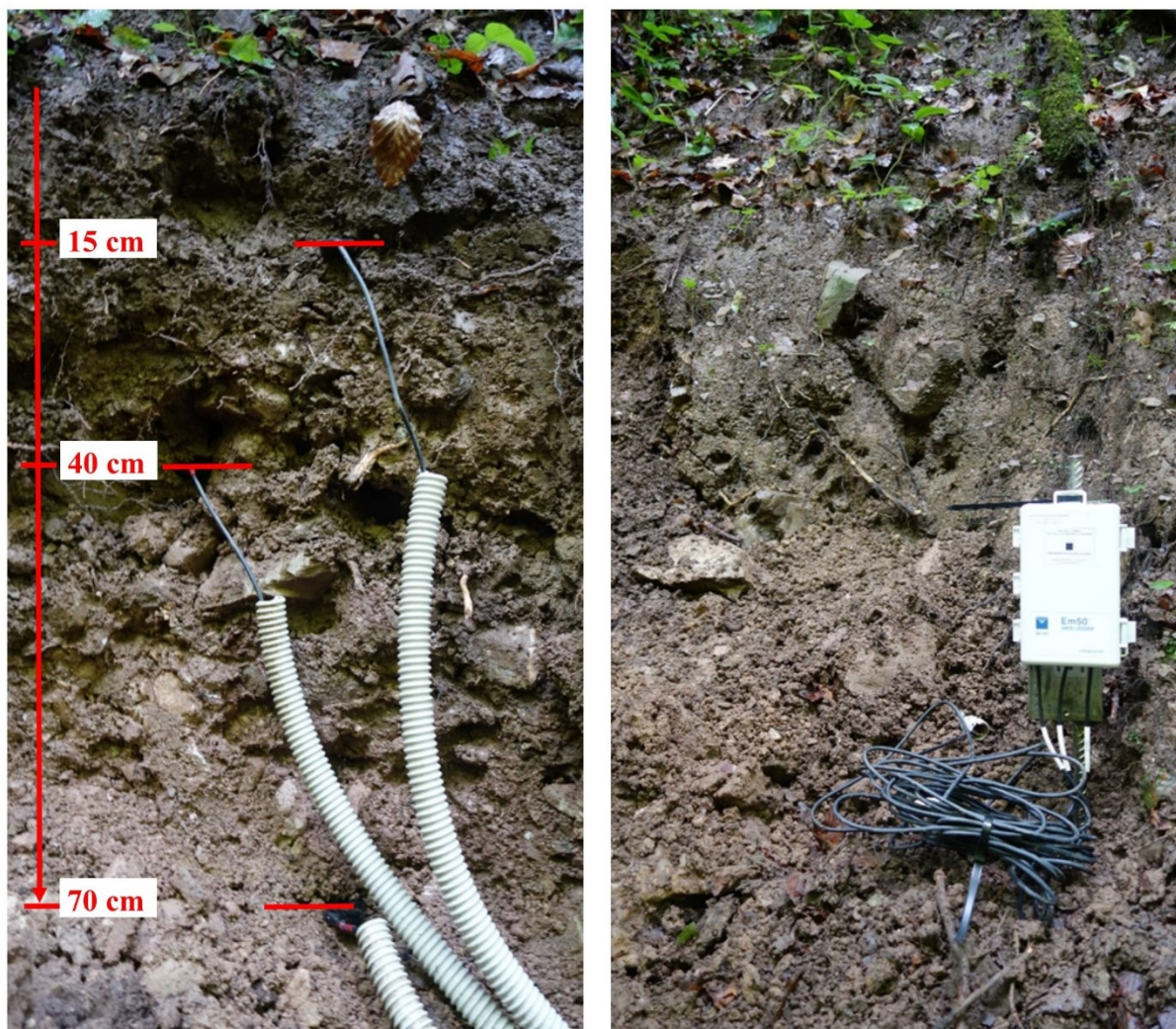
Meritve višine vode v vodotoku se merijo zvezno z 10-min časovnim korakom z nameščenim tlačnim senzorjem (HOBO 13-Foot Fresh Water Level Data Logger) v vsakem od vodotokov. Poleg tlačnega senzorja v vodi, ki meri skupni tlak zaradi vode nad senzorjem in zraka (t. i. absolutni tlak), je v neposredni bližini na kopnem nameščen še tlačni senzor, ki meri in beleži zračni tlak v istih časovnih intervalih. Podatki s tega senzorja se uporabljajo za kompenzacijo zračnega tlaka. Znano je namreč, da se zračni tlak spreminja zaradi sprememb temperature in vremena. Sprememba zračnega tlaka za 1 hPa tako povzroči spremembo v višini vode za 1 cm. Globine vodotokov Kuzlovec in Mačkov graben so relativno nizke (od nekaj centimetrov do nekaj 10 centimetrov), zato je upoštevanje zračnega tlaka toliko pomembnejše.

Pretočna krivulja (krivulja, ki opisuje odnos med vodostajem in pretokom), ki smo jo uporabljali za preračun pretokov, je bila pripravljena na podlagi ročnih meritev pretokov s pomočjo akustičnega Dopplerjevega merilnika hitrosti vode v času višjih voda in s pomočjo merilnika pretokov, ki deluje po principu razredčenja sledila (v našem primeru smo uporabljali kuhinjsko sol), v času nizkih in srednjih voda.

### 3.2.3 Meritve vsebnosti vode v tleh

Za spremljanje sprememb vlažnosti tal smo namestili tri senzorje za spremljanje volumetrične vsebnosti vode v tleh (Decagon ECH2O 5TM). Senzorji delujejo po kapacitivni, elektromagnetni metodi in merijo vsebnost vode v tleh (enote  $m^3/m^3$ ) na podlagi spremembe dielektrične konstante medija. Za vlažno zemljino lahko predpostavimo, da je sestavljena iz kombinacije treh komponent: trdih delcev, tekoče vode in zraka. Dielektrična konstanta vode znaša približno 80, vrednosti dielektrične konstante preostalih dveh komponent pa sta precej nižji in znašata med 1 in 7, zaradi česar je omogočeno določanje vsebnosti vode (Friedman, 1998; Wu in sod., 2011).

Senzorji so nameščeni na globinah 15, 40 in 70 cm od površja tal in so priključeni na napravo za beleženje podatkov (EM50), ki je v neposredni bližini senzorjev (slika 7). Naprava za beleženje podatkov deluje s pomočjo petih alkalnih baterij (AA). Časovni korak meritev je 20 min.



Slika 7: Senzorji za meritve vsebnosti vode v tleh pred zasutjem talnega profila (levo) in naprava za beleženje podatkov (desno)

Figure 7: Sensors for volumetric soil water content measurements before being buried (left) and the data logger (right)

### 3.2.4 Meritve fizikalno-kemijskih lastnosti vode

Meritve fizikalno-kemijskih lastnosti vode, natančneje temperature, pH, električne prevodnosti, motnosti, slanosti in koncentracije nitratnega dušika ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), smo izvajali z uporabo multiparametrške sonde Hydrolab MS5, na katero so nameščena vsa tipala za merjenje naštetih parametrov. Meritve so se izvajale zvezno z 20-minutnim časovnim korakom beleženja podatkov. V času eksperimenta so bila tudi obdobja brez meritev, do katerih je prišlo zaradi tehničnih težav in obdobja rednega umerjanja tipal. Z rednim (na približno 14 dni do 1 mesec) umerjanjem tipal skladno z navodili proizvajalca smo zagotavljali ustrezno kakovost meritev. Za umerjanje smo uporabljali standardne raztopine za pH, električno prevodnost in koncentracije nitratnega dušika. Tipalo za meritve koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  smo zamenjali na približno pol leta, saj je tipalo ionsko selektivno in se s časom izrabi in vpliva na kakovost



podatkov. Umerjanje tipal in menjavo tipal smo izvajali v kontroliranih razmerah v prostorih UL FGG na Hajdrihovi 28 v Ljubljani, saj se po navodilih proizvajalca temperatura med umerjanjem ne sme spremeniti za več kot 0,2 °C. Postopek umerjanja je relativno zamuden in od uporabnika zahteva zbranost ter natančnost. Točnost meritev ionsko selektivnega NO<sub>3</sub>-N tipala znaša ±5 % z natančnostjo meritev 0,01 mg/L-N. Tipalo deluje v medijih s koncentracijami NO<sub>3</sub>-N med 0 in 100 mg/L in v globinah do 15 m (OTT, 2020). Instrument se napaja z energijo 8 alkalnih baterij AA, kar pri naših namestitvah parametrov, časovnem koraku meritev ter kapaciteti spominskega modula (120.000 zapisov) zadošča za približno 1 mesec meritev. Ne glede na to pa je treba instrument redno preverjati, saj je še posebej dovzeten za poškodbe v času nizkih temperatur, ko obstaja možnost zmrzali in s tem poškodbe tipal in/ali razlitja baterij. V času nizkih temperatur zato meritev z multiparametrsko sondo nismo izvajali. Multiparametrska sonda je bila nameščena na iztoku s porečja vodotoka Kuzlovec, kjer bila vstavljena v zaščitno PVC cev. Ta instrument ščiti pred mehanskimi poškodbami vode in materiala (plavja in plavin), ki potuje vzdolž vodotoka po padavinskih dogodkih.

Natančnost meritev kemizma vode z multiparametrsko sondo je manjša od meritev, ki bi jih izvedli z laboratorijskimi analizami. Vendar pa je namen te naloge spremljanje časovnih sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku z majhnim časovnim korakom (20 minut), kar je z laboratorijskimi analizami praktično nemogoče doseči, saj avtomatski vzorčevalniki omogočajo zajem omejenega števila vzorcev in torej zahtevajo prisotnost osebe. Meritve z multiparametrsko sondo so v primerjavi z laboratorijskimi tudi z ekonomskega vidika racionalnejše. Ne glede na to smo ob vsakokratnem obisku porečja odvzeli vzorec vode, ki smo ga pozneje analizirali v laboratoriju z uporabo spektrofotometra HACH DR1900. Vzorec smo po navodilih za meritve NO<sub>3</sub>-N shranili na predpisani temperaturi, s katero smo preprečili reakcije, zaradi katerih bi bila lahko koncentracija NO<sub>3</sub>-N večja ali manjša, kot je bila ob odvzemu vzorca. Meritve so se izvajale po metodi št. 8039, pri kateri se za določitev koncentracije NO<sub>3</sub>-N uporabljajo t. i. praškasti reagenti (angl. *powder pillows*). Za izvedbo meritve je treba pripraviti dvakrat po 10 ml vzorca, pri čemer je en vzorec brez reagenta in služi kot slepi vzorec, drugemu pa primešamo reagent. Celotna meritev traja približno 10 min. Vzorec, ki vsebuje dodani reagent se po določenem času ob vsebnosti NO<sub>3</sub>-N obarva v rumenem odtenku, jakost odtenka pa narašča s koncentracijo (slika 8). Meritve po tej metodi se izvajajo v območju koncentracij NO<sub>3</sub>-N med 0 in 10 mg/L, kar ustreza koncentracijam obravnavanega vodotoka, kjer ni bistvenih antropogenih vnosov dušika na porečje in so koncentracije relativno nizke.



Slika 8: Izvajanje kontrolne meritve z uporabo spektrofotometra HACH DR1900 (levo) in pripravljena vzorca (desno)

Figure 8: The control measurement using spectrophotometer HACH DR1900 (left) and the prepared samples (right)

Meritve električne prevodnosti z multiparametrsko sondo Hydrolab se izvajajo s pomočjo štirih grafitnih elektrod v odprti celici, ki zagotavlja točne in zanesljive podatke, strošek in čas vzdrževanja pa sta minimalna. Poleg električne prevodnosti lahko s tem istim senzorjem merimo tudi slanost, skupne raztopljene snovi (angl. *total dissolved solids*, TDS) in upor (OTT, 2020). Električna prevodnost je merilo za skupno koncentracijo ionov in je pri vodotokih odvisna od hidrogeokemičnih procesov na porečju (Cano-Paoli in sod., 2019). Ne glede na cenovno dostopnost, kakovost in frekvenco zajema meritev pa je uporaba podatkov o električni prevodnosti na področju hidrologije redka (Flynn in Deakin, 2016). Najpogosteje se podatki uporabljajo v študijah kakovosti vode in za razdelitev hidrograma odtoka (Laudon in Slaymaker, 1997; Inzerillo in sod., 2017; Penna in sod., 2015). Pellerin in sod. (2007) so na primer podatke meritev električne prevodnosti uporabili za dvokomponentno razdelitev hidrograma, s čimer so ovrednotili relativni in absolutni delež stare in nove vode zaradi površinskega in podpovršinskega padavinskega odtoka. Za padavine so značilne nizke vrednosti električne prevodnosti, zato smo v nalogi pri interpretaciji rezultatov vrednost električne prevodnosti v padavinah zanemarili. Posledično pride v vodotoku do znižanja električne prevodnosti, to pa je odvisno od količine vode in kontaktnega časa vode z mineralnim substratom (Laudon in Slaymaker, 1997).

V nadaljnjih analizah v disertaciji smo od merjenih fizikalno-kemijskih količin upoštevali koncentracije nitratnega dušika in električno prevodnost ter izračunani iznos nitratnega dušika.

### 3.2.5 Meritve sezonske spremenljivosti vegetacije

Indeks listne površine (angl. *leaf area index*, LAI) je brezdimenzijska vrednost, v splošnem definirana kot skupna enostranska površina listov na enoto površine (Bréda, 2003; Šraj, 2003). Prvotni namen LAI je opis rastlinskih krošenj, posredno pa se podatki o LAI uporabljajo tudi kot kazalniki dinamike rasti vegetacije in sezonskih obdobij rasti (Qiao in sod., 2019). Uporaba podatkov indeksa listne površine je bila v nalogi usmerjena predvsem v določitev mejnikov med posameznimi fenološkimi fazami, natančneje med obdobjem vegetacije in obdobjem mirovanja. Podatke LAI smo pridobili na dva načina, in sicer smo v dvoletnem obravnavanem obdobju izvajali lastne meritve, uporabili pa smo še drugo posredno metodo določanja LAI, tj. analizo satelitskih posnetkov.

Meritve indeksa listne površine (LAI) smo izvajali na približno 100-metrski razdalji ob vodotoku (slika 9, levo) Kuzlovec v povprečju enkrat na mesec, v obdobju prehodov fenoloških faz pa pogosteje (v času spomladanskega olistanja in v času jesenskega rumenenja listov ter odpadanja listov in iglic). Uporabljali smo napravo LAI-2200C, ki LAI določi s posredno, brezkontaktno metodo na podlagi meritev sevanja nad in pod krošnjami. Lokacije meritev so bile stalne, določene in označene ob prvem merjenju (slika 9, desno).



Slika 9: Lokacije merskih mest indeksa listne površine (levo), kjer je z rdečo barvo označena lokacija referenčnih meritev na odprtem, z modro pa lokacije v gozdu. Označena lokacija meritve v gozdu (desno).

Figure 9: Locations of leaf area index measurements (left), where red markers represent the location of reference measurements in the open while the blue markers represent measurement locations in the forest. A marked measurement location in the forest (right).

### 3.3 Analiza merjenih spremenljivk

Za analizo merjenih spremenljivk smo uporabili različne metode, s katerimi smo poskušali opredeliti vpliv hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivk (preglednica 6) na količine in dinamiko iznesenega nitratnega dušika s porečja Kuzlovca.

Za merjene vrednosti spremenljivk, uporabljenih v analizah, smo izračunali povprečne vrednosti in standardne odklone, katerih zapis je podan kot *povprečna vrednost ( $\pm$  standardni odklon)*, poleg tega pa smo za vsak vzorec poiskali še najmanjšo in najvišjo vrednost, izračunali medkvartilni razpon (razlika med tretjim in prvim kvartilom), mediano in koeficient variacije (CV). Koeficient variacije je definiran kot razmerje med standardnim odklonom in povprečno vrednostjo vzorca.

Preglednica 6: Seznam spremenljivk z oznakami, uporabljenih v analizi podatkov

Table 6: List of variables with abbreviations used in the data analysis

Spremenljivka [enota]	Oznaka
Trajanje padavin [min]	Tp
Količina padavin [mm]	Kp
Srednja intenziteta padavin [mm/h]	Isr
Maksimalna 1-urna intenziteta padavin [mm/h]	I60
Energija padavinskega dogodka (Brown in Foster, 1986) [MJ/(ha mm)]	E
Indeks erozivnosti padavinskega dogodka [MJ mm/(ha h)]	EI60
Začetni pretok [l/s]	Qz
Razpon pretoka [l/s]	Qr
Število dni pred dogodkom brez padavin, višjih od 10 mm [dnevi]	N_dni
Kumulativna tridnevna evapotranspiracija [mm]	ET3
Indeks listne površine [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	LAI
Relativna sprememba koncentracije NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	C_rs
Maksimalna koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Cmax
Srednja koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Csr
Razpon koncentracije (Cmax-Ci) [mg/l]	Cr
Povprečni iznos NO <sub>3</sub> -N v časovni enoti [g]	Iznos_N
Najvišji iznos NO <sub>3</sub> -N v 20-minutnem časovnem koraku [g]	Iznos_max

#### 3.3.1 Določitev režimov iznosa nitratnega dušika s porečja

Za razumevanje in posledično boljše napovedovanje odzivov porečja z vidika sproščanja in zadrževanja hranil in drugih v vodi topnih snovi sta ovrednotenje in opredelitev režimov iznosa hranil s porečja ključnega pomena (Musolff in sod., 2015). V literaturi lahko zasledimo različne načine določitve režimov iznosa z uporabo podatkov o časovni spremenljivosti koncentracij/iznosa topila (npr. NO<sub>3</sub>-N) in pretoka. Godsey in sod. (2009) so uporabili metodo določitve naklona premice, ki se najbolj prilaga

parom točk logaritmov koncentracij in logaritmov pretokov (naklon  $\log C - \log Q$ ). Thompson in sod. (2011) so izračunali razmerje med koeficientoma variacije koncentracij in pretokov ( $CV_C/CV_Q$ ) in tako določili spremenljivost koncentracij relativno na pretok. Koenig in sod. (2017) so v svoji raziskavi poleg naklona  $\log C - \log Q$  uporabili še metodo relativne spremembe koncentracije ( $C_{rs}$ ) za posamezni dogodek, ki so jo predlagali Butturini in sod. (2006). V osnovi lahko opredelimo tri splošne režime iznosa (npr. Bierozza in sod., 2018):

- režim spiranja (angl. *flushing*), za katerega je značilna pozitivna zveza med časovno spremenljivostjo koncentracij/iznosa in pretokom,
- režim redčenja (angl. *dilution*), za katerega je značilna negativna zveza med časovno spremenljivostjo koncentracij/iznosa in pretokom, in
- kemostatični režim (angl. *chemostatic*), za katerega je značilno, da se koncentracija/iznos s pretokom ne spreminjata.

V nalogi smo režime iznosa nitratnega dušika določili z metodo naklona regresijske premice parom točk  $\log C - \log Q$ , izračunom  $CV_C/CV_Q$ , njuno kombinacijo in relativno spremembo koncentracije pri posameznem dogodku. V nadaljevanju so metode podrobneje opisane.

Za grafe odvisnosti koncentracije ( $C$ ) od pretoka ( $Q$ ) v logaritmskem merilu večinoma velja linearni potek, kar kaže na zvezo med spremenljivkama v obliki potenčne funkcije:

$$C = a \cdot Q^b, \quad (2)$$

kjer sta  $a$  in  $b$  konstanti. Eksponent  $b$  v logaritmskem merilu predstavlja naklon premice, ki se prilega parom točk  $C$  in  $Q$  ter je fizikalno razločljiv. Če je  $b$  enak 0, potem govorimo o kemostatičnem režimu porečja, kar pomeni, da koncentracije kljub spremembi pretoka ostajajo konstantne. Vrednost  $b > 0$  kaže na spiranje snovi s porečja, saj se s povečevanjem pretoka zvišuje tudi koncentracija snovi. Na drugi strani pa  $b < 0$  kaže na redčenje oziroma zadrževanje snovi na porečju, saj se s povečevanjem pretoka koncentracija snovi zmanjšuje (Godsey in sod., 2009). Vrednost naklona  $b$  smo določili za vsak dogodek posebej, na podlagi česar lahko sklepamo o spremenljivosti režimov iznosa po dogodkih in/ali sezonah.

Zvezo med spremenljivkama  $C$  in  $Q$  v enačbi 2 lahko zapišemo tudi v obliki:

$$\ln C = \ln a + b \cdot \ln Q + \gamma \ln W, \quad (3)$$

kjer  $W$  predstavlja slučajno napako za pretoke različne od 0 in  $\gamma$  je konstanta.

Musolff in sod. (2015) so zgornjo enačbo razčlenili in skladno s postopkom, opisanim v Jawitz in Mitchell (2011), definirali srednjo vrednost ( $\mu_c$ ) in standardno deviacijo ( $\sigma_c$ ) koncentracije. Thompson in sod. (2011) so predlagali uporabo kazalnika, ki upošteva velikost sprememb koncentracij in pretoka, tj. razmerje  $CV_C/CV_Q$  (enačba 4). Koeficient variacije je definiran kot razmerje med standardnim odklonom in srednjo vrednostjo.

$$\frac{CV_C}{CV_Q} = \frac{\mu_Q \sigma_C}{\mu_C \sigma_Q} \quad (4)$$

Thompson in sod. (2011) so se za novi kazalnik odločili na podlagi dejstva, da vrednost naklona  $b = 0$  predvsem pri majhnih spremembah koncentracij še ne dokazuje kemostatičnosti. Podobno je v primeru visokih vrednosti  $\gamma$ , ko je tudi v primeru  $b = 0$ , spremenljivost koncentracij visoka, česar ne moremo opredeliti kot kemostatični režim. Posledično so Musolff in sod. (2015) v študiji iznosov za nemška porečja upoštevali oba kazalnika hkrati, tj.  $CV_C/CV_Q$  in  $b$ .

Tretji kazalnik, na podlagi katerega smo določili režime iznosa nitratnega dušika, je z izračunom relativne spremembe koncentracije za posamezen dogodek. Uporabili smo metodo, ki so jo predlagali Butturini in sod. (2006):

$$C_{rs} = 100 \cdot \frac{(C_{peak} - C_b)}{C_{max}}, \quad (5)$$

kjer je  $C_{peak}$  koncentracija pri maksimalnem pretoku,  $C_{max}$  je maksimalna koncentracija in  $C_b$  koncentracija pri baznem odtoku posameznega dogodka. Vrednost koncentracije  $C_b$  smo določili kot vrednost koncentracije na začetku dogodka. Kazalnik  $C_{rs}$  lahko doseže vrednosti med  $-100$  in  $100$ , pri čemer negativne vrednosti kažejo na režim redčenja oziroma zadrževanja nitratnega dušika na porečju, pozitivne vrednosti kažejo na režim spiranja in vrednosti okoli  $0$  kažejo na kemostatični režim iznosa.

### 3.3.2 Časovna povezanost hidrometeoroloških procesov in procesov spiranja nitratnega dušika

Padavinski dogodki vplivajo na spremembe koncentracij nitratnega dušika v vodotoku neposredno in posredno (Ockerman in Livingston, 1999). Neposredni vpliv predstavlja določena količina  $\text{NO}_3\text{-N}$ , ki ga vsebujejo padavine, posredno pa padavine predstavljajo transportni medij in hidrološki gonilnik, s katerim se dodatne količine  $\text{NO}_3\text{-N}$  prenesejo v vodotok iz drugih virov na porečju (npr. talni horizonti, odpadlo listje). Uveljavljenih je več različnih metod za opredelitev vzrokov in kontrolnih mehanizmov

sprememb koncentracij v vodotoku, ki temeljijo na analizi povezav med koncentracijami in pretoki (povezava C-Q).

V nadaljevanju je predstavljena metoda določitve časov zakasnitve posameznih opazovanih spremenljivk, s katerimi neposredno ali posredno spremljamo hidrometeorološke in biogeokemične procese na porečju. Poleg zgoraj omenjenih padavin in pretoka smo čase zakasnitve izračunali še za volumetrično vsebnost vode v tleh ( $m^3/m^3$ ) v treh globinah in količino iznesenega  $NO_3-N$ , za posamezni 20-minutni časovni korak, določeno kot:

$$m_{NO_3-N} [g] = \frac{c \left[ \frac{mg}{l} \right] \cdot Q \left[ \frac{l}{s} \right] \cdot 20 [min] \cdot 60 \left[ \frac{s}{min} \right]}{1000 \left[ \frac{mg}{g} \right]} \quad (6)$$

Za izračun posameznih časov zakasnitve smo uporabili metodo, ki so jo predstavili Banasik in sod. (2005) v študiji povezav časov zakasnitve padavin, odtoka in iznosa sedimentov na majhnih porečjih. Čas zakasnitve ( $LAG_X$ ) posamezne spremenljivke je določen kot razlika med centroidom diagrama posamezne spremenljivke ( $M_X$ ) in centroidom histograma padavin ( $M_P$ ):

$$LAG_Q = M_Q - M_P \quad (7)$$

$$LAG_N = M_N - M_P \quad (8)$$

$$LAG_{SM15} = M_{SM15} - M_P \quad (9)$$

$$LAG_{SM40} = M_{SM40} - M_P \quad (10)$$

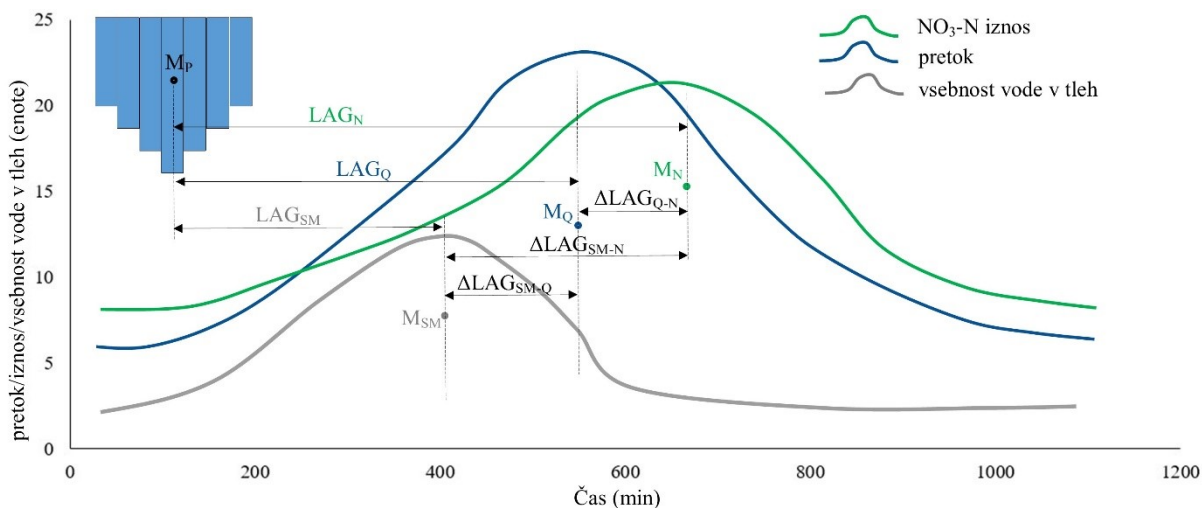
$$LAG_{SM70} = M_{SM70} - M_P \quad (11)$$

V enačbah 7–11 indeks Q predstavlja pretok, indeks N količino iznesenega nitratnega dušika, SM15, SM40 in SM70 pa volumetrično vsebnost vode v tleh v globinah 15, 40 in 70 cm. Centroidi posameznih časovno odvisnih diagramov spremenljivk so izračunani po splošni enačbi:

$$M_X = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (12)$$

kjer  $Y_i$  predstavlja količino padavin, količino iznesenega  $NO_3-N$ , pretok in volumetrično vsebnost vode v tleh v časovnih intervalih  $i = 1, 2, \dots, n$ . Parameter  $t$  predstavlja čas od začetka dogodka do polovice

$i$ -te periode. V primeru 20-minutnih podatkov so vrednosti  $t = 10, 30, 50, \dots (n \cdot 20 - 10)$ . Shematsko so posamezni časi zakasnitve prikazani na sliki 10.



Slika 10: Shematski prikaz metode določitve časov zakasnitve posameznih spremenljivk (Sapač in sod., 2020)

Figure 10: Schematic representation of the method for determining lag times of individual variables (Sapač et al., 2020)

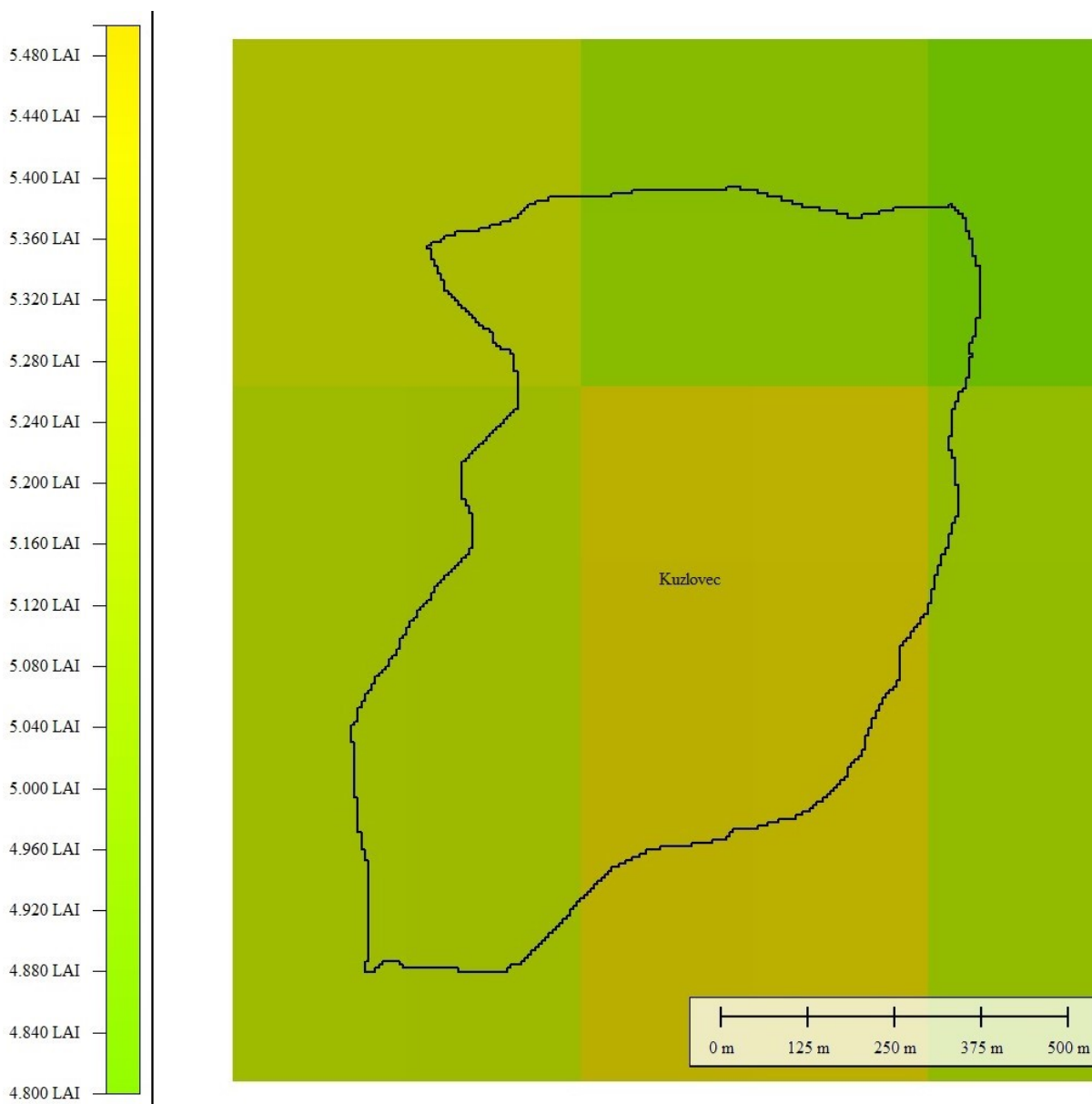
### 3.3.3 Določitev obdobja sezonske vegetacijske dinamike

Za določitev obdobja sezonske spremenljivosti vegetacije smo uporabili podatke o meritvah indeksa listne površine (LAI). Meritve LAI smo sporadično izvajali tekom obravnavanega dvoletnega obdobja s posredno, brezkontaktno metodo na podlagi sevanja nad in pod krošnjami dreves.

Za določitev splošne ali povprečne letne spremenljivosti vegetacije (fenologije) na območju porečja Kuzlovec smo uporabili tudi podatke daljinskega zaznavanja. Od Gozdarskega inštituta Slovenije smo pridobili rastrske podatke indeksov listne površine za območje gozdnogospodarske enote Polhov Gradec. Gozdarski inštitut Slovenije je namreč za namen ocene poškodovanosti drevja po žledolomu leta 2014 izdelal spletni pregledovalnik VegX (Čotar in sod., 2018; Ogris in sod., 2018), ki prikazuje štiri vrste vegetacijskih indeksov: NDVI (angl. *normalized difference vegetation index*), EVI (angl. *enhanced vegetation index*), LAI in FAPAR (angl. *fraction of absorbed photosynthetically active radiation*). Indekse so izračunali na podlagi multispektralnih posnetkov MODIS (angl. *moderate resolution imaging spectroradiometer*), ki jih zajemata instrumenta na Nasinih satelitih Terra in Aqua. Instrumenta na satelitih posnameta celotno površino Zemlje v enem do dveh dnevih. Produkti na podlagi več dnevni opazovanj so različne prostorske in časovne ločljivosti. Prostorska ločljivost indeksov NDVI in EVI znaša 250 m, časovna ločljivost pa 16 dni, medtem ko je prostorska ločljivost indeksov FAPAR in LAI nekoliko slabša in znaša 1 km, časovna ločljivost pa boljša in znaša 4 dni (Ogris in sod.,



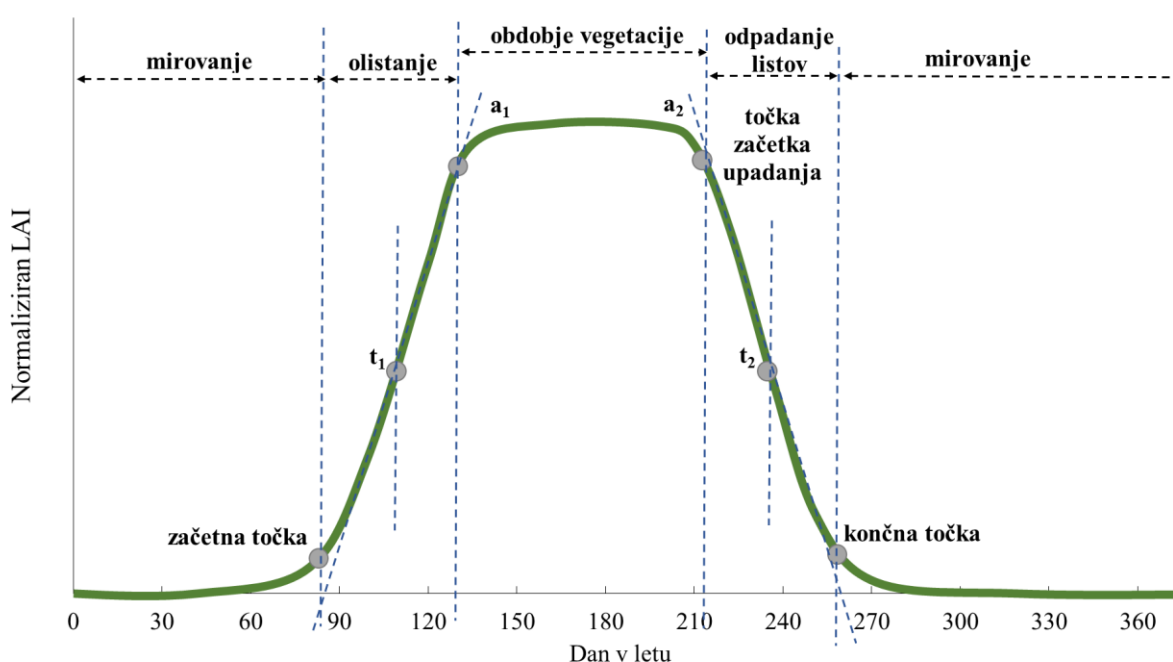
2016). Za vsake 4 dni izrednotenih LAI vrednosti gozdnogospodarske enote Polhov Gradec med 18. februarjem 2000 in 12. avgustom 2016 smo izločili samo vrednosti, ki se nanašajo na območje porečja Kuzlovec. Vrednosti LAI so podane v rastrski datoteki. Posamezna celica lahko zavzame vrednosti LAI med 0 in 10, medtem ko vrednost -2 izkazuje napako (slika 11). Za celotno porečje Kuzlovca smo izračunali povprečno vrednost LAI vseh celic, ki pokrivajo območje. Pri tem smo izločili vse tiste datoteke, pri katerih vsaj v eni celici ni bila pravilno izrednotena LAI vrednost (vrednost v celici -2). Iz začetnih 1298 rastrskih datotek smo za določitev dolgoletnih sprememb indeksa LAI v gozdu na porečju Kuzlovca obdržali 808 datotek, ki smo jih uporabili v nadaljnjih analizah.



Slika 11: Primer rastrskega prikaza vrednosti LAI na porečju vodotoka Kuzlovec, določenih na podlagi satelitskih posnetkov MODIS z dne 30. junija 2015

Figure 11: Example of raster data representation of LAI values in the Kuzlovec river catchment on 30 June 2015. LAI was determined based on the MODIS satellite images.

Za opredelitev letne dinamike gozda na porečju Kuzlovca smo izhajali iz metodologije, ki so jo predlagali Zhang in sod. (2003) in temelji na določitvi datumov prehoda iz ene fenološke faze v drugo: 1) ozelenitev, s katero se začne fotosintetska aktivnost, 2) zrelost, ko je površina zelenih listov največja, 3) staranje, s katerim začne fotosintetska aktivnost upadati in 4) mirovanje, ko je fiziološka aktivnost vegetacije skoraj nična. Z razdelitvijo letnega cikla na štiri obdobja smo v osnovi želeli preveriti razlike med odzivom porečja z vidika iznosa nitratnega dušika s porečja, vendar smo zaradi relativne majhnosti vzorca 43 padavinskih dogodkov cikla razdelili samo na dve obdobji, in sicer na obdobje vegetacije, ki po Zhang in sod. (2003) in Wang in sod. (2017) obsega čas od začetka olistanja in obdobje vegetacije, in na obdobje mirovanja, ki obsega čas od začetka odpadanja listov in mirovanje vegetacije (slika 12).



Slika 12: Razdelitev letne dinamike vegetacije v štiri fenološke faze: mirovanje, olistanje, obdobje vegetacije in odpadanje listov s karakterističnimi točkami (prirejeno po Wang in sod. (2017) in Caglar in sod. (2018))

Figure 12: Determination of phenological phases based on the annual vegetation dynamics: dormancy, greenup, maturity, and senescence with characteristic points (adapted from Wang et al. (2017) and Caglar et al. (2018))

Slika 12 prikazuje, kako lahko sezonsko dinamiko vegetacije opišemo z dvojno sigmoidno krivuljo, ki vsebuje vsaj šest parametrov, dve vmesni točki (angl. *midpoint*), dva parametra naklona krivulje, najvišjo vrednost in začetno (oziroma končno vrednost). Za iskanje prilegajoče krivulje podatkom LAI na podlagi satelitskih posnetkov in izris smo uporabili programsko orodje R in paketa *sicegar* in *phenology*. Postopek prilegajoče funkcije poteka na normaliziranih podatkih, kar pomeni, da vrednostim LAI pripišemo vrednosti od 0 do 1, pri čemer vrednost 0 pričakujemo v obdobju mirovanja in predstavlja najmanjšo vrednost LAI, vrednost 1 pa pričakujemo v obdobju vegetacije in predstavlja najvišjo vrednost LAI. Dvojna sigmoidna funkcija je nato definirana kot kombinacija dveh ločenih sigmoidnih

funkcij. Kombinirana funkcija se začne pri 0 in narašča do maksimalne vrednosti v času  $t^*$  in nato začne upadati do končne vrednosti, ki je v primeru sezonske dinamike LAI enaka začetni, tj. 0. Funkcija je tako razdeljena na dva dela (Caglar in sod., 2018).

Rezultat modela iskanja prilegajoče funkcije je 70 vrednosti, ki obsegajo zgoraj opisane in druge parametre (npr. maksimalna vrednost, minimalna vrednost), med drugim pa tudi iskani vrednosti mejnikov med obdobjem vegetacije in obdobjem mirovanja, poimenovani kot začetna točka (angl. *start point*) in točka začetka upadanja (angl. *start decline point*). Rezultata sta podana kot zaporedni dan v letu.

### 3.3.4 Razvrščanje enot v skupine

Metoda razvrščanja enot v skupine ali gruče (angl. *cluster analysis*) spada med multivariatne analize, s katero želimo posamezne enote razvrstiti v skupine tako, da so si znotraj gruče enote čim bolj podobne, gledano med gručami pa so si enote čim bolj različne (Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Pri tem lahko posamezna enota zavzame mesto v samo eni gruči. Razvite so bile številne metode razvrščanja, ki jih lahko uvrstimo v dve večji skupini: optimizacijske ali nehierarhične in hierarhične metode združevanja. Glavna razlika med obema skupinama metod je v tem, da pri hierarhičnih metodah število skupin ni vnaprej določeno oziroma znano in se gruče/skupine oblikujejo od največjega možnega do izbranega števila, pri nehierarhičnih oziroma optimizacijskih metodah pa vnaprej določimo število gruč, v katere nato razvrščamo posamezne enote (Jesenko in Jesenko, 2007). Podatke pred postopkom razvrščanja standardiziramo, kar pomeni, da je povprečna vrednost enaka 0, standardna deviacija preoblikovanih podatkov pa je enaka 1.

V doktorski disertaciji smo v nadaljevanju predstavljeni metodi razvrščanja uporabili za ugotavljanje podobnosti oziroma razlik med posameznimi dogodki na podlagi hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivk. Dodatno smo preverili, ali oblikovane gruče nakazujejo na sezonsko podobnost dogodkov.

V disertaciji želimo z metodama razvrščanja razvrstiti 43 padavinskih dogodkov, opisanih z naborom vseh spremenljivk (padavine, hidrološke razmere, razmere sprememb koncentracij in iznosov  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodki, vegetacijske lastnosti), v ustrezno oziroma optimalno število gruč z namenom ugotovitve podobnosti oziroma različnosti dogodkov. Pri razvrščanju smo uporabili nekategorizirane podatke, torej številne vrednosti spremenljivk. Za postopka razvrščanja smo uporabili programsko orodje *R* (R Core Team, 2018) in paketa *cluster* (Maechler in sod., 2019) ter *factoextra* (Kassambara in Mundt, 2020).

### 3.3.4.1 Hierarhično razvrščanje

Pri hierarhičnem razvrščanju, kjer število gruč ni vnaprej definirano, se oblikovanje gruč začne tako, da na začetku vsaka enota, ki jo želimo razvrstiti v gručo, predstavlja svojo gručo. Na podlagi matrike razdalj med vsemi enotami v prvem koraku poiščemo med seboj najbližji enoti in ju združimo v gručo. Matrika razdalj med enotami se ponovno preračuna in nadomesti prvotno matriko. Nato ponavljamo korak iskanja najmanjše razdalje med enotama (najmanjše razlike med enotama), dokler vseh enot ne razvrstimo v gruče (Jesenko in Jesenko, 2007; Kassambara, 2017a; Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Načinov, kako določiti razdaljo (različnost) med enotami oziroma gručami, je več (npr. minimalna metoda, maksimalna metoda, metoda težišč, povprečna metoda, Wardova metoda). Wardova metoda je ena najpogosteje uporabljenih, zanjo pa je značilno, da se enote razvrstijo v gruče tako, da je variabilnost gruč med seboj primerljiva oziroma so enote znotraj gruče čim bolj homogene, odklon za posamezno skupino pa je določen kot vsota kvadriranih odklonov od povprečja te skupine (Jesenko in Jesenko, 2007; Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Wardovo metodo dopolnjuje optimizacijska metoda voditeljev, in sicer Wardova metoda služi za določitev smiselnega števila gruč, ki je pogoj za izvedbo razvrščanja z metodo voditeljev. Število gruč na podlagi Wardove metode določimo na podlagi dendrograma, ki je grafični prikaz rezultatov hierarhičnega razvrščanja. Navadno »optimalno« število gruč določa največji skok na skali razdalj, kjer dendrogram navidezno odrežemo in odčitamo posamezni gruči pripadajoče enote.

### 3.3.4.2 Metoda voditeljev

Optimizacijska metoda razvrščanja enot v skupine po metodi voditeljev (angl. *k-means*) spada med najpogosteje uporabljane metode razvrščanja (Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Postopek razvrščanja s to metodo lahko opišemo s petimi glavnimi koraki (Witten in sod., 2011; Zaki in Wagner, 2014):

- 1) Določimo število gruč (parameter  $k$ ), v katere želimo razvrstiti enote (v našem primeru padavinske dogodke). Število gruč določimo na podlagi rezultatov hierarhičnega razvrščanja.
- 2) Naključno se določijo centri  $k$  točk, ki določajo težišče gruč (začetni voditelji).
- 3) Vse enote se pripišejo najbližjemu od  $k$  težišč po načelu evklidske razdalje.
- 4) Izračuna se novo težišče oziroma sredina gruče (iz tega tudi izhaja angleška različica imena »*k-mean*«), ki postane novi voditelj skupine. Težišče  $k$  gruče je vektor dolžine  $p$  (število spremenljivk), ki vsebuje aritmetične sredine vseh spremenljivk v  $k$  gruči.
- 5) Postopek pod točkama 4 in 5 se ponavlja, dokler ne pride do stabilizacije oziroma dokler v več zaporednih ponovitvah niso iste enote pripisane isti  $k$  gruči – voditelji se ne spreminjajo več.

Za niz podatkov, ki vsebuje  $n$  točk (dogodkov) v  $d$ -dimenzionalnem prostoru ( $d$  spremenljivk)  $\mathbf{D} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^n$  z določenim številom gruč  $k$ , je cilj razvrščanja, da ga razvrstimo v  $k$  gruč, ki jih označimo kot  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ . Za vsako gručo  $C_i$  obstaja reprezentativna točka, ki povzame skupino oziroma gručo, tj. težišče oziroma sredina vseh točk v gruči  $\boldsymbol{\mu}_i$ :

$$\boldsymbol{\mu}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{\mathbf{x}_j \in C_i} \mathbf{x}_j, \quad (13)$$

kjer je  $n_i = |C_i|$  število točk v posamezni gruči  $C_i$ . Vsako enoto (točko ali v našem primeru dogodek) lahko pripišemo eni od  $k$  gruč, posledično obstaja  $k^n$  možnosti razvrstitev. Uspešnost oziroma ocena kakovosti razvrščanja v gručo se določi na podlagi kriterijske funkcije, in sicer je v primeru metode voditeljev določena kot vsota kvadratov napak  $SSE$ , definirana kot (Zaki in Wagner, 2014):

$$SSE(C) = \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{x}_j \in C_i} \|\mathbf{x}_j - \boldsymbol{\mu}_i\|^2 \quad (14)$$

Cilj razvrščanja po metodi voditeljev je doseči čim manjšo vrednost kriterijske funkcije  $SSE$ , tj. minimizirati objektno funkcijo, ki predstavlja vsoto kvadratov razdalj med elementi v posameznih gručah.

Optimalno število gruč smo določili na podlagi dendrograma, dobljenega pri predhodnem hierarhičnem razvrščanju.

### 3.3.5 Analiza glavnih komponent (PCA)

Analiza glavnih komponent (angl. *principal component analysis*, PCA) je statistična metoda, pri kateri  $K$  spremenljivk z ortonormalno linearno transformacijo preslikamo v nov koordinatni sistem  $J \leq K$  nekoreliranih spremenljivk, tj. glavnih komponent (PC), ki so razvrščene po velikosti glede na odstotek variance, ki jo pojasnijo, potem ko se začetne  $J$  spremenljivke projicirajo v njih (Jolliffe, 2002). Glavni cilj analize glavnih komponent je torej zmanjšanje števila (merjenih) spremenljivk na nekaj najpomembnejših, določenih na podlagi glavnih komponent, ki jih lahko nato nadalje uporabljamo pri drugih metodah, kot je na primer regresijska analiza (Jesenko in Jesenko, 2007; Zabret, 2018). Število glavnih komponent sovпада s številom spremenljivk in zanje velja, da so med seboj neodvisne, ne glede na to, da so osnovne spremenljivke lahko med seboj korelirane. Visoka (nizka) korelacija med osnovnimi spremenljivkami pa se lahko odrazi na rezultatih PCA. Pri visokih korelacijah spremenljivk se to odrazi kot nekaj velikih lastnih vrednosti, pri nizkih korelacijah spremenljivk pa so lastne vrednosti glavnih komponent med seboj približno enake (Jesenko in Jesenko, 2007). Postopek zmanjšanja razsežnosti s PCA lahko razdelimo na pet glavnih korakov:

- 1) standardizacija podatkov,
- 2) izračun kovariančne matrike,

- 3) izračun lastnih vektorjev in lastnih vrednosti,
- 4) izračun glavnih komponent in
- 5) zmanjšanje razsežnosti podatkovnega niza.

S standardizacijo podatkov (povprečje 0 in standardna deviacija 1) zagotovimo enakovrednost spremenljivk v PCA, saj velja, da na določitev glavnih komponent najbolj vpliva spremenljivka z največjo varianco. Standardizacija je še posebej priporočljiva v primerih, ko imajo spremenljivke različne merske enote oziroma če so vrednosti spremenljivk različnih velikostnih razredov (Košmelj, 2007).

Pri analizi glavnih komponent želimo za  $p$  spremenljivk  $X_1, X_2, \dots, X_K$ , ki jih v matriko  $\mathbf{X}$  zapišemo kot  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ , najti novo množico spremenljivk  $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$ , ki jih lahko zapišemo kot linearno kombinacijo osnovnih spremenljivk (Košmelj, 2007):

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1K}X_K = \mathbf{X}\mathbf{a}_1 \\
 Y_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2K}X_K = \mathbf{X}\mathbf{a}_2 \\
 &\dots \\
 Y_K &= a_{K1}X_1 + a_{K2}X_2 + \dots + a_{Kp}X_p = \mathbf{X}\mathbf{a}_p.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Nadalje velja:

$$\text{Var}(Y_i) = \text{Var}(\mathbf{X}\mathbf{a}_i) = \mathbf{a}_i^T \Sigma \mathbf{a}_i, \text{Cov}(Y_i, Y_k) = \mathbf{a}_i^T \Sigma \mathbf{a}_k,
 \tag{16}$$

kjer je  $\Sigma$  variančno-kovariančna matrika osnovnih spremenljivk,  $\mathbf{a}_i$  pa lastni vektorji kovariančne matrike. Prva glavna komponenta ( $Y_1 = \mathbf{X}\mathbf{a}_1$ ) se nato določi z linearno kombinacijo osnovnih spremenljivk, da je varianca največja in z dodatnim pogojem za enoličnost rešitve  $\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 = 1$ . Druga glavna komponenta ( $Y_2 = \mathbf{X}\mathbf{a}_2$ ) pojasni drugo najvišjo varianco in je pravokotna na prvo glavno komponento. Pri tem velja dodatni pogoj  $\mathbf{a}_2^T \mathbf{a}_2 = 1$ . Postopek se ponavlja do  $p$ -te komponente (Košmelj, 2007). Varianca glavnih komponent je enaka lastnim vrednostim pripadajočih komponent. Če smo podatke standardizirali, potem se glavne komponente dejansko določijo na podlagi korelacijske matrike (Jesenko in Jesenko, 2007). Interpretacija lastnih vektorjev je enaka kot pri koeficientih multiple regresije. Posamezni vektor  $\mathbf{a}_{ij}$  predstavlja vpliv spremenljivke  $X_j$  na glavno komponento  $Y_i$  ob hkratnem upoštevanju ostalih spremenljivk (Košmelj, 2007).

Analizo PCA smo izvedli na podatkovnem nizu padavinskih dogodkov, ki smo jih opisali s hidrometeorološkimi in vegetacijskimi spremenljivkami. Uporabili smo programsko orodje R (R Core Team, 2018), kjer smo uporabili paket *FactoMineR* (Le in sod., 2008).

### 3.3.6 Multipla linearna regresija (MLR)

Procesi iznosa dušika s porečja so posledica številnih dejavnikov. Ena najstarejših statističnih metod, ki se pogosto uporablja za razumevanje povezav oziroma napovedovanje prediktorske oziroma odvisne spremenljivke (angl. *predictor variable*) z več pojasnjevalnimi spremenljivkami oziroma neodvisnimi spremenljivkami (angl. *explanatory variables*) je multipla linearna regresija (angl. *multiple linear regression*, MLR). Zasnova metode temelji na običajni metodi najmanjših kvadratov, vendar s to razliko, da pri običajni metodi najmanjših kvadratov upoštevamo samo po eno odvisno in neodvisno spremenljivko, pri MLR pa je neodvisnih spremenljivk več. Splošno enačbo za multiplo linearno regresijo lahko zapišemo kot:

$$y_i = a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_px_{ip} + \varepsilon, \quad (17)$$

kjer  $i$  predstavlja število opazovanj (npr. padavinskih dogodkov),  $y_i$  je spremenljivka, ki jo napovedujemo,  $x_i$  so pojasnjevalne spremenljivke (npr. količina padavin, trajanje dogodka),  $a_0$  je presečišče z y-osjo oziroma pričakovana vrednost spremenljivke  $y_i$ , če vse pojasnjevalne spremenljivke dosežejo vrednost nič,  $a_p$  koeficient naklona za vsako posamezno pojasnjevalno spremenljivko ob upoštevanju ostalih v modelu,  $\varepsilon$  pa oznaka za napako modela.

Metodo multiple linearne regresije smo uporabili po izvedeni metodi PCA na vseh spremenljivkah za opis hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivk, kjer smo skušali na podlagi izkazanih najpomembnejših glavnih komponent preveriti, kolikšen delež variance sprememb koncentracij oziroma iznosov nitratnega dušika lahko pojasnimo. Ker je s hidrološkega vidika delež nemerjenih porečij (kar pomeni, da ne razpolagamo s podatkom o pretokih in ostalih hidroloških podatkih) nekaj velikostnih razredov večji od tistega, kjer imamo podatek o pretoku (Blöschl, 2006), smo metodo MLR uporabili še za preverjanje količine pojasnjene variance v iznosih in koncentracijah  $\text{NO}_3\text{-N}$ , in to samo na podlagi padavinskih podatkov, ki so lažje prenosljivi z bližnjih območij na območja, kjer je meritev malo, imajo pomanjkljivosti ali jih sploh ni, in sicer z uporabo ustreznih metod, kot so npr. Thiessenovi poligoni.

#### 3.3.6.1 Diagnostika linearnih regresijskih modelov

Ko je postopek določanja ocen parametrov modela na podlagi podatkov zaključen, nastopi faza diagnostike linearnega regresijskega modela, s katero preverimo, ali so predpostavke linearnega modela izpolnjene. Diagnostika modelov pa ni nujni del samo linearnih regresijskih modelov, temveč modelov na splošno. Če pogledamo z vidika hidroloških modelov, ki so pomembni z vidikov varovanja pred poplavami in sušo, načrtovanje infrastrukture za oskrbo s pitno vodo in namakanje kmetijskih površin,

je ključno, da so ti modeli relevantni. Zato je treba preveriti, ali se v množici podatkov, na podlagi katerih so ocenjeni parametri modela, ne nahajajo posamezni podatki, ki bi lahko pomembno vplivali na vrednost neodvisne spremenljivke (t. i. vplivne točke), kar z drugimi besedami pomeni, da model validiramo.

Pri linearnih regresijskih modelih preverjamo naslednje predpostavke: 1) med odvisno in neodvisno spremenljivko mora biti odražena linearna zveza, 2) varianca napak je konstantna (homoskedatičnost), kar pomeni, da so ostanki slučajno razporejeni okoli vrednosti nič, 3) napake so normalno porazdeljene in 4) napake med seboj niso odvisne (Kassambara, 2018). Izhajajoč iz omenjenih predpostavk je za diagnostiko modela pomembno analizirati ostanke. Poleg tega smo v nalogi preverili prisotnost t. i. posebnih točk, za katere je značilno, da se na neki način razlikujejo od ostalih točk, lahko pa tudi bistveno vplivajo na rezultate modela. Osredotočili smo se na določitev morebitnih regresijskih osamelcev (angl. *outliers*), vzvodnih točk (angl. *leverage points*) in vplivnih točk (angl. *influential points*), katerih vpliv na model in modelske rezultate podajamo v nadaljevanju.

