

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 ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA

Kandidatka:

ANJA PUGELJ

**ANALIZA VISOKOVODNIH VALOV SAVE V
ŠENTJAKOBU**

Diplomska naloga št.: **182/VKI**

WATER WAVE ANALYSIS OF SAVA IN ŠENTJAKOB

Graduation thesis No.: **182/VKI**

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 26. 3. 2012

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Anja Pugelj izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, dne 28. 2. 2012

Anja Pugelj

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 532.5(497.4)(627.152Sava)(043.2)
Avtor: Anja Pugelj
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj
Somentor: prof. dr. Mitja Brilly
Naslov: Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu
Obseg in oprema: 98 str., 19 pregl., 62 sl., 44 en.
Ključne besede: hidrogram, površinski odtok, bazni odtok, volumen vala, konica pretoka, trajanje, visokovodni val

Izvleček:

Namen diplomske naloge je predstaviti teoretične osnove hidrograma ter grafične metode izločanja baznega odtoka na hidrogramu. Praktični del zajema analizo visokovodnih valov na vodotoku Sava v Šentjakobu.

V diplomskem delu je najprej predstavljen hidrogram, njegove komponente, značilnosti in parametri. Predstavljena je tudi vloga oblike hidrograma, ki je enako pomembna za izvajanje učinkovitega upravljanja z vodnimi viri kot ostale značilnosti hidrograma visokovodnega vala. Sledi poglavje o baznemu odtoku, njegova predstavitev, značilnosti in statistična analiza karakteristik baznega odtoka. Pri statistični analizi je poudarek na indeksu baznega odtoka, ki zagotavlja pravilnost ocene deleža baznega odtoka, ki prispeva k celotnemu volumnu dogodka. Začetni bazni odtok je lahko tudi indikator volumna odtoka ter vpliva na velikost površinskega volumna. Opisane so različne grafične metode izločanja baznega odtoka na enostavnem in kompleksnem hidrogramu. V praktičnem delu naloge je predstavljena analiza visokovodnih valov. Za izbrano hidrološko postajo in daljše obdobje meritev, smo s tremi grafičnimi metodami izločanja baznega odtoka določili konico, volumen in trajanje visokovodnega vala. Za vse tri primere izločanja baznega odtoka smo naredili analizo odnosov med vsemi tremi spremenljivkami visokovodnega vala ter poskušali kritično analizirati vpliv izbire različnih grafičnih metod izločanja baznega odtoka na ta razmerja.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 532.5(497.4)(627.152Sava)(043.2)
Author: Anja Pugelj
Supervisor: doc. dr. Mojca Šraj
Cosupervisor: prof. dr. Mitja Brilly
Title: Water wave analysis of Sava in Šentjakob
Notes: 98 p., 19 tab., 62 fig., 44 eq.
Key words: hydrograph, streamflow, baseflow, flood volume, peak flow, duration, flood wave

Abstract:

Graduation thesis presents theoretical hydrograph basis and graphical separation methods. The practical part includes water wave analysis on river Sava in Šentjakob.

In the first part the hydrograph, its components, characteristics and parameters are presented. The presented shape of hydrograph is equally important for water management projects as any other characteristic parameters of the hydrograph. There is also the explanation of base flow, its presentation and characteristics. The most important statistical base flow characteristic is the event base flow index, which provides a means to assess base flow contributions to stream flow events. Initial base flow is also as an index to runoff volume. Furthermore, graphical methods of base flow separation on simple and complex hydrographs are listed and described. The following narrative describes water wave analysis of Sava in Šentjakob. For the selected hydrological station and longer time period, main water wave parameters were determined: peak, volume and duration. Associations among water wave characteristics and impact of each addressed graphical methods of base flow separation on those relationships were analysed.

ZAHVALA

Iz srca se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in prof. dr. Mitji Brilly-ju za vse strokovne nasvete in velikodušno vsestransko pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Prav tako se zahvaljujem Agenciji republike Slovenije za okolje za posredovane podatke na merilni postaji Šentjakob na vodotoku Sava.

Zahvalila bi se tudi družini, fantu in prijateljem, ki so me v času študija podpirali in mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 HIDROGRAM ODTOKA	3
2.1 Značilnosti hidrograma.....	3
2.2 Komponente hidrograma	3
2.3 Parametri hidrograma	5
2.3.1 Pretoki.....	5
2.3.2 Višine.....	7
2.3.3 Časi.....	7
2.3.4 Volumni.....	9
2.3.5 Koeficienti	12
2.3.6 Razmerja.....	13
2.4 Standardiziran hidrogram	15
2.5 Oblika hidrograma.....	16
2.5.1 Klasifikacija oblike hidrograma	17
2.5.2 Oblika baznega hidrograma.....	18
3 BAZNI ODTOK.....	20
3.1 Predstavitev baznega odтока	20
3.2 Značilnosti baznega odтока	21
3.3 Statistična analiza karakteristik baznega odтока	23
3.4 Začetni bazni odток kot indikator volumna odтока	24
3.5 Upoštevanje volumna baznega odтока	25
3.6 Metode izločanja baznega odтока.....	26
3.6.1 Predstavitev grafičnih metod in osnovnih pojmov	27
3.6.1.1 Razmejitevna črta	28
3.6.1.2 Prevojna točka	29

3.6.1.3 Recesijska krivulja	30
3.6.2 Grafične metode izločanja baznega odtoka s prelomljeno črto	32
3.6.3 Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno črto	35
3.6.4 Grafična metoda izločanja baznega odtoka s sestavljeno recesijsko krivuljo	38
3.6.5 Vključenost analitičnih algoritmov v grafične metode	40
3.6.6 Izločanje baznega odtoka na kompleksnih hidrogramih	40
3.6.6.1 Osnovni principi izločanja baznega odtoka na kompleksnih hidrogramih.....	40
3.6.6.2 Neodvisnost zaporednih konic visokovodnega vala.....	44
3.6.6.3 Poenostavljena ekstrapolacija dveh zaporednih konic pretoka visokovodnega vala	44
4 ANALIZA VISOKOVODNIH VALOV SAVE V ŠENTJAKOBU	46
4.1 Vhodni podatki	46
4.1.1 Izbira ustreznih podatkov	47
4.1.2 Izbira visokovodnega vala.....	50
4.1.3 Kontrola neodvisnosti konic oz. določitev obsega vala	51
4.2 Izločanje baznega odtoka s tremi izbranimi grafičnimi metodami	53
4.2.1 Izločanje baznega odtoka z metodo 1 (kombinacija tro-točkovne metode in razdalje N).....	54
4.2.2 Izločanje baznega odtoka z metodo 3 (tro-točkovna metoda).....	56
4.2.3 Izločanje baznega odtoka z metodo 4 (dvo-točkovna metoda)	58
4.3 Določanje osnovnih značilnosti visokovodnih valov za vse tri primere izločanja baznega odtoka...	60
5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV	62
5.1 Vpliv spreminjanja mejne vrednosti pretoka na parametre visokovodnega vala	62
5.3. Analiza parametrov V_p , T_t in $Q_{p, \max}$ visokovodnih valov	67
5.3.1 Analiza parametrov visokovodnih valov dobljenih z metodo 1	67
5.3.2 Analiza parametrov visokovodnih vala dobljenih z metodo 3	72
5.3.3 Analiza parametrov visokovodnih valov dobljenih z metodo 4.....	75
5.3.4 Analiza ekstremnih visokovodnih valov	79
5.4 Primerjava rezultatov dobljenih po različnih grafičnih metodah izločanja baznega odtoka	82

5.4.1 Primerjava volumnov visokovodnih valov	83
5.4.2 Primerjava časovnih trajanj visokovodnih valov	85
5.4.3 Primerjava konic površinskega pretoka visokovodnih valov	87
5.4.4 Primerjava povprečnih koeficientov in razmerij parametrov visokovodnih valov	90
6 ZAKLJUČEK	92
VIRI	94

KAZALO SLIK

Slika 1: Komponente tipičnega hidrograma.....	4
Slika 2: Čas zakasnitve T_p in čas koncentracije T_c na hidrogramu	8
Slika 3: Čas trajanja T_t visokovodnega vala.....	9
Slika 4: Komponente visokovodnega vala	10
Slika 5: Primer standardiziranega hidrograma	15
Slika 6: Vpliv oblike povodja na obliko hidrograma	17
Slika 7: Shematičen prikaz različnih oblik hidrograma	18
Slika 8: Bazni odtok	20
Slika 9: Prikaz statističnih značilnosti baznega odtoka na hidrogramu	23
Slika 10: Bazni odtok kot kazalec zveze med padavinami in odtokom	25
Slika 11: Zanimljiv in pomemben volumen baznega odtoka	26
Slika 12: Dve ekstremni obliki baznega toka v vodotoku.....	27
Slika 13: Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno in s prelomljeno črto.....	28
Slika 14: Prevojna točka.....	29
Slika 15: Iskanje določitve prevojne točke.....	29
Slika 16: Recesijske krivulje	30
Slika 17: Grafična Metoda 1 za izločanje baznega odtoka	32
Slika 18: Razdalja N na hidrogramu	33
Slika 19: Grafična metoda 2 za izločanje baznega odtoka.....	33
Slika 20: Konkavna metoda za izločanje baznega odtoka	34
Slika 21: Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno črto	35
Slika 22: Grafična metoda 4 za izločanje baznega odtoka.....	35
Slika 23: Metoda konstantnega pretoka za izločanje baznega odtoka	36
Slika 24: Metoda konstantnega naklona (1) za izločanje baznega odtoka	37
Slika 25: Metoda konstantnega naklona (2) za izločanje baznega odtoka	37
Slika 26: Grafična metoda izločanja baznega odtoka s krivuljo	38
Slika 27: Metoda 7 za izločanje baznega odtoka	39
Slika 28: Wittenbergova metoda	39
Slika 29: Metoda 1-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu	41
Slika 30: Metoda 2-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu	41
Slika 31: Metoda 3-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu	42
Slika 32: Primeri izločanja baznega odtoka s konstantno k-metodo.....	43

Slika 33: Odvisni zaporedni konici visokovodnega vala.....	44
Slika 34: Metoda izločanja baznega odtoka dveh zaporednih konic pretoka visokovodnega vala	45
Slika 35: Merilno mesto: Sava-Šentjakob	46
Slika 36: Prikaz urnih in srednjih dnevni vrednosti pretokov visokovodnega vala.....	48
Slika 37: Primer grafičnega pregleda pretokov za leto 1989.....	51
Slika 38: Primer dveh neodvisnih konic hidrograma	52
Slika 39: Primer odvisnih konic hidrograma.	53
Slika 40: Prikaz metode 1 na hidrogramu 1962	54
Slika 41: Prikaz metode 3 na hidrogramu 1963	56
Slika 42: Prikaz metode 4 na hidrogramu 1964	58
Slika 43: Prikaz določitve mejne vrednosti pretoka na hidrogramu.....	62
Slika 44: Prikaz mejnih vrednosti na hidrogramu 1996	63
Slika 45: Spreminjanje linearnih koleracijskih koeficientov visokovodnega vala Save v Šentjakobu od leta 1991 do leta 2010	65
Slika 46: Spreminjanje povprečnega trajanja visokovodnega vala glede na mejno vrednost pretoka	66
Slika 47: Spreminjanje povprečnega volumna površinskega odtoka visokovodnega vala glede na mejno vrednost pretoka	67
Slika 48: Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 1	68
Slika 49: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 1).....	70
Slika 50: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 1)	71
Slika 51: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 1)	71
Slika 52: Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 3	72
Slika 53: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 3).....	73
Slika 54: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 3)	74
Slika 55: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 3).....	75
Slika 56 Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 4	76
Slika 57: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 4).....	77
Slika 58: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 4)	78
Slika 59: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 4).....	79
Slika 60: Kompleksni hidrogram leta 1980 (Uporabljena metoda 1).....	80
Slika 61: Kompleksni hidrogram leta 2000 (Uporabljena metoda 3).....	81
Slika 62: Enostavni hidrogram leta 2009 (Uporabljena metoda 4)	82

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava parametrov določenih z metodo 4 izločanja baznega odtoka.	48
Preglednica 2: Primerjava parametrov določenih z metodo 3 izločanja baznega odtoka.	49
Preglednica 3: Primer določitve konice visokovodnega vala za leto 1989	50
Preglednica 4: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 1	54
Preglednica 5: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 3.....	56
Preglednica 6: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 4.....	58
Preglednica 7: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 1.....	60
Preglednica 8: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 3.....	61
Preglednica 9: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 4.....	61
Preglednica 10: Izračunani Pearsonovi korelacijski koeficienti glede na izbrano mejno vrednost pretoka.	64
Preglednica 11: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnih valov pridobljenih z metodo 1.....	68
Preglednica 12: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnih valov pridobljenih z metodo 3.....	72
Preglednica 13: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnega vala pridobljenih z metodo 4	76
Preglednica 14: Prikaz parametrov ekstremnih visokovodnih valov glede na uporabljeno metodo.....	79
Preglednica 15: Razmerja volumnov med metodami.....	83
Preglednica 16: Razmerja časovnih trajanj med metodami	85
Preglednica 17: Razmerja konic površinskega pretoka med metodami	87
Preglednica 18: Povprečne vrednosti parametrov visokovodnih valov glede na uporabljeno metodo izločanja baznega odtoka	89
Preglednica 19: Povprečni koeficienti in razmerja parametrov visokovodnih valov	90

1 UVOD

Upravljanje z vodami, načrtovanje, določanje poplavnih območij, dimenzioniranje objektov na vodi ipd.. vse to zahteva temeljito poznavanje značilnosti visokovodnih dogodkov. Značilnosti visokovodnih valov so parametri naključnih dogodkov v naravi, ki so med seboj povezani. Z nadaljnjo analizo pa lahko ugotovimo resnost pojava visokovodnih valov ter tako povzamemo značilnosti dogodka in korelacije med njimi (Karmakar et al., 2007). Pri upravljanju z vodnimi viri zato ni dovolj, da poznamo podatek o konici pretoka, ampak je enako pomembno, da statistično ocenimo tudi volumen in časovno trajanje visokovodnega vala.

Površinski pretok voda, rek in jezer je skupek podzemnih in površinskih komponent. Pomembne komponente so površinski odtok, medtok, neposredne padavine v strugo in bazni odtok. Število komponent pretoka je odvisno od izbranega konceptualnega modela toka. Pogosto obravnavani komponenti toka sta površinski in bazni odtok.

Pri analiziranju visokovodnih valov hidrogram običajno predstavlja osnovno izhodišče vseh analiz. S pomočjo hidrograma se določi značilnosti visokovodnih valov in odvisnosti med njimi. Hidrogram je sestavljen iz dveh glavnih komponent, ki sta bazni odtok in nevihtni odtok. Komponento nevihtnega odtoka imenujemo površinski odtok (TTU, 2009). Hidrogram površinskega odtoka predstavlja presežek padavin v vodotoku po eliminaciji izgub. Iz značilnosti hidrograma lahko ocenimo tudi značilnosti prispevnega območja, kot je na primer oblika, naklon ter geologija območja.

Običajni, izmerjeni podatki o pretoku vodotoka, omejijo našo sposobnost ocene hidroloških simulacijskih modelov ter naš poskus globljega razumevanja pomembnosti padavinskega dogodka (Huff et al., 1976). Metode izločanja baznega odtoka naredijo podatke o pretoku bolj uporabne. Kar pomeni, da so za oceno rezultatov hidrološkega modela bolj primerni podatki o pretoku z ločenim baznim in površinskim odtokom. Razumevanje prispevka baznega odtoka k celotnemu odtoku ima veliko vlogo pri planiranju in upravljanju z vodnimi viri. Zato obstaja veliko uveljavljenih metod za razumevanje magnitude in dinamike baznega odtoka, ki jim pravimo metode izločanja baznega odtoka. Ključnega pomena je, da znamo izbrati pravo metodo izločanja baznega odtoka glede na naš cilj analize. Predvsem pa je pri izbiri potrebno upoštevati razpoložljive informacije oz. podatke.

V praktičnem delu naloge, smo za petdesetletno obdobje, s tremi izbranimi grafičnimi metodami izločili bazni odtok in tako določili najpomembnejše parametre visokovodnih valov. Parametre, kot so konica, volumen in trajanje visokovodnega vala, smo nato analizirali in raziskali razmerja med njimi. Zadnji del vključuje primerjavo rezultatov dobljenih po različnih grafičnih metodah izločanja baznega odтока

2 HIDROGRAM ODTOKA

Diagram časovnih sprememb pretoka v vodotoku imenujemo hidrogram. Po pojavu večjih padavin začne pretok vode v vodotoku naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato postopoma upade. (Brilly in Šraj, 2005).

2.1 Značilnosti hidrograma

Geometrijska oblika hidrograma prikazuje povezavo med pogojenimi dejavniki dogodka visokovodnih valov in dejavniki, ki so posledica vplivov. Dejavniki so podani z obliko naraščajočega in upadajočega dela hidrograma. Lahko rečemo, da je oblika hidrograma posledica fizikalno-geografskih pogojev in padavin (Brilly in Šraj, 2005). Hidrogram je navzgor omejen z maksimalnim pretokom. Njegovi parametri so povezani s točkami, razdaljami in površinami. Iz hidrograma parametre odčitamo ali izračunamo (Pandi, 2010).

Hidrogram analiziramo s funkcijo:

$$Q = f(T) \tag{1}$$

Kjer je:

- T časovno trajanje hidrograma [dni],
- Q pretok hidrograma.

2.2 Komponente hidrograma

Komponente baznega odtoka se določi s pomočjo trenda upadajočega dela hidrograma pred in po nevihti (Frohlich et al., 1994).



Slika 1: Komponente tipičnega hidrograma (Povzeto po NPTEL, 2011)

Na sliki 1 so predstavljene bistvene komponente hidrograma, ki so (NPTEL, 2011):

1. *Naraščajoči del hidrograma:* koncentracijska krivulja predstavlja povečanje pretoka zaradi postopnega polnjenja kanalov in prispevnih površin z vodo. Z nadaljevanjem nevihte vedno več toka iz oddaljenih delov prispevnega območja doseže iztok porečja. Hkrati se s časom manjšajo padavinske izgube;
2. *Hidrogramski vrh:* vršni pretok se pojavi, ko odtoki iz različnih delov prispevnega območja istočasno prispevajo največjo količino pretoka v ustje porečja. Za večje prispevne površine velja, da se vršni pretok pojavi po koncu padavin. Časovni interval, od težišča padavin do vršnega pretoka, je v glavnem odvisen od lastnosti porečja in nevihte;
3. *Padajoči del hidrograma:* sega od prevojne točke na koncu hidrogramskega vrha in vse do začetka podzemnega toka. Predstavlja umik zadržane vode iz prispevnega območja v času zgodnejših faz hidrograma. Začetna točka recesijskega dela hidrograma (prevojna točka) je tam kjer je največja količina zadržane vode. Ker začne voda odtekati po koncu padavin, oblika padajočega dela hidrograma ni odvisna od lastnosti nevihte, ampak od lastnosti porečja. Zadrževanje vode v porečju obstaja kot:
 - površinsko zadrževanje, ki zajema površinsko nabiranje in zadrževanje v strugi,
 - zadrževanje vmesnega odtoka,
 - zadrževanje podzemnih voda oz. baznega odtoka.

2.3 Parametri hidrograma

Pri analizah visokovodnih valov analiziramo zelo različne parametre hidrograma, iz katerih poskušamo sklepati o lastnostih vala, porečja in padavinskega dogodka. Parametri so lahko povezani s pretoki, višinami, časi, volumni ali padavinami. Pri analizah pogosto določamo različna razmerja med njimi.

2.3.1 Pretoki

- *Celotni odtok (Q_t):* Predstavlja celotni pretok visokovodnega vala. Sestavljata ga dve glavni komponenti, ki sta površinski in bazni odtok.
- *Začetni celotni pretok (Q_{in}):* Ta točka predstavlja vrednost prevojnne točke naraščajočega dela hidrograma, tam kjer se začne nenadna sprememba razmerja dotoka površinskih in podzemnih voda.
- *Največji celotni pretok ($vQvk$):* Predstavlja najvišjo točko vrednosti med naraščajočim in upadajočim delom hidrograma. Pravimo mu tudi konica hidrograma ali vrh celotnega pretoka oz. hidrograma.

Hidrogramski vrh je tako podan kot največji površinski odtok in ga izračunamo na sledeči način (Yue et al., 2002):

$$vQvk = \max(Q_{si} - Q_{bi}), (i = s, s + 1, \dots, e) \quad [m^3 s^{-1}] \quad (2)$$

Da bi lahko dobili $vQvk$, moramo izračunati še Q_{bi} :

$$Q_{bi} = Q_{in} + \frac{i-s}{T_t} (Q_{fi} - Q_{in}) \quad [m^3 s^{-1}] \quad (3)$$

Kjer je:

- Q_{si} opazovana n-ta dnevna vrednost površinskega pretoka [$m^3 s^{-1}$],
- Q_{bi} n-ta dnevna vrednost baznega pretoka [$m^3 s^{-1}$],
- s začetni datum hidrograma,
- e končni datum hidrograma.

- *Končni celotni pretok (Q_{fi}):* Točka, ki predstavlja vrednost prevojnne točke na upadajočem delu hidrograma. Točka je tam kjer se površinski pretok preneha in se nadaljuje tok iz samo podzemnih voda.
- *Površinski odtok (Q_p):* Površinski odtok običajno dobimo z izločevanjem baznega odtoka. Kadar je bazni odtok enak nič, je površinski odtok enak celotnemu odtoku.

Kadar bazni odtok ne zanemarimo ali ni enak nič velja:

$$Q_{p,i} = Q_i - Q_{b,i} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (4)$$

Kjer je:

- $Q_{p,i}$ i-ti površinski pretok [$m^3 s^{-1}$],
 - Q_i celotni pretok po osi y [$m^3 s^{-1}$],
 - $Q_{b,i}$ i-ti bazni pretok [$m^3 s^{-1}$].
- *Največji površinski odtok ($Q_{p,max}$):* Vrh površinskega odtoka predstavlja točka površinskega odtoka.
 - *Bazni odtok (Q_b):* V teoriji predstavlja izcejanje površinskih voda in ne vključuje površinskega odtoka. Bazni odtok padavinskega dogodka se spreminja s časom in je rezultat analize metod izločanja baznega odtoka. Bazni odtok v prvi prevojni točki, na naraščajočem delu hidrograma, imenujemo *začetni bazni odtok ($Q_{b,0}$)*, v končni prevojni točki na upadajočem delu hidrograma, pa *končni bazni odtok ($Q_{b,e}$)*. *Vrh baznega pretoka* predstavlja bazni odtok pod celotnim vrhom hidrograma in ga označimo z $Q_{b,max}$. Obstaja veliko načinov določanja baznega odtoka. Pri izbiri načina določanja baznega odtoka upoštevamo lastnosti visokovodnega vala in nato glede na izbrano metodo izbiramo med sledečimi možnostmi določitve baznega odtoka (Pandi, 2010):
 - za vrednost baznega odtoka vzamemo vrednost začetnega pretoka:

$$Q_b = Q_{in} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (5)$$

- lahko ga izračunamo kot aritmetično sredino med začetnim in končnim pretokom:

$$Q_b = \frac{Q_{in}}{2} + \frac{Q_{fi}}{2} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (6)$$

- lahko ga izračunamo kot obteženo aritmetično sredino pretokov na razmejitveni črti hidrograma:

$$Q_b = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (7)$$

Kjer je:

- Q_i pretok na razmejitveni črti hidrograma [$m^3 s^{-1}$],
- n število upoštevanih vrednosti.

2.3.2 Višine

- *Višina (debelina) celotnega odtoka (H_t):* Izračunamo jo kot razmerje med *celotnim volumnom visokovodnega vala* V_t [m^3] in *površino prispevnega območja* A [km^2] (Bergmann et al., 1990):

$$H_t = \frac{V_t}{A} \quad [mm] \quad (8)$$

- *Višina (debelina) površinskega odtoka (H_p):* Izračunamo jo kot razmerje med *površinskim volumnom visokovodnega vala* V_p [m^3] in *površino prispevnega območja* A [km^2] (Bergmann et al., 1990):

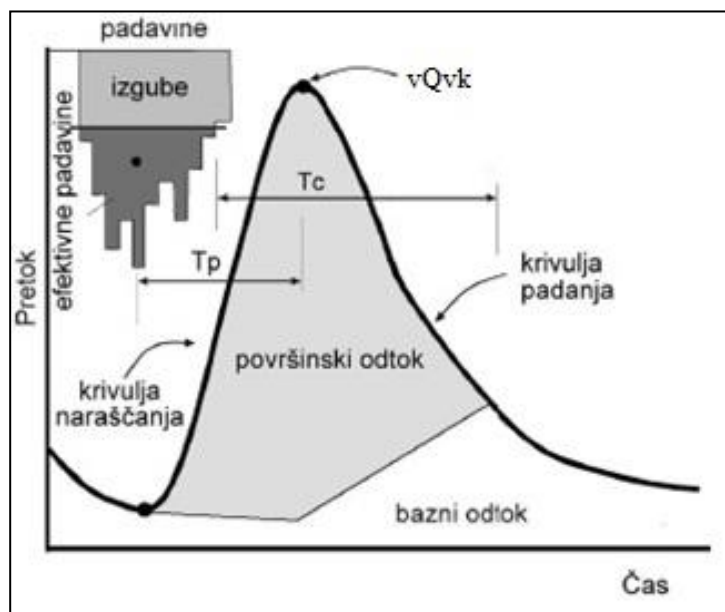
$$H_p = \frac{V_p}{A} \quad [mm] \quad (9)$$

2.3.3 Časi

- *Čas rasti (T_{gr}):* Predstavlja časovno obdobje nenadne rasti površinskega pretoka, od točke začetnega površinskega pretoka do točke celotnega vršnega pretoka. Oblika naraščajočega dela hidrograma je odvisna od značilnosti padavinskega dogodka ali od značilnosti taljenja snega ter

od značilnosti prispevnega območja. Slednje karakteristike, še posebej pobočja in pritoki, vplivajo na koncentracijo pretoka v rečnem koritu vse do prenehanja padavin.

- *Čas upadanja* (T_{des}): Predstavlja časovno obdobje upadanja površinskega pretoka, od točke največjega pretoka do točke, ko se površinski pretok konča. Oblika upadajočega dela hidrograma je posledica koncentracije pretoka na pobočju brežin in prispevka pritokov po prenehanju padavin. Zaradi koncepta regulacije ureditve območja za zaščito pred poplavami, je čas rasti krajši od časa upadanja.



