

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Sukanović, N., 2016. Analiza metod za preučevanje dinamike upadanja pretokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Mikoš, M.): 52 str.

Datum arhiviranja: 21-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

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

Sukanović, N., 2016. Analiza metod za preučevanje dinamike upadanja pretokov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Mikoš, M.): 52 pp.

Archiving Date: 21-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidatka:

NAIDA SUKANOVIĆ

**ANALIZA METOD ZA PREUČEVANJE DINAMIKE
UPADANJA PRETOKOV**

Diplomska naloga št.: 61/B-VOI

**METHODS FOR ANALYZING THE DISCHARGE
RECESSION DYNAMICS**

Graduation thesis No.: 61/B-VOI

Mentor:

doc. dr. Simon Rusjan

Somentor:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Ljubljana, 15. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

Spodaj podpisani/-a študent/-ka NAIDA SUKANOVIĆ, vpisna številka 26300333, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: ANALIZA METOD ZA PREUČEVANJE DINAMIKE UPADANJA PRETOKOV

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

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

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

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

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

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

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.16(043.2)
Avtor:	Naida Sukanović
Mentor:	doc. dr. Simon Rusjan
Somentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Naslov:	Analiza metod za preučevanje dinamike upadanja pretokov
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	52 str., 17 sl., 6 pregl., 11 graf.
Ključne besede:	hidrogram, pretok, bazni odtok, krivulja upadanja pretoka, odzivnostna funkcija

IZVLEČEK

Diplomsko delo predstavlja teoretične osnove analize krivulj upadanja, katere se uporabljajo za opisovanje dinamike upadanja pretokov.

V prvem delu strokovne naloge je predstavljeno teoretično ozadje komponent hidrograma. Predstavljene so tudi metode upadanja pretoka ter nova metoda, s katero dobimo odzivnostno funkcijo porečij, katera odraža odzivnost povodja na spremembe zaloge vode v porečju.

V drugem delu je uporabljena nova metoda. Izvedena je analiza na dveh eksperimentalnih porečjih hudournikov Mačkov graben in Kuzlovec, kjer so uporabljeni podatki padavin in pretokov.

Naša naloga je bila določiti krivuljo upadanja za oba vodotoka in z oceno le-teh dobiti odzivnostno funkcijo ter ju primerjati. Z novim pristopom ponazorimo, kako lahko uporabimo časovno zaporedje spremenljivosti vodnega toka za razlago povezave med zalogo vode v porečju in pretokom v strugi vodotoka. Prav tako lahko funkciji nadalje uporabimo za karakterizacijo porečja ter za simuliranje celotnega spektra hidroloških pogojev. Še zlasti je nova metoda uporabna za natančnejšo oceno zaloge vode v prispevnem območju, čas upadanja pretoka ter odzivnost porečja na padavine.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	556.16(043.2)
Author:	Naida Sukanović
Supervisor:	Prof. Simon Rusjan, Ph.D.
Co supervisor:	Prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.
Title:	Methods for analyzing the discharge recession dynamics
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	52 p., 17 fig., 6 tab., 11 graph.
Keywords:	hydrograph, discharge, recession curve, baseflow, sensitivity function

ABSTRACT

Graduation thesis presents theoretical basis for classical hydrograph recession curve analysis which are used to describe the dynamics of discharge recession.

The first part of the thesis presents theoretical background on assessing different components of hydrographs. A new method which foresees the extraction of catchment sensitivity function is presented.

In the second part of the thesis, New method is applied on rainfall and discharge data from two experimental catchments, the Mačkov graben and Kuzlovec torrents.

Our task was to determine the periods of discharge recession for both stream, to get sensitivity function and compare them. The new approach demonstrated how streamflow time series can be used to construct a storage–discharge relationship which could be used for catchment characterization and to simulate the entire spectrum of hydrological conditions. In particular, the method leads to possible further quantitative estimates of catchment dynamic storage, recession in different time scales, and sensitivity to rainfall inputs.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu in somentorju prof. dr. Matjažu Mikošu za vso strokovno pomoč in vodenje pri diplomski nalogi.

Posebna zahvala pa velja mojim staršem, ki so mi omogočili študij in me pri tem podpirali.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	VII
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IX
KAZALO SLIK.....	XV
KAZALO PREGLEDNIC	XVII
KAZALO GRAFIKONOV.....	XIX
1 UVOD	1
2 HIDROGRAM IN ODTOK.....	3
2.1 Komponente odtoka in hidrograma	4
2.1.1 Površinski odtok.....	5
2.1.2 Medtok.....	5
2.1.3 Bazni odtok	5
3 ANALIZA RECESIJSKIH KRIVULJ	5
3.1 Definicija	5
3.2 Metode.....	7
4 METODA ODZIVNOSTNE FUNKCIJE	8
4.1 Definicija	8
4.2 Karakterizacija porečja z uporabo odzivnostne funkcije	9
4.3 Primerjava s preteklimi analizami	11
5 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANEGA POREČJA	12
5.1 Splošni podatki	12
5.2 Topografija.....	15
5.3 Geologija	15
5.4 Pedologija.....	17
5.5 Pokrovnost in raba prostora	18
5.6 Meritve na terenu.....	20
6. ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA	22
7. ZAKLJUČEK	31
VIRI	33

»Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO SLIK

Slika 1: Hidrogram s pripadajočimi komponentami (Brodie in Hostettler, 2005)	3
Slika 2: Posamezni deli odtoka padavin (Brilly in Šraj, 2005)	4
Slika 3: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (Brilly in Šraj, 2005)	4
Slika 4: Krivulja upadanja (Petek, 2012).....	6
Slika 5: Ločeni krivulji upadanja za zimsko in poletno obdobje (Riggs, 1964; povzeto po Kovačič, 2012).....	7
Slika 6: Lega porečja Gradaščice na zemljevidu Slovenije.....	12
Slika 7: Na modelu Google označeno porečje Mačkov graben	13
Slika 8: Struga Hudournika Mačkov graben	13
Slika 9: Porečje hudournika Kuzlovec na modelu terena iz Google.....	14
Slika 10: Struga hudournika Kuzlovec.....	14
Slika 11: Topografija porečje Gradaščice ter obeh obravnavanih hudournikov (Rusjan, 2013)	15
Slika 12: Geološka karta porečja Gradaščice in obeh obravnavanih hudournikov (Rusjan, 2013)	16
Slika 13: Karta z označeno pedologijo tal porečja Gradaščice	17
Slika 14: Mačkov graben raba tal 2012 (Rusjan, 2013).....	19
Slika 15: Kuzlovec raba tal 2012 (Rusjan, 2013).....	20
Slika 16: Tlačna sonda za zvezno merjenje nivoja gladine v porečju Mačkov graben	21
Slika 17: Tlačna sonda za zvezno merjenje podatkov v porečju Kuzlovec	21

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Splošni podatki porečja Mačkov graben	13
Preglednica 2: Splošni podatki porečja Kuzlovec	14
Preglednica 3: Opis posameznih geoloških enot porečja Gradaščica (Rusjan, 2013)	16
Preglednica 4: Opis posameznih pedoloških enot porečja Gradaščica (Rusjan, 2013)	18
Preglednica 5: Opis rabe tal, porečje Mačkov graben	19
Preglednica 6: Opis rabe tal, porečje Kuzlovec	20

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: Prikaz niza podatkov padavin ter pretoka za porečje Mačkov graben	22
Graf 2: Prikaz niza podatkov padavin ter pretoka za porečje Kuzlovec	23
Graf 3: Prikaz spremembe pretoka v porečju Mačkov graben	24
Graf 4: Prikaz spremembe pretoka v porečju Kuzlovec	24
Graf 5: Srednji pretok ter povprečna deset-minutna sprememba znotraj intervala na porečju Mačkov graben	25
Graf 6: Srednji pretok ter povprečna deset-minutna sprememba znotraj intervala na porečju Kuzlovec	26
Graf 7: Krivulja upadanja porečja Mačkov graben	27
Graf 8: Krivulja upadanja porečja Kuzlovec	27
Graf 9: Sestavljena odzivnostna funkcija porečja Mačkov graben	28
Graf 10: Sestavljena odzivnostna funkcija porečja Kuzlovec	29
Graf 11: Odzivnosti funkciji za oba porečja	30

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Slovenija je obogatena z naravnimi danostmi in je po količini vode ena najbogatejših evropskih držav. Območje obogateno z vodo in raznolikostjo vodnega režima na prostorsko majhnem območju, pripomore k pospešitvi razvoja hidrološke znanosti v Sloveniji. Veda, ki proučuje vode nad zemeljskim površjem in pod njim se imenuje hidrologija. Ukvarja se s postopki, ki uravnavajo izčrpavanje in obnavljanje vodnih virov na kopenskih površinah zemlje ter obravnava različne razvojne faze kroženja vode. Kroženje vode v naravi zajema tudi padavine, ki predstavljajo najpomembnejši del hidrološkega kroga. Reke se napajajo iz raznih virov, poleg padavin, se preskrbujejo še z vodo iz podtalnice ter preko tajanja ledu ali snega. Z različnimi metodami lahko ocenimo količino vode v vodotoku, količino padavin, ki prispe do struge, trajanje poplavnega vala in količino le-tega. Za takšne ocene se že tradicionalno uporablja hidrogram odtoka, to je diagram, ki prikazuje časovno spremenljivost pretoka v vodotoku. Hidrogram je diagram, na katerem je predstavljena sprememba pretoka vodotoka v časovni odvisnosti. Sestavljajo ga različni vodni viri, ki predstavljajo celoten pretok. Komponente hidrograma lahko razdelimo na več delov, ki jih je potrebno razlikovati med seboj, za uporabo v hidroloških študijah, ki raziskujejo in proučujejo nivo pretoka.

Padajoči del hidrograma opišemo s krivuljo upadanja oz. recesijsko krivuljo. Krivulja upadanja vsebuje pomembne informacije o prispevnem deležu podzemnih virov k odtoku in s tem tudi o lastnostih in dinamiki podtalnice. Zanima nas, kako bodo upadali sušni pretoki, posledično jo lahko uporabimo v različnih dejavnostih urejanja in gospodarjenja z vodami. Prav tako, je lahko koristna za pomembnejše analize. Posreduje nam informacije o tem, kolikšna je zaloga vode v prispevni površini, karakteristike vodonosnika in kako se vodotok napaja iz svojega zaledja. Prav tako je krivulja upadanja, eden izmed kazalnikov nizkih pretokov.

Nizki pretoki so pojav, kadar dalj časa ni padavin. V času ko nastopijo nizki pretoki, pride do obremenitve vodnih virov (površinski in podzemni) in posledično do zmanjšanja pretokov v vodotoku. Glavni vir vode v času minimalnih pretokov je podtalnica.

Iz krivulje upadanja ocenimo odzivnostno funkcijo, kar tudi na praktičnih primerih preizkusimo. Odzivnostno funkcijo lahko definiramo, kot matematično zvezo, ki opisuje odziv pretoka v strugi na dinamične spremembe zaloge vode v porečju, ki se ob določenem času steka s prispevnega območja. Odzivnostni funkciji pa lahko nadalje uporabimo za karakterizacijo porečja in za simuliranje celotnega spektra hidroloških pogojev.

Kot smo že omenili, se lahko analize krivulj upadanja pretoka uporabi v različnih dejavnostih urejanja in gospodarjenja z vodami. Pridobljene podatke lahko uporabimo pri napovedovanju minimalnih, nizkih in sušnih pretokov. Le te pa uporabimo za napovedovanje razpoložljivih količin za oskrbo z vodo, za namakanje v kmetijstvu, za uporabo numeričnih modelov (zveza med padavinami in odtokom) in v energetske namene.

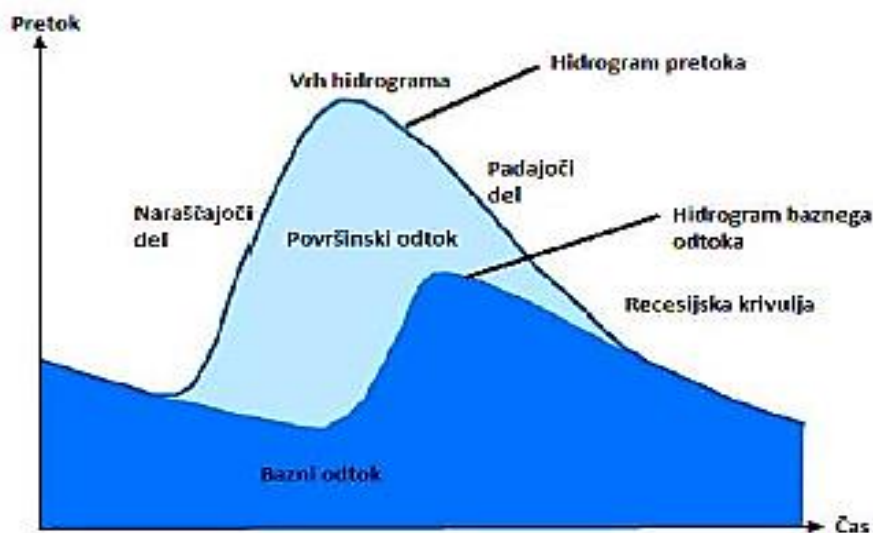
Cilj diplomske naloge je predstaviti obstoječe klasične metode krivulje upadanja pretoka, ki se uporabljajo za opisovanje dinamike upadanja pretokov, in novo metodo - odzivnostne funkcije uporabiti na praktičnih primerih. Metodo smo uporabili na izbranih porečjih hudournikov Mačkov graben in Kuzlovec.