Za točke, pri katerih vrednost izmerjene vrednosti neodvisne spremenljivke močno odstopa od z modelom napovedane vrednosti (imajo velik ostanek), pravimo, da so regresijski osamelci. V praksi se za določanje regresijskih osamelcev uporabljajo standardizirane mere ostankov, imenovani studentizirani ostanki, ki jih dobimo tako, da ostanek delimo s pripadajočim standardnim odklonom. Velja pravilo, da dogodki, pri katerih je studentizirani ostanek večji kot 3, predstavlja regresijski osamelec (James in sod., 2017). V tem primeru si za identifikacijo regresijskih osamelcev pomagamo z grafičnimi prikazi ostankov, npr. s programskim orodjem R in paketom *car* (Fox in Weisberg, 2019). Drugi način za identifikacijo regresijskih osamelcev je z modeliranjem, kjer za vsak dogodek (točko) posebej preverimo, ali je regresijski osamelec. To lahko storimo na dva načina. Pri prvem načinu postopek linearnega modela ponovimo  $n$ -krat, pri čemer vsakič izpustimo po eno točko ( $i$ -ti dogodek) (angl. *case deletion model*). Pri drugem načinu pa (angl. *mean-shift outlier model*) vsako odvisno spremenljivko  $y_i$  izrazimo z linearno kombinacijo neodvisnih spremenljivk, ki pa jim dodamo še eno umetno spremenljivko  $d_i$ , ki ima vrednost nič za vse ostale točke razen  $i$ -te točke, kjer je njena vrednost ena. Cel člen dodane spremenljivke v linearni kombinaciji zapišemo kot  $\gamma d_i$ . Preverjamo ničelno hipotezo, ki pravi, da  $i$ -ta točka ni regresijski osamelec, kar pomeni, da je vrednost  $\gamma$  v dodanem členu spremenljivke enaka nič. Z alternativno hipotezo trdimo, da je  $\gamma$  različna od nič, kar posledično pomeni premik presečišča z vertikalno osjo za vrednost  $\gamma$ . Skupno število testov je tudi pri tem načinu  $n$ , za vsak test pa izračunamo pripadajočo  $p$ -vrednost. Zaradi medsebojne odvisnosti testov je potrebna prilagoditev izračunanih  $p$ -vrednosti. Pogosto se uporabi kar postopek množenja izračunanih  $p$ -vrednosti s številom testov  $n$ , kar imenujemo Bonferronijev popravek (angl. *Bonferroni correction*)



(Everit in Skrondal, 2010). Za določitev regresijskih osamelcev po drugem opisanem načinu smo v programskem orodju R uporabili funkcijo *outlierTest* (Fox in Weisberg, 2019).

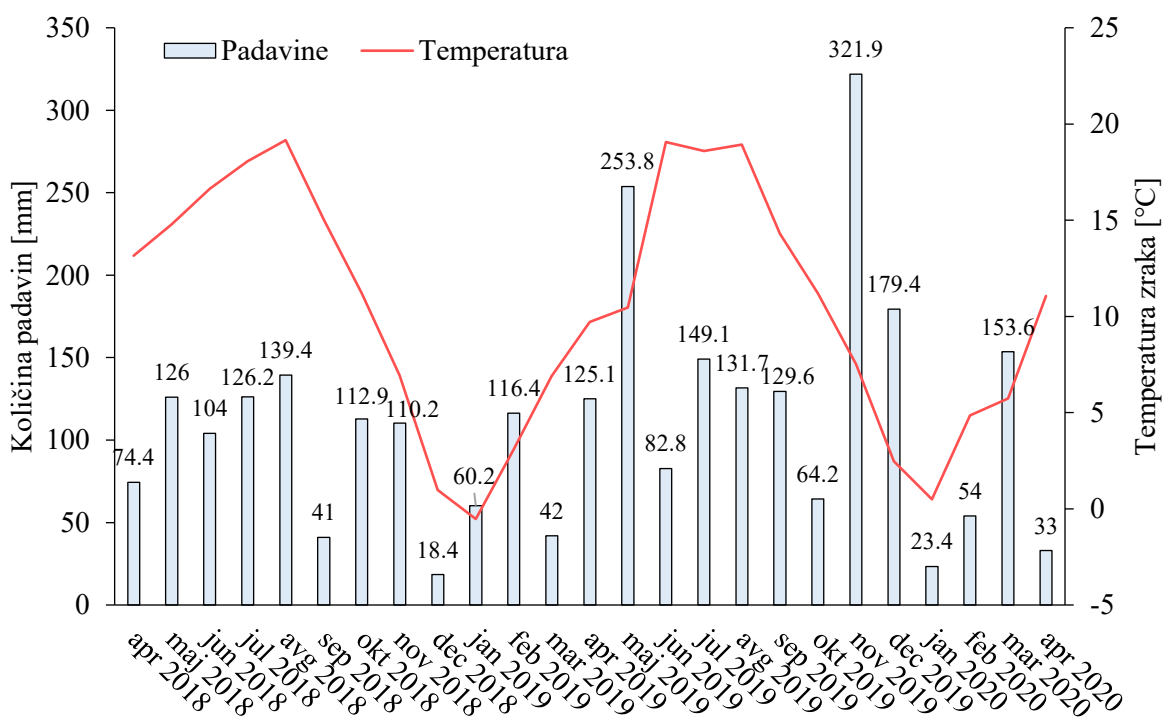
Vzvodne točke predstavljajo tiste dogodke, pri katerih ima ena ali več neodvisnih spremenljivk ekstremno vrednost (Everit in Skrondal, 2010), kar pomeni, da so gledano v smeri vodoravne osi daleč od ostalih točk in imajo velik vzvod. V praksi velja kriterij, da so vzvodne točke tiste, katerih vzvod je dvakrat ali trikrat večji od povprečnega vzvoda. Povprečni vzvod modela se izračuna kot  $(k+1)/n$ , pri čemer je  $k$  število neodvisnih spremenljivk, vključenih v model.

Vplivne točke so tiste točke, ki, če jih izključimo iz modela, bistveno spremenijo ocene parametrov oziroma vrednosti odvisne spremenljivke, ki jo napovedujemo. Eden od načinov, s katerim določamo vpliv posamezne točke, so Cookove razdalje, s katerimi se hkrati upoštevajo tako ostanki kot vzvodi (Kassambara, 2018). Večja sta vzvod in ostanek neke točke, večja je Cookova razdalja in posledično je večji vpliv te točke na ocene parametrov linearnega regresijskega modela. Najpogosteje se kot kriterij za vplivno točko upošteva Cookova razdalja, večja od 1 ali strožji kriterij, kjer je razdalja večja od 0,5.

## 4 REZULTATI

### 4.1 Padavine

Količina padavin, padlih v obdobju med aprilom 2018 in majem 2020, znaša 2.795 mm. Letna količina padavin v letu 2019 je znašala 1.656 mm, kar je primerljivo s predhodnimi ocenami (1.600–1.800 mm) drugih avtorjev (Bezak in sod., 2013). Največjo mesečno količino padavin smo zabeležili novembra 2019 (321,9 mm) in maja 2019 (253,8 mm), medtem ko smo najmanj padavin zabeležili decembra 2018 (18,4 mm) in januarja 2020 (23,4 mm) (slika 13). Povprečna mesečna količina padavin znaša 110 mm, vendar pa lahko predvsem v zimskih mesecih pričakujemo izrazito podpovprečne količine padavin. Poleg tega velja poudariti, da so bile snežne padavine v dvoletnem obdobju zanemarljive. Samodejna postaja ARSO Ljubljana-Bežigrad je snežne padavine zabeležila v 26 dnevih, v katerih je skupna višina snežne odeje znašala samo 13 cm, medtem ko je najvišja dnevna snežna odeja znašala 6 cm (januar 2019) (ARSO, 2020a). Na postaji Ljubljana-Bežigrad je v istem obdobju padlo 2.614 mm padavin.



Slika 13: Mesečne količine padavin na porečju Kuzlovca in povprečne mesečne temperature zraka v dveletnem obdobju meritev

Figure 13: Monthly precipitation data and average monthly air temperature in the Kuzlovce river catchment over the two-year measurement period

Temperaturni razpon v obravnavanem obdobju je znašal od -8,6 do 30,2 °C. Povprečna letna temperatura v letu 2019 je znašala 10,2 °C. Glede na obe leti meritev je bil najhladnejši mesec januar,

ko je bila povprečna mesečna temperatura okoli 0 °C, najvišje temperature pa so značilne za poletne mesece od junija do avgusta s povprečnimi mesečnimi vrednostmi okoli 19 °C (slika 13).

Padavinski dogodki lahko sprožijo relativno velik iznos hranil s porečja v primerjavi z razmerami v času baznega odtoka. V nalogi smo podrobneje obravnavali padavinske dogodke s količino 10 mm ali več. Enak kriterij so uporabili tudi Huebsch in sod. (2014), poleg tega pa so dnevne vrednosti evapotranspiracije v obdobju meritev le v nekaj dnevih presegle 6 mm (ARSO, 2020b). Začetek padavinskega dogodka smo določili s časom prve zabeležene količine padavin (prekucem), ločnico med dvema zaporednima dogodkoma pa smo opredelili s šesturnim obdobjem brez zabeleženih padavin. Za vsak padavinski dogodek smo izračunali karakteristične vrednosti, s katerimi opisujemo lastnosti padavinskih dogodkov in smo jih v nadaljevanju naloge uporabili pri analizah za testiranje hipotez ter v diskusiji rezultatov:

- trajanje padavin ( $Tp$ ),
- količina padavin ( $Kp$ ),
- srednja intenziteta padavin ( $Isr$ ),
- najvišja 60-minutna intenziteta padavin ( $I60$ ),
- kinetična energija padavin ( $E$ ) in
- indeks erozivnosti padavinskega dogodka ( $EI60$ ).

V dvoletnem obdobju meritev smo zabeležili 83 padavinskih dogodkov z več kot 10 mm padavin (priloga A, preglednica 7). Povprečno so se na mesec zgodili trije taki dogodki, največ (devet) smo jih zabeležili novembra 2019, najmanj (nobenega) pa marca 2019. Povprečni dogodek je trajal 946 ( $\pm 800,9$ ) min, pri čemer je najkrajši trajal samo 20 minut (8. julij 2018), ko je padlo 11,4 mm dežja. Za ta dogodek smo izračunali tudi najvišjo srednjo intenziteto padavin (34,2 mm/h). Najdaljši dogodek se je zgodil 30. maja 2019 (4880 min), ko je skupaj padlo 109,8 mm padavin. To je tudi dogodek z najvišjo zabeleženo kumulativno količino padavin. V povprečju so se daljši dogodki pogosteje zgodili v mesecih od oktobra do maja, medtem ko so krajši dogodki značilnejši za poletne mesece. Intenzivnejši dogodki z več kot 10 mm dežja so bili v povprečju bolj značilni za poletne mesece od junija do septembra, medtem ko za količine padavin med padavinskimi dogodki nismo zaznali sezonskih vzorcev.

Povprečna srednja intenziteta dogodka znaša 3,19 ( $\pm 4,6$ ) mm/h, mediana pa 1,87 mm/h. Maksimalne enourne intenzitete so bile pri vseh dogodkih razen pri dveh, ki sta trajala 20 oziroma 40 min, višje od srednjih intenzitet. Vrednosti maksimalnih enournih intenzitet ( $I60$ ) so znašale od 1,8 do 52,2 mm/h, vendar je za večino dogodkov bil značilnejši ožji interval vrednosti med 4,8 in 11,4 mm/h z mediano, ki je znašala 7,2 mm/h.

Dodatno smo izračunali še dva kazalnika, s katerima opišemo potencial erozivnosti, in sicer kinetično energijo dogodka ( $E$ ), ki smo jo določili na podlagi empirične enačbe, kot sta jo definirala Brown in Foster (1986), ter indeks erozivnosti dogodka ( $EI60$ ), ki je določen kot produkt kinetične energije dogodka in maksimalne enourne intenzitete padavin (Svoboda in sod., 2016). Dogodek z najvišjo kinetično energijo dogodka se je zgodil 2. avgusta 2019 (15,4 MJ/ha), sledita mu dogodka s 27. maja 2019 in 25. avgusta 2018, ko je kinetična energija dogodka znašala dobrih 13 MJ/ha. Tako kot najvišje srednje intenzitete in maksimalne enourne intenzitete padavin so tudi maksimalne vrednosti kinetične energije bile značilnejše za pozne spomladanske in poletne mesece. Ne glede na to ugotovitev pa velja poudariti, da lahko višje vrednosti kinetične energije pričakujemo tudi v drugih delih leta, kar potrjuje dogodka z 28. oktobra 2018 in 1. februarja 2019, pri katerih je vrednost  $E$  znašala več kot 10 MJ/ha. Relativno nizke vrednosti  $E$  so bile izračunane za dogodke, ki so se zgodili 9. aprila 2018, 15. aprila 2018, 16. aprila 2018 in 29. oktobra 2019, ko je vrednost  $E$  bila nižja od 1,2 MJ/ha. Povprečna vrednost kinetične energije 83 padavinskih dogodkov je znašala 3,56 MJ/ha z medkvartilnim razponom 1,8–4,5 MJ/ha. Vrednosti indeksa erozivnosti dogodka ( $EI60$ ) so znašale med 2,9 in 803,7 MJ mm/(ha h). Dve najvišji vrednosti sovpadata z dogodkoma z najvišjo kinetično energijo dogodka, tj. z dogodkoma 2. avgusta 2019 (803,7 MJ mm/(ha h)) in 28. avgusta 2018 (284,3 MJ mm/(ha h)), sledi jima pa dogodek z 19. junija 2019 z 259,5 MJ mm/(ha h). Pri tem dogodku sicer kinetična energija ni bila med najvišjimi, vendar pa je maksimalna enourna intenziteta bila zelo visoka (31,8 mm/h).

Preglednica 7: Osnovni statistični kazalniki padavinskih dogodkov z več kot 10 mm padavin

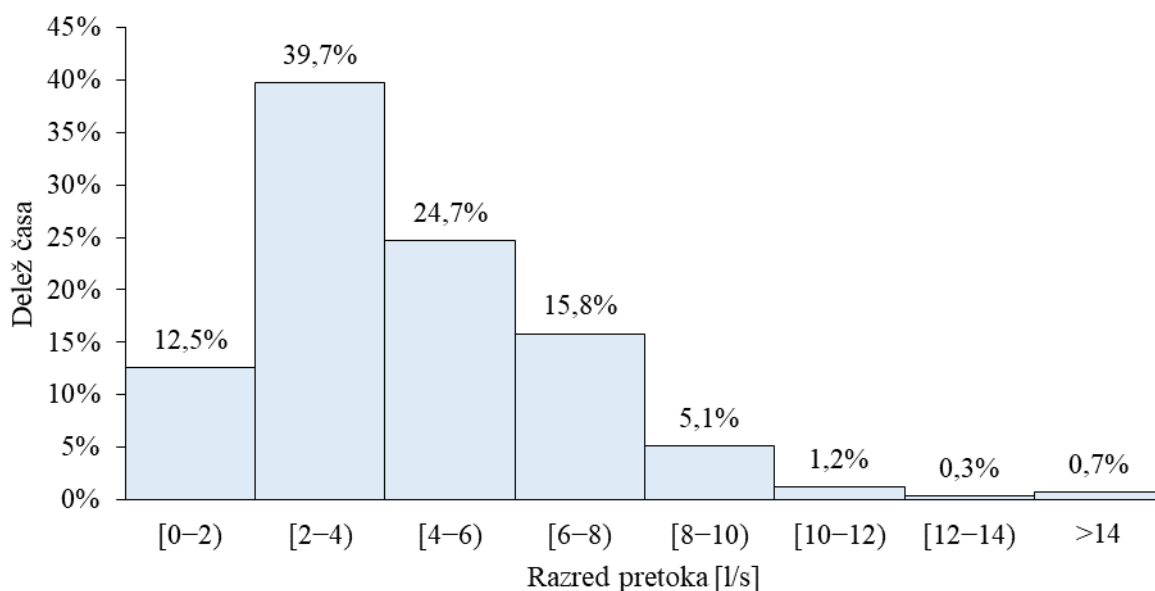
Table 7: Basic statistical parameters of precipitation events with more than 10 mm of rainfall

Statistični parameter	$T_p$ [min]	$K_p$ [mm]	$I_{sr}$ [mm/h]	$I_{60}$ [mm/h]	$E$ [MJ/ha]	$EI_{60}$ [MJ mm/(ha h)]
Povprečna vrednost	946,02	27,64	3,19	9,02	3,56	45,49
Standardni odklon	800,85	19,83	4,63	7,06	2,88	97,82
Koeficient variacije [%]	84,65	71,74	145,00	78,35	80,74	215,05
1. kvartil	440,00	14,70	1,14	4,80	1,80	8,98
Mediana	760,00	20,20	1,87	7,20	2,43	19,58
3. kvartil	1140,00	35,10	2,85	11,40	4,48	40,69
Najvišja vrednost	4880,00	109,80	34,20	52,20	15,40	803,73
Najnižja vrednost	20,00	10,00	0,60	1,80	1,02	2,90

Za vse statistične parametre je značilen relativno visok koeficient variacije, ki je najnižji pri količini padavin (71,7 %), najvišji pa pri indeksu erozivnosti padavin (215,1 %) in srednji intenziteti dogodka (145 %). Razlog za visok koeficient variacije lahko pripišemo veliki občutljivosti kazalnika na ekstremne vrednosti, ki se pojavljajo pri prav vseh statističnih parametrih, kar je razvidno iz njihovih razponov (preglednica 7).

## 4.2 Pretok

Povprečni pretok Kuzlovca v obdobju meritev je znašal 4,5 l/s, mediana vzorca podatkov pa je znašala 3,8 l/s. Ker je Kuzlovec izrazito hudourniški vodotok, je porazdelitev pretokov levo asimetrična, kar pomeni, da večji del časa prevladujejo pretoki okoli povprečja in nižji, izrazito visoki pretoki pa so redki (slika 14). Zaradi hudourniških značilnosti in hitrega površinskega odtoka so konice pretokov lahko tudi več kot 15-krat višje od povprečja. Najvišji pretok smo izmerili 29. maja 2019, ko je ta znašal 80,6 l/s in 3. februarja 2019, ko je znašal 75 l/s. Omenjeni konici sta se zgodili po padavinskih dogodkih, ki sta se začela 27. maja 2019 in 1. februarja 2019, ko je padlo 110 oziroma 95 mm padavin, obenem pa smo za ta dogodka izračunali tudi visoke vrednosti kinetične energije padavin. Hitro naraščanje in upadanje hidrograma se odraža tudi v povprečnih dnevnikih pretokih, kjer maksimalne vrednosti ne presegajo 31 l/s (slika 15). Z razdelitvijo hidrograma na bazni odtok in površinski odtok (razlika med celotnim pretokom in baznim odtokom) z metodo lokalnih minimumov vidimo, da večji del leta v strugi vodotoka teče bazni odtok, vendar so lahko v času konic volumni skupnega pretoka nekajkrat višji od volumna baznega odtoka. Indeks baznega odtoka (BFI) znaša 0,5, kar pomeni, da približno polovico volumna odtoka predstavlja bazni odtok, preostalo polovico pa predstavlja površinski odtok. Površinski odtok lahko v teoriji podrobneje razdelimo na neposredni površinski odtok, medtok in padavine, ki so padle neposredno v strugo vodotoka (Brilly in Šraj, 2005).

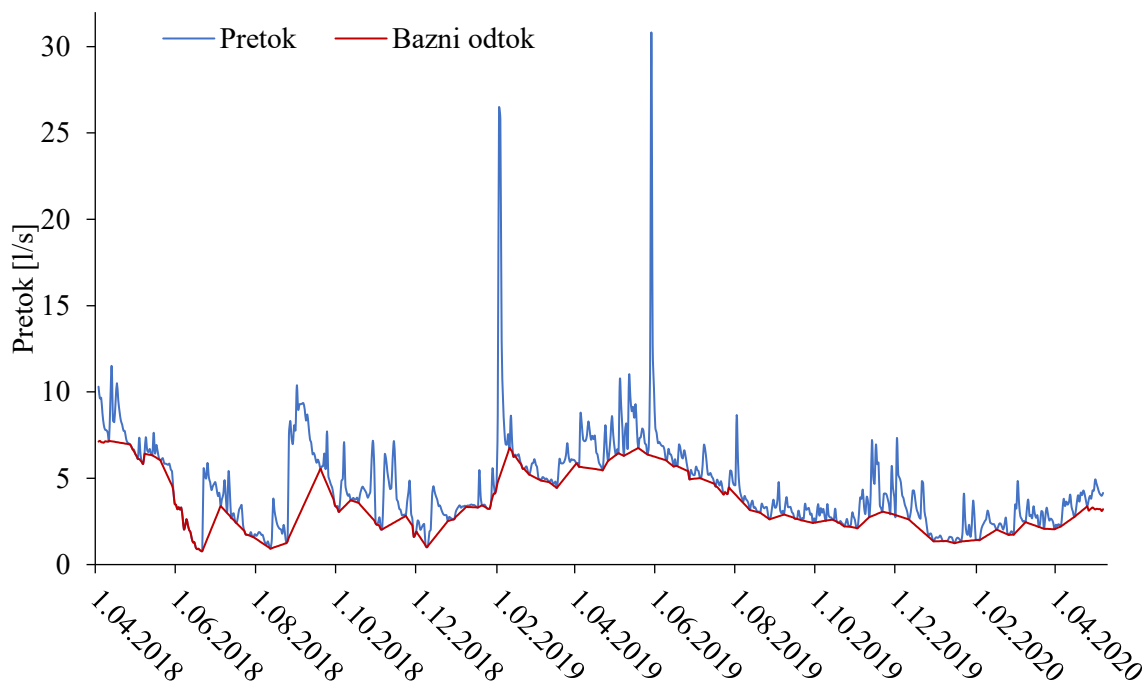


Slika 14: Histogram pretokov dvoletnih meritev

Figure 14: Histogram of discharges over a two-year measurement period

Najnižje dnevne pretoke smo zabeležili med 16. in 21. junijem 2018, ko je bil pretok nižji od 1 l/s. Najvišji povprečni dnevni pretok je znašal 30,8 l/s in je posledica visokih pretokov, ki so se zgodili 29.

maja 2019. Isti razlogi veljajo tudi za drugi in tretji najvišji povprečni dnevni pretok, ki sta se zgodila 2. in 3. februarja 2019 (26,4 oz. 25,8 l/s). Vidimo, da so maksimalni povprečni dnevni pretoki približno trikrat nižji od konice pretoka 20-minutnih podatkov, kar dodatno podkrepi pomen meritev s kratkim časovnim korakom, brez katerih bi bile informacije o izrednih dogodkih najverjetneje izgubljene.

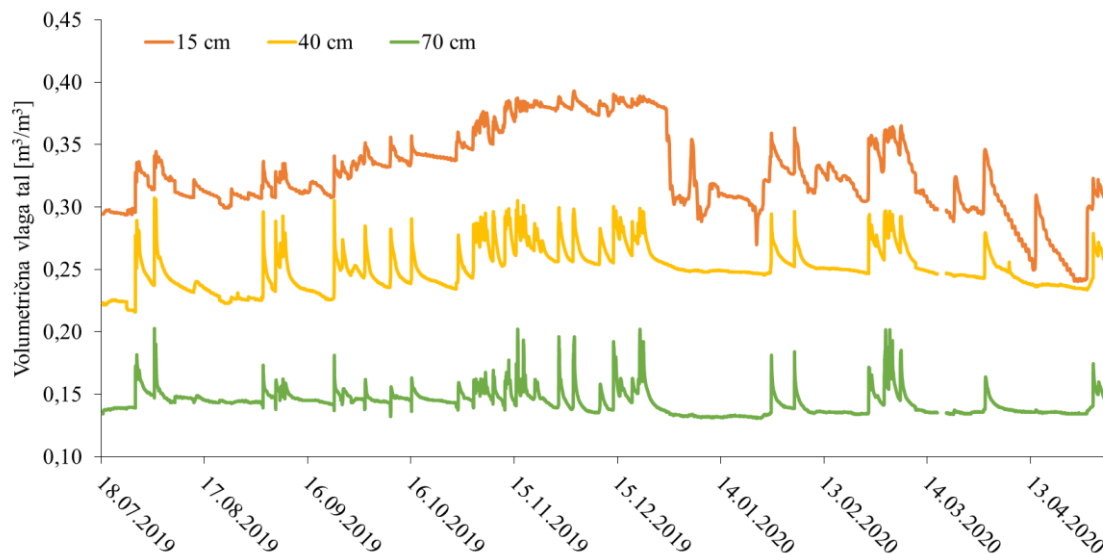


Slika 15: Povprečni dnevni pretoki (modra črta) in bazni odtok (rdeča črta) v dvoletnem obdobju meritev

Figure 15: Average daily discharge (blue line) and baseflow (red line) over the two-year measurement period

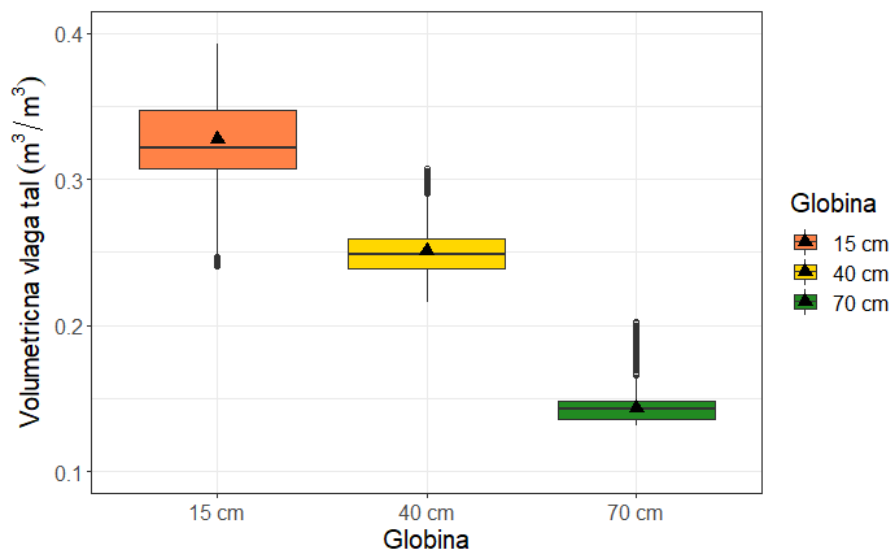
### 4.3 Vsebnost vode v tleh

Z meritvami vsebnosti vode v tleh smo pričeli v drugi polovici eksperimenta, zato v tej nalogi prikazujemo samo rezultate od 18. julija 2019 naprej (slika 16). Meritve smo izvajali na globinah 15 cm, 40 cm in 70 cm. Skozi celotno obdobje meritev so razvidne razlike med sloji, ki kažejo na upadanje volumetrične vsebnosti vode v tleh z globino s povprečnim gradientom  $0,3 \text{ (m}^3/\text{m}^3)/\text{m}$ . Povprečna vrednost volumetrične vsebnosti vode najplitvejšega sloja je znašala  $0,327 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , srednjega sloja  $0,251 \text{ m}^3/\text{m}^3$  in najglobljega  $0,131 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Poleg najvišje vsebnosti vode smo v zgornjem sloju (na globini 15 cm) opazili tudi najvišji razpon vrednosti volumetrične vsebnosti vode v tleh (slika 17). Iz grafa na sliki 16 so sicer razvidni odzivi na padavinske dogodke v smislu spremembe volumetrične vsebnosti vode v tleh na vseh globinah, vendar tudi razpon pada z globino (slika 17). Vrednosti volumetrične vsebnosti vode v najplitvejšem sloju so se gibale med  $0,240$  in  $0,393 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , v srednjem sloju med  $0,216$  in  $0,307 \text{ m}^3/\text{m}^3$  ter na globini 70 cm med  $0,131$  in  $0,202 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .



Slika 16: Volumetrična vsebnost vode v tleh na globinah 15, 40 in 70 cm na porečju Kuzlovca v obdobju med julijem 2019 in aprilom 2020 (20-minutni podatki)

Figure 16: Volumetric water content in soil at depths of 15, 40, and 70 cm in the Kuzlovec river catchment between July 2019 and April 2020 (20 min data)



Slika 17: Prikaz porazdelitve izmerjenih 20-minutnih vrednosti volumetrične vsebnosti vode v tleh z okvirjem z ročaji

Figure 17: Representation of distribution of 20-min volumetric soil water content measurements with a boxplot

V obravnavanem obdobju meritev je bilo padavinskih dogodkov z več kot 10 mm dežja, za katere smo imeli na voljo tudi podatke o volumetrični vsebnosti vode v tleh, 38 (dogodki 46–83 v prilogi A). Srednje vrednosti volumetrične vsebnosti vode v tleh, izmerjene med dogodki, so na vseh globinah višje od srednjih vrednosti celotnega obdobja (preglednica 8). Če smo za celotni niz podatkov ugotovili največjo razliko med najvišjo in najnižjo izmerjeno vrednostjo v zgornjem sloju tal, pa za podatke o volumetrični

vsebnosti vode v tleh med padavinskimi dogodki velja, da so bile največje povprečne spremembe vsebnosti vode zaznane v srednjem sloju ( $0,035 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), sledi najgloblji sloj ( $0,030 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), najmanjše spremembe pa so bile zaznane v zgornjem sloju ( $0,020 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) (preglednica 8). Ne glede na to pa izračun standardnega odklona kaže, da so najmanjša odstopanja od srednje vrednosti v najglobljem sloju in največja v najplitvejšem sloju. Prav tako z globino upadajo minimalne spremembe vsebnosti volumetrične vsebnosti vode, opredeljene kot razlike med najvišjo in najnižjo izmerjeno vsebnostjo vode v tleh med dogodkom. V sloju na globini 15 cm so bile najmanjše spremembe ( $0,003\text{--}0,005 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) izmerjene pri dogodkih med 13. in 22. decembrom 2019. Na globinah 40 cm in 70 cm so bile najmanjše spremembe volumetrične vsebnosti vode v tleh ( $0,001\text{--}0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) izmerjene 3. avgusta 2019 in 14. aprila 2020 (slika 45). Zanimivo je, da je pri dogodku 14. aprila bila v najplitvejšem sloju izmerjena največja sprememba vsebnosti vode v tleh ( $0,057 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), kar nakazuje na izrazit površinski oziroma plitev podpovršinski tok (medtok). Dogodki z izmerjenimi najnižjimi in najvišjimi vrednostmi so podrobneje in celoviteje obravnavani v poglavju 5 Analiza in razprava.

Preglednica 8: Lastnosti volumetrične vsebnosti vode v tleh med padavinskimi dogodki z več kot 10 mm padavin (20-minutni podatki)

Table 8: Properties of volumetric soil water content during the events with more than 10 mm of precipitation (20 min data)

Statistični parameter	Globina		
	15 cm	40 cm	70 cm
Povprečna vrednost [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,356	0,274	0,159
Standardni odklon [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,027	0,018	0,014
Koeficient variacije [%]	7,5	6,6	8,9
1. kvartil [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,337	0,264	0,152
Mediana [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,361	0,279	0,159
3. kvartil [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,381	0,287	0,166
Najvišja vrednost [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,393	0,307	0,202
Najnižja vrednost [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,247	0,216	0,132
Povprečna sprememba [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,020	0,035	0,030
Minimalna sprememba [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,003	0,001	0,001
Maksimalna sprememba [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,057	0,078	0,061
Povprečna minimalna [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,338	0,254	0,145
Povprečna maksimalna [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]	0,358	0,288	0,175

#### 4.4 Vegetacijske in hidrometeorološke lastnosti dogodkov

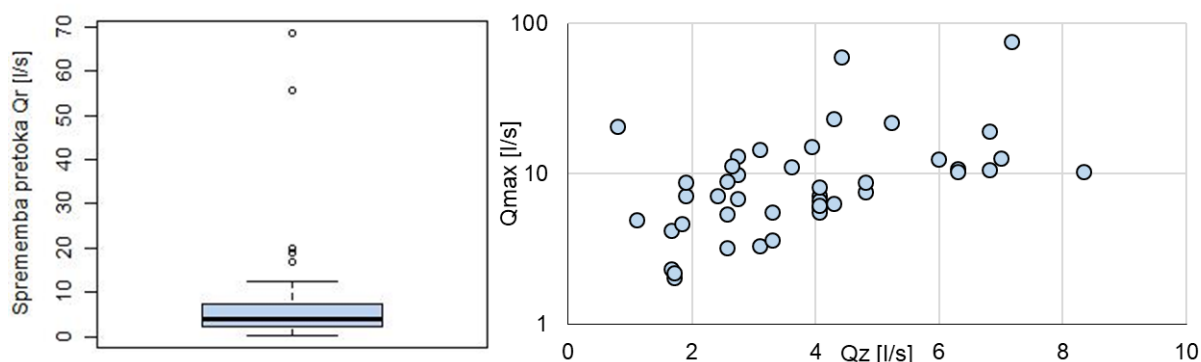
Procesi spiranja hranil s porečja in posledično koncentracije hranil v vodotoku so poleg lastnosti padavinskih dogodkov, ki povzročijo odtok s porečja in s tem transport hranil v vodotok, odvisni še od drugih dejavnikov. V nalogi smo se osredotočili na vpliv sezonskosti, natančneje na vpliv vegetacijskih obdobjev gozda, ki predstavlja rabo tal večjega dela porečja, vpliv vsebnosti vode v tleh, evapotranspiracije in hidroloških razmer. Za 43 padavinskih dogodkov smo določili karakteristične



vrednosti posameznih vplivnih dejavnikov, ki smo jih uporabili v nadaljevanju naloge za testiranje hipotez in v razpravi:

- začetni pretok ( $Q_z$ ),
- razpon pretoka ( $Q_r$ ),
- najvišji pretok ( $Q_{max}$ ),
- število dni pred dogodkom brez padavin z več kot 10 mm ( $N_{dni}$ ),
- kumulativna tridnevna evapotranspiracija ( $ET_3$ ) in
- fenološka faza ( $Ff$ ) ali vrednost indeksa listne površine ( $LAI$ ).

Hidrološke razmere z vidika pretokov oziroma njihovih sprememb po padavinskih dogodkih smo opisali z začetnim pretokom ( $Q_z$ ), razponom pretoka ( $Q_r$ ) in najvišjim pretokom ( $Q_{max}$ ). Za izbiro teh vrednosti smo se odločili na podlagi metode za določitev režimov iznosa hranil, ki so jo predlagali Butturini in sod. (2006), kjer del enačbe za izračun predstavljata začetni oziroma bazni odtok ter razlika med konico pretoka in začetnim pretokom. Začetni pretok ( $Q_z$ ) smo določili kot vrednost pretoka v času, ko so padle prve padavine. Povprečna vrednost pretoka na začetku dogodka znaša  $3,78 (\pm 1,82)$  l/s, vrednosti pa so se gibale od 0,80 pri dogodku, ki se je začel 22. junija 2018, do 8,3 l/s pri dogodku z 10. aprila 2019. Razpon pretoka ( $Q_r$ ) smo opredelili kot razliko med maksimalnim zabeleženim pretokom med dogodkom in pretokom na začetku dogodka ( $Q_z$ ) (slika 18, levo).



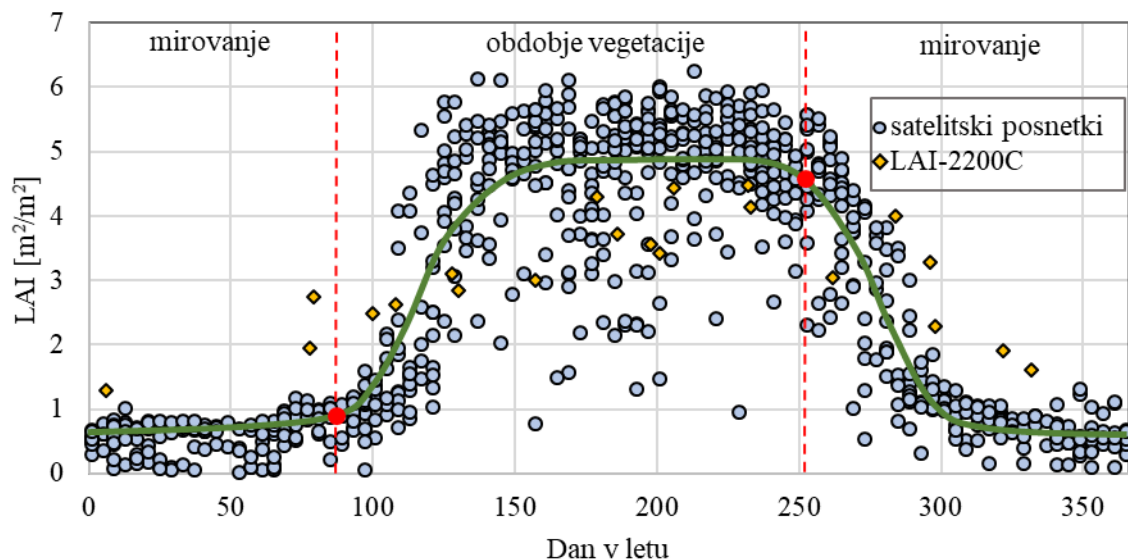
Slika 18: Prikaz začetnih ( $Q_z$ ) in najvišjih pretokov ( $Q_{max}$ ) za 43 dogodkov med padavinskimi dogodki

Figure 18: Representation of initial discharges ( $Q_z$ ) and maximum flows ( $Q_{max}$ ) during 43 rainfall events

Do največje absolutne spremembe pretoka ( $Q_r$ ) je prišlo pri dogodku, znotraj katerega smo zabeležili tudi najvišji izmerjeni pretok, tj. dogodek med 1. in 3. februarjem 2019, ko se je pretok povečal za 68,8 l/s (slika 18, levo). Naslednja največja absolutna sprememba je bila zaznana pri dogodku 2. avgusta 2019, ko je bil dogodek relativno kratek (trajanje padavin 440 min), vendar je v tem času padlo dobrih 60 mm padavin, kar je povzročilo spremembo pretoka za 55,8 l/s. Med obravnavanimi 43 dogodki se je pretok v povprečju povečal za 8,1 l/s. Mediana razpona pretoka je za približno enkrat nižja in znaša 4,1 l/s (slika 18, levo). Med 43 dogodki je 5 dogodkov takih, kjer je bila sprememba manjša od 1 l/s, in 9

takih dogodkov, kjer je bila sprememba pretoka večja od 10 l/s. Najvišji pretoki ( $Q_{max}$ ) sovpadajo z največjimi spremembami. Med 43 padavinskimi dogodki so se maksimalne vrednosti pretokov gibale med 2,0 in 75,9 l/s, najvišji pretok povprečnega dogodka pa je znašal 11,8 ( $\pm 13,4$ ) l/s (slika 18, desno).

Upoštevanje fenološke faze gozda, s katero smo opisali morebitni sezonski vpliv vegetacije na količine in koncentracije iznesenega nitratnega dušika s porečja, smo opredelili na podlagi dneva v letu, ko se je dogodek zgodil. Zaradi velikosti vzorca ( $N = 43$ ) smo leto razdelili samo na dve fenološki fazi, tj. obdobje vegetacije, ki obsega olistanje in rast, in obdobje mirovanja, ki obsega odpadanje listja in zimsko mirovanje. Fenološki fazi smo določili na podlagi vrednosti indeksa listne površine ( $LAI$ ). Na podlagi obdelanih podatkov daljinskega zaznavanja (satelitskih posnetkov) so bile za obravnavano porečje določene vrednosti indeksa listne površine (Čotar in sod., 2018; Ogris in sod., 2018) za dolgoletno obdobje 2002–2016. Datuma ločnic med fenološkima fazama smo določili s programskim orodje R in paketoma *phenology* (Girondot, 2019) ter *sicegar* (Umut Calgar in Wilke, 2019), pri čemer smo nizu podatkov iskali prilegajočo funkcijo (slika 19, zelena krivulja), ki jo opišemo s karakterističnimi vrednostmi. Na podlagi rezultatov smo kot obdobje vegetacije določili čas med 27. marcem in 12. septembrom, medtem ko smo kot obdobje mirovanja vegetacije opredelili preostali čas leta, tj. čas med 13. septembrom in 26. marcem (slika 19, črtkani rdeči črti).

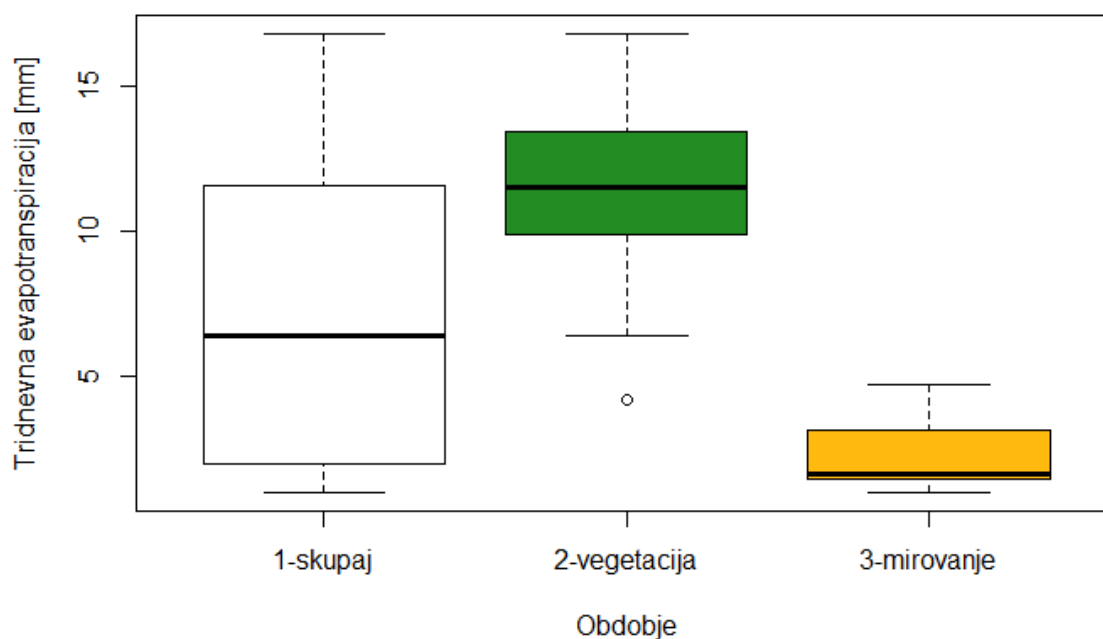


Slika 19: Podatki LAI na podlagi obdelave satelitskih posnetkov (modri krogi) in z dvojno sigmoidno funkcijo prilagojena krivulja (zelena črta). Z rdečo črtkano črto je označena meja med fenološkima fazama. Na sliki so prikazani tudi vrednosti LAI, pridobljene z meritvami z merilnikom LAI-2200C (rumeni kvadratki).

Figure 19: LAI data based on the satellite images (blue dots) and fitted curve obtained by double-sigmoidal function (green line). The red dashed line shows the border between the phenological phases. LAI values obtained by measurements with LAI-2200C are also indicated (yellow squares).

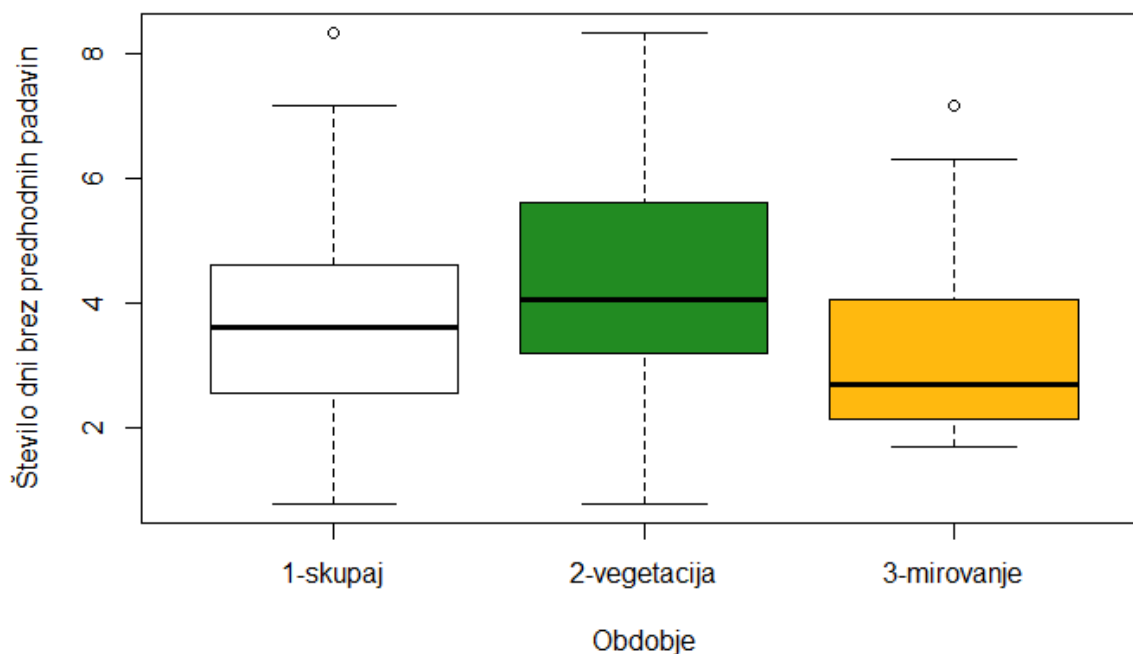
Nizu podatkov, pridobljenih na podlagi satelitskih podatkov, smo dodali še podatke lastnih meritev LAI (slika 19), da bi preverili ustreznost določenih datumov. Ugotovili smo, da dodatne vrednosti LAI ne spremenijo datuma začetka obdobja vegetacije, datum začetka obdobja mirovanja pa zamaknejo za en dan, na 14. september. Ne glede na to smo se zaradi daljšega časovnega niza podatkov iste vrste, tj. vrednosti LAI na podlagi satelitskih podatkov, odločili za prvotno delitev. Primerjava obeh podatkovnih nizov LAI (slika 19) je pokazala, da satelitski posnetki nekoliko precenjujejo maksimalne vrednosti LAI, medtem ko so vrednosti LAI v zimskem obdobju oziroma v obdobju mirovanja nekoliko podcenjene glede na meritve LAI. Ne glede na to je maksimum prilegajoče dvojne sigmoidne krivulje blizu najvišjim izmerjenim vrednostim LAI, saj znaša  $4,8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , medtem ko je najvišja izmerjena vrednost LAI znašala  $4,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Od 43 dogodkov je 23 takih, ki so se zgodili v obdobju vegetacije, in 20 takih dogodkov, ki so se zgodili v obdobju mirovanja, s čimer smo zagotovili približno enako velikost obeh primerjanih vzorcev. Če bi upoštevali drugo delitev na obdobji vegetacije in mirovanja, bi vzorca ostala nespremenjena, saj se noben dogodek ni zgodil na ločnici med obema fenološkima fazama.

Ker smo z meritvami volumetrične vsebnosti vode v tleh pričeli šele v drugi polovici izvajanja eksperimenta (julij 2019) in tako ne razpolagamo z začetno volumetrično vsebnostjo vode v tleh za vse dogodke, smo kot kazalnik predhodne vlažnosti oziroma namočenosti porečja uporabili število dni pred dogodkom s padavinami, višjimi od 10 mm (*Ndni*). Na količino vode na porečju in posledično na predhodno namočenost tal in razpoložljive količine vode za vegetacijo vplivajo tudi procesi evapotranspiracije. Na podlagi mediane kazalnika *Ndni*, ki je za vseh 43 dogodkov znašala 3,61 dneva, smo se odločili, da kot predhodno evapotranspiracijo upoštevamo skupno tridnevno evapotranspiracijo (*ET3*). Za izračun *ET3* smo upoštevali uradne dnevne podatke ARSO za postajo Ljubljana-Bežigrad (ARSO, 2020b), ki je najbližje obravnavanemu porečju. Za izračun referenčne evapotranspiracije, katere podatke smo uporabili v nalogi, ARSO uporablja Penman-Monteithovo metodo, pri kateri so upoštevane naslednje meteorološke spremenljivke: temperatura zraka, relativna zračna vlaga, hitrost vetra in sončno sevanje. Kot privzeto referenčno površino se upošteva aktivno rastoča trava s popolno prekrivnostjo tal in zadostno preskrbo z vodo. Višina trave znaša 12 cm in ima površinsko upornost 70 s/m ter albedo 0,23 (ARSO, 2020b). Posledično smo najvišje vrednosti tridnevne kumulativne evapotranspiracije izračunali za dogodke, ki so se zgodili v toplejših delih leta, in obratno, v hladnejših delih leta smo izračunali najnižje vrednosti. Absolutno najvišja *ET3* je bila izračunana za dogodek, ki se je zgodil 27. julija 2019, in sicer je znašala 16,8 mm (slika 20). Po velikosti nato sledijo dogodki, ki so se zgodili, 22. junija 2018, 28. julija 2019 in 13. junija 2018 z vrednostmi *ET3* med 14,6 in 15,9 mm. Povprečna vrednost *ET3* za dogodke, ki so se zgodili v obdobju vegetacije, znaša 11,5 mm, najnižjo vrednost v tem obdobju (4,2 mm) pa smo izračunali za dogodek, ki se je zgodil 10. aprila 2019. V obdobju mirovanja vegetacije (med 13. septembrom in 26. marcem) so vrednosti *ET3* znašale med 1 in 4,7 mm s povprečjem 2,3 mm.



Slika 20: Prikaz vrednosti tridnevne kumulativne evapotranspiracije pred padavinskimi dogodki za celotno obdobje, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja vegetacije

Figure 20: Representation of the three-day cumulative evapotranspiration before rainfall events for the entire period, the vegetation period and the dormant period

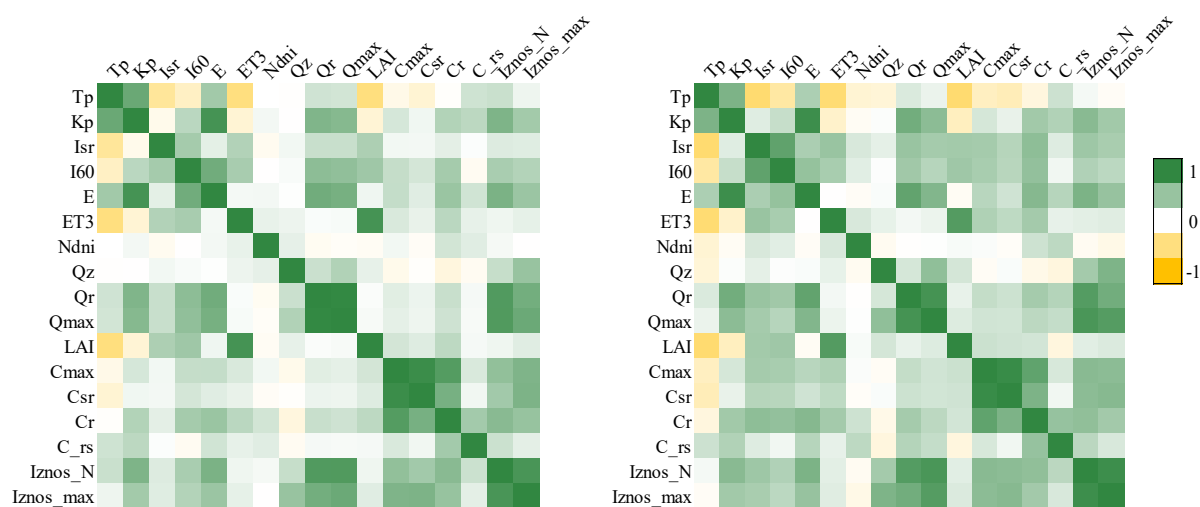


Slika 21: Prikaz števila dni brez padavin pred padavinskimi dogodki za celotno obdobje, obdobje vegetacije in obdobje mirovanja vegetacije

Figure 21: Representation of the number of days without precipitation before rainfall events for the entire period, the vegetation period, and the dormant period

Glede na kazalnik predhodnih padavin *Ndni* so pred posameznim dogodkom bili v povprečju 3,8 dnevi brez padavin, višjih od 10 mm. Obdobje brez predhodnih padavin je v povprečju nekoliko daljše v obdobju vegetacije, ko znaša 4,3 dni, v obdobju mirovanja vegetacije znaša povprečje 3,2 dni (slika 21). Med obravnavanimi 43 dogodki je bilo najdaljše obdobje brez padavin (8,3 dneva) izračunano za dogodek, ki se je zgodil 12. aprila 2019. Pri tem dogodku je tridnevna kumulativna evapotranspiracija znašala samo 4,2 mm. Po dolžini obdobja brez padavin sledijo dogodki, ki so se zgodili 3. februarja 2019 (7,2 dneva), 5. aprila 2019 (7 dni) in 9. maja 2018 (6,8 dneva).

Spremenljivke, ki smo jih v nadaljevanju naloge uporabili za analize, pa so med seboj različno povezane. Povezavo med 17 spremenljivkami grafično prikazujemo s korelogramom (slika 22), točnejše povezave spremenljivk na podlagi 43 padavinskih dogodkov in statistična značilnost povezav pa so zbrani v korelacijski matriki (priloga C). Najmočnejše pozitivne povezave ( $R \geq 0,9$ ) smo opazili med količino padavin (*Kp*) in kinetično energijo padavin (*E*), med absolutno spremembo pretoka (*Qr*) in maksimalnim pretokom med padavinskim dogodkom (*Qmax*), med maksimalnimi (*Cmax*) in srednjimi koncentracijami nitratnega dušika (*Csr*) in med predhodno tridnevno evapotranspiracijo (*ET3*) ter indeksom listne površine (*LAI*). Po stopnji povezanosti sledijo naslednji pari spremenljivk: maksimalni in srednji iznos nitratnega dušika s porečja (*Iznos\_max*, *Iznos\_N*), absolutna sprememba pretoka in srednji iznos nitratnega dušika (*Qr*, *Iznos\_N*), najvišji pretok med dogodkom (*Qmax*) in srednji iznos nitratnega dušika (*Iznos\_N*), absolutna sprememba koncentracije nitratnega dušika (*Cr*) med padavinskim dogodkom in najvišjo koncentracijo nitratnega dušika (*Cmax*). Največje negativne povezave med spremenljivkami so povezane s trajanjem padavin (*Tp*), in sicer so daljša trajanja padavin značilnejša za obdobja z nižjimi vrednostmi evapotranspiracije (*ET3*) in indeksov listne površine (*LAI*) ter dogodke z nižjimi srednjimi in maksimalnimi enournimi padavinami (*Isr*, *I60*).



Slika 22: Korelogram spremenljivk, uporabljenih v analizah, na podlagi Pearsonovega (levo) in Spearmanovega (desno) koeficienta korelacije

Figure 22: Correlogram of variables used in the analyses based on the Pearson (left) and Spearman (right) correlation coefficient

S kazalniki spremenljivosti koncentracij nitratnega dušika v vodotoku med dogodkom ( $C_{max}$ ,  $C_{sr}$ ,  $C_r$ ,  $C_{rs}$ ) ni tako izrazito močnih povezav s spremenljivkami lastnosti padavinskih dogodkov ter hidroloških in sezonskih razmer, kar kaže na kompleksnost vplivov na razmere koncentracij. Ne glede na to pa smo med nekaterimi spremenljivkami zaznali povezave. Količina padavin ( $Kp$ ) je pozitivno povezana z absolutno in relativno spremembo koncentracije med dogodkom, ni pa razvidne povezave s srednjo in maksimalno koncentracijo. Maksimalna enourna intenziteta padavin ( $I60$ ) je pozitivno povezana s  $C_r$  ( $R = 0,44$ ) in  $C_{max}$  ( $R = 0,29$ ). S slednjo je pozitivno povezana tudi kinetična energija padavinskega dogodka ( $R = 0,29$ ), ki kaže tudi pozitivno povezavo z absolutnimi spremembami koncentracij ( $R = 0,49$ ). S  $C_{sr}$  nismo zaznali nobene statistično značilne povezave. Pri kazalnikih iznosov nitratnega dušika ( $Iznos_N$ ,  $Iznos_{max}$ ) s porečja smo ugotovili, da obstajajo pozitivne povezave s količino, intenziteto in energijo padavin ( $0,37 \leq R \leq 0,64$ ).

#### 4.5 Koncentracije nitratnega dušika

Kontinuirano spremljanje koncentracij nitratnega dušika v vodotoku je bilo osredotočeno na obdobja padavinskih dogodkov, ki povzročijo spiranje nitratnega dušika s porečja in posledično spremembe v koncentracijah v vodotoku. Ko je bila merilna naprava nameščena na terenu, so se meritve izvajale kontinuirano s časovnim korakom 20 min. Med aprilom 2018 in aprilom 2020 smo zabeležili dobrih 21500 podatkov o koncentracijah nitratnega dušika v vodotoku in pripadajočih parametrov, izmerjenih z multiparametrsko sondo (npr. električna prevodnost, pH, temperatura vode). Osnovni statistični kazalniki meritev koncentracij nitratnega dušika v celotnem obdobju so povzeti v preglednici 9.