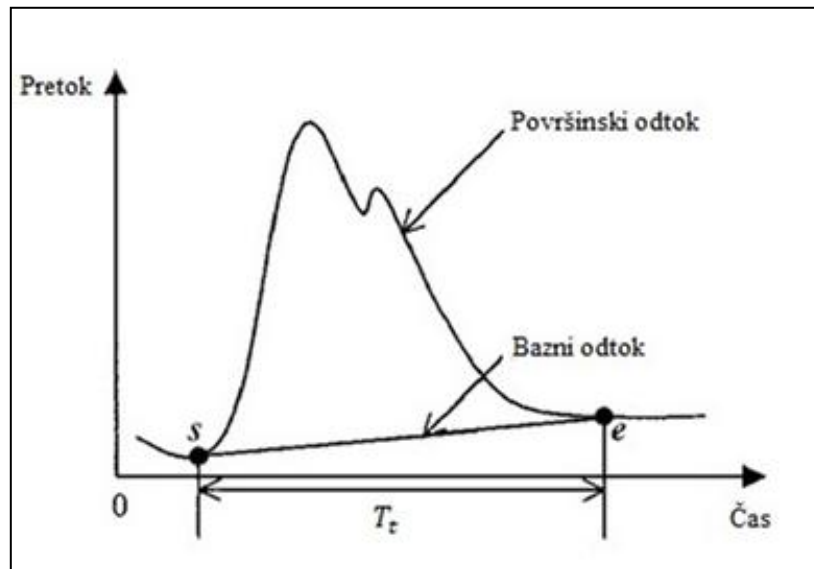
Slika 2: Čas zakasnitve T_p in čas koncentracije T_c na hidrogramu (Povzeto po Brilly in Šraj, 2005)

- *Čas koncentracije* (T_c): Čas koncentracije (slika 2) je čas, ko do izhodnega profila priteče voda iz najbolj oddaljene točke povodja oz. ko celotne učinkovite padavine prispevajo k površinskemu odtoku v izhodnem profilu (Brilly in Šraj, 2005).
- *Čas zakasnitve* (T_p): Čas zakasnitve (slika 2) je čas med težiščem histograma učinkovitih padavin in težiščem hidrograma (Brilly in Šraj, 2005).
- *Celotni čas* (T_t): Predstavlja obdobje od začetne do končne prevojnne točke hidrograma. Uporablja se tudi izraz »čas poplave« ali »čas trajanja«. Celotni čas površinskega pretoka je vsota časa rasti in časa upadanja:

$$T_t = T_{gr} + T_{des} \quad [h; dni] \quad (10)$$

Trajanje hidrograma, ki je predstavljeno na sliki 3, določimo tudi tako, da od začetnega datuma s odštejemo končni datum e (Yue et al., 2002):

- $$T_t = e - s \quad [\text{dni}] \quad (11)$$



Slika 3: Čas trajanja T_t visokovodnega vala (Povzeto po Yue et al., 2002)

- Časovni vrh površinskega odtoka (T_m): Časovni vrh odtoka izračunamo kot razmerje med površinskim volumnom V_p [m^3] in vrhom površinskega pretoka $Q_{p,max}$ [$m^3 s^{-1}$]:

$$T_m = \frac{V_p}{Q_{p,max}} \quad [h; \text{dni}] \quad (12)$$

2.3.4 Volumni

- *Volumen naraščajočega dela hidrograma (V_{gr}):* Ta element predstavlja površino, omejeno z naraščajočim delom hidrograma, vertikalno vršnega pretoka in razmejitveno črto od prve prevojne točke (začetni celotni pretok) do točke, ko razmejitvena črta seka vertikalno vršnega pretoka. Površina nastalega območja na hidrogramu predstavlja volumen vode. Analitičen račun volumna naraščajočega dela hidrograma:

$$V_{gr} = \frac{Q_{in}}{2} + \sum_2^{n-1} Q_i + \frac{vQvk}{2} \quad [m^3] \quad (13)$$

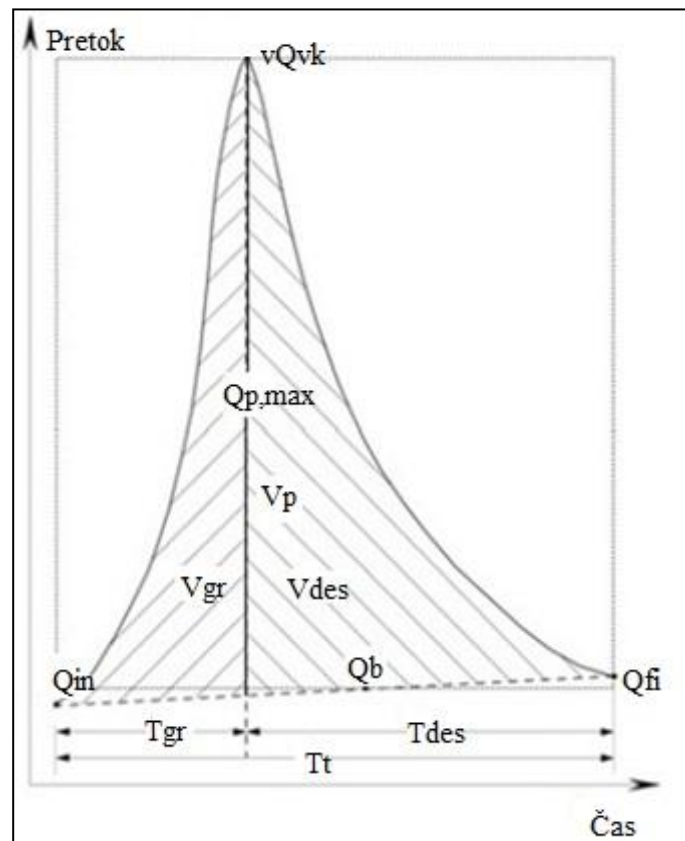
Kjer je:

- n število upoštevanih pretokov na naraščajočem delu hidrograma, z vključno Q_{in} in $vQvk$.
- **Volumen upadajočega dela hidrograma (V_{des}):** Predstavlja območje omejeno z upadajočim delom hidrograma, vertikalno vršnega pretoka in razmejitevno črto od končne prevojnne točke (končni celotni pretok) do točke, ko razmejitevna črta seka vertikalno vršnega pretoka (slika 4). Volumen upadanja zapišemo:

$$V_{des} = \frac{vQvk}{2} + \sum_2^{n-1} Q_i + \frac{Q_{fi}}{2} \quad [m^3] \quad (14)$$

Kjer je:

- n število upoštevanih pretokov na naraščajočem delu hidrograma, vključno s Q_{fi} in $vQvk$.



Slika 4: Komponente visokovodnega vala. (Povzeto po Pandi, 2010)

- **Volumen visokovodnega vala V_t ; Celotni volumen V :** Predstavlja celotni volumen vode, ki je predstavljen na hidrogramu. Za določitev le tega uporabimo splošno analitično enačbo:

$$V_t = \sum_1^n \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t \quad [m^3] \quad (15)$$

Kjer je:

- Q_i pretok iz vej hidrograma [$m^3 s^{-1}$],
- Δt časovni interval [s],
- n število vrednosti.

Ali

$$V_t = \int_0^{T_t} Q_i \times dt \quad [m^3] \quad (16)$$

Kjer je:

- T_t celotni čas dogodka visokovodnih valov [s],
- Q_i pretok na osi y [$m^3 s^{-1}$],
- dt zelo kratki časovni intervali (ko upoštevamo pretoke).

V zgornjih metodah je bazni odtok zanemarjen, vsi pretoki se začnejo z nič.

- *Volumen površinskega odtoka (V_p):* Predstavlja volumen površinskega dela odtoka. Z metodo izločanja baznega odtoka, določimo vrednosti baznega odtoka in ga odštejemo od celotnega pretoka, kot je prikazano v enačbi (17). Volumen površinskega odtoka tako izračunamo po modificirani enačbi (15):

$$V_p = \sum_1^n \frac{(Q_i - Q_{b,i}) + (Q_{i+1} - Q_{b,i+1})}{2} \times \Delta t \quad [m^3] \quad (17)$$

Ali pa ga izračunamo kot vsoto volumna rasti in volumna upadanja hidrograma:

$$V_p = V_{gr} + V_{des} \quad [m^3] \quad (18)$$

Kadar je volumen baznega odtoka zanemarjen ali enak nič, velja tudi:

$$V_t = V_{gr} + V_{des} \quad [m^3] \quad (19)$$

- *Volumen baznega odtoka (V_b)*: Predstavlja volumen baznega dela odtoka.
- *Začetni volumen baznega odtoka ($V_{b,0}$)*: Predstavlja volumen baznega odtoka v začetni točki baznega odtoka.
- *Končni volumen baznega odtoka ($V_{b,e}$)*: Predstavlja volumen baznega odtoka v končni točki baznega odtoka.

2.3.5 Koeficienti

- *Koeficient izločevanja (ϵ)*: Predstavlja razmerje med *volumnom površinskega odtoka V_p [m^3]* in *volumnom baznega odtoka V_b [m^3]* (Bergmann et al., 1990):

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_b} \quad (20)$$

- *Koeficient oblike (γ)*: Predstavlja razmerje med *volumnom visokovodnega vala V_t [m^3]* in *volumnom pravokotnika s stranicama $vQvk$ [m^3s^{-1}] ali $vQvk - Q_{b,max}$ [m^3s^{-1}] in T_t [s]*.
Kadar je bazni odtok enak nič:

$$\gamma = \frac{V_t}{vQvk \times T_t} \quad (21)$$

Kadar bazni odtok ni enak nič, uporabimo sledečo formulo:

$$\gamma = \frac{V_t}{(vQvk - Q_{b,max}) \times T_t} \quad (22)$$

- *Koeficient odtoka (C)*: Predstavlja razmerje med odteklo in padlo količino vode oz. razmerje med efektivnimi (neto) in bruto padavinami. Odvisen je od vrste dejavnikov: lastnosti povodja, intenzivnosti in trajanja padavin, vlažnosti zemljišča ipd. (Brilly in Šraj, 2005).

$$C = \frac{P_{ef}}{P} \quad (23)$$

Kjer je:

- P_{ef} efektivne (neto) padavine [mm],

- P bruto (izmerjene) padavine [mm],.

2.3.6 Razmerja

- *Značilni specifični pretoki* (Bergmann et al., 1990):

- *Specifični največji pretok* (q_t):

$$q_t = \frac{vQvk}{A} \quad [m^3 s^{-1} km^{-2}] \quad (24)$$

- *Specifični največji površinski pretok* (q_p):

$$q_p = \frac{Q_{p,max}}{A} \quad [m^3 s^{-1} km^{-2}] \quad (25)$$

- *Specifični začetni bazni pretok* ($q_{b,0}$):

$$q_{b,0} = \frac{Q_{b,0}}{A} \quad [m^3 s^{-1} km^{-2}] \quad (26)$$

- *Specifični končni bazni pretok* ($q_{b,e}$):

$$q_{b,e} = \frac{Q_{b,e}}{A} \quad [m^3 s^{-1} km^{-2}] \quad (27)$$

Za preverjanje pravilnosti izločitve baznega odtoka na hidrogramu, lahko uporabimo naslednja razmerja:

- *Časovna razmerja:*

$$\frac{T_{gr}}{T_t} \quad (28)$$

in

$$\frac{T_{gr}}{T_{des}} \quad (29)$$

Na podlagi primera študije romunskih vodotokov, naj bi časovno razmerje med časom naraščajočega dela površinskega odtoka in časom padajočega dela površinskega odtoka za majhna prispevna območja (50–100 km²) znašalo (Pandi, 2010):

$$\frac{T_{gr}}{T_t} \approx \frac{1}{2} \text{ do } \frac{1}{3}$$

Za velika prispevna območja pa naj bi to razmerje znašalo (Pandi, 2010):

$$\frac{T_{gr}}{T_t} \approx \frac{1}{3} \text{ do } \frac{1}{5}$$

- *Volumenska razmerja:*

$$\frac{V_{gr}}{V_p} \tag{30}$$

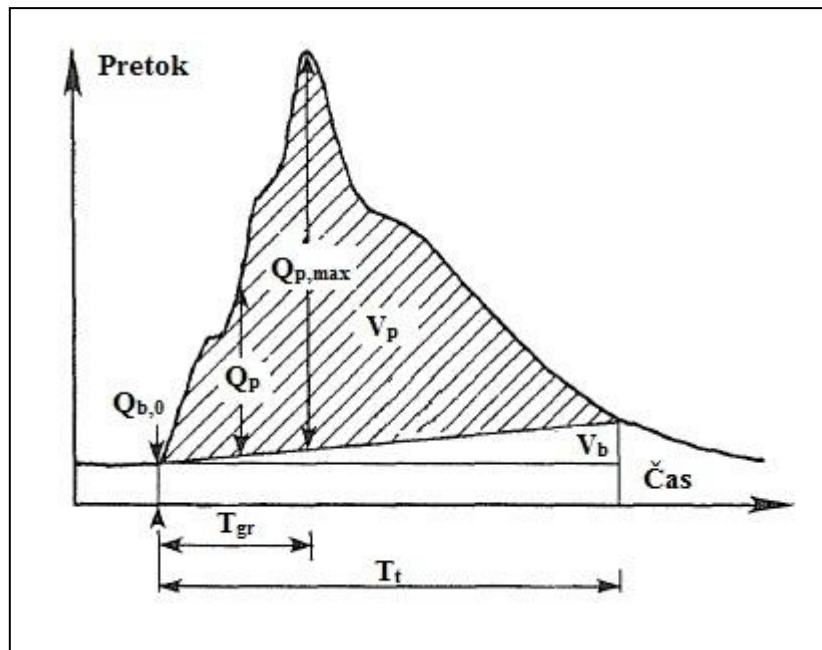
in

$$\frac{V_{gr}}{V_{des}} \tag{31}$$

Vodotoki s hitro rastočo koncentracijo toka in počasnim razvojem poplav naj bi imeli razmerje med volumnom naraščajočega dela hidrograma in volumnom padajočega dela hidrograma (Pandi, 2010):

$$\frac{V_{gr}}{V_{des}} \approx 0,5$$

2.4 Standardiziran hidrogram



Slika 5: Primer standardiziranega hidrograma (Povzeto po Bergmann et al., 1990)

Standardiziran hidrogram površinskega odtoka (slika 5) je definiran s standardnimi parametri, ki so (Bergmann et al., 1990):

- čas τ

$$\tau = \frac{t_i}{T_{gr}} \quad (32)$$

Standardni čas τ je razmerje med izbranim časom t_i [h, dni] in časom rasti T_{gr} [h, dni] hidrograma.

- odtok u

$$u = \frac{q_{ti}}{Q_{p,max}} \quad (33)$$

Standardni odtok u predstavlja razmerje med celotnim odtokom q_{ti} [$m^3 s^{-1}$] in površinskim odtokom $Q_{p,max}$ [$m^3 s^{-1}$] visokovodnega vala.

- *volumen* V_s

$$V_s = \frac{V_p}{Q_{p,max} \times T_{gr}} \quad (34)$$

Standardni volumen V_s predstavlja razmerje med *volumnom površinskega dotoka* V_p [m^3] in zmnožkom *vrha površinskega odtoka* $Q_{p,max}$ [m^3s^{-1}] in *časa rasti* T_{gr} [s] hidrograma.

- *trajanje* τ_t

$$\tau_t = \frac{T_t}{T_{gr}} \quad (35)$$

Standardno trajanje τ_t predstavlja razmerje med *celotnim časom trajanja* T_t [h, dni] in *časom rasti* T_{gr} [h, dni] hidrograma.

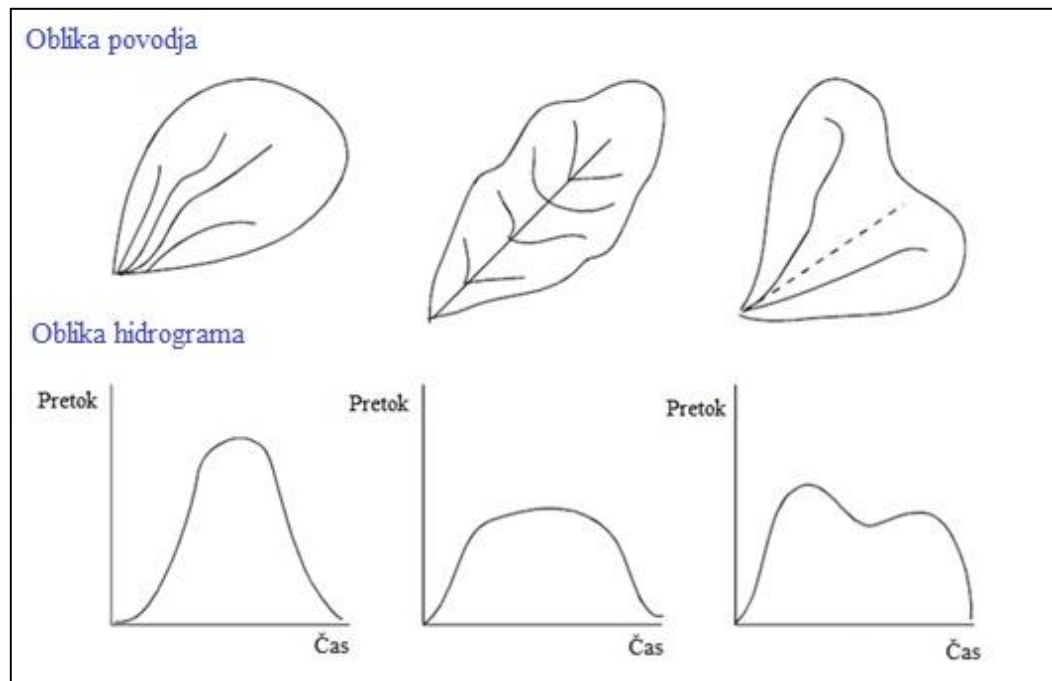
2.5 Oblika hidrograma

Oblike hidograma ne smemo zanemariti, saj je pomembna za izvajanje učinkovitega upravljanja z vodnimi viri. Intenzivnost poplave ni odvisna samo od vršnega pretoka, volumna in trajanja, ampak tudi od oblike hidrograma.

Glavni faktorji, ki vplivajo na obliko hidrograma so:

- *Lastnosti prispevnega območja*: površina, oblika, naklon, podolžni profil struge, vrsta zemljine, raba prostora, gostota mreže vodotokov in njihova razporeditev;
- *Lastnosti padavin*: intenziteta, trajanje, prostorska in časovna razporeditev ter gibanje nevihte. V kolikor se nevihta premika dolvodno, se ustvari večji vršni pretok, kot če se nevihta premika gorvodno glede na vodotok.

Na sliki 6 je predstavljeno kako oblika povodja vpliva na obliko hidrograma.



Slika 6: Vpliv oblike povodja na obliko hidrograma (Povzeto po Cheng, 2011)

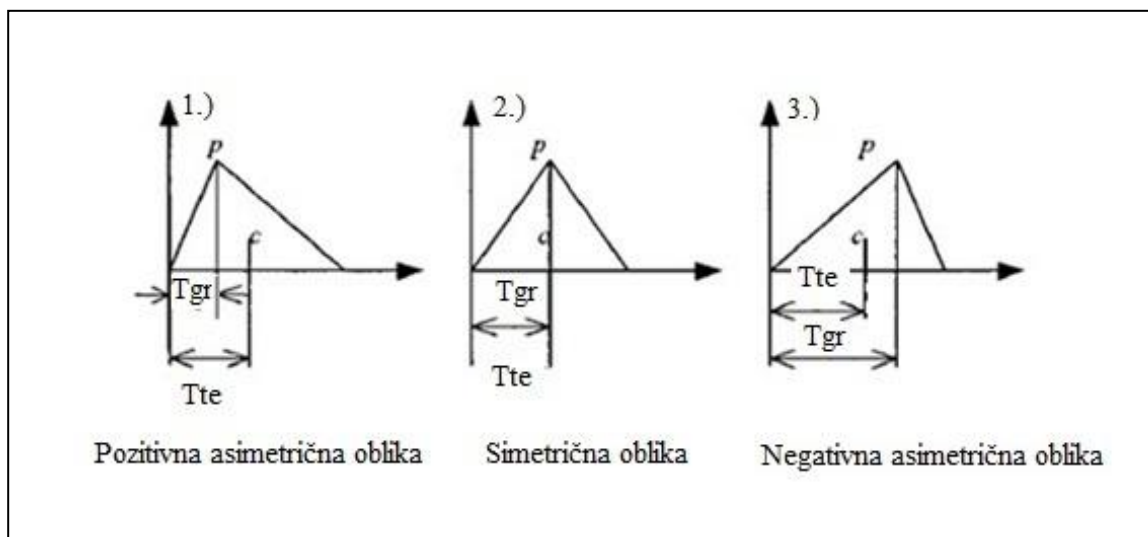
2.5.1 Klasifikacija oblike hidrograma

V praksi je poplavni hidrogram vodotoka lahko različnih oblik, ker vsaka nevihta ali taljenje snega povzroči drugačen poplavni odtok. Yue s sodelavci (2002) je ugotovil, da zveza med časom rasti in časom do težišča, to je med vodoravnima razdaljama T_{gr} in T_{te} , vpliva na klasifikacijo oblike hidrograma (Yue et al., 2002):

1. Pozitivna asimetrična oblika: $T_{gr} < T_{te}$
2. Simetrična oblika: $T_{gr} = T_{te}$
3. Negativna asimetrična oblika: $T_{gr} > T_{te}$

Kjer je:

- T_{gr} čas rasti: vodoravna razdalja od točke začetnega pretoka do vrha hidrograma [h ; dni];
- T_{te} čas do težišča: vodoravna razdalja od točke začetnega pretoka do težišča hidrograma [h ; dni];
- P vrh hidrograma.



Slika 7: Shematičen prikaz različnih oblik hidrograma (Povzeto po Yue et al., 2002)

Oblika hidrograma lahko vpliva na velike stroškovne razlike in na vodenje politike upravljanja z vodnimi viri. Za primer vzemimo, da obravnavamo dva poplavna dogodka z enakim vršnim pretokom in volumnom, le njuna oblika je različna. Prvi poplavni hidrogram ima pozitivno asimetrično obliko, drugi pa negativno asimetrično obliko (slika 7). Uporabimo račun spremembe visokovodnega vala. To je postopek za izračun gibanja in spreminjanja oblike visokovodnega vala na odseku reke ali v zadrževalniku (Mikoš et al., 2002). Da bi dobili enako stopnjo zaščite, moramo pri negativni asimetrični obliki hidrograma uporabiti veliko več prostornine v zbiralniku, kot pri pozitivni asimetrični obliki hidrograma.

2.5.2 Oblika baznega hidrograma

Pomemben del hidrograma predstavlja bazni odtok. Oblika baznega hidrograma je delno subjektivna, vendar so nekatere skupne značilnosti zajete s krivuljo baznega odtoka. Značilnosti baznega odtoka se tako odražajo pri obliki baznega hidrograma. To tematiko so predstavili Nathan in McMahon (1990) ter Brodie in Hostetler (2005) (Povzeto po Murphy et al., 2009):

- Nizke pretočne razmere pred začetkom poplavnega dogodka predstavljajo celoten bazni odtok.
- Hitro povečanje gladine vodnega toka je odvisno od gladine okoliške podzemne vode in se pokaže v povečanem obrežnem zadrževanju. Zaradi obrežnega zadrževanja ima voda daljši odzivni čas vrnitve v vodotok in to povzroči upadanje baznega odtoka kasneje kot celotnega hidrograma.
- Zaradi zadrževalnega učinka posameznih podporečij, se konica baznega odtoka zgodi kasneje kot konica celotnega hidrograma.

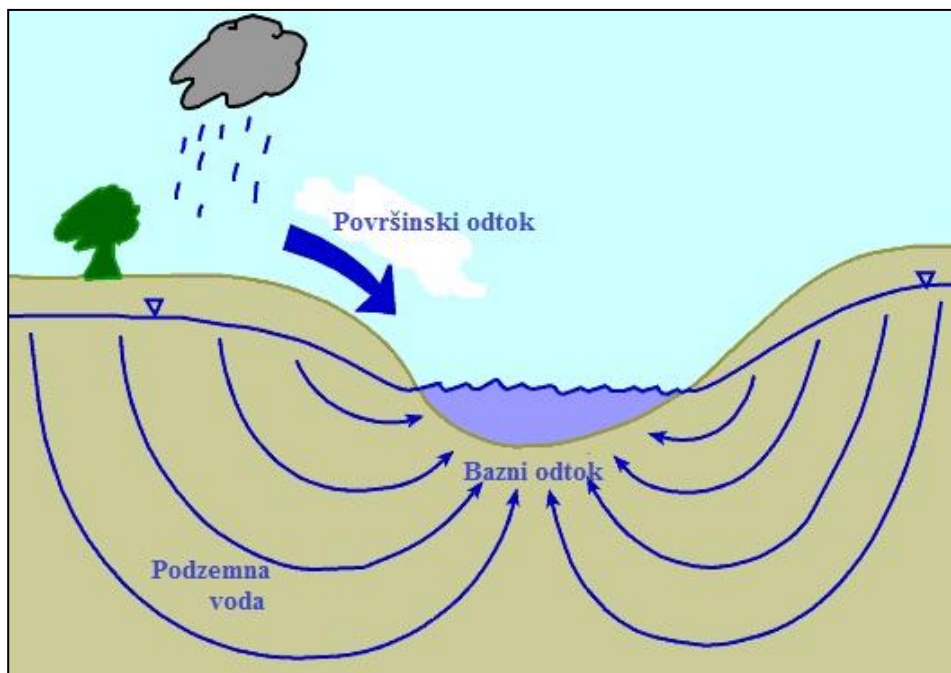
- Recesijska krivulja baznega odtoka bo najverjetneje sledila eksponentni funkciji. Izjema so presihajoči vodotoki.
- Po prenehanju površinskega odtoka se bazni odtoka ponovno združi s celotnim hidrogramom.

3 BAZNI ODTOK

3.1 Predstavitev baznega odtoka

Celotni odtok se deli na dve glavni komponenti glede na odzivni čas, ki ga padavine porabijo, da dosežejo strugo vodotoka po dogodku padavin (Murphy et al., 2009). Voda s kratkim odzivnim časom do vodotoka, se imenuje površinski odtok in je posledica neposrednih padavin v rečno površino in padavinskega odtoka po zemeljskem površju. Vodo, ki doteka v strugo v daljših obdobjih, imenujemo bazni odtok. Bazni odtok primarno tvori podzemni odtok v strugo vodotoka in je torej predvsem posledica izcejanja podzemnih voda (slika 8) ali tudi iztoka iz jezer ali taljenja ledenikov (Murphy et al., 2009). Najmanjši bazni odtok zaznamo v strugi vodotoka, ko dalj časa ni padavin (Brilly in Šraj, 2005). Bazni odtok velja za manj pomembno komponento pri ekstremno obsežnih poplavih, vendar ima lahko zelo velik pomen pri manjših poplavnih dogodkih. V praksi je meja med površinskim odtokom in baznim odtokom težko določljiva.

Strogo definicijo baznega odtoka je težko oblikovati, ampak na splošno bazni odtok predstavlja vodni tok, ki ga tvori podzemna voda iz vodonosnikov in je prisoten v vodotoku tudi po daljšem obdobju brez padavin (Murphy et al., 2009).



Slika 8: Bazni odtok (Povzeto po Stream Processes, 2011)

3.2 Značilnosti baznega odtoka

Razumevanje lokalnih značilnosti je nujno potrebno za analizo baznega odtoka. Med poplavnim dogodkom je interakcija procesov med podzemnimi in površinskimi vodami povečana, kar posledično poveča volumne pretokov. Poplavne dogodke povzroča hitro, vendar začasno povečanje gladine vode, ki se pod vplivom gravitacije premika dolvodno (Murphy et al., 2009). Povečanje vodne gladine lahko pripelje do hidrostatične razlike tlaka med reko in podzemno vodo v rečni brežini. Hidrostatični tlak v okolici vodonosnika v hranjenem vodotoku stimulira gibanje toka vode proti brežini. Po doseženem vrhu poplave, se začne voda umikati nazaj v vodotok in hidrostatični tlak v reki začne padati. To začasno zadrževanje vode v času poplav je znano kot zadrževanje brežin. Zmanjševanje velikosti in trajanja skupnega vršnega pretoka vpliva na upad konice visokovodnega vala. Lokalne hidrogeološke razmere v kombinaciji s specifičnimi poplavnimi pogoji narekujejo pomembnost tega procesa. Na zelo prepustnih površinah (kras, aluvialne ravnine) površinskega odtoka niti ne zaznamo, poveča se samo bazni odtok. Na slabše prepustnih površinah pa ni povečanja baznega odtoka, padavine v celoti odtečejo površinsko (Brilly in Šraj, 2005). Komponenti vodnega toka, padavine v strugo in evapotranspiracija se tudi pojavita, vendar sta običajno zanemarljivo majhni v primerjavi z drugimi komponentami vodnega toka. Interakcija teh procesov je kompleksna in algoritem za vodno izločanje baznega odtoka ne upošteva teh parametrov (Murphy et al., 2009).

Predpostavimo, da pretok podzemnih voda iz vodonosnika predstavlja bazni odtok, ki prispeva k povečanju vodnega toka. Pogoj, da to velja je, da je podzemni hidrostatični tlak vodonosnika višji kot hidrostatični tlak vodotoka. Vodonosnik pa mora biti poleg tega tudi redno polnjen in narejen iz materialov, ki omogočajo shranjevanje in prenos vode do vodotoka. V nekaterih primerih te predpostavke ne odražajo lokalnih hidrogeoloških razmer in na režim baznega odtoka vplivajo tudi drugi sledeči faktorji (Murphy et al., 2009):

- *Povezava z dodatnimi vodnimi zbiralniki:* obrežni zadrževalniki, globoki vodonosniki in povezava z jezeri lahko vpliva na režim baznega odtoka na določenem mestu v nasprotju z zgoraj navedenimi pogoji;
- *Ureditev toka gorvodno od zadrževalnika:* zadrževalnik izpusti odtok, ki je drugačen od vtoka in ustvari se nizki pretok, ki se ga lahko narobe razloži in sicer kot bazni odtok;
- *Kmetijsko namakanje:* visoka koncentracija kmetijskih pregrad vpliva na bazni odtok, ampak samo tam kjer so pregrade locirane na vodotoku ali tam kjer so v stiku s podzemnimi vodami.
- *Velika odvajanja poplavne vode:* odvajanje poplavne vode za namakalne kanale in za urbano odvodnjo poplavne vode, lahko zmanjša nizki tok in se tako zdi, da se je zmanjšal bazni odtok.