2 HIDROGRAM IN ODTOK

Hidrogram je diagram, na katerem je predstavljena sprememba pretoka vodotoka v časovni odvisnosti. Sestavljajo ga različni vodni viri, ki predstavljajo celoten pretok (Brodie in Hostetler, 2005).

Relativni prispevek baznega in površinskega odtoka, k kateremu prištevamo tudi medtok se spreminja. Komponente hidrograma lahko razdelimo na več delov (slika 1) (Pugelj, 2012):

- Del, ki narašča: v tem delu pride do polnjenja rečne struge ter odraža povečanje pretoka.
- Hidrogramska konica: s padavinami pride do naraščanja pretoka vodotoka. Posledično pride do povečanja baznega odtoka, površinskega odtoka in medtoka. Naraščajoči del proti konici pa povzroči celoten odtok.
- Del, ki pada: poteka od vrha hidrograma do prevoja, kjer krivulja začne zopet naraščati, kar lahko pripišemo povečanim padavinam.
- Krivulja upadanja: začne se v prevojni točki in je tisti del krivulje, ki nadaljuje padajočo vejo hidrograma. Ravno recesijski krivulji bomo v diplomskem delu namenili največ pozornosti.

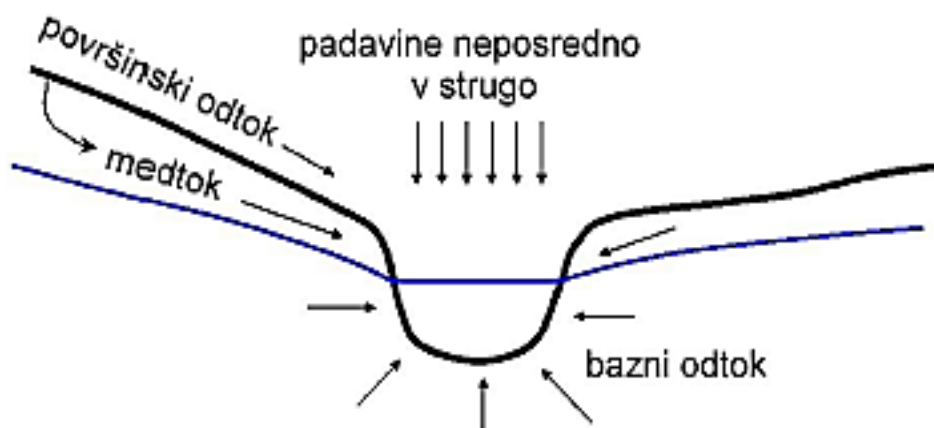


Slika 1: Hidrogram s pripadajočimi komponentami (Brodie in Hostetler, 2005)

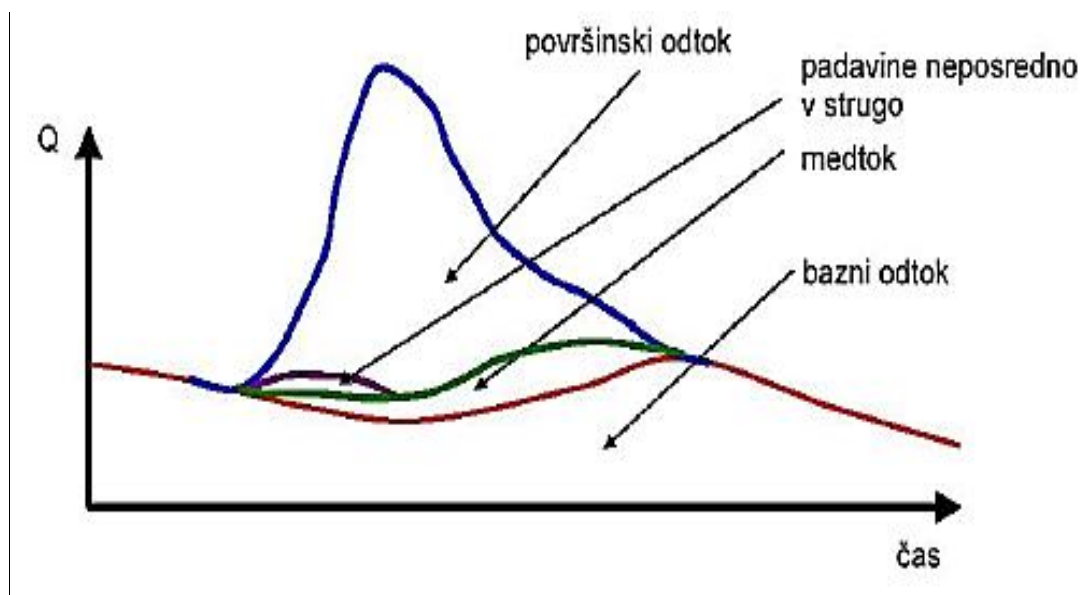
Padajoči del hidrograma, ki ga imenujemo tudi recesijski del hidrograma, grafično prikazuje primanjkovanje vode in zajemanje zalog vode iz porečja. Analize prav tega upadajočega dela hidrograma so pomembne za določanje raznih karakteristik vodonosnikov (Brodie in Hostetler, 2005).

2.1 Komponente odtoka in hidrograma

Pretok vodotoka sestavljajo štirje osnovni deli, in sicer bazni odtok, odtok ki ga povzročijo padavine, medtok in površinski odtok (sliki 2 in 3).



Slika 2: Posamezni deli odtoka padavin (Brilly in Šraj, 2005)



Slika 3: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (Brilly in Šraj, 2005)

2.1.1 Površinski odtok

Površinski odtok povzroča tisti del padavin, ki odteka po površju in pod površjem v mrežo vodotokov (padavine ki se zadržijo na vegetaciji, v tleh ali izhlapijo, ne sodijo sem) (Brilly in Šraj, 2005).

Padavine povzročajo povečanje pretoka v vodotoku, s tem pa se pojavijo pričetki površinskega odtoka. Na povečanje pretoka vodotoka vpliva tudi medtok (slika 2), vendar v poglavitno manjši meri kot površinski in bazni odtok (Brodie in Hostetler, 2005).

2.1.2 Medtok

Običajno se medtok v zemljino infiltrira med nevihto in se pojavi v baznem odtoku v času neposrednega odtoka neviht. Voda poišče neprepustno ali polprepustno plast tik pod površino z značilnim nagibom navzdol. Taka plast preprečuje infiltracijo navzdol in poveča stranski tok. Ta voda lahko izteka iz zemlje v obliki izvira in postane del površinskega toka. Medtok običajno določamo z uporabo recesijske konstante, npr. trenutni tok je v stalni zvezi s tokom v nekem času v preteklosti (Brilly in Šraj, 2005).

2.1.3 Bazni odtok

Pomen baznega odtoka ima več razlag. Najpogosteje ga opisujemo kot, prispevni delež podtalnice k pretoku vodotoka (Lacey, 1996).

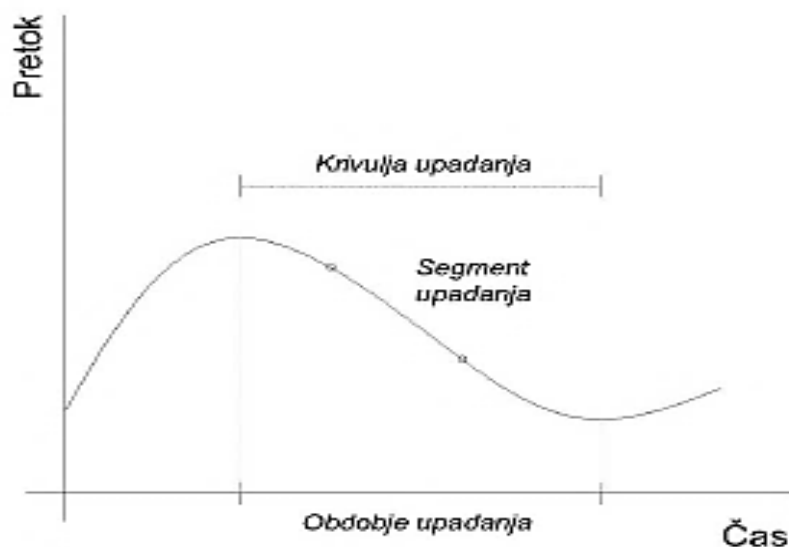
Bazni odtok (slika 3) predstavlja pomembnejši delež odtoka, saj v daljših sušnih obdobjih, ko ni padavin, reki zagotavlja dolgoročno oskrbo z vodo. Nastane pa z izcejanjem podtalnih in podzemnih zalog voda v samo strugo vodotoka (Smakhtin, 2001).

Bazni odtok je ena izmed karakteristik, ki odraža nizke pretoke prispevne površine. Poznavanje le-teh odločilno vpliva na usmeritve oz. razvoj upravljanja vodnega bogastva, še posebno v pogojih z nizkimi pretoki (količina pretoka, obdobje trajanja) (Tallaksen, 1995).

3 ANALIZA RECESIJSKIH KRIVULJ

3.1 Definicija

Analiza recesijske krivulje oz. krivulje upadanja preverja povezanost in odvisnost pretoka od spreminjanja v času. V obdobju ko je manj padavin se količina podzemne vode največkrat zmanjša, s tem pa tudi evapotranspiracija in pretok v strugi. Slednja ugotovitev sledi iz padajočega dela hidrograma, kar lahko predstavimo s t.i. recesijsko krivuljo oz. krivuljo upadanja (slika 4) (Tallaksen, 1995).



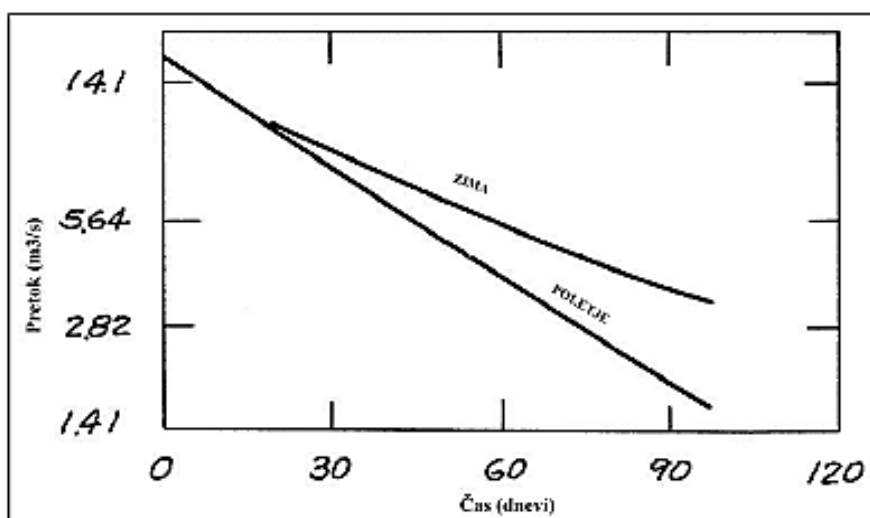
Slika 4: Krivulja upadanja (Petek, 2012)

Krivulja upadanja (slika 4) vsebuje pomembne informacije o prispevnem deležu podzemnih virov k odtoku in s tem tudi o dinamiki in karakteristikah podtalnice. Njena uporaba je možna v različnih dejavnostih urejanja in gospodarjenja z vodami. Prav tako, je lahko koristna za pomembnejše analize. Posreduje nam informacije o tem, kolikšna je zaloga vode v prispevni površini, karakteristike vodonosnika in kako se vodotok napaja iz svojega zaledja (Tallaksen, 1995).

Poznavanje podatkov o minimalnih pretokih lahko uporabimo za namakanje v kmetijstvu, napovedovanje razpoložljivih količin za oskrbo z vodo, pri uporabi numeričnih modelov (zveza med padavinami in odtokom), uporabi v energetske namene (Tallaksen, 1995).

Oblika krivulje upadanja pretoka je različna glede na letne čase, saj nanjo vplivajo tudi izgube zaradi evaporacije in evapotranspiracije. Glede na letni čas, lahko le te zelo nihajo. Da bi se izognili velikemu vplivu sezonskosti, se izdelata ločeni krivulji upadanja pretoka, eno za poletno in drugo za zimsko obdobje (slika 5) (Riggs, 1964).

Pri analizi podatkov z veliko frekvenco zajema (npr. urne vrednosti pretokov) lahko za analizo upadanja pretokov uporabimo podatke v nočnem času, ko je evapotranspiracija minimalna (Rusjan in Mikoš, 2015).



Slika 5: Ločeni krivulji upadanja za zimsko in poletno obdobje (Riggs, 1964; povzeto po Kovačič, 2012)

3.2 Metode

Na območju, kjer je podnebje bolj vlažno, padavine pogosto prekinjajo obdobje upadanja pretokov. Bolj strma krivulja upadanja je značilna v obdobju izrazitejše evapotranspiracijo v času naravnega rasti, kar nakazuje na pospešeno zmanjševanje baznega odtoka (Kovačič, 2012).

Za naklon krivulje upadanja je značilna velika spremenljivost, kar povzroča težave pri iskanju primerne metode za določanje krivulje iz zveznih meritev pretoka. Da bi lahko identificirali in parametrizirali značilnosti obnašanja krivulje upadanja, je bilo razvitih več postopkov (Kovačič, 2012).