Preglednica 9: Osnovni statistični kazalniki 20-minutnih meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec za celotno obdobje meritev

Table 9: The basic statistical parameters about 20 min measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream for the whole period of measurements

Statistični parameter	Koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Iznos NO <sub>3</sub> -N [g]*
Povprečna vrednost	0,89	4,41
Standardni odklon	0,42	4,07
Koeficient variacije [%]	47,7	92,2
1. kvartil	0,64	2,22
Mediana	0,75	3,35
3. kvartil	1,03	5,18
Najvišja vrednost	3,47	82,40
Najnižja vrednost	0,27	0,44

\*preračunano na 20-minutni časovni korak

Povprečna vrednost koncentracij NO<sub>3</sub>-N v vodotoku je znašala 0,89 ( $\pm 0,42$ ) mg/l, kar je primerljivo z ugotovitvami drugih avtorjev, ki so opravljali meritve na vodotokih, ki drenirajo vodo z gozdnatih porečij. Robustnejša mera srednje vrednosti, mediana, je za obdobje meritev bila nekoliko nižja, in sicer znaša 0,75 mg/l. Srednjih 50 % vrednosti, tj. medkvartilni razpon, je pokazalo, da se vrednosti koncentracij večji del časa gibljejo med 0,64 in 1,03 mg/l. Najnižjo vrednost smo izmerili v sušnem obdobju, 23. avgusta 2018, ko je koncentracija NO<sub>3</sub>-N znašala samo 0,27 mg/l, predhodno pa je v enem mesecu skupaj padlo manj kot 20 mm dežja. Na drugi strani smo najvišjo koncentracijo (3,47 mg/l) izmerili v obdobju mirovanja vegetacije, 22. decembra 2019, ko je skupna tridnevna količina padavin preseгла 70 mm. V času dveh padavinskih dogodkov, ki sta se zgodila med 21. decembrom 2019 9:00 in 23. decembrom 2019 00:40, je skupna masa iznesenega nitratnega dušika znašala 2183,6 g. Iznese količine NO<sub>3</sub>-N smo preračunali na 20-minutni časovni korak (preglednica 9). Najvišja 20-minutna iznesena količina NO<sub>3</sub>-N (82,4 g) se ni zgodila v obdobju teh dogodkov, temveč 3. februarja 2019, ko je bila dosežena konica takratnega dogodka (75,9 l/s). Povprečna 20-minutna vrednost iznesenega NO<sub>3</sub>-N je znašala 4,41 ( $\pm 4,07$ ) g. Vrednosti količine iznosov imajo relativno velik koeficient variacije (92 %),

kar je posledica velike spremenljivosti pretočnih razmer. Ne glede na to pa medkvartilni razpon znaša 2,22–5,18 g z mediano blizu povprečne vrednosti (3,35 g), kar kaže na to, da do večjih iznosov pride ravno v času povišanih pretokov, tj. po padavinah. Slednje smo preverili s podrobnejšo analizo koncentracij in količine iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  v času baznega odtoka (referenčnih razmerah) in v času med padavinskimi dogodki. Ocena letne količine iznosa, preračunane glede na povprečni iznos v dvoletnem obdobju, znaša 1,6 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha/leto}$ . Ocenjeni iznosi so primerljivi z iznosi z eksperimentalnega porečja Hubbard Brook (1,5 kg N/ha/leto), ki velja za eno najstarejših in najbolj opremljenih eksperimentalnih porečij, na katerih se spremljajo koncentracije dušikovih spojin, podatkovni nizi pa so dolgi več kot 50 let (Yanai in sod., 2013).

#### 4.5.1 Razmere v času baznega odtoka

Kot referenčne razmere koncentracij nitratnega dušika v vodotoku, tj. razmere brez vpliva padavinskih dogodkov, smo opredelili razmere v času baznega odtoka. Obdobja baznih razmer smo določili s pomočjo razdelitve hidrograma. Za izračun baznega odtoka smo podatke najprej preračunali na dnevne podatke, pri čemer smo za dnevno vrednost upoštevali povprečje vseh zabeleženih vrednosti v enem dnevu. Bazni odtok smo izračunali z uporabo metode, ki upošteva lokalne minimume (WMO, 2008b). Pri tej metodi se časovna serija dnevni pretokov razdeli na petdnevne neprekrivajoče se bloke, pri čemer se v vsakem bloku določi minimalni pretok. Nato se na seriji minimumov poiščejo prevojne točke, in sicer se za vsako od minimalnih vrednosti in dve njeni sosednji vrednosti preveri, če velja, da je 0,9-sredinska vrednost  $\leq$  sosednja vrednost. Če slednje velja, potem je sredinska vrednost določena kot prevojna točka. Prevojne točke se nato med seboj povežejo. Da dobimo dnevne vrednosti baznega odtoka, se vrednosti pretoka med prevojnimi točkami interpolirajo. Razmerje volumna pretoka, določenega pod ločitveno krivuljo, in celotnega pretoka predstavlja indeks baznega odtoka (BFI), ki lahko zavzame vrednosti od 0 do 1. Pri tem vrednosti bližje 1 kažejo na šibko povezanost površinskih in podzemnih vod, medtem ko vrednosti bližje 0 kažejo na dobro povezanost površinskih vod in zaloge vode na porečju ter posledično na manjšo občutljivost na dlje trajajoča obdobja brez padavin (Sapač in sod., 2019; Sapač in sod., 2020a).

Velikost vzorca 20-minutnih meritev pri povprečnem baznem pretoku znaša  $N=10825$ , kar predstavlja 50,2 % vseh meritev. Povprečna koncentracija nitratnega dušika pri pretokih enakih ali manjših od povprečnega baznega pretoka ( $<3,5$  l/s) je nekoliko višja od povprečne koncentracije celotnega obdobja in znaša 0,93 mg/l ( $\pm 0,44$ ) (preglednica 10). Medkvartilni razpon koncentracij v času baznega odtoka (0,66–1,04 mg/l) in koeficient variacije (49,7 %) sta primerljiva s celotnim obdobjem meritev. Najvišjo vrednost koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  v času baznega odtoka smo izmerili 23. decembra 2019 ob 00:20, ko je pretok po obilnih padavinah že upadel na raven baznega odtoka, količina  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku pa je bila



še visoka (2,9 mg/l). Ob tem času smo izračunali tudi najvišji 20-minutni iznos nitratnega dušika s porečja, ki je znašal 11,8 g. V primerjavi s celotnim obdobjem meritev ugotavljamo, da so količine iznesenega NO<sub>3</sub>-N s porečja v času baznega odtoka nižje, in sicer je količina pri 50 % meritev znašala med 1,68 in 3,0 g (preglednica 10).

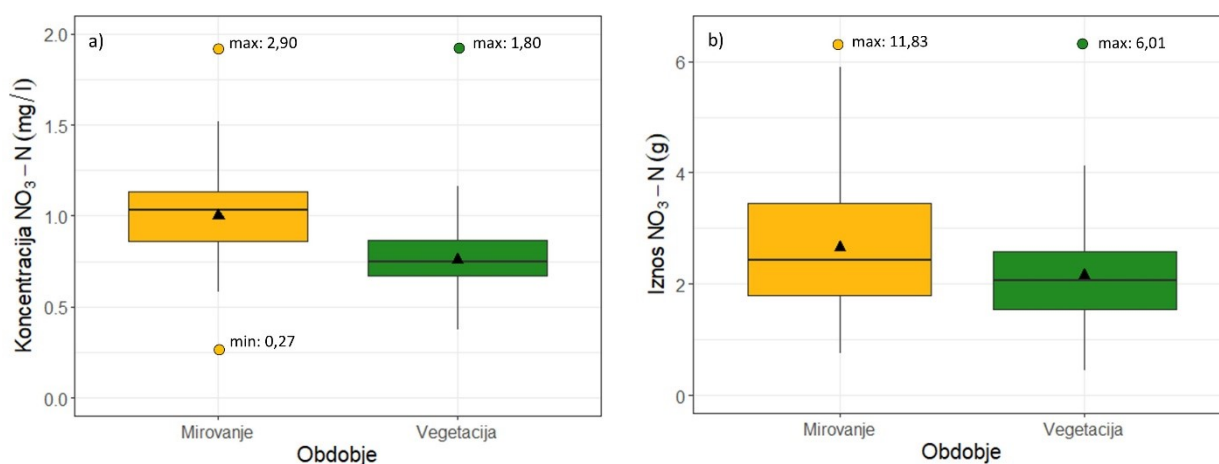
Preglednica 10: Osnovni statistični kazalniki meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec v času baznega odtoka

Table 10: The basic statistical parameters about measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream during the baseflow period

Statistični parameter	Koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Iznos NO <sub>3</sub> -N [g]*
Povprečna vrednost	0,93	2,50
Standardni odklon	0,46	1,25
Koeficient variacije [%]	49,7	50,0
1. kvartil	0,66	1,68
Mediana	0,79	2,26
3. kvartil	1,04	3,00
Najvišja vrednost	2,90	11,83
Najnižja vrednost	0,27	0,44

\*preračunano na 20-minutni časovni korak

Dodatno smo preverili še razmere koncentracij NO<sub>3</sub>-N v vodotoku pri baznem odtoku v obdobjih vegetacije (27. marec–12. september) in mirovanja (13. september–26. marec), da bi ocenili, ali obstajajo razlike med tema obdobjema. Velikosti vzorcev meritev med baznim odtokom v času vegetacije in v času mirovanja sta približno enaki, in sicer obdobje vegetacije obsega 44 % meritev (N = 4741), obdobje mirovanja pa 56 % meritev (N = 6084). Osnovne statistične vrednosti obeh vzorcev prikazujeta okvirja z ročaji (slika 23, a), iz katerih je razvidno, da so koncentracije tako glede na povprečno vrednost kot na medkvartilni razpon višje v obdobju mirovanja. Povprečna vrednost v obdobju vegetacije znaša 0,76 (±0,19) mg/l, v obdobju mirovanja pa 1,06 (±0,56) mg/l. 50 % meritev koncentracije v obdobju vegetacije je zavzelo vrednosti med 0,66 in 0,87 mg/l, medtem ko je 50 % vrednosti v obdobju mirovanje bilo v širšem intervalu (0,68–1,18 mg/l). Na nižje koncentracije NO<sub>3</sub>-N v fenoloških fazah olistanja in polne ozelenitve dreves kažejo tudi nizke koncentracije, ki so v tem obdobju nižje kot v obdobju odpadanja listja in mirovanja (slika 23, a).



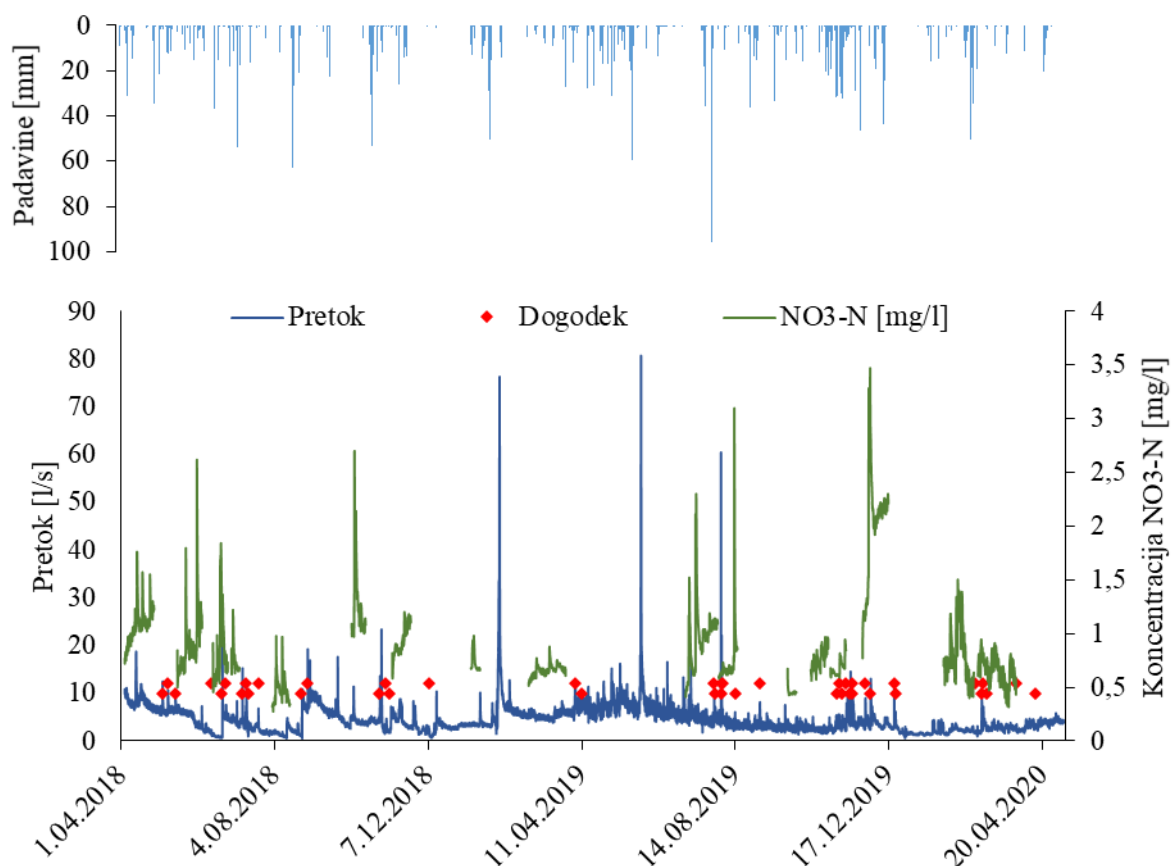
Slika 23: Primerjava razmer pri baznem odtoku v obdobju vegetacije in obdobju mirovanja z vidika koncentracij v vodotoku (a) in količine iznosa nitratnega dušika s porečja (b) (krogi ponazarjajo najmanjše in največje vrednosti ubežnikov 20-minutnih podatkov)

Figure 23: Comparison of baseflow conditions between the vegetation period and dormancy from the in-stream  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (a) and export flux (b) points of view (dots represent the lowest and the highest values of outliers of 20 min data)

Podobno primerjavo smo naredili še za količine iznesenega  $\text{NO}_3\text{-N}$  s porečja (slika 23, b). V obdobju vegetacije je povprečni 20-minutni iznos nitratnega dušika s porečja znašal  $2,14 (\pm 0,92)$  g, medtem ko so bile povprečne količine v obdobju mirovanja nekoliko višje ( $2,78 \pm 1,40$  mg/l). V obdobju mirovanja je opaziti višjo spremenljivost v količinah iznosa, na kar kažeta koeficient variacije (50,1 %) in medkvartilni razpon. V obdobju vegetacije se je 50 % vrednosti gibalo med 1,55 in 2,58 g, v obdobju mirovanja pa med 1,81 in 3,59 g. Letni iznos ob upoštevanju povprečnih vrednosti pri baznem odtoku za celotno obdobje meritev bi znašal nekaj manj kot 1 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha}$ , od česar bi prispevek v obdobju vegetacije k celoletni izneseni količini bil 20 % manjši kot prispevek v obdobju mirovanja.

#### 4.5.2 Razmere med padavinskimi dogodki

Razmere koncentracij med padavinskimi dogodki smo opredelili kot razmere od začetka padavinskega dogodka do preteka 6 ur po koncu zadnjega zabeleženega padavinskega podatka. Na primer, če so padavine trajale 1 uro, je celotni padavinski dogodek trajal 7 ur. Na tak način smo tudi med seboj ločili dva zaporedna dogodka. V celotnem obdobju meritev je bilo takih dogodkov 83, dogodkov, kjer hkrati razpolagamo še s podatki o koncentracijah nitratnega dušika v vodotoku, pa 43 (slika 24). Povprečno je padavinski dogodek trajal 1324 min (22 ur). Najdaljši dogodek po zgoraj opisanem merilu je trajal 3400 min (28. oktober 2018), medtem ko je najkrajši trajal 380 min (8. julij 2018). Za obdobje mirovanja so v povprečju značilnejši daljši padavinski dogodki (1700 min,  $N = 20$ ). Povprečno trajanje 23 dogodkov v obdobju vegetacije, za katere smo razpolagali z veljavnimi meritvami koncentracij nitratnega dušika, je znašalo 997 min.



Slika 24: Prikaz podatkovnega niza padavin (zgoraj, dnevne vsote), pretokov in koncentracij nitratnega dušika (spodaj, 20-minutni podatki) z označenimi začetki padavinskih dogodkov (rdeče točke)

Figure 24: Representation of data series of rainfall (above, daily sums), discharge, and concentration of nitrate nitrogen (below, 20 min data) with marked beginnings of the rainfall events (red dots)

Preglednica 11 prikazuje osnovne statistične podatke podatkovnega niza, ki obsega vse meritve koncentracij ter izračunanih iznosov  $\text{NO}_3\text{-N}$  v času 43 padavinskih dogodkov ( $N=2878$ ). Povprečna koncentracija nitratnega dušika med dogodki je znašala  $1,13 (\pm 0,54)$  mg/l, kar je približno 20 % več kot med baznim odtokom. Polovica podatkov iz niza zavzema vrednosti med 0,78 in 1,28 mg/l (medkvartilni razpon) z mediano 0,94 mg/l, vendar je celotni razpon vrednosti veliko večji. Najnižjo vrednost koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskim dogodkom smo izmerili 30. avgusta 2018 ob 18:40, ko je ta na začetku dogodka znašala samo 0,36 mg/l. V mesecu avgustu 2018 smo nizke koncentracije beležili vse od 22. avgusta 2018, ko smo pred napovedanimi padavinskimi dogodki ponovno namestili multiparametrsko sondo, kar pomeni, da so nizke koncentracije lahko trajale še veliko dlje.

Preglednica 11: Osnovni statistični kazalniki 20-minutnih meritev koncentracije in iznosa nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec v času padavinskih dogodkov

Table 11: The basic statistical parameters about 20-min measurements of nitrate nitrogen concentration and export flux in the Kuzlovec stream during the inter-event period

Statistični parameter	Koncentracija NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	Iznos NO <sub>3</sub> -N [g]*
Povprečna vrednost	1,13	8,63
Standardni odklon	0,54	8,35
Koeficient variacije [%]	47,48	96,79
1. kvartil	0,78	3,48
Mediana	0,94	6,42
3. kvartil	1,28	10,36
Najvišja vrednost	3,47	82,40
Najnižja vrednost	0,36	0,45

\*preračunano na 20-minutni časovni korak

Najvišjo koncentracijo NO<sub>3</sub>-N smo med padavinskimi dogodki zabeležili 22. decembra 2019 ob 17:40. Vrednosti koncentracij so bile višje od 3 mg/l samo med padavinskimi dogodki, ki so se zgodili med 2. in 3. septembrom 2019, 21. decembra 2019 in 22. decembra 2019. Spremenljivost koncentracij med padavinskimi dogodki, opisana s koeficientom variacije in standardnim odklonom, je nekoliko višja od spremenljivosti koncentracij med baznim odtokom (preglednica 10, preglednica 11), kar je posledica hitrih sprememb v koncentracijah po padavinah.

Spremenljivost iznosov nitratnega dušika je skoraj enkrat večja od spremenljivosti koncentracij NO<sub>3</sub>-N, saj je funkcija tako pretoka kot koncentracije v nekem trenutku (preglednica 11), zaradi česar visoka koncentracija ne pomeni nujno tudi velikega iznosa s porečja ter obratno. Iznosi med 43 padavinskimi dogodki so se gibali med 0,45 in 82,4 g (preračunano na 20-minutni časovni korak). Povprečni iznos NO<sub>3</sub>-N med padavinskimi dogodki je znašal 8,63 (±8,35) g, mediana pa 6,42 g. Medkvartilni razpon je precej manjši od celotnega razpona iznosov med padavinskimi dogodki in znaša 6,9 g. S primerjavo izračunanih iznosov med baznim odtokom in med padavinskimi dogodki lahko ugotovimo, da so iznosi NO<sub>3</sub>-N v povprečju približno 3,5-krat večji kot med baznim odtokom, kar potrjuje pogojenost sprememb koncentracij med dogodki s padavinami. Višje iznose nitratnega dušika s porečja potrjujejo tudi rezultati primerjave medkvartilnih razponov. Prvi kvartil iznosov med padavinskimi dogodki je približno dvakrat višji od 1. kvartila med baznim odtokom, medtem ko je presežek vrednosti 3. kvartila in mediane podoben povprečnemu (preglednica 10, preglednica 11).

Nadalje smo podatkovni niz z vidika koncentracij NO<sub>3</sub>-N in količine iznesenega nitratnega dušika podrobneje analizirali, in sicer na ravni dogodkov (angl. *event-based analysis*). Za vsak dogodek smo poleg povprečne in maksimalne koncentracije ( $C_{sr}$ ,  $C_{max}$ ) izračunali še absolutno spremembo (razliko) koncentracije med koncentracijo na začetku dogodka in najvišjo izmerjeno koncentracijo ( $C_r$ ), relativno

spremembo koncentracije ( $C_{rs}$ ), ki smo jo izračunali, kot so predlagali Butturini in sod. (2006), iznos nitratnega dušika na časovno enoto ( $Iznos_N$ ) ter največji iznos v 20-minutnem časovnem koraku ( $Iznos_{max}$ ) (preglednica 12). Najvišje povprečne koncentracije smo izračunali pri dogodkih, ki sta se zgodila 21. decembra 2019 ( $2,78 \pm 0,53$  mg/l) in 22. decembra 2019 ( $3,00 \pm 0,26$  mg/l), ko smo izmerili tudi absolutno najvišje koncentracije. Najnižje povprečne koncentracije smo izmerili pri dogodkih, ki so se zgodili med 25. in 26. avgustom 2018 ( $0,63 \pm 0,09$  mg/l), med 10. in 12. aprilom 2019 ( $0,71 \pm 0,03$  mg/l) ter 5. in 6. novembrom 2019 ( $0,71 \pm 0,04$  mg/l).

Do največje spremembe koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  je prišlo med dogodkom, ki se je zgodil med 2. in 3. septembrom 2019, ko se je koncentracija z začetnih 0,75 mg/l povečala na 3,08 mg/l. Glede na velikost  $C_r$  sledita dogodka, ki sta se zgodila 22. junija 2018 in 21. decembra 2019. Pri prvem se je začetna koncentracija povečala za 1,81 mg/l (začetna koncentracija je bila 0,80 mg/l), pri drugem pa za 1,76 mg/l (začetna koncentracija je bila 1,52 mg/l). Najmanjše spremembe povečanja koncentracij smo zaznali pri dogodkih, ki sta se zgodila 3. avgusta 2019, ko so začetne koncentracije bile višje od koncentracij, ki so sledile med dogodkom (razredčenje), in 16. novembra 2019, ko se je koncentracija povečala za manj kot 0,1 mg/l (preglednica 12). Relativne spremembe koncentracij med dogodkom so poleg začetne in maksimalne koncentracije odvisne še od koncentracije, ki je bila dosežena ob konici pretoka (enačba 5). Negativne vrednosti  $C_{rs}$  pomenijo, da je prišlo do razredčenja, saj je koncentracija pri konici pretoka nižja od koncentracije na začetku dogodka. Med 43 dogodki smo pri dveh dogodkih izračunali negativne vrednosti  $C_{rs}$ , in sicer za zaporedna dogodka, ki sta se zgodila med 2. in 3. avgustom 2019. Pri prvem dogodku je bilo razredčenje večje, saj je relativna sprememba koncentracije znašala -14,4 %, pri drugem pa -1,41 %. Med dogodkom z 2. na 3. avgust 2019 je bila sicer dosežena relativno visoka maksimalna koncentracija (2,3 mg/l), vendar je bila koncentracija med konico poplavnega vala nižja od začetne koncentracije. Pri dogodku s 3. avgusta 2019 se koncentracije do konca dogodka niso povzpele nazaj na raven ob začetku dogodka.

Količine iznesenega nitratnega dušika pa ne moremo oceniti samo na podlagi koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ , ampak potrebujemo hkratni podatek o volumnu vode, ki je pretekel skozi iztočni profil v časovni enoti (pretok). V preglednici 12 smo zbrali podatke o povprečnem iznosu  $\text{NO}_3\text{-N}$  na časovno enoto [g/min] in maksimalnem iznosu na 20-minutni časovni korak [g]. Največje iznose na časovno enoto ( $Iznos_N$ ) smo izračunali za dogodek s 1. februarja 2019, ko je bilo na minuto iznesenega 1,3 g nitratnega dušika. Sledi mu ravno dogodek med 2. in 3. avgustom 2019, ko smo po enačbi Butturini in sod. (2006) sicer zaznali razredčenje, vendar je bil povprečni iznos relativno velik (1,06 g/min). Maksimalni iznos nitratnega dušika, ki smo ga med posameznim dogodkom zabeležili v časovnem koraku 20 minut, se je zgodil pri dogodku med 1. in 3. februarjem 2019 (82,4 g), ko smo tudi izmerili najvišji pretok v obravnavanem obdobju. Z nekaj več kot 55 g iznesenega nitratnega dušika v 20 minutah mu sledita dogodek z 22. junija 2018 in dogodek, ki se je zgodil med 28. in 30. oktobrom 2018.

Preglednica 12: Razmere koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  in iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  v času padavinskih dogodkov. V preglednici so prikazane najvišje ( $C_{max}$ ) in srednje koncentracije ( $C_{sr}$ ) med dogodkom, absolutna ( $Cr$ ) in relativna sprememba koncentracije med dogodkom ( $C_{rs}$ ) ter srednji ( $Iznos\_N$ ) in najvišji iznos nitratnega dušika med dogodkom ( $Iznos\_max$ ).

Table 12:  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration and export conditions during rainfall events. The table shows the maximum concentrations ( $C_{max}$ ), average concentrations ( $C_{sr}$ ), absolute ( $Cr$ ) and relative changes in concentration ( $C_{rs}$ ), and average ( $Iznos\_N$ ) and maximum exports of nitrate nitrogen during the event ( $Iznos\_max$ ).

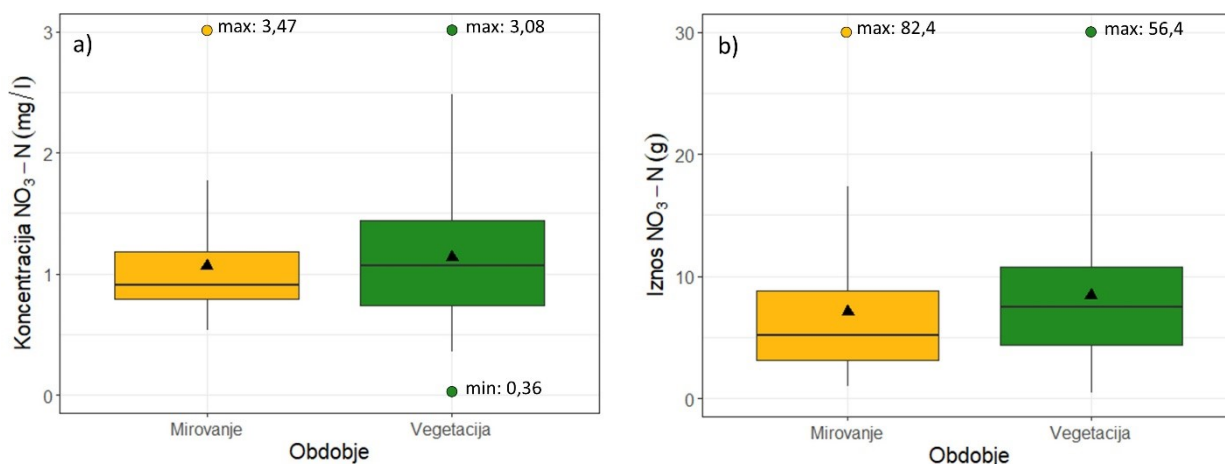
Dogodek	$C_{max}$ [mg/l]	$C_{sr}$ [mg/l]	$Cr$ [mg/l]	$C_{rs}$ [%]	$Iznos\_N$ [g/min]	$Iznos\_max$ [g/20 min]
1	1,76	1,56 ( $\pm 0,18$ )	0,69	39,20	0,77	26,29
2	1,57	1,42 ( $\pm 0,12$ )	0,48	30,57	0,70	19,97
3	1,55	1,33 ( $\pm 0,15$ )	0,44	27,74	0,63	20,05
4	1,80	1,43 ( $\pm 0,32$ )	0,99	34,82	0,16	4,57
5	2,61	1,59 ( $\pm 0,64$ )	1,81	44,20	0,69	56,35
6	1,29	1,17 ( $\pm 0,09$ )	0,24	0,44	0,42	10,98
7	0,98	0,87 ( $\pm 0,09$ )	0,41	37,20	0,34	17,11
8	1,84	1,40 ( $\pm 0,37$ )	1,17	58,45	0,50	23,25
9	1,36	1,16 ( $\pm 0,14$ )	0,43	2,07	0,15	5,56
10	1,22	1,08 ( $\pm 0,12$ )	0,50	18,03	0,23	7,69
11	0,97	0,63 ( $\pm 0,09$ )	0,58	31,78	0,20	9,10
12	0,97	0,79 ( $\pm 0,15$ )	0,61	62,86	0,50	22,15
13	2,69	1,68 ( $\pm 0,40$ )	1,69	36,06	0,76	55,20
14	1,28	1,19 ( $\pm 0,07$ )	0,11	0,00	0,21	6,88
15	1,14	1,09 ( $\pm 0,04$ )	0,10	6,14	0,19	9,56
16	1,20	1,06 ( $\pm 0,11$ )	0,29	3,29	0,07	2,32
17	0,98	0,88 ( $\pm 0,07$ )	0,29	22,32	1,30	82,40
18	0,88	0,80 ( $\pm 0,06$ )	0,23	25,94	0,48	13,35
19	0,75	0,71 ( $\pm 0,03$ )	0,09	11,36	0,35	9,32
20	1,17	0,93 ( $\pm 0,22$ )	0,62	0,00	0,26	7,15
21	1,52	1,16 ( $\pm 0,20$ )	0,64	21,71	0,41	11,57
22	2,11	1,61 ( $\pm 0,48$ )	1,46	4,27	0,92	53,52
23	2,30	1,94 ( $\pm 0,27$ )	0,73	-14,35	1,06	34,65
24	1,42	1,36 ( $\pm 0,03$ )	0,00	-1,41	0,45	11,16
25	1,19	1,14 ( $\pm 0,04$ )	0,16	12,61	0,27	8,47
26	3,08	1,98 ( $\pm 0,67$ )	2,33	26,48	0,66	23,93
27	0,75	0,71 ( $\pm 0,04$ )	0,18	19,97	0,17	4,76
28	0,81	0,74 ( $\pm 0,04$ )	0,09	7,93	0,17	5,20
29	0,85	0,78 ( $\pm 0,05$ )	0,25	26,78	0,19	5,42
30	0,92	0,84 ( $\pm 0,07$ )	0,26	23,27	0,31	10,44
31	0,97	0,85 ( $\pm 0,08$ )	0,21	7,66	0,36	14,46
32	0,86	0,84 ( $\pm 0,02$ )	0,07	6,41	0,23	6,35
33	0,97	0,94 ( $\pm 0,03$ )	0,11	3,94	0,40	11,08
34	0,82	0,73 ( $\pm 0,08$ )	0,22	22,70	0,23	8,40
35	0,94	0,81 ( $\pm 0,10$ )	0,26	24,68	0,32	14,36

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 12

36	3,28	2,78 ( $\pm 0,53$ )	1,76	49,09	0,98	43,71
37	3,47	3,00 ( $\pm 0,26$ )	0,78	6,05	0,85	24,32
38	1,18	1,05 ( $\pm 0,09$ )	0,37	29,92	0,11	3,10
39	1,34	0,95 ( $\pm 0,31$ )	0,72	48,01	0,26	14,02
40	1,50	1,21 ( $\pm 0,18$ )	0,50	33,65	0,31	12,92
41	1,39	1,12 ( $\pm 0,17$ )	0,46	23,63	0,18	4,80
42	0,86	0,75 ( $\pm 0,09$ )	0,23	5,88	0,10	2,74
43	0,78	0,73 ( $\pm 0,04$ )	0,14	10,79	0,14	3,18

Podobno kot v primeru razmer med baznim odtokom smo izmerjene 20-minutne podatke v času padavinskih dogodkov razdelili na obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (slika 25). Medtem ko so med baznim odtokom opazne izrazite razlike pri koncentracijah in iznosih med obema obdobjema, so povprečne vrednosti koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskimi dogodki v obeh obdobjih praktično identične z nekoliko višjim standardnim odklonom in koeficientom variacije v obdobju vegetacije ( $1,14 \pm 0,46$  mg/l oziroma  $1,13 \pm 0,58$  mg/l). Mediani pri obeh obdobjih kažeta na nižje vrednosti od povprečnih, tj. 1,07 mg/l v obdobju vegetacije in 0,92 mg/l v obdobju mirovanja.



Slika 25: Primerjava razmer med padavinskimi dogodki v obdobju vegetacije in obdobju mirovanja z vidika koncentracij v vodotoku (a) in količine iznosa nitratnega dušika s porečja (b) (krogci predstavljajo najmanjše in največje vrednosti ubežnikov 20-minutnih podatkov)

Figure 25: Comparison of inter-event conditions between the vegetation period and dormancy from in-stream  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (a) and export flux (b) points of view (dots represent the lowest and the highest values of outliers of 20 min data, respectively)

Pri iznosih nitratnega dušika smo izračunali identični mediani (1,72 g/20 min), medtem ko smo pri povprečnih vrednostih iznosov ugotovili nižje vrednosti v obdobju vegetacije ( $4,61 \pm 5,70$  g/20 min) kot v obdobju mirovanja ( $8,54 \pm 9,35$  g/20 min). S tem sicer še ne moremo potrditi ali zavreči teze, da so vplivi vegetacijskih razmer na koncentracije nitratnega dušika v vodotoku pogojeni s hidrometeorološkimi razmerami. V nadaljevanju smo zato uporabili multivariatne statistične analize, ki

poleg obdobja v letu, preko katerega opišemo aktivnost vegetacije, upošteva še druge potencialne dejavnike.

Relevantnost izmerjenih vrednosti koncentracij smo zagotavljali z rednimi laboratorijskimi meritvami. Poleg tega pa na vodotokih Gradaščica (Dvor), katere pritok je tudi vodotok Kuzlovec, in dolvodno na Malem Grabnu (Dolgi most) opravlja meritve v sklopu monitoringa kakovosti vode površinskih voda tudi ARSO. V preglednici 13 so zbrani podatki analiz vzorčenj v obdobju 2008–2019 o dušikovih spojinah, vključujoč tudi koncentracije nitratnega dušika. Koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$ , merjene na reki Gradaščici, so primerljive s povprečjem naših meritev, določenim za celotno dvoletno obdobje kontinuiranih meritev, s čimer lahko potrdimo ustreznost meritev, izvedenih z multiparametrsko sondo in kontroliranjem le-teh s posamičnimi analizami vzorčenj s spektrofotometrom. Ne glede na primerljivost povprečja pa s sporadičnimi vzorčenji in analizami ne dobimo informacij o hidrološko pogojeni časovni dinamiki koncentracij nitratnega dušika in informacij o ekstremnih vrednostih, do katerih pride ob padavinskih dogodkih (preglednica 12) in lahko bistveno vplivajo na masnobilančne izračune.

Preglednica 13: Podatki o meritvah dušikovih spojin na vodotokih Gradaščica in Mali Graben v obdobju 2008–2019 (ARSO, 2020c)

Table 13: Data about nitrogen compounds measurements on the Gradaščica and Mali Graben rivers in the period 2008–2019 (ARSO, 2020c)

Vodotok-merilno mesto	Datum	Skupni dušik TN	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_4$	$\text{NO}_2$	$\text{NO}_3$	$\text{NO}_3\text{-N}$
Mali Graben-Dolgi most	12. 02. 2008	0,9		0,093	0,025	3,57	0,81
Mali Graben-Dolgi most	14. 05. 2008	0,99		0,029	0,033	3,49	0,79
Mali Graben-Dolgi most	18. 08. 2008	1,2		0,071	0,043	4,12	0,93
Mali Graben-Dolgi most	17. 11. 2008	0,82		0,067	0,036	4,04	0,91
Mali Graben-Dolgi most	18. 03. 2010	0,92	<0,008	0,081	0,025	3,66	0,83
Mali Graben-Dolgi most	17. 06. 2010	1,5	<0,008	0,113	0,111	3,67	0,83
Mali Graben-Dolgi most	16. 08. 2010	1,4	<0,008	0,054	0,041	4,1	0,93
Mali Graben-Dolgi most	20. 12. 2010	0,91	<0,008	0,083	0,02	3,3	0,75
Gradaščica-Dvor	16. 2. 2012	0,78	<0,008	0,018	0,013	3,3	0,75
Gradaščica-Dvor	21. 05. 2012	0,82	<0,008	0,067	0,027	3,29	0,74
Gradaščica-Dvor	11. 07. 2012	0,97	<0,008	0,099	0,074	3,64	0,82
Gradaščica-Dvor	21. 11. 2012	0,9	<0,008	0,054	0,009	3,52	0,80
Mali Graben-Dolgi most	26. 01. 2015	0,85	<0,008	0,089	0,026	3,65	0,82
Mali Graben-Dolgi most	14. 07. 2015	0,92	<0,008	0,036	0,029	3,51	0,79
Mali Graben-Dolgi most	12. 08. 2015	0,86	<0,008	0,04	0,038	3,5	0,79
Mali Graben-Dolgi most	08. 09. 2015	1,2	<0,008	0,046	0,037	4,46	1,01
Mali Graben-Dolgi most	06. 10. 2015	1	<0,008	0,047	0,056	3,83	0,87
Mali Graben-Dolgi most	11. 11. 2015	0,82	<0,008	0,05	0,044	3,55	0,80

se nadaljuje ...



... nadaljevanje preglednice 13

Mali Graben-Dolgi most	09. 12. 2015	0,97	<0,008	0,063	0,034	3,04	0,69
Gradaščica-Dvor	20. 02. 2019	0,98	<0,01	0,068	0,0033	3,88	0,88
Gradaščica-Dvor	18. 04. 2019	0,77	<0,01	0,028	0,009	3,2	0,72
Gradaščica-Dvor	19. 06. 2019	0,77	<0,01	0,019	0,0072	3,04	0,69
Gradaščica-Dvor	12. 08. 2019	1,3	<0,01	<0,01	0,0073	4	0,90
Gradaščica-Dvor	28. 10. 2019	0,88	<0,01	<0,01	0,013	3,26	0,74
Gradaščica-Dvor	09. 12. 2019	0,92	<0,01	0,016	0,004	3,9	0,88

#### 4.6 Režimi iznosa nitratnega dušika s porečja

Za določitev iznosnih režimov nitratnega dušika s porečja Kuzlovec smo uporabili 20-minutne podatke meritev koncentracije nitratnega dušika ( $C$ ) in pretoka ( $Q$ ). Pred analizo smo podatke razdelili na 43 dogodkov, kot je opisano v poglavju 4.5.2. Za vsakega od 43 dogodkov smo režim določili na podlagi naklona regresijske premice  $\log C$ - $\log Q$ , razmerja med koeficientoma variacije  $CV_C/CV_Q$ , kombinacije naklona regresijske premice in razmerja med koeficientoma variacije ter z izračunom relativne spremembe koncentracije med dogodkom ( $C_{rs}$ ) (preglednica 14).

Z razmerjem  $CV_C/CV_Q$  opišemo relativno varianco koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  v primerjavi z varianco pretoka, s katero upoštevamo spremenljivost pretoka in spremenljivost koncentracije kot rezultat napake pri pretoku in naklona  $b$  (Thompson in sod., 2011; Musolff in sod., 2015). Ne glede na to pa predznak naklona  $b$  ne vpliva na varianco koncentracije. Zato lahko naklon  $b$  upoštevamo kot posebni kazalnik kemodinamičnosti (Musolff in sod., 2015), kjer vrednosti  $b < 0$  kažejo vzorce razredčenja, vrednosti  $b > 0$  pa vzorce povečanih koncentracij.

Preglednica 14: Naklon  $b$ , razmerje  $CV_C/CV_Q$  in relativne spremembe koncentracije  $C_{rs}$  za posamezni dogodek

Table 14: Slope  $b$ , ratio  $CV_C/CV_Q$ , and relative change in concentration  $C_{rs}$  for an individual event

Dogodek	Začetek	Konec	$b$	$CV_C/CV_Q$	$C_{rs}$ [%]
1	4. 05. 2018 08:20	4. 05. 2018 15:20	0,38*	0,57	39,20
2	8. 05. 2018 20:20	9. 05. 2018 05:40	0,46*	0,60	30,57
3	14. 05. 2018 22:00	15. 05. 2018 10:20	0,63*	0,77	27,74
4	13. 06. 2018 05:00	13. 06. 2018 07:00	0,15	1,23	34,82
5	22. 06. 2018 00:20	22. 06. 2018 13:00	0,37*	0,47	44,20
6	25. 06. 2018 00:40	25. 06. 2018 10:20	-0,10	0,63	0,44
7	8. 07. 2018 17:40	8. 07. 2018 17:40	0,06	0,23	37,20
8	10. 07. 2018 23:20	12. 07. 2018 03:00	0,46*	0,78	58,45
9	13. 07. 2018 02:20	13. 07. 2018 08:40	-0,01	0,32	2,07
10	21. 07. 2018 15:20	21. 07. 2018 20:20	-0,15	0,35	18,03
11	25. 08. 2018 09:40	26. 08. 2018 16:20	0,23*	0,26	31,78

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 14

12	30. 08. 2018 18:40	31. 08. 2018 00:40	0,47*	0,65	62,86
13	28. 10. 2018 02:00	30. 10. 2018 04:20	0,32*	0,43	36,06
14	2. 11. 2018 10:20	3. 11. 2018 04:40	0,10*	0,19	0,00
15	5. 11. 2018 20:00	6. 11. 2018 11:40	0,05*	0,08	6,14
16	7. 12. 2018 23:40	8. 12. 2018 08:40	-0,19*	0,42	3,29
17	1. 02. 2019 08:40	3. 02. 2019 02:40	0,12*	0,13	22,32
18	5. 04. 2019 07:40	5. 04. 2019 18:20	0,49*	0,55	25,94
19	10. 04. 2019 19:40	12. 04. 2019 06:20	0,29*	0,48	11,36
20	27. 07. 2019 21:20	28. 07. 2019 00:00	-0,84*	0,98	0,00
21	28. 07. 2019 06:40	29. 07. 2019 00:40	-0,14	1,63	21,71
22	2. 08. 2019 10:00	2. 08. 2019 13:00	-0,21	0,28	4,27
23	2. 08. 2019 19:40	3. 08. 2019 02:40	-0,22*	0,32	-14,35
24	3. 08. 2019 15:20	3. 08. 2019 15:40	-0,02	0,13	-1,41
25	13. 08. 2019 19:40	14. 08. 2019 04:40	0,00	0,20	12,61
26	2. 09. 2019 23:40	3. 09. 2019 05:40	0,18	1,61	26,48
27	5. 11. 2019 00:40	6. 11. 2019 02:20	0,24*	0,36	19,97
28	6. 11. 2019 09:20	7. 11. 2019 02:40	0,15*	0,31	7,93
29	8. 11. 2019 20:00	9. 11. 2019 12:20	0,20*	0,50	26,78
30	12. 11. 2019 04:40	13. 11. 2019 20:00	0,19*	0,25	23,27
31	15. 11. 2019 12:00	16. 11. 2019 07:20	0,16*	0,24	7,66
32	16. 11. 2019 20:20	17. 11. 2019 07:00	0,02*	0,20	6,41
33	17. 11. 2019 16:00	18. 11. 2019 05:00	-0,15	0,24	3,94
34	27. 11. 2019 15:00	28. 11. 2019 12:00	0,24*	0,29	22,70
35	1. 12. 2019 17:40	2. 12. 2019 18:40	0,20*	0,22	24,68
36	21. 12. 2019 09:00	21. 12. 2019 23:00	0,62*	0,57	49,09
37	22. 12. 2019 06:40	22. 12. 2019 18:40	0,18*	0,44	6,05
38	25. 02. 2020 20:00	26. 02. 2020 16:40	0,41*	0,83	29,92
39	1. 03. 2020 05:40	2. 03. 2020 00:40	0,55*	0,61	48,01
40	2. 03. 2020 14:00	4. 03. 2020 05:00	0,49*	0,56	33,65
41	6. 03. 2020 01:20	6. 03. 2020 13:40	0,70*	1,65	23,63
42	30. 03. 2020 06:40	30. 03. 2020 17:00	-0,24*	0,70	5,88
43	14. 04. 2020 08:20	14. 04. 2020 14:40	-0,21	0,80	10,79

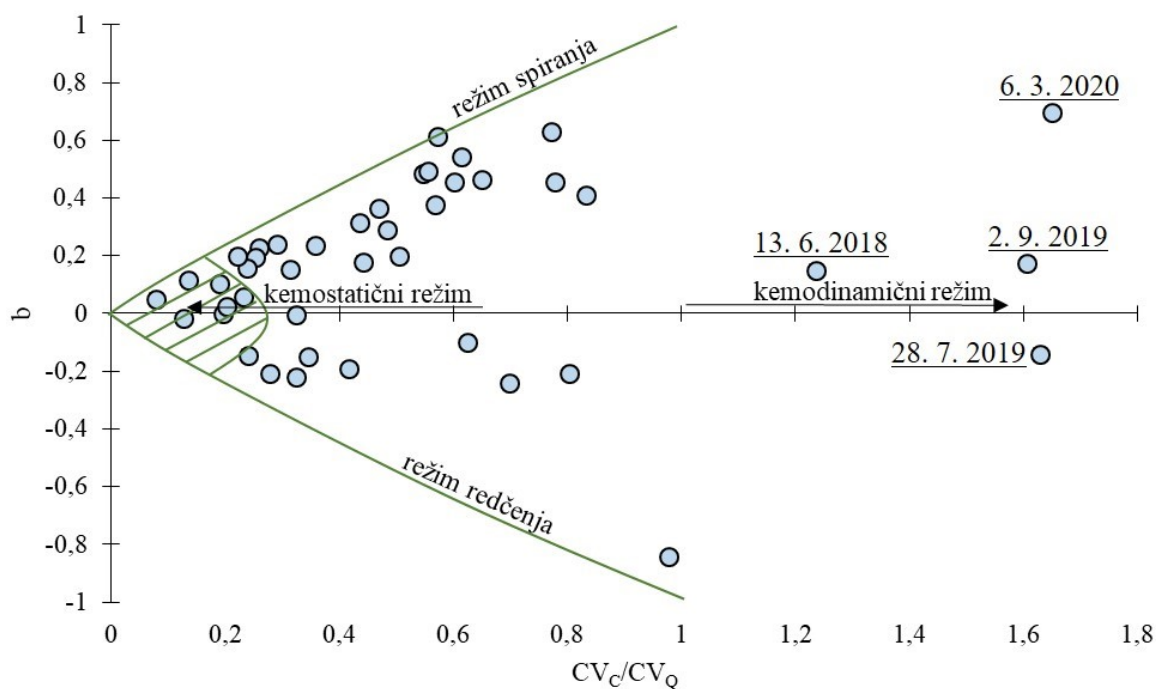
\*statistično značilen naklon s stopnjo zaupanja  $\alpha = 0,05$ 

Razmerje med koeficientoma variacije  $CV_C/CV_Q$  je bilo pri štirih dogodkih, ki so se zgodili 13. junija 2018, 28. julija 2019, 2. septembra 2019 in 6. marca 2020, višje od 1, kar kaže na kemodinamične dogodke (koncentracija se bistveno spreminja glede na spremembe pretoka). Glede na kazalnik  $CV_C/CV_Q$  so bile pri vseh ostalih dogodkih vrednosti nižje od 1, izrazito nizke ( $CV_C/CV_Q < 0,2$ ) pa so bile pri dogodkih 14, 15, 17, 24, 25 in 32 (preglednica 14, slika 26), katerih razmere lahko opredelimo kot kemostatične (koncentracija se ne spreminja bistveno s pretokom). Pri 12 dogodkih od 43 (preglednica 14) smo izračunali negativno odvisnost med logaritmom koncentracij in logaritmom

pretoka, kar v splošnem nakazuje na režim redčenja. Za izračune statističnih vrednosti, ki temeljijo na centralnih momentih (aritmetična sredina, varianca), je znano, da so manj robustni, če so v vzorcu podatkov prisotni ubežniki. Ne glede na to, da v našem primeru analiziramo časovne vrste, pri katerih so ekstremne vrednosti izrednega pomena in jih zato ne moremo izločiti iz vzorca, smo preverili, ali se rezultati režimov iznosa s  $CV_C/CV_Q$  bistveno razlikujejo, če uporabimo robustnejšo mero razpršenost. Uporabili smo koeficient, ki temelji na vrednostih prvega (Q1) in tretjega kvartila (Q3) in je definiran kot:  $(Q3-Q1)/(Q3+Q1)$ . Ugotovili smo, da je pri 20 dogodkih bila razlika med obema merama manj kot 0,1, pri 13 dogodkih pa med 0,1 in 0,2. Poleg tega rezultati kažejo, da bi razlika med obema merama vplivala na opredelitev režima samo pri 4 dogodkih, in sicer sta dogodka 3 (14. maj 2018) in 42 (30. marec 2020) izkazala bolj kemodinamični odziv (vrednost razmerja 1,21 in 3,32), dogodek 4 (13. junij 2018) manj kemodinamični odziv (vrednost razmerja 0,56), dogodek 27 (5. november 2019) pa bolj kemostatični odziv (vrednost razmerja 0,20). V obeh primerih uporabe mer razpršenosti podatkov prevladuje kemodinamični režim iznosa nitratnega dušika s porečja.

Na drugi strani vrednosti  $b$  blizu 1 kažejo na izrazit režim spiranja, vrednosti okoli 0 pa na kemostatični režim. Thompson in sod. (2011) menijo, da je lahko uporaba naklona  $b$  zavajajoča, saj v primerih majhne spremenljivosti koncentracij ( $b \approx 0$ ) kaže na kemostatičnost. Zato Thompson in sod. (2011) priporočajo hkratno uporabo obeh kazalnikov, tj.  $CV_C/CV_Q$  in naklona  $b$ . Musolff in sod. (2015) so režime iznosa grafično določili na podlagi obeh kazalnikov. Glede na to klasifikacijo smo dogodke iz dvoletnega obdobja meritev opredelili tudi za porečje Kuzlovca (slika 26).

Pri 58,1 % dogodkov smo na podlagi obeh kazalnikov identificirali režim spiranja  $\text{NO}_3\text{-N}$  s porečja. Od tega lahko po klasifikaciji Musolffa in sod. (2015) tri dogodke (13. junij 2018, 28. julij 2019, 2. september 2019) uvrstimo med dogodke, za katere je značilen režim spiranja z visoko reaktivnostjo (prikazano na sliki 26, skrajno desno), enega (6. marec 2020) pa celo med dogodke, za katere je značilno, da je iznos pogojen s pragom (npr. erozijo tal). Sedem dogodkov (16,3 %) z nizkima vrednostma naklona  $b$  in razmerja  $CV_C/CV_Q$  smo opredelili kot dogodke s kemostatičnim režimom, za katerega je značilno, da se je koncentracija  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom malo spreminjala napram spremembam pretoka. Gre za dogodke, ki so se zgodili 8. julija 2018, 2. in 5. novembra 2018, 1. februarja 2019, 3. in 13. avgusta 2019 ter 16. novembra 2019. Ostale dogodke (25,6 %) smo uvrstili med dogodke, pri katerih je prišlo do razredčenja (slika 26).



Slika 26: Določitev režimov iznosov NO<sub>3</sub>-N s porečja Kuzlovec na podlagi naklona  $b$  in razmerja  $CV_c/CV_Q$

Figure 26: Determination of NO<sub>3</sub>-N export regimes from the Kuzlovec river catchment based on the slope  $b$  and ratio  $CV_c/CV_Q$

Glede na kazalnik relativne spremembe ( $C_{rs}$ ) smo samo dva dogodka (dogodek 2. avgusta 2019 in sledeči dogodek med 2. in 3. avgustom 2019) opredelili kot dogodka, pri katerih je prišlo do razredčenja. Glede na naravo enačbe za izračun relativne spremembe pri dveh dogodkih nismo zaznali spremembe koncentracije, vendar pa je to zgolj posledica časovnega zamika iznosa; v času, ko je prišlo do konice pretoka, se začetna koncentracija še ni spremenila. Ostale dogodke smo zaradi pozitivnih vrednosti  $C_{rs}$  uvrstili med dogodke, pri katerih je prišlo do spiranja NO<sub>3</sub>-N s porečja (preglednica 14).

Na podlagi povprečnih vrednosti iznosov nitratnega dušika med padavinskimi dogodki in v preostalem obdobju smo izračunali, kolikšen delež celotne iznesene količine predstavljajo padavinski dogodki. Upoštevali smo celotno obdobje meritev (od aprila 2018 do aprila 2020), pri čemer so padavinski dogodki z več kot 10 mm padavin trajali skupaj približno 75 dni. Količina nitratnega dušika s porečja vodotoka Kuzlovec, iznesena med padavinskimi dogodki upoštevajoč povprečni iznos (8,63 g/20 min), znaša 666 g/ha. Za preostali čas smo upoštevali razmere v času baznega odtoka, ki v dvoletnem obdobju meritev predstavljajo 656 dni (povprečni iznos nitratnega dušika med baznim odtokom znaša 2,5 g/20 min), izračunani iznos v obdobju pa znaša 1686 g/ha. Izkazalo se je, da količina iznesenega nitratnega dušika med padavinskimi dogodki, ki predstavljajo približno 10 % časa, znaša dobrih 28 % celotne iznesene količine. Za primerjavo, na kmetijskem porečju reke Save v Franciji so izračunali, da iznosi med poplavnimi dogodki predstavljajo dobrih 60 % celotnega letnega iznosa pri 16–20 % deležu

trajanja (Oeurng in sod., 2010). Na podlagi tega lahko zaključimo, da količine iznesenega  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskimi dogodki tudi na naravnih, gozdnatih porečjih predstavljajo pomemben delež in bi jih bilo treba upoštevati tudi v računih masnih bilanc (Sapač in sod., 2020b).

## 5 ANALIZA IN RAZPRAVA

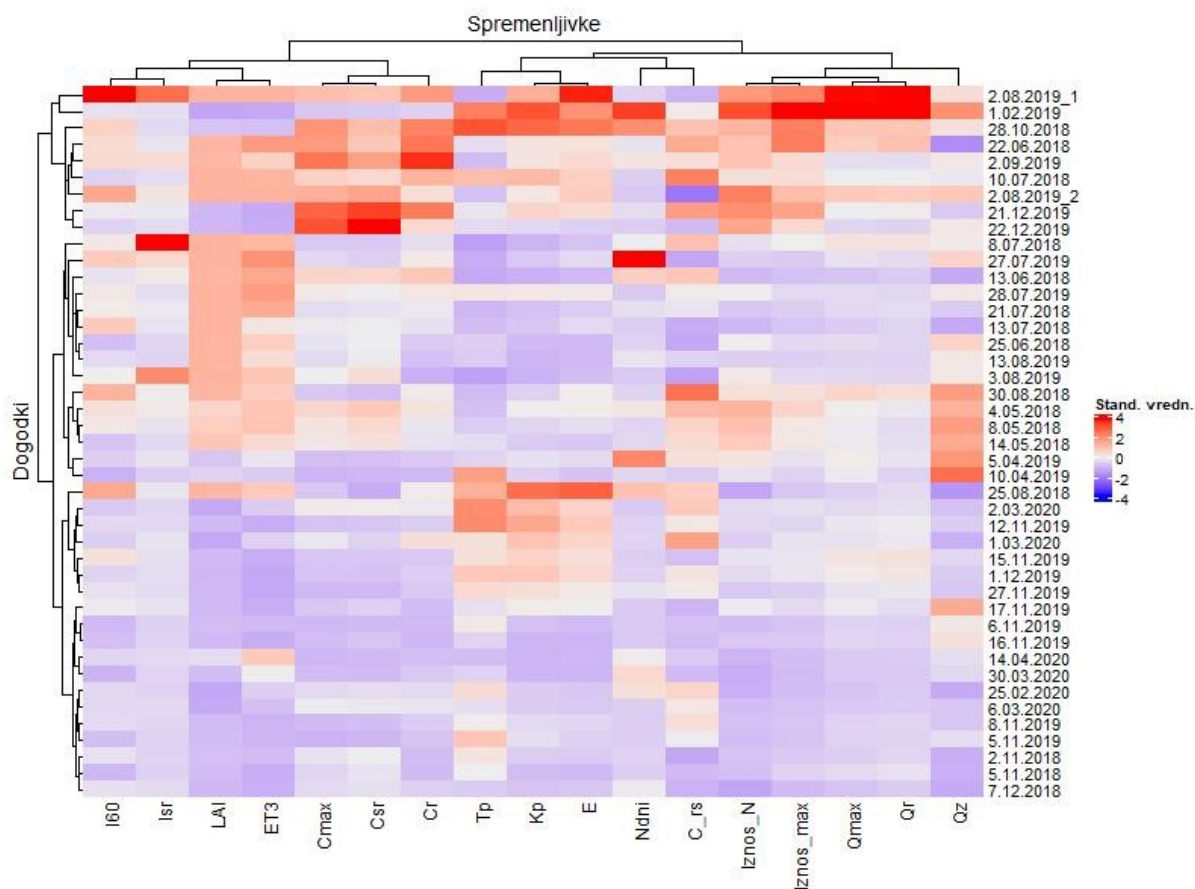
### 5.1 Vpliv lastnosti padavinskih dogodkov, hidroloških in vegetacijskih razmer na spremembe koncentracij $\text{NO}_3\text{-N}$ v vodotoku in iznose s porečja

Za analizo vplivov lastnosti padavinskih dogodkov na dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku smo uporabili: hierarhično razvrščanje ter razvrščanje z metodo voditeljev (k-means), metodo glavnih komponent (PCA) in modele multiple linearne regresije (MLR). Z metodo PCA smo zmanjšali nabor spremenljivk in določili najvplivnejše spremenljivke. Metodo PCA smo uporabili na vseh hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivkah hkrati. Ker pa delež nemerjenih porečij v primerjavi z merjenimi (z vidika hidroloških meritev) prevladuje, smo z uporabo multiple linearne regresijskega modela preverili tudi možnost pojasnitve iznosov nitratnega dušika samo na podlagi osnovnih spremenljivk lastnosti padavin ( $Kp$ ,  $Tp$  in  $I60$ ).