- *Urbanizacija*: v urbanih območjih lahko aktivnosti kot je zalivanje mestnih vrtov, športnih igrišč itn. povečajo nizke tokove med poletjem, kar je lahko podobno baznemu odtoku;
- *Povratna voda*: Voda se lahko vrne v reke tudi preko odplak industrije. Primer za to je tudi odtok vode iz hladilnih stolpov elektrarn. To poveča nizke tokove in je podobno baznemu odtoku;
- *Rečna evapotranspiracija in izhlapevanje*: izhlapevanje iz rečnega površja in iz zalivalnih površin ima zanemarljivo majhen vpliv na vodotok prispevne površine manjše od 1000 km^2 . Pri večjih prispevnih površinah, je bazni odtok bolj izražen v gorvodnem delu struge, ampak je zaradi velikih izgub, še posebej zaradi poletnih razmer, manjši pri merilni postaji vodotoka.

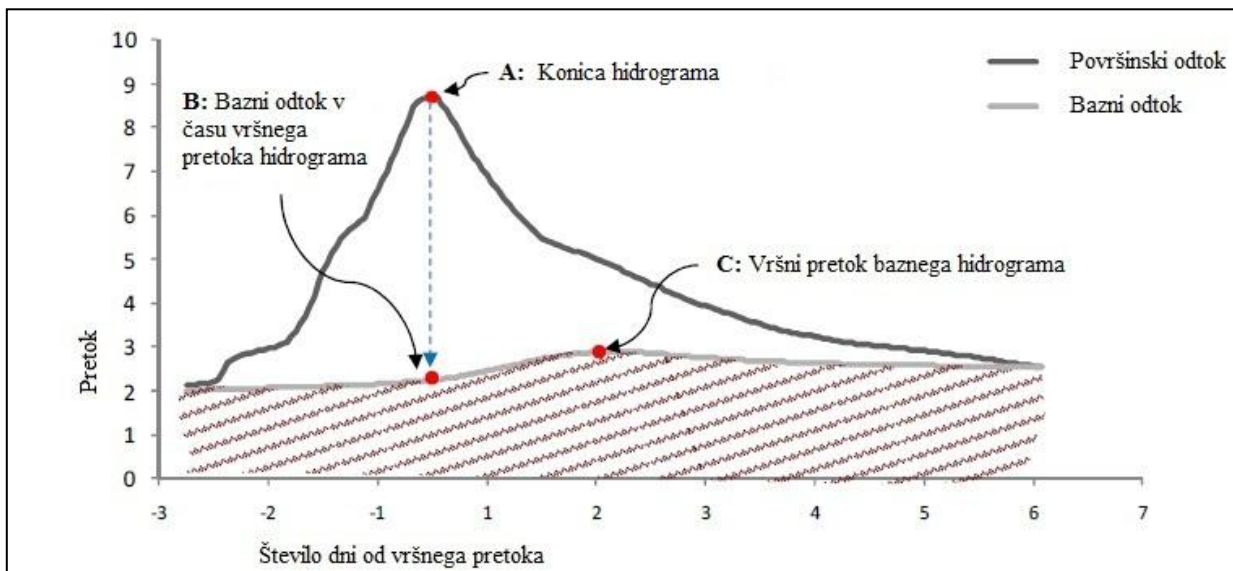
Na prispevnih območjih, kjer na vodni tok v veliki meri vplivajo zgoraj naštetih vplivi, je težko izločiti bazni odtok od celotnega odtoka.

Interakcija med površinsko in podzemno vodo je odvisna od vodotoka, gladine podtalnice in hidrogeoloških značilnosti. Na merilni postaji podatki o izločevanju baznega odtoka iz vodotoka, predstavljajo oceno baznega odtoka s prispevnih površin gorvodno od merilne postaje. V praksi, samo gorvodni del vodotoka vsebuje bazni odtok, medtem ko drugje voda ponika v podtalnico. Opazovan bazni odtok pri merilni postaji vodotoka predstavlja čisti učinek gorvodnih procesov (Murphy et al., 2009).

Površinski odtok se pojavi takoj po padavinah. Vmesni odtok potrebuje malo dalj časa, da pride skozi nezasičeno zemljino. Bazni odtok pa potrebuje več ur, dni ali celo let, da se odzove na padavine, saj je proces gibanja podzemnih voda zelo dolgotrajen.

3.3 Statistična analiza karakteristik baznega odtoka

Za vsak poplavni dogodek, se lahko izračuna vrsto statističnih značilnosti v povezavi z baznim odtokom.



Slika 9: Prikaz statističnih značilnosti baznega odtoka na hidrogramu (Povzeto po Murphy et al., 2009)

Spodnje statistične značilnosti zagotavljajo pravilnost ocene deleža baznega odtoka, ki prispeva k celotnemu volumnu dogodka in vključujejo (Murphy et al., 2009):

- Indeks baznega odtoka (BFI) je podan z razmerjem med volumnom baznega odtoka $V_b [m^3]$ za čas trajanja dogodka $T_t [h; dni]$ in celotnim volumnom $V_t [m^3]$ dogodka:

$$BFI = \frac{V_b}{V_t} \quad (36)$$

Na sliki 9 je bazni odtok označen osenčeno.

- Razmerje med baznim odtokom v času konice hidrograma (B) in konico hidrograma (A) je podano z B/A.
- Razmerje med konico baznega odtoka (C) in konico hidrograma (A) je podano s C/A.

Za vsak dogodek je ključno zbrati navedene statistične značilnosti in jih nato časovno umestiti.

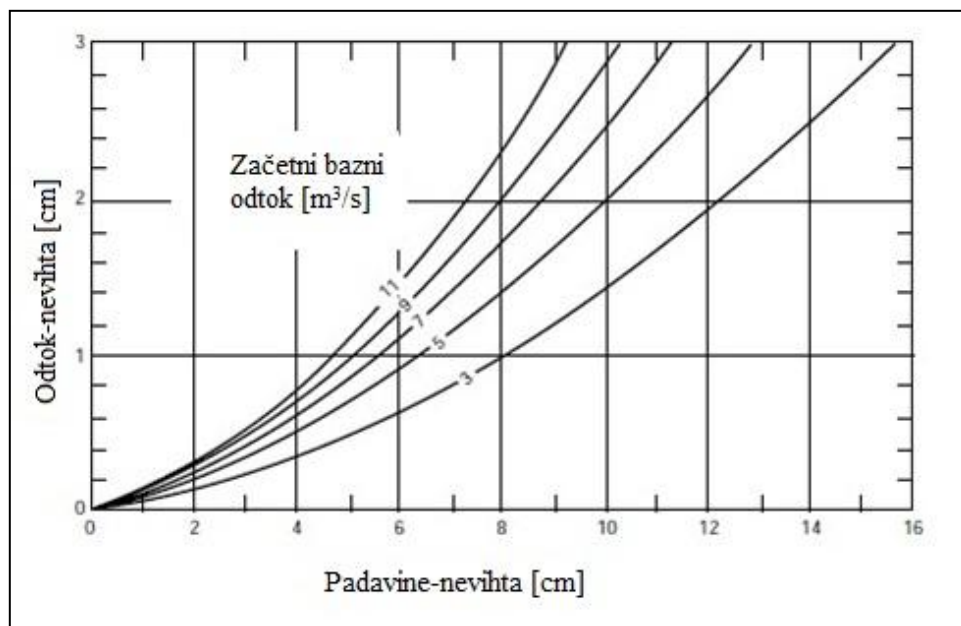
Indeks baznega odtoka (BFI) je brezdimenzijska spremenljivka, ki izraža volumen baznega odtoka kot delež celotnega odtoka. Temelji na standardizirani osnovi primerjave med območji vzdolž reke z različnimi gorvodnimi prispevnimi površinami in v različnih povodjih.

Indeks baznega odtoka velja kot kazalnik hidrogeoloških razmer določenega prispevnega območja. Inštitut za hidrologijo Wallingford UK (1980) je določil razpon indeksa baznega odtoka za določene vrste kamnin (Murphy et al., 2009). Sinclair Knight Merz (2003) je s pomočjo značilnosti prispevnih površin razvil enačbo za predvidevanje ocene indeksa baznega odtoka za nemerjena porečja. Značilnosti prispevnih površin so vključevale pokritost z vegetacijo in padavinami (kazalniki za dovajanje vode v podzemno in površinsko vodo), gostoto rečne mreže (kazalniki potencialne povezanosti podzemne vode s tokovnicami odvodnje površinske vode) in oceno prepustnosti tal (kazalnik hidravlične prevodnosti in prepustnosti). To omogoča oceno lastnosti baznega odtoka na prispevnih območjih, kadar imamo premalo merjenih podatkov za določitev baznega odtoka.

Kljub temu, da dolgoletno povprečje indeksa baznega odtoka velja za zanesljiv kazalnik hidrogeoloških pogojev, ne smemo pozabiti, da je indeks baznega odtoka odvisen od celotnega pretoka. Skozi obdobja kratkih časovnih intervalov, indeks baznega odtoka odraža nihanja površinskega odtoka, ne pa spremembe baznega odtoka. V dolgih sušnih obdobjih je indeks baznega odtoka enak vrednosti ena, v času poplave pa je blizu nič. Zavedati se moramo, da obseg visokovodnega dogodka vpliva na razpon velikosti indeksa baznega odtoka.

3.4 Začetni bazni odtok kot indikator volumna odtoka

Na vlažnih območjih, kjer vodotoki niso pogosto brez vode, se na začetku nevihte bazni odtok uporabi kot kazalec razmer porečja. Primer takšnega razmerja je prikazan na sliki 10. Bazni odtok odraža razmere celotnega prispevnega območja. Za nekatera območja je značilno, da je razmerje med padavinami, odtokom in začetnim baznim odtokom, odvisno od letnega časa. Običajna rešitev tega problema je, da določimo povezave med njimi posebej za zimo in posebej za poletje. Za nevihte, ki se pojavijo v vmesnem obdobju, pa s pomočjo krivulje ocenimo odtok in ga interpoliramo, da dobimo pravo vrednost (WMO, 1994).

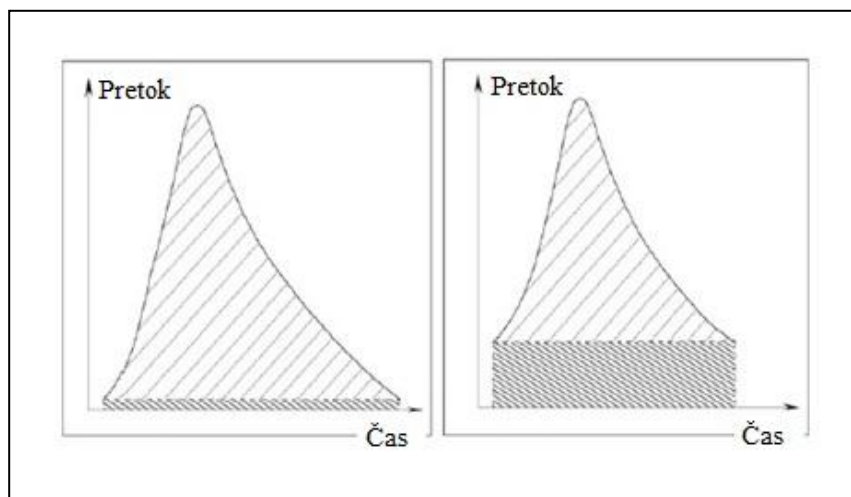


Slika 10: Bazni odtok kot kazalec zveze med padavinami in odtokom (Povzeto po WMO, 1994)

Začetni bazni odtok lahko uporabimo kot indikator razmer odtoka samo v določenih primerih in sicer na majhnih porečjih, s kratkim časom koncentracije. Na večjih območjih se lahko zgodi, da se na hidrogramu časovno različna zvišanja pretokov prekrivajo oz. prikažejo kasneje, kot so se v resnici zgodila, kar oteži določitev vrednosti začetnega odtoka. Običajen pristop je, da določimo začetni bazni odtok za porečja z majhnim indeksom in ga potem apliciramo na bližnja območja s podobnimi hidrološkimi značilnostmi.

3.5 Upoštevanje volumna baznega odtoka

V kolikor je razdalja med razmejitveno črto in osjo x majhna in je površina baznega odtoka na hidrogramu majhna v primerjavi s površino površinskega odtoka, se obravnava, da je na začetku in na koncu takšnega dogodka ničelni pretok. V nasprotnem primeru, kadar je razdalja med razmejitveno črto in osjo x velika in je površina baznega odtoka na poplavnem hidrogramu v primerjavi s površino površinskega odtoka velika, volumen baznega odtoka ne šteje kot del volumna visokovodnega vala (slika 11). Te ugotovitve so zelo pomembne za izračun volumna visokovodnega vala in koeficienta oblike (Pandi, 2010).



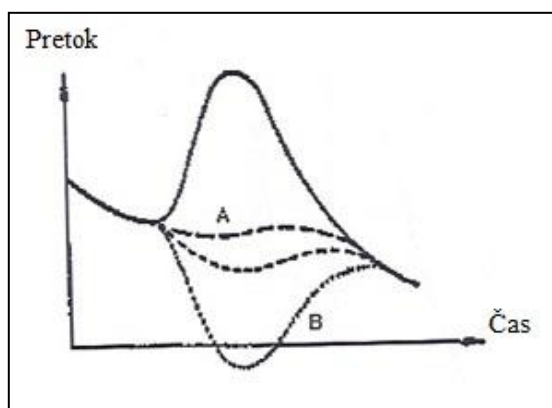
Slika 11: Zanemarljiv in pomemben volumen baznega odtoka (Povzeto po Pandi, 2010)

3.6 Metode izločanja baznega odtoka

Analiza komponent baznega odtoka v hidrogramu vodotoka ima dolgo zgodovino razvoja. Začetniki zgodnjega teoretičnega in empiričnega dela so Boussinesq (1904), Maillet (1905) in Horton (1933). K razvoju so s svojimi raziskavami pripomogli tudi Hall (1968), Nathan and McMahon (1990), Tallaksen (1995) in Smakhtin (2001). Številne metode, ki so se razvile skozi čas, lahko kategoriziramo med tri osnovne pristope, ki so: izločanje baznega odtoka, verjetnostna analiza in analiza recesijskih krivulj. Tehnike izločanja baznega odtoka uporabljajo časovno zaporedne vrednosti pretoka in na ta način določijo vrednosti baznega odtoka (Brodie et al., 2005).

Poznane metode izločanja baznega odtoka so: komponenta odtoka izločanja z uporabo sledil, enostavni grafični pristop, metode filtriranja, rekurzivna metoda filtriranja, metoda enotnega hidrograma, metoda pretočne krivulje itn. (Gonzales et al., 2009). Poznamo tudi več različnih tehnik izločanja baznega odtoka na hidrogramu, ki so grafične, analitične, geokemične ali pa avtomatizirane. Nobena metoda ni popolnoma, stoprocento zanesljiva ter vsak pristop ima svoje prednosti in slabosti (WMO, 1994).

Uporabljene metode izločanja baznega odtoka so najpogosteje grafične in se osredotočajo na določanje točk v katerih bazni odtok seka upadajoči ali naraščajoči del površinskega odtoka. Prav tako velikokrat uporabljene metode baznega odtoka vključujejo filtriranje, kjer z obdelavo podatkov celotnega hidrograma vodotoka določimo hidrogram baznega odtoka.



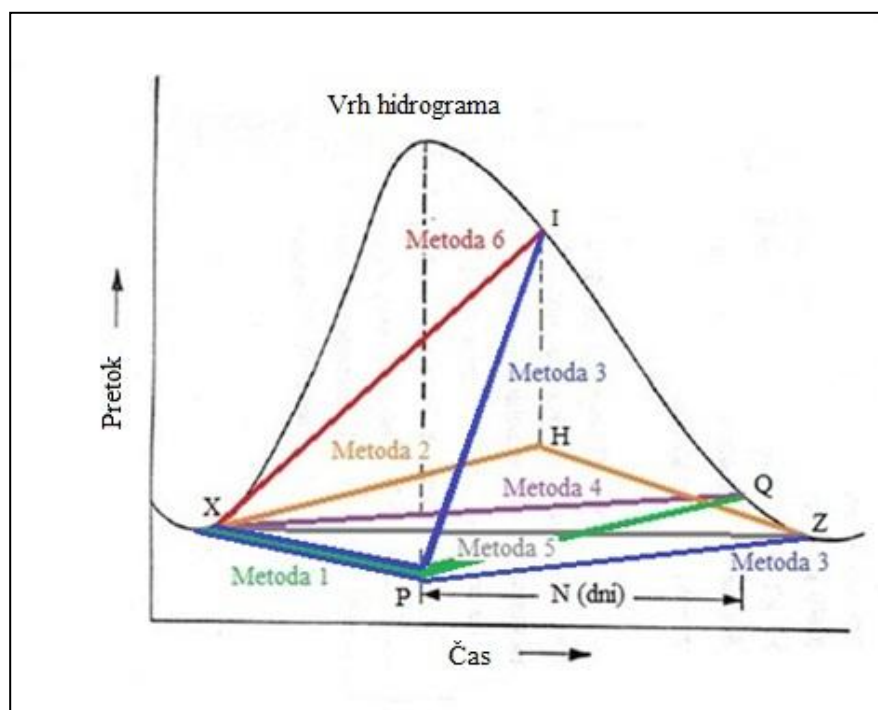
Slika 12: Dve ekstremni obliki baznega toka v vodotoku (Povzeto po Brilly in Šraj, 2005)

Na sliki 12 sta prikazani dve zelo različni metodi izločanja baznega odtoka, ki tudi podata zelo različne vrednosti baznega odtoka.

3.6.1 Predstavitev grafičnih metod in osnovnih pojmov

Grafične metode izločanja baznega odtoka na hidrogramu so primerne za uporabo kadar obravnavamo individualni dogodek nevihte. Tehnika ne upošteva fizičnih parametrov prispevnega območja, zato je težko razumeti kaj komponenta baznega odtoka točno predstavlja.

Grafične metode se običajno uporabljajo za določitev področja baznega odtoka v poplavnem hidrogramu, vključno s točko v kateri bazni odtok seka upadajoči del hidrograma. Od te točke naprej se predvideva, da je vodni tok v celoti bazni odtok. Odziv hidrograma nastopi po znatnem padavinskem dogodku in takrat nastopi površinski odtok (Brodie et al., 2005). Izbira metode je odvisna od neposrednih izkušenj in metod.

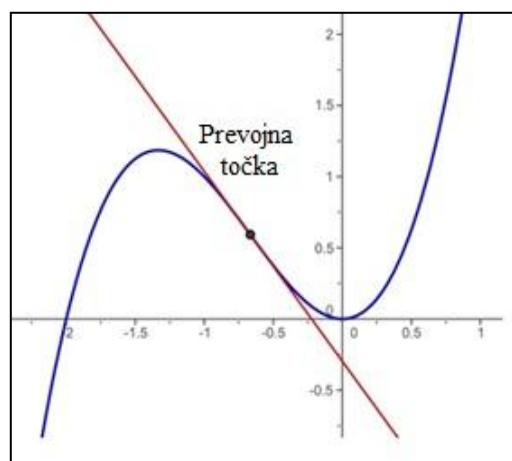


Slika 13: Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno in s prelomljeno črto

Opomba: Metoda 3, označena z modro barvo, je na sliki 13 prikazana na dva različna načina. V obeh primerih se metoda zaključi v prevojni točki na upadajočem delu hidrograma, prvič v točki I, drugič v točki Z. To pomeni, da imamo na sliki 13 prikazani kar dve končni prevojni točki. Določanje prevojne točke na upadajočem delu hidrograma ni tako enostavno in je predmet številnih polemik po celem svetu. V naslednjem podpoglavju se bomo zato posvetili prevojni točki.

3.6.1.1 Razmejitvena črta

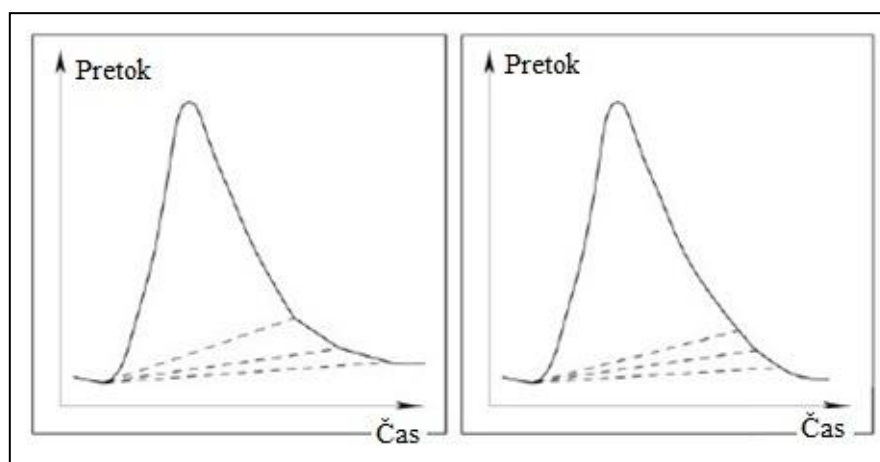
Glavni problem pri grafičnih metodah predstavlja določitev razmejitvene črte. Razmejitvena črta na hidrogramu loči volumen površinskega odtoka od volumna baznega odtoka. V teoriji, razmejitvena črta poveže prevojni točki. Prevojna točka je točka, kjer krivulja spremeni smer (predznak ukrivljenosti). To točko najdemo tam, kjer funkcija preide iz konveksne v konkavno (slika 14).



Slika 14: Prevojna točka

3.6.1.2 Prevojna točka

Začetek razmejitvene črte predstavlja prevojna točka na naraščajočem delu hidrograma, konec razmejitvene črte pa predstavlja prevojna točka na upadajočem delu hidrograma. Začetno točko najdemo brez težav in jo opredelimo kot trenutek, ko je pretok v strugi začel naraščati. Končna točka razmejitvene črte predstavlja čas, ko preneha površinski odtok. Ta točka je težko določljiva in je predmet velikega števila razprav. V veliko primerih ima upadajoči del hidrograma več prevojnih točk (slika 15), zato je izbira ene prevojne točke težka. Včasih pa se zgodi, da je upadajoči del hidrograma ne vsebuje niti ene prevojne točke (Pandi, 2010).



Slika 15: Iskanje določitve prevojne točke (Povzeto po Pandi, 2010)

3.6.1.3 Recesijska krivulja

Prevojno točko lahko najdemo tudi s pomočjo recesijskih krivulj. Recesijske krivulje baznega odtoka se na nekem vodotoku med seboj prekrivajo in praviloma sledijo eksponentni zakonitosti. Eksponentni koeficient se lahko postopoma zmanjšuje zaradi heterogenosti in oblike geoloških skladov. Praviloma se njegova vrednost spreminja zaradi manjše prepustnosti in efektivne poroznosti globljih slojev. Koeficient določimo tako, da na logaritmčno mrežo nanašamo recesijsko krivuljo. Točko, v kateri le ta preide v premico, privzamemo kot točko Z, ko preneha površinski odtok (slika 16). Na osnovi nagiba premice določimo recesijski koeficient α (Brilly in Šraj, 2005):

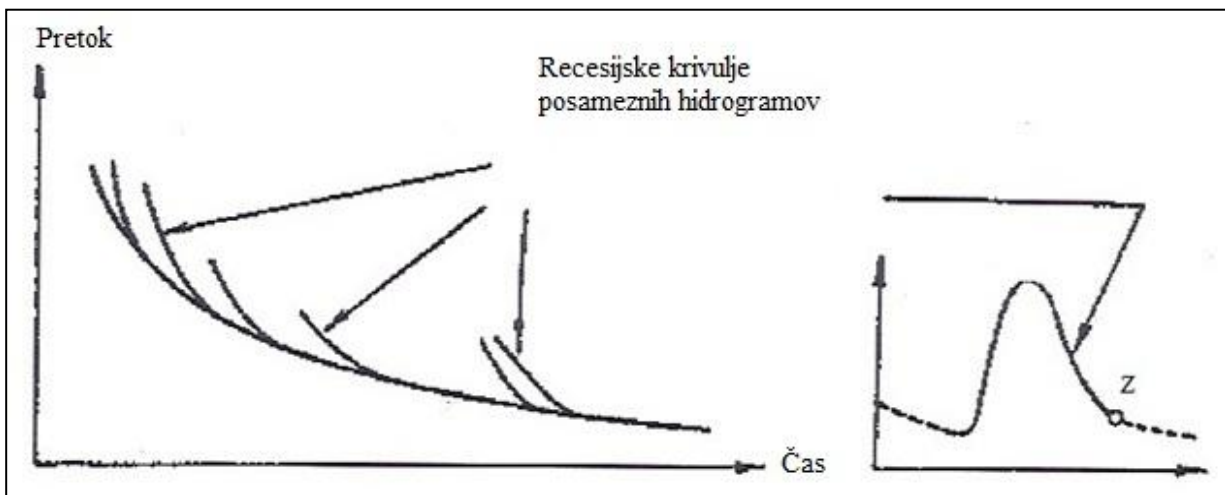
$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (37)$$

ali

$$Q_t = Q_0 K^t \quad [m^3 s^{-1}] \quad (38)$$

Kjer je:

- Q_t pretok po nekem času t [$m^3 s^{-1}$],
- Q_0 pretok na prevojni točki [$m^3 s^{-1}$],
- α recesijski koeficient. V praksi se pogosto uporablja tudi izraz k ,
- K recesijska konstanta.



Slika 16: Recesijske krivulje (Povzeto po Brilly in Šraj, 2005)

Recesijska konstanta K je produkt recesijskih konstant treh individualnih komponent (Cheng, 2011) :

$$K = K_s K_i K_G \quad (39)$$

Kjer je:

- K_s recesijska konstanta površinskega zbiranja vode (surface storage) (od 0,05 do 0,2),
- K_i recesijska konstanta medtoka (od 0,5 do 0,85),
- K_g recesijska konstanta podzemnega toka (od 0,85 do 0,99).

Proces določitve prevojne točke na upadajočem delu hidrograma vključuje korelacijo med celotnim časom visokovodnega vala in nadmorsko višino, površino baznega odtoka hidrograma ali dolžino vodotoka (Pandi, 2010):

$$T_t = f(H, A) \quad (40)$$

ali

$$T_t = f(L) \quad (41)$$

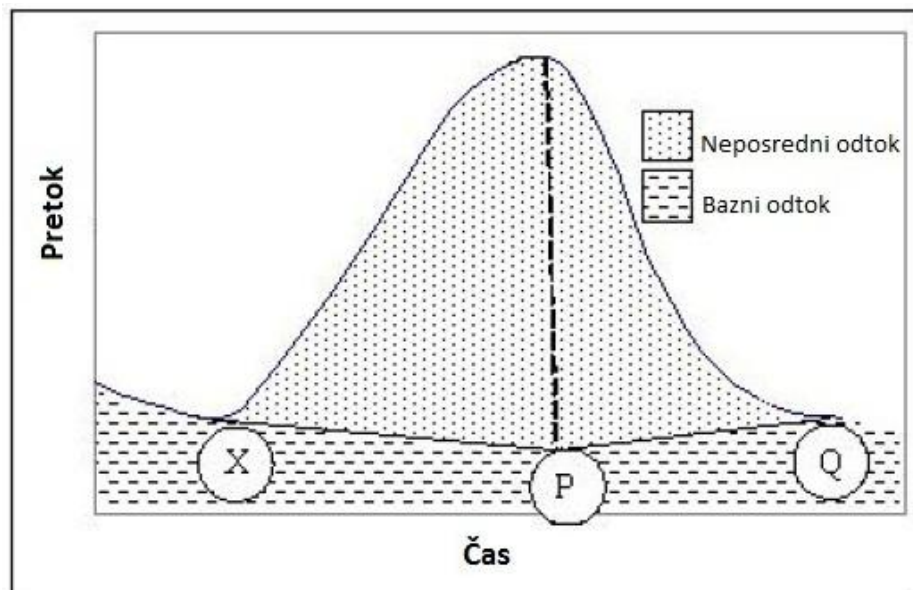
Kjer je:

- T celotni čas trajanja visokovodnega vala [h, dni],
- H nadmorska višina [m],
- A površina baznega odtoka hidrograma [m^2],
- L dolžina vodotoka [m].