Tallaksen (1995) je oblikoval enostavno eksponentno enačbo:

$$Q_t = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{C}\right) \quad (1)$$

Krivulja je prikazana v pol-logaritemskem merilu z naklonom $-1/C$:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - \frac{t}{C} \quad (2)$$

kjer je:

Q_t pretok v času,

Q_0 pretok na začetku recesijskega obdobja,

C recesijska konstanta.

Krivulja upadanja pretoka je opisana tudi na drug način. Nelinearno zvezo med časom in pretokom je Horton (1933) predstavil z dvojno eksponentno enačbo:

$$Q_t = Q_0 \exp(-at^m), \quad (3)$$

kjer je:

a stalna vrednost,

m stalna vrednost.

Toebeš in Strang (1964) sta razvila empirično enačbo, kot je na primer enačba:

$$Q_t = (Q_0 - b) \exp\left(-\frac{t}{c}\right) + b, \quad (4)$$

kjer je:

b konstanta, ki zajema vpliv taljenja ledu ali snega.

Iztok iz rezervoarja brez dotoka, lahko uporabimo tudi za modeliranje, kar opišemo z naslednji enačbo:

$$Q = KS^p, \quad (5)$$

kjer je:

K stalna vrednost,

p stalna vrednost,

S zalogo vode v rezervoarju (Žogan, 2013).

4 METODA ODZIVNOSTNE FUNKCIJE

4.1 Definicija

Odzivnostno funkcijo lahko definiramo kot matematično zvezo, ki opisuje odziv pretoka v strugi na dinamične spremembe zaloge vode v porečju, ki se ob določenem času steka s prispevnega območja. Porečje je prostorski element, ki nadzoruje vodne tokove s pomočjo različnih topografskih, fizičnih in geoloških lastnosti. Na najbolj osnovni ravni je funkcija porečja definirana kot zbiranje, skladiščenje in odtokanje voda (Rusjan in Mikoš, 2015).

Najpomembnejši parametri, ki vplivajo na vodni tok so: zaloga podzemne vode, količina padavin in odtok. Komponente vodnega toka določimo z analizo posameznih komponent

hidrograma in s krivuljo upadanja pretoka. Iz slednje ocenimo odzivnostno funkcijo porečja, ki jo lahko nadalje uporabimo za simulacijo hidrograma odtoka (Rusjan in Mikoš, 2015).

Koncept procesov odzivnosti in njihovega vključevanja v hidrološke modele, s katerimi iščemo povezavo med padavinami in odtokom (ang. »rainfall-runoff«), spominja na enega najpogostejših pristopov v hidrologiji porečij (Rusjan in Mikoš, 2015).

Kirchner (2009) z novim pristopom ponazori, kako lahko uporabimo časovno zaporedje spremenljivosti vodnega toka (pretoka v strugi) za razlago povezave med zalogo vode v porečju in pretokom v strugi vodotoka. Opišemo ga kot enostaven nelinearen dinamični sistem. Obliko enačbe lahko sklepamo iz neposrednih meritev spremenljivosti pretoka vode. Ta pristop vodi do kvantitativne ocene skladiščene vode na prispevnem območju, časa upadanja pretoka in odzivnost na padavine, kar lahko uporabimo za karakterizacijo povodja. Tako dobimo nelinearno diferencialno enačbo, ki povezuje osnovne komponente bilance vode v porečju, padavine, evapotranspiracijo in odtok. Le ta se nato lahko uporabi za simuliranje celotnega spektra hidroloških pogojev z upoštevanjem padavin in padavinskih izgub (Rusjan in Mikoš, 2015).

Metoda temelji na neposrednih povezavah med upadanjem pretoka in značilnostmi vodonosnika ter kombinacij celotne zaloge vode porečja, odtoka in hidrogeoloških karakteristik. To pomeni, da lahko več informacij o vodotoku dobimo iz krivulje upadanja pretoka kot iz informacij, ki jih pridobimo iz tradicionalnih teoretičnih, večinoma empiričnih hidroloških pristopov (Rusjan in Mikoš, 2015).

V primerih bolj kompliciranih hidroloških pogojev se komponente vodnega toka na padavine in odtok odzivajo na različne načine. Zato se odzivnost pretoka na spremembe v zalogi porečja lahko analizira za posamezno komponento vodnega toka. Z združitvijo krivulje upadanja pretoka in analizo posameznih komponent hidrograma odtoka pripomoremo k boljšemu razumevanju hidrološkega delovanja in obnašanje porečja (Rusjan in Mikoš, 2015).

4.2 Karakterizacija porečja z uporabo odzivnostne funkcije

Za razumevanje odziva porečja na padavinske dogodke je predstavljeno teoretično ozadje, ki nam omogoča nadaljnjo raziskovanje obnašanja prispevnega območja v danih hidroloških razmerah. Metodologijo in s tem vse enačbe je razvil Kirchner (2009).

Karakterizacijo prispevne površine začnemo ob predpostavki, da je količina vode v porečju v ravnovesju s celotno količino skladiščene vode prispevne površine, to opišemo z naslednjo enačbo:

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - Q, \quad (6)$$

kjer S predstavlja celotno zalogo vode v porečju, P - padavine, ET - evapotranspiracijo oz. vse padavinske izgube in Q - pretok. S vključuje celotno zalogo podzemne vode in kratkoročno skladiščenje vode na površini npr. v času velike namočenosti porečja.

Kirchner (2009) predpostavi, da je pretok (Q) vodotoka odvisen izključno od zaloge vode v porečju (S) in od povezave med zalogo vode in pretokom, ki jo lahko opišemo kot funkcijo praznjenja in polnjenja celotne zaloge vode v porečju.

$$Q = f(S) \quad (7)$$

Zaradi tega razloga funkcija $f(S)$ nima določene predpisane oblike in se od porečja do porečja razlikuje. Zato je potrebno oceniti njeno obliko preko npr. koeficientov funkcije, te pa lahko ocenimo neposredno iz časovnega zaporedja podatkov o odtoku.

$$f(S) = \frac{dQ}{dS} = f(f^{-1}(Q)) = g(Q) \quad (8)$$

Dobimo novo funkcijo $g(Q)$, ki jo lahko poimenujemo »odzivnostna funkcija porečja«, saj odraža odziv pretoka na spremembe v zalogi vode v porečju.

Z upoštevanjem časa in sprememb pretoka skozi čas, dobimo naslednjo enačbo:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dS} \frac{dS}{dt} = \frac{dQ}{dS} (P - E - Q), \quad (9)$$

kjer $\frac{dQ}{dt}$ predstavlja stopnjo spremembe pretoka.

Iz izpeljave (8) in (9) ocenimo funkcijo $g(Q)$, z upoštevanjem obdobj, ko so padavine in evapotranspiracija majhne v primerjavi s pretokom. Oba pogoja sta istočasno izpolnjena v nočnih obdobjih brez padavin, ko je evapotranspiracija zanemarljiva. Dobimo naslednjo enačbo:

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} \approx \frac{-dQ/dt}{Q} \quad (10)$$

Koncept odzivnostne funkcije kaže, da procesi, ki kontrolirajo padavine in odtok v porečju, zagotavljajo edinstveno razmerje, ki se odraža v časovni spremenljivosti pretoka v vodotoku. Le to pa se lahko uporabi za nadaljnje preiskave obnašanja pretoka vodotoka v različnih hidroloških razmerah.

4.3 Primerjava s preteklimi analizami

Skozi zgodovino hidrologije so Hall (1968), Tallaksen (1995) in Smakhtin (2001) poskušali povezati obnašanje upadanja pretoka vodotoka s funkcijo praznjenja zaloge vode v porečju. Nov pristop (Kirchner, 2009) se od prejšnjih analiz razlikuje na štiri načine:

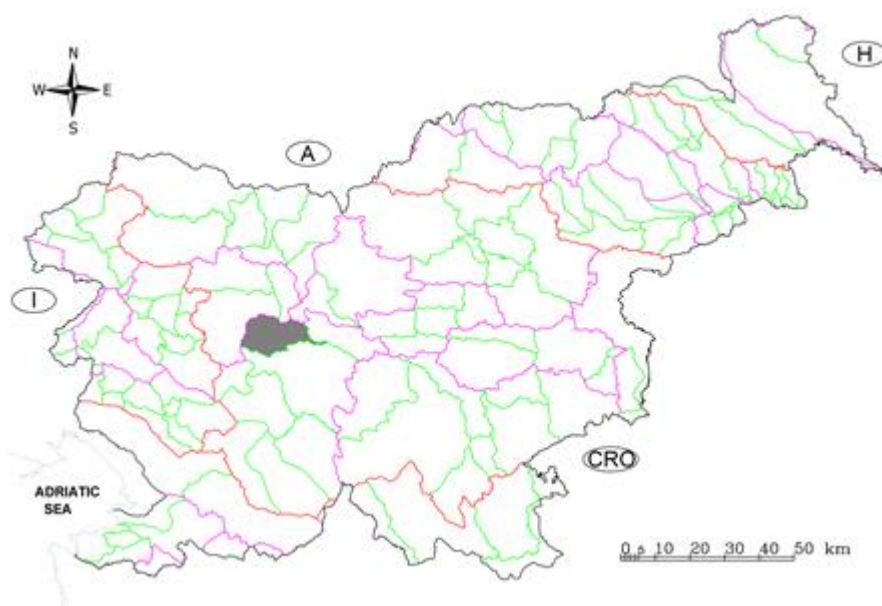
1. Odnos med zalogo vode v porečju in upadanjem pretoka je opisan z odzivnostno funkcijo $g(Q)$, kar je prednost, saj lahko $g(Q)$ ocenimo neposredno iz krivulje upadanja pretoka (recesijske krivulje). S to funkcijo lahko celo preko masne bilance ocenimo padavine ali dejanske padavinske izgube (dejansko evapotranspiracijo) iz niza podatkov o pretoku.
2. Ne predpisuje oblike zveze med zalogo vode v prispevnem območju in pretokom, prav tako ne določa vnaprej oblike odzivnostne funkcije, ampak se jo določi neposredno iz podatkov o pretoku. To naredi analizo bolj splošno, v primerjavi z analizami, ki predpostavljajo, da mora zveza med zalogo in pretokom imeti določeno obliko. Ker se odzivnostno funkcijo določi neposredno iz pretočnih podatkov in vključuje še obnašanje porečja ob praznjenju, jo lahko uporabimo kot parameter oz. orodje za karakterizacijo porečja.
3. Z novim pristopom skušamo upoštevati negotove in zavajajoče dejavnike, ki običajno vplivajo na podatke o povodju. Že Tallaksen (1995) je izpostavil, da se v predhodnih analizah upadanja pretoka premalo pozornosti posveča motečim učinkom evapotranspiracije, saj le ti znatno vplivajo na naklon krivulje upadanja. Krivuljo se uporabi za oceno odzivnostne funkcije $g(Q)$. Ni potrebna neprekinjena recesijska krivulja, da bi lahko izločili moteče podatke, na katere evapotranspiracija bistveno vpliva.
4. Ne upoštevamo razlik med baznim odtokom in površinskim odtokom. Namesto tega obravnavamo praznjenje porečja kot stalnico hidrološkega obnašanja. Zato ni potrebno ločevanje hidrograma na posamezne komponente, kar naredi analizo splošno in preprosto.

Z novo metodo v nasprotju s klasičnimi metodami analize upadanja pretoka ni določene funkcionalne oblike odnosa med zalogo vode in pretokom, namesto tega z novim pristopom določimo funkcionalno obliko neposredno iz pretočnih podatkov (Kirchner, 2009).

5 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANEGA POREČJA

5.1 Splošni podatki

Reko Gradaščico napajata tudi izbrani analizirani porečji Mačkov graben in Kuzlovec (slika 8) (Rusjan, 2013).



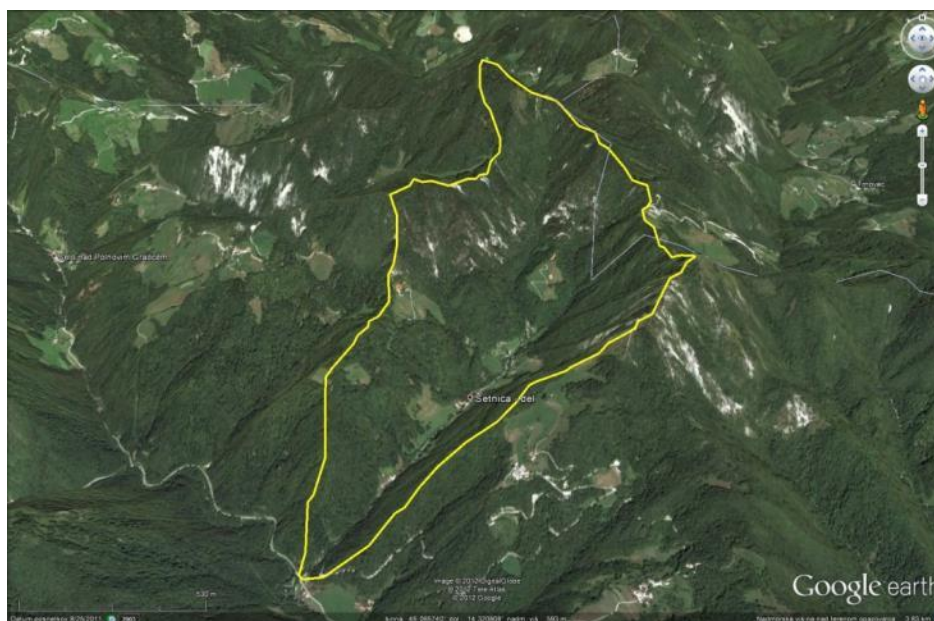
Slika 6: Lega porečja Gradaščice na zemljevidu Slovenije

Porečje Gradaščice je na prehodnem območju med dinarskim in alpskim svetom. Območje povirja sestavljajo različni gorski reliefi dolomitov, ki oblikujejo številne soteske in doline. Celotno prispevno območje meri 158,82 km² ter obsega velik del Polhograjskega hribovja. Za ta predel so značilni visoki vrhovi, strma pobočja ter obilne padavine (povprečna letna vsota padavin je med 1600 in 1800 mm), kar se odraža v hitrem naraščanju vodostajev in posledično v hudourniškem odzivu Gradaščice in njenih pritokov (Rusjan, 2013).