#### 5.1.1 Rezultati hierarhične metode razvrščanja

Namen hierarhičnega razvrščanja enot v skupine, ki se uvršča med metode raziskovanja podatkov, je bil dobiti vpogled v podatke z vidika podobnosti oziroma različnosti padavinskih dogodkov, ki smo jih opisali s 17 spremenljivkami ( $Tp$ ,  $Kp$ ,  $Isr$ ,  $I60$ ,  $E$ ,  $ET3$ ,  $Qmax$ ,  $Qr$ ,  $Qz$ ,  $Ndni$ ,  $LAI$ ,  $Csr$ ,  $Cmax$ ,  $Cr$ ,  $C_{rs}$ ,  $Iznos\_N$ ,  $Iznos\_max$ ). Poleg tega smo na podlagi dendrograma kot rezultata hierarhičnega razvrščanja v kombinaciji s toplotno karto sklepali o ustreznem številu skupin, ki smo ga uporabili pri postopku razvrščanja enot v skupine pri metodi voditeljev. Za določitev razdalj, s katerimi opišemo različnost med dogodki, smo uporabili kvadrat evklidske razdalje, za razvrščanje v skupine pa najprej Wardovo metodo na matriki kvadratov evklidskih razdalj in nato metodo voditeljev. Zaradi razlik v velikostnih razredih spremenljivk in njihove variabilnosti smo podatke pred razvrščanjem standardizirali. Rezultate hierarhičnega razvrščanja smo prikazali z informativno toplotno karto (slika 27), ki poleg dendrograma dogodkov prikazuje še dendrogram spremenljivk, katerih razvrščanje je bilo narejeno z Wardovo metodo, razdalje pa so bile določene s Spearmanovim koeficientom korelacije. Levi dendrogram dogodkov nakazuje, da bi bilo dogodke smiselno razvrstiti v štiri skupine. Gledano od vrha proti dnu dendrograma, prvo skupino predstavljata dva dogodka, drugo skupino sedem dogodkov, tretjo skupino 15 dogodkov, četrto pa 19 dogodkov. Po drugi strani vidimo, katere spremenljivke so povezane med seboj. Spremenljivki intenzitete padavin sta najbolj povezani s sezonskima spremenljivkama  $LAI$  in  $ET3$ . Posebno skupino med seboj povezanih spremenljivk tvorijo spremenljivke najvišje in srednje koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom in absolutne spremembe koncentracije. Na drugi strani je odražena povezanost spremenljivk iznosov  $\text{NO}_3\text{-N}$  in spremenljivk pretoka ( $Qmax$ ,  $Qr$ ,  $Qz$ ). Zanimiva je tudi odražena povezava med številom predhodnih dni brez padavin, višjih od 10 mm, in relativno

spremembo koncentracije med dogodkom. Spremenljivke, ki opišejo lastnosti padavin ( $Tp$ ,  $Kp$ ,  $E$ ) glede na Spearmanov koeficient korelacije, tvorijo posebno skupino.

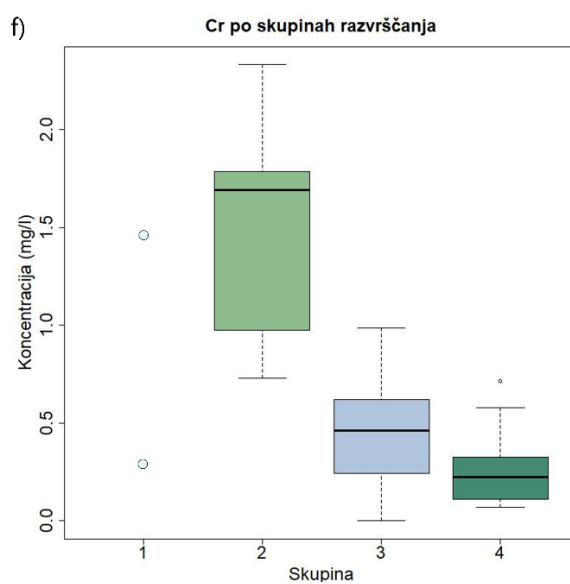
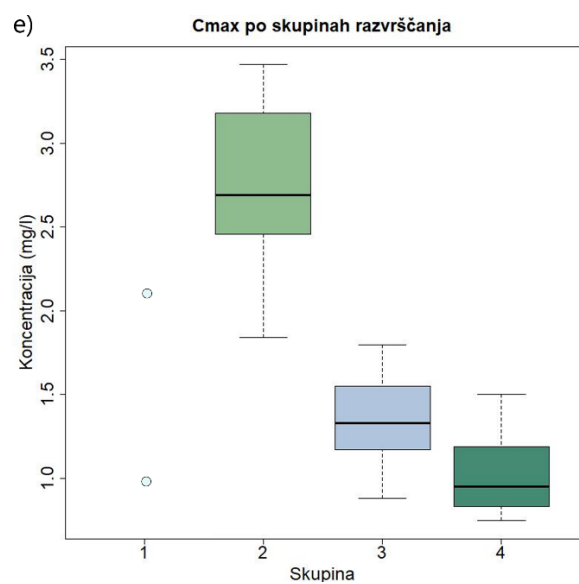
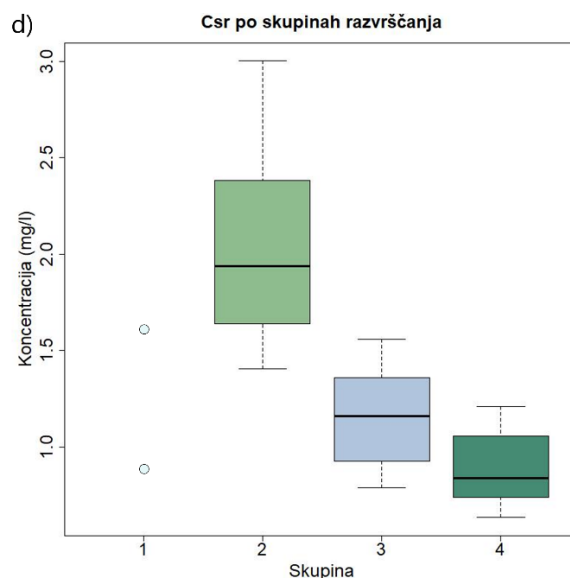
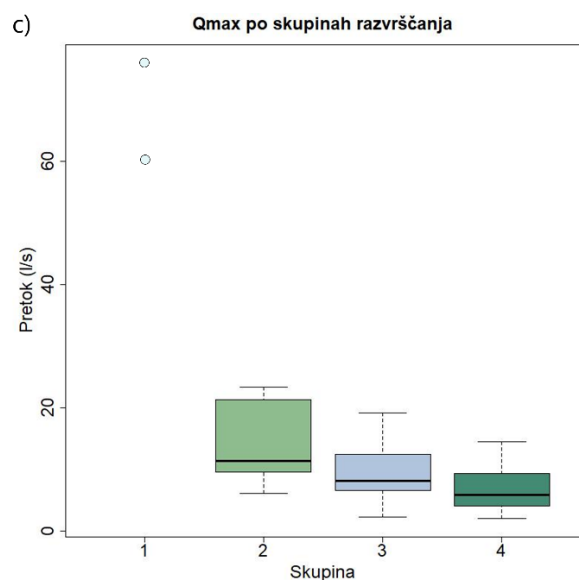
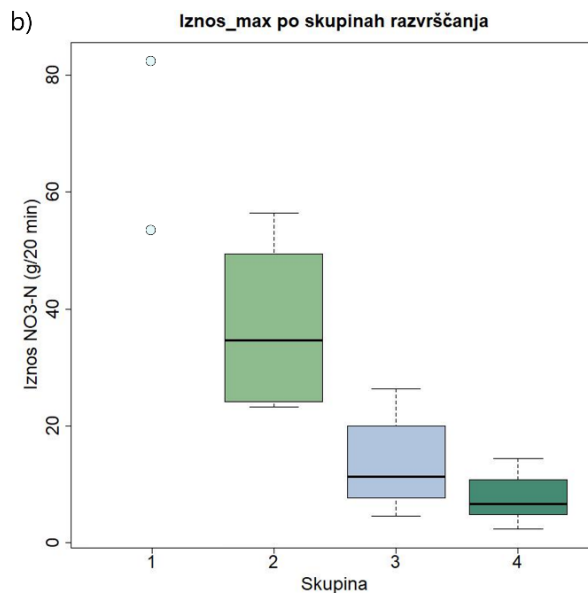
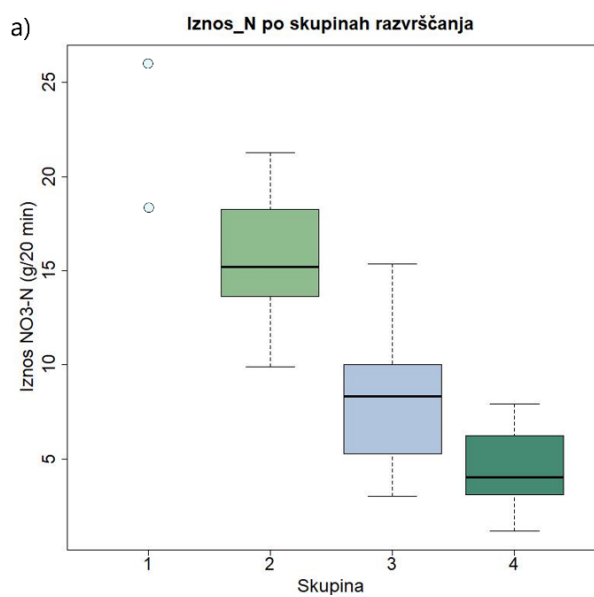


Slika 27: Prikaz standardiziranih vrednosti spremenljivk za opis padavinskih dogodkov z dodanima dendrogramoma. Na vrhu je dendrogram spremenljivk z Wardovo metodo na Spearmanovih koeficientih korelacije, levo pa dendrogram dogodkov z Wardovo metodo na kvadratih evklidskih razdalj.

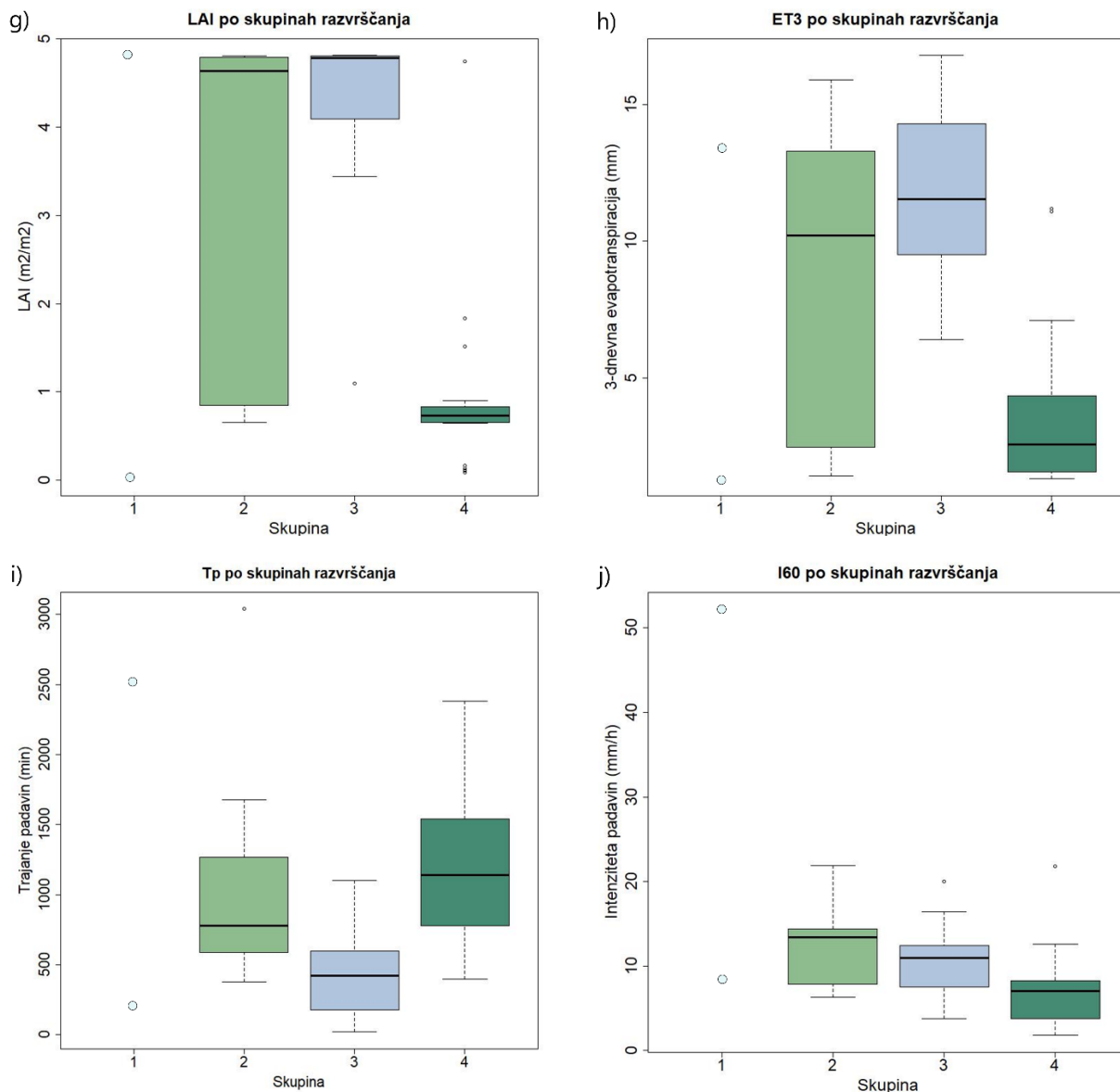
Figure 27: Representation of standardized values of variables for description of rainfall events with added dendrograms. On the top of the graph is a dendrogram for the variables based on the Ward method and Spearman correlation coefficient, on the left hand side of the graph, there is a dendrogram of the events based on the Ward method and squared Euclidean distances.

### 5.1.2 Rezultati razvrščanja z metodo voditeljev

Isti nabor spremenljivk, kot smo ga uporabili pri hierarhičnem razvrščanju, smo uporabili v metodi razvrščanja z metodo voditeljev ( $k$ -means), in sicer v štiri skupine ( $k = 4$ ). Rezultati kažejo, da je razvrstitev dogodkov v štiri skupine smiselna, saj pride do razlike pri razvrstitvi samo pri enem dogodku (10. april 2019), ki je za razliko od hierarhičnega razvrščanja uvrščen v četrto skupino (prej v tretjo), prav tako pa večkratna ponovitev metode daje enake rezultate, kar kaže na stabilno razvrstitev v štiri skupine. Poskusili smo še z razvrščanjem v tri skupine, kjer pa so se rezultati hierarhičnega razvrščanja in razvrščanja z metodo voditeljev bistveno razlikovali glede na to, kateri dogodki so bili razvrščeni v isto skupino, poleg tega pa je večkratna ponovitev metode voditeljev dala različne razvrstitve dogodkov v tri skupine.







Slika 28: Porazdelitev vrednosti nekaterih spremenljivk padavinskih dogodkov po skupinah, dobljenih z metodo voditeljev

Figure 28: Distribution of values of some variables of rainfall events by groups obtained by the k-means method

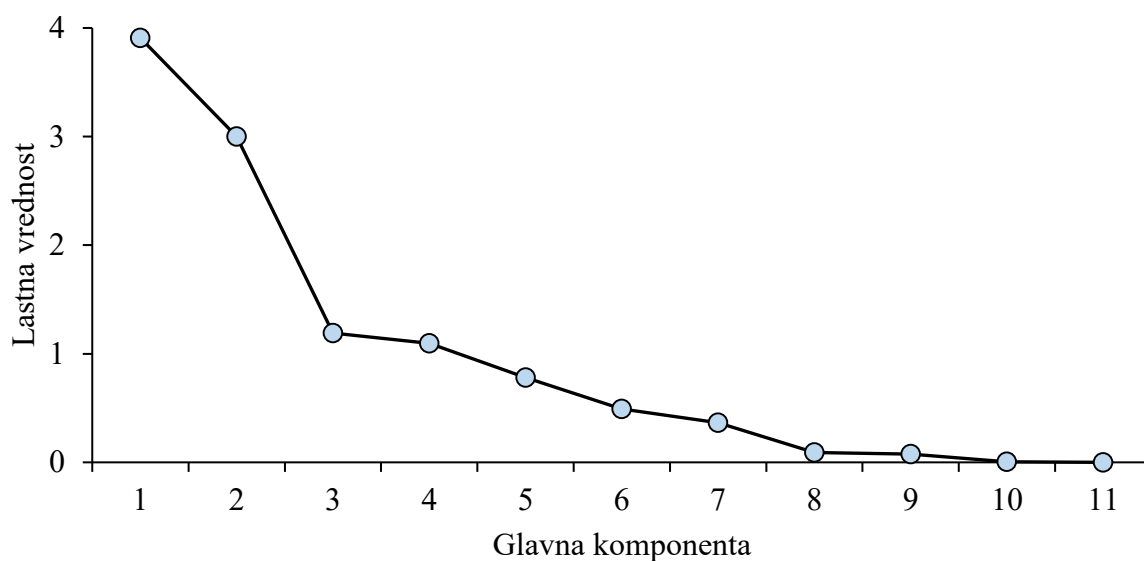
Obe uporabljeni metodi razvrščanja torej dajeta zelo podobne rezultate razvrstitve padavinskih dogodkov v skupine. Za prvo skupino, kjer sta dogodka s 1. februarja 2019 in prvi od dogodkov z dne 2. avgusta 2019, so značilni veliki srednji in maksimalni iznosi nitratnega dušika kot tudi visoki pretoki (slika 28, a, b, c), ki so v primeru poletnega dogodka posledica predvsem visokih intenzitet, v primeru zimskega dogodka pa velikih količin in trajanja padavin (slika 28, i, j). Dogodkom v drugi skupini so skupne visoke koncentracije nitratnega dušika med dogodkom (srednje, maksimalne in absolutna sprememba) (slika 28, d, e, f), dogodki pa so se zgodili v različnih delih leta. Za tretjo in četrto skupino, v katerih je skupaj razvrščenih 34 dogodkov, lahko ugotovimo, da se odtenki barv toplotne karte (slika 27) ločijo predvsem pri spremenljivkah *LAI* in *ET3*, ki imata višje vrednosti v tretji skupini (slika 28, g,

h), in pri spremenljivki  $Tp$ , ki ima višje vrednosti v četrti skupini (slika 28, i). Omenjene spremenljivke imajo izrazito sezonsko spremenljivost, zato ni presenetljiva ugotovitev, da so se vsi dogodki v tretji skupini zgodili v obdobju vegetacije, večina dogodkov iz četrte skupine pa v obdobju mirovanja. V četrti skupini so se od 20 dogodkov štirje zgodili v obdobju mirovanja glede na določene mejnike fenoloških faz, predstavljene v poglavju 3.3.3. Podrobnejši pregled teh dogodkov pokaže, da so se trije zgodili na prehodu iz ene fenološke faze v drugo (10. april 2019, 14. april 2020, 30. marec 2020) eden pa sredi obdobja vegetacije (25. avgust 2018). Za slednji dogodek je bila značilna velika količina padavin in daljše trajanje padavin, kar so karakteristike jesensko-zimskih padavinskih dogodkov (Kobold in Sušelj, 2004). Z vidika spremenljivk, s katerimi opišemo spremembo koncentracije in iznosov nitratnega dušika s porečja, je med največjima skupinama in znotraj njiju (tretja in četrta skupina) razvidna velika raznolikost, kar kaže na to, da obdobje leta, v katerem se je zgodil dogodek, ni neposredni pokazatelj višjih/nizjih koncentracij oziroma iznosov nitratnega dušika.

### 5.1.3 Rezultati analize glavnih komponent (PCA)

V analizo glavnih komponent (PCA) smo vključili 11 najpogostejših spremenljivk, s katerimi opisujemo padavinske dogodke, hidrološke razmere na porečju in vpliv sezonskosti vegetacije: količino padavin ( $Kp$ ), trajanje padavin ( $Tp$ ), srednjo intenziteto padavin ( $Isr$ ), maksimalno 60-minutno izmerjeno intenziteto padavinskega dogodka ( $I60$ ), kinetično energijo padavinskega dogodka ( $E$ ), predhodno tridnevno evapotranspiracijo ( $ET3$ ), število dni pred dogodkom brez padavin, višjih od 10 mm ( $N\_dni$ ), indeks listne površine ( $LAI$ ), začetni pretok ( $Qz$ ), razpon pretoka ( $Qr$ ) in najvišji pretok ( $Qmax$ ). V analizi PCA smo prav tako kot pri razvrščanju dogodkov v skupine uporabili standardizirane vrednosti spremenljivk (povprečje 0, standardni odklon 1), s čimer smo zagotovili enakovredno pomembnost vseh spremenljivk v analizi PCA.

Rezultat PCA je nov niz spremenljivk, ki jih imenujemo glavne komponente (PC) in so v bistvu linearna kombinacija začetnih spremenljivk (Kassambara, 2017b). Enotnega pravila oziroma kriterija za določitev ustreznega števila glavnih komponent za nadaljnje analize ni. V nalogi smo upoštevali Kaiserjevo pravilo, ki pravi, da je zadostno število glavnih komponent enako številu lastnih vrednosti, ki so večje od 1. V našem primeru smo zato za nadaljevanje analize izbrali prve štiri glavne komponente (slika 29). Plaziščni diagram (angl. *scree plot*) (slika 29) sicer nakazuje, da je dovolj, da upoštevamo tri glavne komponente, vendar smo se zaradi dodatnega deleža pojasnjene variance s četrto komponento odločili za štiri. Skupna varianca, ki jo pojasnijo izbrane glavne komponente (PC1, PC2, PC3 in PC4), je 83,6 %.



Slika 29: Plazišni diagram PCA za določitev potrebnega števila glavnih komponent

Figure 29: Scree plot of PCA for determining the adequate number of principal components

Glede na uteži (angl. *loadings*) osnovnih spremenljivk v posamezni glavni komponenti lahko opišemo, katere osnovne spremenljivke povzema posamezna glavna komponenta (preglednica 15). Prvo glavno komponento PC1 določajo spremenljivke *E*, *Qr*, *Qmax*, *Kp* in *I60*, kar pomeni, da jo lahko opredelimo kot merilo za jakost dogodka z vidika spremembe pretoka in kinetične energije padavin. Omenjene spremenljivke so med seboj pozitivno povezane, kar pomeni, da PC1 opisuje dogodke z veliko kinetično energijo večje količine padavin, ki povzročijo večjo spremembo pretoka in posledično višji največji pretok med dogodkom (preglednica 15).

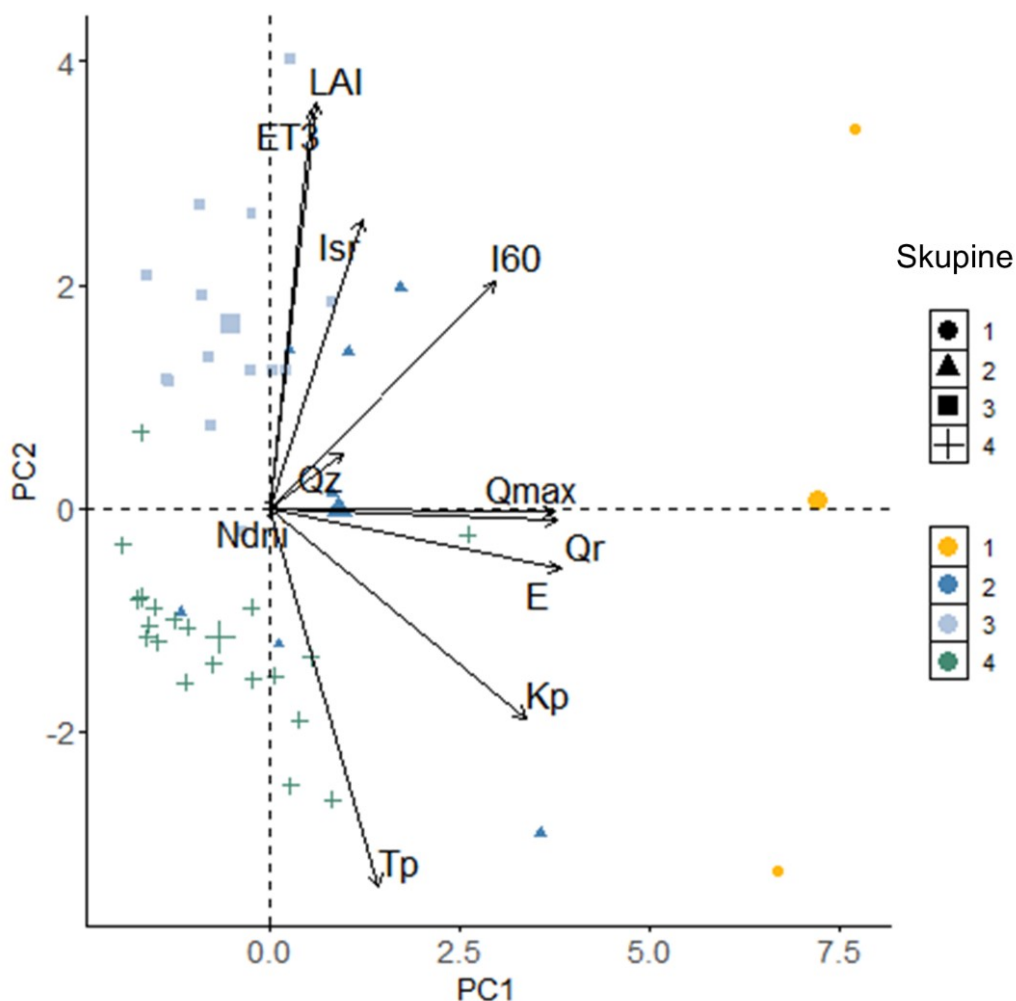
Druga glavna komponenta PC2 je merilo za sezonskost, saj imata največjo utež spremenljivki tridnevne predhodne evapotranspiracije (*ET3*) in indeksa listne površine (*LAI*), ki sta med seboj prav tako pozitivno povezani. PC2 je pozitivno korelirana tudi z intenziteto padavin *Isr* in negativno s trajanjem padavin (*Tp*). PC2 ima večje vrednosti za dogodke kratko trajajočih intenzivnejših padavin v obdobju vegetacije (pomlad, poletje). Najvišjo utež pri tretji glavni komponenti PC3 ima začetni pretok (*Qz*). To komponento lahko opredelimo kot merilo za predhodne razmere. Komponenta PC3 torej opisuje padavinske dogodke z daljšim predhodnim sušnim obdobjem (*Ndni*), vendar višjim začetnim pretokom (*Qz*) in konico pretoka med dogodkom (*Qmax*). Zadnja v nadaljnji analizi upoštevana glavna komponenta je PC4, kjer ima najvišjo utež število predhodnih dni brez padavinskih dogodkov. S PC4 so okarakterizirani padavinski dogodki, za katere je značilno daljše sušno obdobje (*Ndni*). Obe glavni komponenti PC3 in PC4 lahko opredelimo kot merilo za predhodne razmere.

Preglednica 15: Uteži posameznih spremenljivk, upoštevanih v analizi glavnih komponent (PCA). S krepko pisavo so označene najvišje absolutne vrednosti uteži posamezne glavne komponente.

Table 15: Loadings from principal component analysis (PCA) for the individual variable. The highest absolute values of loadings for individual principal component are marked in bold.

Spremenljivka	Glavna komponenta			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Qmax	<b>0,45</b>	0,00	0,27	-0,20
ET3	0,07	<b>0,49</b>	-0,07	0,28
Qr	<b>0,46</b>	-0,01	0,17	-0,21
Isr	0,15	<b>0,36</b>	-0,01	-0,27
Qz	0,12	0,07	<b>0,81</b>	-0,03
Kp	<b>0,41</b>	-0,26	-0,19	0,19
I60	<b>0,36</b>	0,28	-0,21	0,02
LAI	0,07	<b>0,50</b>	-0,11	0,16
Tp	0,17	<b>-0,47</b>	-0,07	0,14
E	<b>0,46</b>	-0,08	-0,24	0,18
N_dni	0,01	0,00	0,30	<b>0,80</b>

Rezultate analize glavnih komponent (v ravnini PC1, PC2) in razvrščanja v skupine z metodo voditeljev na skupnem grafu prikazuje slika 30. Glede na centroide posameznih skupin lahko ugotovimo, da prvo skupino dogodkov (rumeni krogi) najbolj določa najvišji pretok oziroma njegova sprememba. Vsi dogodki tretje skupine ležijo na zgornji polovici navpične osi (osi PC2), vsi dogodki iz četrte skupine razen enega pa na spodnji polovici. Komponento PC2 najbolj določata predhodna tridnevna evapotranspiracija in indeks listne površine, pri čemer lahko za dogodke iz tretje skupine sklepamo, da so se zgodili v obdobju višjih vrednosti *LAI* in *ET3* (pozna pomlad, poletje), dogodki iz četrte skupine pa jeseni oziroma pozimi, saj so zanje značilne nižje vrednosti omenjenih spremenljivk. Za dogodke tretje skupine je značilna tudi višja srednja intenziteta padavinskih dogodkov. PC2 je v veliki meri določena tudi s trajanjem padavin, in sicer je za dogodke v četrti skupini značilnejše daljše trajanje padavin, dogodki v tretji skupini pa so krajši. Najbolj nehomogena skupina v ravnini PC1, PC2 je druga skupina, katere dogodki so razpršeni v različne kvadrante grafa. V poglavju o razvrščanju dogodkov v skupine smo sicer za drugo skupino ugotovili, da so zanje značilni dogodki z visokimi vrednostmi koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Na podlagi rezultatov obeh metod lahko sklepamo, da pojavnosti dogodkov z visokimi koncentracijami  $\text{NO}_3\text{-N}$  ne moremo enoznačno pojasniti na podlagi 11 upoštevanih hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivk. Do visokih koncentracij lahko tako pride ob različnih hidrometeoroloških in vegetacijskih razmerah.



Slika 30: Padavinski dogodki v prostoru PC1, PC2 in glede na skupino, dobljeno z metodo voditeljev. Centroidi posameznih skupin so prikazani z večjim simbolom pripadajoče barve in oblike.

Figure 30: Rainfall events in PC1, PC2 space, coloured based on the k-means clusters. Centroids of individual group are represented by larger symbol of corresponding colour and shape.

Spremenljivke, s katerimi smo v nadaljevanju ponazorili spremembe koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku, so maksimalna izmerjena koncentracija  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom ( $C_{max}$ ), povprečna vrednost izmerjene koncentracije med dogodkom ( $C_{sr}$ ), absolutna sprememba koncentracije, določena kot razlika med maksimalno izmerjeno in začetno koncentracijo ( $Cr$ ), relativna sprememba koncentracije med dogodkom ( $C_{rs}$ ), povprečni 20-minutni iznos  $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $I_{znos\_N}$ ) in maksimalni 20-minutni iznos  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom ( $I_{znos\_max}$ ). Kako izbrane štiri glavne komponente (PC1–PC4) vplivajo na razmere koncentracij ( $C_{max}$ ,  $C_{sr}$ ,  $Cr$ ,  $C_{rs}$ ) in iznosa ( $I_{znos\_N}$ ,  $I_{znos\_max}$ ) nitratnega dušika s porečja smo v nadaljevanju preverjali z modelom multiple linearne regresije (MLR). Ugotovili smo, da so bili rezultati modelov statistično značilni ( $p$ -vrednost  $< 0,001$ ) za obe odzivni spremenljivki, ki se nanašata na količino iznesenega nitratnega dušika (preglednica 16, preglednica 17). Rezultati linearnih modelov za napoved vrednosti povprečnega iznosa na časovno enoto  $I_{znos\_N}$  in najvišjega 20-minutnega iznosa

med padavinskim dogodkom *Iznos\_max* kažejo, da lahko z vhodnimi podatki (tj. glavnimi komponentami PC1, PC2, PC3 in PC4) pojasnimo 57 % (prilagojeni  $R^2 = 0,53$ ) oziroma 69 % (prilagojeni  $R^2 = 0,66$ ) variance odzivne spremenljivke. Za povprečni iznos nitratnega dušika s porečja sta bili statistično značilni glavni komponenti PC1 ( $p$ -vrednost  $< 0,001$ ) in PC3 ( $p$ -vrednost  $< 0,01$ ), ki sta okarakterizirani z jakostjo dogodka oziroma predhodnimi razmerami na porečju, natančneje začetnim pretokom ( $Qz$ ). Iste glavne komponente so bile statistično značilne tudi v primeru najvišjih iznosov med padavinskim dogodkom.

Rezultati modelov za spremenljivke, s katerimi opišemo razmere koncentracij  $NO_3-N$  med padavinskimi dogodki, so bili statistično značilni samo za absolutno spremembo koncentracije ( $Cr$ ) ( $p$ -vrednost  $< 0,001$ ) (preglednica 18) in v tem primeru vsebujejo 33 % variance odzivne spremenljivke. Statistična značilnost napovednih spremenljivk je prisotna pri  $Cr$ , kjer so statistično značilne ( $p$ -vrednost  $< 0,1$ ) vse glavne komponente razen PC2, ki smo jo opredelili kot komponento sezonskosti (preglednica 18). Koeficient determinacije je ne glede na to bistveno nižji kot v primeru MLR za *Iznos\_N* in *Iznos\_max*, kar je posledica velike razpršenosti točk okoli regresijske premice in kaže na kompleksnost pojasnjevanja/napovedi spremenljivk koncentracij  $NO_3-N$ . Statistična značilnost posameznih spremenljivk pa kljub temu odraža vpliv neodvisne spremenljivke na odvisno spremenljivko, kar sta v prispevku o zmotnem razumevanju statistike  $R^2$  pokazala tudi Colton in Bower (2002).

Preglednica 16: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za spremenljivko povprečnega iznosa na časovno enoto *Iznos\_N*. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk.

Table 16: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for average export per time unit *Iznos\_N*. Shaded rows show results without the identified influential points.

Iznos_N	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	8,31	0,62	13,42	0,0000	***
Presečišče_B	8,55	0,61	13,91	0,0000	***
PC1	1,94	0,31	6,19	0,0000	***
PC1_brez	2,41	0,40	6,06	0,0000	***
PC2	0,24	0,36	0,68	0,5020	
PC2_brez	0,51	0,38	1,36	0,1820	
PC3	1,94	0,57	3,42	0,0015	**
PC3_brez	1,82	0,55	3,28	0,0023	**
PC4	-0,50	0,59	-0,85	0,3997	
PC4_brez	-0,75	0,59	-1,27	0,2119	

Stopnje statistične značilnosti: \*\*\*0,001; \*\*0,01

Preglednica 17: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za spremenljivko najvišjega 20-minutnega iznosa med padavinskim dogodkom *Iznos\_max*. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk.

Table 17: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for the maximum 20-min export during the rainfall event *Iznos\_max*. Shaded rows show results without the identified influential points.

Iznos_max	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	17,17	1,55	11,07	0,0000	***
Presečišče_B	18,90	1,38	13,70	0,0000	***
PC1	6,97	0,78	8,88	0,0000	***
PC1_brez	9,28	0,92	10,15	0,0000	***
PC2	-0,44	0,90	-0,49	0,6269	
PC2_brez	0,51	0,83	0,62	0,5420	
PC3	2,99	1,42	2,11	0,0419	*
PC3_brez	0,42	1,39	0,30	0,7660	
PC4	-0,66	1,48	-0,45	0,6567	
PC4_brez	0,00	1,35	0,00	0,998	

Stopnje statistične značilnosti: \*\*\*0,001; \*0,05

Preglednica 18: Rezultati multiplega linearnega modela (MLR) na podlagi glavnih komponent za razpon koncentracij NO<sub>3</sub>-N med padavinskim dogodkom *Cr*. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk.

Table 18: Results of the multiple linear regression (MLR) model based on principal components for the range of NO<sub>3</sub>-N concentrations during the rainfall event *Cr*. Shaded rows show results without the identified influential points.

Cr	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	0,55	0,07	8,20	0,0000	***
Presečišče_B	0,58	0,06	9,38	0,0000	***
PC1	0,11	0,03	3,29	0,0022	**
PC1_brez	0,13	0,03	4,21	0,0002	***
PC2	0,06	0,04	1,63	0,1114	
PC2_brez	0,06	0,04	1,71	0,0956	+
PC3	-0,12	0,06	-1,96	0,0569	+
PC3_brez	-0,21	0,06	-3,26	0,0024	**
PC4	0,17	0,06	2,64	0,0118	*
PC4_brez	0,23	0,06	3,74	0,000621	***

Stopnje statistične značilnosti: \*\*\*0,001; \*\*0,01; \*0,05; +0,1

Predpostavke linearnega modela smo najprej preverili z osnovnimi diagnostičnimi diagrami, s katerimi prikazemo vrednosti ostankov in njihovih standardiziranih vrednosti, porazdelitev ostankov ter razmerje med standardiziranimi ostanki in vzvodi. V primeru vseh treh modelov (*Iznos\_N*, *Iznos\_max* in *Cr*) so ostanki približno enakomerno porazdeljeni okoli vrednosti 0, črta glajenih povprečij standardiziranih ostankov pa v primeru višjih vrednosti iznosov in absolutnih sprememb koncentracij rahlo narašča, kar nakazuje na kršenje predpostavke o konstantni varianci. Prav tako diagrami standardiziranih ostankov v odvisnosti od vzvodov, na katerih so prikazane tudi izolinerje Cookovih razdalj, kažejo na morebitno prisotnost vplivnih točk, zato smo v nadaljevanju preverili prisotnost regresijskih osamelcev in vzvodnih točk ter izračunali Cookove razdalje. Izkazalo se je, da sta z vidika slednjih dogodka 11 (25. avgust 2018) in 22 (2. avgust 2019) najvplivnejša. Dogodek 11 predstavlja vplivno točko (razdalja  $> 0,5$ ) v primerih modelov za *Iznos\_N*, *Iznos\_max* in *Cr*, dogodek 22 pa tudi v primerih modela za *Iznos\_N*, *Iznos\_max*. Pri modelih ostalih odzivnih spremenljivk nismo zaznali vplivnih točk. V primeru modela *Iznos\_max* se je kot regresijski osamelec izkazal dogodek 5 (22. junij 2018), med katerim je bila najvišja iznesena količina  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom precej višja, kot bi pričakovali glede na ocene parametrov modela. Pri modelu za spremenljivko *Iznos\_N* ni regresijskih osamelcev, pri modelu za *Cr* pa je to dogodek 26 (2. september 2019), ko smo zaznali najvišjo spremembo koncentracije med dogodkom. Vzvodne točke, to je odstopanja od centra regresorskega prostora (povprečja napovednih spremenljivk), predstavljajo dogodki 17, 18 in 22 (1. februar 2019, 5. april 2019 in 2. avgust 2019). Dogodka 17 in 22 sta se že z metodo razvrščanja v skupine izkazala kot drugačna od ostalih dogodkov, saj sta bila razvrščena v ločeno skupino.

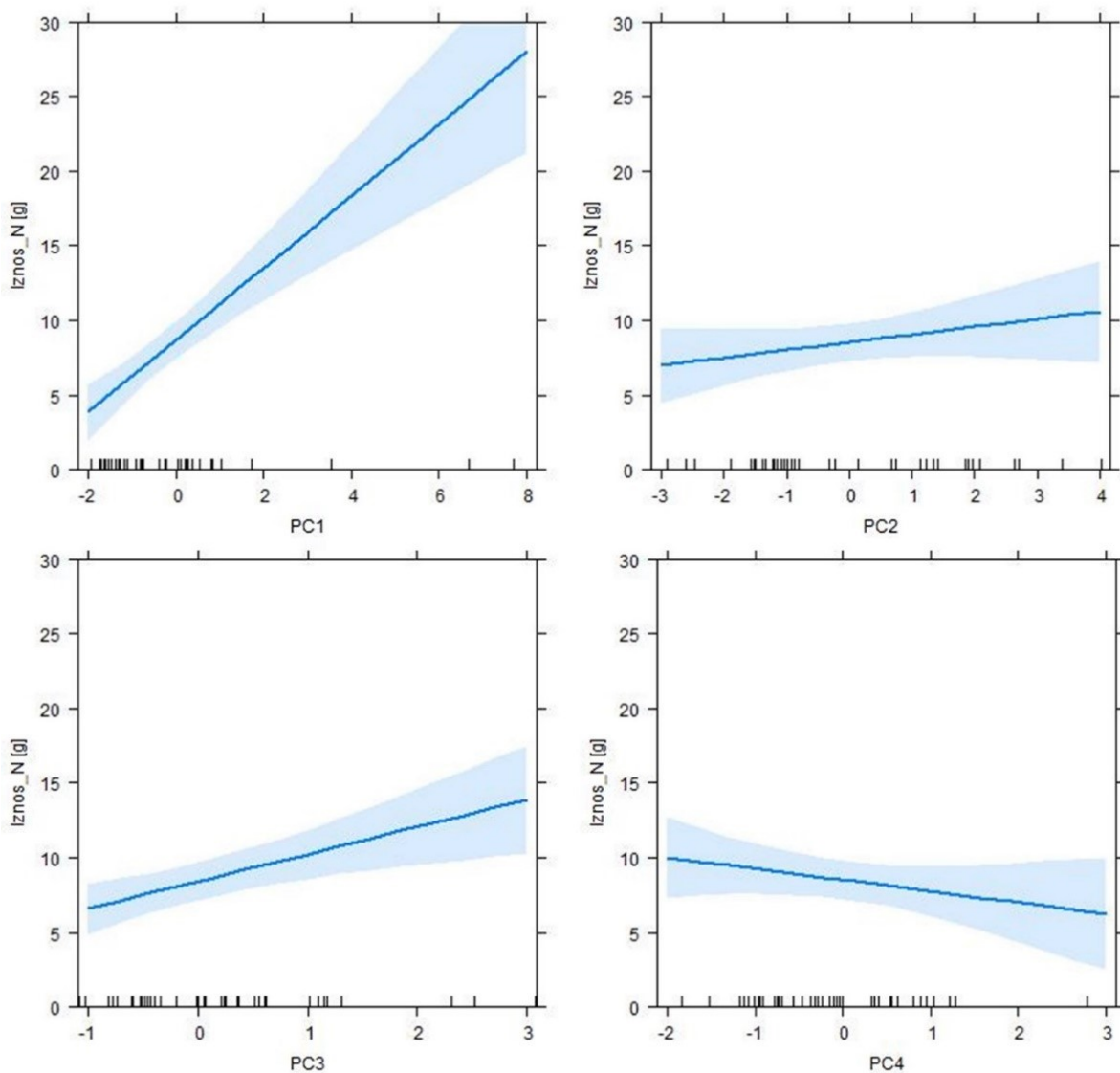
V nadaljevanju smo za odzivne spremenljivke *Iznos\_N*, *Iznos\_max* in *Cr* naredili nov model MLR, in sicer s podatki brez omenjenih vplivnih točk, ter primerjali ocene parametrov modelov brez vplivnih točk in z njimi. Rezultati novih ocen parametrov so prikazani v preglednicah 16–18 v osenčenih vrsticah. Vidimo, da se v primeru modelov za *Iznos\_N* in *Iznos\_max*, ko izločimo vplivne točke, vse ocene parametrov nekoliko spremenijo, vendar je pripadajoča standardna napaka podobna kot v izhodiščnem modelu. Naklon regresijske premice se v primeru modela *Iznos\_N* in *Iznos\_max* brez vplivnih točk nekoliko poveča pri PC1, kar nakazuje, da se tako srednje kot maksimalne količine iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  povečujejo nekoliko hitreje z večanjem jakosti dogodkov kot v prvotnem primeru modela z vsemi padavinskimi dogodki. Višje vrednosti PC1 so torej pri dogodkih z večjimi kinetično energijo padavin, spremembo pretoka in intenziteto padavin. Pri modelu za *Iznos\_max* je opaziti tudi bistveno izboljšanje odstotka pojasnjene variance odzivne spremenljivke, ki se je povečala z 69 na 76 %. Izločili smo dogodka 11 in 22, ki sta se zgodila v avgustu 2018 oziroma 2019, zanju je bila značilna velika kinetična energija, intenziteta in količina padavin, vendar pa je bil najvišji iznos nižji od iznosa primerljivih dogodkov. Pri modelu za *Iznos\_N* ni bistvene razlike v deležu pojasnjene variance odzivne spremenljivke glede na prvotni model. Bistveno izboljšanje modela z vidika koeficienta determinacije



smo opazili tudi v primeru modela za absolutno spremembo koncentracije  $Cr$  brez vplivnih točk, kjer se je ta povečal na 0,51. V tem primeru so vse v model vključene spremenljivke statistično značilne (preglednica 18). Največja relativna sprememba ocene parametra je pri spremenljivki PC3, ki jo odražajo začetne razmere, tj. začetni pretok, in spremenljivki PC4, ki je okarakterizirana s predhodno količino padavin. To spremembo lahko pojasnimo tako, da če je začetni pretok ( $Qz$ ) nižji, potem je sprememba koncentracije večja, in daljše je število dni brez predhodnih padavin ( $Ndni$ ), večja je sprememba koncentracije  $NO_3-N$  med padavinskim dogodkom. Tudi v primeru modela brez vplivnih točk za  $Cr$  so standardne napake primerljive s standardnimi napakami z vsemi vključenimi padavinskimi dogodki (preglednica 18). Z diagnostičnimi diagrami smo ugotovili, da z izločitvijo vplivnih točk zadostimo predpostavkam za linearne modele, ki so bile v prvotnih modelih vprašljive, kar pomeni, da ima model konstantno varianco, vplivne točke pa v modelu niso več prisotne.

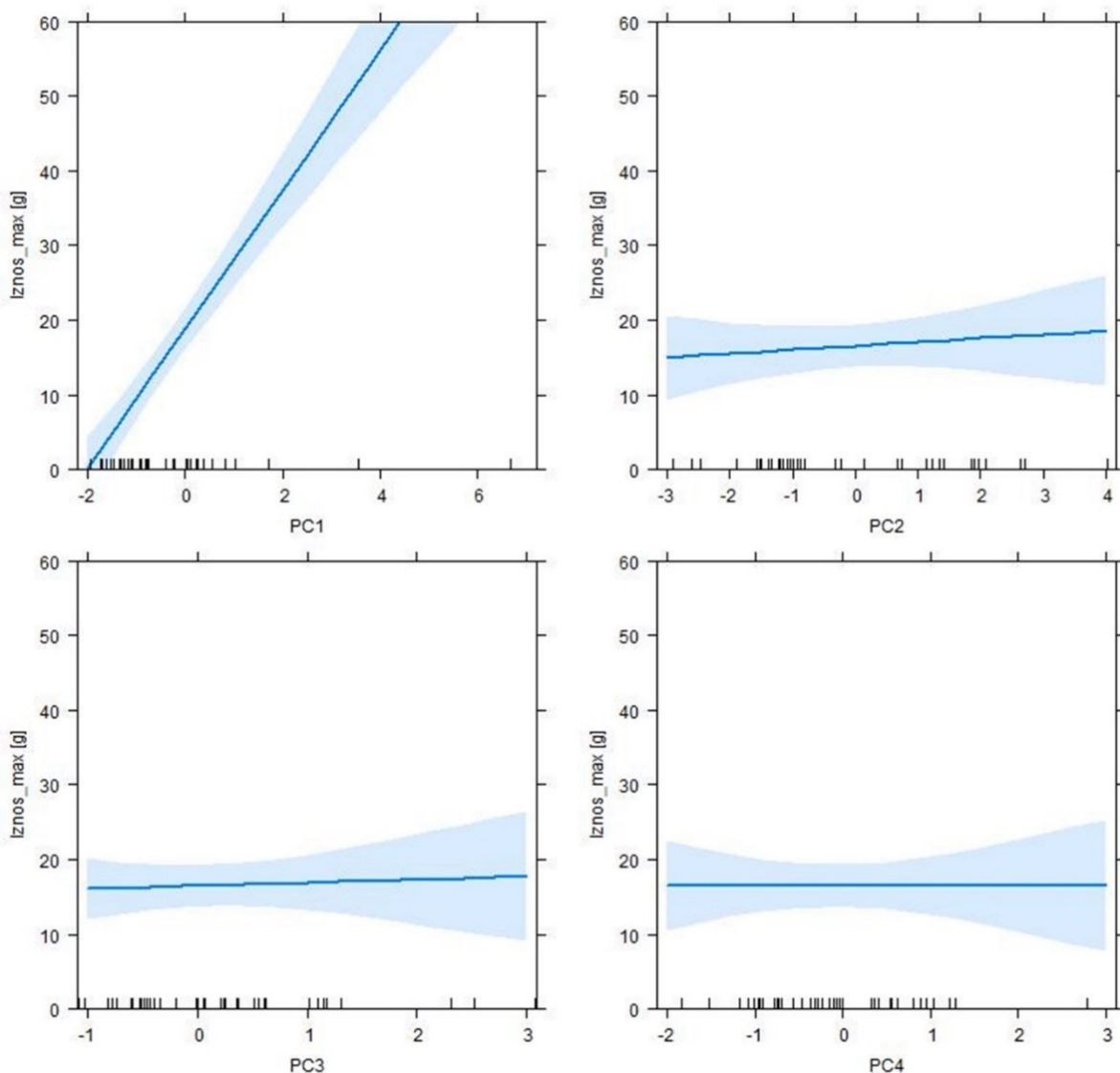
Grafi, prikazani na slikah 31–33, prikazujejo modelske napovedi za  $Iznos\_N$ ,  $Iznos\_max$  in  $Cr$  brez vplivnih točk. Za vsako od odzivnih spremenljivk je prikazana odvisnost od posamezne glavne komponente PC1–PC4 in pripadajoča regresijska premica s 95-odstotnim intervalom zaupanja za povprečno napoved  $Iznos\_N$ ,  $Iznos\_max$  in  $Cr$  ob upoštevanju konstantni (povprečni) vrednosti ostalih napovednih spremenljivk (glavnih komponent). Za vse tri odzivne spremenljivke velja, da največjo spremembo povzroči prva glavna komponenta (PC1), ki je okarakterizirana z jakostjo dogodka. Odvisnost med odzivno in napovedno spremenljivko je pozitivna, kar pomeni, da so pri intenzivnejših padavinskih dogodkih (z višjo intenziteto padavin, višjim maksimalnim pretokom, večjo količino padavin, večjo kinetično energijo padavin in večjo spremembo pretoka) tako srednji in maksimalni iznosi  $NO_3-N$  kot tudi sprememba koncentracije  $NO_3-N$  večji. Ostale glavne komponente (PC2–PC4) imajo bistveno manjši vpliv na spremembo odzivnih spremenljivk iznosov, še posebej je to izrazito pri  $Iznos\_max$ , kjer so regresijske premice skoraj vzporedne z vodoravno osjo. Še največji vpliv pri srednjih iznosih ima tretja glavna komponenta (PC3), ki jo določa začetni pretok ( $Qz$ ) in je prav tako kot jakost dogodka pozitivno povezana z odzivno spremenljivko. Višji začetni pretok pomeni višje srednje iznose, kar lahko pojasnimo z večjim vplivom pretoka v primerjavi s koncentracijami, ki so na obravnavanem gozdnatem porečju relativno nizke tudi po padavinah. Je pa s tretjo glavno komponento (PC3) negativno povezana absolutna sprememba koncentracije ( $Cr$ , slika 33), na podlagi česar lahko zaključimo, da pri padavinskih dogodkih z nižjimi začetnimi pretoki lahko pričakujemo večje spremembe koncentracije. Nižji začetni pretoki so posledica daljše odsotnosti padavin, kar se posredno odraža na četrtem diagramu slike 33, ki prikazuje odvisnost četrte glavne komponente (PC4), določene s številom predhodnih dni brez padavin ( $N\_dni$ ). Razvidno je namreč, da daljša odsotnost padavin pomeni večjo spremembo koncentracije. Sezonskost, odražena z drugo glavno komponento (PC2), se pri srednjih in maksimalnih iznosih ni izkazala kot izrazito vplivna (slika 31, slika 32), je pa vpliv sezonskosti bistveno večji pri  $Cr$ . Model napovedi namreč kaže, da so večje spremembe pričakovane pri krajših padavinskih dogodkih, z višjo tridnevno predhodno evapotranspiracijo, višjim LAI in višjo srednjo intenziteto padavin. Dogodki

z opisanimi lastnostmi so primer poletnih nalivov (obdobje vegetacije), vendar pa rezultati ne odražajo neposrednega vpliva vegetacije.



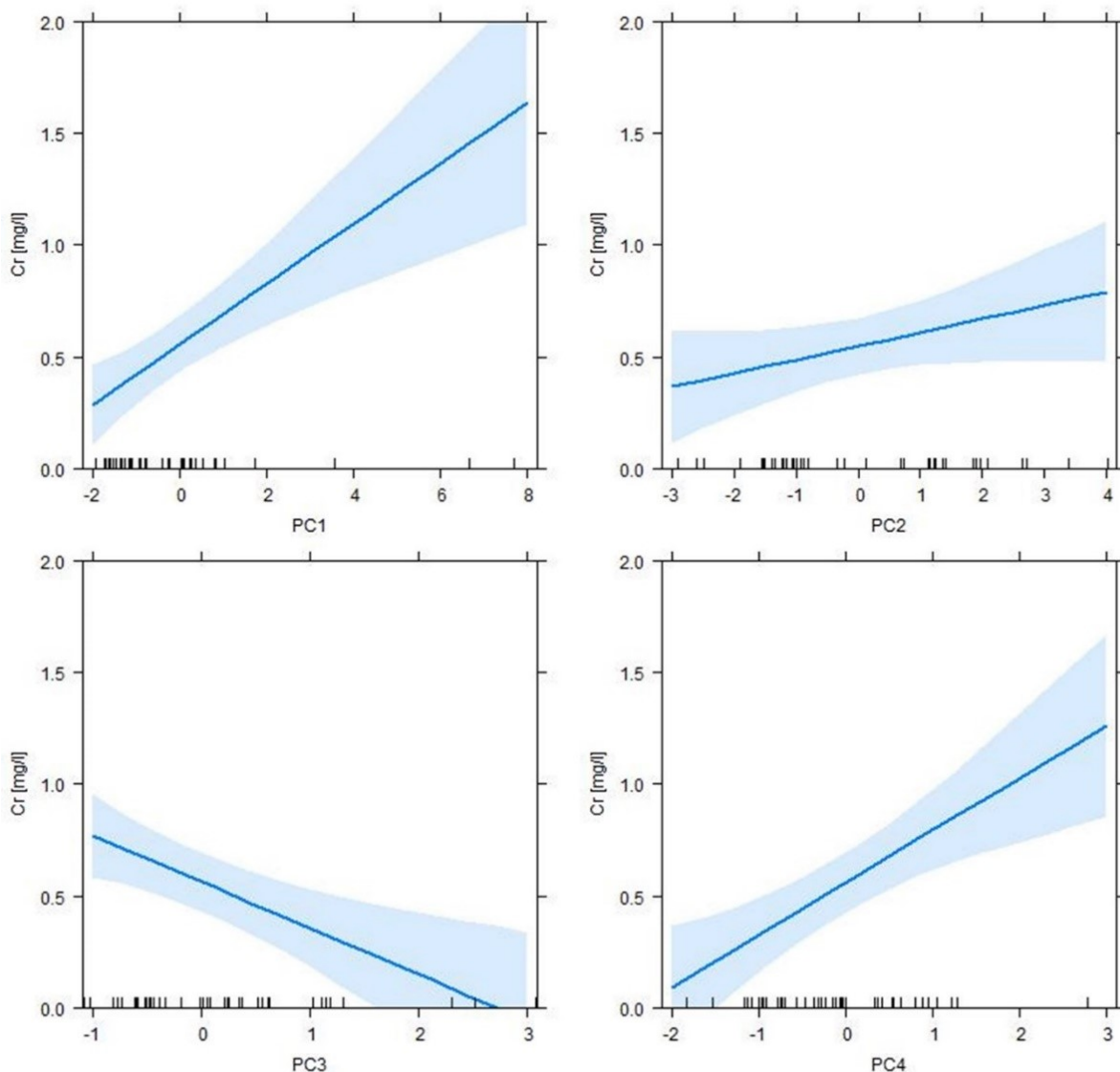
Slika 31: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen *Iznos\_N* za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent.