Visokovodni val lahko razmejimo z ravno ali prelomljeno črto in tudi s krivuljo. Najbolj pogosto uporabljene so metode izločevanja baznega odtoka z ravno črto.

3.6.2 Grafične metode izločanja baznega odtoka s prelomljeno črto

- Metoda 1



Slika 17: Grafična Metoda 1 za izločanje baznega odtoka (Povzeto po NPTEL, 2011)

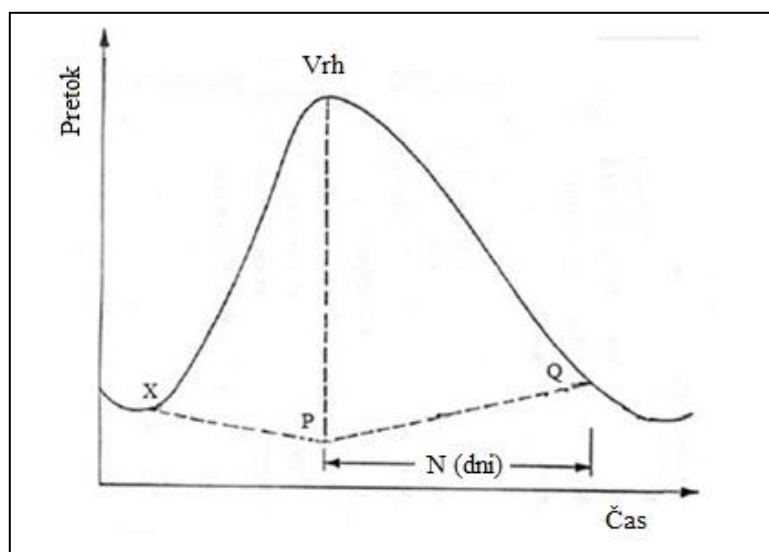
Metoda 1 je tro-točkovna metoda, kar pomeni, da je razmejitvena črta, ki ločuje bazni odtok od površinskega odtoka, sestavljena iz treh točk, ki jih določimo na hidrogramu. Začetek naraščanja hidrograma, točko X, povežemo s točko P. Točka P se nahaja direktno pod vrhom hidrograma in predstavlja vršni odtok (slika 17). Od točke P dalje, narišemo ravno črto PQ, ki seka hidrogram v točki Q (NPTEL, 2011). Ta metoda je pogosto uporabljena v praksi.

Na upadajočem delu hidrograma določimo točko Q v tisti točki, kjer površinski odtok preneha in postane bazni odtok celotni odtok. Točko Q določimo s pomočjo sledeče empirične zveze (Brodie et al., 2005):

$$N = 0,862A^{0,2} \quad [h, dni] \quad (42)$$

Kjer je:

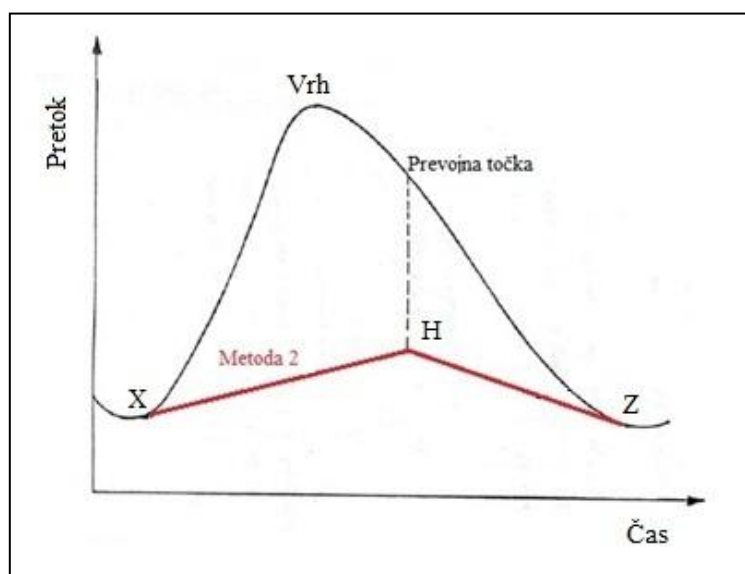
- N je število dni od prenehanja nevihte do prenehanja površinskega odtoka (slika 18),
- A je površina prispevnega območja v kvadratnih kilometrih,
- vrednost eksponentne funkcije (0,2) je odvisna od značilnosti prispevnega območja, ki so: naklon, vegetacija in geologija območja.



Slika 18: Razdalja N na hidrogramu

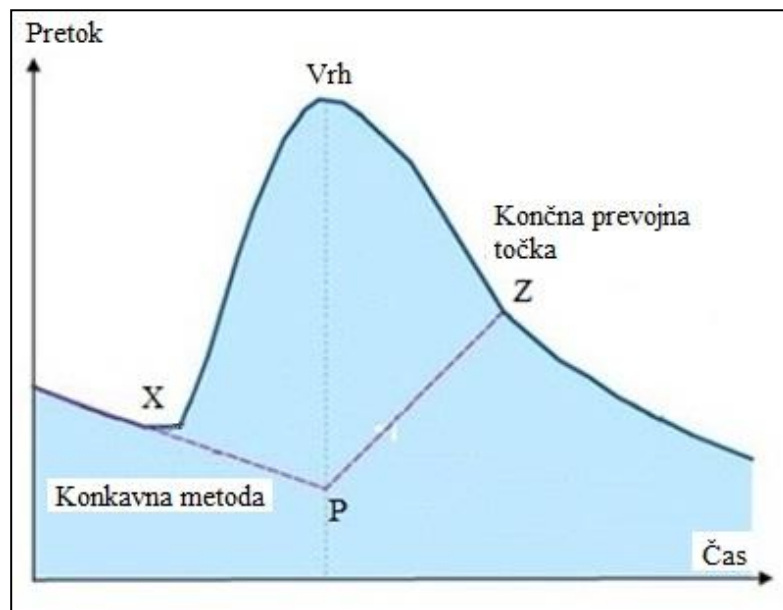
- **Metoda 2**

To metodo pogosto uporabimo takrat, ko je bazni odtok relativno velik in hitro doseže strugo vodotoka. Recesijska krivulja je podaljšana do točke H. Točka H se nahaja direktno pod prevojno točko. Daljico XH narišemo od točke X, v kateri začne del hidrograma naraščati, do točke H. Pretok pod daljico XH in HZ je bazni odtok (slika 19). Včasih točke X in H ter H in Z povežemo z rahlo ukrivljenimi krivuljami (MOST, 2011).



Slika 19: Grafična metoda 2 za izločanje baznega odtoka (Povzeto po MOST, 2011)

- **Metoda 3: Tro-točkovna ali konkavna metoda**



Slika 20: Konkavna metoda za izločanje baznega odtoka (Povzeto po Brodie et al., 2005)

Na sliki 20 je predstavljena metoda 3, ki temelji na določitvi konkavne razmejitvene črte.

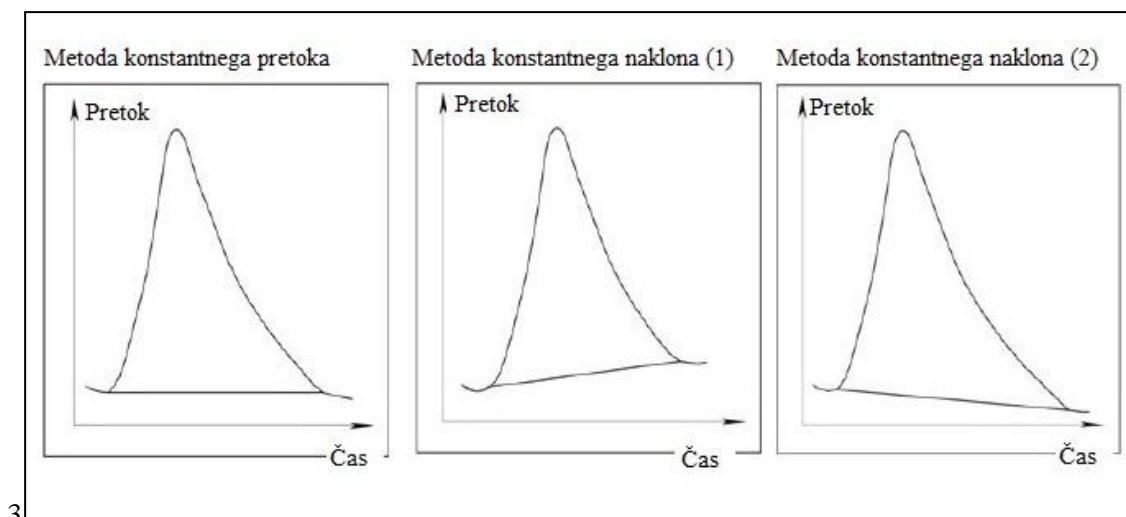
Razmejitveno črto, ki loči površinski pretok od baznega odtoka, določajo tri točke:

- *Točka X* je začetna prevojna točka v kateri začne naraščajoči del hidrograma naglo rasti;
- *Točka P* seka vertikalo vrha hidrograma in je v smeri osi y pozicionirana nižje od točke X, ker sledi trendu padajoče recesijske krivulje;
- *Točka Z* je končna prevojna točka na upadajočem delu hidrograma. Nahaja se v točki v kateri se krivulja spremeni v premico.

Konkavna metoda prikaže trend upadanja baznega odtoka v času naraščanja dela hidrograma. Minimum baznega odtoka je dosežen v trenutku najvišje točke visokovodnega vala. Po vrhu visokovodnega vala začne bazni odtok naglo naraščati, del celotnega hidrograma pa upadati. Bazni odtok povežemo s končno prevojno točko Z in prikažemo zakasnelo povečanje baznega odtoka (Brodie et al., 2005).

3.6.3 Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno črto

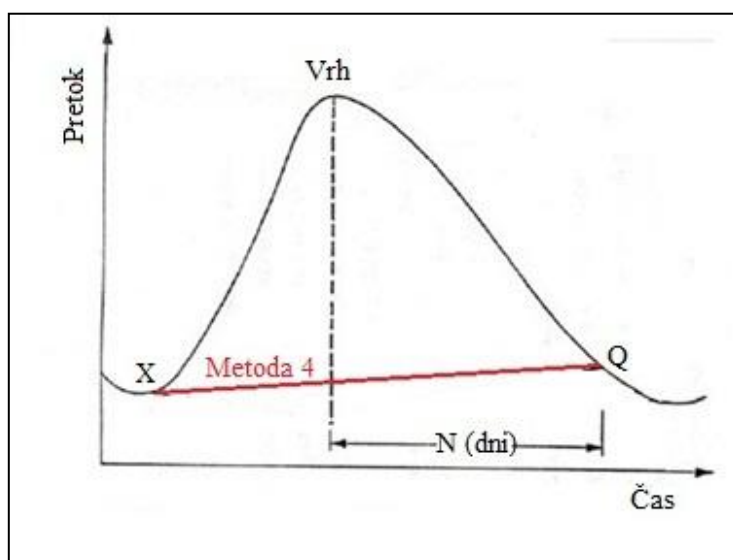
Pregled grafičnih metod izločanja baznega odtoka z ravno črto je prikazane na sliki 21.



Slika 21: Grafične metode izločanja baznega odtoka z ravno črto (Povzeto po Pandi, 2010).

- **Metoda 4: Dvo-točkovna metoda**

Ta metoda predstavlja modificirano, zgoraj opisano, metodo 1. Na hidrogramu z ravno črto povežemo točki X in Q.

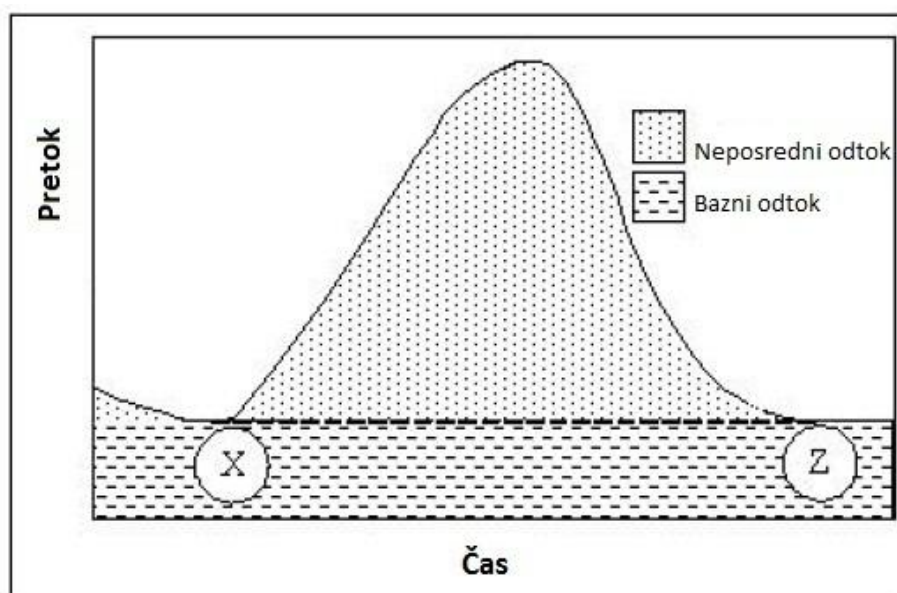


Slika 22: Grafična metoda 4 za izločanje baznega odtoka

Točka X je v točki kjer začne hidrogram naraščati. Točka Q je na hidrogramu N dni po vrhu visokovodnega vala. Razdaljo N [ur, dni] izračunamo z enačbo (42) in predstavlja število dni ali ur od prenehanja nevihte do prenehanja površinskega odtoka. Na sliki 22 je predstavljena opisana metoda.

- **Metoda 5: Metoda konstantnega pretoka**

Bazni odtok od celotnega odtoka hidrograma ločimo tako, da točko X povežemo s točko Z. Ta metoda ne velja za najbolj natančno (NPTEL, 2011).



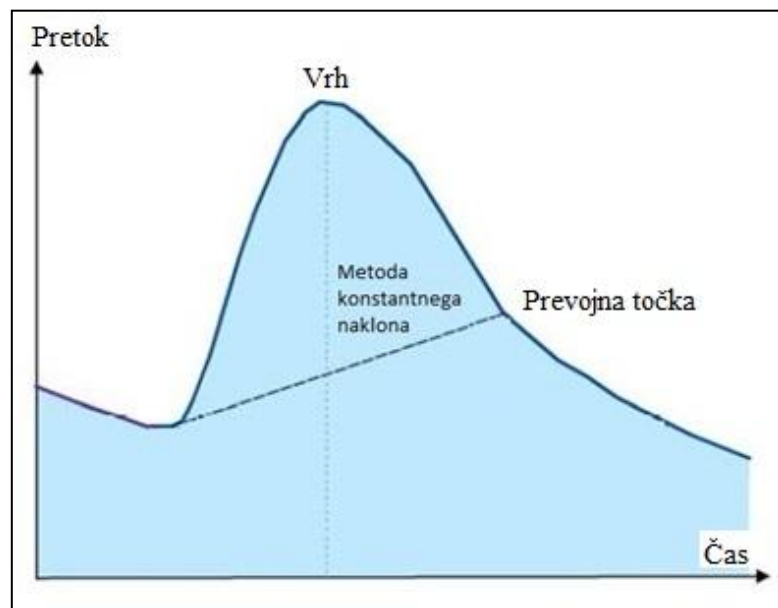
Slika 23: Metoda konstantnega pretoka za izločanje baznega odtoka (Povzeto po NPTEL, 2011)

Metoda konstantnega odtoka predvideva, da je bazni odtok konstanten tekom hidrograma nevihte (Linsley et al., 1958). Neposredno pred začetkom naraščanja hidrograma, tako kot je prikazani na sliki 23, vzamemo minimalno vrednost pretoka kot konstantno vrednost baznega odtoka (Brodie et al., 2005). Tok pod črto XZ predstavlja bazni odtok. Točka X je najnižja točka na naraščajočem delu in točka Z je najnižja točka na upadajočem delu hidrograma. Točki sta določeni s tangento na vejo hidrograma. Visokovodni val razmejimo vzporedno z osjo x. Med poplavnim obdobjem se dotok podzemnih voda v hidrografsko prispevno območje ne spremeni (Pandi, 2010).

- **Metoda 6**

- **Metoda konstantnega naklona (1)**

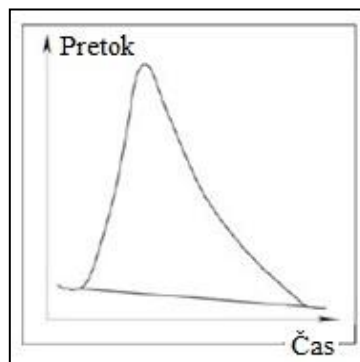
Metoda konstantnega naklona (1) je prikazana na sliki 24. Z ravno črto povežemo začetek naraščajočega dela s prevojno točko upadajočega dela hidrograma. Upoštevan je takojšnji odziv baznega odtoka na dogodek padavin. (Brodie et al., 2005). Logično je, da se na koncu poplavnega obdobja poveča dotok podzemnih voda v vodotok in ne na začetku. (Pandi, 2010).



Slika 24: Metoda konstantnega naklona (1) za izločanje baznega odtoka (Povzeto po Brodie et al., 2005)

- **Metoda konstantnega naklona (2)**

Začetno točko na naraščajočem delu navzdol povežemo z ravno črto s točko na upadajočem delu hidrograma (slika 25). Takšen način izločanja baznega odtoka je redek in specifičen (Pandi, 2010).



Slika 25: Metoda konstantnega naklona (2) za izločanje baznega odtoka (Povzeto po Pandi, 2010)

3.6.4 Grafična metoda izločanja baznega odtoka s sestavljeno recesijsko krivuljo

V ta sklop metod spadajo grafične metode, ki bazni odtok na hidrogramu izločijo s sestavljeno recesijsko krivuljo.

- **Metoda 7**

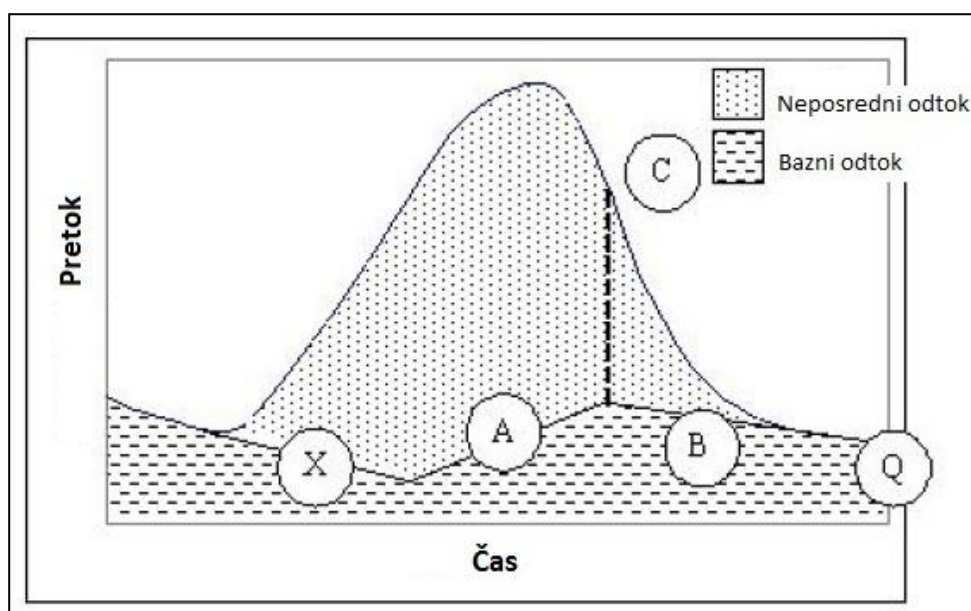
Metoda za izločitev baznega odtoka uporabi sestavljeno recesijsko krivuljo baznega odtoka. Pomembne so sledeče točke (slika 26):

X-A sledi trendu začetnega baznega odtoka recesijske krivulje pred začetkom neposrednega odtoka hidrograma;

B-Q sledi trendu kasnejše faze baznega odtoka recesijske krivulje;

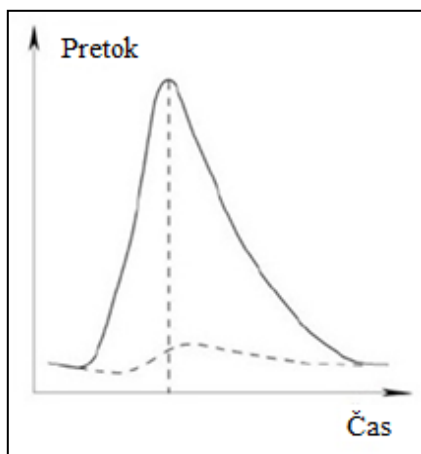
B leži na hidrogramu pod točko C, ki je prevojna točka.

Po izločitvi baznega odtoka dobimo hidrogram neposrednega odtoka (NPTEL, 2011).



Slika 26: Grafična metoda izločanja baznega odtoka s krivuljo (Povzeto po NPTEL, 2011)

Uporaba metode izločanja baznega odtoka s krivuljo je predvsem teoretična metoda, ki upošteva različne modele dotekanja podzemnih voda. Modeli dotekanja podzemnih voda so odvisni od zveze med višino vode vodotoka in višino vode podzemnih voda na začetku poplave, ter od vpliva drugih lokalnih dejavnikov (Pandi, 2010).

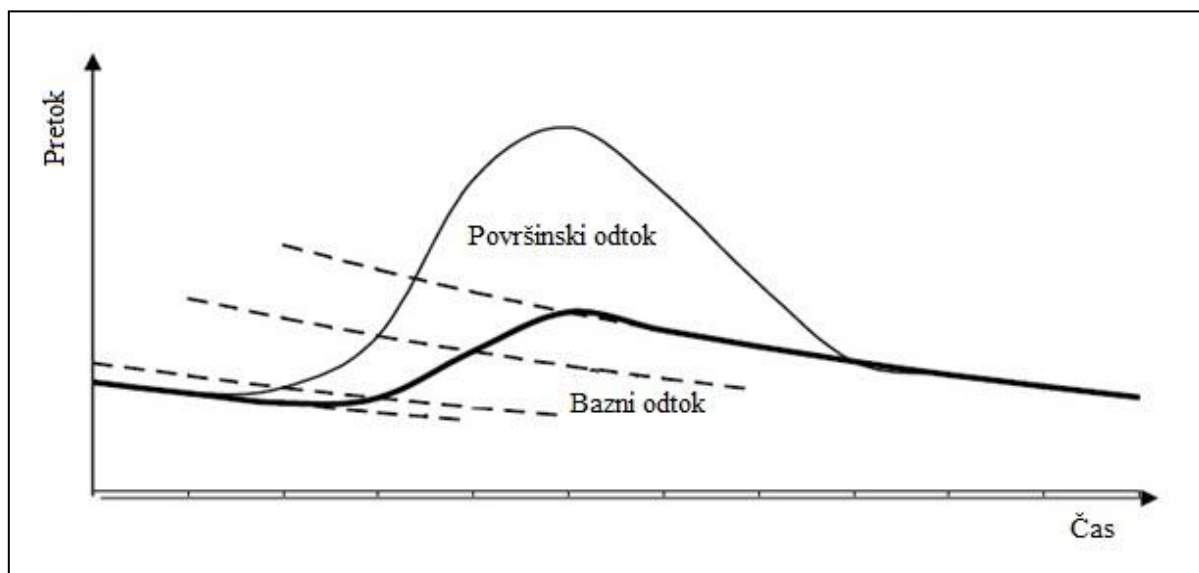


Slika 27: Metoda 7 za izločanje baznega odtoka (Povzeto po Pandi, 2010).

Slika 27 prikazuje grafično metodo izločanja baznega odtoka s sestavljeno recesijsko krivuljo.

- **Metoda 8: Wittenbergova metoda**

Recesijska krivulja baznega odtoka seka naraščajoči del hidrograma. Pod vrhom celotnega hidrograma se nahaja vrh baznega hidrograma. Vrednosti naraščajočega baznega dela hidrograma dobimo kot izračun recesije za en časovni korak naprej za vsako dano vrednost površinskega pretoka.



Slika 28: Wittenbergova metoda (Povzeto po Cimen et al., 2004)

3.6.5 Vključenost analitičnih algoritmov v grafične metode

Poznani metodi, ki sta v grafično metodo vključili analitične algoritme sta (WMO, 1994):

- **Metoda USDA**

Metodo USDA-ARS je razvilo Ameriško ministrstvo za kmetijstvo (USDA-ARS, 1973). Metoda temelji na masni bilanci in predpostavlja dvokomponentni model. Tri enačbe se uporablja za izločanje baznega odtoka v odvisnosti od obdobja. Obdobja se delijo na večanje vlažnosti tal, polnjenje podzemnih voda in recesija. Ta obdobja se vidijo na hidrogramu kot naraščajoči del, vrh in padajoči del hidrograma. S pomočjo enačb dobimo razmejitevno črto. Ob tem velja predpostavka, da se zbiralnik podzemne vode vede kot en sam linearni zbiralnik tekom polnjenja z vodo in recesije.

- **Nazeerjeva metoda**

Metoda, ki jo je razvil Nazeer (leta 1989), v prvem koraku uporabi katerokoli metodo za izločanje baznega odtoka in tako na hidrogramu definira razmejitevno črto. V drugem koraku se izračuna koeficient oblike z uporabo algoritma, ki se nanaša na čas do vršnega pretoka. S koeficientom oblike preoblikujemo krivuljo baznega odtoka dokler ne sovпада s koeficientom oblike hidrogramske krivulje.

3.6.6 Izločanje baznega odtoka na kompleksnih hidrogramih

Metode izločanja baznega odtoka na kompleksnih hidrogramih se razlikujejo od izločanja baznega odtoka na enostavnih hidrogramih. Kompleksni hidrogram je hidrogram z več vrhovi, ki niso ločeni s krivuljo izčrpavanja baznega odtoka. Krivulja izčrpavanja kaže znižanje odtoka ali pretoka zaradi izčrpavanja.