Preglednica 2 in preglednica 3 prikazujeta osnovne podatke hudourniških območij Mačkov graben in Kuzlovec (Rusjan, 2013).

Preglednica 1: Splošni podatki porečja Mačkov graben

Prispevna površina	2.33 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	384 m; 1015 m; 649 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	58.5° (163.5%); 30.5° (59%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1780 m
Naklon struge (povprečje)	9.3 %
Največji izmerjeni pretok	N/A
Najmanjši izmerjeni pretok	N/A



Slika 7: Na modelu Google označeno porečje Mačkov graben



Slika 8: Struga Hudournika Mačkov graben

Preglednica 2: Splošni podatki porečja Kuzlovec

Prispevna površina	0.71 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	394 m; 847 m; 631 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	46.5° (105.3%); 27.3° (51.6%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1300 m
Naklon struge (povprečje)	22.2 %
Največji izmerjeni pretok	N/A
Najmanjši izmerjeni pretok	N/A



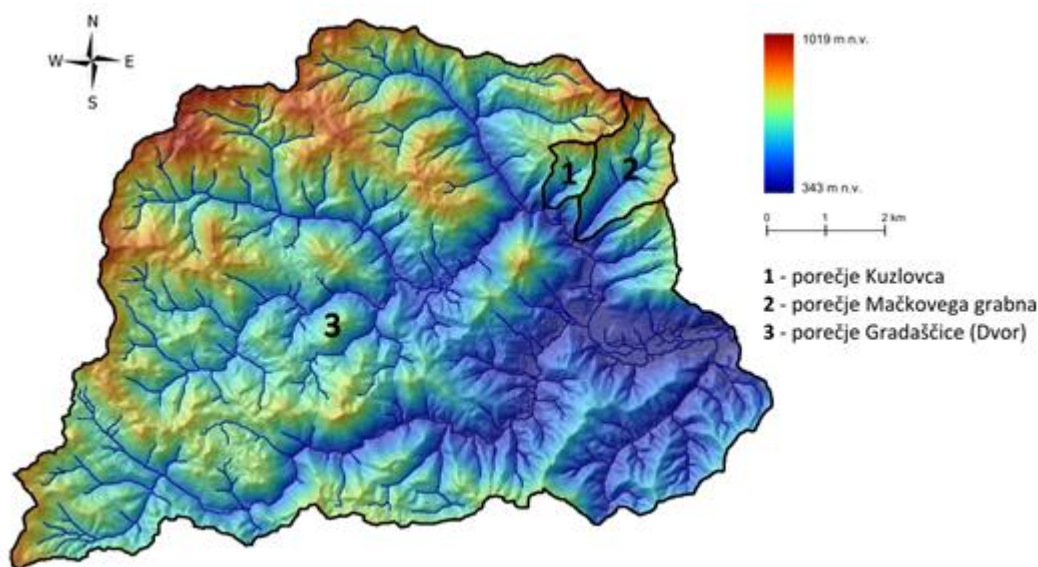
Slika 9: Porečje hudournika Kuzlovec na modelu terena iz Google



Slika 10: Struga hudournika Kuzlovec

5.2 Topografija

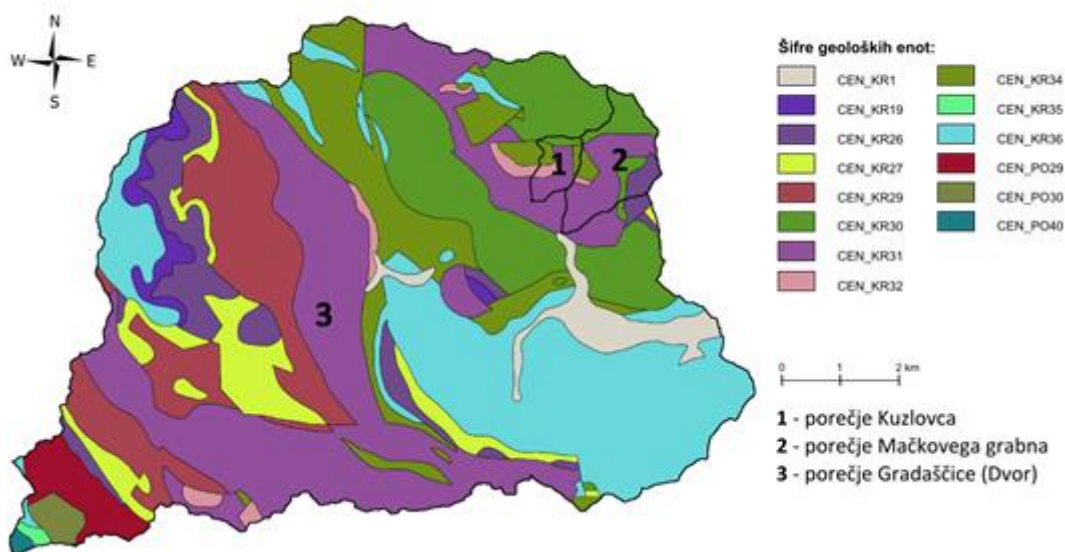
Porečje Gradaščice obsega topografsko raznolika področja: na bolj severnem predelu porečja Polhograjsko hribovje na jugozahodnem pa ljubljansko nižavje/kotlino. Greben Polhograjskega hribovja z vrhovi Toško Čelo, Sveta Katarina, Grmada, Tošč ter Pasja ravan razmejuje severni del porečja. Meja se nato preusmeri na greben z vrhovi Sivka, Gabrovec, Špik ter Kovčka. Na tem območju je razgiban teren s strmimi pobočji ter ozkimi dolinami v povirnem delu (severni in severozahodni del porečja) je v glavnem posledica vodne erozije. Za območja, kjer prevladujejo dolomiti so značilne največje strmine, proti jugu in jugovzhodu se dolina razširi in pojavijo se topografske karakteristike nižavja. Najvišji vrh porečja je Pasja ravan (1019 m.n.v.), najnižja točka pa je sotočje Gradaščice in Ljubljanice (291 m.n.v.). Izbrani analizirani hudourniški območji (Mačkov graben in Kuzlovec) imata prav tako razgiban teren (Rusjan, 2013).



Slika 11: Topografija porečje Gradaščice ter obeh obravnavanih hudournikov (Rusjan, 2013)

5.3 Geologija

Za Polhograjsko hribovje je značilna hitra spremenljivost plasti med karbonatno in nekarbonatno osnovo. Posledično na območju najdemo tako kraške morfološke kot rečne značilnosti. Med karbonatnimi kamninami prevladuje dolomit. Med nekarbonatnimi kamninami pa prevladujejo glinovci in peščenjaki. Dna dolin pa so prekrita s srednje debelimi plastmi rečnih nanosov (Rusjan, 2013).



Slika 12: Geološka karta porečja Gradaščice in obeh obravnavanih hudournikov (Rusjan, 2013)

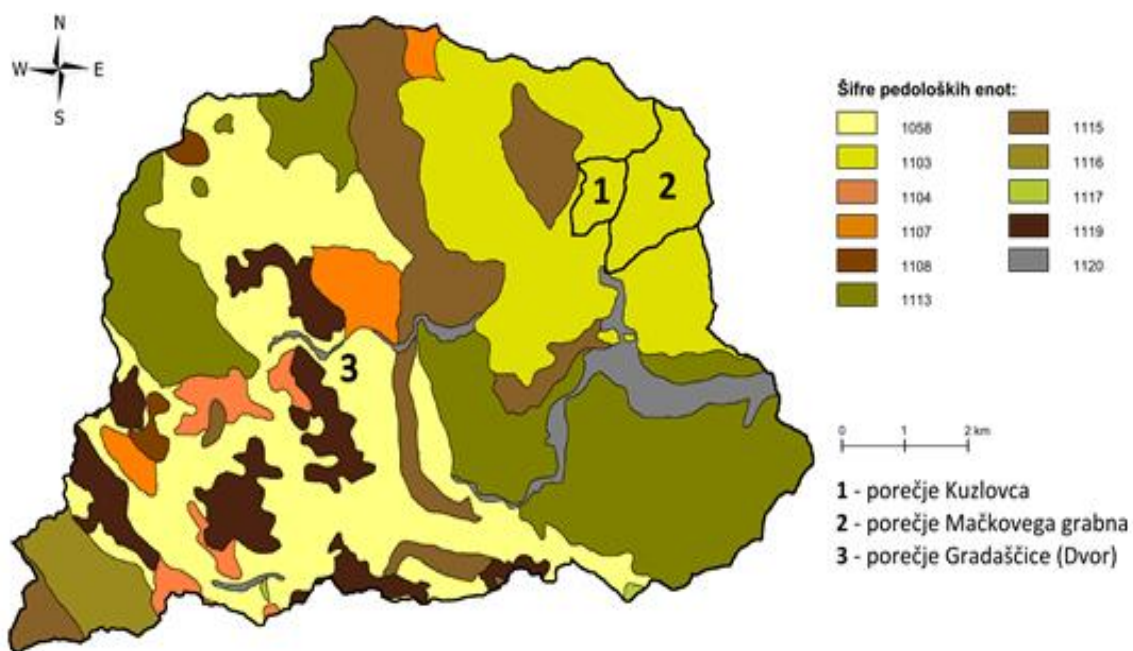
Geološka sestava je na obeh območjih zelo podobna.

Preglednica 3: Opis posameznih geoloških enot porečja Gradaščica (Rusjan, 2013)

Šifra	Opis šifre
CEN_KR1	Nanosi rek in potokov
CEN_KR19	Pisan peščenjak, argilit, tufit, apnenec, ponekod z rožencem
CEN_KR26	Svetlo siv kristalast dolomit
CEN_KR27	Piroklasititi, apnenec
CEN_KR29	Dolomit, ploščast apnenec
CEN_KR30	Neplastovit dolomit
CEN_KR31	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec
CEN_KR32	Temno siv apnenec in dolomit - žažarske plasti
CEN_KR34	Grodenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat
CEN_KR35	Grodenski skladi - zelenkasto siv peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat
CEN_KR36	Glinast skrilavec, alevrolit, peščenjak in konglomerat
CEN_PO29	Glavni dolomit
CEN_PO30	Karbonatne in klastične kamenine; boksit
CEN_PO40	Kremenov peščenjak in glinast skrilavec

5.4 Pedologija

Samo porečje Gradašnice je pedološko zelo raznoliko. Obravnavana območja sta v celoti sestavljena iz rendzine, na dolomitu ter apnencu (Rusjan, 2013).



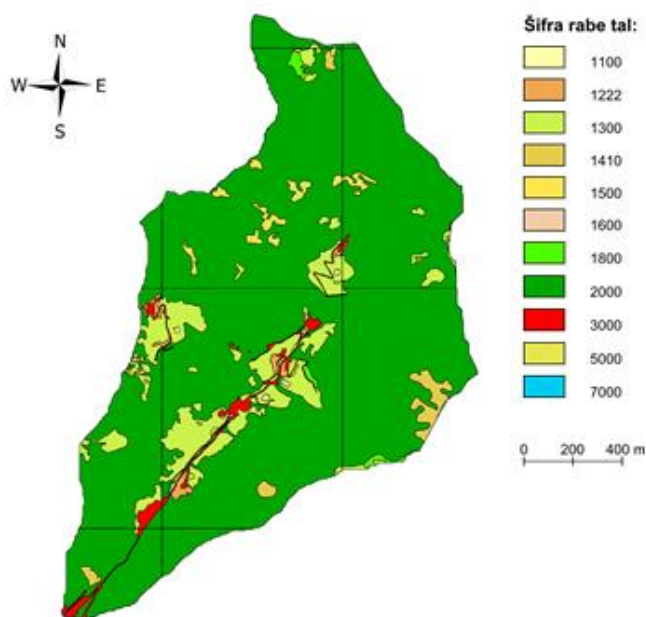
Slika 13: Karta z označeno pedologijo tal porečja Gradašnice

Preglednica 4: Opis posameznih pedoloških enot porečja Gradaščica (Rusjan, 2013)

Šifra	Opis šifre
1058	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 20%
1103	Rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 50%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50%
1104	Rendzina na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 70%, rjava, pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 30%
1107	Evtrična rjava tla, na laporju, tipična 80%, evtrična rjava tla na mehkih karbonatnih kamninah (lapornati apnenci), tipična 20%
1108	Evtrična rjava tla, na vezanih klastičnih pelitskih in psamitskih kamninah, tipična 70%, distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 20%
1113	Distrična rjava tla, na permo - karbonskih skrilavcih in peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1115	Distrična rjava tla, na grodenskih peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1116	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1117	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah tipična 60%, ranker, distričen, regolitični 40%
1119	Rjava pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 20%
1120	Obrečna tla, evtrična, srednje globoka 50%, obrečna tla, evtrična, zmerno oglašena 30%, obrečna tla, evtrična, globoka 20%

5.5 Pokrovnost in raba prostora

Porečje Gradaščice do vodomerne postaje Dvor pretežno pokrivajo gozdovi (70 %), ostali del pa predvsem kmetijske površine, katere so obdane z naravno vegetacijo in pašniki. Urbaniziranih površin je zelo malo (manj kot 1 %), saj so le v širokih delih doline Gradaščice gručaste vasi, drugod pa prevladujejo samotne kmetije.