Figure 31: Predicted values and 95% confidence intervals for the average *Iznos\_N* for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components.



Slika 32: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen *Iznos\_max* za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent.

Figure 32: Predicted values and 95% confidence intervals for the average *Iznos\_max* for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components.



Slika 33: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen  $Cr$  za model brez vplivnih točk glede na posamezno glavno komponento (PC1–PC4) ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih glavnih komponent.

Figure 33: Predicted values and 95% confidence intervals for the average  $Cr$  for the model without influential points based on individual principal components (PC1–PC4) and taking into account the average values of others principal components.

#### 5.1.4 Vpliv lastnosti padavin brez hidroloških podatkov

Z metodo PCA smo želeli 11 spremenljivk, s katerimi bi pojasnili razmere koncentracij v vodotoku Kuzlovec in iznose nitratnega dušika s porečja, zmanjšati na nekaj glavnih komponent. Rezultati so pokazali, da je smiselno spremenljivke nadomestiti s štirimi glavnimi komponentami, pri čemer je najpomembnejša povezava bila ugotovljena med višjo jakostjo dogodka ( $Q_{max}$ ,  $K_p$ ,  $E$ ,  $I_{60}$ ) in višjimi iznosi  $NO_3-N$ . S hidrološkega vidika je večina porečij nemerjenih (kar pomeni, da ne razpolagamo s podatkom o pretokih in ostalih hidroloških podatkih) (Blöschl, 2006), zato je opredelitev

najpomembnejših vplivov karakteristik padavin na iznose nitratnega dušika pomembna. Poleg tega število merskih mest na površinskih vodah upada na globalni ravni. Tourian in sod. (2013) so namreč ugotovili, da se po letu 2003 v bazi GRDC (Global Runoff Data Centre) zbirajo podatki samo še 40 % merilnih mest od dobrih 8000 postaj s celega sveta. Podobno ugotavljajo tudi v Medvladnem hidrološkem programu (IHP UNESCO), ki v svojem IX. programu za obdobje 2022–2029 kot enega od ciljev navajajo obrnitev trenda števila merskih mest na vodotokih (UNESCO, 2021).

Pri hidrološkem modeliranju, kjer je glavni rezultat izračun pretoka, so za nemerjena porečja glavni vhodni podatek običajno samo meteorološki podatki, zato je poznavanje neposredne zveze med padavinami, pretokom in ne nazadnje količinami iznesenih snovi, kot so hranila, pomembno za vrednotenje rezultatov tovrstnih modelov. Odločili smo se, da vplive oziroma povezanost spremenljivk na iznose nitratnega dušika preverimo še z oceno glede na posamezno spremenljivko, pri čemer nas je zanimal vpliv spremenljivk lastnosti padavin. Uporabili smo modele multiple linearne regresije (MLR), s katerimi smo preverili, koliko variance v srednjih in maksimalnih iznosih ter spremembah koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  pojasnijo spremenljivke  $Tp$ ,  $Kp$  in  $I60$ . Ker smo želeli uporabiti samo merjene vrednosti spremenljivk, katerih vrednosti niso določene z empiričnimi izračuni, kinetične energije padavin nismo vključili v model. Prav tako nismo v model vključili srednje intenzitete padavin, saj bi se s to kombinacijo napovednih spremenljivk v modelu pojavila kolinearnost. Za oceno vplivov na iznose in na absolutno spremembo koncentracije ne pa tudi ostale spremenljivke, ki opišejo spremembo koncentracije med dogodkom, smo se odločili, ker v predhodni analizi PCA ni izkazala dobrih rezultatov glede deleža pojasnjene variance v koncentracijah  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Pred uporabo metode MLR smo vse podatke log-transformirali, da smo zadostili vsem predpostavkam, ki morajo veljati pri (multiplih) linearnih regresijskih modelih.

Rezultati MLR za posameznelog-transformirane odzivne spremenljivke ( $\log(Iznos\_N)$ ,  $\log(Iznos\_max)$  in  $\log(Cr)$ ) so prikazani v preglednicah 19–21. Vsi trije modeli so statistično značilni ( $p$ -vrednost  $< 0,05$ ) in v osnovi pojasnijo 28 % ( $Iznos\_N$ ), 49 % ( $Iznos\_max$ ) oziroma 37 % ( $Cr$ ) variance odzivne spremenljivke. Pri modelih za srednje in maksimalne iznose med padavinskimi dogodki je diagnostika pokazala prisotnost ene vplivne točke, natančneje gre za dogodek pod zaporedno številko 11 (25. avgust 2018), zato smo za ti dve odzivni spremenljivki ponovili MLR z izločeno vplivno točko. Ti rezultati so prikazani v preglednici 19 in preglednici 20 v osenčenih vrsticah. Količina padavin se je v primeru vseh treh obravnavanih odzivnih spremenljivk izkazala kot najvplivnejša tako na srednje in maksimalne iznose kot tudi na velikost spremembe koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskim dogodkom. Po izločitvi vplivnega dogodka se delež pojasnjene variance v  $\log(Iznos\_N)$  poveča na 45 %, v primeru  $\log(Iznos\_max)$  pa kar na 59 %, kar pomeni, da lahko samo na podlagi treh spremenljivk lastnosti padavin relativno dobro ocenimo iznose  $\text{NO}_3\text{-N}$ , kjer ne razpolagamo z drugimi hidrološkimi podatki.

Predpostavke linearnih modelov so po izločitvi vplivne točke popolnoma zadoščene (ostanki so normalno porazdeljeni okoli premice, gladilnik vrednosti ostankov približno sledi premici  $y = 0$ , varianca ostankov je konstantna), na samo izločitev pa je vplival kriterij velike Cookove razdalje (več kot 0,5). Vrednosti vseh parametrov so se nekoliko spremenile, standardna napaka pa je ostala v približno enakem velikostnem razredu. Največjo spremembo je zaznati pri presečišču z navpično osjo, ki se je znižalo skoraj za polovico. Statistika VIF (angl. *variance inflation factor*) vseh treh spremenljivk je nižja od štiri, kar pomeni, da modeli ne kršijo predpostavke o nekolinearnosti.

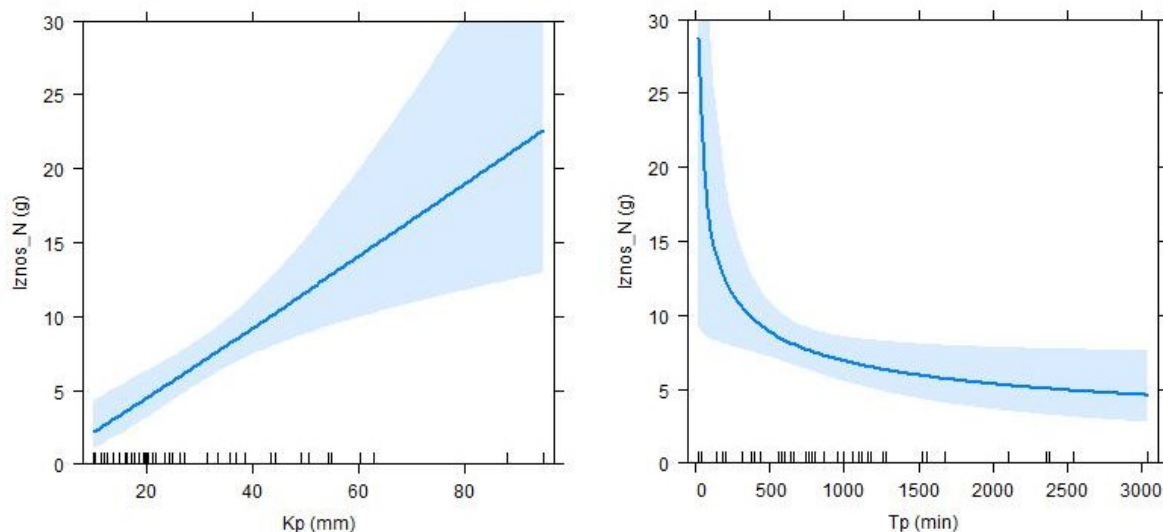
V nadaljevanju je za vsakega od modelov podana interpretacija, pri čemer pri modelih  $\log(Iznos\_N)$  in  $\log(Iznos\_max)$  podajamo interpretacijo za model brez vplivne točke (preglednica 19). Model za  $\log(Iznos\_N)$  kaže, da če se količina padavin poveča za 10 %, potem se ob upoštevanju ostalih dveh spremenljivk srednji iznos med padavinskim dogodkom poveča v skoraj enaki meri (10,4 %) (slika 34, levo). Trajanje padavin ( $Tp$ ) ima nasprotni učinek, in sicer če se trajanje dogodka podaljša za 10 %, potem lahko pričakujemo zmanjšanje srednjih iznosov za 4,4 % (slika 34, desno). Pri krajših dogodkih (do približno 500 min) je opazno izrazito upadanje srednje količine iznosa  $NO_3-N$  z daljšanjem padavin. Pri tem je zanimivo, da maksimalna enourna intenziteta padavin ( $I60$ ) skoraj ne izkazuje vpliva na spremembo srednjih iznosov ob upoštevanju ostalih dveh spremenljivk.

Preglednica 19: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za  $Iznos\_N$  na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk.

Table 19: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for  $Iznos\_N$  based on basic variables describing rainfall characteristics. Shaded rows show results without identified influential points.

log-log model za $Iznos\_N$	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	0,86	0,42	2,07	0,0453	*
Presečišče_brez	0,46	0,36	1,27	0,2114	
log(Kp)	0,99	0,31	3,22	0,0026	**
log(Kp_brez)	1,04	0,25	4,07	0,0002	***
log(I60)	-0,23	0,25	-0,92	0,3633	
log(I60_brez)	-0,07	0,21	-0,32	0,7521	
log(Tp)	-0,44	0,19	-2,36	0,0232	*
log(Tp_brez)	-0,37	0,16	-2,34	0,0245	*

Stopnje statistične značilnosti: \*\*\*0,001; \*\*0,01; \*0,05



Slika 34: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen *Iznos\_N* za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko (*Kp*, *Tp*) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu

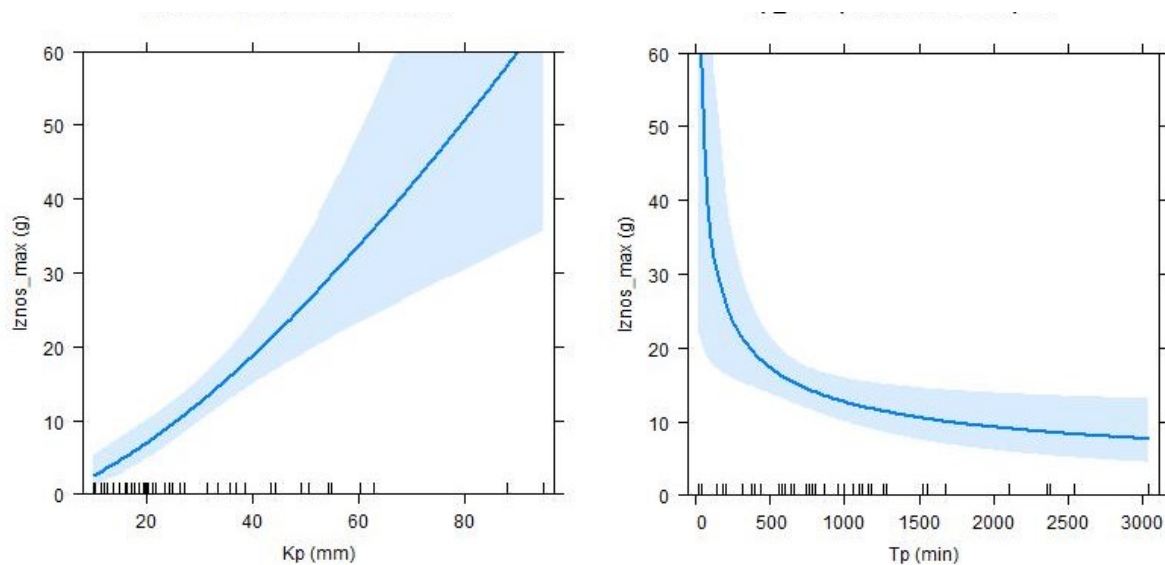
Figure 34: Predicted values and 95% confidence intervals for the average *Iznos\_N* for the log-log model without influential points based on individual variable (*Kp*, *Tp*) and taking into account average values of others variables in the model

Preglednica 20: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za *Iznos\_max* na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin. Osenčene vrstice prikazujejo rezultate brez identificiranih vplivnih točk.

Table 20: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for *Iznos\_max* based on basic variables describing rainfall characteristics. Shaded rows show results without identified influential points

log-log model za <i>Iznos_max</i>	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	0,70	0,41	1,73	0.0925	+
Presečišče_brez	0,39	0,38	1,03	0.3104	
log( <i>Kp</i> )	1,39	0,30	4,64	0.0000	***
log( <i>Kp_brez</i> )	1,42	0,27	5,25	0.0000	***
log( <i>I60</i> )	-0,18	0,24	-0,76	0.4533	
log( <i>I60_brez</i> )	-0,06	0,22	-0,27	0.7868	
log( <i>Tp</i> )	-0,51	0,18	-2,79	0.0081	**
log( <i>Tp_brez</i> )	-0,45	0,17	-2,71	0.0100	**

Stopnje statistične značilnosti: \*\*\*0,001; \*\*0,01;+.0,1



Slika 35: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečen *Iznos\_max* za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko (*Kp*, *Tp*) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu

Figure 35: Predicted values and 95% confidence intervals for the average *Iznos\_max* for the log-log model without influence points based on individual variable (*Kp*, *Tp*) and taking into account the average values of others variables in the model

Podobne rezultate je pokazal tudi model za  $\log(Iznos\_max)$ , ki ocenjuje, da se najvišji iznos  $NO_3-N$  med dogodkom v povprečju poveča za 14 %, če je količina padavin med dogodkom višja za 10 % (slika 35, levo). Na drugi strani pa ocenjuje, da se pri skrajšanju trajanja padavin za 10 % najvišji iznos v povprečju poveča za slabih 5 % (slika 35, desno). Pri obeh omenjenih ocenah velja tak vpliv ob upoštevanju povprečnih vrednosti ostalih spremenljivk v modelu. Podobno kot pri modelu za srednje iznose je presenetljiva ugotovitev na podlagi MLR, da *I60* ob upoštevanju ostalih spremenljivk v modelu ni statistično značilna spremenljivka v modelu za maksimalne iznose. Rezultati za model absolutne spremembe koncentracije  $NO_3-N$  med dogodkom ( $\log(Cr)$ ) pa nakazujejo pozitiven vpliv najvišje enourne intenzitete med dogodkom na vrednost spremembe (slika 36, desno), in sicer se v povprečju koncentracija spremeni za 6 %, če se *I60* poveča za 10 %. Podoben vpliv na spremembo *Cr* ob upoštevanju ostalih spremenljivk v modelu je pričakovati tudi glede na količino padavin, in sicer model ocenjuje, da se koncentracija  $NO_3-N$  v povprečju poveča za slabih 6 %, če se količina padavin poveča za 10 % (preglednica 21) ob hkratnem upoštevanju maksimalne enourne intenzitete padavin in trajanja padavin. Slednje so se v modelu izkazale za najmanj vplivne, kar bi se na diagramih, kot sta prikazana na sliki 36 za *Kp* in *I60*, odrazilo v obliki skoraj vodoravne črte. Pri tem velja ponovno poudariti, kar je sicer podrobneje opisano v poglavju 4.4, da se koncentracije  $NO_3-N$  v povprečju med dogodkom spremenijo za 0,5 mg/l, vendar pa se zaradi velike spremembe pretoka med dogodkom iznosi zelo povečajo in predstavljajo bistveni delež iznosa  $NO_3-N$  s porečja.

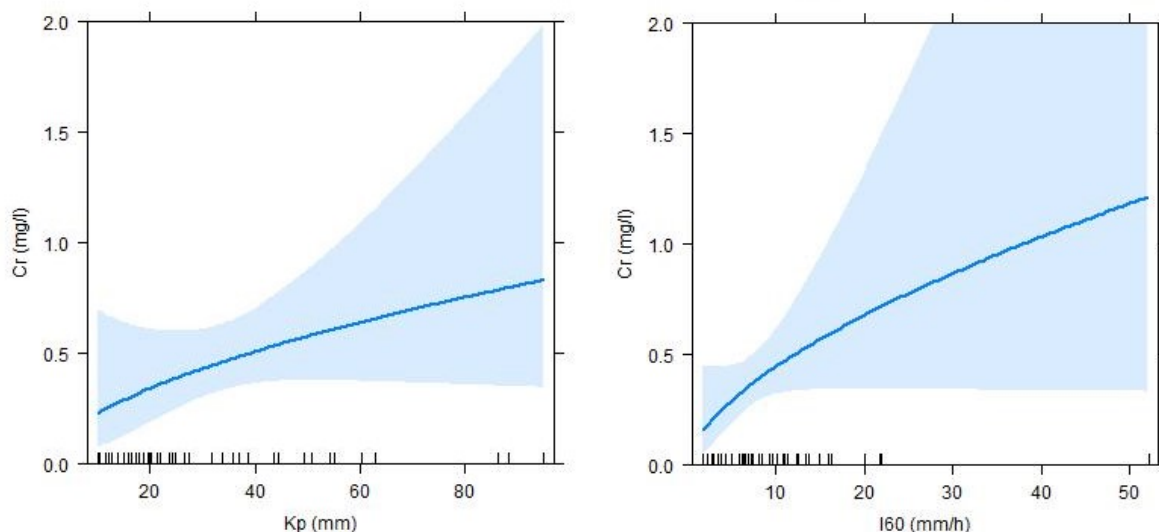


Preglednica 21: Rezultati log-log multiplega linearnega modela (MLR) za  $Cr$  na podlagi osnovnih spremenljivk za opis lastnosti padavin

Table 21: Results of the log-log multiple linear regression (MLR) model for  $Cr$  based on basic variables describing rainfall characteristics

log-log model za $Cr$	Ocena	Standardna napaka	t vrednost	Pr(> t )	Statistična značilnost
Presečišče	-1,86	0,56	-3,31	0,002	**
log( $Kp$ )	0,57	0,41	1,38	0,1758	
log( $I60$ )	0,61	0,33	1,82	0,0763	+
log( $ Tp$ )	0,01	0,25	0,06	0,9537	

Stopnja statistične značilnosti: \*0,01; + 0,1



Slika 36: Napovedane vrednosti in 95 % intervali zaupanja za povprečni  $Cr$  za log-log model brez vplivnih točk glede na posamezno spremenljivko ( $Kp$ ,  $I60$ ) in ob upoštevanju povprečne vrednosti ostalih spremenljivk v modelu

Figure 36: Predicted values and 95% confidence intervals for the average  $Cr$  for the log-log model without influence points based on an individual variable ( $Kp$ ,  $I60$ ) and taking into account the average values of others variables in the model

### 5.1.5 Razprava

Vpliv lastnosti padavinskih dogodkov na dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku oziroma na njegove iznesene količine smo preverjali z uporabo podatkov, ki so v večji meri rezultat lastnih meritev. Za preverjanje smo uporabili metode razvrščanja enot v skupine, metodo glavnih komponent (PCA) in modele multiple linearne regresije (MLR).

V disertaciji smo z metodo hierarhičnega razvrščanja sprva preverili podobnost oziroma različnost med 43 padavinskimi dogodki na podlagi 17 spremenljivk, ki so poleg hidrometeoroloških in vegetacijskih razmer obsegale razmere koncentracij in iznosov nitratnega dušika. Poleg tega smo z razvrščanjem dogodkov v skupine dobili prvi vpogled v najvplivnejše spremenljivke, od katerih so potencialno odvisne razmere koncentracij nitratnega dušika v obravnavanem vodotoku med padavinskimi dogodki. Na podlagi dendrograma hierarhičnega razvrščanja smo določili ustrezno število skupin, v katere lahko razvrstimo dogodke, in v drugem koraku uporabili optimizacijsko metodo razvrščanja enot v skupine. Dogodke smo razvrstili v štiri skupine, katerih velikosti znašajo 2, 7, 14 in 20 enot oziroma dogodkov. Dogodki s posebej visokimi vrednostmi iznosov in koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  so razvrščeni v prvo oziroma drugo skupino, medtem ko so si dogodki tretje skupine najbolj podobni glede na visoke vrednosti *LAI* in *ET3* in krajše trajanje padavin, v skupini štiri pa so dogodki z nižjimi vrednostmi *LAI* in *ET3* in daljšim trajanjem padavin.

Raziskovanje povezanosti spremenljivk iznosov in koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  s spremenljivkami hidrometeoroloških in vegetacijskih razmer smo nadaljevali z metodo PCA, ki smo jo uporabili na naboru 11 spremenljivk, s katerimi smo opisali lastnosti padavinskih dogodkov na podlagi merjenih 20-minutnih podatkov. Analiza glavnih komponent je pokazala, da dovolj velik del variance v podatkih pojasnimo s prvimi štirimi glavnimi komponentami. Prve štiri komponente so odrazile vpliv magnitude dogodka, sezonskosti in predhodnih razmer namočenosti. Želeli smo preveriti, ali je na podlagi teh glavnih lastnosti mogoče napovedati spremembe koncentracij in iznosov nitratnega dušika v vodotoku. Uporabili smo multipli linearni regresijski model, s katerim smo preverili, koliko variance odzivne spremenljivke lahko pojasni linearna kombinacija prvih štirih glavnih komponent (PC1–PC4) za napoved štirih spremenljivk sprememb koncentracij med dogodki in dveh spremenljivk iznosov nitratnega dušika. Ugotovili smo, da so rezultati modela v primeru srednjih in najvišjih iznosov (*Iznos\_N*, *Iznos\_max*) statistično značilni ( $\alpha = 0,01$ ) in pojasnijo več kot 50 % variance odzivne spremenljivke. Nasprotno pa se je izkazalo pri spremenljivkah, s katerimi smo opisali spremembe koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ , saj je model pokazal šibko povezavo med linearno kombinacijo glavnih komponent in spremenljivko spremembe koncentracije. Razlog lahko pripišemo relativno majhnemu vzorcu, ki pa zajame širok spekter lastnosti padavinskih dogodkov, zaradi česar je napoved kompleksnih odvisnih

spremenljivk samo na podlagi glavnih komponent nezanesljiva. Relativno uspešnost v primeru napovedi iznosov nitratnega dušika pa lahko pojasnimo z močno povezavo med pretokom in iznosom. Sprememba pretoka med dogodkom in njegova najvišja vrednost sta namreč merilo prve glavne komponente.

Ker pa je število porečij, kjer ne razpolagamo s podatki o pretokih, sploh pa ne s podatki s krajšim časovnim korakom, nekaj razredov velikosti večje od števila porečij, za katera obstajajo podatki (Blöschl, 2006), smo preverili neposredno povezavo med lastnostmi padavin in iznosi  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Z uporabo multiplih modelov linearne regresije sta se kot najvplivnejši spremenljivki za iznose  $\text{NO}_3\text{-N}$  izkazali količina padavin in trajanje, medtem ko je v primeru absolutne spremembe koncentracije namesto trajanja bolj vplivna spremenljivka maksimalne intenzitete padavin.

Študij, v katerih bi raziskovali povezanost lastnosti padavinskih dogodkov z dinamiko sprememb nitratnega dušika v vodotoku med padavinskimi dogodki, je malo. O intenziteti padavin, kot enem ključnih dejavnikov oziroma gonilnikov, ki vplivajo na dinamiko iznosa nitratnega dušika s porečja, so poročali Blaen in sod. (2017). Z analizo glavnih komponent so ugotovili, da so maksimalne koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  in relativne spremembe koncentracij med dogodkom najbolj povezane z maksimalnimi intenzitetami padavin, vendar velja poudariti, da je njihova analiza potekala na podatkih kmetijskega območja. V naši raziskavi smo podobno povezavo z intenzitetami padavin ugotovili pri absolutni spremembi koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$ , medtem ko sta srednji in maksimalni iznos bolj povezana s količino padavin. Po drugi strani pa so Aubert in sod. (2016) ovrgli hipotezo o vplivu padavin na dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku, s čimer so potrdili predhodne izotopske raziskave, ki so pokazale močno povezanost podzemne in površinske vode na njihovem obravnavanem porečju, zaradi česar med padavinskimi dogodki v vodotoku prevladuje t. i. stara voda (Orlowski in sod., 2016). Njihova raziskava je bila narejena na slabe 4 km<sup>2</sup> velikem porečju, kjer prevladujočo rabo tal predstavljata gozd in kmetijska območja, geološka sestava pa omogoča zadrževanje vode v velikih vodonosnikih predvsem na površnem delu porečja.

Za razliko od lastnosti padavin so hidrološke kontrole v povezavi z dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v površinskih vodah pogosteje obravnavane. Bernal in sod. (2002) so s faktorsko analizo opredelili predhodno namočenost (potencialna evapotranspiracija, deficit vsebnosti vode v tleh) in magnitudo dogodka (količina padavin, trajanje dogodka, sprememba pretoka) kot najpomembnejša dejavnika, ki vplivata na koncentracije in količino iznesenega nitratnega dušika s porečja. O vplivih predhodnih razmer, natančneje količini predhodnih padavin in/ali predhodni namočenosti, so poročali tudi drugi avtorji. Rusjan in Mikoš (2008) sta z uporabo regresijskih dreves ugotovila, da je ena najvplivnejših spremenljivk količina predhodnih padavin, izražena z indeksom predhodnih padavin. Blaen in sod. (2017) so poleg predhodne količine padavin kot vplivni dejavnik opredelili še najvišjo

predhodno namočenost in najvišji nivo podzemne vode pred dogodkom. O vplivu predhodnih razmer vsebnosti vode v tleh in sezone na dinamiko C-Q med padavinskimi dogodki na kmetijskem območju so poročali tudi Knapp in sod. (2020), vendar je bil vpliv manj izrazit.

V disertaciji smo proučevali tudi vpliv sezone oziroma fenološke faze na dinamiko koncentracij in iznosa nitratnega dušika med padavinskimi dogodki, saj so nekatere predhodne raziskave pokazale vpliv na razlike v koncentracijah nitratnega dušika. Rusjan in Mikoš (2008) sta sezonsko različnost dinamike koncentracij opredelila na podlagi temperatur zraka pred dogodkom, kar sta pojasnila s hkratnim vplivom vsebnosti vode v tleh na stopnjo mineralizacije oziroma nitrifikacije, o čemer so poročali tudi drugi avtorji (npr. Arheimer in sod., 1996). Razvrščanje padavinskih dogodkov je sicer nakazalo podobnost večine dogodkov (34 dogodkov od 43) glede na sezono (vrednost *ET3* in *LAI*), vendar so bili dogodki z ekstremnimi vrednostmi koncentracij in/ali iznosov uvrščeni v preostali dve skupini, kjer se sezonskost ni odrazila. Podobno smo ugotovili tudi z multiplimi linearnimi modeli z glavnimi komponentami iz analize PCA, kjer so se kot statistično značilne za napoved iznosov nitratnega dušika izkazale predvsem hidrometeorološke razmere med in pred dogodkom (pretok, količina padavin, intenziteta padavin), vpliv sezone, odražen preko druge glavne komponente, pa je bil statistično značilen samo pri modelu za absolutno spremembo koncentracije. Izvrednotene osnovne statistične vrednosti koncentracij in iznosov v času padavinskih dogodkov in v času baznega odtoka (poglavje 4.5) pa so pokazale, da med fenološkima fazama v času baznega odtoka obstaja razlika z višjimi vrednostmi koncentracij in iznosov pozimi oziroma v obdobju mirovanja, medtem ko te razlike med padavinskimi dogodki niso tako očitne. Podobne sezonske razlike med baznim odtokom so zaznali tudi Sebestyen in sod. (2014) na podlagi tedenskih vzorčenj vode. Feinson in sod. (2016) so pri proučevanju lastnosti histereznih zank C-Q med padavinskimi dogodki različnih lokacij prav tako ugotovili, da za velikost in smer histerezne zanke sezona ni statistično značilna, če nastopa kot samostojen člen v linearnem modelu. Se je pa sezona kot statistično značilna spremenljivka v linearnem modelu izkazala v primeru interakcije z dejavnikom lokacije.

Pomemben dejavnik, ki vpliva na naravno spremenljivost iznosa dušika, pa so tudi snežne padavine oziroma snežna odeja, v kateri se nitratni dušik iz atmosferske depozicije akumulira (Brooks in sod., 1999). Zato je za porečja z zimsko snežno odejo značilno, da se spomladi v času taljenja snega zgodijo večji iznosi nitratnega dušika s porečja, tako iz akumuliranega dušika v snežni odeji kot iz tal, kjer se zadržuje mikrobnno proizveden nitratni dušik (Judd in sod. 2007). Ker smo v obravnavanem obdobju zabeležili zanemarljivo malo količino snežnih padavin, snežne odeje pa praktično ni bilo, lahko sklepamo, da je to vplivalo na neprepoznavnost sezonskih razlik med kazalniki koncentracij in iznosov, saj se zaradi rednih dežnih padavin večja količina nitratnega dušika ni mogla akumulirati v tleh oziroma snežni odeji v hladnejših obdobjih leta.

## 5.2 Identifikacija procesov oblikovanja padavinskega odtoka

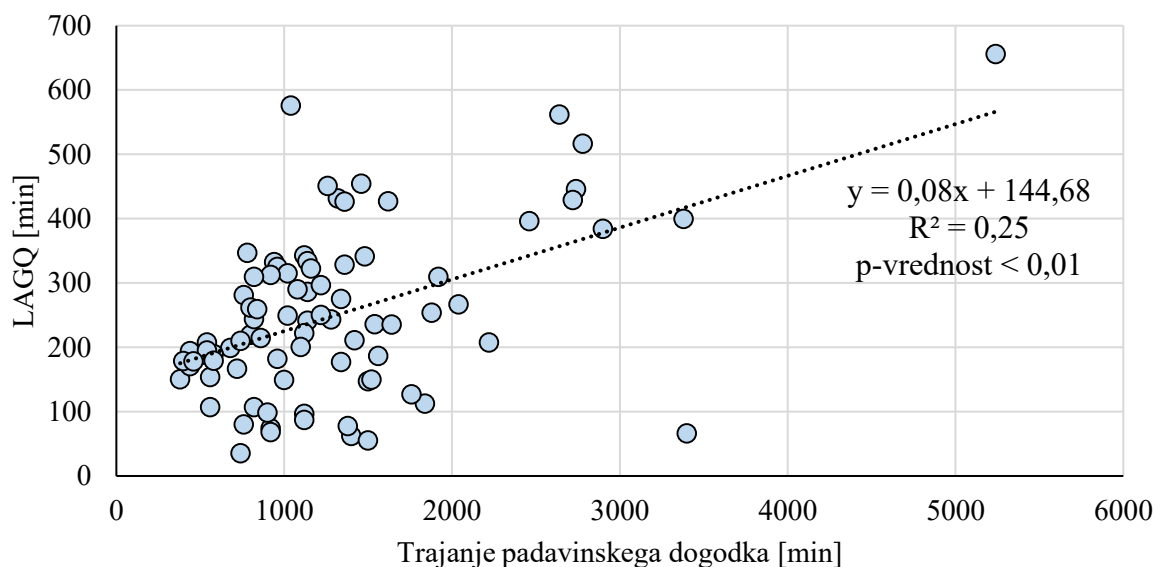
Za raziskovanje in določitev razlogov ter kontrolnih mehanizmov spiranja hranil s porečja se pogosto uporabljajo analize odnosov med spremembami koncentracij in pretoka (C-Q). Prisotnost časovnega zamika med odzivi posameznih procesov na padavinske dogodke lahko prikažemo z bivariatnim diagramom odvisne (npr. koncentracija) in neodvisne spremenljivke (npr. pretok, vsebnost vode v tleh), kjer se časovni zamik odrazi v obliki zanke (Prowse, 1984).

Da bi ugotovili časovno dinamiko in soodvisnost procesov, ki se s spremembami odzovejo na padavinske dogodke, smo v nalogi uporabili: i) metodo določitve časovnih zamikov med procesi na podlagi časa pojava težišča diagrama, ki na področju spiranja hranil s porečja predhodno še ni bila uporabljena, in ii) podrobno, celovito analizo izbranih padavinskih dogodkov.

### 5.2.1 Časovni zamiki procesov

Pri metodi določitve časovnih zamikov in njihove analize smo upoštevali 43 dogodkov, za katere smo razpolagali z 20-minutnimi podatkovnimi nizi o pretokih, koncentracijah nitratnega dušika (izneseni količini NO<sub>3</sub>-N) in padavinah. Za 24 dogodkov smo imeli na voljo tudi 20-minutne podatkovne nize meritev volumetrične vsebnosti vode v tleh na treh globinah (15, 40 in 70 cm). Za vsak dogodek smo izračunali čas pojava težišča hietograma ter ostalih obravnavanih procesov, nakar smo za vsak proces, tj. pretok, količino iznesenega NO<sub>3</sub>-N in vsebnost vode v tleh, izračunali, s kolikšnim časovnim zamikom glede na težišče hietograma se je zgodilo težišče posameznega procesa (priloga E).

Težišče pretoka 43 dogodkov se je v povprečju zgodilo 254 min za težiščem hietograma, vendar pa je razpon časovnih zamikov pretoka (LAGQ) znašal med 35 in 455 min. Povprečje razširjenega vzorca, v katerega so vključeni vsi padavinski dogodki z več kot 10 mm padavin v dvoletnem obdobju meritev (N = 83), znaša 250 min, kar je primerljivo z manjšim vzorcem in priča o ustreznosti vzorca. Med časovnim zamikom težišča pretoka in trajanjem dogodka je sicer razvidna pozitivna povezava (slika 37), vendar je ta šibka ( $R^2 = 0,25$ ; p-vrednost < 0,01), saj na čas pojava težišča hidrograma vplivajo tudi drugi dejavniki (npr. porazdelitev in količina padavin), zaradi česar imajo lahko dogodki z istim trajanjem, vendar drugačno porazdelitvijo padavin znotraj dogodka, različne čase zakasnitve in obratno.

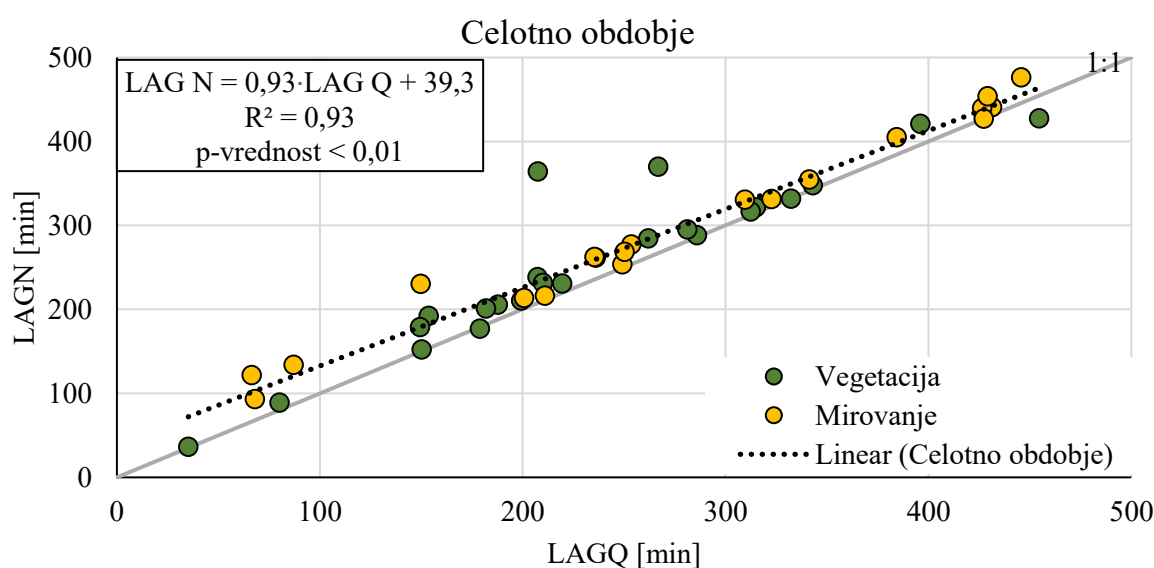


Slika 37: Povezava med časovnim zamikom težišča hidrograma (LAGQ) in trajanjem padavinskega dogodka

Figure 37: Relationship between the time lag of the hydrograph centroid and the duration of a rainfall event

Za analizo časovne dinamike in identifikacijo oblikovanja procesov padavinskega odtoka smo z linearno regresijo preverili povezavo med časi zakasnitve. Povprečni čas zakasnitve iznosa nitratnega dušika s porečja (LAGN) je za dobrih 20 min daljši od časa zakasnitve LAGQ in znaša  $276,8 (\pm 108,3)$  min. Na poznejši pojav težišča diagrama iznosa nitratnega dušika v primerjavi s hidrogramom kaže tudi linearna zveza med posameznimi časi zakasnitve LAGQ in LAGN (slika 38), saj skoraj vse točke ležijo nad premico  $x = y$ . Med časi zakasnitve LAGQ in LAGN smo ugotovili statistično značilno pozitivno linearno zvezo ( $R^2 = 0,93$ ,  $p$ -vrednost  $< 0,01$ ) brez prisotnosti vplivnih točk. Ne glede na to pa smo pri enem dogodku ugotovili, da je do pojava težišča pri diagramu iznosa nitratnega dušika prišlo prej kot do pojava težišča hidrograma. Gre za dogodek, ki se je zgodil 28. julija 2019 ob 6:40. Od konca predhodnih padavin je minilo slabih sedem ur, zaradi česar koncentracije nitratnega dušika za razliko od pretoka na začetku drugega dogodka še niso upadle na začetno raven prvega dogodka. Posledično se je težišče diagrama iznosa nitratnega dušika zgodilo prej kot težišče hidrograma. Pri desetih dogodkih smo ugotovili, da je do pojava težišč prišlo skoraj hkrati, saj razlika med izračunanimi LAGQ in LAGN znaša manj kot  $\pm 5$  minut. Sedem od teh dogodkov se je zgodilo v obdobju vegetacije, trije pa v obdobju mirovanja. Dogodki iz vegetacijskega dogodka so trajali od 20 do 780 min (povprečje  $445 \pm 375$  min) v obdobju mirovanja pa 660, 1060 oz. 1260 min. Pri povprečnem dogodku je padlo 18,3 mm padavin, najvišja enourna intenziteta padavin pa je v povprečju znašala  $9,2 (\pm 4,9)$  mm/h, pri čemer je za sedem dogodkov iz obdobja vegetacije bila povprečna najvišja enourna intenziteta padavin ( $10,2 \pm 4,5$  mm/h) višja kot pri treh dogodkih iz obdobja mirovanja (4,7 mm/h).

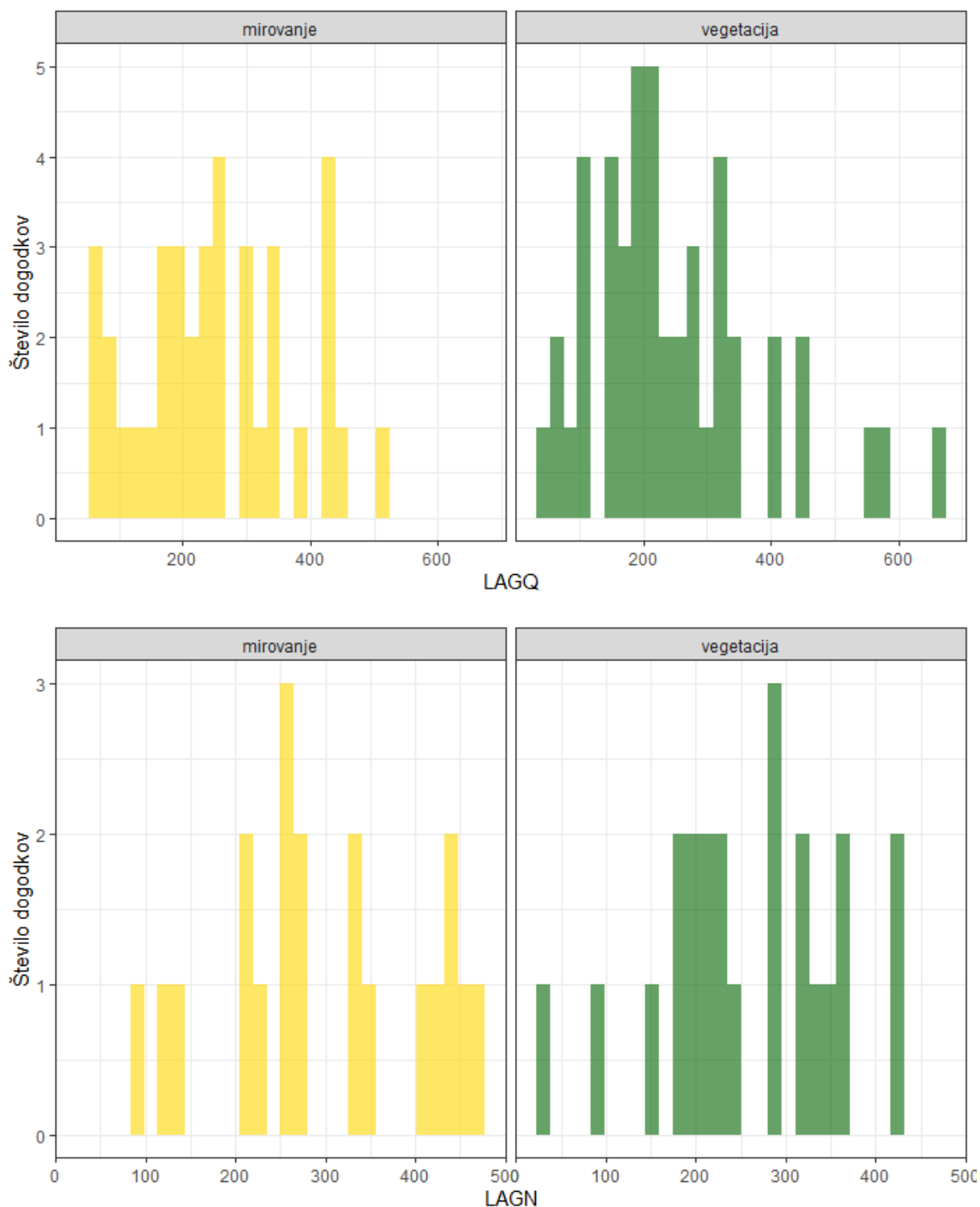
Vzorec izračunanih časov zakasnitve LAGQ in LAGN smo nadalje razdelili še glede na fenološko fazo, tj. obdobje vegetacije (27. marec–12. september) in obdobje mirovanja vegetacije (13. september–26. marec). V obdobju mirovanja (N=20) smo izračunali daljši povprečni čas zakasnitve pretoka ( $276,3 \pm 124,6$  min) kot v obdobju vegetacije (N = 23), ko je LAGQ znašal  $235,2 (\pm 153,0)$  min. Vzrok lahko pripišemo nekaj višjim vrednostim LAGQ v obdobju mirovanja, ki so najverjetneje posledica padavinskih dogodkov z več vmesnimi prekinitvami, ki so podaljšale čas trajanja dogodka in premik težišča hidrograma krepko v desno po časovni osi. To potrjuje tudi robustnejša mera srednje vrednosti, mediana, ki za vzorec LAGQ v obdobju vegetacije (N = 23) znaša 210,0 min, za obdobje mirovanja pa 251,9 min. Povprečni dogodek v obdobju mirovanja je namreč trajal  $1700 (\pm 683)$  min, v obdobju vegetacije pa  $997 (\pm 946)$  min.



Slika 38: Linearna regresija med časom zakasnitve težišča diagrama iznosa  $NO_3\text{-N}$  in težišča hidrograma za celotno obdobje meritev. Zeleni krogeci prikazujejo dogodke v obdobju vegetacije, rumeni pa v obdobju mirovanja.

Figure 38: Linear regression between time lags of centroid of  $NO_3\text{-N}$  flux graph and hydrograph centroid for the entire period of measurements. Green dots represent events in the vegetation period, the yellow dots represent events in the dormancy.

Nadalje vpliv daljših časovnih obdobj potrdjuje tudi porazdelitev dogodkov glede na izračunani čas zakasnitve LAGQ. Medtem ko je v obdobju vegetacije porazdelitev približno normalna, ima porazdelitev v obdobju mirovanja še en izrazit vrh ravno pri ekstremnih dogodkih z LAGQ, daljšim od 400 min (slika 39, zgoraj). Porazdelitev dogodkov glede na izračunan LAGN pa je za obe obdobji zelo podobna (slika 39, spodaj). Ne glede na to pa se je z regresijskim modelom izkazalo, da fenološka faza v linearnem modelu ni statistično značilna spremenljivka, kar pomeni, da sta regresijski premici, če bi ju zrisali posebej za dogodke v obdobju vegetacije in posebej za dogodke iz obdobja mirovanja, podobni z vidika naklona regresijske premice in presečišča.



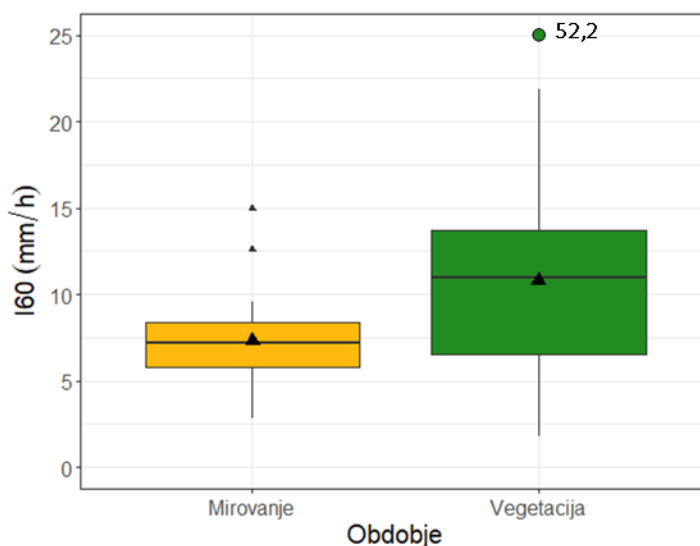
Slika 39: Frekvenčni histogrami časov zakasnitve LAGQ (zgoraj) in LAGN (spodaj) glede na fenološko fazo

Figure 39: Frequency histograms of time lags LAGQ (above) and LAGN (below) based on the phenology

Na krajši čas zakasnitve v obdobju vegetacije oziroma v pomladansko-poletnem obdobju pa lahko vpliva tudi porazdelitev padavin. Šraj in sod. (2010) so preverjali obliko hietograma na modelirani hidrogram odtoka in ugotovili, da se čas do konice pretoka podaljšuje s trajanjem padavin, poleg tega



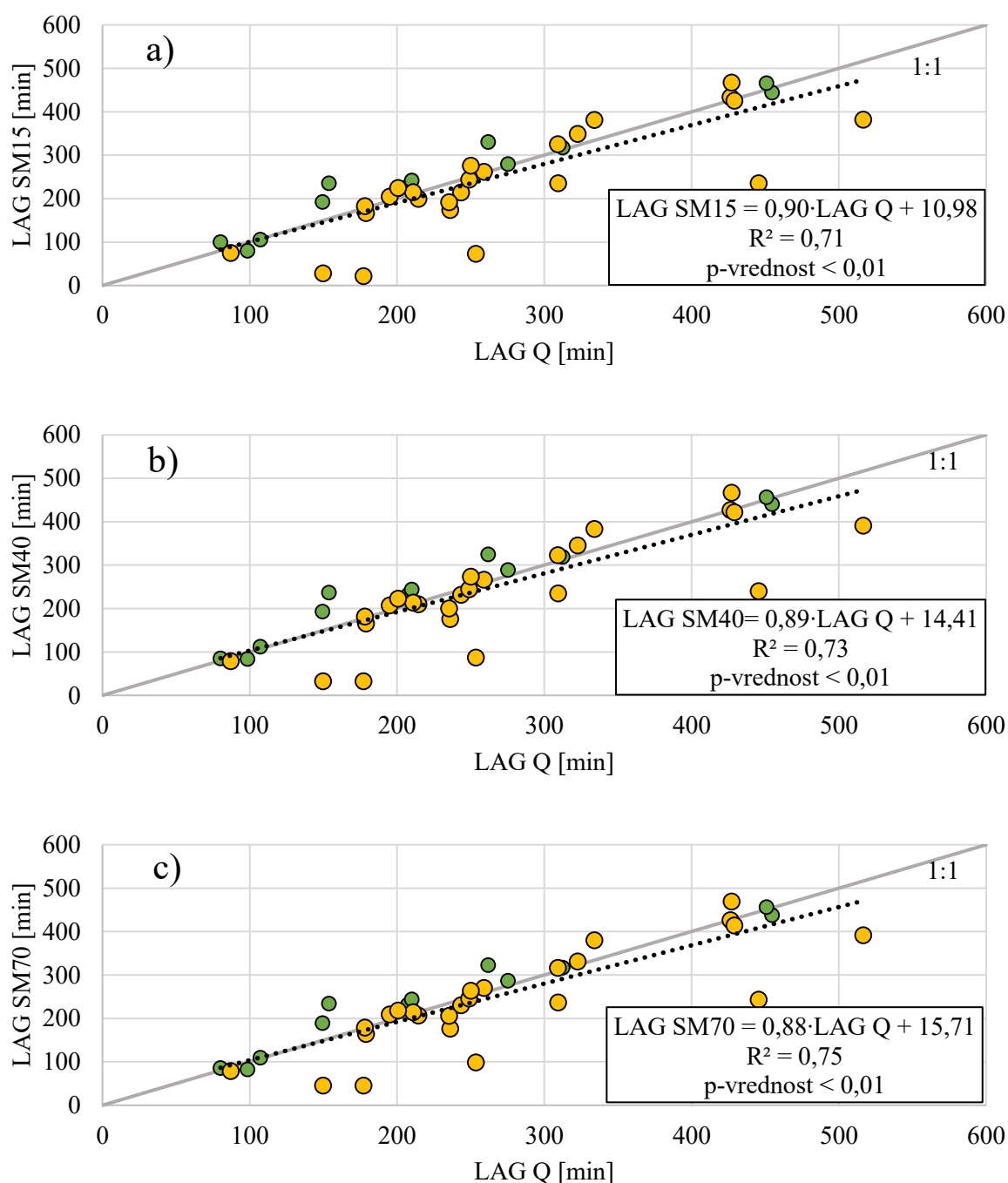
pa je ključni dejavnik, ki vpliva na čas pojava konice tudi, kdaj med padavinskim dogodkom se pojavi največja intenziteta padavin. Povprečna maksimalna enourna intenziteta ( $I_{60}$ ) v obdobju vegetacije je znašala  $12,6 (\pm 9,3)$  mm/h, v obdobju mirovanja pa  $7,3 (\pm 3,1)$  mm/h (slika 40). V obdobju vegetacije je bila maksimalna enourna intenziteta padavin v povprečju dosežena na četrtini trajanja padavin, v obdobju mirovanja pa približno na polovici.



Slika 40: Prikaz maksimalnih enournih intenzitet padavin z okvirjem z ročaji glede na obdobje vegetacije oziroma mirovanja. Zaradi boljše preglednosti vrednost  $I_{60} = 52,2$  mm/h v obdobju vegetacije ni zrisana v merilu.

Figure 40: Presentation of maximum one hour rainfall intensities with box-plot based on the time of vegetation or dormancy. For better representation purpose, value  $I_{60} = 52.2$  mm/h during vegetation period is not shown in scale.

Na obliko hidrograma in posledično na čas zakasnitve namreč poleg oblike porečja, porazdelitve padavin, topografije in reliefa ter geologije vpliva tudi raba tal oziroma sezonska dinamika vegetacije. V raziskavi Bian in sod. (2020) so z uporabo hidrološkega modela, v katerega so vključili podatke LAI, pridobljene z daljinskim zaznavanjem, ugotovili, da je bil vpliv vegetacije na zmanjšanje odtoka predvsem v poletnih mesecih (zaradi povišane evapotranspiracije in večjega prestrezanja padavin) izrazit. Podobno smo tudi v primeru diagrama iznesenega nitratnega dušika s porečja (LAGN) ugotovili, da je povprečni čas zakasnitve (ob izločitvi ekstremne vrednosti) v obdobju rasti vegetacije in njene olistanosti krajši od tistega v obdobju mirovanja vegetacije. V obdobju vegetacije znaša povprečni čas zakasnitve  $252 (\pm 99,3)$  min, v obdobju mirovanja pa  $299,5 (\pm 110,8)$  min.



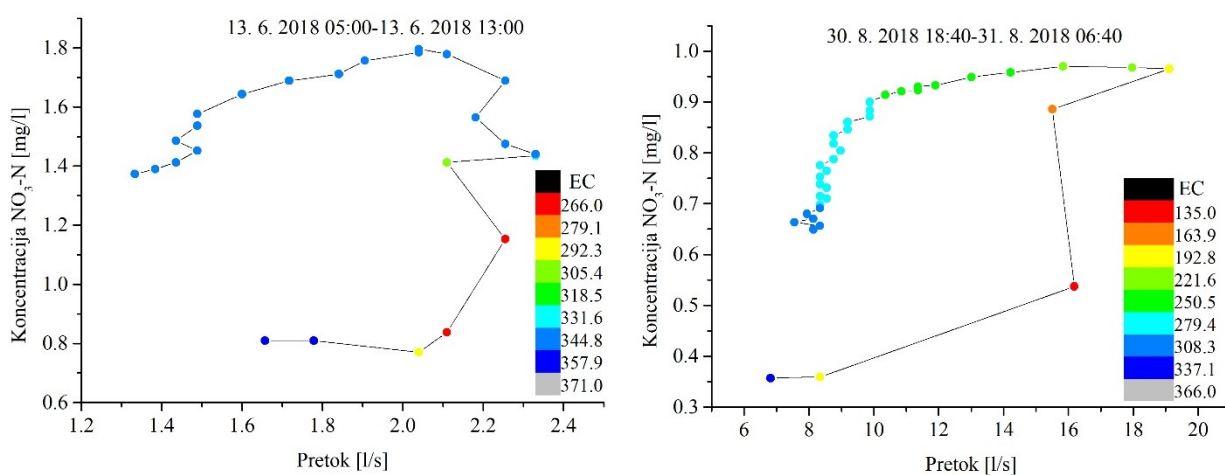
Slika 41: Linearna regresija med časom zakasnitve težišča diagrama volumetrične vsebnosti vode v tleh za različne globine (a–c) in težišča hidrograma. Zeleni krogi prikazujejo dogodke v obdobju vegetacije, rumeni pa v obdobju mirovanja.

Figure 41: Linear regression between the time lags of the centroid of the volumetric soil water content graph for different depths (a–c) and the hydrograph centroid. Green dots represent events in the vegetation period, the yellow dots represent events in the dormancy.

Na enak način smo določili tudi čase zakasnitve volumetrične vsebnosti vode v tleh (težišče diagrama) in jih primerjali z LAGQ. Za vsak dogodek smo izračunali tri čase zakasnitve (LAGSM15, LAGSM40, LAGSM70), in sicer posebej za vsako globino, na kateri je nameščen senzor. Do težišča diagrama

volumetrične vsebnosti vode v tleh pride na vseh treh globinah skoraj hkrati, kar je razvidno tudi iz velike podobnosti diagramov odvisnosti LAGQ in LAGSM za različne globine (slika 41). Gledano celotno obdobje se je težišče hidrograma v povprečju zgodilo v 257( $\pm$ 111) min, težišča diagramov volumetrične vsebnosti vode v tleh gledano od zgoraj navzdol pa v 241( $\pm$ 118), 243( $\pm$ 116) oziroma 243( $\pm$ 113) min. Prav tako kot v primeru odvisnosti LAGQ in LAGN se je tudi v primeru linearne regresije med LAGQ in LAGSM na vseh treh globinah izkazalo, da spremenljivka fenološka faza v modelu ni statistično značilna. Na podlagi časov zakasnitve in njihove primerjave med obravnavanimi procesi smo dobili vpogled v njihovo časovno povezanost in dinamiko, vendar pa na podlagi časov zakasnitve ne moremo sklepati o jakosti in obsegu posameznih dogodkov, zato smo v nadaljevanju podrobneje in celovito analizirali posamezne padavinske dogodke.