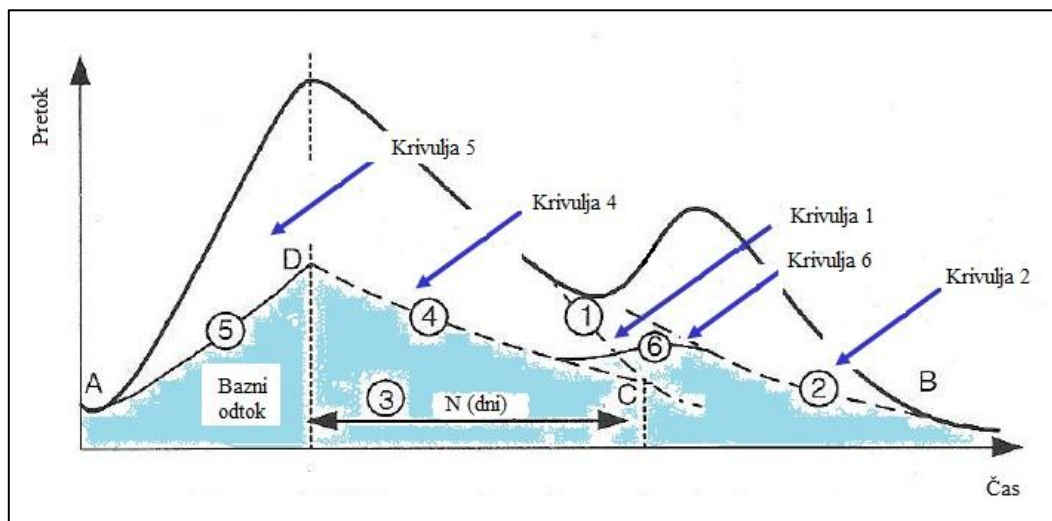
3.6.6.1 Osnovni principi izločanja baznega odtoka na kompleksnih hidrogramih

- **Metoda 1**

Bazni odtok izločimo postopno, tako da med seboj povežemo več sledečih krivulj (Akintuğ, 2005):

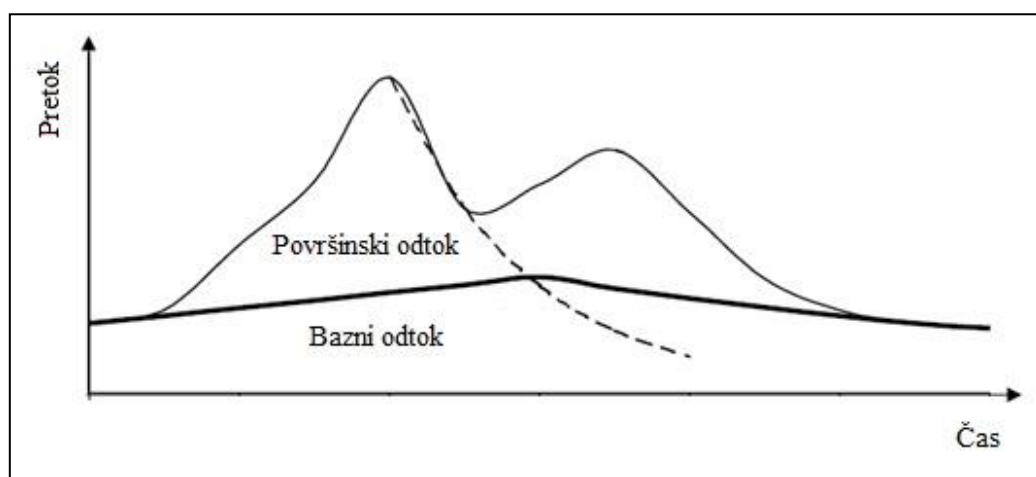
- *Krivulja 1:* Recesijska krivulja prvega vrha hidrograma se zaključi z recesijskim delom celotnega hidrograma. To pomeni, da recesijsko krivuljo prvega vrha podaljšamo z vzporedno recesijsko krivuljo.
- *Krivulja 2:* Krivulja izčrpavanja baznega odtoka je podaljšana od desne proti levi.
- *Črta 3:* Razdalja N je izračunana po enačbi (42).

- *Krivulja 4*: Narišemo krivuljo, ki je vzporedna s krivuljo 2 in sicer od točke C do točke D. Točka D je tam, kjer krivulja 4 seka vertikalno prvega vršnega pretoka.
- *Krivulja 5*: Točko D povežemo s prvo prevojno točko na naraščajočem delu prvega vrha hidrograma.
- *Krivulja 6*: V kolikor se krivulja 4 ne poveže gladko s krivuljo 2, se jih med seboj poveže s krivuljo 6, tako kot je to prikazano na sliki 29.



Slika 29: Metoda 1-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu (Povzeto po Akintuğ, 2005)

- **Metoda 2**

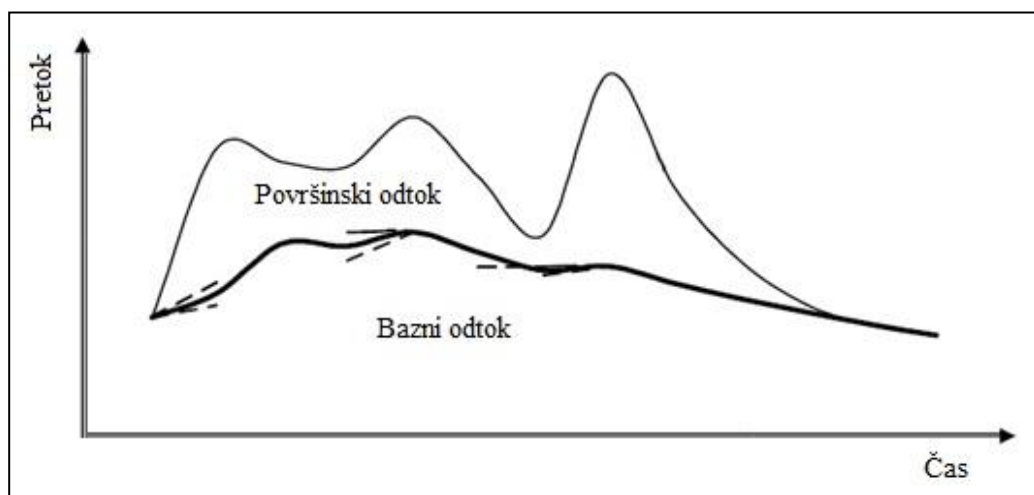


Slika 30: Metoda 2-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu (Povzeto po Cimen et al., 2005)

Na sliki 30 sta recesijska krivulja površinskega odtoka iz prejšnjega padavinskega dogodka in recesijska krivulja baznega hidrograma združeni. Ta točka in točka v kateri začne hidrogram naraščati sta povezani z ravno črto.

- **Metoda 3**

Sledečo metoda se lahko uporabi pri izločanju baznega odtoka na enostavnih hidrogramih kot tudi na kompleksnih hidrogramih.



Slika 31: Metoda 3-izločanje baznega odtoka na kompleksnem hidrogramu (Povzeto po Cimen et al., 2005)

Izračunano recesijsko krivuljo baznega odtoka podaljšamo v nasprotni smeri, vse do vrha površinskega hidrograma in tako dobimo končno vrednost vrha baznega odtoka (slika 31). Z vodoravno črto povežemo to točko in začetno točko naraščajočega dela končnega hidrograma površinskega odtoka ter z ravno črto povežemo končni vrh hidrograma baznega odtoka z začetno točko prvega naraščajočega dela hidrograma površinskega odtoka. Glede na število vrhov površinskega hidrograma, se postopek ponavlja. Krivulje so izrisane s pomočjo formule (37) (Cimen et al., 2005).

- **Metoda 4: Konstantna k -metoda**

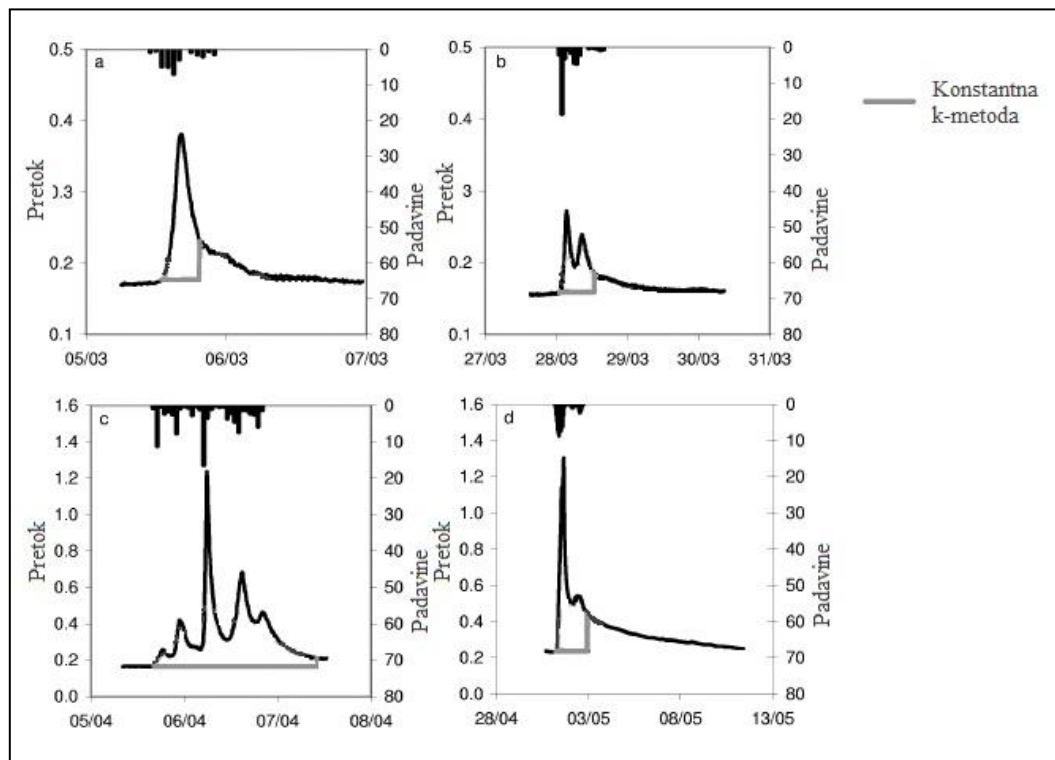
Konstantna k -metoda objektivno določi končno prevojno točko. Predpostavlja, da je zadrževanje podzemne vode oz. baznega odtoka linearno ter da recesijska krivulja eksponentno pada. Pri določanju recesijskega koeficienta k , kot je to prikazano v enačbi (43), lahko opredelimo trenutek t_e , po katerem je recesijski koeficient k približna konstanta. Trenutek t_e je opredeljen kot konec dogodka odtoka, recesijski koeficient k pa se za vsako točko izračuna po sledeči enačbi (Blume et al., 2007):

$$k = -\frac{dQ}{dt} \times \frac{1}{Q(t)} \quad [1/\text{min}] \quad (43)$$

Pri nizko pretočnih razmerah, ko se pretok Q približa vrednosti nič, postane recesijski koeficient k zelo občutljiv na majhne spremembe v pretoku. Da bi zmanjšali občutljivost recesijskega koeficienta k v odvisnosti od pretoka Q , vse dogodke standardiziramo glede na vrednost pretoka Q prejšnjega dogodka in tako modificiramo izhodišča. Poudariti moramo, da z uporabo zgornje enačbe (43) z modificiranimi časovnimi intervali pretokov, ne dobimo vrednosti realnega recesijskega koeficienta k , ampak stabiliziran recesijski koeficient k^* . Natančna vrednost k nas ne zanima, pač pa njegovo napredovanje v daljšem časovnem obdobju.

Končna točka dogodka na recesijski krivulji je tam, kjer se gradient recesijskega koeficienta k^* najbolj približa vrednosti nič oz. tam, kjer k^* postane konstanta.

Na sliki 32 vidimo štiri različne primere izločanja baznega odtoka s konstantno k -metodo.

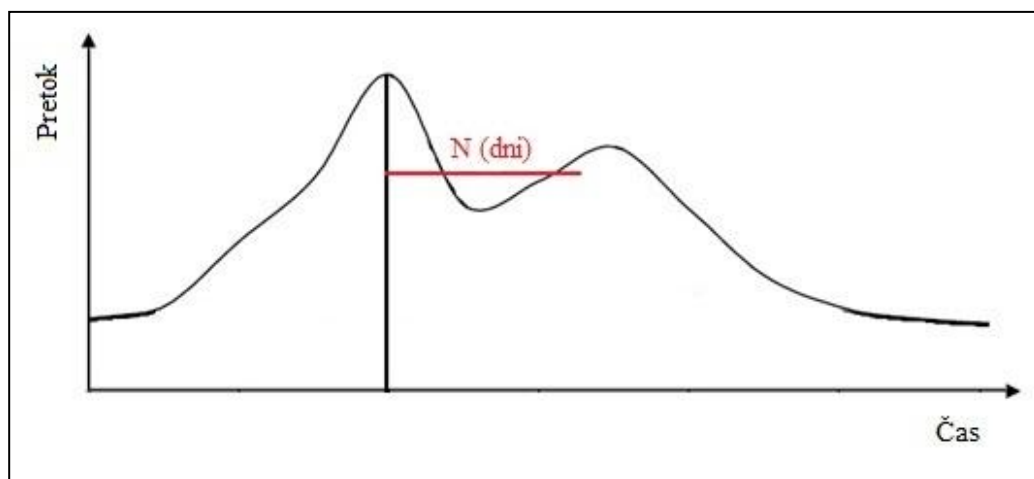


Slika 32: Primeri izločanja baznega odtoka s konstantno k -metodo (Povzeto po Blume et al., 2007)

Za to metodo velja, da je določitev končne prevojne točke na hidrogramu bolj objektivna od drugih grafičnih metod in se jo lahko aplicira tudi na kompleksne hidrograme. To metodo lahko brez težav avtomatiziramo in tako omogočimo hitrejšo obdelavo obsežnih nizov podatkov.

3.6.6.2 Neodvisnost zaporednih konic visokovodnega vala

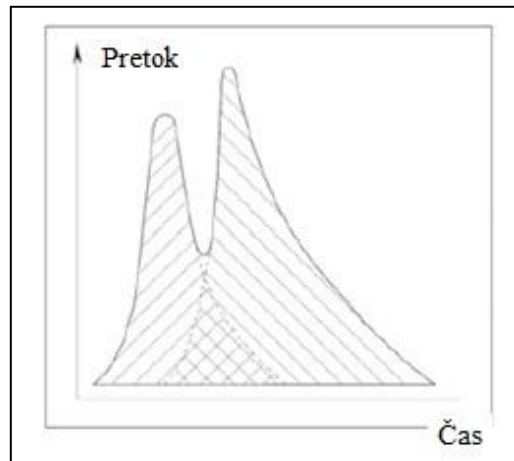
Neodvisnost zaporednih konic hidrograma nam pove ali lahko zaporedni konici hidrograma ločimo in ju obravnavamo kot dva neodvisna visokovodna vala. Neodvisnost zaporednih konic preverimo z izračunom razdalje N , ki jo izračunamo po enačbi (42) in naneseemo na hidrogram od konice hidrograma v pozitivni smeri osi x , tako kot je to prikazano na sliki 33. Izračunana razdalja N nam pove koliko časa je potrebno od prenehanja nevihte do prenehanja površinskega odtoka. Zaporedni konici hidrograma sta neodvisni takrat, ko se razdalja N ne dotakne naslednjega naraščajočega oz. prejšnjega padajočega dela hidrograma.



Slika 33: Odvisni zaporedni konici visokovodnega vala (Povzeto po Cimen et al., 2005)

3.6.6.3 Poenostavljena ekstrapolacija dveh zaporednih konic pretoka visokovodnega vala

V primeru visokovodnega vala z dvema zaporednima konicama pretoka, lahko takšen visokovodni val zelo enostavno poenostavimo. Z ekstrapolacijo naraščajočega ali upadajočega dela hidrograma tako ločimo tudi dva zaporedna visokovodna vrha (slika 34). Oblika ekstrapoliranega odseka se približa varianci trenda v tistem delu, ki je bil odrezan. Pri tej metodi se pojavljajo napake, ker so predpostavljene nepoznane regulacije variacij (Pandi, 2010).



Slika 34: Metoda izločanja baznega odtoka dveh zaporednih konic pretoka visokovodnega vala (Povzeto po Pandi, 2010)

4 ANALIZA VISOKOVODNIH VALOV SAVE V ŠENTJAKOBU

4.1 Vhodni podatki

V Sloveniji za pridobivanje in shranjevanje uradnih hidroloških podatkov skrbi Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Hidrološki podatki v omejenem obsegu so objavljeni na spletni strani agencije <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/> in v hidroloških letopisih (ARSO, 2011).

Podatki o poplavnih dogodkih, so poleg konvencionalnih hidroloških podatkov temeljna osnova za upravljanje vodnih virov, reševanje problemov s tega področja in za znanstvene raziskave. Prav podatki so bistveni element tehničnih informacijskih sistemov. Moramo se zavedati, da so tehnični informacijski sistemi brez kvalitetnih in pravih podatkov brez vrednosti. Dandanes si ne moremo predstavljati, da bi živeli v družbi brez informacijskih sistemov, saj jih dnevno potrebuje celotna družba, od javne uprave, gospodarstva in do znanosti (Bergmann et al., 1990). V kolikor nimamo kvalitetnih in pravih vhodnih podatkov, so tudi naše ugotovitve nezanesljive in je posledično analiziranje brez večjega pomena. Prav tako je pomembno, da pri analiziranju obravnavamo daljše časovno obdobje.



Slika 35: Merilno mesto: Sava-Šentjakob (ARSO, 2011)

Na sliki 35 je prikazano merilno mesto na reki Savi v Šentjakobu. Vsi uporabljeni podatki so s tega merilnega mesta.

Pri analizi visokovodnih valov, smo uporabili več vrst podatkov o pretokih na vodomerni postaji Šentjakob na reki Savi (ARSO, 2011):

- *Srednje dnevne vrednosti pretokov*: povprečje dnevnih urnih pretokov;
- *Urne vrednosti pretokov*: izmerjena vrednost pretoka ob vsaki polni uri (slika 36);
- *Mesečne maksimalne in minimalne pretoke*: izmerjene najvišje in najnižje vrednosti pretoka ob točno določeni uri.

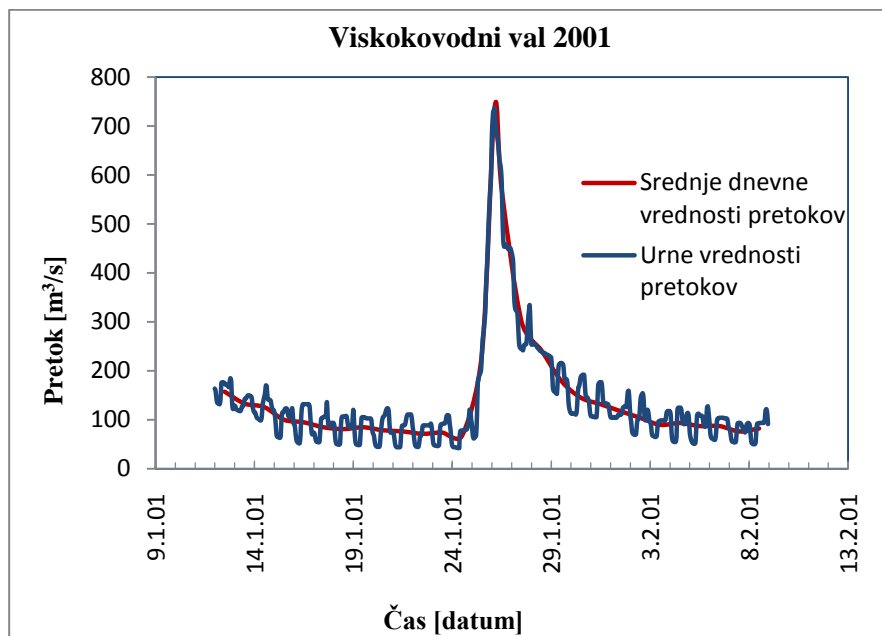
4.1.1 Izbira ustreznih podatkov

Pri hidroloških analizah so pravilni in točni vhodni podatki izrednega pomena, saj so poleg pravilne izbire metode, le ti ključnega pomena za pravilnost analiz in posledično njihovo aplikativno uporabnost. Odločiti smo se morali kateri podatki, dnevni ali urni, so bolj primerni za analiziranje visokovodnih valov.

Urne in dnevne podatke smo primerjali na naključno izbranih visokovodnih valovih:

- visokovodni val leta 2001,
- visokovodni val leta 2005,
- visokovodni val leta 2010.

Pri tem je potrebno opozoriti, da so pri vseh izračunih z dnevnimi vrednostmi pretokov upoštevane tudi absolutne konice posameznih valov.



Slika 36: Prikaz urnih in srednjih dnevni vrednosti pretokov visokovodnega vala

Z metodo 3 in metodo 4 izločanja baznega odtoka (poglavji 3.6.2 in 3.6.3) smo analizirali sledeče vrednosti parametrov:

- volumen površinskega odtoka V_p ,
- trajanje visokovodnega vala T_t ,
- konico $vQvk$.

Osredotočili smo se na odstopanja med parametri visokovodnega vala glede na uporabljene podatke in ali izbrani podatki kakorkoli vplivajo na uporabnost metode, kot sta čas in težavnost izvedbe metode.

Preglednica 1: Primerjava parametrov določenih z metodo 4 izločanja baznega odtoka.

Leto	Volumen V_{pd} [m^3]	Volumen V_{ph} [m^3]	Razmerje volumnov V_{pd}/V_{ph}	Trajanje T_t [h]	Trajanje T_t [dni]	Konica pretoka $vQvk$ [$m^3 s^{-1}$]
2001	94.131.705,33	90.562.462,63	1,04	118,53	5,69	737,40
2005	89.389.525,43	85.135.938,66	1,05	147,66	7,19	590,73
2009	307.412.550,76	284.484.867,93	1,08	167,41	7,15	1.357,61

Preglednica 2: Primerjava parametrov določenih z metodo 3 izločanja baznega odtoka.

Leto	Volumen V_{pd} [m^3]	Volumen V_{ph} [m^3]	Razmerje volumnov V_{pd}/V_{ph}	Trajanje T_t [h]	Trajanje T_t [dni]	Konica pretoka $vQvk$ [$m^3 s^{-1}$]
2001	127.472.235,54	116.418.113,77	1,09	240,00	10,00	737,40
2005	108.984.165,75	107.072.044,87	1,02	213,00	9,00	590,73
2009	351.328.277,12	346.475.407,90	1,01	230,00	9,01	1.357,61

Kjer je:

- V_{pd} površinski volumen izračunan iz srednjih dnevni pretokov po tro-točkovni metodi izločanja baznega odtok,
- V_{ph} površinski volumen izračunan iz urnih vrednosti pretokov po dvo-točkovni metodi izločanja baznega odtok,
- T_t časovno trajanje visokovodnega vala.

Površinski volumen izračunan iz srednjih dnevni vrednosti pretoka je pri vseh analiziranih visokovodnih valovih, ne glede na uporabljeno metodo, večji od volumna površinskega odtoka izračunanega iz urnih vrednosti pretoka. Seveda pa smo izračune izvedli le na treh valovih, kar je za kakršnekoli končne zaključke seveda premalo.

Z uporabo metode 4 (dvo-točkovna metoda) izločanja baznega dotoka so vrednosti površinskega odtoka izračunanega iz srednjih dnevni vrednosti pretoka (z dodano absolutno konico) od 4% do 8% večje od površinskega volumna izračunanega iz urnih vrednosti pretoka. Pri uporabi metode 3 (tro-točkovna metoda) izločanja baznega odtoka pa so vrednosti površinskega pretoka izračunanega iz srednjih dnevni vrednosti pretoka od 1% do 9% večje od volumna površinskega odtoka izračunanega iz urnih vrednosti pretoka.

Pri odčitavanju prevojnih točk iz urnega hidrograma, tako pri metodi 4 kot pri metodi 3, je bilo potrebno krivuljo pred prevojnima točkama zgladiti zaradi lažjega odčitavanja le teh.

Konica hidrograma je enaka ne glede na to ali uporabimo dnevne ali urne podatke o pretokih, saj smo v obeh primerih upoštevali lokalno izmerjeno konico.

Hidrograma iz urnih in dnevni podatkov se že na prvi pogled razlikujeta (slika 36), saj so na hidrogramu iz urnih podatkov lepo vidna urna nihanja vrednosti pretokov, ki so posledica delovanja gorvodnih HE.

Sklepamo lahko, da nam urne vrednosti pretokov dajo bolj natančne vrednosti od srednjih dnevnih vrednosti pretokov. Vendar pa nam pri urnih vrednostih ravno ta nihanja povzročijo težave pri uporabi grafičnih metod izločanja baznega odtoka, saj zelo težko določimo prevojni točki. Iz tega razloga lahko pride do odstopanj tudi pri določanju časa trajanja posameznih valov na urnih in dnevnih hidrogramih. Prav tako določevanje prevojnih točk na urnem hidrogramu, zaradi glajenja krivulj, traja dalj časa kot določevanje prevojnih točk na dnevnem hidrogramu, kar pa ne vpliva na težavnost izvedbe metod. Glavni razlog za uporabo dnevnih vrednosti pa je bil zvezni niz dnevnih podatkov za daljše časovno obdobje, saj so bile urne vrednosti podatkov za izbrano postajo na voljo le od leta 1989 dalje.

4.1.2 Izbira visokovodnega vala

Visokovodni val je običajno posledica velike intenzitete padavin. Padavinam nato sledi naraščanje visokovodnih valov in zvišanje visokovodnih konic.

Pri verjetnostnih analizah in določanju pretokov z določeno povratno dobo se v praksi najpogosteje uporablja metodo letnih maksimumov. V novejšem času pa se poskuša pri takih analizah upoštevati tudi volumen in trajanje vala. Iz podatkov o visokovodnih konicah (mesečni pregled) se zato za vsako leto posebej določi letni maksimalni pretok (preglednica 3), nato pa za pripadajoč val še volumen in trajanje.

Preglednica 3: Primer določitve konice visokovodnega vala za leto 1989 (ARSO, 2011)

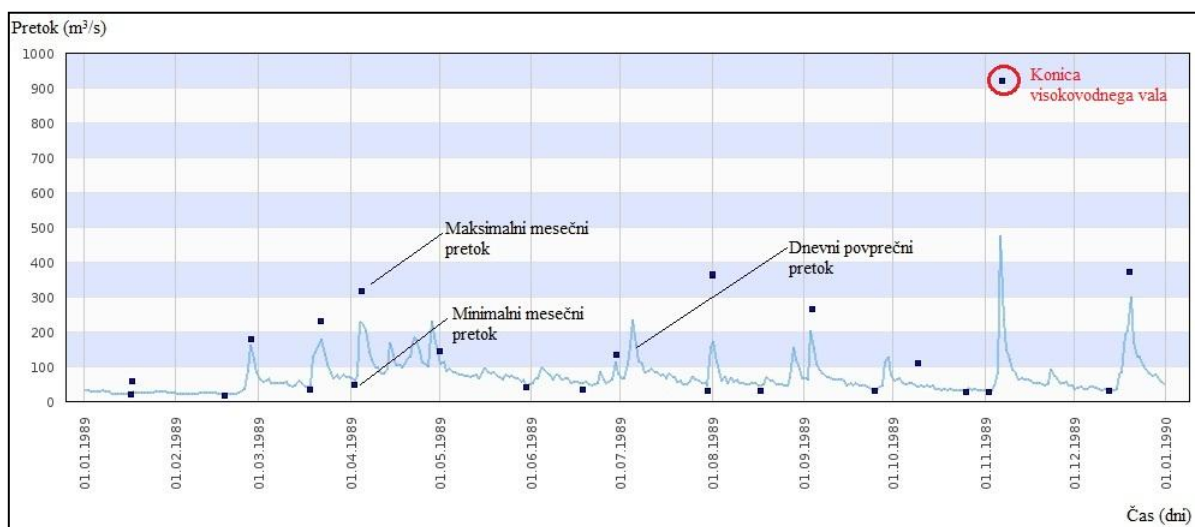
Mesec	Datum in ura	Mesečni maksimalni povprečni pretok	Letni maksimalni pretok
jan.89	17.01.1989 10:00:00	58,40	922,00
feb.89	26.02.1989 08:13:00	180,00	
mar.89	22.03.1989 00:30:00	230,00	
apr.89	04.04.1989 12:30:00	317,00	
maj.89	01.05.1989 00:00:00	145,00	
jun.89	29.06.1989 18:37:00	133,00	
jul.89	31.07.1989 23:59:00	362,00	
avg.89	01.08.1989 00:30:00	364,00	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 3

sep.89	03.09.1989 13:59:00	267,00	
okt.89	09.10.1989 09:48:00	112,00	
nov.89	06.11.1989 14:41:00	922,00	
dec.89	19.12.1989 22:00:00	374,00	

Iz grafičnega letnega pregleda pretokov smo določili obseg visokovodnega vala za nadaljnjo analizo.