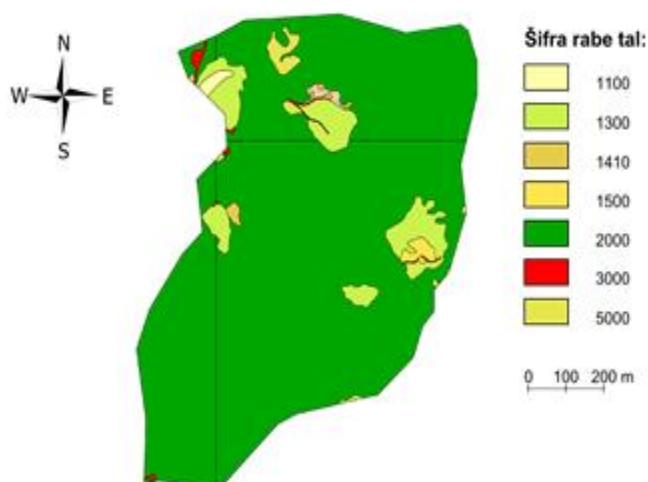


Slika 14: Mačkov graben raba tal 2012 (Rusjan, 2013)

Porečje Mačkovega grabna je v veliki večini pokrito z mešanim gozdom (40,4%), sledi mu listnati gozd (28%) in kmetijske površine obdane z naravno vegetacijo (11,6%).

Preglednica 5: Opis rabe tal, porečje Mačkov graben

Šifra	Opis rabe tal	Površina [km ²]	Delež [%]
2000	Gozd	1.966	84.8
1300	Trajni travnik	0.217	9.4
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0.033	1.4
1500	Drevesa in grmičevje	0.004	0.2
1222	Ekstenzivni travniški sadovnjak	0.014	0.6
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0.039	1.7
1100	Njive	0.002	0.1
5000	Odrpato zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0.029	1.3
1800	Kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	0.011	0.5
7000	Vodne površine	0.003	0.1



Slika 15: Kuzlovec raba tal 2012 (Rusjan, 2013)

Porečje Kuzlovca je prav tako v veliki večini pokrito z mešanim gozdom (38,3%), sledi mu listnati gozd (43,7%) in kmetijske površine obdane z naravno vegetacijo (18%) (Rusjan, 2013).

Preglednica 6: Opis rabe tal, porečje Kuzlovec

Šifra	Opis rabe tal	Površina [km ²]	Delež [%]
2000	Gozd	0.633	90.1
1300	Trajni travnik	0.050	7.1
1410	Kmetijsko zemljišče v zaraščanju	0.002	0.3
1500	Drevesa in grmičevje	0.004	0.5
1600	Neobdelano kmetijsko zemljišče	0.002	0.3
3000	Pozidano in sorodno zemljišče	0.003	0.4
1100	Njive	0.003	0.4
5000	Odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0.006	0.8

5.6 Meritve na terenu

Orodje, ki smo ga uporabili za pridobitev pretočnih podatkov je tlačna sonda, ki zvezno meri nivo vode. Sestavlja jo senzor z majhno odprtino, ki zaznava pritisk vode. Odprtina, skozi katero priteče voda, je relativno majhnega premera, zato lahko pride hitro do zamašitve predvsem v primeru velike vsebnosti suspendiranih plavin. Prav zaradi pogostih zamašitev tlačne sonde pride do motenj v meritvah in posledično vpliva na rezultate analize.



Slika 16: Tlačna sonda za zvezno merjenje nivoja gladine v porečju Mačkov graben

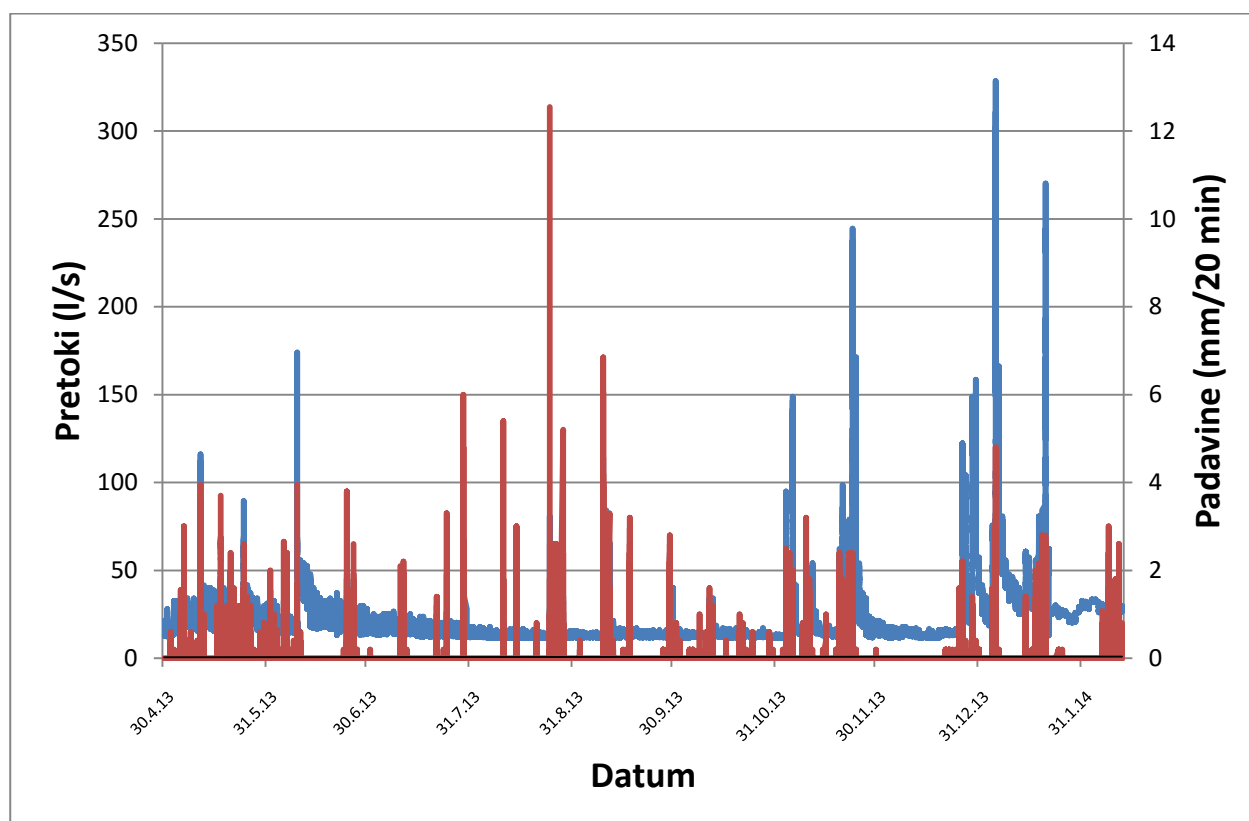


Slika 17: Tlačna sonda za zvezno merjenje podatkov v porečju Kuzlovec

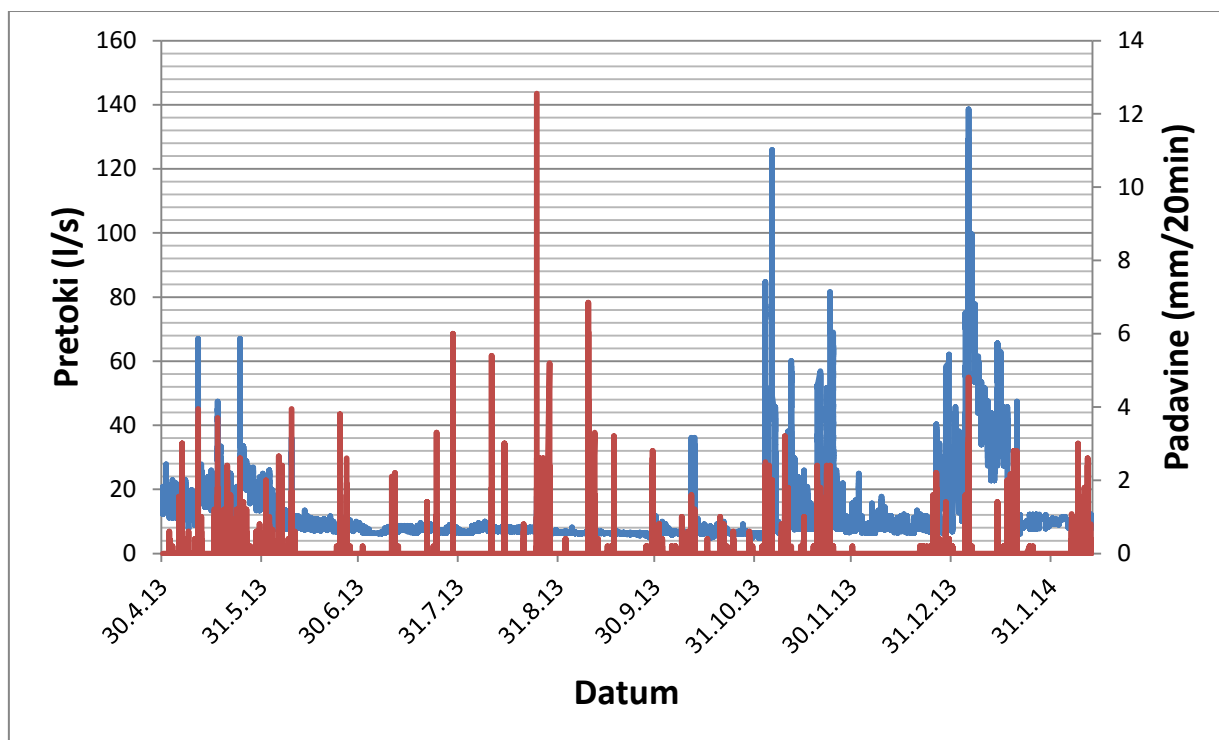
6. ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA

Naša naloga je bila analizirati porečje vodotoka Kuzlovec in Mačkov graben s pomočjo nove metode upadanja pretokov – metode odzivnostne funkcije. Določiti smo želeli obliko funkcije odnosa med zalogo vode in pretokom za obe porečji.

V analizo smo zajeli eno - letni niz podatkov v obdobju od 30. 4. 2013 do 12. 2. 2014. Merili smo deset-minutne pretoke in dvajset-minutne podatke o padavinah. Na grafih (graf 1, graf 2) so z rdečo oznako prikazani podatki o padavinah, z modro pa podatki o pretoku.



Graf 1: Prikaz niza podatkov padavin ter pretoka za porečje Mačkov graben



Graf 2: Prikaz niza podatkov padavin ter pretoka za porečje Kuzlovec

Tako Mačkov graben kot Kuzlovec sta hudourniška potoka, zato se naglo odzivata na padavinske dogodke, kar je lepo razvidno iz hidrograma, saj so velika nihanja v pretoku.

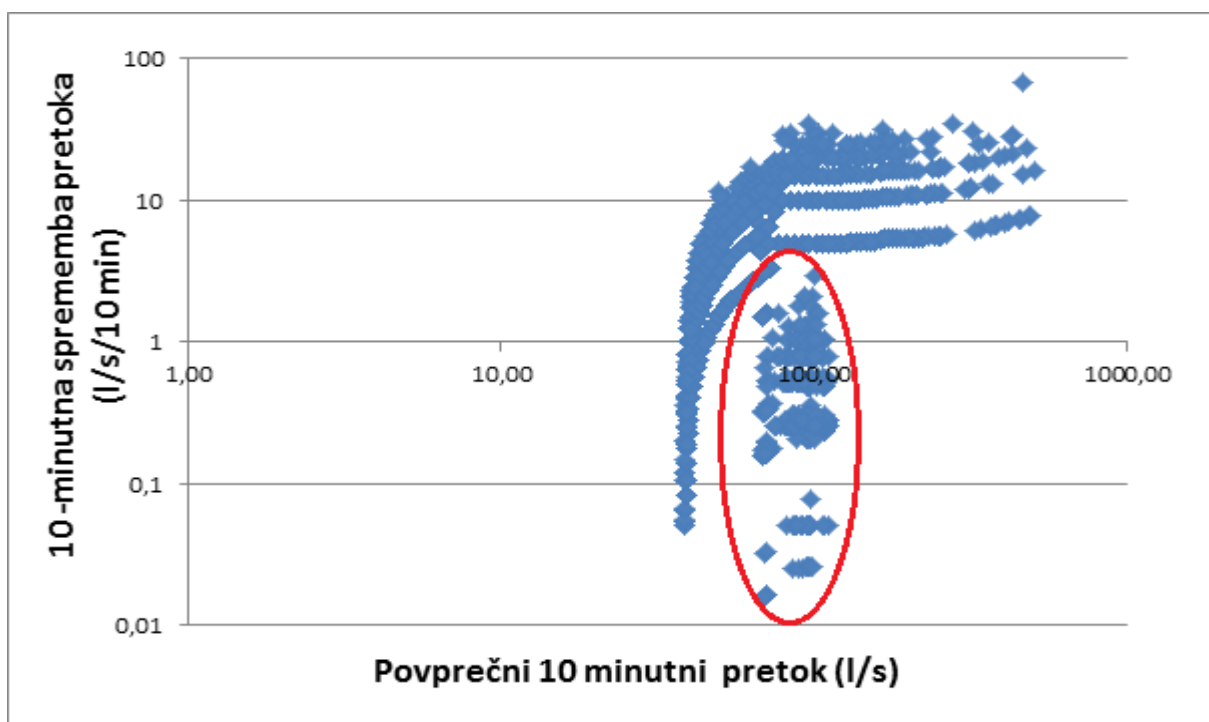
V prvem delu analize smo filtrirali podatke in s tem izločili obdobja, ki so pod vplivom padavin in pretoke v dnevnem času. Evapotranspiracija ima močan vpliv v dnevnem času, ko je sončno sevanje največje, zato iz nadaljnje analize izvzamemo pretoke čez dan in upoštevamo le meritve v nočnem času. Oblika krivulje upadanja se med letnimi časi razlikuje, kot je bilo omenjeno že v poglavju 4.1. Glede na letni čas je priporočljivo izdelati krivuljo upadanja pretoka posebej za poletno in zimsko obdobje. V našem primeru upoštevamo pretočne meritve le v nočnem času in s tem v veliki meri izločimo vpliv sezonskosti.