Časovno spreminjanje koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  v odvisnosti od časovne spremembe pretoka pri dveh izbranih padavinskih dogodkih prikazuje slika 42. Dodatno smo v grafično predstavitev vključili še časovno spremembo električne prevodnosti, ki v splošnem pri najnižjih vrednostih prikazuje najvišji delež nove vode. Iz slike je lepo razvidna tvorba padavinskega odtoka. Vidimo, da sta se najnižji vrednosti električne prevodnosti (rdeči točki na diagramih) zgodili pred konico pretoka, kar kaže na hiter odtok po površini tal (kratek kontaktni čas s tlemi), in da se del odtoka tvori tudi skozi talne horizonte. Dodatno je iz diagramov razvidno, da do konice koncentracije pride še pozneje, na podlagi česar lahko sklepamo, da največjega deleža nitratnega dušika ne predstavlja površina tal, ampak plitvi talni horizonti.

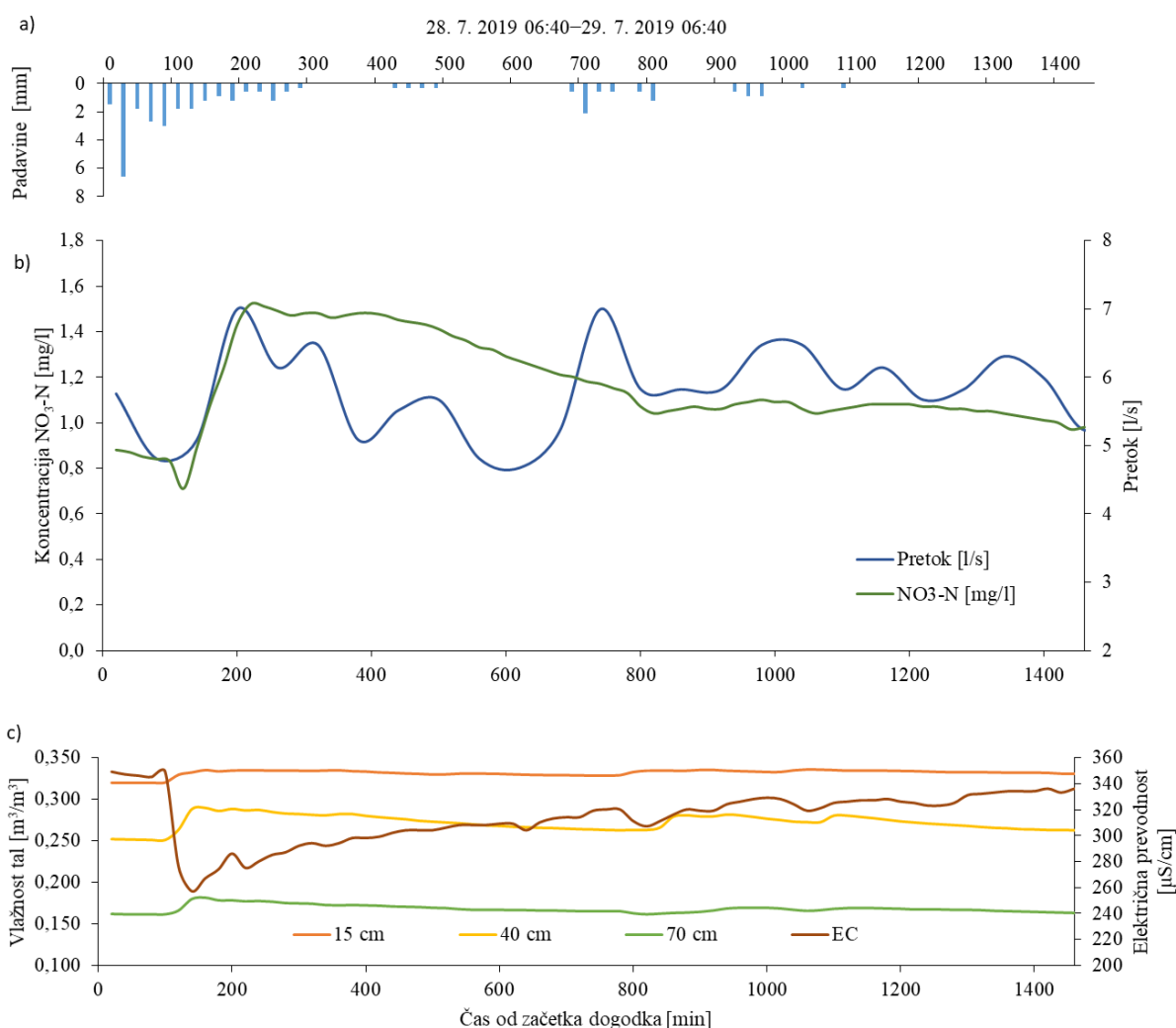


Slika 42: Časovne spremembe koncentracije nitratnega dušika v odvisnosti od pretoka z označenimi pripadajočimi vrednostmi električne prevodnosti med dvema padavinskima dogodkoma

Figure 42: Temporal variability of nitrate nitrogen concentration and discharge with marked corresponding values of electrical conductivity during two rainfall events

### 5.2.2 Podrobnejša in celovita analiza dogodkov

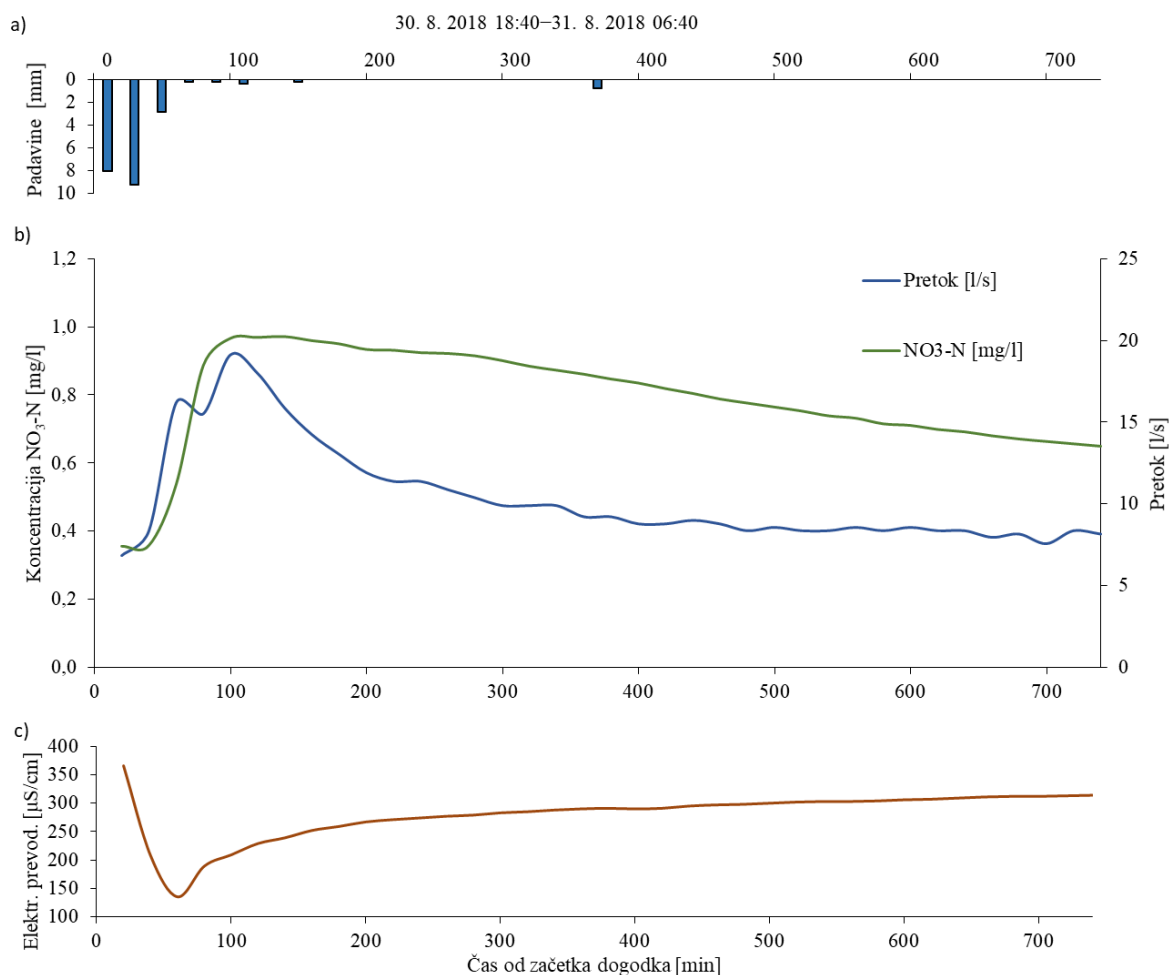
V nadaljevanju smo podrobneje in celovito analizirali razmere med padavinskimi dogodki, pri katerih smo v poglavju 4 Rezultati z vidika koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ , količine iznesenega  $\text{NO}_3\text{-N}$ , pretoka in vlažnosti tal ugotovili ekstremne razmere (npr. najvišji dosežen pretok, najvišja dosežena koncentracija, največja sprememba vsebnosti vode v tleh). Najdaljši čas zakasnitve pretoka (LAGQ) je bil dosežen pri dogodku, ki se je zgodil med 28. in 29. julijem 2019, ko je ob 1460 min dolgem padavinskem dogodku čas zakasnitve trajal 454 min. Predhodni dogodek se je zaključil le slabo uro pred začetkom tega dogodka, zato je tako pri pretoku kot pri koncentraciji  $\text{NO}_3\text{-N}$  na začetku opazno upadanje obeh količin (slika 43, b). Absolutna konica pretoka se je zgodila slabih osem ur po konici koncentracije nitratnega dušika.



Slika 43: Padavine (a), pretok, koncentracija  $\text{NO}_3\text{-N}$  (b), vsebnost vode v tleh in električna prevodnost (c) med padavinskim dogodkom 28.–29. julij 2019

Figure 43: Precipitation (a), discharge,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 28–29 July 2019

Iz oblike hidrograma lahko opazimo, da bi pri obravnavanem dogodku zaradi hitrega odziva porečja na padavine lahko govorili o sestavljenem dogodku z več konicami. Prva večja konica se je namreč zgodila tik pred konico koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  (slika 43, a in b). Diagrama električne prevodnosti in koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  na drugi strani ne izkazujeta vidnejših odzivov na padavine po 300 min od začetka dogodka (slika 43, b in c). To je najverjetneje posledica dotoka vode skozi talne horizonte, kjer se z raztapljanjem snovi povečuje vsebnost ionskih delcev, posledično pa se zvišuje tudi električna prevodnost. Na to kaže tudi diagram volumetrične vsebnosti vode v tleh, ki okoli 850 min od začetka dogodka kaže predvsem v srednjem sloju na ponovno povečanje vsebnosti vode (slika 43, c). Po pedološki klasifikaciji talnega profila se v tem delu nahajajo tudi korenine, preko katerih drevesa v obdobju vegetacije povečano absorbirajo hranila (npr. Li in sod., 2016), kar je lahko vzrok, da se koncentracija  $\text{NO}_3\text{-N}$  kljub dodatnemu transportnemu mediju ni več povečevala. Med dogodkom je skupaj padlo 35,7 mm padavin, maksimalna enourna intenziteta padavin pa je znašala 11,1 mm/h.



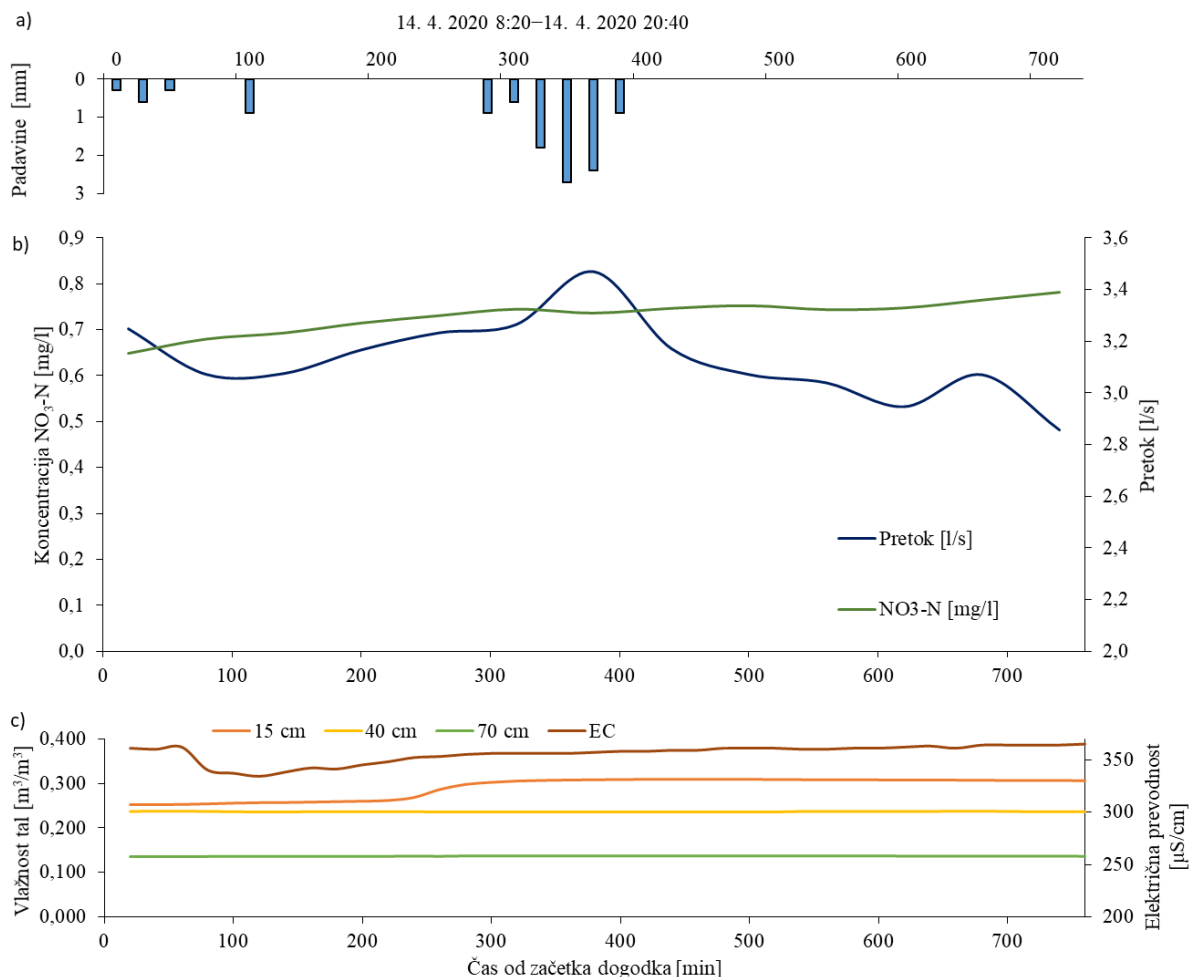
Slika 44: Padavine (a), pretok, koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  (b) in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 30.–31. avgust 2018.

Figure 44: Precipitation (a), discharge,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (b), and electrical conductivity during the rainfall event 30–31 August 2018

Najkrajši čas zakasnitve LAGQ (35,2 min) smo izračunali pri dogodku 30. avgusta 2018 (slika 44). V 740 min dogodka je padlo 21,8 mm padavin, od česar je 20 mm padlo v prvi uri dogodka. Konica pretoka se je pojavila 100 min po začetku padavinskega dogodka oziroma v dobri uri od centroida hietografa. Težišče hidrograma je pomaknjeno še nekoliko bolj v levo na časovni osi, saj so se pretočne razmere kmalu po koncu padavin povrnile na raven pred dogodkom (slika 44, modra črta). Podoben odziv smo opazili tudi pri koncentraciji nitratnega dušika, ki je najvišjo vrednost dosegla v istem času kot pretok (slika 44, b, zelena črta). Informacijo o oblikovanju površinskega odtoka dopolnjuje diagram časovne spremenljivosti električne prevodnosti. Ta je minimum 135  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (najvišji delež nove vode v vodotoku) dosegla pred konico pretoka in koncentracije (60 min po začetku dogodka). V tem času se je koncentracija nitratnega dušika že nekoliko povečala, vendar se je do konice še podvojila. Pri tem velja poudariti, da je v času od minimuma električne prevodnosti do konice pretoka in koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  padla zanemarljiva količina padavin (0,8 mm), kar nakazuje, da povišane koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  niso posledica spiranja  $\text{NO}_3\text{-N}$  skladno s časovno dinamiko stekanja nove vode (pretežno površinskega odtoka v strugo vodotoka, ampak spiranja skozi talne horizonte. Relativno velika sprememba električne prevodnosti po padavinah nakazuje na hiter in pretežen površinski odtok, pri katerem se voda ne navzame velikih količin snovi, ki bi bile vir ionov. Na podlagi tega lahko sklepamo, da je vir nitratnega dušika, ki je prispeval k povišanju koncentracij, predvsem talni horizonti. Glede na vrednosti C : N lahko sklepamo, da je najintenzivnejše spiranje  $\text{NO}_3\text{-N}$  potekalo iz talnih horizontov H3 in H4, saj je vrednost razmerja v teh slojih najnižja.

Dogodek z največjo izmerjeno spremembo vsebnosti vode v tleh v najplitvejšem sloju ( $0,057 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) se je zgodil 14. aprila 2020, kar nakazuje na izrazit površinski oziroma plitev podpovršinski tok. Ne glede na to pa podrobnejša in celovita analiza padavinskega dogodka pokaže, da je bila na začetku dogodka volumetrična vsebnost vode v tleh v globini 15 cm samo  $0,253 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (slika 45, c), kar je blizu najnižje izmerjene vrednosti (preglednica 8). Med padavinskim dogodkom, ki je trajal 760 min, je padlo 11,4 mm dežja s srednjo intenziteto 1,7 mm/h. Vsebnost vode v tleh na koncu dogodka je dosegla vrednost  $0,306 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , kar je še vedno precej manj od dvoletnega povprečja. Sprememba pretoka med dogodkom je bila manjša od 1 l/s, prav tako sprememba koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  (slika 45, b), kar kaže na to, da je do vodotoka prispel zgolj manjši delež padavin. V srednjem in najglobljem sloju nismo zaznali sprememb volumetrične vsebnosti vode v tleh (slika 45, c). Razlog za takšen odziv porečja lahko pripišemo kombinaciji nizke predhodne oziroma začetne vsebnosti vode v tleh, zaradi česar so tla zadržala večjo količino vode iz padavin, in večji potrošnji vode, razpoložljive v tleh, za rast in razvoj vegetacije, kar dokazuje tudi relativno visoka tridnevna predhodna evapotranspiracija, ki je v rangi višine padlega dežja (11,1 mm). Podobne odzive sprememb vsebnosti vode v tleh v suhih obdobjih so opazili tudi Noguchi in sod. (1997), kjer podobno kot v našem primeru v globljih slojih niso zaznali sprememb volumetrične vsebnosti vode. To ugotovitev dopolnjuje tudi diagram časovne spremenljivosti

električne prevodnosti (slika 45, c, rjava črta), ki kaže na majhno spremembo med dogodkom. Ta pa je značilna predvsem za začetni del dogodka. V drugem delu dogodka z večjim deležem padavin ni prišlo do spremembe električne prevodnosti.

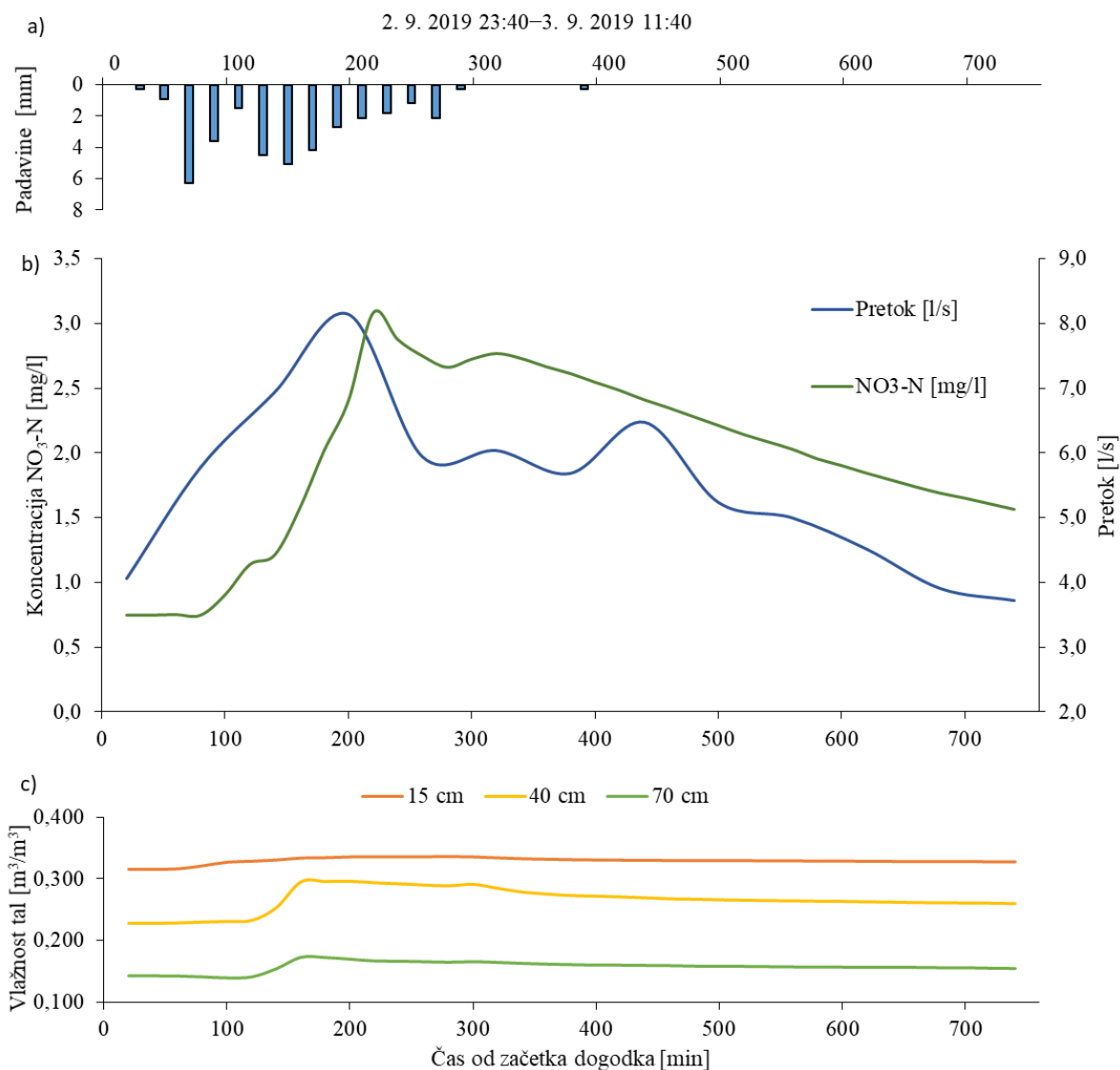


Slika 45: Padavine (a), pretok, koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  (b) in volumetrično vsebnost vode v tleh (c) med padavinskim dogodkom 14. aprila 2020

Figure 45: Precipitation (a), discharge,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (b), and volumetric soil water content (c) during the rainfall event on 14 April 2020

Med padavinskim dogodkom, ki se je zgodil med 2. in 3. septembrom 2019, smo opazili najvišjo spremembo koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$ , ki se je po padavinah z začetnih 0,75 mg/l povzpela do vrednosti 3,08 mg/l (slika 46, b). V 380 min je padlo 36,9 mm padavin s srednjo intenziteto ( $I_{sr}$ ) 5,8 mm/h in z maksimalno enourno intenziteto ( $I_{60}$ ) 13,8 mm/h. Koncentracije nitratnega dušika so po začetku padavin začele strmo naraščati in dosegle konico 220 min po začetku padavin. Konica pretoka (8,1 l/s) je bila dosežena pred konico koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$ , in sicer v 160 min. Največja relativna sprememba volumetrične vsebnosti vode v tleh je bila zaznana v srednjem sloju (globina 40 cm), kjer je bila sprememba 7 %, medtem ko se je v zgornjem in najglobljem sloju povečala zgolj za 2 oziroma 3 %. Iz grafičnega prikaza časovne spremembe pretoka in koncentracij nitratnega dušika je razvidno, da je bila konica pretoka dosežena eno uro pred najvišjo izmerjeno koncentracijo. Podobno smo ugotovili tudi na

podlagi primerjave izračunanih težišč diagramov; težišče hidrograma se je zgodilo približno 20 min prej. Na podlagi celovitega pregleda časovnega razvoja vseh procesov lahko sklepamo, da so vir nitratnega dušika predstavljala tla v vseh globinah. V času dogodka smo imeli tehnične težave s tipalom za električno prevodnost, zaradi česar ne moremo podrobneje sklepati o tem, ali je večinski delež vode odtokel površinsko ali podpovršinsko.



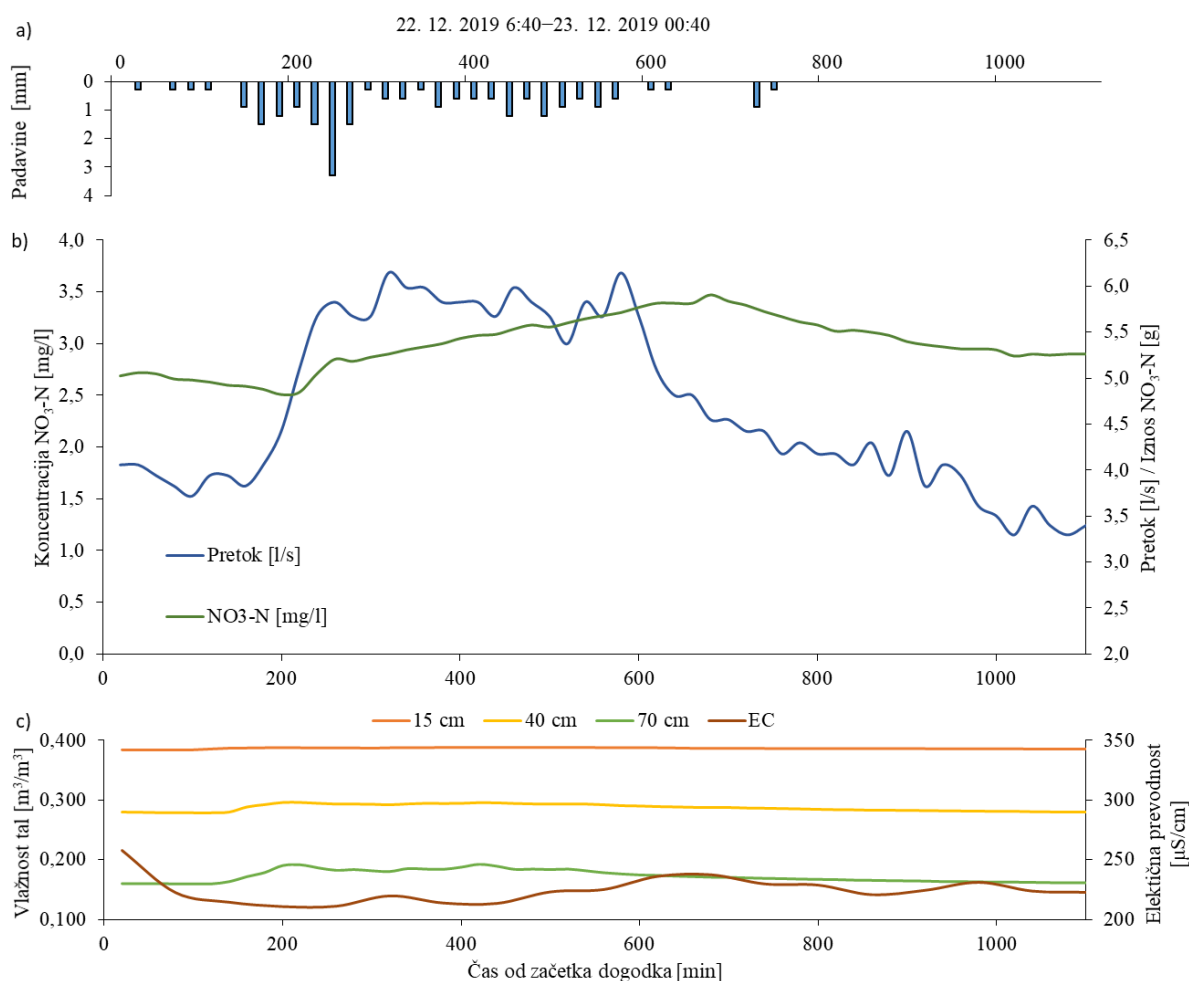
Slika 46: Padavine (a), pretok, koncentracije NO<sub>3</sub>-N (b) in volumetrično vsebnost vode v tleh (c) med padavinskim dogodkom 2. septembra 2019

Figure 46: Precipitation (a), discharge, NO<sub>3</sub>-N concentration (b), and volumetric soil water content (c) during the rainfall event on 2 September 2019

22. decembra 2019 smo izmerili najvišjo koncentracijo NO<sub>3</sub>-N v vodotoku, ki je znašala 3,47 mg/l. Od prvih zabeleženih padavin do konca dogodka je preteklo 1100 min, v tem času pa je padlo 24,3 mm dežja. Vsebnost vode v vseh slojih tal je bila zaradi nizke evapotranspiracije in večje količine padavin, ki so padle en dan prej, nadpovprečna. Posledično so bile spremembe vsebnosti vode v tleh med



padavinskim dogodkom nizke, njihova sprememba pa je naraščala z globino tal, vendar je bila ta tudi v najglobljem sloju zanemarljivo majhna (slika 47, c). Iz časovnih diagramov pretoka in koncentracije nitratnega dušika (slika 47, b) je razvidno, da naraščanje koncentracije nitratnega dušika po padavinah ni tako strmo kot naraščanje pretoka, kar je najverjetneje posledica predhodnega dogodka, ki se je končal slabi dve uri pred začetkom novega in v katerem se je večja količina nitratnega dušika že sprala s porečja. Zaradi kratkega časovnega razmika med dogodkoma pa so bile koncentracije na začetku dogodka že relativno visoke (2,69 mg/l). Na vpliv predhodnega dogodka kaže tudi diagram električne prevodnosti, ki je bila že na začetku dogodka nizka (250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), med dogodkom pa se je le še malo znižala (slika 47, c, rjava črta).

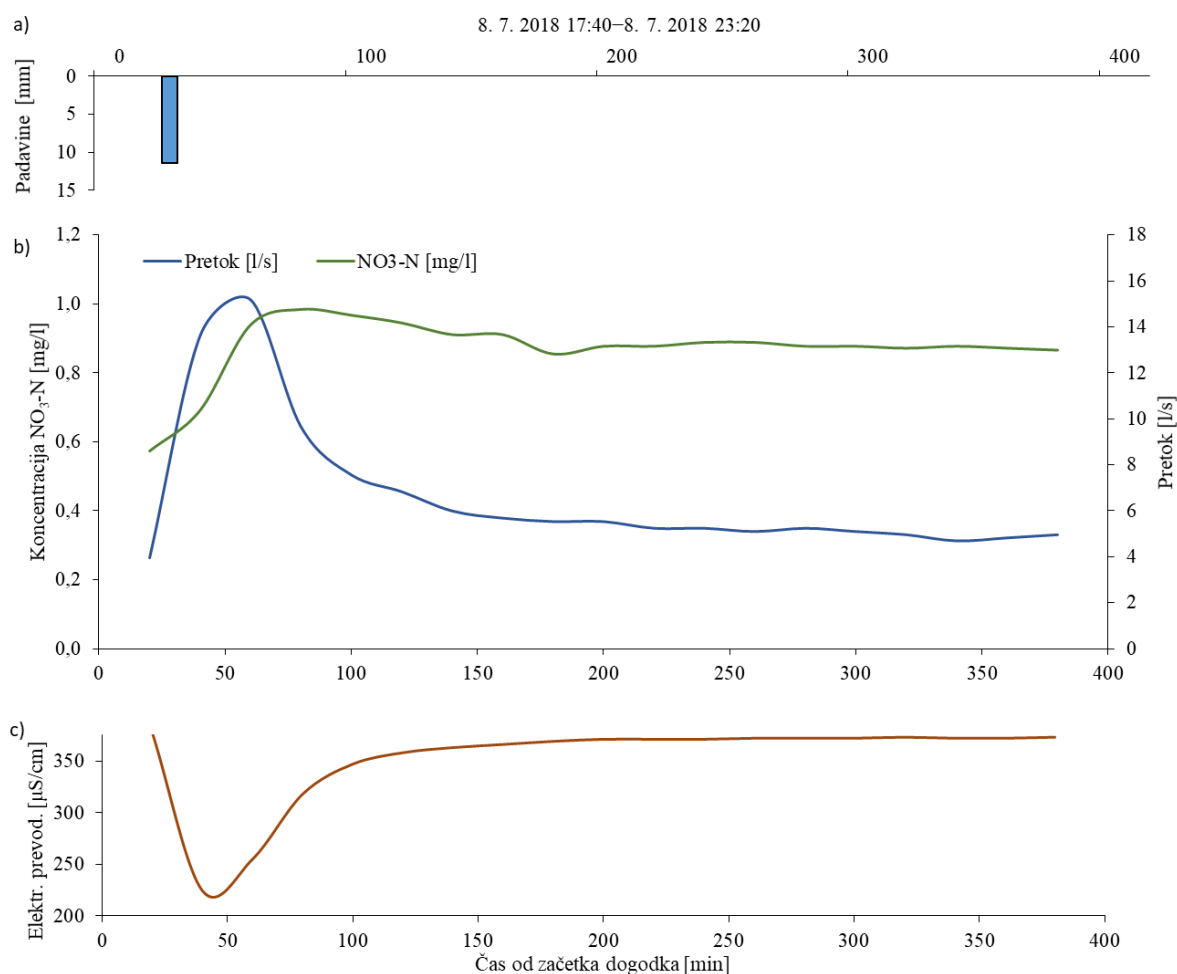


Slika 47: Padavine (a), pretok, koncentracije NO<sub>3</sub>-N (b), volumetrične vsebnosti vode v tleh in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 22.–23. decembrom 2019

Figure 47: Precipitation (a), discharge, NO<sub>3</sub>-N concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event between 22–23 December 2019

V nadaljevanju smo podrobneje analizirali še dogodka z najvišjo izmerjeno srednjo in maksimalno enourno intenziteto padavin. Prvi se je zgodil 8. julija 2018 (slika 48), ko je v 20 minutah padlo 11,4 mm padavin, drugi pa 2. avgusta 2019, ko so padavine trajale 200 min, padlo pa je 60,3 mm dežja (slika 49). Srednja intenziteta julijskega dogodka je znašala 34,2 mm/h, maksimalna enourna intenziteta

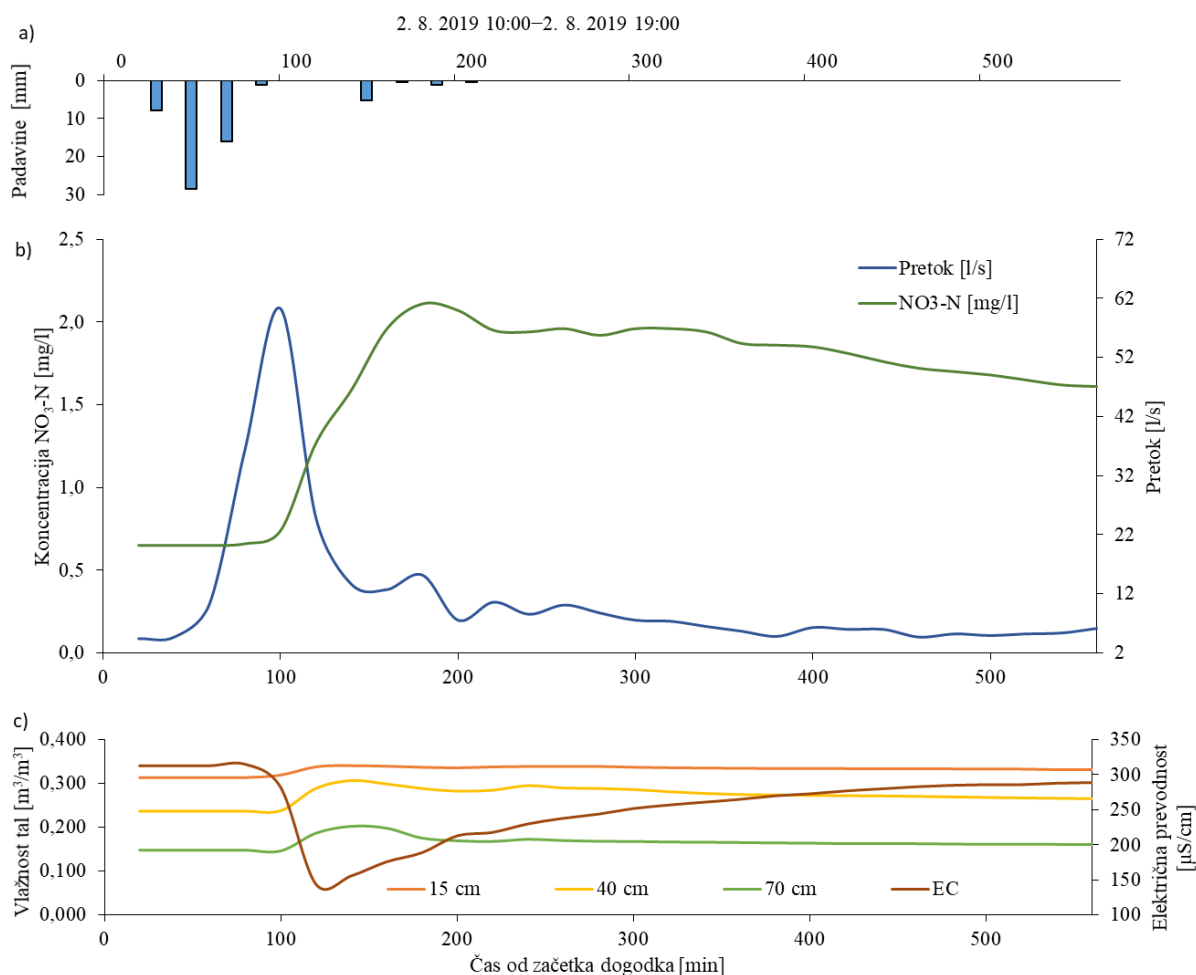
avgustovskega dogodka pa 52,2 mm/h. Pri obeh dogodkih je dobro razviden hiter odziv, ki se odraža v strmem naraščajočem delu hidrograma kmalu po začetku visokointenzivnega dogodka. Konica pretoka pri dogodku julija 2018 (15,2 l/s) je bila dosežena v 60 min od začetka dogodka (slika 48, b, modra črta), konica pretoka pri dogodku avgusta 2019 (60,3 l/s) pa v 100 min od začetka dogodka (slika 49, b, modra črta). Graf koncentracije nitratnega dušika je konico dosegel nekoliko za konico pretoka in ni upadal tako hitro kot hidrogram, kar nakazuje na oddaljene vire nitratnega dušika. V primeru dogodka z 8. julija 2018 je bila koncentracija nitratnega dušika ob koncu padavinskega dogodka še vedno v velikostnem razredu maksimalne izmerjene koncentracije, najvišja koncentracija (0,98 mg/l) pa je bila izmerjena 20 min po konici pretoka (slika 48, b, zelena črta). Diagram električne prevodnosti (slika 48) dopolnjuje interpretacijo razvoja dogodka z informacijo, da je večina padavinske vode odtekla zelo hitro, pri čemer zaradi velike spremembe prevodnosti lahko sklepamo, da je večji delež odtekel brez daljšega stika s tlemi, pri čemer bi prišlo do intenzivnejšega raztapljanja snovi v vodi in posledično višjih vrednosti elektroprevodnosti.



Slika 48: Padavine (a), pretok, koncentracije NO<sub>3</sub>-N (b) in električna prevodnost (c) med padavinskim dogodkom 8. julija 2018

Figure 48: Precipitation (a), discharge, NO<sub>3</sub>-N concentration (b), and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 8 July 2018

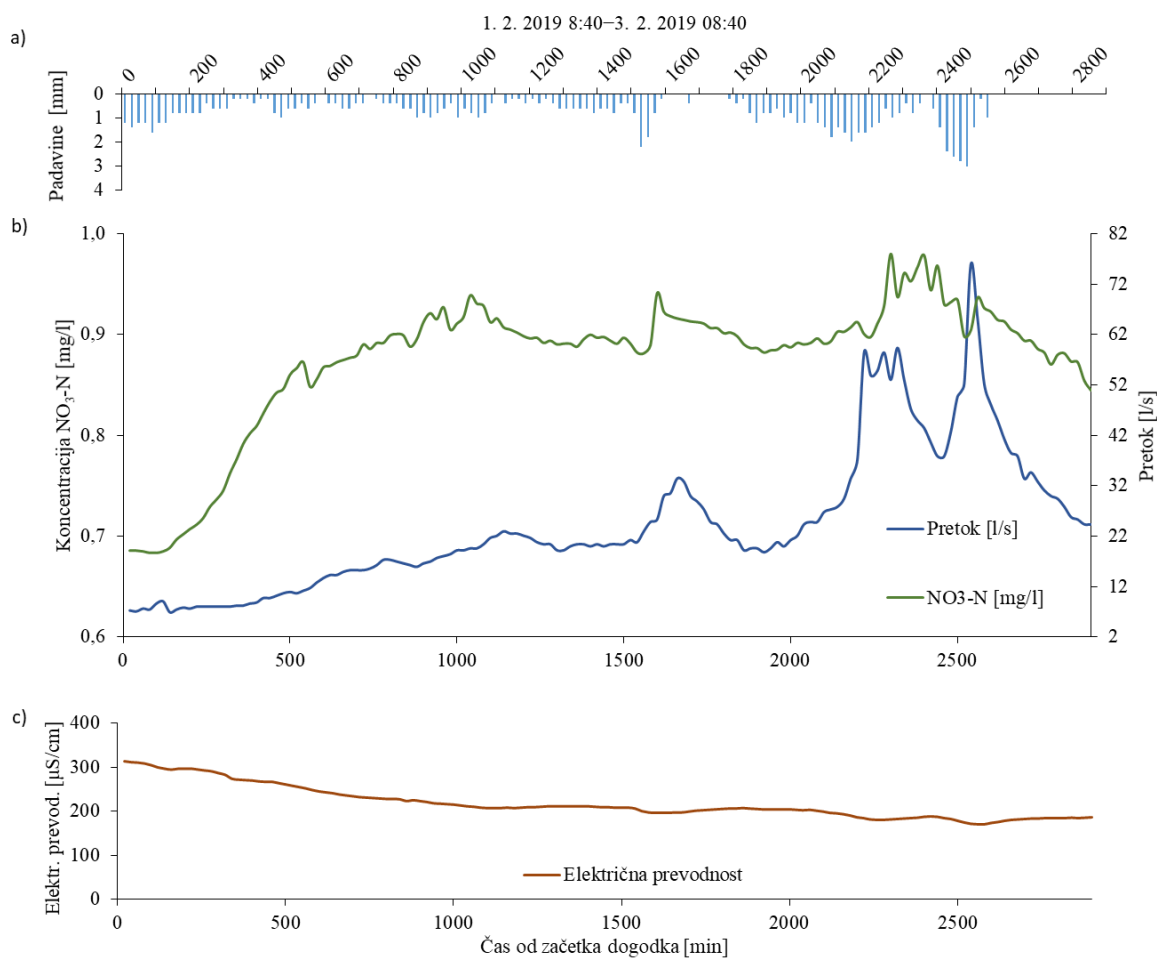
V primeru dogodka z 2. avgusta 2019 smo izmerili najvišjo koncentracijo nitratnega dušika (2,11 mg/l) 80 min za konico pretoka, upadanje koncentracije pa je bilo v primerjavi s padajočim delom hidrograma tudi pri tem dogodku relativno počasno (slika 49, b). Pri slednjem dogodku smo spremljali tudi spreminjaje volumetrične vsebnosti vode v tleh (slika 49, c). Ugotovili smo, da je najmanjša sprememba volumetrične vsebnosti vode v tleh kljub podpovprečni začetni vsebnosti vode bila v najplitvejšem sloju, kjer se je vsebnost vode povečala za slabe 3 %. Povečanje volumetrične vsebnosti vode v tleh je bilo večje v slojih na globinah 40 in 70 cm, kjer se je vsebnost vode spremenila za 7 oziroma 5,5 %. Časovni potek sprememb vsebnosti vode v tleh dodatno razkriva, da je vsebnost vode v vseh treh globinah tal začela naraščati, ko je hidrogram že upadal (približno 2 uri po začetku dogodka), kar kaže na to, da je pretežni del volumna vode med dogodkom odtekel po površini porečja. To potrjujejo tudi podatki o električni prevodnosti, ki kažejo, da je bil nižek (največji delež padavinske vode v vodotoku) skoraj hkrati s konico pretoka.



Slika 49: Padavine (a), pretok, koncentracije NO<sub>3</sub>-N (b), volumetrične vsebnosti vode v tleh in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 2. avgusta 2019

Figure 49: Precipitation (a), discharge, NO<sub>3</sub>-N concentration (b), volumetric soil water content, and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 2 August 2019

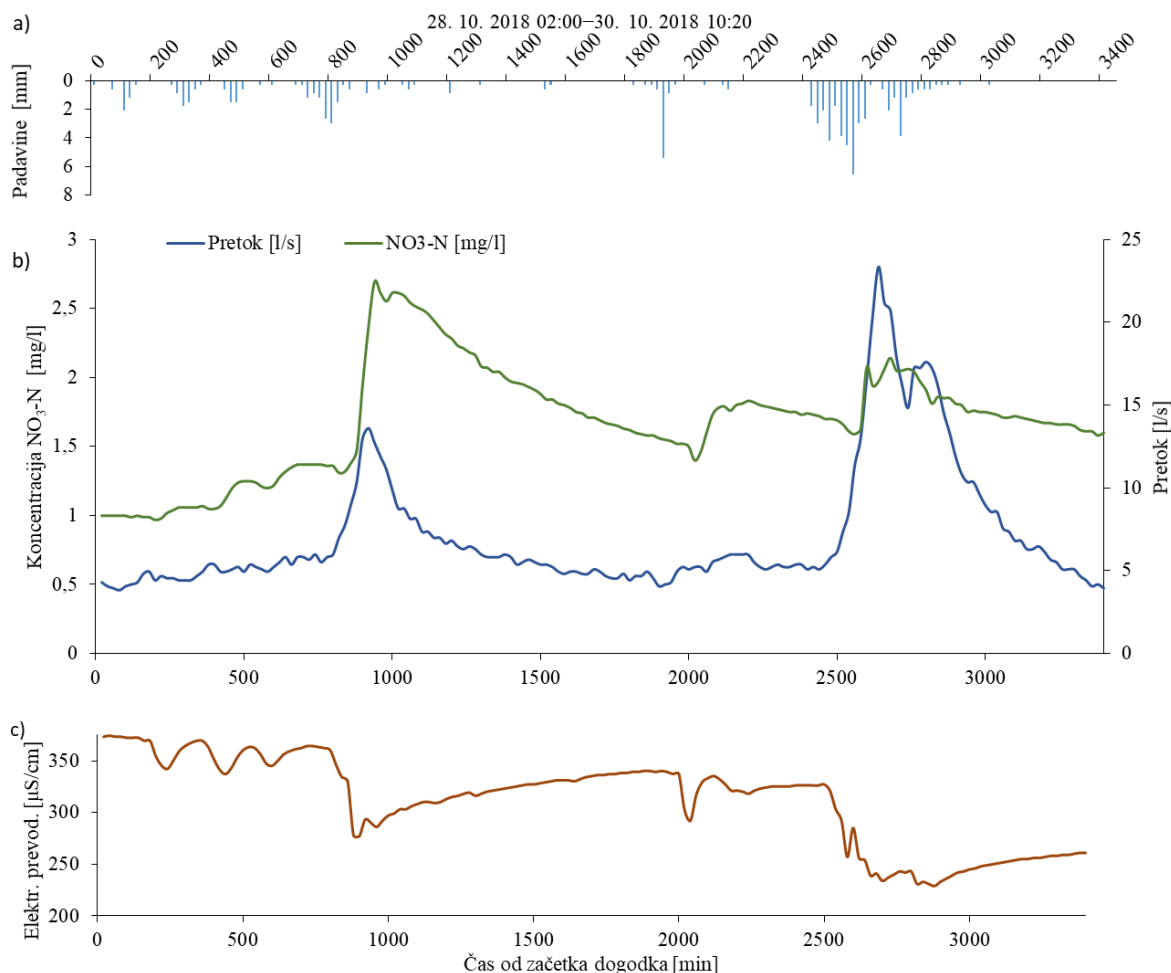
Najvišji izmerjeni pretok (80,6 l/s) je bil sicer izmerjen 27. maja 2019, vendar za ta dogodek zaradi tehničnih težav nimamo razpoložljivih podatkov o koncentraciji nitratnega dušika. Zato smo podrobneje analizirali dogodek, ki se je zgodil med 1. in 3. februarjem 2019, ko je konica pretoka znašala 75,9 l/s (slika 50, b). Dogodek je z 2900 min drugi najdaljši, za katerega smo imeli na voljo tako hidrometeorološke podatke kot podatke sprememb koncentracije nitratnega dušika. Med dogodkom je skupaj padlo 95 mm dežja s srednjo intenziteto 2,2 mm/h in maksimalno enourno intenziteto 8,4 mm/h. Koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  so kmalu po začetku padavin začele naraščati. Na začetku dogodka je koncentracija znašala 0,69 mg/l, absolutni maksimum (0,98 mg/l) pa je bil dosežen po 2300 min. Pri tem velja dodati, da so se koncentracije večji del dogodka gibale okoli vrednosti 0,90 mg/l, zato podatek o konici v tem primeru ni najbolj relevanten. Pretok je relativno hitro narastel na več kot 10 l/s in postopoma naraščal vse do konice z nekaj vmesnimi izrazitimi naraščanji in upadanji pretoka. Tako kot pri hidrogramu smo tudi pri diagramu koncentracije zaznali nekaj skokov, vendar za manj kot 0,1 mg/l. Koncentracija je začela proti koncu dogodka hitreje upadati, začetek upadanja pa približno sovpada z upadanjem pretoka (slika 50, b).



Slika 50: Padavine (a), pretok, koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  (b) in električne prevodnosti (c) med padavinskim dogodkom 1. februarja 2019

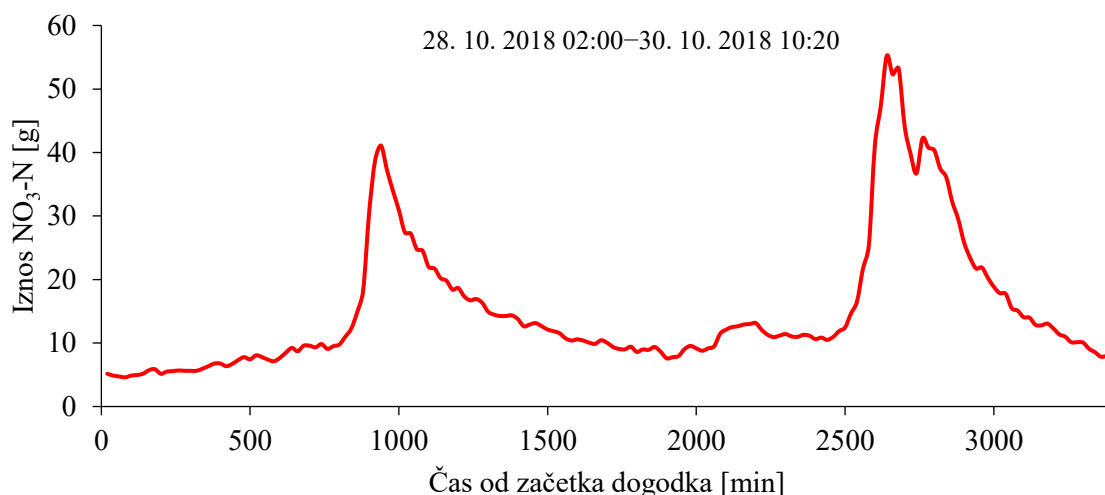
Figure 50: Precipitation (a), discharge,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration (b), and electrical conductivity (c) during the rainfall event on 1 February 2019

Dogodek med 28. in 30. oktobrom 2018 je bil najdaljši dogodek v vzorcu 43 dogodkov in je trajal 3400 min, skupna količina padavin pa je znašala 88,2 mm. Hidrogram ima dve izraziti konici, prva (13,6 l/s) je bila dosežena 28. oktobra ob 17:00, druga, višja (23,35 l/s) pa naslednji dan ob 21:40 (slika 51). Pri diagramu koncentracije nitratnega dušika je magnituda dogodkov ravno obratna, v obdobju prve konice hidrograma je koncentracija narasla precej bolj (najvišja koncentracija 2,69 mg/l) kot v času višjih pretokov (najvišja koncentracija 2,14 mg/l). Pri tem velja dodati, da sta se konici koncentracije zgodili za konicama pretoka, in sicer je prva konica bila poznejša za en časovni korak, druga konica pa za dva časovna koraka. Sklepamo lahko, da je pri drugi konici prišlo do velikega razredčenja zaradi dodatnih padavin. To potrjujeta tudi diagrama električne prevodnosti (slika 51, c), na podlagi katere lahko sklepamo, da je bil delež nove vode v vodotoku v času druge konice hidrograma najvišji, in diagram časovne dinamike iznosa nitratnega dušika s porečja (slika 52), ki kaže na višji iznos nitratnega dušika med drugo konico, ne glede na nižje koncentracije. Skupna količina iznesenega nitratnega dušika med padavinskim dogodkom znaša 2587 g, kar predstavlja več kot 2 % povprečnega letnega iznosa.



Slika 51: Razmere padavin (a), koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ , pretoka (b), električne prevodnosti (c) in iznosa nitratnega dušika (d) med padavinskim dogodkom med 28. in 30. oktobrom 2018

Figure 51: Precipitation (a),  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration conditions, discharge (b), electrical conductivity conditions (c), and nitrate nitrogen export (d) during the rainfall event between 28 and 30 October 2018



Slika 52: Količine iznesenega nitratnega dušika med padavinskim dogodkom 28.–30. oktobrom 2018

Figure 52: Amounts of exported nitrate nitrogen during the rainfall event of 28–30 October 2018

### 5.2.3 Razprava

S hkratnimi meritvami različnih procesov na porečju vodotoka Kuzlovec, ki imajo medsebojni vpliv, smo pokazali, da so tovrstne meritve ključnega pomena za interpretacijo izredno kompleksnih in raznolikih procesov. Kompleksnost in raznolikost smo pokazali z določitvijo režimov iznosa nitratnega dušika, ki sicer v večjem deležu kažejo na spiranje, analizo PCA in ne nazadnje z individualno obravnavo dogodkov. Ne glede na to pa nam je z uporabo metode časov zakasnitve na podatkih z majhnim časovnim korakom merjenja uspelo priti do nekaterih pomembnih zaključkov, podanih v nadaljevanju.

Časovno dinamiko iznosa nitratnega dušika smo okarakterizirali s težiščem diagrama iznosa, na podlagi česar smo dobili podatek, kdaj med dogodkom je prišlo do iznosa polovice celotne mase nitratnega dušika. Z izračunom časovne razlike med časom težišča diagrama iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  (LAGN) in težiščem hietografa smo posamezni dogodek opisali s pomembno lastnostjo procesa časovne porazdelitve iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  s porečja. S primerjavo LAGN z LAGQ smo nato ugotovili, da med obema karakterističnima vrednostma obstaja močna linearna povezava, ki kaže na veliko odvisnost količine iznesenega nitratnega dušika od hidroloških razmer, ne glede na sezonskost. Slednja pa se je izkazala za pomembno v primeru časovne povezanosti obeh časovnih zamikov. Ugotovili smo, da se v obeh obravnavanih fenoloških fazah težišče diagrama iznosa nitratnega dušika pojavi pozneje kot težišče hidrograma, je pa ta časovni zamik med težiščema diagramov večji v obdobju mirovanja. Učinki prestrezanja padavin vegetacije na hidrološki krog so predvsem zmanjšanje odtoka in koeficienta odtoka, znižanje in zakasnitev konic pretokov ter zakasnitev začetka podpovršinskega toka (npr. Keim in sod., 2006; Zabret in Šraj, 2015). Na porečju vodotoka Kuzlovec prevladuje listopadna vegetacija, tako da bi z vidika sezonskosti

pričakovali hitrejši odtok v obdobju mirovanja, ko je količina prestreženih količin nižja. Razlog za obratno ugotovitev pa lahko pripišemo višjim maksimalnim intenzitetam padavin v obdobju vegetacije, ki imajo očitno večji vpliv na hitrost oblikovanja odtoka, kot je učinek upočasnjevanja odtoka zaradi prestrezanja padavin. Pomembna lastnost, ki smo jo opazili pri časovni porazdelitvi padavin med obema obdobjema, je tudi ta, da se maksimalne intenzitete padavin pojavljajo precej proti začetku dogodkov (v povprečju na 25 % trajanja dogodka), medtem ko se maksimalne intenzitete v obdobju mirovanja pojavijo precej pozneje (v povprečju na 50 % trajanja dogodka, ki pa so v obdobju mirovanja tudi daljši). Lastnost vpliva pojava maksimalne intenzitete na čas konice pretoka so s pomočjo hidrološkega modela potrdili Šraj in sod. (2010), ki so ugotovili tudi bistveno počasnejši pojav konice pretoka z naraščanjem trajanja padavin.