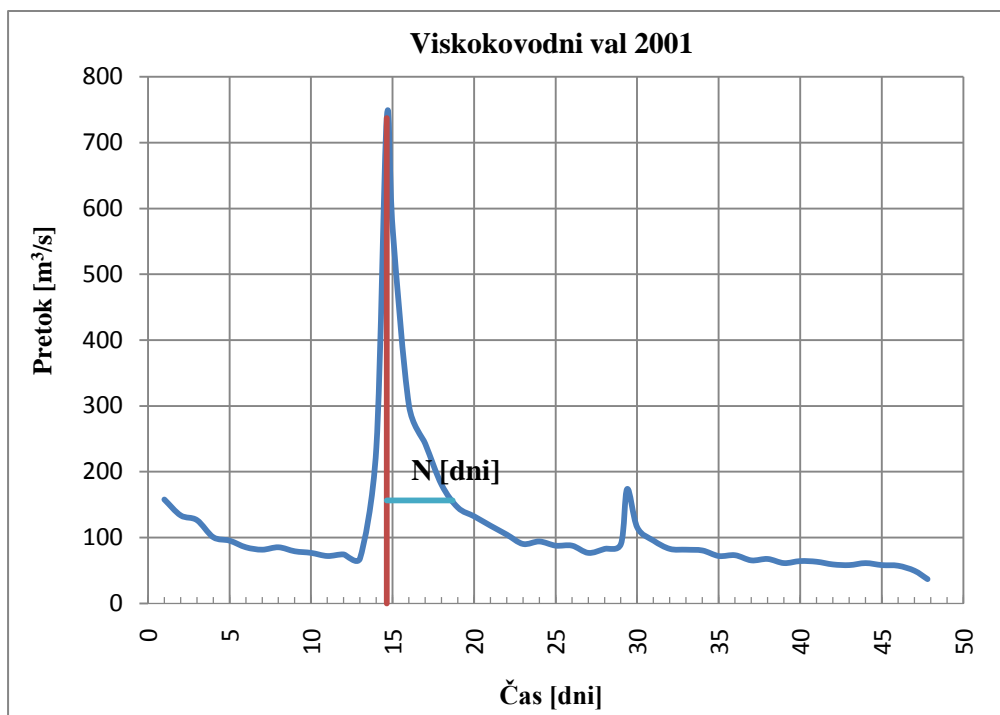
Slika 37: Primer grafičnega pregleda pretokov za leto 1989 (Povzeto po ARSO, 2011)

Črne pike na sliki 37 so točno izmerjeni maksimalni in minimalni pretoki. Modra črta predstavlja potek povprečnih dnevni vrednosti pretoka v odvisnosti od časa (ARSO,2011).

Hidrogram visokovodnega vala smo določili na podlagi kombinacije lokalno izmerjene konice in povprečnih dnevni vrednosti. Tak hidrogram visokovodnega vala je bil osnova za nadaljnje analize.

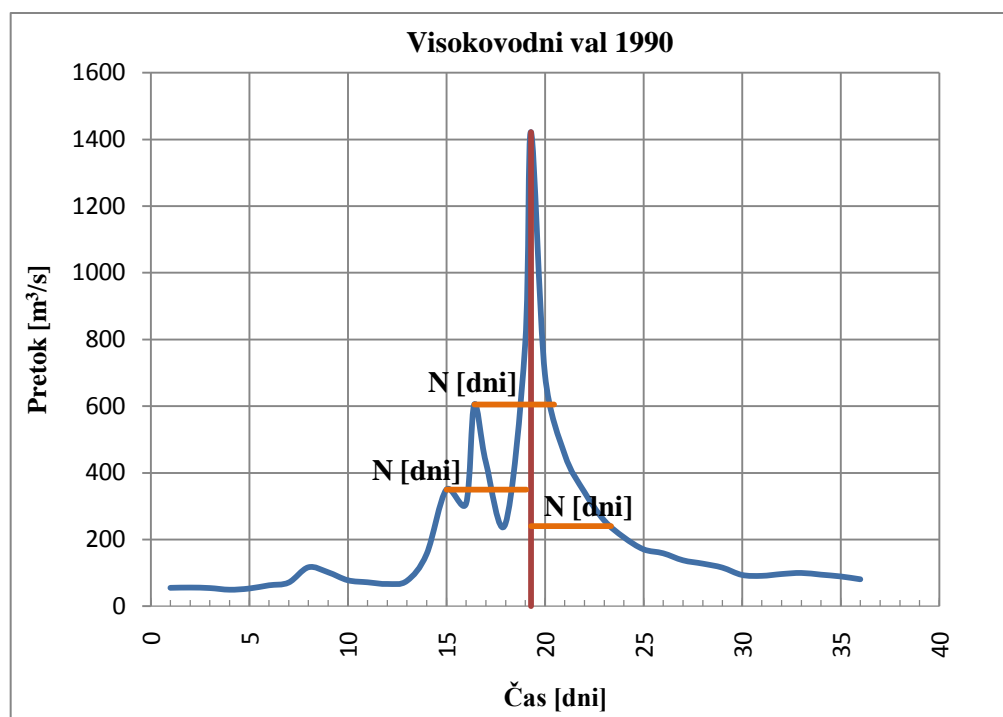
4.1.3 Kontrola neodvisnosti konic oz. določitev obsega vala

Pri določanju obsega visokovodnega vala je potrebno preveriti odvisnost oz. neodvisnost konic hidrograma.



Slika 38: Primer dveh neodvisnih konic hidrograma

Odvisnost oz. neodvisnost konic hidrograma se je določilo z izračunom števila dni od prenehanja nevihte do prenehanja površinskega odtoka. Za to smo uporabili enačbo (42). Izračunano razdaljo N [dni] se je nato naneslo v smeri osi x od konice hidrograma. V kolikor izračunana razdalja N [dni] ni dosegla naslednjega naraščajočega ali prejšnjega padajočega dela hidrograma, velja obravnavana konica hidrograma za neodvisno (slika 38). V primeru, da se je izračunana razdalja N [dni] padla v naslednji naraščajoči ali prejšnji padajoči del hidrograma, je obravnavana konica hidrograma vzeta kot odvisna. Visokovodni val, ko v obravnavano območje visokovodnega vala spadata tudi dve zaporedni konici pred vrhom hidrograma, je prikazan na sliki 39.



Slika 39: Primer odvisnih konic hidrograma.

4.2 Izločanje baznega odtoka s tremi izbranimi grafičnimi metodami

Grafične metode, ki smo jih uporabili za izločanje baznega odtoka so (poglavji 3.6.2 in 3.6.3):

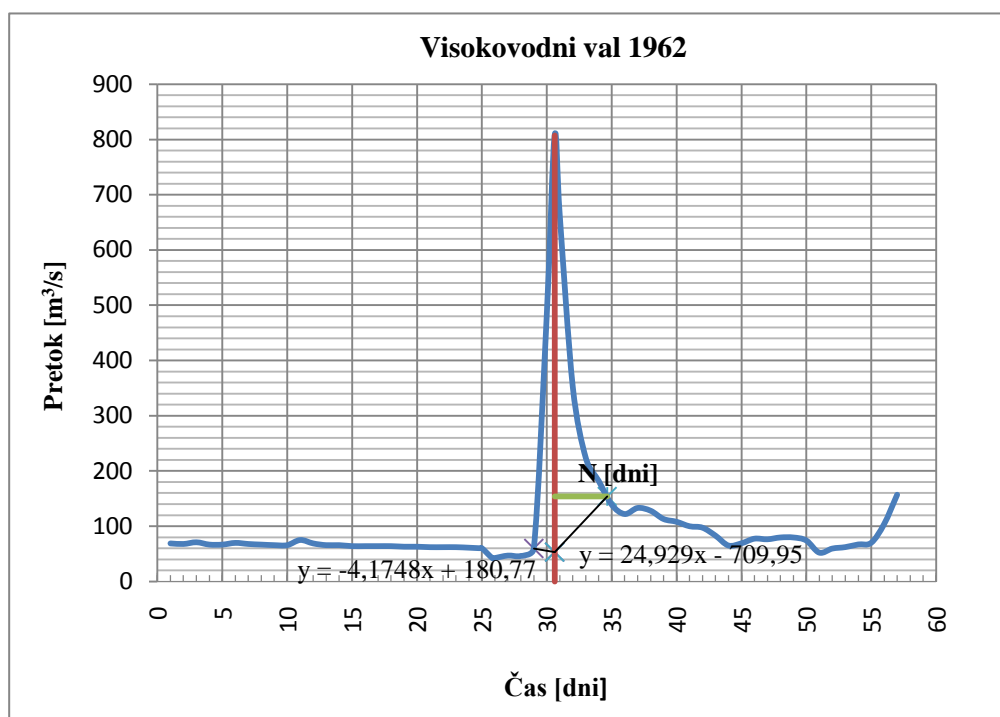
- Metoda 1: kombinacija tro-točkovne metode in razdalje N;
- Metoda 3: tro-točkovna metoda;
- Metoda 4: dvo-točkovna metoda;

Vse tri grafične metode smo uporabili na visokovodnih valovih Save v Šentjakobu, od leta 1961 do leta 2010.

Analizirali smo sledeče vrednosti parametrov v odvisnosti od izbrane metode:

- volumen površinskega odtoka V_p ,
- trajanje visokovodnega vala T_t ,
- konico površinskega pretoka $Q_{p,max}$.

4.2.1 Izločanje baznega odtoka z metodo 1 (kombinacija tro-točkovne metode in razdalje N)



Slika 40: Prikaz metode 1 na hidrogramu 1962

Preglednica 4: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 1

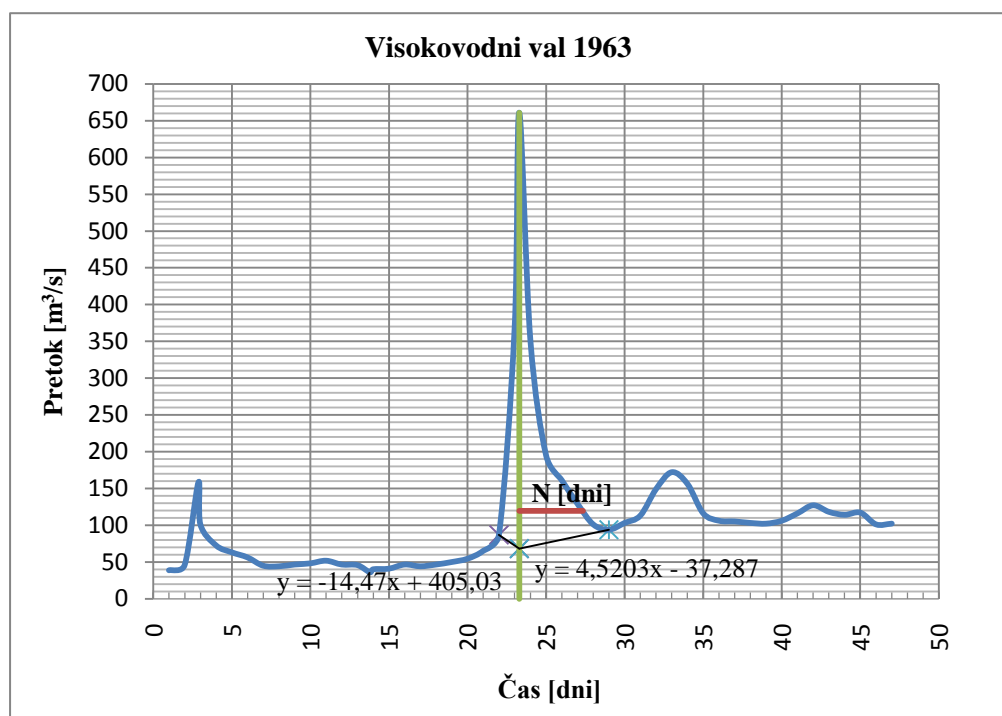
Leto	Volumen V_p [$10^6 m^3$]	Trajanje T_t [dni]	Konica pretoka $vQvk$ [$m^3 s^{-1}$]	Konica površinskega dela pretoka $Q_{p,max}$ [$m^3 s^{-1}$]	Začetek visokovodnega vala	Konec visokovodnega vala
1961	172	5,49	1.062,00	1.030,00	17.10.1961	23.10.1961
1962	133	5,65	807,00	754,00	4.3.1962	10.3.1962
1963	77	5,34	661,00	593,00	11.3.1963	16.3.1963
1964	210	6,80	1.019,00	929,00	23.10.1964	30.10.1964
1965	197	5,51	1.185,00	1.105,00	1.9.1965	7.9.1965
1966	201	5,80	1.237,00	1.157,00	3.11.1966	9.11.1966
1967	179	10,05	985,00	910,00	3.11.1967	13.11.1967
1968	156	11,38	941,00	901,00	15.9.1968	26.9.1968
1969	160	6,32	866,00	826,00	12.11.1969	18.11.1969
1970	181	11,13	685,00	658,00	13.11.1970	24.11.1970
1971	67	8,03	442,00	402,00	1.4.1971	9.4.1971
1972	153	10,26	742,00	672,00	10.5.1972	20.5.1972
1973	201	8,38	918,00	883,00	21.9.1973	29.9.1973

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 4

1974	99	10,55	617,00	582,00	23.6.1974	4.7.1974
1975	262	7,92	1.198,00	1.108,00	3.4.1975	11.4.1975
1976	138	12,05	622,00	582,00	30.11.1976	12.12.1976
1977	128	5,92	900,00	822,00	20.2.1977	26.2.1977
1978	47	4,86	489,00	453,00	28.1.1978	2.2.1978
1979	229	5,55	1.281,00	1.219,00	27.1.1979	2.2.1979
1980	319	14,05	1.151,00	1.126,00	7.10.1980	21.10.1980
1981	177	9,05	880,00	863,00	28.12.1981	6.1.1982
1982	250	9,26	1.339,00	1.309,00	9.11.1982	18.11.1982
1983	119	6,94	773,00	748,00	17.12.1983	24.12.1983
1984	123	6,83	797,00	752,00	21.9.1984	28.9.1984
1985	127	6,22	1.033,00	1.008,00	22.1.1985	28.1.1985
1986	104	5,47	915,00	865,00	27.8.1986	1.9.1986
1987	77	4,80	875,00	810,00	4.8.1987	9.8.1987
1988	65	5,31	563,00	528,00	20.8.1988	25.8.1988
1989	95	7,16	922,00	896,00	3.11.1989	10.11.1989
1990	255	9,34	1.422,00	1.312,00	27.10.1990	5.11.1990
1991	188	12,05	643,00	603,00	13.11.1991	25.11.1991
1992	199	7,53	1.089,00	1.039,00	2.12.1992	10.12.1992
1993	140	5,06	762,00	656,00	21.10.1993	26.10.1993
1994	76	5,72	537,82	497,82	13.9.1994	19.9.1994
1995	73	5,34	623,43	576,43	22.12.1995	27.12.1995
1996	210	8,34	1.012,96	982,96	14.11.1996	22.11.1996
1997	144	6,84	692,34	666,34	5.11.1997	12.11.1997
1998	164	5,24	1.054,16	914,16	5.10.1998	10.10.1998
1999	143	13,76	680,03	640,03	7.4.1999	21.4.1999
2000	370	10,93	1.217,00	1.182,00	31.10.2000	11.11.2000
2001	101	5,69	737,40	668,40	24.1.2001	30.1.2001
2002	250	17,60	749,08	699,08	17.11.2002	5.12.2002
2003	153	7,63	950,64	925,64	29.10.2003	6.11.2003
2004	155	6,64	1.123,63	1.051,63	29.10.2004	5.11.2004
2005	98	7,19	590,73	535,73	2.12.2005	9.12.2005
2006	84	5,71	749,52	714,52	4.3.2006	9.3.2006
2007	136	5,60	1.167,74	1.139,74	17.9.2007	23.9.2007
2008	167	10,56	697,34	662,34	29.11.2008	10.12.2008
2009	329	7,15	1.357,61	1.312,61	22.12.2009	29.12.2009
2010	234	6,83	1.237,15	1.197,15	16.9.2010	23.9.2010

4.2.2 Izločanje baznega odtoka z metodo 3 (tro-točkovna metoda)



Slika 41: Prikaz metode 3 na hidrogramu 1963

Predlednica 5: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 3

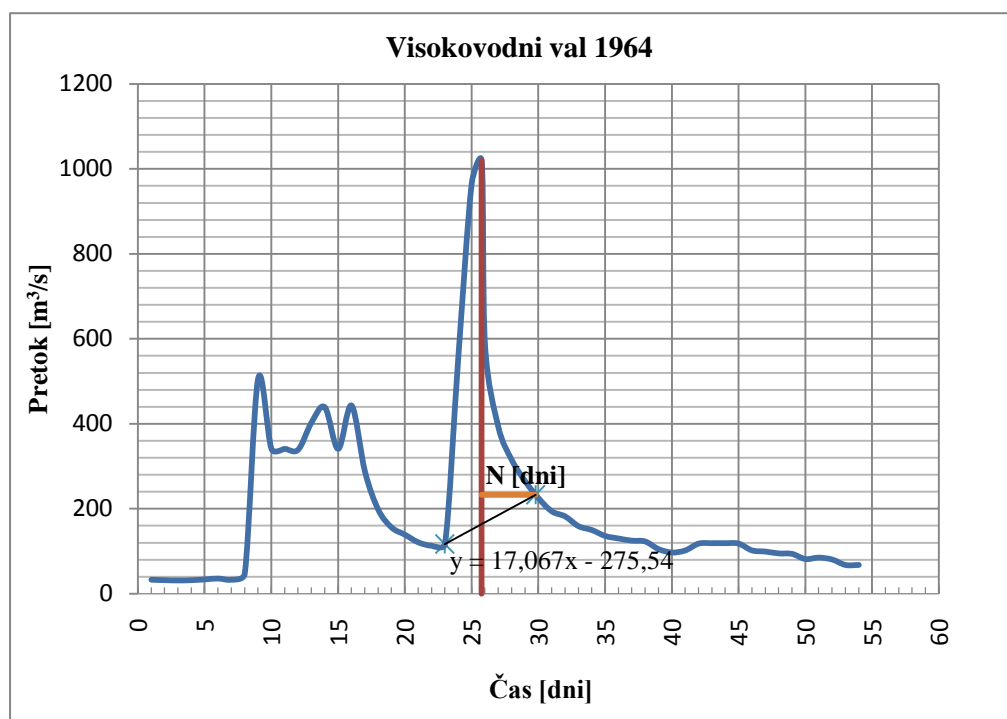
Leto	Volumen V_p [10^6 m^3]	Trajanje T_t [dni]	Konica pretoka $vQvk$ [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	Konica površinskega dela pretoka $Q_{p,max}$ [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	Začetek visokovodnega vala	Konec visokovodnega vala
1961	192	8,00	1.062,00	1.030,00	17.10.1961	25.10.1961
1962	144	7,00	807,00	754,00	4.3.1962	11.3.1962
1963	85	7,00	661,00	593,00	11.3.1963	18.3.1963
1964	232	9,00	1.019,00	929,00	23.10.1964	1.11.1964
1965	226	9,00	1.185,00	1.105,00	1.9.1965	10.9.1965
1966	221	8,00	1.237,00	1.157,00	3.11.1966	11.11.1966
1967	188	12,00	985,00	910,00	3.11.1967	15.11.1967
1968	171	13,00	941,00	901,00	15.9.1968	28.9.1968
1969	190	9,00	866,00	826,00	12.11.1969	21.11.1969
1970	199	13,00	685,00	658,00	13.11.1970	26.11.1970
1971	81	10,21	442,00	402,00	1.4.1971	11.4.1971
1972	187	15,00	742,00	672,00	10.5.1972	25.5.1972

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

1973	208	9,00	918,00	883,00	21.9.1973	30.9.1973
1974	120	15,00	617,00	582,00	23.6.1974	8.7.1974
1975	292	11,00	1.198,00	1.108,00	3.4.1975	14.4.1975
1976	151	13,00	622,00	582,00	30.11.1976	13.12.1976
1977	158	8,00	900,00	822,00	20.2.1977	28.2.1977
1978	59	8,00	489,00	453,00	28.1.1978	5.2.1978
1979	245	7,00	1.281,00	1.219,00	27.1.1979	3.2.1979
1980	371	17,00	1.151,00	1.126,00	7.10.1980	24.10.1980
1981	201	13,00	880,00	863,00	28.12.1981	10.1.1982
1982	279	13,00	1.339,00	1.309,00	9.11.1982	22.11.1982
1983	144	9,00	773,00	748,00	17.12.1983	26.12.1983
1984	146	10,00	797,00	752,00	21.9.1984	1.10.1984
1985	160	11,00	1.033,00	1.008,00	22.1.1985	2.2.1985
1986	111	7,00	915,00	865,00	27.8.1986	3.9.1986
1987	94	9,00	875,00	810,00	4.8.1987	13.8.1987
1988	82	8,00	563,00	528,00	20.8.1988	28.8.1988
1989	106	10,00	922,00	896,00	3.11.1989	13.11.1989
1990	276	11,00	1.422,00	1.312,00	27.10.1990	7.11.1990
1991	227	15,00	643,00	603,00	13.11.1991	28.11.1991
1992	220	10,00	1.089,00	1.039,00	2.12.1992	12.12.1992
1993	172	7,00	762,00	656,00	21.10.1993	28.10.1993
1994	96	8,00	537,82	497,82	13.9.1994	21.9.1994
1995	89	7,00	623,43	576,43	22.12.1995	29.12.1995
1996	250	11,00	1.012,96	982,96	14.11.1996	25.11.1996
1997	182	10,00	692,34	666,34	5.11.1997	15.11.1997
1998	177	6,00	1.054,16	914,16	5.10.1998	11.10.1998
1999	145	14,00	680,03	640,03	7.4.1999	21.4.1999
2000	386	12,00	1.217,00	1.182,00	31.10.2000	12.11.2000
2001	127	10,00	737,40	668,40	24.1.2001	3.2.2001
2002	259	20,00	749,08	699,08	17.11.2002	7.12.2002
2003	167	10,00	950,64	925,64	29.10.2003	8.11.2003
2004	163	8,00	1.123,63	1.051,63	29.10.2004	6.11.2004
2005	109	9,00	590,73	535,73	2.12.2005	11.12.2005
2006	89	7,40	749,52	714,52	4.3.2006	11.3.2006
2007	144	7,00	1.167,74	1.139,74	17.9.2007	24.9.2007
2008	169	11,00	697,34	662,34	29.11.2008	10.12.2008
2009	351	9,01	1.357,61	1.312,61	22.12.2009	31.12.2009
2010	247	8,00	1.237,15	1.197,15	16.9.2010	24.9.2010

4.2.3 Izločanje baznega odtoka z metodo 4 (dvo-točkovna metoda)



Slika 42: Prikaz metode 4 na hidrogramu 1964

Pri izračunu razdalje N , je velikost prispevne površine vodotoka Sava v Šentjakobu: 2.284,80 km² (Bat et al., 2008). Rezultat razdalje N je 4,048 dni oz. 97,160 h.

Preglednica 6: Parametri hidrograma pridobljeni z metodo 4

Leto	Volumen V_p [$10^6 m^3$]	Trajanje T_t [dni]	Konica pretoka vQ_{vk} [$m^3 s^{-1}$]	Konica površinskega dela pretoka $Q_{p,max}$ [$m^3 s^{-1}$]	Začetek visokovodnega vala	Konec visokovodnega vala
1961	165	5,49	1.062,00	990,00	17.10.1961	23.10.1961
1962	125	5,65	807,00	720,55	4.3.1962	10.3.1962
1963	71	5,34	661,00	566,38	11.3.1963	16.3.1963
1964	189	6,80	1.019,00	855,05	23.10.1964	30.10.1964
1965	187	5,51	1.185,00	1.059,61	1.9.1965	7.9.1965
1966	187	5,80	1.237,00	1.101,94	3.11.1966	9.11.1966
1967	167	10,05	985,00	883,69	3.11.1967	13.11.1967
1968	114	7,98	941,00	806,65	15-18.9.1968	21-26.9.1968
1969	143	6,32	866,00	764,86	12.11.1969	18.11.1969
1970	138	11,13	685,00	568,60	13.11.1970	24.11.1970

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 6

1971	45	8,03	442,00	339,66	1.4.1971	9.4.1971
1972	115	10,26	742,00	585,71	10.5.1972	20.5.1972
1973	163	8,38	918,00	782,55	21.9.1973	29.9.1973
1974	76	10,55	617,00	531,17	23.6.1974	4.7.1974
1975	233	7,92	1.198,00	1.020,34	3.4.1975	11.4.1975
1976	120	12,05	622,00	547,39	30.11.1976	12.12.1976
1977	109	5,92	900,00	749,56	20.2.1977	26.2.1977
1978	45	4,86	489,00	441,85	28.1.1978	2.2.1978
1979	218	5,55	1.281,00	1.174,82	27.1.1979	2.2.1979
1980	303	14,05	1.151,00	1.100,51	7.10.1980	21.10.1980
1981	166	9,05	880,00	800,16	28.12.1981	6.1.1982
1982	217	9,26	1.339,00	1.226,21	9.11.1982	18.11.1982
1983	100	6,94	773,00	680,23	17.12.1983	24.12.1983
1984	110	6,83	797,00	708,01	21.9.1984	28.9.1984
1985	114	6,22	1.033,00	961,00	22.1.1985	28.1.1985
1986	97	5,47	915,00	843,71	27.8.1986	1.9.1986
1987	75	4,80	875,00	796,77	4.8.1987	9.8.1987
1988	60	5,31	563,00	506,65	20.8.1988	25.8.1988
1989	86	7,16	922,00	866,48	3.11.1989	10.11.1989
1990	217	9,34	1.422,00	1.217,63	27.10.1990	5.11.1990
1991	154	12,05	643,00	538,72	13.11.1991	25.11.1991
1992	175	7,53	1.089,00	963,49	2.12.1992	10.12.1992
1993	130	5,06	762,00	607,40	21.10.1993	26.10.1993
1994	67	5,72	537,82	460,50	13.9.1994	19.9.1994
1995	64	5,34	623,43	538,90	22.12.1995	27.12.1995
1996	160	8,34	1.012,96	843,45	14.11.1996	22.11.1996
1997	126	6,84	692,34	605,30	5.11.1997	12.11.1997
1998	152	5,24	1.054,16	858,58	5.10.1998	10.10.1998
1999	95	12,26	680,03	558,35	7-11.4.1999	12-21.4.1999
2000	303	10,93	1.217,00	1.040,48	31.10.2000	11.11.2000
2001	94	5,69	737,40	641,71	24.1.2001	30.1.2001
2002	213	17,60	749,08	649,45	17.11.2002	5.12.2002
2003	138	7,63	950,64	878,82	29.10.2003	6.11.2003
2004	140	6,64	1.123,63	1.000,15	29.10.2004	5.11.2004
2005	89	7,19	590,73	507,11	2.12.2005	9.12.2005
2006	78	5,71	749,52	688,62	4.3.2006	9.3.2006
2007	131	5,60	1.167,74	1.119,63	17.9.2007	23.9.2007
2008	141	10,56	697,34	605,47	29.11.2008	10.12.2008
2009	307	7,15	1.357,61	1.242,01	22.12.2009	29.12.2009
2010	214	6,83	1.237,15	1.132,34	16.9.2010	23.9.2010

4.3 Določanje osnovnih značilnosti visokovodnih valov za vse tri primere izločanja baznega odtoka

Na visokovodnih valih (od leta 2000 do leta 2010), dobljenih na osnovi povprečnih dnevni vrednosti pretokov, z upoštevanjem absolutne konice in z uporabo treh različnih grafičnih metod izločanja baznega odtoka, smo določili tudi nekatere druge pomembne značilnosti hidrogramov:

- Koeficiente
 - *Koeficient izločevanja* ϵ ;
 - *Koeficient oblike* γ ;
 - *Indeks baznega odtoka BFI*.
- Razmerja
 - *Specifični največji pretok* q_t [$m^3 s^{-1} km^{-2}$];
 - *Specifični začetni bazni pretok* $q_{b,0}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$];
 - *Časovna razmerja* $\frac{T_{gr}}{T_t}, \frac{T_{gr}}{T_{des}}$;
 - *Volumenska razmerja* $\frac{V_{gr}}{V_p}, \frac{V_{gr}}{V_{des}}$.