Pogoji, ki smo jih izkustveno določili in morajo biti izpolnjeni za upoštevanje naših podatkov o pretoku:

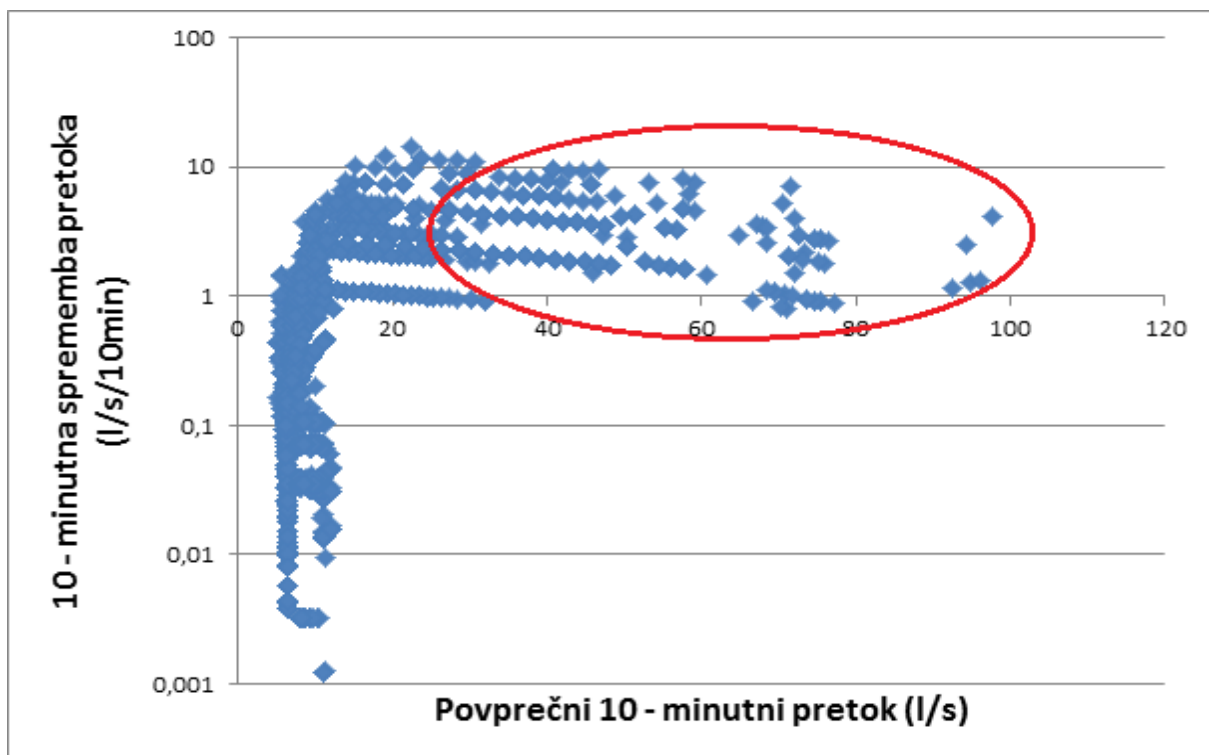
1. V preteklih šestih urah mora biti manj kot 1 mm padavin: $\text{sum preteklih } 6 \text{ ur} < 1 \text{ [mm]}$.
2. V prihodnjih dveh urah mora biti manj kot 1 mm padavin: $\text{sum prihodnjih } 2\text{h} < 1 \text{ [mm]}$.
3. Da se znebimo sezonskosti, upoštevamo samo nočni čas (19:00 - 7:00), ko je evapotranspiracija praktično zanemarljiva.

Ob upoštevanju vseh kriterijev in izločitvi podatkov dobimo deset-minutne spremembe pretoka ter povprečne desetminutne pretoke, kar uporabimo nadalje v analizi.

Graf je splošen prikaz recesijskega obnašanja. Upadanje toka ocenimo kot razliko dveh sosednjih desetminutnih pretokov.



Graf 3: Prikaz spremembe pretoka v porečju Mačkov graben

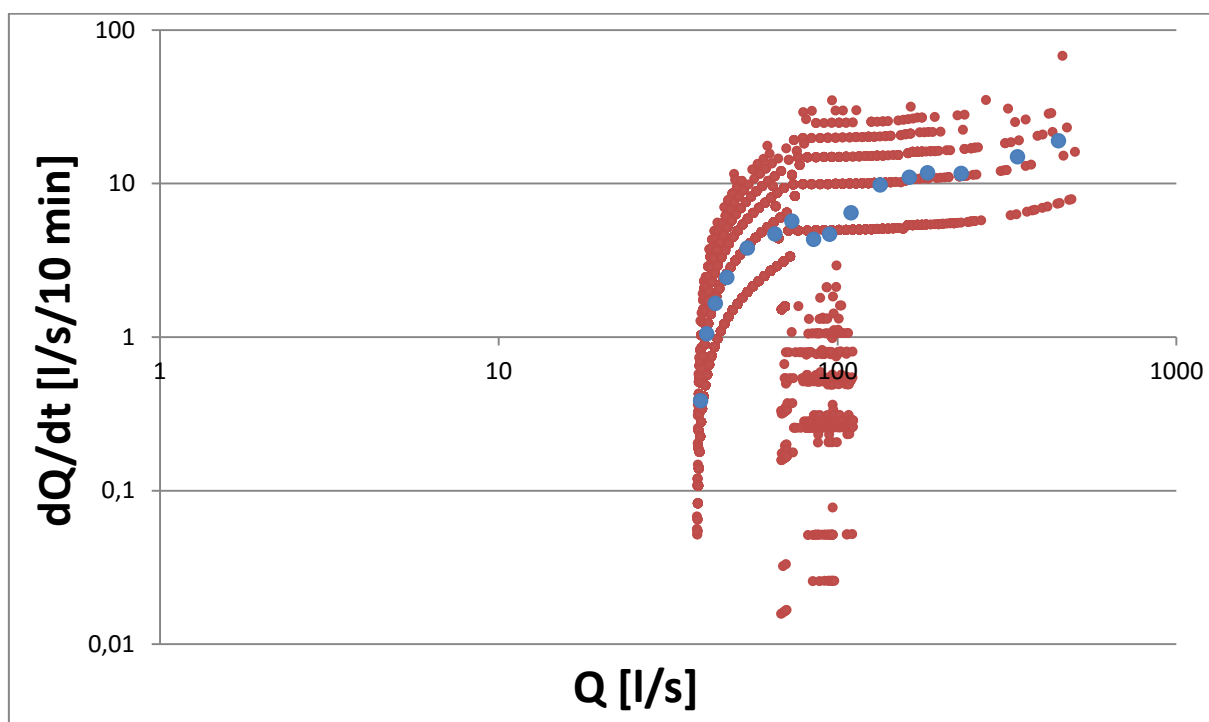


Graf 4: Prikaz spremembe pretoka v porečju Kuzlovec

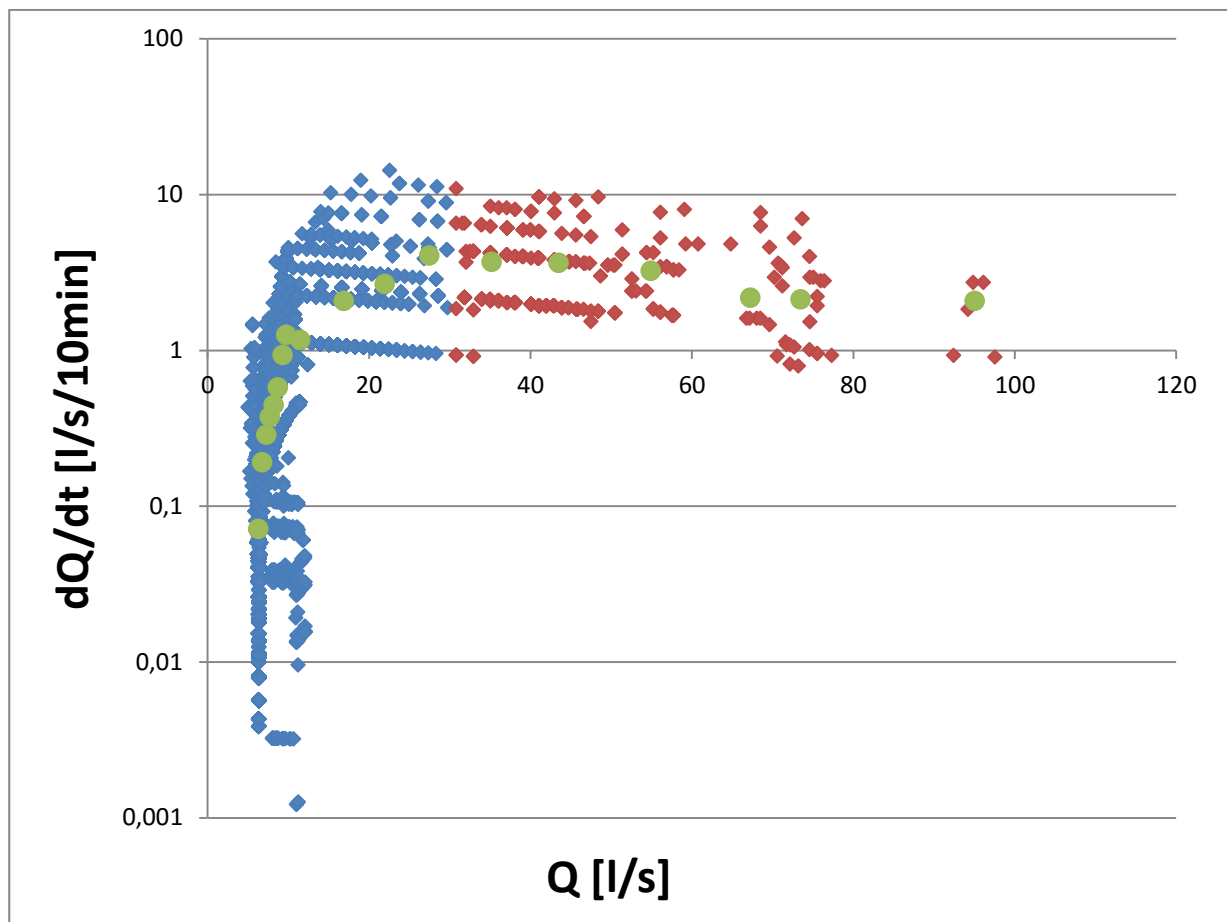
Raztros podatkov (graf 3) pri pretoku 100 l/s je posledica motenj v pretoku, predvidevamo da to povzročijo težave pri delovanju tlačne sonde.

Pri porečju Kuzlovec imamo težave (graf 4), saj se v določeni točki z naraščanjem pretokov (rdeč krog na grafu 4), začne zmanjševati sprememba pretoka, kar ni smiselno. Do te težave pride zaradi nizkega števila podatkov o visokih pretokih. Le ti imajo velik vpliv na samo povprečje podatkov, zato jih izločimo iz analize.

Podatke razdelimo v razrede, ki se razlikujejo glede na velikost in število vrednosti pretokov. Tako dobimo za Mačkov graben 16 razredov, za Kuzlovec pa 18 razredov. Glede na razrede je razpon podatkov porečja Mačkov graben od 40 do 510 l/s, porečja Kuzlovec pa precej manjši, to je od 6 do 100 l/s. Prav tako ni omejenega in določenega števila podatkov v posameznem razredu. Z višanjem pretoka se število podatkov v posameznem razredu manjša. Tako imamo v enem razredu tudi do 1500 podatkov, v razredu z največjim pretokom pa le 5 podatkov. Znotraj posameznega razreda izračunamo srednji pretok ter povprečno desetminutno spremembo znotraj intervala.