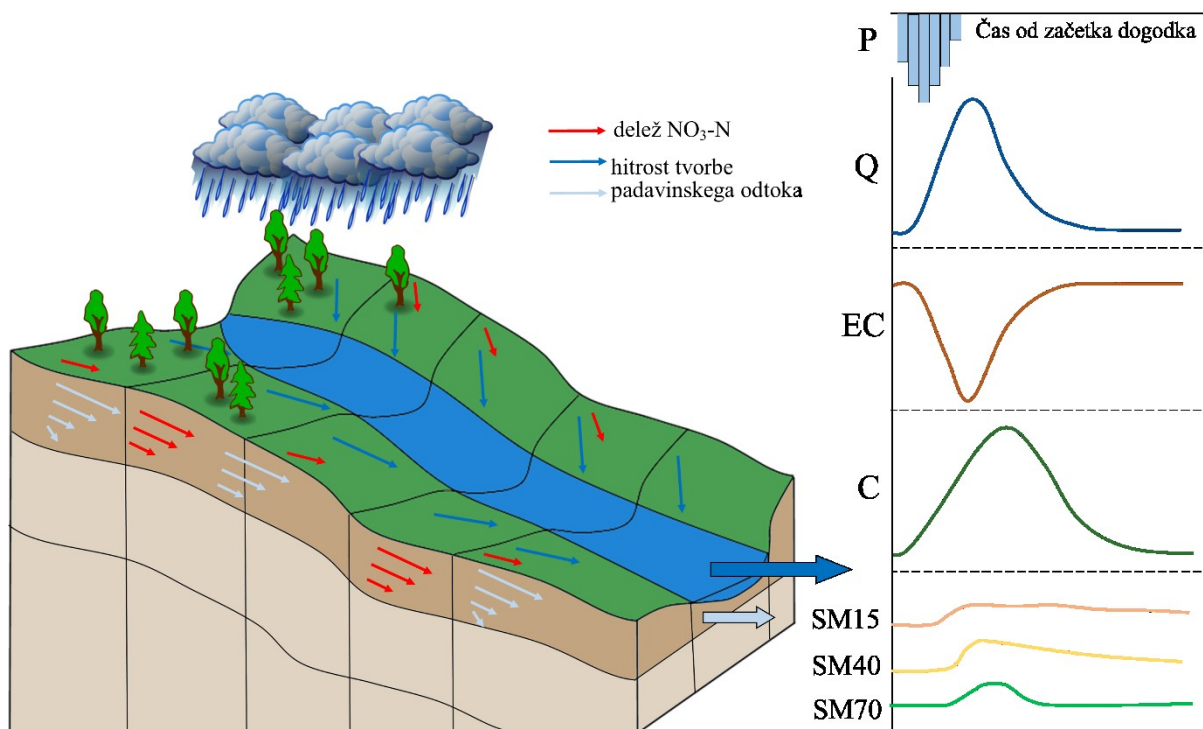
V drugih raziskavah, kjer so obravnavali časovno povezanost pretokov in iznosov hranil, je bil poudarek na času pojava konic hidrograma in diagrama koncentracij (npr. Van Herpe in Troch, 2000; Rusjan in sod., 2008). Ali se konica koncentracije nitrata pojavi pred konico pretoka, so Shrestha in sod. (2013) pripisali velikosti porečja, pri čemer naj bi za manjša porečja veljalo, da se zaradi bližine virov nitratnega dušika konica koncentracije pojavi pred konico hidrograma, medtem ko za srednje velika in velika porečja velja poznejši pojav konice koncentracije. Čas pojava konice koncentracije nitratnega dušika se je v času naših meritev spreminjal od dogodka do dogodka in niti ne odraža sezonskosti. Poleg tega smo samo pri nekaterih dogodkih opazili pojav konice koncentracije pred konico pretoka, kar kaže na to, da na časovno komponento pojava konice ne vpliva samo velikost porečja, ampak je pojav kompleksnejši. Uporaba izračuna težišč diagramov iznosov nitratnega dušika, s čimer upoštevamo tako hidrološko kot biogeokemično komponento iznosa nitratnega dušika, in hidrograma se je zato izkazala za ustrežnejšo z vidika upoštevanja celotnega časovnega razvoja dogodka, česar samo z določitvijo časa nastopa konic ne moremo zajeti. Omenjeno metodo smo prvi uporabili na področju analize iznosov hranil, so pa prednosti metode ravno z vidika časovne porazdelitve pojava pri analizah hidrološko pogojenih procesov izpostavili že Banasik in sod. (2005) ter Hejduk in Banasik (2011), ki so metodo uporabili za analize iznosov sedimentov in prav tako ugotovili dobro linearno povezavo med obema časoma zakasnitve.

Gozdna tla so pomemben vir nitratnega dušika, zato smo naknadno v eksperiment vključili meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh, na podlagi katerih smo lahko spremljali časovno spremenljivost vode v tleh v treh globinah. Ne glede na pomen tal tako v hidrološkem kot biogeokemičnem krogu, uporabe meritev volumetrične vsebnosti vode v tleh z majhnim časovnim korakom pri študijah iznosov nitratnega dušika nismo zasledili. Številni avtorji so kot indikator stopnje iznosa nitratnega dušika uporabili C : N razmerje (npr. Curtis in sod., 2004). Pri tem velja, da so stopnje iznosov pri vrednostih razmerja C : N < 25 večje kot pri višjih vrednostih razmerja (Borken in Matzner, 2004). Za porečje vodotoka Kuzlovec izračunano razmerje znaša med 12,6 in 15,1 v sloju od 0 do 55 cm, v najnižjem

analiziranem sloju pa 24,5. V analizah smo zato upoštevali predpostavko, da razmerje C:N ni limitirajoči element spiranja nitratnega dušika. Z vključitvijo informacij o časovni spremenljivosti vode v tleh po padavinah smo lahko sklepali o poteh in virih vode v vodotoku in s tem nitratnega dušika. Časi zakasnitve LAGSM v treh globinah so pokazali, da so talni horizonti dobro povezani, saj pride do težišča diagrama sprememb v zelo kratkem časovnem razponu. Čeprav smo najmanjše absolutne spremembe volumetrične vsebnosti vode v tleh izmerili v najplitvejšem sloju, pa je za ta sloj značilna najvišja povprečna vsebnost vode v tleh. Podobne razmere so bile tudi v študiji Penna in sod. (2009), ki so razloge za tako situacijo pripisali izrazitemu vplivu rose. Časi zakasnitev težišč diagramov sprememb vsebnosti vode v tleh v treh globinah (LAGSM15, LAGSM40, LAGSM70) z močno pozitivno povezavo z LAGQ in LAGN odražajo, da se del padavinskega odtoka odvrši tudi skozi talne horizonte. Lahko sklepamo, da so gozdna tla glavni vir iznosov nitratnega dušika, hkrati pa lahko na podlagi visoke korelacije časov zakasnitve zaključimo, da je oblikovanje odtoka skozi talne horizonte eden glavnih kontrolnih mehanizmov spiranja  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Zaradi strmega terena na porečju vodotoka Kuzlovec je pričakovati, da večji del padavinske vode odteče kot površinski oziroma lateralni odtok, kar potrjujejo znatna znižanja električne prevodnosti med padavinskimi dogodki. Podoben pristop z uporabo podatkov o električni prevodnosti so uporabili tudi Pellerin in sod. (2007). Najplitvejši sloji skupaj s slojem odpadne organske snovi na površini tal veljajo za območja z največjo produkcijo  $\text{NO}_3\text{-N}$  (npr. Osaka in sod., 2010), zato smo večja ali manjša zvišanja koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  opazili praktično pri vseh obravnavanih padavinskih dogodkih, razen enem. Povprečno zvišanje med dogodki je znašalo 0,56 mg/l, le pri dogodku s 3. avgusta 2019, pri katerem so padavine trajale zgolj 40 min (10,2 mm) in je sledil dvema predhodnima izredno intenzivnima padavinskima dogodkoma, smo zasledili zanemarljivo majhno zmanjšanje koncentracije ( $< 0,1$  mg/l).

Zgoraj opisani časovni razvoj procesov in njihovo medsebojno povezanost med padavinskimi dogodki smo ponazorili s shemo porečja (slika 53, levo), na kateri so z modrimi puščicami označene poti stekanja padavinskega odtoka (velikost puščice prikazuje hitrost tvorbe odtoka), z rdečimi puščicami pa spiranje nitratnega dušika s porečja (velikost puščice prikazuje delež k celotnemu iznosu). Na desni strani sheme so prikazani časovni diagrami obravnavanih procesov, tj. padavin (P), pretoka (Q), električne prevodnosti (EC), koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku in volumetrične vsebnosti vode v tleh v treh obravnavanih globinah (SM) (slika 53, desno). Iz sheme je razvidno, da hitrost tvorbe odtoka upada z globino tal, na kar nakazujeta časovni spremembi pretoka in električne prevodnosti. Koncentracija nitratnega dušika doseže konico pozneje kot hidrogram in električna prevodnost, s čimer lahko sklepamo, da se največji vir nitratnega dušika nahaja tik pod površino tal in nato z globino upada. Slednje je povezano s spremembami vsebnosti vode v tleh in oblikovanjem odtoka v talnih horizontih, ki se najhitreje oblikuje v najplitvejšem sloju in nato upada z globino.





Slika 53: Shematski prikaz procesov tvorbe padavinskega odtoka (velikosti modrih puščic kažejo hitrost tvorbe) in spiranja nitratnega dušika s porečja (velikosti rdečih puščic kažejo delež nitratnega dušika k celotnemu iznosu). Na desni strani je shematski prikaz časovnih sprememb obravnavanih procesov: padavin (P), pretoka (Q), električne prevodnosti (EC), koncentracije NO<sub>3</sub>-N (C) in vsebnosti vode v tleh (SM).

Figure 53: Schematic representation of runoff formation (size of blue arrows represents runoff formation rate) and nitrate nitrogen flushing from the catchment (size of the red arrows shows the proportion of the total export) during rainfall events. The right side of the scheme shows the temporal changes of the processes under consideration precipitation (P), discharge (Q), electrical conductivity (EC), NO<sub>3</sub>-N concentration (C), and soil water content (SM).

Ker je poti stekanja in vire nitratnega dušika nemogoče podrobno določiti samo na podlagi statistične analize merjenih hidroloških podatkov in kemizma vode, se za boljše razumevanje procesov in predvsem boljše ocene iznesenih snovi (sedimentov, hranil ipd.) v praksi pogosto uporabljajo modeli (Shi in sod., 2012). Ne glede na to pa je pred modeliranjem osnovno razumevanje hidroloških procesov na obravnavanem porečju izrednega pomena, saj lahko bistveno vpliva na kakovost modela, s katerim želimo opisati opazovani sistem (Beven, 2007). V nadaljevanju smo zato preverili uporabnost pridobljenih rezultatov v okviru doktorske disertacije v dveh pogosto uporabljenih modelih, tj. Soil Water Assessment Tool (SWAT) in Generalized Watershed Loading Function (GWLF). SWAT je konceptualni model, ki temelji na fizikalnih zakonitostih (npr. masne bilance) in najpogosteje deluje na dnevni podatkah (ali večjem časovnem koraku) na nivoju porečja (Arnold in Fohrer, 2005), je pa danes že mogoče vključiti tudi nekatere podatke s krajšim časovnim korakom od dnevnega (Jeong in sod., 2010), vendar so taki primeri uporabe v primerjavi z daljšimi časovnimi koraki redki (npr. Mehdi in sod., 2021). Model SWAT se najpogosteje uporablja za modeliranje procesov na porečjih, katerih raba tal je pretežno kmetijska (dodatni vnos hranil), velikost porečij pa precej večja, kot je naše proučevano porečje (Donmez in sod., 2020). GWLF je v primerjavi s SWAT manj zahteven model, ki temelji na

procesih in prav tako kot SWAT deluje na podatkih z dnevnim časovnim korakom (Haith in sod., 1992). Tudi model GWLF se pogosto uporablja za modeliranje procesov na s hranili in onesnaževali obrmenjenih območjih. Volf in sod. (2018) so omenjeni model v kombinaciji z orodji strojnega učenja uporabili za proučevanje scenarijev, ki so obsegali čiščenje odpadnih voda in dejavnosti v kmetijstvu, na stanje morskih ekosistemov severnega Jadrana. Rezultati modela, tj. iznosi sedimentov in dušika, so bili izračunani na mesečni časovni skali. Podrobnejša opisa obeh omenjenih modelov in njuno medsebojno primerjavo z vidika uspešnosti lahko bralec najde v prispevku Qi in sod. (2017), v nadaljevanju pa je v obliki diskusije podana ocena uporabnosti modelov za v nalogi obravnavano porečje ter izmerjene in drugače pridobljene vhodne podatke.

V osnovi je model SWAT namenjen spremljanju transporta sedimentov in v vodi raztopljenih snovi v daljših časovnih obdobjih z upoštevanjem časovnih korakov, enakih ali večjih kot en dan, kar z vidika časovne dinamike procesov onemogoča opis dogajanja na hudourniških porečjih, kakršno je porečje vodotoka Kuzlovec. Hidrološki modul znotraj modelnega orodja SWAT je relativno preprost, saj z metodami, na katerih temelji (npr. SCS Curve Number method, metoda infiltracije Green-Ampt, empirične enačbe za oceno časov koncentracije) težko opišemo poglobitve oziroma prevladujoče poti stekanja padavinskega odtoka. So pa rezultati in meritve, pridobljene v okviru raziskave, lahko uporabljeni za umerjanje nekaterih parametrov, ki se uporabljajo v prej omenjenih metodah. Na primer meritve volumetrične vsebnosti vode v tleh ter rezultate pedološke analize bi lahko uporabili za opredelitev dinamike gibanja vode skozi talne horizonte in za opis dinamike spreminjanja vlažnosti tal v posameznih globinah tal v daljših časovnih obdobjih (npr. mesečni časovni korak). Rezultati analiz dinamike stekanja vode skozi talne profile in o vsebnosti dušika v talnih horizontih bi koristili tudi za modeliranje transformacij različnih oblik dušikovih spojin v tleh. Yuan in sod. (2020) uvrščajo model GWLF med srednje kompleksne modele, ki upoštevajo poleg osnovnih procesov gibanja vode in sedimentov tudi empirične enačbe, s katerimi se izrazijo obremenitve s hranili, vendar pa ne temeljijo na zahtevnih fizikalnih procesih, ki zahtevajo velike količine podatkov. To predstavlja osnovno prednost tega modela pred drugimi, saj je za njegov zagon potrebna manjša količina vhodnih podatkov. Ne glede na to pa ima ta model podobne omejitve kot model SWAT glede časovne ločljivosti simulacij. Poleg tega pa omogoča modeliranje samo skupnega raztopljenega dušika in skupnega dušika, kar pomeni, da za uporabo modela potrebujemo dodatne informacije o vsebnosti ostalih dušikovih spojin. Te informacije bi v našem primeru lahko ocenili na podlagi pedoloških analiz talnih profilov.

Za oba opisana modela torej velja, da so v okviru disercije pridobljeni podatki lahko v določeni meri in obliki uporabni. Se pa uporabnost modelov zmanjša oziroma ni smiselna v primeru, ko želimo simulirati procese, katerih časovna spremenljivost je zelo velika, tako kot se je to izkazalo s spiranjem nitratnega dušika s porečja vodotoka Kuzlovec, kjer se najzanimivejša dinamika z vidika iznesenih

količin zgodi na ravni padavinskega dogodka (nekaj ur) in je niti z dnevnim, še manj pa s tedenskim ali mesečnim časovnim korakom ne bi ujeli. Statistične analize, ki upoštevajo hkratni vpliv več različnih spremenljivk in na njih zgrajeni statistični modeli, so se v tem primeru izkazali kot bolj zanesljivo orodje.

## 6 SKLEPI

Glede na rezultate analiz in njihovo razpravo (poglavji 4 in 5), lahko zastavljene hipoteze potrdimo.

**HIPOTEZA 1:** Lastnosti padavinskih dogodkov imajo velik vpliv na časovno dinamiko sprememb koncentracij nitratnega dušika v vodotoku.

Za vsak padavinski dogodek, pri katerem smo razpolagali tudi s podatki o spremembah koncentracije nitratnega dušika v vodotoku, smo izračunali količino padavin, trajanje padavin, srednjo intenziteto padavin, maksimalno enourno intenziteto padavin in kinetično energijo padavinskega dogodka. Vpliv posameznih lastnosti padavin na spremembe koncentracij in količino iznesenega  $\text{NO}_3\text{-N}$  s porečja smo pokazali že s korelacijsko analizo (Pearsonov in Spearmanov koeficient korelacije, poglavje 4.4), kjer se je izkazalo, da so količina padavin, intenziteta padavin in kinetična energija padavin pozitivno povezane z iznosi  $\text{NO}_3\text{-N}$  in absolutno spremembo koncentracije med padavinskim dogodkom. Vpliv teh spremenljivk na iznose  $\text{NO}_3\text{-N}$  v vodotoku Kuzlovec smo potrdili tudi z metodo analize glavnih komponent (PCA), ki je pokazala, da omenjene spremenljivke (poleg najvišjega pretoka in največje spremembe pretoka) opredeljujejo prvo glavno komponento, ki smo jo v nadaljevanju opredelili kot komponento za jakost padavinskega dogodka. Ta glavna komponenta se je pri multipli linearni regresiji na prvih štirih glavnih komponentah izkazala kot statistično značilna in najbolj vplivna v primeru pojasnjevalnega statističnega modela za srednje in maksimalne iznose ter spremembo koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskim dogodkom. Modeli napovedi so podrobneje izkazali, da lahko pri intenzivnejših padavinskih dogodkih (z višjo intenziteto padavin, višjim maksimalnim pretokom, večjo količino padavin, večjo kinetično energijo padavin in večjo spremembo pretoka) pričakujemo višje tako srednje in maksimalne iznose  $\text{NO}_3\text{-N}$  kot tudi spremembo koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Neposredni vpliv lastnosti padavin na iznose in koncentracije smo preverili z MLR, kjer smo v model kot pojasnjevalne spremenljivke vključili  $I60$ ,  $Kp$  in  $Tp$ . Pri pojasnjevanju variance v iznosih sta najvplivnejši spremenljivki količina padavin in trajanje, medtem ko ima na spremembo koncentracije večji vpliv najvišja intenziteta v primerjavi s trajanjem padavin.

**HIPOTEZA 2:** Z meritvami časovne spremenljivosti kemizma vode lahko identificiramo poglavitne procese oblikovanja padavinskega odtoka.

S pomočjo podatkov, ki smo jih pridobili z meritvami časovne spremenljivosti kemizma vode, natančneje koncentracij nitratnega dušika, smo uspešno identificirali najpoglavitejše procese oblikovanja padavinskega odtoka. Uporabili smo metodo, ki za ta namen v svetovnem merilu še ni bila uporabljena. Izračunali smo čase zakasnitve težišč, tj. čas, ki je pretekel od težišča hietografa do težišča

časovnih diagramov pretoka (LAGQ), iznosa nitratnega dušika (LAGN) in volumetrične vsebnosti vode v tleh (LAGSM), ki smo jih nato medsebojno primerjali in na podlagi tega sklepali o njihovi časovni odvisnosti (poglavje 5.2.1). Med časoma zakasnitve LAGQ in LAGN smo ugotovili močno linearno povezavo s Pearsonovim koeficientom korelacije 0,96. Linearna zveza med omenjenima časoma zakasnitve je pokazala, da so procesi oblikovanja padavinskega odtoka hitrejši od procesov spiranja nitratnega dušika. S to povezavo sklepamo, da glavno območje vira nitratnega dušika na porečju ni v neposredni bližini rečne mreže. Z dodatno analizo časov zakasnitve volumetrične vsebnosti vode v tleh v globinah 15, 40 in 70 cm smo zaznali dobro medsebojno povezanost talnih horizontov, saj so bile razlike v časovnih spremembah volumetrične vsebnosti vode v talnih horizontih zelo majhne. Glede na močne povezave časa pojava težišča volumetrične vsebnosti vode v tleh v vseh treh globinah z LAGQ in LAGN pa smo lahko padavinski odtok skozi talne horizonte opredelili kot prevladujoči kontrolni mehanizem spiranja nitratnega dušika s porečja.

**HIPOTEZA 3:** Vpliv vegetacijskih razmer na koncentracije nitratnega dušika v vodotoku je pogojen s hidrometeorološkimi razmerami.

V nalogi smo zaradi omejenega števila dogodkov na podlagi indeksa listne površine določili dve fenološki fazi oziroma sezoni, tj. vegetacije in mirovanja. Analiza koncentracij in iznosa nitratnega dušika s porečja med baznim odtokom je pokazala, da med obdobjema obstaja razlika med koncentracijami, z višjimi koncentracijami v obdobju mirovanja in nižjimi v obdobju vegetacije. Ker pa je bil poudarek disertacije na razmerah med padavinskimi dogodki, smo z metodama razvrščanja enot v gruče preverili podobnost oziroma različnost dogodkov glede na upoštevane hidrometeorološke in vegetacijske lastnosti. Izkazalo se je, da lahko dogodke iz vzorca razvrstimo v štiri skupine. V prvo, najmanjšo skupino spadata dva dogodka z visokimi vrednostmi iznosov in pretoka. V drugo skupino je uvrščenih sedem dogodkov, ki so jim skupne lastnosti višjih srednjih, maksimalnih in absolutnih sprememb koncentracij. V preostalih dveh skupinah lahko dogodke ločimo predvsem glede na sezonske lastnosti, tj. evapotranspiracija, LAI in trajanje padavin, pri čemer v eni skupini prevladujejo dogodki iz obdobja mirovanja, v drugi pa dogodki iz obdobja vegetacije. Dodatno smo z analizo časov zakasnitve ugotovili, da so za obdobje vegetacije značilnejši hitrejši pojavi težišč hidrograma in diagramov iznosa nitratnega dušika kot v obdobju mirovanja, kar pa smo pripisali predvsem lastnostim padavinskih dogodkov, natančneje intenziteti in trajanju padavin, ki so v obdobju vegetacije intenzivnejše in krajše. To je najverjetneje tudi razlog za skoraj popolno razvrstitev dogodkov v dve večji skupini (od štirih) glede na obdobje v letu, saj je pri upoštevanih hidrometeoroloških prisotna določena stopnja sezonskosti. V splošnem lahko zaključimo, da na koncentracije nitratnega dušika v vodotoku v času baznega odtoka prevladuje vpliv vegetacije oziroma sezonskih razmer, v obdobju padavinskih dogodkov pa je prevladujoč vpliv lastnosti padavinskih dogodkov in hidroloških razmer.

## 7 ZAKLJUČKI

Na manj kot 1 km<sup>2</sup> velikem gozdnatem porečju v občini Polhov Gradec smo med aprilom 2018 in aprilom 2020 izvajali hkratne meritve padavin, pretokov, vsebnosti vode v tleh in kemizma vodotoka Kuzlovec. Meritve smo izvajali s kratkim časovnim korakom 20 minut. V doktorski disertaciji smo se osredotočili na analizo vplivov hidrometeoroloških in sezonskih vplivov na spremembe koncentracij in iznose nitratnega dušika s porečja. Povprečne koncentracije med referenčnimi razmerami, ki smo jih opredelili kot razmere v času baznega odtoka, so bile v obdobju od olistanja do začetka odpadanja listov za 0,3 mg/l nižje od tistih v obdobju mirovanja, ki se začne z odpadanjem listov. Podobno so bili iznosi v obdobju vegetacije za približno 25 % nižji od iznosov v obdobju mirovanja.

V podatkovnem nizu smo zabeležili 83 padavinskih dogodkov z višino padavin več kot 10 mm, vendar smo v analizo vključili 43 dogodkov, za katere smo razpolagali z vsemi za analizo potrebnimi podatki. Omenjeni dogodki so zelo raznoliki z vidika intenzitete padavin, njihove količine in trajanja, prav tako pa tudi z vidika predhodne namočenosti porečja in fenološke faze (poglavje 4). Skoraj 60 % obravnavanih padavinskih dogodkov smo glede na kazalnik naklona logaritmov koncentracije NO<sub>3</sub>-N in pretoka ter kazalnik razmerja med koeficientoma variacije koncentracij NO<sub>3</sub>-N in pretoka uvrstili v režim spiranja, pri 25 % je prišlo do razredčenja, pri preostalih dogodkih pa so bile razmere kemostatične.

Vpliv hidrometeoroloških in vegetacijskih razmer na koncentracije NO<sub>3</sub>-N v vodotoku in količino iznesenega NO<sub>3</sub>-N s porečja smo analizirali z multivariatnimi statističnimi metodami, natančneje s hierarhičnim razvrščanjem in razvrščanjem z metodo voditeljev, analizo glavnih komponent ter modeli multiple linearne regresije (poglavje 5.1). Spremembe koncentracij med dogodkom smo opisali s štirimi kazalniki (srednja koncentracija, maksimalna koncentracija ter absolutna in relativna sprememba koncentracije), iznos NO<sub>3</sub>-N med dogodkom pa s srednjim in največjim iznosom. Z razvrščanjem dogodkov v gruče smo pokazali, da so karakteristike padavinskih dogodkov izrazito sezonske, zaradi česar je bilo 90 % dogodkov (od 34 dogodkov v dveh večjih gručah) ustrezno razvrščenih v obdobji vegetacije in mirovanja, kot smo ju opredelili glede na indeks listne površine, določen na podlagi satelitskih posnetkov (poglavje 4.4). Devet dogodkov je bilo razvrščenih v dve skupini (z dvema in sedmimi dogodki), saj so se po upoštevanih lastnostih bistveno razlikovali od ostalih dogodkov v vzorcu, natančneje je šlo v manjši skupini za izrazito velike iznose nitratnega dušika, v drugi skupini pa za dogodke z večjimi spremembami koncentracije kot tudi večjimi srednjimi in najvišjimi vrednostmi. Med hidrometeorološkimi razmerami, opisanimi z različnimi spremenljivkami tako lastnosti padavinskih dogodkov kot predhodnih in vmesnih hidroloških razmer na porečju, smo zaznali bistvene razlike med obema obravnavanima obdobjema vegetacije in mirovanja. Poleg tega so hidrometeorološke razmere na

obravnava območju zelo raznolike (poglavje 4). Z metodo PCA smo domneve na podlagi metod razvrščanja nadalje proučili, in sicer smo z linearnimi multiplimi regresijskimi modeli preverili, koliko variance iznosov oziroma koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  lahko pojasnimo na podlagi nekaj glavnih komponent. Izkazalo se je, da je pojasnjevanje koncentracij na tak način zelo kompleksno, kar smo pripisali manjšemu vzorcu podatkov, ki pa je pokrival zelo raznolike razmere. Na drugi strani smo z multiplimi linearnimi regresijskimi modeli pojasnili precejšen delež iznosov in absolutne spremembe koncentracije, ki so pokazali, da so najvplivnejše spremenljivke povezane z intenzivnostjo in jakostjo dogodka (konica in sprememba pretoka, intenziteta in količina padavin) ter predhodnimi razmerami (predhodna namočenost, predhodna evapotranspiracija). V multiplih linearnih modelih absolutne spremembe koncentracije med padavinskim dogodkom samo na podlagi spremenljivk, ki opisujejo padavine, sta se kot najvplivnejši izkazali količina in intenziteta padavin, medtem ko ima na iznose večji vpliv trajanje padavin v primerjavi z intenziteto.

Analize obsežnega podatkovnega niza meritev so pokazale, da padavinski dogodki z 10 mm ali več padavin povzročijo določeno spremembo koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$ , v največji meri gre za povečanje koncentracij. Ne glede na to pri meritvah v času padavinskih dogodkov nismo zaznali značilnih sezonskih razlik v spremembah koncentracij nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec. Smo pa ugotovili, da obstajajo sezonske razlike med koncentracijami nitratnega dušika v času referenčnih razmer oziroma med baznim odtokom. Metode razvrščanja, PCA in MLR pa so prav tako pokazale, da sama fenološka faza, preko katere se odraža aktivnost vegetacije na porečju, ne prispeva k višjim ali nižjim iznosom ter koncentracijam. Na podlagi tega lahko sklepamo, da je v času baznega odtoka prevladujoč vpliv vegetacije oziroma sezonskih razmer, v obdobju padavinskih dogodkov pa je vpliv vegetacije zabrisan, saj imajo na iznos nitratnega dušika večji vpliv lastnosti padavinskih dogodkov in hidrološke razmere na porečju.

Analiza težišč hidrograma in diagrama iznosa nitratnega dušika ter volumetrične vsebnosti vode v tleh v treh globinah, ki smo ju z izračunom razlike do težišča hietografa opredelili kot časovni zamik, je pokazala, da med vrednostmi obstaja močna linearna povezava (poglavje 5.2.1). V povprečju se težišče iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  zgodi približno 30 min za težiščem hidrograma, ne glede na sezono ali karakteristike padavinskih dogodkov, kar kaže na to, da so procesi oblikovanja odtoka hitrejši od procesov spiranja nitratnega dušika in da so viri nitratnega dušika oddaljeni od neposredne bližine rečne mreže. Z razdelitvijo dogodkov na obdobje vegetacije in mirovanja smo ugotovili, da je razlika med časom pojava težišč v obdobju mirovanja še celo nekoliko daljša. Razlog lahko pripišemo višji intenziteti padavin v obdobju vegetacije in pojavu maksimalnih intenzitet na začetku dogodkov. Na podlagi dodatne analize časov zakasnitve volumetrične vsebnosti vode v tleh lahko sklepamo, da so gozdna tla glavni vir nitratnega dušika, medtem ko lahko oblikovanje odtoka skozi talne horizonte zaradi močne povezave

med pojavom težišč volumetrične vsebnosti vode v tleh in težišči hidrogramov in diagramov iznosa  $\text{NO}_3\text{-N}$  opredelimo kot kontrolni mehanizem spiranja.

Količine iznesenega nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov so se izkazale kot pomemben člen v izračunih masnih bilanc, saj smo ugotovili, da se med padavinskimi dogodki spere približno 30 % celotne količine nitratnega dušika, dogodki pa zajamejo zgolj 10 % opazovanega obdobja. Z naraščanjem intenzitete padavin (večja količina padavin, krajše trajanje) pa lahko pričakujemo tudi večje spremembe koncentracij med dogodki in s tem višje maksimalne koncentracije, kakor tudi večje srednje in maksimalne iznose  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Trajanje padavin se je izkazalo kot eden najpomembnejših kazalnikov časa pojava težišča iznosa nitratnega dušika in hidrograma. S krajšimi in intenzivnejšimi dogodki bi tako lahko pričakovali še hitrejši odziv porečja, kar bi pomenilo večje volumne vode in količine spranega nitratnega dušika v krajšem času. Raziskave na naravnih porečjih, ki pokrivajo širok spekter podnebnih dejavnikov in hidrogeoloških lastnosti porečij, so zato ključnega pomena za oceno vplivov podnebnih sprememb in človekovih dejavnosti na vodni in dušikov krog. Pri tem bodo ključnega pomena predvsem tehnologije, ki omogočajo meritve s kratkim časovnim korakom in ustrezno točnostjo. Kot se je izkazalo v pričujoči nalogi, lahko na podlagi pogostih meritev kemizma vode bolje sklepamo o prevladujočih procesih padavinskega odtoka in transporta snovi ter izboljšamo njihovo konceptualno razumevanje.

Za prihodnje študije ostaja veliko odprtih vprašanj, katerih izhodišča smo zastavili s to nalogo. Med drugim bi z izmerjenimi podatki o prestreženih padavinah lahko točneje ocenili odziv porečja na padavinske dogodke. Z meritvami na sosednjih porečjih, ki imajo različno rabo tal ali geološke lastnosti, bi pridobili pomembne informacije o izbranih vplivnih dejavnikih na spiranje nitratnega dušika. Predlagamo vzpostavitev več eksperimentalnih porečij, kjer bi se kontinuirano spremljali vplivni parametri na spiranje nitratnega dušika in tudi kemizem vode, s čimer bi zagotovili podporo za razvoj ustreznih modelskih orodij in njihovega testiranja ter tudi podporo upravljanju virov na porečju. Metoda časovne zakasnitve ima velik potencial pri porečjih s povečanim vnosom dušika, kot so urbana in kmetijska območja, saj bi zaradi fizikalne uporabnosti metode na tak način dobili pomemben vpogled v masno bilanco dušika in vode ter ne nazadnje tudi morebitne glavne vire hranil in ostalih onesnaževal. Dodatno velja omeniti, da se pri študijah spiranja hranil s porečja kljub razpoložljivi merski opreми, ki zagotavlja meritve s kratkim časovnim korakom, v analizah še vedno premalo upošteva časovni razvoj procesov, zato bi bilo v prihodnje smiselno poudarek nameniti tudi analizam časovnih vrst.



## 8 POVZETEK

Procesi kroženja enega najpomembnejših elementov, dušika, so neposredno odvisni od količine padavin in njihove časovne ter prostorske razporeditve, saj voda predstavlja glavni transportni medij in gonilno silo številnih ekosistemskih procesov. V nalogi smo se osredotočili predvsem na transport nitratnega dušika v času padavinskih dogodkov. Raziskavo smo zasnovali na naravnem, z gozdom pokritem porečju, saj je poznavanje razmer in vplivnih dejavnikov na območjih brez človekovih vplivov ključnega pomena za prihodnjo primerjavo in ocenjevanje učinkov bodisi podnebnih bodisi antropogenih vplivov na količine iznesenega dušika. Problematika in pomen naloge smo podrobneje opredelili v uvodnem poglavju, kjer smo zastavili tudi cilje in hipoteze raziskave.

V poglavju o teoretičnih osnovah smo predstavili dejavnike, ki vplivajo na procese spiranja nitratnega dušika s porečja, s poudarkom na hidrološkem vidiku. Opisali smo kompleksen proces kroženja dušikovih spojin v gozdnih ekosistemih in poudarili pomen hkratnega spremljanja hidroloških razmer in koncentracij hranil predvsem pa meritev s krajšimi časovnimi intervali za boljše razumevanje procesov.

Za potrebe doktorske disertacije smo na manjšem gozdnatem porečju v občini Polhov Gradec izvajali zvezne meritve koncentracij nitratnega dušika z 20-minutnim časovnim korakom, s poudarkom na opazovanju sprememb koncentracij med padavinskimi dogodki. Na porečju in v bližnji okolici smo za spremljanje količine padavin, njihovega trajanja in intenzitete uporabljali dežemere, pretoke pa smo določili na podlagi meritev gladine vode s tlačnim senzorjem. Poleg hidroloških in meteoroloških spremenljivk smo v raziskavo vključili tudi vpliv gozda, ki smo ga opisali s spreminjanjem indeksa listne površine med letom. Eksperimentalno porečje in uporabljena merska oprema ter metode, pogostost meritev in druge, z meritvami povezane informacije, smo podrobneje opisali v poglavju o metodah. V to poglavje smo vključili tudi predstavitev vseh metod za analizo podatkov. Najprej smo predstavili uveljavljene metode za določitev režimov iznosa nitratnega dušika s porečja. Sledili sta predstavitvi metode za določitev časov zakasnitve, ki na področju iznosa hranil s porečja še ni bila uporabljena, na podlagi katere smo pozneje sklepali o časovni povezanosti hidrometeoroloških procesov in procesov spiranja hranil in metoda določitve obdobj sezonske dinamike gozda. Nabor spremenljivk, pridobljen z lastnimi meritvami ali iz drugih virov, smo analizirali z multivariatnimi statističnimi metodami, katerih kratko razlago smo prav tako podali v poglavju o metodah.

Teoretičnemu delu sledi praktični del naloge, kjer smo najprej zbrali in opisali rezultate meritev padavin, pretokov, volumetrične vsebnosti vode v tleh, koncentracij nitratnega dušika, sezonske dinamike gozda in drugih v nalogi uporabljenih podatkov. Določili smo režime spiranja nitratnega dušika in opredelili vegetacijske in hidrometeorološke spremenljivke, ki smo jih uporabili v nadaljevanju naloge. S

primerjavo razmer med padavinskimi dogodki in med baznim odtokom smo pokazali, da je povprečni iznos  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskimi dogodki več kot trikrat višji, maksimalni iznosi pa tudi sedemkrat višji od iznosov med referenčnimi razmerami.

Vplive hidrometeoroloških in vegetacijskih spremenljivk na koncentracije nitratnega dušika v vodotoku Kuzlovec smo preverjali z razvrščanjem enot v skupine, analizo glavnih komponent in statističnimi modeli multiple linearne regresije. S prvo smo pokazali prevladujoč vpliv jakosti dogodkov in predhodnih razmer na količine iznesenega  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Dodatno smo se osredotočili še na opredelitev vplivov na iznose nitratnega dušika samo na podlagi karakteristik padavin, saj je tako pri nas kot drugje po svetu večina porečij nemerjenih, za padavine pa je značilno, da so parametri lažje prenosljivi na druga, podobna porečja, kot hidrološki parametri. Na tak način bi lahko samo na podlagi podatkov o padavinah znali oceniti iznose nitratnega dušika z naravnih porečij. Izkazalo se je, da se tako maksimalni kot srednji iznosi povečujejo z intenziteto padavin (večja količina padavin in krajše trajanje), prav tako pa je ob večji intenziteti in količini padavin pričakovati večjo spremembo koncentracije  $\text{NO}_3\text{-N}$  med padavinskim dogodkom.

Različnost padavinskih dogodkov v obdobju vegetacije od tistih v obdobju mirovanja, ki smo jih opisali z najpomembnejšimi hidrometeorološkimi in vegetacijskimi dejavniki, smo potrdili tudi z metodama razvrščanja enot v gruče, ki sta pokazali, da med obravnavanimi dogodki obstajajo razlike glede na sezono. Ne glede na to pa v samih iznosih in spremembah koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  nismo zaznali bistvenih razlik med sezonama, poleg tega pa so dogodki z najvišjimi iznosi in koncentracijami razvrščeni v posebne skupine nevezano na fenološko fazo. Na podlagi tega smo zaključili, da so sezonske spremembe posledica sezonske spremenljivosti predvsem hidrometeoroloških spremenljivk, kot je na primer večja intenziteta padavin v obdobju vegetacije v primerjavi z obdobjem mirovanja.

Z analizami v okviru naloge smo pokazali, da so procesi spiranja nitratnega dušika z gozdnatega porečja, ki smo jih opisali s koncentracijami oziroma iznosom  $\text{NO}_3\text{-N}$ , izredno kompleksni. Pri tem so bile ključnega pomena predvsem meritve s kratkim časovnim intervalom, s katerimi smo zajeli celotno dinamiko sprememb koncentracij  $\text{NO}_3\text{-N}$  med dogodkom in so eden glavnih doprinosov področju, saj so tovrstne meritve ob vzporednem spremljanju različnih vplivnih dejavnikov kljub razpoložljivi merski opremi še vedno relativno redke. Pokazali smo, da so padavinski dogodki in njihove lastnosti, predvsem lastnosti padavin, kot sta količina in intenziteta, pomembni dejavniki, ki vplivajo na koncentracije in količine iznesenega dušika s porečja. Poleg tega smo pokazali, da obstajajo značilne razlike med dogodki v obdobju vegetacije in obdobju mirovanja, zato bi bilo v prihodnje smiselno v raziskavah temu delu nameniti več pozornosti.

## 9 SUMMARY

With nitrogen being one of the most important elements, the processes in the nitrogen cycle are directly dependent on the amount of precipitation and its temporal and spatial distribution, as water is both the main transport medium and the driving force of many ecosystem services. In this dissertation we focused mainly on the transport of nitrate nitrogen during precipitation events. Our study area was established in a small, natural, forest-covered stream catchment, as knowledge of the conditions and influencing factors in areas without human influence is crucial for future comparison and assessment of the effects of either climate or anthropogenic impacts on nitrogen export. The research questions and importance of the study were defined in more detail in the introductory chapter, where we also set the research objectives and hypotheses

In the chapter on theoretical bases, we presented the factors influencing the processes of nitrogen export from a river catchment, with a special emphasis on the hydrological aspect. We described the complex nitrogen cycle processes in forest ecosystems and underlined the importance of measurements with short time intervals for their better understanding.

Under this doctoral dissertation, we were continuously measured concentrations of nitrate nitrogen in a small forested river catchment in the municipality of Polhov Gradec with a 20-min time step for two years. Special emphasis was placed to changes in concentration during the precipitation events. In the river catchment and in its immediate vicinity, rain gauges were used to monitor the amount of precipitation, its duration, and intensity. The discharge was obtained by measuring water level using a pressure sensor. In addition to hydrological and meteorological variables, we included in the study also the impact of the forest, by looking at the changing of the leaf area index during the year. The experimental river catchment, the measuring equipment and the methods used, frequency of measurements, and other information related to the research experiment were described in more detail in the chapter on methods. This chapter also includes a presentation of all methods for data analyses. Firstly, we presented the well-established methods for determining the export regimes of nitrate nitrogen from the river catchment. This was followed by a presentation of the method for determining lag times, which has not yet been used in relation to nutrient export from the river catchments. Based on the calculated lag times we were able to conclude on the temporal relationship of hydrometeorological and nitrate nitrogen export processes. The set of variables, obtained with our own measurements or from other sources, was analysed by multivariate statistical methods, a brief explanation of which was also given in the chapter on methods.

The theoretical part of the dissertation is followed by the practical part, where we first collected and described the measurement results of precipitation, discharges, volumetric soil water content,  $\text{NO}_3\text{-N}$

concentrations, seasonal forest dynamics, and other data used in the research. We determined the nitrate nitrogen export regimes and defined the vegetation and hydrometeorological variables, used later in the continuation of the research. By comparing the conditions during rainfall events and during the baseflow, we showed that the average  $\text{NO}_3\text{-N}$  amount during precipitation events is more than three times higher, while the maximum amounts are as much as seven times higher than the amounts during reference conditions.

The influence of hydrometeorological and vegetation variables on the nitrate nitrogen concentration in the Kuzlovec stream were verified using clustering methods, the principal component analysis, and statistical models of multiple linear regression. With the first, we showed the predominant influence of the magnitude of events and antecedent conditions on the amounts of nitrate nitrogen exported from the river catchments. Additionally, we focused on the determining the influences on the nitrate nitrogen export based just on the precipitation characteristics, since both in Slovenia and globally, most river basins are unmeasured, while precipitation is characterized by the fact that the parameters are more easily transferable to other similar river basins in comparison with hydrological parameters. In this way, the amounts of nitrate nitrogen from natural river basins can be estimated on the basis of precipitation data only. We found that both maximum and mean export amounts increase with the rainfall intensity (higher rainfall amount and shorter duration of events). Furthermore, with higher intensity and rainfall amounts, higher absolute changes in  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration during the events can be expected.

The differences according to the phenological phase between precipitation events, which we described using the most relevant hydrometeorological and vegetation variables, were confirmed using two clustering methods. It was found that among the precipitation events differences by season exist. However, in the  $\text{NO}_3\text{-N}$  export amounts and changes in concentrations, we did not find any significant differences. Moreover, the events with the highest export amounts and concentrations are classified into special groups regardless of the phenological phase. Hence, we concluded that seasonal differences and changes are a consequence of seasonal variability of especially hydrometeorological variables. For example, a higher rainfall intensity is expected in the vegetation phase compared than in the dormancy.

With the analyses in the scope of this doctoral dissertation we showed that the processes of nitrate nitrogen flushing from the river catchment, which were described by the concentrations and amounts of the exported  $\text{NO}_3\text{-N}$ , are extremely complex. The measurements with high frequency were of key importance in this research, since they covered the entire dynamics of changes in  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations during the precipitation events. Moreover, we believe that a dataset with such an extensive set of simultaneously measured variables, is one of the main contributions to the research field, as such measurements are still relatively rare, despite the measuring equipment available. We have shown that

precipitation events and their characteristics, especially the rainfall intensity, are an important factor influencing the amounts of nitrogen flushed and exported from a river catchment. In addition, we have shown that there are characteristic differences between events during the vegetation period and the dormancy periods. Therefore, we believe that more studies are needed to examine this research area in the future.

## VIRI

Agrarius, 2018. Opis pedoloških lastnosti tal na območju vodotoka Kuzlovec. Poročilo o pedoloških lastnostih tal. Bohinjska Bistrica, Agrarius, tla in okolje: 4 str.

Aguilera, R., Melack, J. M. 2018. Concentration-Discharge Responses to Storm Events in Coastal California Watersheds. *Water Resources Research* 54: 407–424. <https://doi.org/10.1002/2017WR021578>

Arheimer, B., Andersson, L., Lepistö, A. 1996. Variation of nitrogen concentration in forest streams - Influences of flow, seasonality and catchment characteristics. *Journal of Hydrology* 179: 281–304. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02831-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02831-5)

Arnold, J. G., Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19: 563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>

ARSO, 2020a. Arhiv opazovanih in merjenih meteoroloških podatkov po Sloveniji. <http://www.meteo.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 8. julija 2020).

ARSO, 2020b. Referenčna evapotranspiracija in padavine samodejnih postaj (dnevni podatki od leta 2017). [https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv\\_etc/](https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_etc/) (Pridobljeno 20. julija 2020).

ARSO, 2020c. Arhivski podatki: kakovost voda. <https://www.arso.gov.si/vode/podatki/> (Pridobljeno 20. julija 2020).

ARSO, 2017a. Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 156 str.

ARSO, 2017b. Program monitoringa kemijskega in ekološkega stanja voda. Program za obdobje 2016 in 2021. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 81 str.

Aubert, A. H., Thrun, M. C., Breuer, L., Ultsch, A. 2016. Knowledge discovery from high-frequency stream nitrate concentrations: Hydrology and biology contributions. *Scientific Reports* 6: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep31536>

Baker, E. B., Showers, W. J. 2019. Hysteresis analysis of nitrate dynamics in the Neuse River, NC. *Science of Total Environment* 652: 889–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.254>

Banasik, K., Madeyski, M., Mitchell, J. K., Mori, K. 2005. An investigation of lag times for rainfall-runoff-sediment yield events in small river basins. *Hydrological Sciences Journal* 50: 857–866. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.5.857>

Bartley, R., Speirs, W. J., Ellis, T. W., Waters, D. K. 2012. A review of sediment and nutrient concentration data from Australia for use in catchment water quality models. *Marine Pollution Bulletin* 65: 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.08.009>

Bernal, S., Butturini, A., Sabater, F. 2002. Variability of DOC and nitrate responses to storms in a small Mediterranean forested catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6: 1031–1041. <https://doi.org/10.5194/hess-6-1031-2002>

Bernal, S., Hedin, L. O., Likens, G. E., Gerber, S., Buso, D. C. 2012. Complex response of the forest nitrogen cycle to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 9: 3406–3411. <https://doi.org/10.1073/pnas.1121448109>

Beven, K. 2007. Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(1): 460–467.

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013. Primerjava Dveh Sosednjih Eksperimentalnih Hudourniških Porečij: Kuzlovec in Mačkov Graben = Comparison Between Two Adjacent Experimental Torrential Watersheds: Kuzlovec and Mačkov Graben. *Acta hydrotechnica* 26, 45: 85–97.

Bian, Z., Wang, L., Gu, Y., Pan, Y., Yao, Y., Zhao, J., Ji, X. 2020. Using integrated modelling to understand seasonal vegetation dynamics and its relationship to runoff generation. *Hydrological Processes* 34: 3222–3234. <https://doi.org/10.1002/hyp.13787>

Bieroza, M. Z., Heatwaite, A. L., Bechmann, M., Kyllmar, K., Jordan, P. 2018. the concentration-discharge slope as a tool for water quality management. *Science of the Total Environment*, 630: 738–749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.256>

Blaen, P. J., Khamis, K., Lloyd, C. Comer-Warner, S., Ciocca, F., Thomas, R. M., MacKenzie, A. R., Krause, S. 2017. High-frequency monitoring of catchment nutrient exports reveals highly variable storm

event responses and dynamic source zone activation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122: 2265–2281. <https://doi.org/10.1002/2017JG003904>

Blöschl, G. 2006. Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments. V: Anderson, M. G. (ur.) in McDonnell, J. J. (ur.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa140>

Bobbink, R., Ashmore, M., Braun, S., Flückiger, W., van den Wyngaert, I. J. J. 2003. Empirical critical loads for natural and semi-natural ecosystems: 2002 update. V: Achermann, B. (ur.), Bobbink, R. (ur.). *Empirical Critical Loads of Nitrogen*. Bern, Swiss Agency for Environment Forests and Landscape: 43–169.

Borken, W., Matzner, E. 2004. Nitrate teaching in forest soils: An analysis of long-term monitoring sites in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167: 277–283. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421354>

Bostan, P. A., Akyürek, Z. 2007. Exploring the Mean Annual Precipitation and Temperature Values Over Turkey By Using Environmental Variables. V: *Proceedings of the ISPRS Joint Workshop "Visualization and Exploration of Geospatial Data"*. Germany, Stuttgart, University of Applied Sciences: 1–6.

Bréda, 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. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>

Brilly, M., Šraj, M. 2005. *Osnove hidrologije, univerzitetni učbenik*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Brooks, P. D., Campbell, D. H., Tonnessen, K. A., Heuer, K., 1999. Natural variability in N export from headwater catchments: Snow cover controls on ecosystem N retention. *Hydrological Processes* 13: 2191–2201. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199910\)13:14/15<2191::aid-hyp849>3.0.co;2-l](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199910)13:14/15<2191::aid-hyp849>3.0.co;2-l)

Brown, L. C., Foster, G. R. 1986. Storm Erosivity Using Idealized Intensity Distributions. *Transactions of the ASAE* 30: 379–386.



Burns, D. A., Kendall, C. 2002. Analysis of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  to differentiate  $\text{NO}_3^-$  sources in runoff at two watersheds in the Catskill Mountains of New York. *Water Resources Research* 38: 91–912.

<https://doi.org/10.1029/2001wr000292>

Butturini, A., Gallart, F., Latron, J., Vazquez, E., Sabater, F. 2006. Cross-site comparison of variability of DOC and nitrate c-q hysteresis during the autumn-winter period in three Mediterranean headwater streams: A synthetic approach. *Biogeochemistry* 77: 327–349. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0711-7>

Caglar, M. U., Teufel, A. I., Wilke, C. O. 2018. Sicegar: R package for sigmoidal and double-sigmoidal curve fitting. *PeerJ*: 6:e4251. <https://doi.org/10.7717/peerj.4251>

Campbell, J. L., Rustad, L. E., Boyer, E. W., Christopher, S. F., Driscoll, C. T., Fernandez, I. J., Groffman, P. M., Houle, D., Kiekbusch, J., Magill, A. H., Mitchell, M. J., Ollinger, S. V. 2009. Consequences of climate change for biogeochemical cycling in forests of northeastern North America. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 264–284. <https://doi.org/10.1139/X08-104>

Cano-Paoli, K., Chiogna, G., Bellin, A. 2019. Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Science of Total Environment* 685: 37–49.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.166>

Clausen, J. C. 2003. Jordan cove Watershed Project. Final report. USA, Storrs, University of Connecticut: 113 str.

Colton, J. A., Bower, K. M. 2002. Some Misconceptions About  $R^2$ . *International Society of Six Sigma Professionals, EXTRAOrdinary Sense* 3, 2: 20–22.

Compton, J. E., Church, M. R., Larned, S. T., Hogsett, W. E. 2003. Nitrogen Export from Forested Watersheds in the Oregon Coast Range: The Role of  $\text{N}_2$ -fixing Red Alder. *Ecosystems* 6: 773–785.

<https://doi.org/10.1007/s10021-002-0207-4>

Curtis, C. J., Emmett, B. A., Reynolds, B., Shilland, J. 2004. Nitrate leaching from moorland soils: Can soil C:N ratios indicate N saturation? *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 4: 359–369.

<https://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028365.23623.b0>

Čotar, K., Pehani, P., Veljanovski, T. 2018. Leaf Area Index, MODIS MCD15A3, obdobje 2002-2016. Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti.

De Neve, S., Hartmann, R., Hofman, G. 2003. Temperature effects on N mineralization: Changes in soil solution composition and determination of temperature coefficients by TDR. *Eurasian. Journal of Soil Science* 54: 49–62. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00521.x>

Dhillon, G. S., Inamdar, S. 2013. Extreme storms and changes in particulate and dissolved organic carbon in runoff: Entering uncharted waters? *Geophysical Research Letters* 40: 1322–1327. <https://doi.org/10.1002/grl.50306>

Direktiva 2000/60/ES Evropskega Parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2000, ki določa okvir za delovanje Skupnosti na področju vodne politike (OL L št. 327/1 z dne 22.12.2000). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=SL> (Pridobljeno 1. junija 2018)

Dise, N. B., Matzner, E., Forsius, M. 1998. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe. *Environmental Pollution* 102: 453–456. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80068-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80068-7)

Donmez, C., Sari, O., Berberoglu, S., Cilek, A., Satir, O., Volk, M. 2020. Improving the Applicability of the SWAT Model to Simulate Flow and Nitrate Dynamics in a Flat Data-Scarce Agricultural Region in the Mediterranean. *Water* 12: 3479. <https://doi.org/10.3390/w12123479>

Duncan, J. M., Band, L. E., Groffman, P. M., Bernhardt, E. S. 2015. Mechanisms driving the seasonality of catchment scale nitrate export: Evidence for riparian ecohydrologic controls. *Water Resources Research* 51: 3982–3997. <https://doi.org/10.1002/2015WR016937>

EEA, 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator based report. Denmark, Copenhagen, European Environment Agency: 419 str.

Everit, B. S., Skrondal, A. *The Cambridge Dictionary of Statistics*. USA, New York, Cambridge University Press: 468 str.

Exner-Kittridge, M., Strauss, P., Blöschl, G., Eder, A., Saracevic, E., Zessner, M. 2016. The seasonal dynamics of the stream sources and input flow paths of water and nitrogen of an Austrian headwater agricultural catchment. *Science of Total Environment* 542: 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.151>

Feinson, L. S., Gibs, J., Imbrigiotta, T. E., Garrett, J. D. 2016. Effects of Land Use and Sample Location on Nitrate-Stream Flow Hysteresis Descriptors During Storm Events. *Journal of American Water Resources Association* 52, 1493–1508. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12477>

Ferrant, S., Laplanche, C., Durbe, G., Probst, A., Dugast, P., Durand, P., Sanchez-Perez, J. M., Probst, J. L. 2013. Continuous measurement of nitrate concentration in a highly event-responsive agricultural catchment in south-west of France: Is the gain of information useful? *Hydrological Processes* 27: 1751–1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.9324>

Flynn, R., Deakin, J. 2016. Technical Note: Electrical Conductivity – A useful tool for investigating catchment hydrology. <https://www.catchments.ie/technical-note-electrical-conductivity-useful-tool-investigating-catchment-hydrology/> (Pridobljeno 25. septembra 2020).

Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., Voss, M. 2013. The global nitrogen cycle in the twentyfirst century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences* 368, 1621: 20130164. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>

Fox, J., Weisberg, S. 2019. *An R Companion to Applied Regression*. SAGE Publications: 472 str.

Friedman, S. P. 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 34: 2949–2961. <https://doi.org/10.1029/98WR01923>

García-Ruiz, J. M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., Navas, A., Latron, J., Martí-Bono, C., Arnáez, J. 2008. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology* 356: 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.013>

Girondot, M. 2019. phenology: Tools to Manage a Parametric Function that Describes Phenology. R package version 7.3. <https://CRAN.R-project.org/package=phenology>

Godsey, S. E., Kirchner, J. W., Clow, D. W. 2009. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes* 23: 1844–1864. <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>

GOZDIS. 2018. Polhograjsko hribovje - podatki o gozdnih sestojih. Elektronsko sporočilo Mitje Ferlana (Gozdarski inštitut Slovenije) z dne 15. maja 2018. Osebna komunikacija.

Gundersen, P., Callesen, I., De Vries, W. 1998a. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environmental Pollution* 102: 403–407. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80060-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80060-2)

Gundersen, P., Emmett, B. A., Kjønås, O. J., Koopmans, C. J., Tietema, A. 1998b. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management* 101: 37–55. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00124-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00124-2)

Haith, D. A., Mandel, R., Wu, R. S. 1992. GWLF: Generalized Watershed Loading Functions, version 2.0. User's Manual. USA, New York, Cornell University: 62 str.