Preglednica 7: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 1

Leto	ϵ	γ	<i>BFI</i>	$\frac{T_{gr}}{T_t}$	$\frac{T_{gr}}{T_{des}}$	$\frac{V_{gr}}{V_p}$	$\frac{V_{gr}}{V_{des}}$	q_t [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]	$q_{b,0}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]
2000	4,57	0,40	0,18	0,26	0,36	0,42	0,73	0,53	0,03
2001	1,92	0,47	0,34	0,29	0,41	0,30	0,42	0,32	0,03
2002	1,99	0,35	0,33	0,32	0,48	0,51	1,04	0,33	0,04
2003	4,38	0,31	0,19	0,47	0,89	0,43	0,76	0,42	0,02
2004	2,42	0,36	0,29	0,39	0,64	0,47	0,89	0,49	0,04
2005	2,06	0,44	0,33	0,44	0,78	0,44	0,79	0,26	0,03
2006	2,67	0,33	0,27	0,29	0,41	0,36	0,57	0,33	0,02
2007	5,23	0,29	0,16	0,28	0,38	0,30	0,43	0,51	0,01
2008	3,17	0,36	0,24	0,43	0,75	0,52	1,07	0,31	0,02
2009	5,68	0,48	0,15	0,43	0,77	0,52	1,06	0,59	0,02
2010	4,61	0,40	0,18	0,62	1,04	0,56	1,25	0,54	0,03
Povprečje:	3,52	0,38	0,24	0,38	0,63	0,44	0,82	0,42	0,03

Preglednica 8: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 3

Leto	ϵ	γ	BFI	$\frac{T_{gr}}{T_t}$	$\frac{T_{gr}}{T_{des}}$	$\frac{V_{gr}}{V_p}$	$\frac{V_{gr}}{V_{des}}$	q_t [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]	$q_{b,0}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]
2000	4,50	0,38	0,18	0,24	0,32	0,40	0,68	0,53	0,03
2001	1,81	0,34	0,36	0,16	0,20	0,23	0,30	0,32	0,03
2002	1,83	0,33	0,35	0,23	0,29	0,32	0,47	0,33	0,04
2003	4,37	0,26	0,19	0,36	0,56	0,40	0,66	0,42	0,02
2004	2,42	0,32	0,29	0,32	0,48	0,44	0,80	0,49	0,04
2005	2,22	0,38	0,31	0,35	0,54	0,40	0,66	0,26	0,03
2006	2,08	0,29	0,32	0,22	0,29	0,34	0,52	0,33	0,02
2007	5,23	0,25	0,16	0,22	0,28	0,28	0,40	0,51	0,01
2008	3,08	0,36	0,25	0,41	0,70	0,51	1,04	0,31	0,02
2009	5,62	0,41	0,15	0,34	0,53	0,48	0,93	0,59	0,02
2010	4,58	0,36	0,18	0,35	0,53	0,53	1,12	0,54	0,03
Povprečje:	3,43	0,33	0,25	0,29	0,43	0,39	0,69	0,42	0,03

Preglednica 9: Značilnosti hidrogramov dobljenih z metodo 4

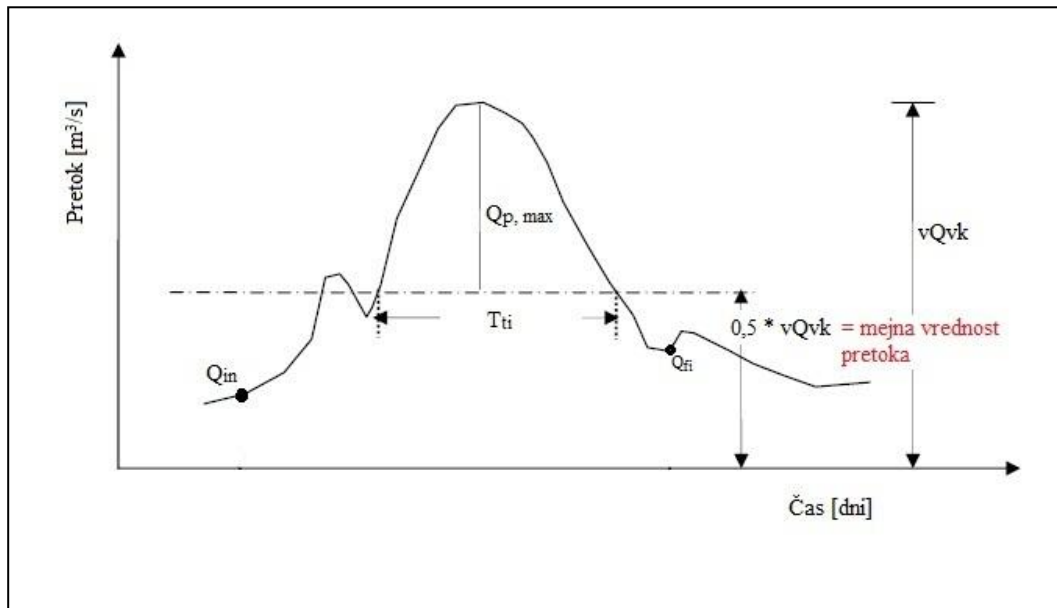
Leto	ϵ	γ	BFI	$\frac{T_{gr}}{T_t}$	$\frac{T_{gr}}{T_{des}}$	$\frac{V_{gr}}{V_p}$	$\frac{V_{gr}}{V_{des}}$	q_t [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]	$q_{b,0}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]
2000	2,05	0,46	0,33	0,26	0,36	0,41	0,70	0,53	0,03
2001	1,60	0,49	0,39	0,29	0,41	0,30	0,42	0,32	0,03
2002	1,31	0,38	0,43	0,32	0,48	0,50	1,01	0,33	0,04
2003	2,73	0,33	0,27	0,47	0,89	0,43	0,74	0,42	0,02
2004	1,78	0,38	0,36	0,39	0,64	0,48	0,92	0,49	0,04
2005	1,58	0,46	0,39	0,44	0,78	0,44	0,79	0,26	0,03
2006	2,05	0,34	0,33	0,29	0,41	0,37	0,59	0,33	0,02
2007	4,93	0,29	0,17	0,28	0,38	0,30	0,43	0,51	0,01
2008	1,91	0,39	0,34	0,43	0,75	0,52	1,07	0,31	0,02
2009	3,85	0,37	0,28	0,43	0,77	0,52	1,09	0,59	0,02
2010	3,18	0,42	0,24	0,41	0,69	0,57	1,31	0,54	0,03
Povprečje:	2,45	0,39	0,32	0,36	0,59	0,44	0,83	0,42	0,03

5 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV

5.1 Vpliv spreminjanja mejne vrednosti pretoka na parametre visokovodnega vala

Parametri visokovodnega vala so slučajne spremenljivke, opredeljene s pojavom istega fizičnega dogodka v naravi, zaradi česar lahko sklepamo, da obstaja možnost, da so ti parametri med seboj povezani (Karmakar et al., 2007). Med pomembne parametre, ki definirajo visokovodni val, uvrščamo volumen površinskega odtoka V_p , konico površinskega pretoka $Q_{p,max}$ in celotno trajanje visokovodnega vala T_t .

Predpostavili smo, da spreminjanje mejne vrednosti pretoka vpliva na lastnosti visokovodnega vala.

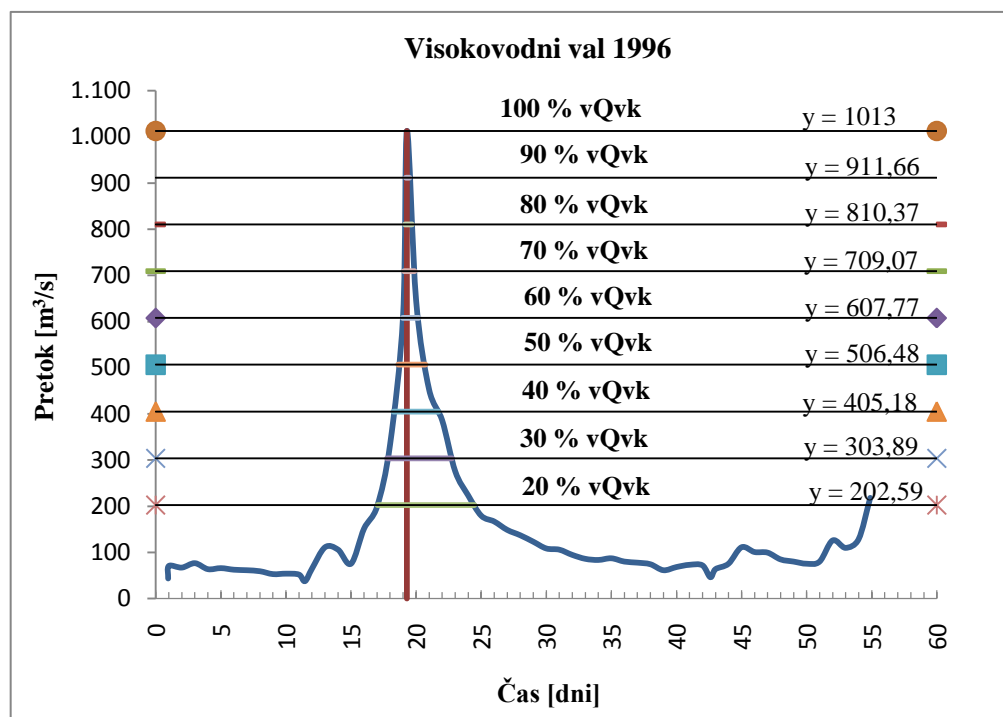


Slika 43: Prikaz določitve mejne vrednosti pretoka na hidrogramu (Povzeto po Karmakar et al., 2007)

Na sliki 43 je prikazana ena izmed možnih mejnih vrednosti visokovodnega vala. Za 20-letno obdobje, od leta 1991 do leta 2010, smo določili parametre visokovodnih valov za sledeče mejne vrednosti pretoka (slika 44):

- 20 % konice pretoka [20 % v_{Qvk}],
- 30 % konice pretoka [30 % v_{Qvk}],
- 40 % konice pretoka [40 % v_{Qvk}],
- 50 % konice pretoka [50 % v_{Qvk}],
- 60 % konice pretoka [60 % v_{Qvk}],

- 70 % konice pretoka [70 % vQvk],
- 80 % konice pretoka [80 % vQvk],
- 90 % konice pretoka [90 % vQvk].



Slika 44: Prikaz mejnih vrednosti na hidrogramu 1996

Lastnosti visokovodnega vala so zelo občutljive na določitev mejne vrednosti pretoka. Z višanjem mejne vrednosti pretoka se manjšajo vrednosti parametrov visokovodnega vala. Izračunane lastnosti parametrov visokovodnega vala za določene mejne vrednosti pretoka nam omogočajo natančno določitev odvisnosti slučajnih spremenljivk.

Odvisnost slučajnih spremenljivk V_p , $Q_{p,max}$ in T_t smo preverili z uporabo Pearsonovega korelacijskega koeficienta, saj linearno povezanost med dvema spremenljivkama merimo s kovarianco. Pearsonov koeficient korelacije je brezdimenzijska mera linearne povezanosti. Oceno koeficienta korelacije smo izračunali po naslednji enačbi (Turk, 2011):

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (44)$$

Kjer je:

- n število opazovanj v vzorcu,
- \bar{x} povprečje vzorca x_i ,
- \bar{y} povprečje vzorca y_i .

Z izračunom Pearsonovega korelacijskega koeficienta smo raziskali medsebojne korelacije med lastnostmi visokovodenaga vala $Q_{p,max}$, V_p in T_t pri različnih mejnih vrednostih pretoka. Upoštevane so bile sledeče možne kombinacije:

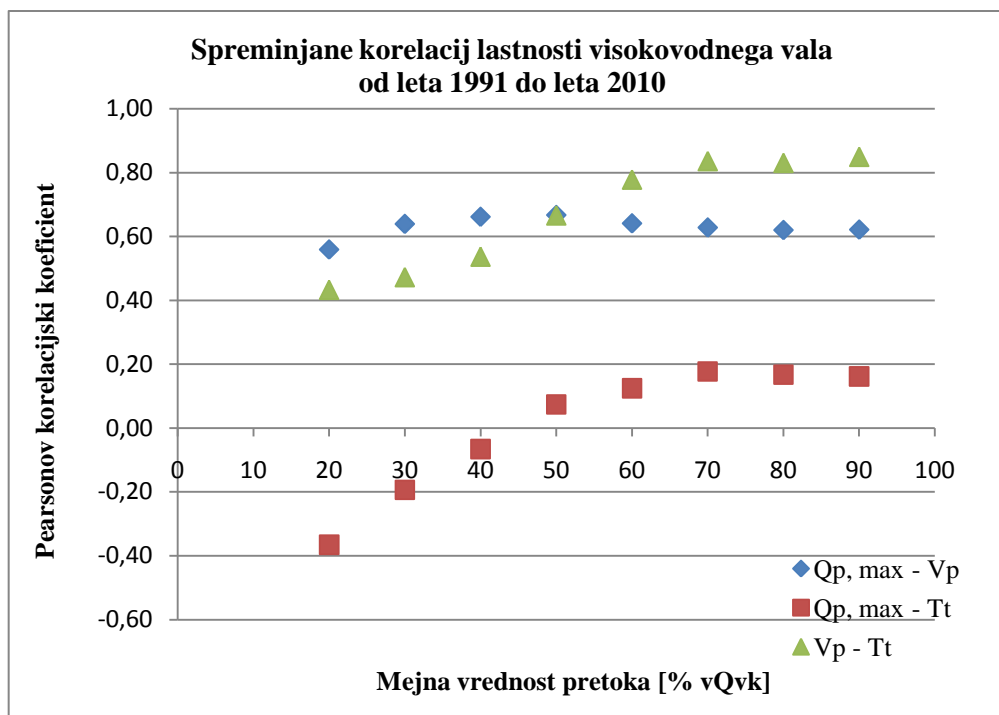
- $Q_{p,max} - V_p$,
- $V_p - T_t$,
- $Q_{p,max} - T_t$.

Preglednica 10: Izračunani Pearsonovi korelacijski koeficienti glede na izbrano mejno vrednost pretoka

Mejna vrednost pretoka [% vQvk]	Pearsonov korelacijski koeficient $\rho_{Q_{p,max},V_p}$	Pearsonov korelacijski koeficient $\rho_{Q_{p,max},T_t}$	Pearsonov korelacijski koeficient ρ_{V_p,T_t}
90	0,6219	0,1618	0,8492
80	0,6205	0,1671	0,8303
70	0,6285	0,1776	0,8359
60	0,6415	0,1248	0,7780
50	0,6676	0,0738	0,6659
40	0,6621	-0,0657	0,5370
30	0,6397	-0,1933	0,4728
20	0,5594	-0,3655	0,4332

V preglednici 10 je prikazano spreminjanje vrednosti Pearsonovega korelacijskega koeficienta glede na mejno vrednost pretoka visokovodnih valov.

Pridobljene vrednosti za Pearsonova linearna korelacijska koeficienta $\rho_{Q_{p,max},V_p}$ in ρ_{V_p,T_t} so vseskozi pozitivne, medtem ko so vrednosti za Pearsonov linearni korelacijski koeficient $\rho_{Q_{p,max},T_t}$ negativne samo pri manjših mejnih vrednostih pretoka (od 20 % do 40 % vQvk).



Slika 45: Spreminjanje linearnih korelacijskih koeficientov visokovodnega vala Save v Šentjakobu od leta 1991 do leta 2010

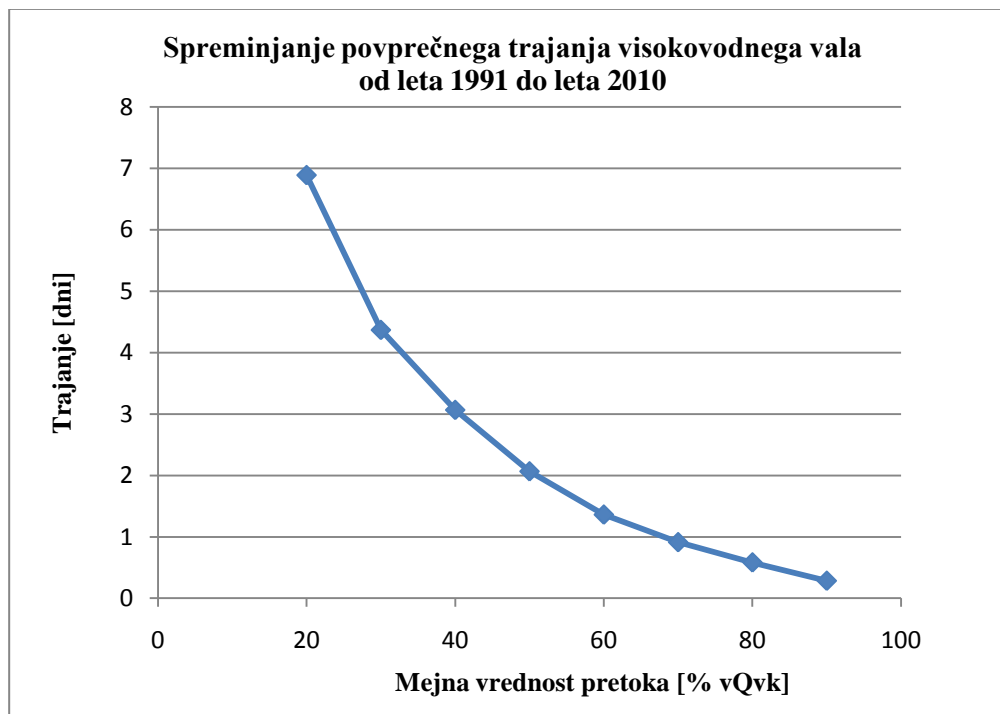
Yue et al. (1999) je zapisal, da gledano iz splošnega fizikalnega vidika, ni pričakovati da bi med konico površinskega pretoka in celotnim trajanjem visokovodnega vala, obstajala močna korelacija, bodisi pozitivna ali negativna (Karmakar et al., 2007). Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi v našem primeru. Dobili smo negativno korelacijo, vrednost največjega korelacijskega koeficienta pa je dosegla le 0,3665 (pri 20 % $vQvk$), kar kaže na slabo povezanost med konico površinskega odtoka in trajanjem visokovodnega vala. Tudi dodatna statistična analiza je pokazala, da sta spremenljivki med seboj zelo slabo statistično značilno odvisni s p-vrednostjo 0,1131. Največja pozitivna vrednost korelacijskega koeficienta ρ_{Q_p, max, T_t} pa znaša 0,1776 (pri 70 % $vQvk$) s p-vrednostjo 0,4538. Iz korelacijskih koeficientov in dodatnih statističnih analiz lahko zaključimo, da med konico vala in trajanjem vala ni statistično značilne odvisnosti oz. je zelo majhna.

Močno linearno povezanost pa smo ugotovili med volumnom površinskega odtoka in celotnim trajanjem visokovodnega vala, predvsem pri večjih mejnih vrednostih pretoka (od 70 % do 90 % $vQvk$), ko so vrednosti korelacijskih koeficientov ρ_{V_p, T_t} nad 0,8. Dodatna statistična analiza je pokazala, da se p-vrednost veča z manjšanjem mejnih vrednosti pretoka. Najmanjši korelacijski koeficient med spremenljivkama je znašal 0,4332 (pri 20% $vQvk$) s p-vrednostjo 0,0564, ki kaže na slabo statistično

značilno odvisnost, medtem ko je največji korelacijski koeficient med spremenljivkama znašal 0,8492 (pri 90 % *vQvk*) s *p*-vrednostjo $2,1816 \cdot 10^{-6}$, ki pa kaže na zelo močno statistično značilno odvisnost.

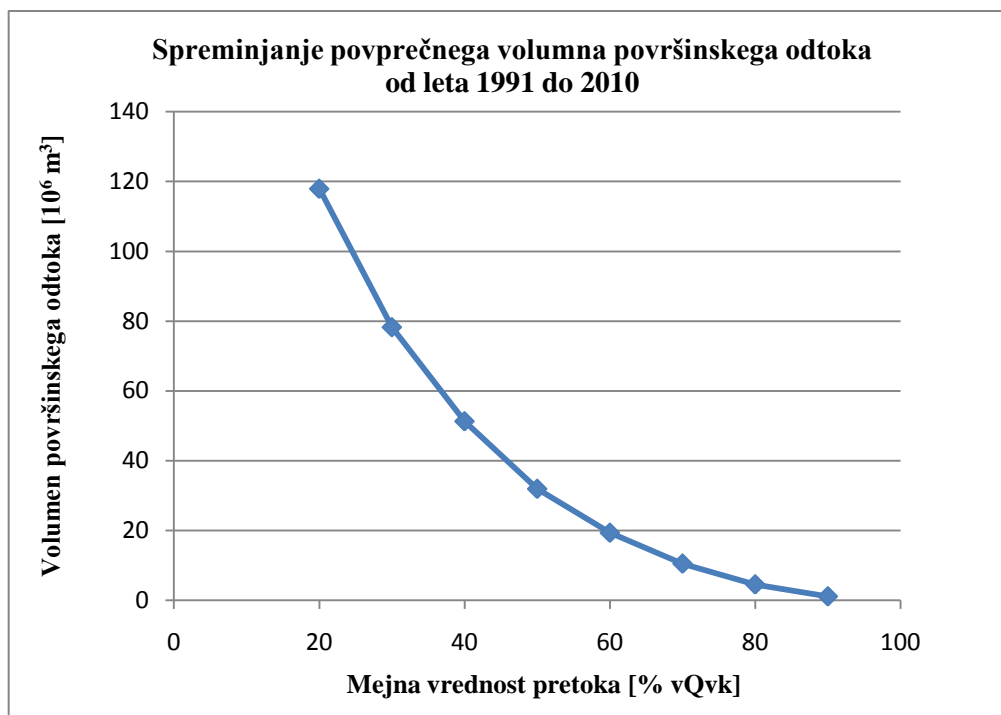
Vrednosti korelacijskega koeficienta ρ_{Q_p, max, V_p} med konicami in volumni so najbolj konstantne glede na določitev mejne vrednosti pretoka in se gibljejo od 0,5594 (pri 20 % *vQvk*) do 0,6219 (pri 90 % *vQvk*). Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Karmakar in Simonovic (2007). Med konico površinskega pretoka in volumnom površinskega odtoka obstaja srednje močna pozitivna linearna povezanost. Statistična analiza je pokazala, da med njima zelo verjetno obstaja statistično značilna odvisnost (*p* = 0,0103 pri 20% *vQvk* in *p* = 0,0034 pri 90 % *vQvk*).

Na sliki 46 je prikazano spreminjanje povprečnega trajanja viskovodnega vala glede na mejno vrednost pretoka. Podatki zavzemajo povprečno trajanje viskovodega vala za 20-letno obdobje glede na mejno vrednost pretoka. Pričakovano trajanje viskovodnega vala upada z večanjem mejne vrednosti pretoka.



Slika 46: Spreminjanje povprečnega trajanja viskovodnega vala glede na mejno vrednost pretoka

Enako tudi volumen površinskega odtoka upada z večanjem mejne vrednosti pretoka. Obe krivulji, ki jih vidimo na slikah 46 in 47, imata obliko parabole ter sta si zelo podobni.



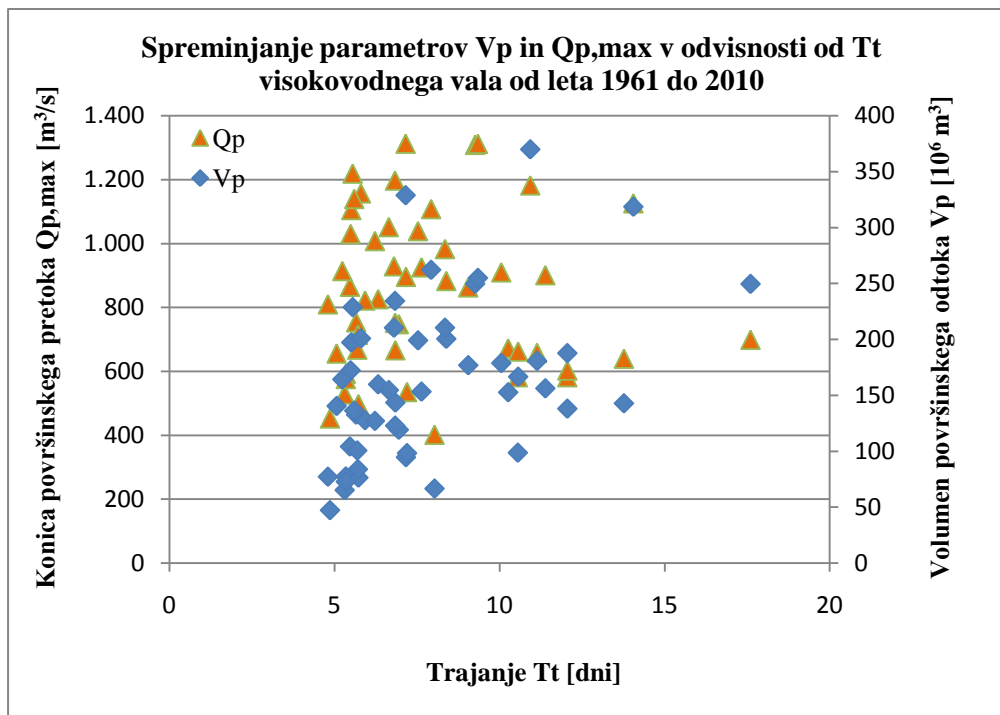
Slika 47: Spreminjanje povprečnega volumna površinskega odtoka visokovodnega vala glede na mejno vrednost pretoka

5.3. Analiza parametrov V_p , T_t in $Q_{p,max}$ visokovodnih valov

5.3.1 Analiza parametrov visokovodnih valov dobljenih z metodo 1

Na sliki 48 vidimo spreminjanje parametrov V_p in $Q_{p,max}$ v odvisnosti od časovnega trajanja T_t visokovodnega vala.

Dogodkov, ki po ekstremnih vrednostih parametrov izstopajo, v obdobju od leta 1961 do leta 2010, ni bilo veliko. Takšni izredni dogodki so na sliki 48 takoj vidni, ker so odmaknjeni od povprečja in se nahajajo na robovih hidrograma.



Slika 48: Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 1

Daljše trajanje visokovodnega vala, ki odstopa od izračunanega povprečnega trajanja, 7,86 dni, je bilo zabeleženo leta leta 2002, ko je bilo trajanje visokovodnega vala 17,60 dni. Trajanje visokovodnega vala leta 2002 je torej za 123,92 % daljše od povprečnega trajanja visokovodnega vala. Leta 2000 je bil največji volumen površinskega odtoka, ki je znašal $370 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, leta 2009 pa največja konica površinskega odtoka, ki je bila kar $1.312,61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Z Excelovim orodjem za analizo, t.j. opisna statistika, smo ustvarili poročilo o enovariabilni statistiki z informacijo o srednji tendenci in variabilnosti podatkov (Microsoft Slovenija, 2011).

Preglednica 11: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnih valov pridobljenih z metodo 1

Funkcija	Qp	Tt	Vp
Aritmetična sredina	849,35	7,86	162.302.527,46
Standardna napaka	34,55	0,40	10.053.494,20
Mediana	844,50	6,89	153.998.727,82
Modus	582,00	12,05	#N/A

se nadaljuje ...

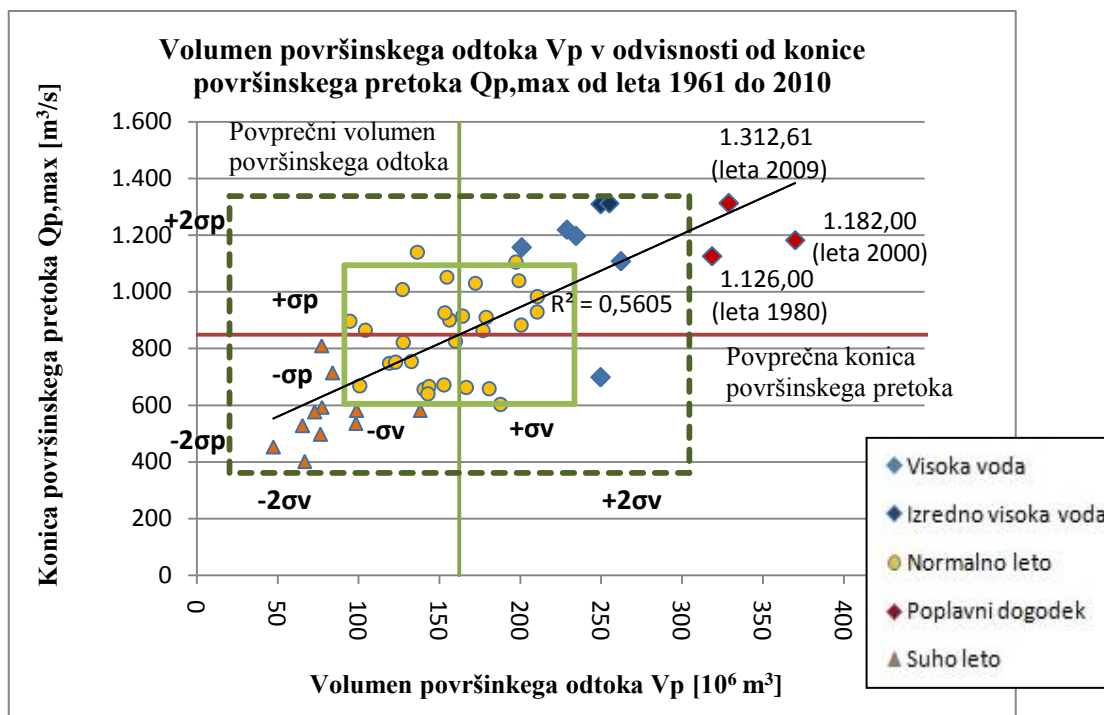
... nadaljevanje Preglednice 11

Standardna deviacija (vzorčni standardni odklon)	244,29	2,81	71.088.939,21
Vzorčna varianca	59.675,97	7,89	$5,05 \cdot 10^{15}$
Sploščenost porazdelitve	-0,91	1,82	0,67
Asimetričnost porazdelitve	0,23	1,36	0,81
Variacijski razmik	910,61	12,80	322.626.293,21
Minimalna vrednost	402,00	4,80	47.305.418,04
Maksimalna vrednost	1.312,61	17,60	369.931.711,26
Vsota vrednosti	42.467,58	392,82	8.115.126.373,05
Število vrednosti	50,00	50,00	50,00

Opomba: Množica vrednosti V_p , ne vsebuje nobenih podvojenih podatkovnih vrednosti, zato je v preglednici 11 za modus zapisana vrednost #N/V (Microsoft Slovenija, 2011).