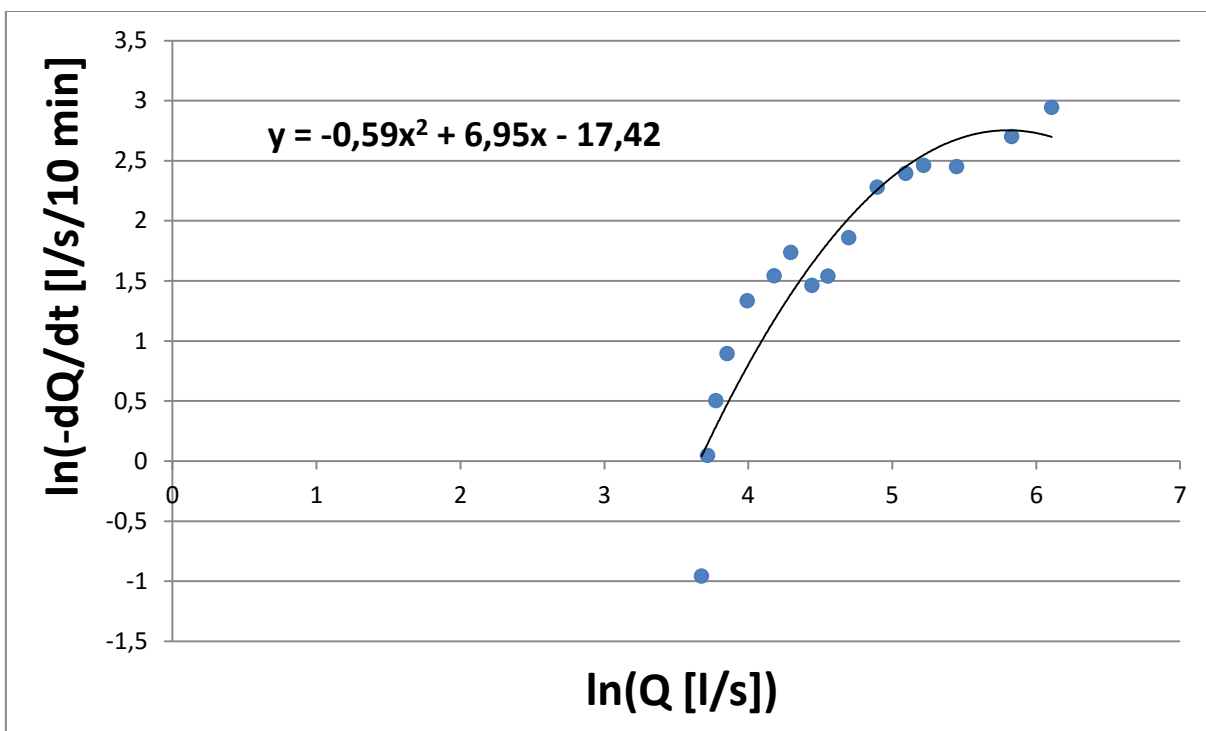


Graf 5: Srednji pretok ter povprečna deset-minutna sprememba znotraj intervala na porečju Mačkov graben

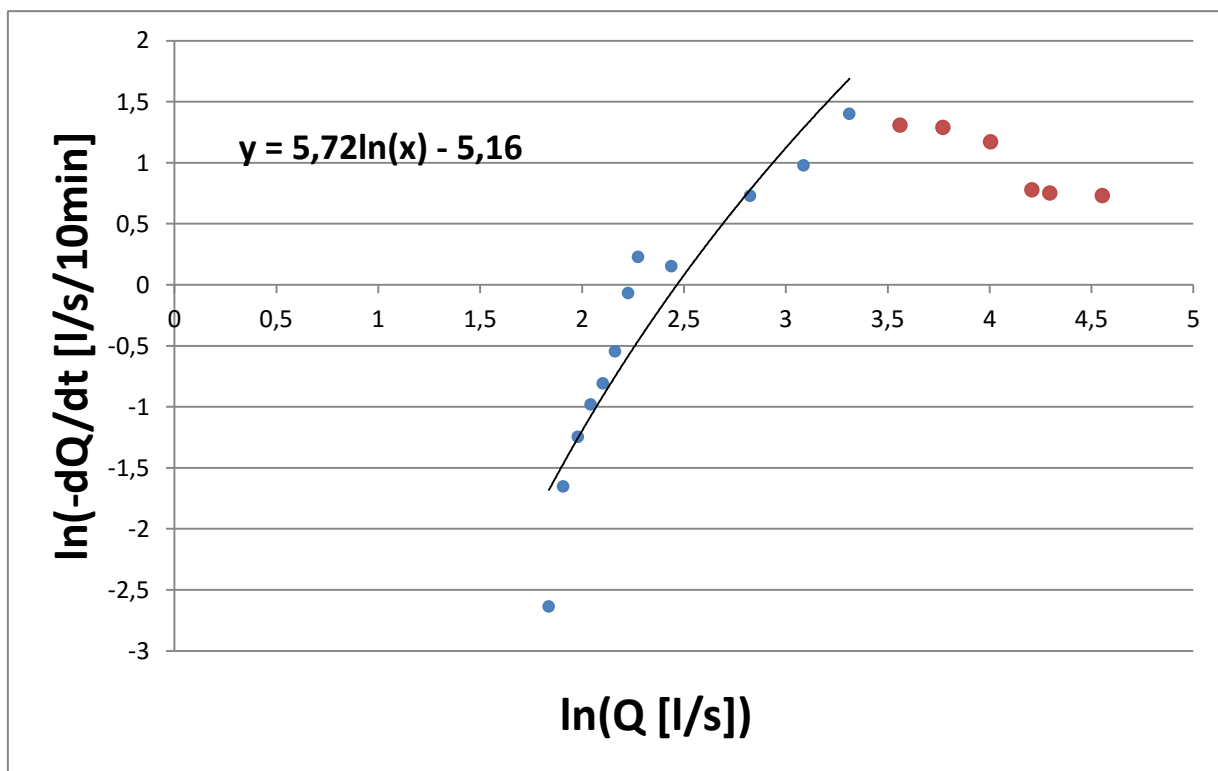


Graf 6: Srednji pretok ter povprečna deset-minutna sprememba znotraj intervala na porečju Kuzlovec

Krivulja upadanja (graf 7, graf 8) je pomembno orodje za predpostavljjanje oblike zveze med zalogo vode prispevne površine in pretokom ali za določanje odzivnostne funkcije porečja. Da zmanjšamo raztros točk, ki prikazujejo posamezne razrede pretokov, so vrednosti podane v obliki naravnega logaritma.



Graf 7: Krivulja upadanja porečja Mačkov graben



Graf 8: Krivulja upadanja porečja Kuzlovec

Dobimo odzivnostni funkciji za vsako izmed porečij, ki odražata odziv pretoka na spremembe v zalogi vode v porečju. Funkciji opišemo z naslednjima enačbama:

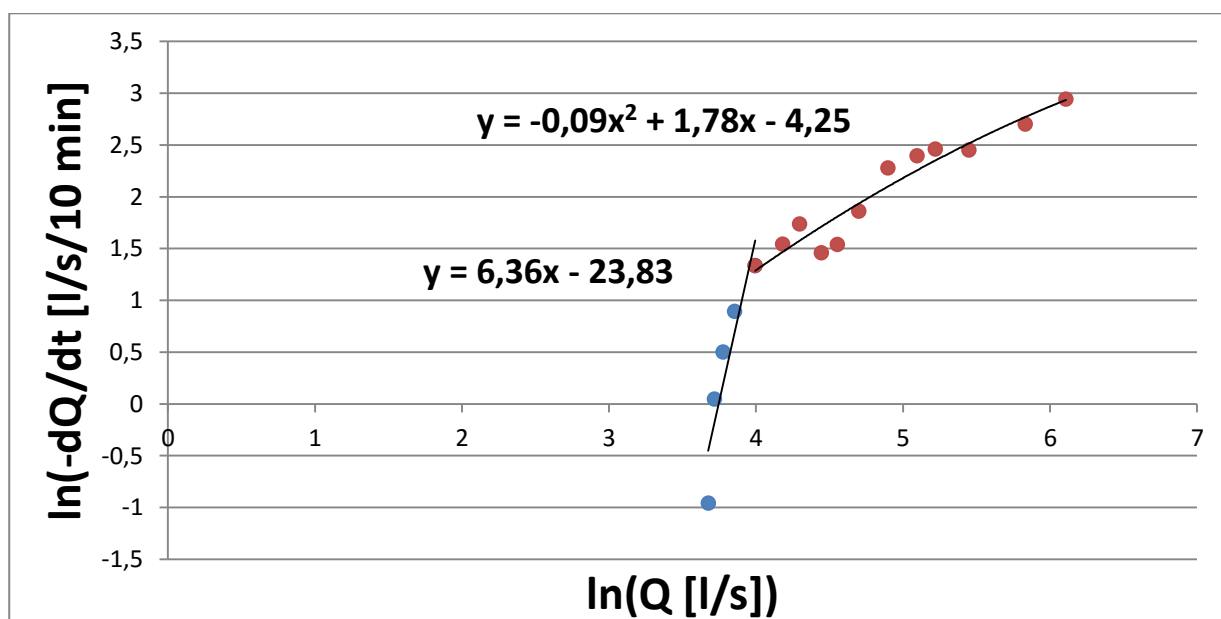
$$\text{Mačkov graben: } g1(Q) = -0,59x^2 + 6,95x - 17,42 \quad (11)$$

$$\text{Kuzlovec: } g2(Q) = 5,72\ln(x) - 5,16 \quad (12)$$

Podatke, ki so obarvani z rdečo (graf 8) ne upoštevamo v analizi, saj se krivulja obrne navzdol, kar ni logično ne smiselno, da bi se z naraščanjem pretokov sprememba pretoka začela zmanjševati. To težavo smo omenili na prejšnjih straneh pri ugotavljanju upadanja toka (graf 3, graf 4). Strmejši naklon krivulje je pokazatelj hitrejšega spreminjanja nizkih pretokov.

Kljub pridobljenim funkcijam je zelo težko določiti obnašanje porečja le z eno samo funkcijo. V grafu vidimo, da pride do preloma, saj se v začetnem delu (gledano od manjših vrednosti na x osi proti večjim) pri majhnih pretokih časovna sprememba pretoka hitro zmanjšuje. V nadaljevalnem delu pa z večanjem pretoka narašča tudi časovna sprememba pretoka. Zato se odločimo, da bomo funkcijo razdelili na dva dela, območje manjših pretokov opišemo z linearno funkcijo, kjer časovne spremembe pretoka vizualno hitreje naraščajo. V nadaljevanju, kjer se pretok počasneje spreminja pa opišemo z najbolje priliegajočo funkcijo (graf 9, graf 10).

Tako obravnavana porečja opišemo s sestavljeno funkcijo.

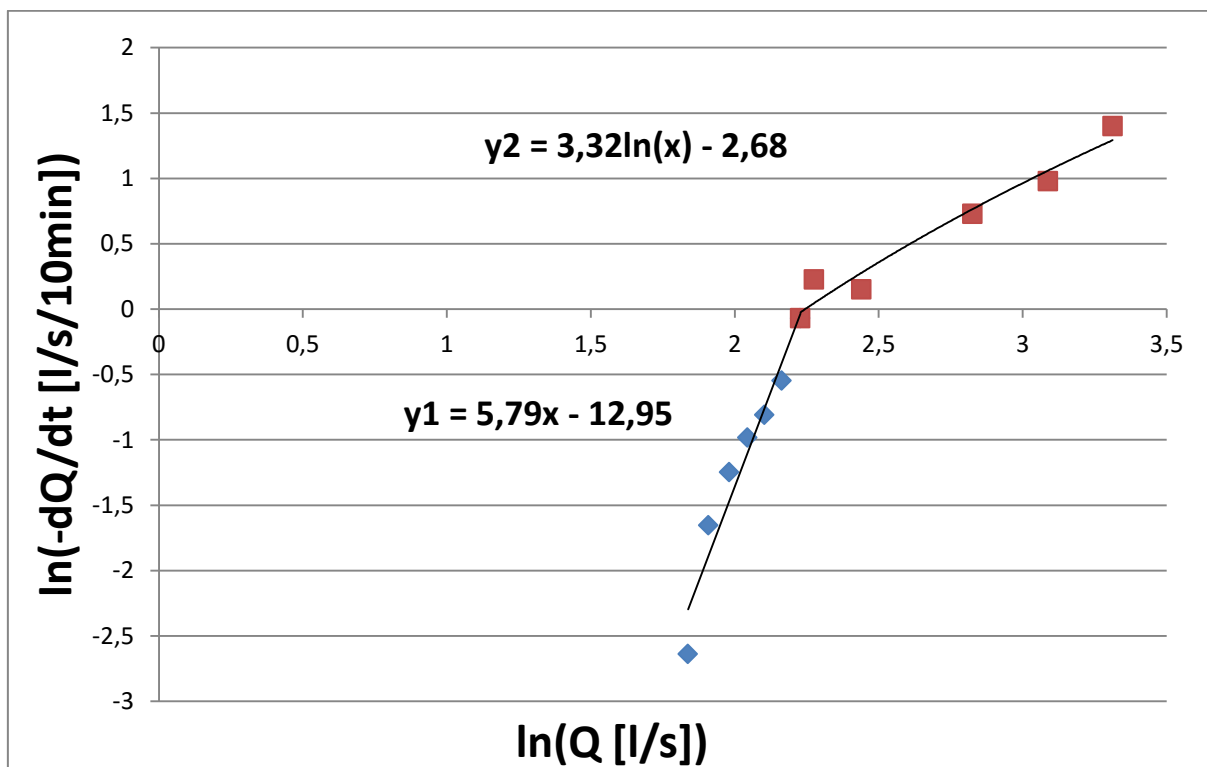


Graf 9: Sestavljena odzivnostna funkcija porečja Mačkov graben

Do pretoka 54 l/s opišemo obnašanje porečja Mačkovega grabna (graf 9) z linearno funkcijo, naprej do pretoka 450 l/s pa s kvadratno funkcijo.