Harrigan, S., Hannaford, J., Muchan, K., Marsh, T. J. 2018. Designation and trend analysis of the updated UK Benchmark Network of river flow stations: The UKBN2 dataset. *Hydrological Research* 49: 552–567. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.058>

Hedin, L. O., Armesto, J. J., Johnson, A. H. 1995. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old-growth temperate forests: Evaluation of biogeochemical theory. *Ecology* 76: 493–509. <https://doi.org/10.2307/1941208>

Hejduk, A., Banasik, K. 2011. Recorded lag times of snowmelt events in a small catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation* 43; 37–46. <https://doi.org/10.2478/v10060-008-0091-5>

Higashino, M., Stefan, H. G. 2014. Modeling the effect of rainfall intensity on soil-water nutrient exchange in flooded rice paddies and implications for nitrate fertilizer runoff to the Oita River in Japan. *Water Resources Research* 50: 8611–8624. <https://doi.org/10.1002/2013WR014643>

Holloway, J. A. M., Dahlgren, R. A. 2001. Seasonal and event-scale variations in solute chemistry for four Sierra Nevada catchments. *Journal of Hydrology* 250: 106–121. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00424-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00424-3)

Huebsch, M., Fenton, O., Horan, B., Hennessy, D., Richards, K. G., Jordan, P., Goldscheider, N., Butscher, C., Blum, P. 2014. Mobilisation or dilution? Nitrate response of karst springs to high rainfall

events. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 4423–4435. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4423-2014>

Huebsch, M., Grimmeisen, F., Zemann, M., Fenton, O., Richards, K. G., Jordan, P., Sawarieh, A., Blum, P., Goldscheider, N. 2015. Technical Note: Field experiences using UV/VIS sensors for high-resolution monitoring of nitrate in groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 1589–1598. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1589-2015>

Inserillo, E. A., Green, M. B., Shanley, J. B., Boyer, J. N. 2017. Comparing catchment hydrologic response to a regional storm using specific conductivity sensors. *Hydrological Processes* 31: 1074–1085. <https://doi.org/10.1002/hyp.11091>

IPCC, 2014. *Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Field, C. B. (ur.), Barros, V. R. (ur.), Dokken, D. J. (ur.), Mach, K. J. (ur.), Mastrandrea, T. E. (ur.), Bilir, T. E. (ur.), Chatterjee, M. (ur.), Ebi, K. L. (ur.), Estrada, R. C. (ur.), Genova, B. (ur.), Girma, E. S. (ur.), Kissel, A. N. (ur.), Levy, S. (ur.), MacCracken, P. R. (ur.), Mastrandrea, P. R. (ur.), White, L. L. (ur.). United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge, Cambridge University Press: 1132 str.

James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2017. *An introduction to statistical learning with applications in R.* Springer US: 440 str.

James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2017. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R, 7th edition,* Springer: 440 str.

Jawitz, J. W., Mitchell, J. 2011. Temporal inequality in catchment discharge and solute export. *Water Resources Research* 47: 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010WR010197>

Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosseling, L., Srinivasan, R. 2010. Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. *Water Resources Management* 24: 4505–4527. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9670-4>

Jesenko, J., Jesenko, M. 2007. *Multivariatne statistične metode.* Kranj, Moderna organizacija v okviru FOV Kranj: 346 str.

Johnson, D.W., Turner, J. 2014. Nitrogen budgets of forest ecosystems: A review. *Forest Ecology and Management* 318: 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.028>

Jolliffe, I. T. 2002. Principal Component Analysis. Springer Series in Statistics, Second Edition. New York, Springer Science & Business Media: 487 str.

Jordan, P., Cassidy, R. 2011. Technical Note: Assessing a 24/7 solution for monitoring water quality loads in small river catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 3093–3100. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3093-2011>

Judd, K. E., Likens, G. E., Groffman, P. M. 2007. High nitrate retention during winter in soils of the Hubbard Brook Experimental Forest Ecosystems 10: 217–225. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9027-x>

Kassambara, A. 2018. Machine Learning Essentials: Practical Guide in R. CreateSpace Independent Publishing Platform: 210 str.

Kassambara, A. 2017a. Multivariate Analysis I: Practical Guide to Cluster Analysis in R. Unsupervised Machine Learning. STHDA: 187 str.

Kassambara, A. 2017b. Multivariate Analysis II: Practical Guide to Principal Component Methods in R. STHDA: 264 str.

Kassambara, A., Mundt, F. 2020. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

Keim, R. F., Tromp-van Meerveld, H. J., McDonnell, J. J. 2006. A virtual experiment on the effects of evaporation and intensity smoothing by canopy interception on subsurface stormflow generation. *Journal of Hydrology* 327: 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.024>

Kirchner, J. W., Feng, X., Neal, C., Robson, A. J. 2004. The fine structure of water-quality dynamics: The (high-frequency) wave of the future. *Hydrological Processes* 18: 1353–1359. <https://doi.org/10.1002/hyp.5537>

Kmetijski inštitut Slovenije. 2018. Poročilo o preskusu vzorcev iz talnih horizontov na lokaciji porečja Kuzlovec. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije: 4 str.

Knapp, J. L., Freyberg, J. von, Studer, B., Kiewiet, L., Kirchner, J., 2020. Concentration-discharge relationships vary among hydrological events, reflecting differences in event characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences* 24: 2561–2576. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-684>

Kobold, M., Sušelj, K. 2004. Padavinske napovedi in njihova nezanesljivost v hidrološkem prognoziranju. V: *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004*: 61–75.

Koch, E., Bruns, E., Chmielewski, F. M., Defila, C., Lipa, W., Annette, M. 2009. Guidelines for Plant Phenological Observations. World Climate Programme, World Climate Data and Monitoring Programme, WCDMP-No. 70: 13 str.

Koenig, L. E., Shattuck, M. D., Snyder, L. E., Potter, J. D., McDowell, W. H. 2017. Deconstructing the Effects of Flow on DOC, Nitrate, and Major Ion Interactions Using a High-Frequency Aquatic Sensor Network. *Water Resources Research* 53: 10655–10673. <https://doi.org/10.1002/2017WR020739>

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 = Methods for cluster analysis; introduction and a case study. *Acta agriculturae Slovenica* 87: 299–310.

Kreutzer, K., Butterbach-Bahl, K., Rennenberg, H., Papen, H. 2009. The complete nitrogen cycle of an N-saturated spruce forest ecosystem. *Plant Biology* 11: 643–649. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00236.x>

Kronvang, B., Bruhn, A. J. 1996. Choice of sampling strategy and estimation method for calculating nitrogen and phosphorus transport in small lowland streams. *Hydrological Processes* 10: 1483–1501. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199611\)10:11<1483::AID-HYP386>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199611)10:11<1483::AID-HYP386>3.0.CO;2-Y)

Langmuir, D., Jacobson, R. L. 1970. Specific-Ion Electrode Determination of Nitrate in Some Freshwaters and Sewage Effluents. *Environmental Science and Technology* 4: 834–838. <https://doi.org/10.1021/es60045a004>

Laudon, H., Slaymaker, O. 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: An alpine example. *Journal of Hydrology* 201: 82–101. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00030-9)

Le, S., Josse, J., Husson, F. 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25, 1: 1–18. <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

Lennon, M. A., Whelton, H., Mullane, D. O., Ekstrand, J. 2004. Rolling Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Nitrates and nitrites in drinking-water. World Health Organization: 133 str.

Lewis, W. M., Melack, J. M., McDowell, W. H., McClain, M., Richey, J. E. 1999. Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. *Biogeochemistry* 46: 149–162. <https://doi.org/10.1007/BF01007577>

Li, X., Rennenberg, H., Simon, J. 2016. Seasonal variation in N uptake strategies in the understorey of a beech-dominated N-limited forest ecosystem depends on N source and species. *Tree Physiology* 36, 589–600. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv132>

Likens, G. E. 2013. The Hubbard Brook Ecosystem Study: Celebrating 50 Years. *Bulletin of the Ecological Society of America* 94: 336–337. <https://doi.org/10.1890/0012-9623-94.4.336>

Likens, G. E., Bormann, F. H. 2013. *Biogeochemistry in a Forested Ecosystem*. Springer: 208 str. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7810-2>

Lloyd, C. E M, Freer, J.E., Johnes, P.J., Coxon, G., Collins, A.L. 2016. Discharge and nutrient uncertainty: Implications for nutrient flux estimation in small streams. *Hydrological Processes* 30: 135–152. <https://doi.org/10.1002/hyp.10574>

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. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2)

Lohse, K. A., Brooks, P. D., McIntosh, J. C., Meixner, T., Huxman, T. E. 2009. Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems. *Annual Review of Environment and Resources* 34: 65–96. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.33.031207.111141>

Lovett, G. M., Weathers, K. C., Arthur, M. A. 2002. Control of nitrogen loss from forested watersheds by soil carbon:Nitrogen ratio and tree species composition. *Ecosystems* 5: 712–718. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0153-1>



Machacova, K., Vainio, E., Urban, O., Pihlatie, M. 2019. Seasonal dynamics of stem N<sub>2</sub>O exchange follow the physiological activity of boreal trees. *Nature Communications* 10: 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12976-y>

Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K. 2019. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.1.0.

Martin, C., Aquilina, L., Gascuel-Oudou, C., Molénat, J., Faucheux, M., Ruiz, L. 2004. Seasonal and interannual variations of nitrate and chloride in stream waters related to spatial and temporal patterns of groundwater concentrations in agricultural catchments. *Hydrological Processes* 18: 1237–1254. <https://doi.org/10.1002/hyp.1395>

Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Martin-Vide, J., Bech, J., Rodrigo, F. S. 2018. Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmospheric Research* 200: 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.016>

Mehdi, B., Schürz, C., Grath, B., Schulz, K. 2021. Storm event impacts on in-stream nitrate concentration and discharge dynamics: A comparison of high-resolution in-situ measured data with model simulations. *Science of the Total Environment* 755: 143406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143406>

Meybeck, M. 1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science* 282: 401–450.

MKGP, 2018. Grafični podatki RABA za celo Slovenijo. Ministrstvo za kmetijstvo gozdarstvo in prehrano. <https://rkg.gov.si/vstop/> (Pridobljeno 6. maja 2019).

Moravcová, J., Pavlíček, T., Ondr, P., Koupilová, M., Kvítek, T. 2013. Comparison of parameters influencing the behavior of concentration of nitrates and phosphates during different extreme rainfall-runoff events in small watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10, 12105–12151. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-12105-2013>

Musolff, A., Schmidt, C., Selle, B., Fleckenstein, J. H. 2015. Catchment controls on solute export. *Advances in Water Resources* 86: 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.026>

Myers, D. N. 2015. Foundations of Water Quality Monitoring and Assessment in the United States, in: Ahuja Energy, and Water, S.B.T.-F. (Ed.), Food, Energy, and Water. Elsevier, Boston, pp. 21–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800211-7.00002-8>

Nadelhoffer, K. J., Aber, J. D., Melillo, J. M. 1984. Seasonal patterns of ammonium and nitrate uptake in nine temperate forest ecosystems. *Plant and Soil* 80: 321–335.

Newman, B. D., Wilcox, B. P., Archer, S. R., Breshears, D. D., Dahm, C. N., Duffy, C. J., McDowell, N. G., Phillips, F. M., Scanlon, B. R., Vivoni, E. R. 2006. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research* 42: 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005WR004141>

Niu, S., Classen, A. T., Dukes, J. S., Kardol, P., Liu, L., Luo, Y., Rustad, L., Sun, J., Tang, J., Templer, P. H., Thomas, R. Q., Tian, D., Vicca, S., Wang, Y. P., Xia, J., Zaehle, S. 2016. Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle. *Ecology Letters* 19: 697–709. <https://doi.org/10.1111/ele.12591>

Noguchi, S., Nik, A. R., Yusop, Z., Tani, M., Sammori, T. 1997. Rainfall-runoff responses and roles of soil moisture variations to the response in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. *J. of Forestry Research* 2: 125–132. <https://doi.org/10.1007/BF02348209>

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., Rowe, B. 2007. Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *Bioscience* 57: 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>

Ockerman, D. J., Livingston, C. W. 1999. Nitrogen concentrations and Ddeposition in rainfall at two sites in the coastal bend area, South Texas, 1996–98. *U.S. Geol. Surv. Fact Sheet* 146–99: 6 str. <https://doi.org/10.3133/fs14699>

Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J. M. 2010. Temporal variability of nitrate transport through hydrological response during flood events within a large agricultural catchment in south-west France. *Science of Total Environment* 409: 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.006>

Ogris, N., Čotar, K., Kobler, A. 2016. Zaznava velikopovršinskih poškodb gozdnega drevja s pomočjo vegetacijskih indeksov na primeru žledoloma 2014. *Novice iz varstva gozdov* 9: 3–7. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.20315/NVG.9.1>

Ogris, N., Kobler, A., Čotar, K., Pehani, P., Veljanovski, T. 2018. VegX–Vegetacijski indeksi v Sloveniji, spletna aplikacija in interaktivna karta. <https://www.zdravgozd.si/projekti/vegx/> (Pridobljeno 15. maja 2020)

Ohte, N. 2012. Implications of seasonal variation in nitrate export from forested ecosystems: A review from the hydrological perspective of ecosystem dynamics. *Ecological Research* 27: 657–665. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0956-2>

Orlowski, N., Kraft, P., Pferdmenges, J., Breuer, L. 2016. Exploring water cycle dynamics by sampling multiple stable water isotope pools in a developed landscape in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences* 20: 3873–3894. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3873-2016>

Osaka, K., Ohte, N., Koba, K., Yoshimizu, C., Katsuyama, M., tani, M., Tayasu, I., Nagata, T. Hydrological influences on spatiotemporal variations of d15N and d18O of nitrate in a forested headwater catchment in central Japan: Denitrification plays a critical role in groundwater. *Journal of Geophysical Research* 115: G02021. <https://doi.org/10.1029/2009JG000977>

Osnovna geološka karta 1:100.000. Geološki zavod Slovenije. <https://ogk100.geo-zs.si/> (Pridobljeno 6. maja 2019)

OTT, 2020. Hydrolab MS5 - Multiparameter Mini Sonde. <https://www.ott.com/products/water-quality-2/hydrolab-ms5-multiparameter-mini-sonde-57/> (Pridobljeno 15. maja 2019)

Pan, Y., Hom, J., Birdsey, R., Mccullough, K. 2004. Impacts of rising nitrogen deposition on N exports from forests to surface waters in the Chesapeake Bay watershed. *Environmental Management* 33: 120–131. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9122-5>

Pauling, A., Paeth, H. 2006. On the variability of return periods of European winter precipitation extremes over the last five centuries. *Climate of the Past Discussions* 2: 157–189. <https://doi.org/10.5194/cpd-2-157-2006>

Pedološka karta 1:250.000. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. <http://soil.bf.uni-lj.si/index.php?page=projekti/pk250> (Pridobljeno 6. maja 2019)

Pellerin, B. A., Bergamaschi, B. A., Downing, B. D., Saraceno, J. F., Garrett, J. D., Olsen, L. D. 2013. Optical techniques for the determination of nitrate in environmental waters: Guidelines for instrument

selection, operation, deployment, maintenance, quality assurance, and data reporting. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, B. 5 1-D5: 37 str. <https://doi.org/10.3133/tm1D5>

Pellerin, B. A., Stauffer, B. A., Young, D. A., Sullivan, D. J., Bricker, S. B., Walbridge, M. R., Clyde, G. A., Shaw, D. M. 2016. Emerging Tools for Continuous Nutrient Monitoring Networks: Sensors Advancing Science and Water Resources Protection. *Journal of the American Water Resources Association* 52: 993–1008. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12386>

Pellerin, B. A., Wollheim, W. M., Feng, X., Vörösmarty, C. J. 2007. The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments. *Hydrological Processes* 22, 1810–1818. <https://doi.org/10.1002/hyp.6786>

Penna, D., Borga, M., Norbiato, D., Dalla Fontana, G. 2009. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *Journal of Hydrology* 364: 311–327. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.009>

Penna, D., van Meerveld, H. J., Oliviero, O., Zuecco, G., Assendelft, R. S., Dalla Fontana, G., Borga, M. 2015. Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment. *Hydrological Processes* 29: 2027–2042. <https://doi.org/10.1002/hyp.10347>

Perakis, S. S., Hedin, L. O. 2002. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature* 415: 416–419. <https://doi.org/10.1038/415416a>

Peterson, B. J., Wollheim, W. M., Mulholland, P. J., Webster, J. R., Meyer, J. L., Tank, J. L., Marti, E., Bowden, W. B., Valett, H. M., Hershey, A. E., McDowell, W. H., Dodds, W. K., Hamilton, S. K., Gregory, S., Morrall, D. D. 2001. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams. *Science* 292 (5514): 86–90. <https://doi.org/10.1126/science.1056874>

Piniewski, M., Marcinkowski, P., Koskiaho, J., Tattari, S. 2019. The effect of sampling frequency and strategy on water quality modelling driven by high-frequency monitoring data in a boreal catchment. *Journal of Hydrology* 579: 124186. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124186>

Pionke, H. B., Gburek, W. J., Schnabel, R. R., Sharpley, A. N., Elwinger, G. F. 1999. Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed. *Journal of Hydrology* 220: 62–73. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00064-5)

Pravilnik o monitoringu stanja površinskih voda (Uradni list RS, št. 10/09, 81/11 in 73/16)

Prowse, C. W. 1984. Some Thoughts on Lag and Hysteresis. *Area* 16: 17–23.

Qi, Z., Kang, G., Chu, C., Qiu, Y., Xu, Z., Wang, Y. 2017. Comparison of SWAT and GWLF Model Simulation Performance in Humid South and Semi-Arid North of China. *Water* 9: 567.  
<https://doi.org/10.3390/w9080567>

Qiao, K., Zhu, W., Xie, Z., Li, P. 2019. Estimating the Seasonal Dynamics of the Leaf Area Index Using Piecewise LAI-VI Relationships Based on Phenophases. *Remote Sensing* 11: 689.  
<https://doi.org/10.3390/rs11060689>

R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Rennenberg, H., Dannenmann, M. 2015. Nitrogen nutrition of trees in temperate forests-the significance of nitrogen availability in the pedosphere and atmosphere. *Forests* 6: 2820–2835.  
<https://doi.org/10.3390/f6082820>

Rode, M., Wade, A. J., Cohen, M. J., Hensley, R. T., Bowes, M. J., Kirchner, J. W., Arhonditsis, G. B., Jordan, P., Kronvang, B., Halliday, S. J., Skeffington, R. A., Rozemeijer, J. C., Aubert, A. H., Rinke, K., Jomaa, S. 2016. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. *Environmental Science and Technology* 50: 10297–10307. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02155>

Rodríguez-Blanco, M. L., Taboada-Castro, M. M., Arias, R., Taboada-Castro, M. T. 2018. Inter- and Intra-Annual Variability of Nitrogen Concentrations in the Headwaters of the Mero River. V: Amanullah, K. (ur.), Fahad, S. (ur.). *Nitrogen in Agriculture*. Croatia, Rijeka, IntechOpen: 3–16.  
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69996>

Rose, L. A., Karwan, D. L., Godsey, S. E. 2018. Concentration–discharge relationships describe solute and sediment mobilization, reaction, and transport at event and longer timescales. *Hydrological Processes* 32: 2829–2844. <https://doi.org/10.1002/hyp.13235>

Rozemeijer, J. C., Van Der Velde, Y., Van Geer, F. C., Bierkens, M. F. P., Broers, H. P. 2010. Direct measurements of the tile drain and groundwater flow route contributions to surface water contamination:

From field-scale concentration patterns in groundwater to catchment-scale surface water quality. *Environmental Pollution* 158: 3571–3579. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.014>

Rusjan, S., Brilly, M., Mikoš, M. 2008. Flushing of nitrate from a forested watershed: An insight into hydrological nitrate mobilization mechanisms through seasonal high-frequency stream nitrate dynamics. *Journal of Hydrology* 354: 187–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.009>

Rusjan, S., Mikoš, M. 2008. Assessment of hydrological and seasonal controls over the nitrate flushing from a forested watershed using a data mining technique. *Hydrology and Earth System Sciences* 12: 645–656. <https://doi.org/10.5194/hess-12-645-2008>

Rusjan, S., Vidmar, A. 2017. The role of seasonal and hydrological conditions in regulating dissolved inorganic nitrogen budgets in a forested catchment in SW Slovenia. *Science of the Total Environment* 575: 1109–1118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.178>

Sapač, K., Rusjan, S., Šraj, M. 2019. Vpliv računskih kriterijev na vrednosti recesijskih konstant nizkih pretokov v nehomogenem porečju v Sloveniji = Influence of calculation criteria on the values of low-flow recession constants in a non-homogenous catchment in Slovenia. *Acta hydrotechnica* 32, 56: 1–19. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.01>

Sapač, K., Rusjan, S., Šraj, M. 2020a. Assessment of consistency of low-flow indices of a hydrogeologically non-homogeneous catchment: A case study of the Ljubljanica river catchment, Slovenia. *Journal of Hydrology* 583: 124621. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124621>

Sapač, K., Vidmar, A., Bezak, N., Rusjan, S. 2020b. Lag Times as Indicators of Hydrological Mechanisms Responsible for NO<sub>3</sub>-N Flushing in a Forested Headwater Catchment. *Water* 12: 1092. <https://doi.org/10.3390/w12041092>

Schimel, J. P., Bennett, J. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology* 85: 591–602.

Schulze, E.-D. 2000. *The Carbon and Nitrogen Cycle of Forest Ecosystems*. V: Schulze, Ernst-Detlef (ur.). *Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 3–13. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-57219-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-57219-7_1)

Schwab, M. P., Klaus, J., Pfister, L., Weiler, M. 2017. How runoff components affect the export of DOC and nitrate: a long-term and high-frequency analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*: 1–21. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-416>

Sebestyen, S. D., Boyer, E. W., Shanley, J. B., Kendall, C., Doctor, D. H., Aiken, G. R., Ohte, N. 2008. Sources, transformations, and hydrological processes that control stream nitrate and dissolved organic matter concentrations during snowmelt in an upland forest. *Water Resources Research* 44: 1–14. <https://doi.org/10.1029/2008WR006983>

Sebestyen, S. D., Shanley, J. B., Boyer, E. W., Kendall, C., Doctor, D. H. 2014. Coupled hydrological and biogeochemical processes controlling variability of nitrogen species in streamflow during autumn in an upland forest. *Water Resources Research* 50: 1569–1591. <https://doi.org/10.1002/2013WR013670>

Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., Conway, D., Della-Marta, P. M., Gerber, M., Gong, S., Goswami, B. N., Hemer, M., Huggel, C., van den Hurk, B., Kharin, V. V., Kitoh, A., Tank, A. M. G. K., Li, G., Mason, S., McGuire, W., van Oldenborgh, G. J., Orlovsky, B., Smith, S., Thiaw, W., Velegrakis, A., Yiou, P., Zhang, T., Zhou, T., Zwiers, F. W. 2012. Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment, V: Field, C. B. (ur.), Dahe, Q. (ur.), Stocker, T. F. (ur.), Barros, V. (ur.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press: 109–230. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.008>

Shi, Z. H., Fang, N. F., Wu, F. Z., Wang, L., Yue, B. J., Wu, G. L. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology* 454–455: 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.004>

Shrestha, R. R., Osenbrück, K., Rode, M. 2013. Assessment of catchment response and calibration of a hydrological model using high-frequency discharge nitrate concentration data. *Hydrology Research* 44: 995–1012. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.087>

Shuster, W. D., Morrison, M. A., Webb, R. 2008. Front-loading urban stormwater management for success – a perspective incorporating current studies on the implementation of retrofit low-impact development. *Cities and the Environment* 1, 2: 8.

Snyder, L., Potter, J. D., McDowell, W. H. 2018. An Evaluation of Nitrate, fDOM, and Turbidity Sensors in New Hampshire Streams. *Water Resources Research* 54: 2466–2479. <https://doi.org/10.1002/2017WR020678>

Sousa, P. M., Trigo, R. M., Aizpurua, P., Nieto, R., Gimeno, L., Garcia-Herrera, R. 2011. Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 33–51. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-33-2011>

Stahr, K., Rück, F., Gaiser, T. 1994. Soil Nitrogen-Reserves and Mineralisation as Affected by Climate, Soil and Land use V: Köhler, W. (ur.). *The Terrestrial Nitrogen Cycle as Influenced by Man*. Nova Acta Leopoldina. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale): 213–235.

Stevens, C. J. 2019. Nitrogen in the environment. *Science* 363, 6427, 578–580. <https://doi.org/10.1126/science.aav8215>

Stoddard, J. L. 1994. Long-Term Changes in Watershed Retention of Nitrogen. Its Causes and Aquatic Consequences. V: Baker, L. A. (ur.). *Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs*: 223–284. <https://doi.org/10.1021/ba-1994-0237.ch008>

Suescún, D., Villegas, J. C., León, J. D., Flórez, C. P., García-Leoz, V., Correa-Londoño, G. A. 2017. Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change* 17: 827–839. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1071-7>

Svoboda, V., Hanel, M., Máca, P., Kyselý, J. 2016. Projected changes of rainfall event characteristics for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 64: 415–425. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0036>

Šraj, M. 2003. Določanje indeksa listne površine listnatega gozda na povodju Dragonje - 1. del: Metode in meritve = Estimating leaf area index of the deciduous forest in the Dragonja watershed - part I: Methods and measurements. *Acta hydrotechnica* 21, 35: 105–127.

Šraj, M., Dirnbek, L., Brilly, M. 2010. The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 58: 3–14. <https://doi.org/10.2478/v10098-010-0001-5>

Templer, P. H., Weathers, K. C., Lindsey, A., Lenoir, K., Scott, L. 2015. Atmospheric inputs and nitrogen saturation status in and adjacent to Class I wilderness areas of the northeastern US. *Oecologia* 177: 5–15. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3121-5>



Tezclaff, D., Carey, S. K., McNamara, J. P., Laudon, H. Soulsby, C. 2017. The essential value of long-term experimental data for hydrology and water management. *Water Resources research* 53: 2598–2604. <https://doi.org/10.1002/2017WR020838>

Thompson, S. E., Basu, N. B., Lascrain, J., Aubeneau, A., Rao, P. S. C. 2011. Relative dominance of hydrologic versus biogeochemical factors on solute export across impact gradients. *Water Resources Research* 47: 1–20. <https://doi.org/10.1029/2010WR009605>

Tourian, M. J., Seeuw, N., Bárdossy, A. 2013. A quantile function approach to discharge estimation from satellite altimetry (ENVISAT). *Water Resources Research* 49: 4174–4186. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20348>

Umut Calgar, M., Wilke, C. O. 2019. sicegar: Analysis of Single-Cell Viral Growth Curves. R package version 0.2.3. <https://CRAN.R-project.org/package=sicegar>

UNESCO. 2021. Science for a Water Secure World in a Changing Environment. The ninth phase of the Intergovernmental Hydrological Programme 2022–2029, draft strategic plan. UNESCO, Paris: 63 str.

Van Herpe, Y., troch, P. A. 2000. Spatial and temporal variations in surface water nitrate concentrations in a mixed land use catchment under humid temperate climatic conditions. *Hydrological Processes* 14: 2439–2455.

van Verseveld, W. J., McDonnell, J. J., Lajtha, K. 2008. A mechanistic assessment of nutrient flushing at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 358: 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.009>

Vaughan, M. C. H., Bowden, W. B., Shanley, J. B., Vermilyea, A., Sleeper, R., Gold, A. J., Pradhanang, S. M., Inamdar, S. P., Levia, D. F., Andres, A. S., Birgand, F., Schroth, A. W. 2017. High-frequency dissolved organic carbon and nitrate measurements reveal differences in storm hysteresis and loading in relation to land cover and seasonality. *Water Resources Research* 53: 5345–5363. <https://doi.org/10.1002/2017WR020491>

Verweij, W., van der Wiele, J., van Moorselaar, I., van der Grinten, E. 2010. Impact of climate change on water quality in the Netherlands. RIVM Report 607800007/2010. The Netherlands, National Institute for Public Health and Environment: 63 str.

- Vilhar, U., De Groot, M., Žust, A., Skudnik, M., Simončič, P. 2018. Predicting phenology of European beech in forest habitats. *IForest* 11: 41–47. <https://doi.org/10.3832/ifor1820-010>
- Voepel, H., Ruddell, B., Schumer, R., Troch, P. A., Brooks, P. D., Neal, A., Durcik, M., Sivapalan, M. 2011. Quantifying the role of climate and landscape characteristics on hydrologic partitioning and vegetation response. *Water Resources Research* 47: 1–13. <https://doi.org/10.1029/2010WR009944>
- Volf, G., Atanasova, N., Škerjanec, M., Ožanić, N. 2018. Hybrid modeling approach for the northern Adriatic watershed management. *Science of the Total Environment* 635: 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.094>
- Wang, C., Li, J., Liu, Q., Zhong, B., Wu, S., Xia, C. 2017. Analysis of differences in phenology extracted from the enhanced vegetation index and the leaf area index. *Sensors* 17: 1982 <https://doi.org/10.3390/s17091982>
- Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., Wade, A. J. 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal* 54: 101–123. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
- Wieben, C. M., Baker, R. J., Nicholson, R. S. 2013. Nutrient Concentrations in Surface Water and Groundwater, and Nitrate Source Identification Using Stable Isotope Analysis, in the Barnegat Bay-Little Egg Harbor Watershed, New Jersey, 2010–11. Scientific Investigations Report 2012-5287. Virginia, Reston, U.S. Geological Survey: 44 str.
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A. 2011. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, 3rd edition. USA, CA, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers Inc.: 664 str.
- WMO, 2008a. *Guide to Hydrological Practices. Volume I: Hydrology–From Measurement to Hydrological Information*, WMO-No. 168. Switzerland, Geneva, World Meteorological Organization: 296 str.
- WMO, 2008b. *Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report WMO-No. 10*. Switzerland, Geneva, World Meteorological organization: 136 str.

Wu, S. Y., Zhou, Q. Y., Wang, G., Yang, L., Ling, C. P. 2011. The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content. *Environmental Earth Sciences* 62: 999–1011. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0585-4>

Yanai, R. D., Vadeboncoeur, M. A., Hamburg, S. P., Arthur, M. A., Fuss, C. B., Groffman, P. M., Siccama, T. G., Driscoll, C. T. 2013. From missing source to missing sink: Long-term changes in the nitrogen budget of a northern hardwood forest. *Environmental Science and Technology* 47: 11440–11448. <https://doi.org/10.1021/es4025723>

Yevenes, M. A., Mannaerts, C. M. 2012. Untangling hydrological pathways and nitrate sources by chemical appraisal in a stream network of a reservoir catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 787–799. <https://doi.org/10.5194/hess-16-787-2012>

Yuan, L., Sinshaw, T., Forshay, K. 2020. Review of Watershed-Scale Water quality and Nonpoint Source Pollution Models. *Geosciences* 10: 25. <https://doi.org/10.3390/geosciences10010025>

Zabret, K. 2018. Vpliv meteoroloških in vegetacijskih parametrov na prestrezanje padavin. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Varstvo okolja: 174 str.

Zabret, K., Šraj, M. 2015. Can urban trees reduce the impact of climate change on storm runoff? *Urbani Izziv* 26: 165–178. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-011>

Zaki, M. J., Wagner, M. J. 2014. *Data Mining and Analysis: Fundamental Concepts and Algorithms*. USA, Cambridge University Press: 562 str.

Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K., Lagos, O. 2016. Sixteen years of agricultural drought assessment of the biobío region in Chile using a 250 m resolution vegetation condition index (VCI). *Remote Sensing* 8, 6: 530. <https://doi.org/10.3390/rs8060530>

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., Huete, A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84: 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

**PRILOGE**

Priloga A: Dogodki z več kot 10 mm padavin v obdobju med aprilom 2018 in aprilom 2020.....	151
Priloga B: Preglednica s karakterističnimi vrednostmi spremenljivk posameznih padavinskih dogodkov za opis hidroloških in vegetacijskih razmer.....	153
Priloga C: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Pearsonov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi odtenki zelene barve. ....	154
Priloga D: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Spearmanov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi odtenki zelene barve.....	155
Priloga E: Časovni zamiki težišč posameznih procesov glede na težišče hietografa. Rezultati so podani v minutah. ....	156

Priloga A: Dogodki z več kot 10 mm padavin v obdobju med aprilom 2018 in aprilom 2020

Dogodek	Začetek	Konec	Trajanje padavin [min]	Količina padavin [mm]	Intenziteta padavin [mm/min]
1	9. 04. 2018 19:00	10. 04. 2018 12:00	1040	10,4	0,60
2	11. 04. 2018 23:40	13. 04. 2018 00:00	1480	31,4	1,27
3	15. 04. 2018 17:00	16. 04. 2018 05:20	760	10,6	0,84
4	16. 04. 2018 18:00	17. 04. 2018 06:40	780	11,0	0,85
5	4. 05. 2018 08:20	4. 05. 2018 15:20	440	31,6	4,31
6	8. 05. 2018 20:20	9. 05. 2018 05:40	580	23,6	2,44
7	14. 05. 2018 22:00	15. 05. 2018 10:20	760	19,8	1,56
8	29. 05. 2018 14:40	30. 05. 2018 00:20	600	10,8	1,08
9	13. 06. 2018 05:00	13. 06. 2018 07:00	140	10,0	4,29
10	22. 06. 2018 00:20	22. 06. 2018 13:00	780	37,0	2,85
11	25. 06. 2018 00:40	25. 06. 2018 10:20	600	13,8	1,38
12	3. 07. 2018 20:20	4. 07. 2018 05:20	560	19,6	2,10
13	8. 07. 2018 17:40	8. 07. 2018 17:40	20	11,4	34,20
14	10. 07. 2018 23:20	12. 07. 2018 03:00	1680	55,0	1,96
15	13. 07. 2018 02:20	13. 07. 2018 08:40	400	17,8	2,67
16	21. 07. 2018 15:20	21. 07. 2018 20:20	320	16,4	3,08
17	14. 08. 2018 03:00	14. 08. 2018 08:40	360	12,0	2,00
18	25. 08. 2018 09:40	26. 08. 2018 16:20	1860	86,2	2,78
19	30. 08. 2018 18:40	31. 08. 2018 00:40	380	21,8	3,44
20	22. 09. 2018 11:40	22. 09. 2018 18:20	420	14,4	2,06
21	23. 09. 2018 23:20	24. 09. 2018 06:40	460	23,0	3,00
22	28. 10. 2018 02:00	30. 10. 2018 04:20	3040	88,2	1,74
23	2. 11. 2018 10:20	3. 11. 2018 04:40	1120	20,2	1,08
24	5. 11. 2018 20:00	6. 11. 2018 11:40	960	15,0	0,94
25	24. 11. 2018 10:40	25. 11. 2018 00:40	860	30,0	2,09
26	25. 11. 2018 09:20	26. 11. 2018 08:20	1400	22,8	0,98
27	7. 12. 2018 23:40	8. 12. 2018 08:40	560	17,2	1,84
28	17. 01. 2019 10:40	18. 01. 2019 05:20	1140	21,6	1,14
29	27. 01. 2019 10:00	28. 01. 2019 05:40	1200	23,8	1,19
30	1. 02. 2019 08:40	3. 02. 2019 02:40	2540	95,0	2,24
31	10. 02. 2019 11:00	11. 02. 2019 03:40	1020	17,2	1,01
32	5. 04. 2019 07:40	5. 04. 2019 18:20	660	27,3	2,48
33	10. 04. 2019 19:40	12. 04. 2019 06:20	2100	21,3	0,61
34	23. 04. 2019 04:40	24. 04. 2019 18:20	2280	32,7	0,86
35	28. 04. 2019 09:40	28. 04. 2019 22:00	760	26,7	2,11
36	3. 05. 2019 11:20	5. 05. 2019 13:20	3020	35,1	0,70
37	9. 05. 2019 04:40	9. 05. 2019 15:40	680	16,8	1,48
38	11. 05. 2019 23:40	12. 05. 2019 16:00	1000	35,1	2,11
39	15. 05. 2019 01:20	15. 05. 2019 20:00	1140	19,8	1,04
40	27. 05. 2019 02:00	30. 05. 2019 11:00	4880	109,8	1,35
41	10. 06. 2019 18:00	10. 06. 2019 19:00	80	13,5	10,13

42	19. 06. 2019 15:00	19. 06. 2019 18:20	220	43,2	11,78
43	22. 06. 2019 10:40	22. 06. 2019 22:20	720	18,3	1,53
44	7. 07. 2019 14:40	7. 07. 2019 15:40	80	13,5	10,12
45	8. 07. 2019 17:20	9. 07. 2019 00:40	460	40,2	5,24
46	27. 07. 2019 21:20	28. 07. 2019 00:00	180	18,6	6,20
47	28. 07. 2019 06:40	29. 07. 2019 00:40	1100	35,7	1,95
48	2. 08. 2019 10:00	2. 08. 2019 13:00	200	60,3	18,09
49	2. 08. 2019 19:40	3. 08. 2019 02:40	440	35,7	4,87
50	3. 08. 2019 15:20	3. 08. 2019 15:40	40	10,2	15,30
51	13. 08. 2019 19:40	14. 08. 2019 04:40	560	11,4	1,22
52	2. 09. 2019 23:40	3. 09. 2019 05:40	380	36,9	5,83
53	6. 09. 2019 14:00	6. 09. 2019 17:00	200	13,5	4,05
54	8. 09. 2019 11:20	8. 09. 2019 20:00	540	14,7	1,63
55	23. 09. 2019 14:20	24. 09. 2019 03:00	780	33,0	2,54
56	2. 10. 2019 12:20	2. 10. 2019 20:00	480	13,2	1,65
57	9. 10. 2019 21:20	10. 10. 2019 05:20	500	15,6	1,87
58	16. 10. 2019 03:20	16. 10. 2019 06:00	180	15,9	5,30
59	29. 10. 2019 04:40	29. 10. 2019 19:40	920	12,0	0,78
60	2. 11. 2019 23:00	4. 11. 2019 15:00	2420	30,9	0,77
61	5. 11. 2019 00:40	6. 11. 2019 02:20	1560	26,4	1,02
62	6. 11. 2019 09:20	7. 11. 2019 02:40	1060	15,9	0,90
63	8. 11. 2019 20:00	9. 11. 2019 12:20	1000	24,9	1,49
64	12. 11. 2019 04:40	13. 11. 2019 20:00	2380	63,0	1,59
65	15. 11. 2019 12:00	16. 11. 2019 07:20	1180	44,4	2,26
66	16. 11. 2019 20:20	17. 11. 2019 07:00	660	12,0	1,09
67	17. 11. 2019 16:00	18. 11. 2019 05:00	800	33,6	2,52
68	27. 11. 2019 15:00	28. 11. 2019 12:00	1280	38,7	1,81
69	1. 12. 2019 17:40	2. 12. 2019 18:40	1520	49,2	1,94
70	13. 12. 2019 20:40	14. 12. 2019 04:00	460	15,9	2,07
71	14. 12. 2019 10:40	14. 12. 2019 14:00	220	18,6	5,07
72	21. 12. 2019 09:00	21. 12. 2019 23:00	860	43,5	3,03
73	22. 12. 2019 06:40	22. 12. 2019 18:40	740	24,3	1,97
74	28. 01. 2020 03:20	28. 01. 2020 19:20	980	16,2	0,99
75	4. 02. 2020 10:40	4. 02. 2020 12:00	100	15,0	9,00
76	25. 02. 2020 20:00	26. 02. 2020 16:40	1260	20,1	0,96
77	1. 03. 2020 05:40	2. 03. 2020 00:40	1160	50,7	2,62
78	2. 03. 2020 14:00	4. 03. 2020 05:00	2360	54,3	1,38
79	6. 03. 2020 01:20	6. 03. 2020 13:40	760	19,5	1,54
80	30. 03. 2020 06:40	30. 03. 2020 17:00	640	12,6	1,18
81	14. 04. 2020 08:20	14. 04. 2020 14:40	400	11,4	1,71
82	29. 04. 2020 09:20	30. 04. 2020 00:00	900	21,0	1,40
83	30. 04. 2020 23:20	1. 05. 2020 15:20	980	13,8	0,84

Priloga B: Preglednica s karakterističnimi vrednostmi spremenljivk posameznih padavinskih dogodkov za opis hidroloških in vegetacijskih razmer.

Dogodek	Začetek	Konec	Qz	Qr	ET3	Ndni	Ff
1	4. 05. 2018 08:20	4. 05. 2018 15:20	5,98	6,47	11,5	5,98	Vegetacija
2	8. 05. 2018 20:20	9. 05. 2018 05:40	6,82	3,78	11,7	6,82	Vegetacija
3	14. 05. 2018 22:00	15. 05. 2018 10:20	6,31	4,55	9,5	6,31	Vegetacija
4	13. 06. 2018 05:00	13. 06. 2018 07:00	1,66	0,67	14,6	1,66	Vegetacija
5	22. 06. 2018 00:20	22. 06. 2018 13:00	0,80	19,93	15,9	0,80	Vegetacija
6	25. 06. 2018 00:40	25. 06. 2018 10:20	4,81	2,74	10,6	4,81	Vegetacija
7	8. 07. 2018 17:40	8. 07. 2018 17:40	3,94	11,23	12,9	3,94	Vegetacija
8	10. 07. 2018 23:20	12. 07. 2018 03:00	3,61	7,50	13,2	3,61	Vegetacija
9	13. 07. 2018 02:20	13. 07. 2018 08:40	1,66	2,52	8,2	1,66	Vegetacija
10	21. 07. 2018 15:20	21. 07. 2018 20:20	2,74	4,08	14,3	2,74	Vegetacija
11	25. 08. 2018 09:40	26. 08. 2018 16:20	1,10	9,75	11,2	1,10	Vegetacija
12	30. 08. 2018 18:40	31. 08. 2018 00:40	6,82	12,30	10,7	6,82	Vegetacija
13	28. 10. 2018 02:00	30. 10. 2018 04:20	4,30	19,05	3,3	4,30	Mirovanje
14	2. 11. 2018 10:20	3. 11. 2018 04:40	1,84	2,84	3	1,84	Mirovanje
15	5. 11. 2018 20:00	6. 11. 2018 11:40	1,91	5,27	1,7	1,91	Mirovanje
16	7. 12. 2018 23:40	8. 12. 2018 08:40	1,72	0,32	1	1,72	Mirovanje
17	1. 02. 2019 08:40	3. 02. 2019 02:40	7,18	68,76	1,3	7,18	Mirovanje
18	5. 04. 2019 07:40	5. 04. 2019 18:20	6,99	5,73	6,4	6,99	Vegetacija
19	10. 04. 2019 19:40	12. 04. 2019 06:20	8,34	2,02	4,2	8,34	Vegetacija
20	27. 07. 2019 21:20	28. 07. 2019 00:00	4,81	3,95	16,8	4,81	Vegetacija
21	28. 07. 2019 06:40	29. 07. 2019 00:40	4,06	3,12	15,8	4,06	Vegetacija
22	2. 08. 2019 10:00	2. 08. 2019 13:00	4,42	55,84	13,4	4,42	Vegetacija
23	2. 08. 2019 19:40	3. 08. 2019 02:40	5,23	16,79	13,4	5,23	Vegetacija
24	3. 08. 2019 15:20	3. 08. 2019 15:40	4,06	2,59	11,6	4,06	Vegetacija
25	13. 08. 2019 19:40	14. 08. 2019 04:40	4,06	1,92	9,1	4,06	Vegetacija
26	2. 09. 2019 23:40	3. 09. 2019 05:40	4,06	4,08	10,2	4,06	Vegetacija
27	5. 11. 2019 00:40	6. 11. 2019 02:20	3,30	2,22	2,4	3,30	Mirovanje
28	6. 11. 2019 09:20	7. 11. 2019 02:40	4,06	1,46	2,7	4,06	Mirovanje
29	8. 11. 2019 20:00	9. 11. 2019 12:20	2,57	2,80	2,2	2,57	Mirovanje
30	12. 11. 2019 04:40	13. 11. 2019 20:00	2,74	7,14	1,6	2,74	Mirovanje
31	15. 11. 2019 12:00	16. 11. 2019 07:20	3,10	11,43	1,5	3,10	Mirovanje
32	16. 11. 2019 20:20	17. 11. 2019 07:00	4,30	2,01	1,5	4,30	Mirovanje
33	17. 11. 2019 16:00	18. 11. 2019 05:00	6,31	4,05	1,5	6,31	Mirovanje
34	27. 11. 2019 15:00	28. 11. 2019 12:00	2,57	6,41	1,3	2,57	Mirovanje
35	1. 12. 2019 17:40	2. 12. 2019 18:40	2,74	10,28	1,3	2,74	Mirovanje
36	21. 12. 2019 09:00	21. 12. 2019 23:00	2,65	8,71	1,4	2,65	Mirovanje
37	22. 12. 2019 06:40	22. 12. 2019 18:40	4,06	2,08	1,6	4,06	Mirovanje
38	25. 02. 2020 20:00	26. 02. 2020 16:40	1,72	0,46	4,5	1,72	Mirovanje
39	1. 03. 2020 05:40	2. 03. 2020 00:40	1,91	6,85	4,7	1,91	Mirovanje
40	2. 03. 2020 14:00	4. 03. 2020 05:00	2,41	4,77	4,2	2,41	Mirovanje
41	6. 03. 2020 01:20	6. 03. 2020 13:40	2,57	0,63	3,3	2,57	Mirovanje
42	30. 03. 2020 06:40	30. 03. 2020 17:00	3,10	0,20	7,1	3,10	Vegetacija
43	14. 04. 2020 08:20	14. 04. 2020 14:40	3,30	0,31	11,1	3,30	Vegetacija

Priloga C: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Pearsonov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi otenki zelene barve.

	<b> Tp </b>	<b> Kp </b>	<b> Isr </b>	<b> I60 </b>	<b> E </b>	<b> ET3 </b>	<b> Ndni </b>	<b> Qz </b>	<b> Qr </b>	<b> Qmax </b>	<b> LAI </b>	<b> Cmax </b>	<b> Csr </b>	<b> Cr </b>	<b> C_rs </b>	<b> Iznos_N </b>	<b> Iznos_max </b>
<b> Tp </b>	1,00	<b>0,73</b>	<b>-0,40</b>	-0,23	<b>0,46</b>	<b>-0,50</b>	0,00	-0,01	0,23	0,22	<b>-0,50</b>	-0,09	-0,17	-0,01	0,24	0,27	0,09
<b> Kp </b>	0,73	1,00	-0,08	<b>0,34</b>	<b>0,90</b>	-0,17	0,06	0,00	<b>0,62</b>	<b>0,59</b>	-0,16	0,20	0,07	<b>0,37</b>	<b>0,33</b>	<b>0,63</b>	<b>0,45</b>
<b> Isr </b>	-0,40	-0,08	1,00	<b>0,44</b>	0,13	<b>0,38</b>	-0,06	0,06	<b>0,27</b>	<b>0,27</b>	<b>0,40</b>	0,06	0,06	0,13	0,02	0,17	0,16
<b> I60 </b>	-0,23	0,34	0,44	1,00	<b>0,69</b>	<b>0,43</b>	0,00	0,03	<b>0,56</b>	<b>0,54</b>	<b>0,47</b>	<b>0,29</b>	0,21	<b>0,44</b>	-0,05	<b>0,42</b>	<b>0,37</b>
<b> E </b>	0,46	0,90	0,13	0,69	1,00	0,06	0,06	0,01	<b>0,69</b>	<b>0,66</b>	0,08	<b>0,29</b>	0,15	<b>0,49</b>	0,23	<b>0,64</b>	<b>0,49</b>
<b> ET3 </b>	-0,50	-0,17	0,38	0,43	0,06	1,00	0,11	0,09	0,03	0,04	<b>0,91</b>	0,19	0,11	<b>0,34</b>	0,12	0,08	0,12
<b> Ndni </b>	0,00	0,06	-0,06	0,00	0,06	0,11	1,00	0,13	-0,05	-0,03	-0,04	0,06	-0,03	0,22	0,15	0,05	0,00
<b> Qz </b>	-0,01	0,00	0,06	0,03	0,01	0,09	0,13	1,00	<b>0,26</b>	<b>0,38</b>	0,12	-0,08	-0,01	-0,13	-0,05	<b>0,28</b>	<b>0,50</b>
<b> Qr </b>	0,23	0,62	0,27	0,56	0,69	0,03	-0,05	0,26	1,00	<b>0,99</b>	0,03	0,15	0,09	<b>0,27</b>	0,05	<b>0,85</b>	<b>0,68</b>
<b> Qmax </b>	0,22	0,59	0,27	0,54	0,66	0,04	-0,03	0,38	0,99	1,00	0,04	0,13	0,09	0,24	0,04	<b>0,85</b>	<b>0,72</b>
<b> LAI </b>	-0,50	-0,16	0,40	0,47	0,08	0,91	-0,04	0,12	0,03	0,04	1,00	0,22	0,16	<b>0,32</b>	0,05	0,08	0,15
<b> Cmax </b>	-0,09	0,20	0,06	0,29	0,29	0,19	0,06	-0,08	0,15	0,13	0,22	1,00	<b>0,95</b>	<b>0,83</b>	0,19	<b>0,53</b>	<b>0,63</b>
<b> Csr </b>	-0,17	0,07	0,06	0,21	0,15	0,11	-0,03	-0,01	0,09	0,09	0,16	0,95	1,00	<b>0,66</b>	0,07	<b>0,45</b>	<b>0,63</b>
<b> Cr </b>	-0,01	0,37	0,13	0,44	0,49	0,34	0,22	-0,13	0,27	0,24	0,32	0,83	0,66	1,00	<b>0,45</b>	<b>0,58</b>	<b>0,51</b>
<b> C_rs </b>	0,24	0,33	0,02	-0,05	0,23	0,12	0,15	-0,05	0,05	0,04	0,05	0,19	0,07	0,45	1,00	<b>0,26</b>	0,13
<b> Iznos_N </b>	0,27	0,63	0,17	0,42	0,64	0,08	0,05	0,28	0,85	0,85	0,08	0,53	0,45	0,58	0,26	1,00	<b>0,89</b>
<b> Iznos_max </b>	0,09	0,45	0,16	0,37	0,49	0,12	0,00	0,50	0,68	0,72	0,15	0,63	0,63	0,51	0,13	0,89	1,00

Stopnja statistične značilnosti:

<b>0,001</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>
--------------	-------------	-------------	------------



Priloga D: Korelacijska matrika spremenljivk, uporabljenih v analizah, glede na Spearmanov koeficient korelacije. V zgornji trikotni matriki so s krepko pisavo označene statistično značilne povezave med spremenljivkami. Stopnja statistične značilnosti (od 0,1 do 0,001) je označena z različnimi odtenki zelene barve

	Tp	Kp	Isr	I60	E	ET3	Ndni	Qz	Qr	Qmax	LAI	Cmax	Csr	Cr	C_rs	Iznos_N	Iznos_max
Tp	1,00	<b>0,64</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,36</b>	<b>0,40</b>	<b>-0,55</b>	-0,17	-0,15	0,18	0,10	<b>-0,56</b>	-0,24	-0,28	-0,13	0,25	0,05	-0,03
Kp	0,64	1,00	0,16	<b>0,28</b>	<b>0,95</b>	-0,20	-0,04	0,02	<b>0,69</b>	<b>0,56</b>	-0,25	0,21	0,11	<b>0,46</b>	<b>0,38</b>	<b>0,58</b>	<b>0,46</b>
Isr	-0,56	0,16	1,00	<b>0,78</b>	<b>0,41</b>	<b>0,50</b>	0,19	0,13	<b>0,50</b>	<b>0,44</b>	<b>0,45</b>	<b>0,44</b>	<b>0,36</b>	<b>0,55</b>	0,16	<b>0,47</b>	<b>0,42</b>
I60	-0,36	0,28	0,78	1,00	<b>0,52</b>	<b>0,42</b>	0,15	0,02	<b>0,46</b>	<b>0,35</b>	<b>0,47</b>	<b>0,42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,53</b>	0,07	<b>0,38</b>	<b>0,33</b>
E	0,40	0,95	0,41	0,52	1,00	0,00	-0,03	0,03	<b>0,77</b>	<b>0,61</b>	-0,04	<b>0,34</b>	0,24	<b>0,59</b>	<b>0,36</b>	<b>0,64</b>	<b>0,51</b>
ET3	-0,55	-0,20	0,50	0,42	0,00	1,00	0,19	0,12	0,06	0,10	<b>0,83</b>	<b>0,39</b>	<b>0,32</b>	<b>0,45</b>	0,12	0,14	0,15
Ndni	-0,17	-0,04	0,19	0,15	-0,03	0,19	1,00	-0,05	-0,01	0,01	0,04	0,03	-0,02	0,24	<b>0,32</b>	-0,05	-0,09
Qz	-0,15	0,02	0,13	0,02	0,03	0,12	-0,05	1,00	0,21	<b>0,54</b>	0,21	-0,04	0,03	-0,09	-0,13	<b>0,44</b>	<b>0,63</b>
Qr	0,18	0,69	0,50	0,46	0,77	0,06	-0,01	0,21	1,00	<b>0,91</b>	0,12	<b>0,29</b>	0,25	<b>0,44</b>	<b>0,36</b>	<b>0,83</b>	<b>0,68</b>
Qmax	0,10	0,56	0,44	0,35	0,61	0,10	0,01	0,54	0,91	1,00	0,17	0,23	0,22	<b>0,33</b>	<b>0,29</b>	<b>0,88</b>	<b>0,83</b>
LAI	-0,56	-0,25	0,45	0,47	-0,04	0,83	0,04	0,21	0,12	0,17	1,00	<b>0,25</b>	0,23	0,22	-0,13	0,15	0,18
Cmax	-0,24	0,21	0,44	0,42	0,34	0,39	0,03	-0,04	0,29	0,23	0,25	1,00	<b>0,97</b>	<b>0,77</b>	0,20	<b>0,58</b>	<b>0,56</b>
Csr	-0,28	0,11	0,36	0,35	0,24	0,32	-0,02	0,03	0,25	0,22	0,23	0,97	1,00	<b>0,63</b>	0,07	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>
Cr	-0,13	0,46	0,55	0,53	0,59	0,45	0,24	-0,09	0,44	0,33	0,22	0,77	0,63	1,00	<b>0,51</b>	<b>0,54</b>	<b>0,45</b>
C_rs	0,25	0,38	0,16	0,07	0,36	0,12	0,32	-0,13	0,36	0,29	-0,13	0,20	0,07	0,51	1,00	<b>0,33</b>	0,19
Iznos_N	0,05	0,58	0,47	0,38	0,64	0,14	-0,05	0,44	0,83	0,88	0,15	0,58	0,56	0,54	0,33	1,00	<b>0,94</b>
Iznos_max	-0,03	0,46	0,42	0,33	0,51	0,15	-0,09	0,63	0,68	0,83	0,18	0,56	0,58	0,45	0,19	0,94	1,00

Stopnja statistične značilnosti:

<b>0,001</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>
--------------	-------------	-------------	------------

Priloga E: Časovni zamiki težišč posameznih procesov glede na težišče hietografa. Rezultati so podani v minutah.

<b>Dogodek</b>	<b>LAGC</b>	<b>LAGN</b>	<b>LAGQ</b>	<b>LAGSM15</b>	<b>LAGSM40</b>	<b>LAGSM70</b>
1	214,37	230,54	219,48	-	-	-
2	351,44	331,78	332,28	-	-	-
3	361,33	347,75	343,04	-	-	-
4	224,24	205,66	187,77	-	-	-
5	222,82	288,13	285,95	-	-	-
6	204,18	200,82	182,01	-	-	-
7	182,61	152,26	150,23	-	-	-
8	289,45	369,97	266,75	-	-	-
9	280,46	295,19	281,22	-	-	-
10	251,29	210,40	199,24	-	-	-
11	367,38	364,25	207,56	-	-	-
12	35,50	36,31	35,20	-	-	-
13	-30,57	121,59	66,41	-	-	-
14	302,50	354,60	341,22	-	-	-
15	316,14	440,69	431,31	-	-	-
16	128,75	92,97	67,99	-	-	-
17	44,65	405,04	384,29	-	-	-
18	310,56	321,26	314,96	-	-	-
19	409,20	420,79	396,04	-	-	-
20	249,39	238,18	207,38	227,89	230,65	231,31
21	416,47	427,48	454,61	443,95	440,33	437,39
22	259,55	192,35	153,75	235,72	236,28	233,58
23	346,11	284,31	261,97	330,29	324,46	322,31
24	172,14	176,93	178,89	174,37	173,97	174,12
25	319,80	316,59	312,50	317,90	318,71	316,77
26	258,69	231,63	210,03	241,88	243,89	243,50
27	259,51	330,46	309,51	235,40	234,34	236,42
28	220,34	216,01	211,05	214,91	213,25	214,17
29	447,02	439,66	426,47	434,09	426,64	425,62
30	280,55	476,11	445,69	235,54	240,10	242,89
31	206,26	261,73	236,10	173,67	175,67	175,99
32	249,09	253,41	249,11	243,79	244,46	245,57
33	357,84	331,50	322,74	348,99	345,08	330,98
34	235,24	262,40	235,36	191,44	200,23	205,70
35	120,03	277,09	253,62	72,99	86,62	98,64
36	311,56	268,54	250,26	275,80	273,47	263,24
37	237,97	213,53	200,70	224,35	222,25	217,58
38	455,00	426,97	427,22	467,19	466,68	469,10
39	150,38	230,47	149,82	27,82	32,63	44,80
40	474,23	453,69	429,13	425,55	421,34	414,00
41	118,61	133,85	87,16	74,79	78,31	78,18
42	205,60	178,70	149,46	192,41	192,72	188,82
43	94,37	89,05	80,13	99,93	85,31	85,83