$$g1.1(Q) = 6,36x - 23,83 \quad (13)$$

$$g1.2(Q) = -0,09x^2 + 1,78x - 4,25 \quad (14)$$



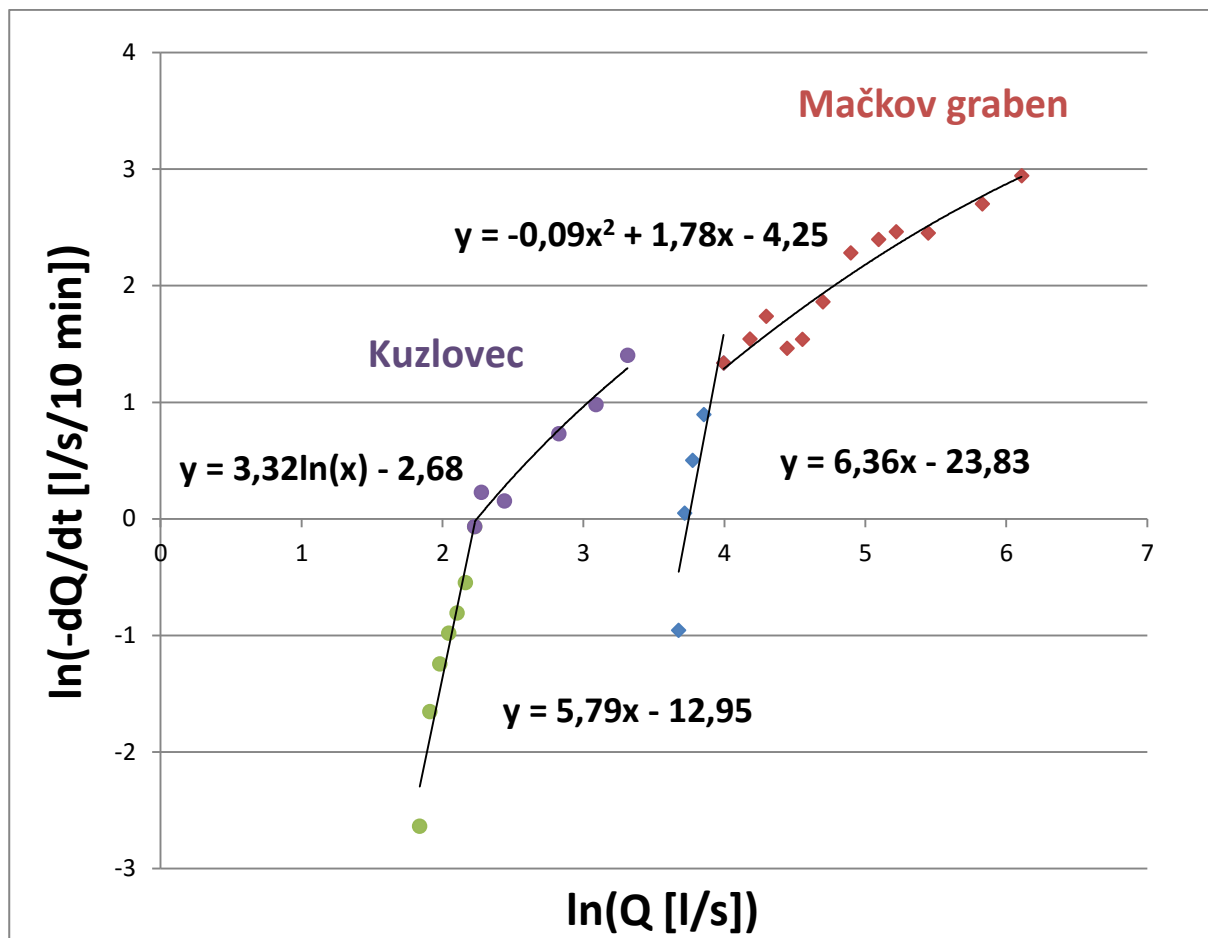
Graf 10: Sestavljena odzivnostna funkcija porečja Kuzlovec

Obnašanje porečja Kuzlovca (Graf 10) v prvem delu, do pretoka 9,28 l/s opišemo z linearno funkcijo, drugi del do pretoka 95 l/s pa z logaritemsko funkcijo.

$$g2.1(Q) = 5,79x - 12,95 \quad (15)$$

$$g2.2(Q) = 3,32\ln(x) - 2,68 \quad (16)$$

Za hudourniški območji so značilni visoki vrhovi, strma pobočja in obilne padavine, kar se odraža v hitrem naraščanju vodostajev in posledično v hudourniškem odzivu, saj sta oba potoka hudourniškega značaja.



Graf 11: Odzivnosti funkciji za oba porečja

Kuzlovec ima manjše prispevno območje in nižje pretoke v primerjavi s porečjem Mačkov graben, prav tako je tudi naklon struge večji za približno dvakrat. Posledično je tudi krivulja upadanja nekoliko bolj strma in se drugače odziva, kar smo tudi pričakovali. Iz grafa (graf 11) je razvidno, da časovne spremembe pretoka porečja Kuzlovec naraščajo hitreje kot pri Mačkovem grabnu, kar kaže na to, da tudi praznjenje in polnjenje celotne zaloge vode v samem porečju Kuzlovca poteka nekoliko hitreje.

7. ZAKLJUČEK

Recesijska krivulja oz. krivulja upadanja opisuje, kako zaloga vode (različnih oblik) in raznoliki procesi v porečju, vplivajo na odtok. Krivulja upadanja vsebuje pomembne informacije o prispevnem deležu podzemnih virov k odtoku in s tem tudi o dinamiki in karakteristikah podtalnice. Njena uporaba je možna v različnih dejavnostih urejanja in gospodarjenja z vodami. Prav tako, je lahko koristna za pomembnejše analize. Posreduje nam informacije o tem, kolikšna je zaloga vode v prispevni površini, karakteristike vodonosnika in kako se vodotok napaja iz svojega zaledja. Poznavanje podatkov o minimalnih pretokih lahko uporabimo za namakanje v kmetijstvu, preskrbi z vodo, pri uporabi numeričnih modelov (zveza med padavinami in odtokom) ter uporabi v energetske namene. Za naklon krivulje upadanja je značilna velika spremenljivost, ravno zaradi tega je težko poiskati najbolj primerno metodo za časovno določitev upadanja pretokov, katere dobimo iz niza merjenih podatkov.

V diplomski nalogi so predstavljene obstoječe klasične metode krivulje upadanja pretoka, katere so uporabne za opisovanje ter razumevanje dinamike upadanja pretokov. Za oblikovanje recesijske krivulje si pomagamo z različnimi pristopi, kjer iščemo funkcijo Q_t , ki se najbolje prilega krivulji. Skozi zgodovino so se tudi postopki analize krivulje upadanja spreminjali. V začetku so krivuljo upadanja opisovali z linearno funkcijo, kjer je krivulja imela obliko enostavne eksponentne enačbe. Nato so uporabili drug način, za opis krivulje so predlagali nelinearno zvezo med časom in pretokom ter jo opisali z dvojno eksponentno enačbo. Za tem so se razvile mnoge empirične enačbe. Vendar se je izpostavilo da je v predhodnih analizah premalo pozornosti posvečeno motečim učinkom evapotranspiracije, ki pa znatno vplivajo na naklon krivulje upadanja. To pa je prednost nove metode upadanja pretoka metoda – odzivnostne funkcije porečja, ki jo ocenimo iz krivulje upadanja pretoka. Ta pristop vodi do kvantitativne ocene skladiščene vode na prispevnem območju časovnega upadanja pretoka in odzivnost na padavine, kar lahko uporabimo za karakterizacijo povodja. Tako lahko dobimo nelinearno diferencialno enačbo, ki povezuje osnovne komponente bilance vode v porečju, padavine, evapotranspiracijo ter odtok. Le ta se nato lahko uporabi za simuliranje celotnega spektra hidroloških pogojev z upoštevanjem padavin in padavinskih izgub. Z novim pristopom ponazorimo, kako lahko uporabimo časovno zaporedje spremenljivosti vodnega toka za razlago povezave med zalogo vode v porečju in pretokom v strugi vodotoka. Nov pristop smo uporabili v praksi na izbranih porečjih hudournikov Mačkov graben in Kuzlovec.

V analizi obeh porečij smo zajeli eno letni niz podatkov. Iz obeh hidrogramov (graf 1, graf 2) so razvidna relativno velika nihanja v pretoku, kar kaže na hudourniški odziv in nagli odziv na

padavinske dogodke. Izločeni so podatki v obdobju, ki so pod vplivom padavin in pretoki v dnevnem času, saj smo želeli doseči čim manjši vpliv evapotranspiracije in s tem zanemariti sezonskost. Posledično ni bilo potrebno izdelati dveh krivulj za zimsko in poletno obdobje. V sami izvedbi analize nas zanima, kako hitro se spreminja pretok z naraščanjem pretoka, kar prikažemo v grafih (graf 3, graf 5). Zaradi motenj v pretoku imamo na porečju Mačkov graben velik raztros podatkov. Na težave naletimo pri porečju Kuzlovec, saj se v določeni točki z naraščanjem pretokov, začne zmanjševati sprememba pretoka, kar ni smiselno. Do te težave pride zaradi nizkega števila podatkov o visokih pretokih. Le ti imajo velik vpliv na samo povprečje podatkov, zato jih izločimo iz analize. To bi lahko rešili, če bi imeli večji niz podatkov (daljše obdobje).

Za hudourniški območji so značilni visoki vrhovi, strma pobočja in obilne padavine, kar se odraža v hitrem naraščanju vodostajev in posledično v hudourniškem odzivu, saj sta oba potoka hudourniškega značaja.

Kuzlovec ima manjše prispevno območje in nižje pretoke v primerjavi z porečjem Mačkov graben, prav tako je tudi naklon struge večji za približno dvakrat. Posledično je tudi krivulja upadanja bolj strma in se drugače odziva, kar smo tudi pričakovali. Iz grafa (graf 11) je razvidno, da časovne spremembe pretoka porečja Kuzlovec hitreje naraščajo kot pri Mačkovem grabnu, kar kaže na to, da tudi praznjenje in polnjenje celotne zaloge vode v samem porečju poteka hitreje.

Iz dobljenih funkcij lahko predvidimo obnašanje porečja in pridobljeno funkcijo uporabimo pri napovedovanju minimalnih, nizkih ter sušnih pretokov. Le te pa uporabimo za napovedovanje razpoložljivih količin za oskrbo z vodo, uporabi v energetske namene na itd. Prav tako lahko funkciji nadalje uporabimo za karakterizacijo porečja in za simuliranje celotnega spektra hidroloških pogojev.

Prednost odzivnostne funkcije je ta, da ne upoštevamo razlik med baznim in površinskim odtokom, ampak obravnavamo praznjenje porečja kot stalnico hidrološkega obnašanja. Zato ni bilo potrebno ločevanje hidrograma na posamezne komponente, kar naredi analizo splošno in preprosto. Z novo metodo v nasprotju s klasičnimi metodami analize upadanja pretoka ni določene funkcionalne oblike odnosa med zalogo vode in pretokom, namesto tega smo z novim pristopom določili funkcionalno obliko neposredno iz podatkov o pretoku.

VIRI

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2015. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij; Kuzlovec in Mačkov graben. Acta Hydrotechnica 26, 45: 13

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik, 1.izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Brodie, R., Baskaran, S., Hostetler, S. 2007. Tools for assessing groundwater-surface water interactions: a case study in the Lower Richmond catchment. NSW, Bureau of Rural Sciences, Canberra: 134 str.

Brodie, R.S., Hostetler, S. 2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs: 13 str.

Horvat, A. 2014. Primerjava metod izločanja baznega odtoka in analiza visokovodnih valov v Sloveniji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Horvat): 85 str.

Kirchner, J. W. 2008. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. Water resources reseearch: 34 str.

Kovačič, T. 2012. Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kovačič): 93 str.

Lacey, G. C. 1996. Relating baseflow to catchment properties. A scaling approach. Report 96/8. Cooperative research centre for catchment hydrology: 51 str.

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, J., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje. Acta Hydrotechnica 20/32: 323 str. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 22. 5. 2016.)

Petek, M. 2014. Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba M. Petek): 68 str.

Pugelj, A. 2012. Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Pugelj): 98 str.

Riggs, H. C. 1964. The Base-flow Recession Curve as an Indicator of Ground Water. International Association of Scientific Hydrology 63: 352-363.

Rusjan, S., Mikoš, M. 2015. A catchment as a simple dynamical system: Characterization by the streamflow component approach. Journal of Hydrology 527 (2015) 794-808: 15 str.

Smakhtin, V. U. 2001: Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147-186: 41 str.

Tallaksen, L.M. 1995. A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology 165: 349–370: 22 str.

Žogan, A. 2013. Analiza nizkih pretokov vodotokov porečja Ljubljanice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba A. Žogan): 88 str.