Minimalna vrednost konice površinskega pretoka, $402,00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (preglednica 9), je za 53 % nižja od povprečne konice, $844,50$, površinskega pretoka. Odstopanje minimalne vrednosti trajanja visokovodnega vala ($4,80 \text{ dni}$) je za 39 % manjše povprečnega trajanja visokovodnega vala. Veliko odstopanje smo zabeležili pri volumnu površinskega odtoka, ko minimalni volumen znaša $47 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, kar je za 70 % manj od povprečnega volumna površinskega odtoka, ki je $162 \cdot 10^6$.

Preprost, vendar učinkovit način pregleda spremenljivk visokovodnih valov $Q_{p,max}$ in V_p , za daljše časovno obdobje, je prikazan na sliki 49. Ekstremne dogodke »presejmo« na enostaven način. Metoda, ki smo jo uporabili, temelji na dveh »pravokotnikih« in temelji na odstopanju od povprečne vrednosti. Prvi pravokotnik je definiran z enojno standardno deviacijo σ_v in σ_p , drugi pa z dvojno standardno deviacijo $2\sigma_v$ in $2\sigma_p$ (MRC, 2007).



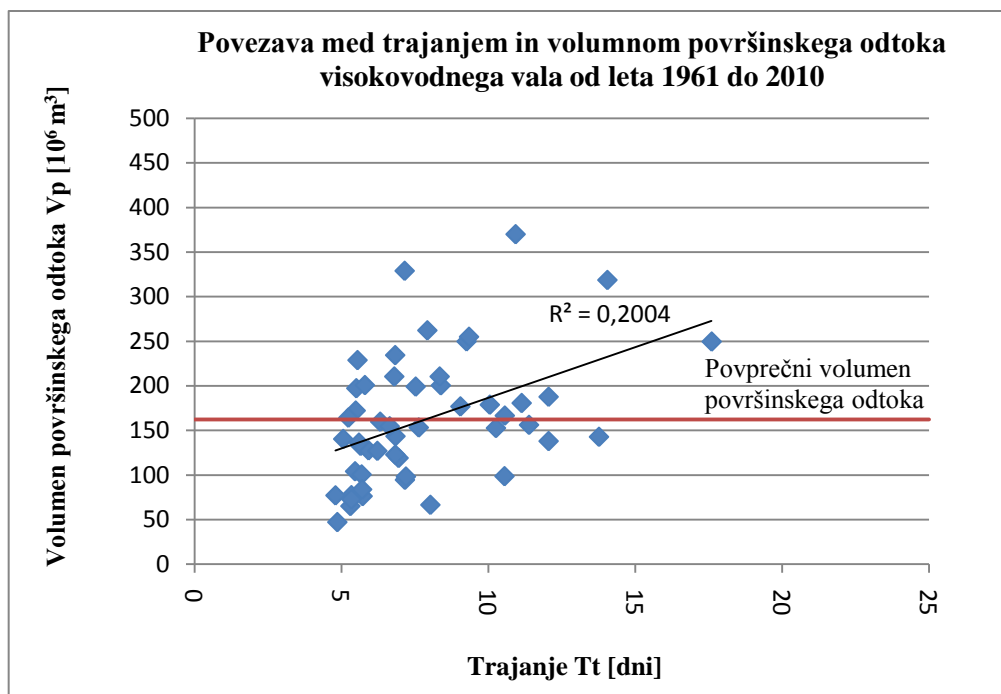
Slika 49: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 1)

Dogodki visokovodnih valov, ki izstopajo po ekstremno visokih vrednostih spremenljivk visokovodnega vala, so se zgodili leta 1980, 2000 in 2009. Pri vseh treh dogodkih je bil volumen površinskega odtoka visokovodnega vala večji od $319 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, konica površinskega pretoka pa večja od $1.126,00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Na sliki 49 je povezanost med volumnom površinskega pretoka in konico površinskega pretoka prikazana s pomočjo koeficienta R^2 , ki predstavlja kvadratno vrednost korelacijskega koeficienta. Izvedli smo tudi analizo linearne regresije z uporabo metode »najmanjših kvadratov« in množico merskih točk, ki se približajo premici (Microsoft Slovenija, 2011). Vrednost, ki nas je najbolj zanimala, je p-vrednost, ki nam pove ali je razlika med aritmetičnima sredinama statistično značilna, ali ne.

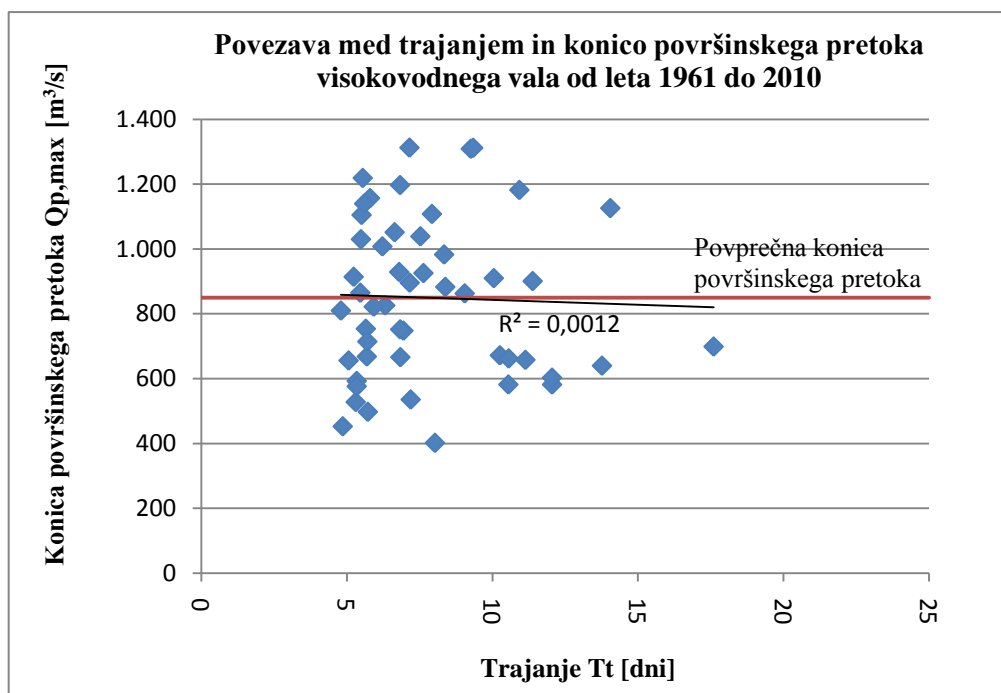
Spremenljivki $Q_{p,max}$ in V_p sta pozitivno linearno povezani ($R^2 = 0,5605 \rightarrow R = 0,7487$). Statistična analiza je pokazala, da sta spremenljivki med seboj zelo močno statistično značilno odvisni s p-vrednostjo $4,0584 \cdot 10^{-10}$.

Linearna povezanost med spremenljivkama V_p in T_t (slika 50) je nekoliko slabša ($R^2 = 0,2004 \rightarrow R = 0,4477$). Kljub manjšemu korelacijskemu koeficientu, pa je dodatna statistična analiza pokazala močno statistično značilno odvisnost s p-vrednostjo 0,0011.



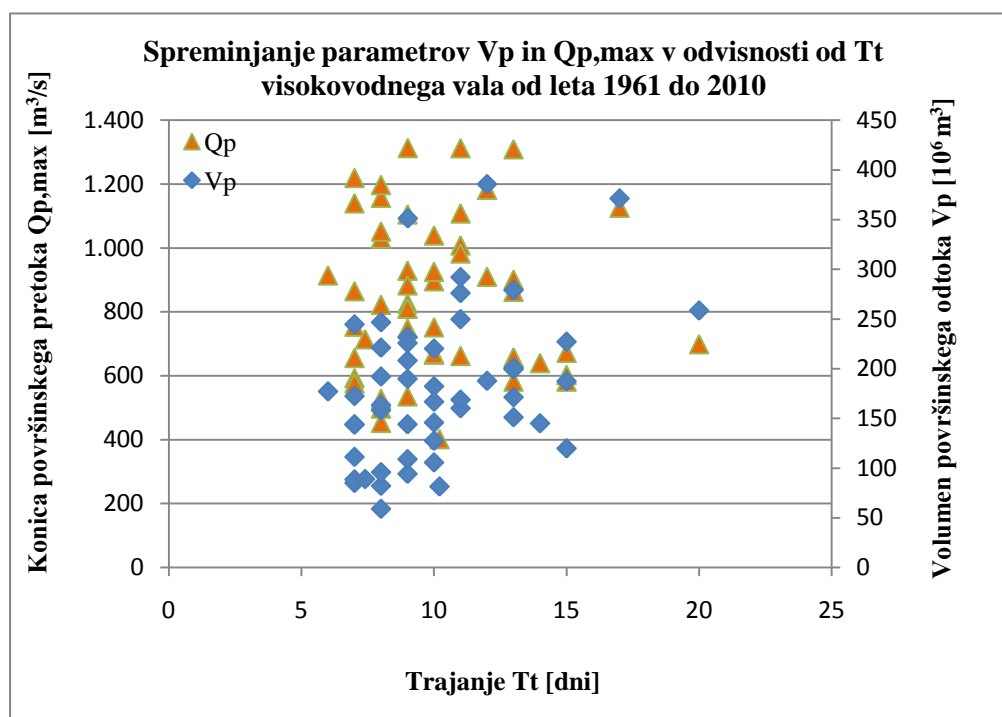
Slika 50: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 1)

Linearne povezanosti med konicami in trajanjem praktično ni ($R^2 = 0,0012 \rightarrow R = 0,0344$), tudi p-vrednost 0,8123 kaže na zelo slabo statistično značilno odvisnost.



Slika 51: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 1)

5.3.2 Analiza parametrov visokovodnih vala dobljenih z metodo 3



Slika 52: Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 3

Dogodek visokovodnega vala, ki odstopa od povprečja po vidnem daljšem trajanju 20 dni, se je zgodil leta 2002. Trajanje tega visokovodnega vala je bilo skoraj za še enkrat daljše od povprečnega trajanja visokovodnega vala 10,17 (preglednica 12). Trije visokovodni valovi, leta 1982, 1990 in 2009, so imeli visoko konico površinskega pretoka, ki je preseгла vrednost 1.300,00. Največji volumen, $386 \cdot 10^6$, je bil leta 2000 in je za 112 % preseglal povprečni volumen površinskega odtoka, ki je $182 \cdot 10^6$.

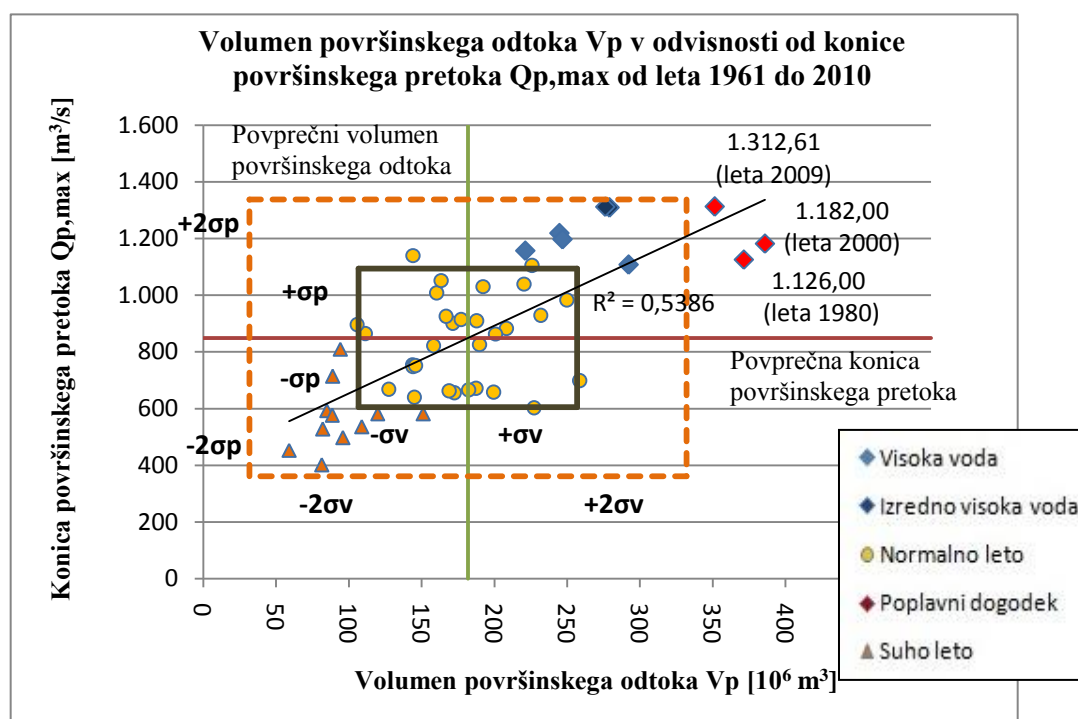
Preglednica 12: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnih valov pridobljenih z metodo 3

Funkcija	Q_p	T_t	V_p
Aritmetična sredina	849,35	10,17	181.819.458,80
Standardna napaka	34,55	0,42	10.616.825,28
Mediana	844,50	9,51	171.948.929,03
Modus	582,00	8,00	#N/A

se nadaljuje ...

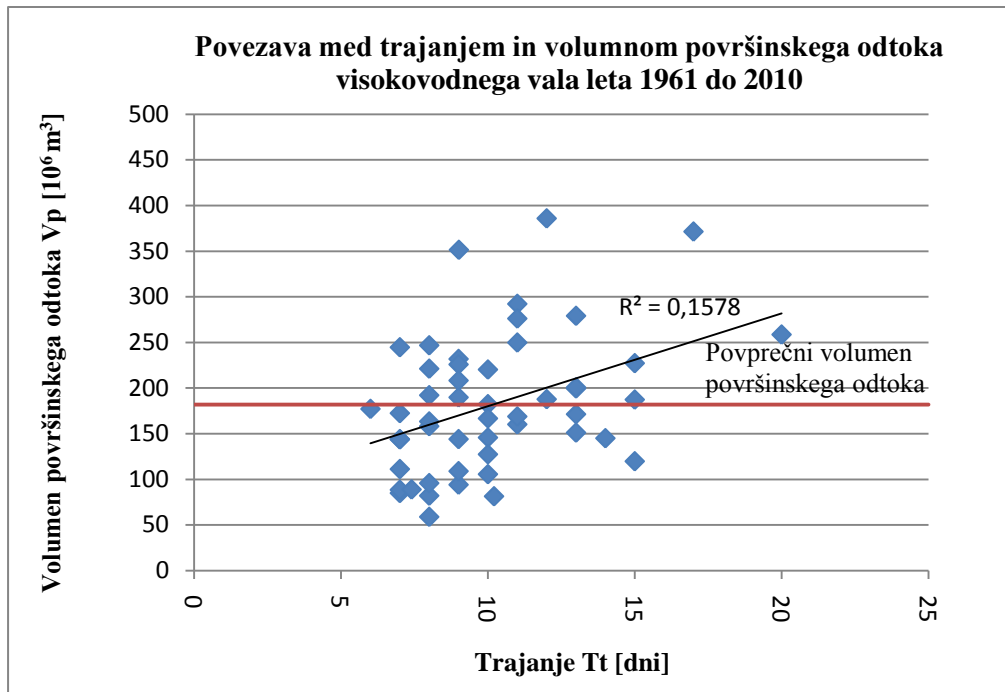
... nadaljevanje Preglednice 12

Standardna deviacija (vzorčni standardni odklon)	244,29	2,94	75.072.291,53
Vzorčna varianca	59.675,97	8,62	$5,64 \cdot 10^{15}$
Sploščenost porazdelitve	-0,91	1,45	0,56
Asimetričnost porazdelitve	0,23	1,16	0,77
Variacijski razmik	910,61	14,00	326.757.501,67
Minimalna vrednost	402,00	6,00	58.987.031,63
Maksimalna vrednost	1.312,61	20,00	385.744.533,30
Vsota vrednosti	42.467,58	508,62	9.090.972.939,99
Število vrednosti	50,00	50,00	50,00



Slika 53: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 3)

Slika 53 prikazuje volumen površinskega odtoka v odvisnosti od konice površinskega pretoka. Za visokovodne valove od leta 1961 do leta 2010. Za dogodke visokovodnih valov, ki se nahajajo izven zunanega pravokotnika lahko sklepamo, da gre za večje poplavne dogodke (MRC, 2007). Takšnih poplavnih dogodkov je 6 % od obravnavanih petdesetih dogodkov visokovodnih valov in so se zgodili leta 1980, 2000 in 2009. Za ta tri leta so bili volumni površinskega odtoka večji od $351 \cdot 10^6 m^3$, konice površinskega pretoka pa so imele vrednost med $1.126,00$ in $1.312,61 m^3 s^{-1}$.

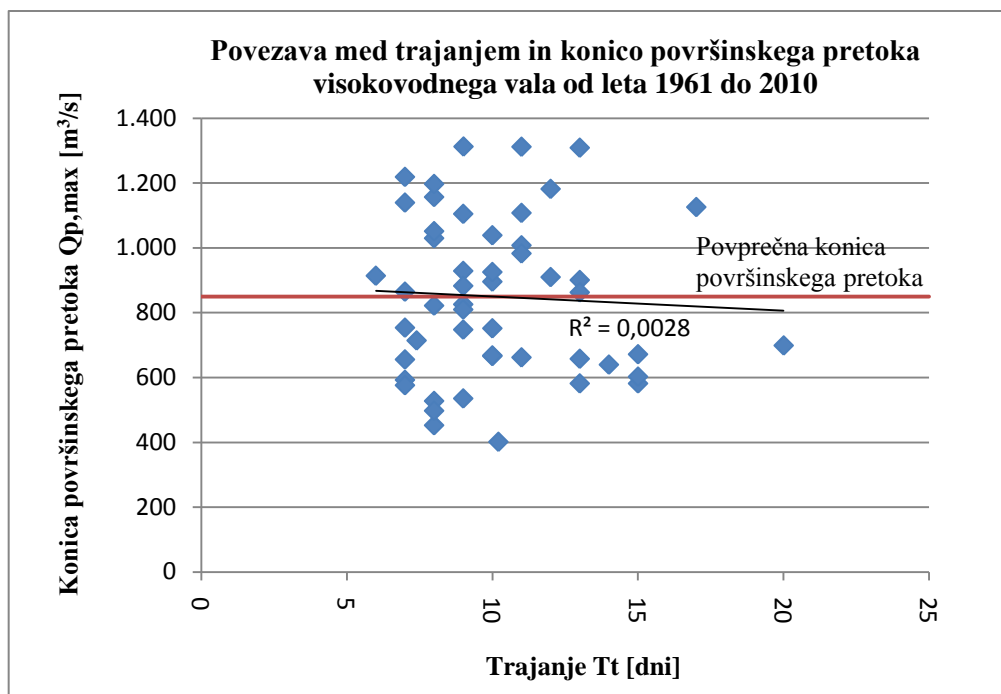


Slika 54: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 3)

Spremenljivki visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in V_p sta pozitivno linearno povezani, kar lahko vidimo iz pozitivne koleracije ($R^2 = 0,5386 \rightarrow R = 0,7339$) na sliki 53. Statistična analiza je pokazala, da je odvisnost med konico površinskega pretoka in volumnom površinskega odtoka močno statistično značilna s p-vrednostjo $1,3331 \cdot 10^{-9}$.

Med spremenljivkama V_p in T_t (slika 54) tudi obstaja pozitivna linearna povezanost. Kljub slabi povezanosti ($R^2 = 0,1578 \rightarrow 0,3973$), pa je statistična analiza pokazala, da je odvisnost med njima zelo močno statistično značilna s p-vrednostjo 0,0043.

Na sliki 55 je prikazan korelacijski koeficient ($R^2 = 0,0028 \rightarrow R = 0,0528$) med spremenljivkama $Q_{p,max}$ in T_t , ki praktično ne kaže linearne povezanosti. Tudi visoka p-vrednost 0,7158 med tema dvema spremenljivkama kaže na zelo slabo statistično značilno odvisnost.



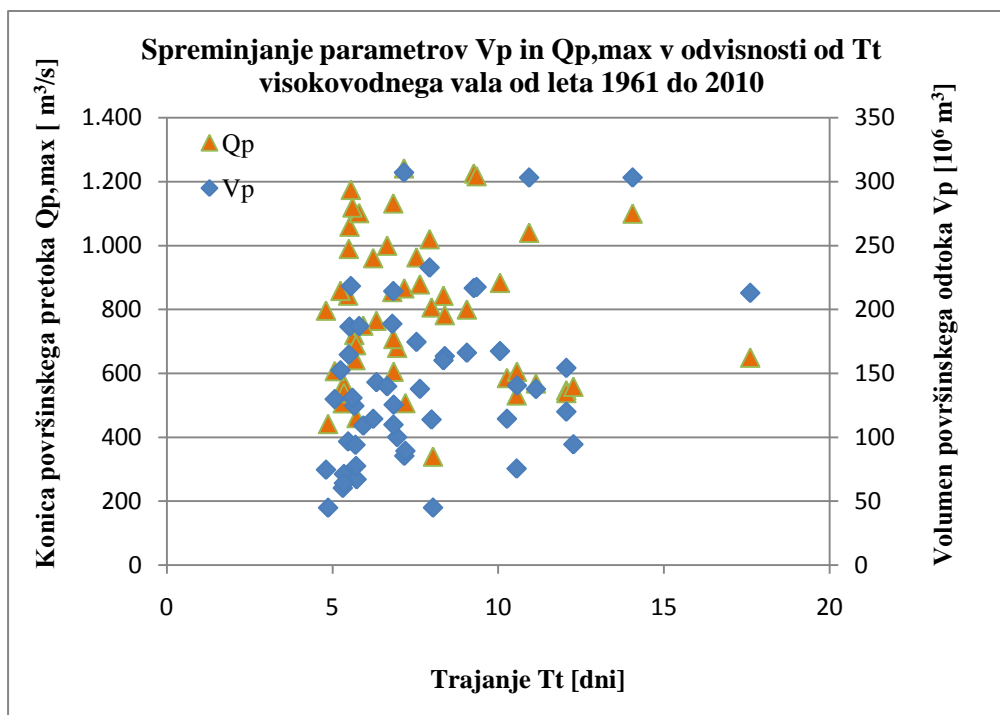
Slika 55: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 3)

5.3.3 Analiza parametrov visokovodnih valov dobljenih z metodo 4

Spreminjanje parametrov visokovodnih valov od leta 1961 do leta 2010, ki smo jih izračunali z metodo 4 izločanja baznega odtoka, so prikazani na sliki 56.

Visokovodni val z najdaljšim trajanjem, 17,60 dni, se je zgodil leta 2002, njegova konica površinskega pretoka ($649,45 m^3 s^{-1}$) pa je bila pod povprečno konico površinskega pretoka ($793,56 m^3 s^{-1}$).

Izstopajo trije volumni površinskega odtoka visokovodnega vala, ki so se zgodili leta 1980 ($303 \cdot 10^6 m^3$), 2000 ($303 \cdot 10^6 m^3$), in 2009 ($307 \cdot 10^6 m^3$). Največji volumen površinskega odtoka, ki se je zgodil leta 2009, je za 116 % večji od povprečnega površinskega volumna, ki je $143 \cdot 10^6$ (preglednica 10).

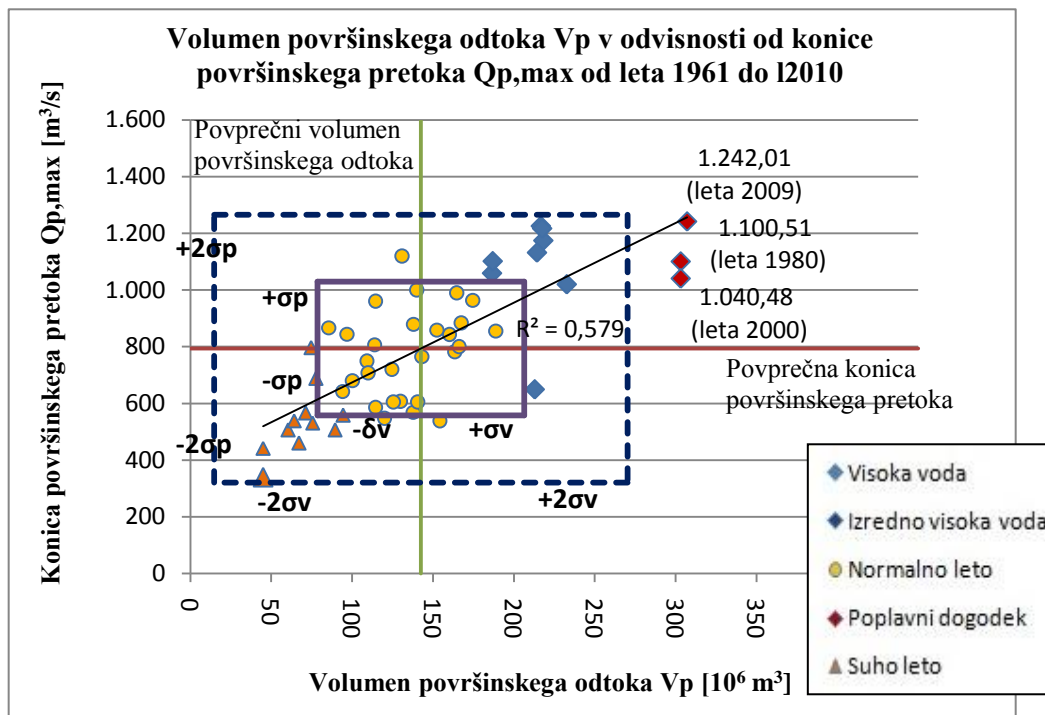


Slika 56 Parametri visokovodnega vala pridobljeni z metodo 4

Preglednica 13: Osnovna statistična analiza parametrov visokovodnega vala pridobljenih z metodo 4

<i>Funkcija</i>	<i>Q_p</i>	<i>T_t</i>	<i>V_p</i>
Aritmetična sredina	793,56	7,76	142.491.415,01
Standardna napaka	33,40	0,38	9.037.459,53
Mediana	789,66	6,89	134.303.707,73
Modus	#N/A	12,05	#N/A
Standardna deviacija (vzorčni standardni odklon)	236,16	2,70	63.904.489,21
Vzorčna varianca	55.773,59	7,31	$4,08 \cdot 10^{15}$
Sploščenost porazdelitve	-0,94	2,44	0,56
Asimetričnost porazdelitve	0,24	1,46	0,85
Variacijski razmik	902,34	12,80	262.133.268,22
Minimalna vrednost	339,66	4,80	44.963.679,64
Maksimalna vrednost	1.242,01	17,60	307.096.947,86
Vsota vrednosti	39.678,19	387,92	7.124.570.750,31
Število vrednosti	50,00	50,00	50,00

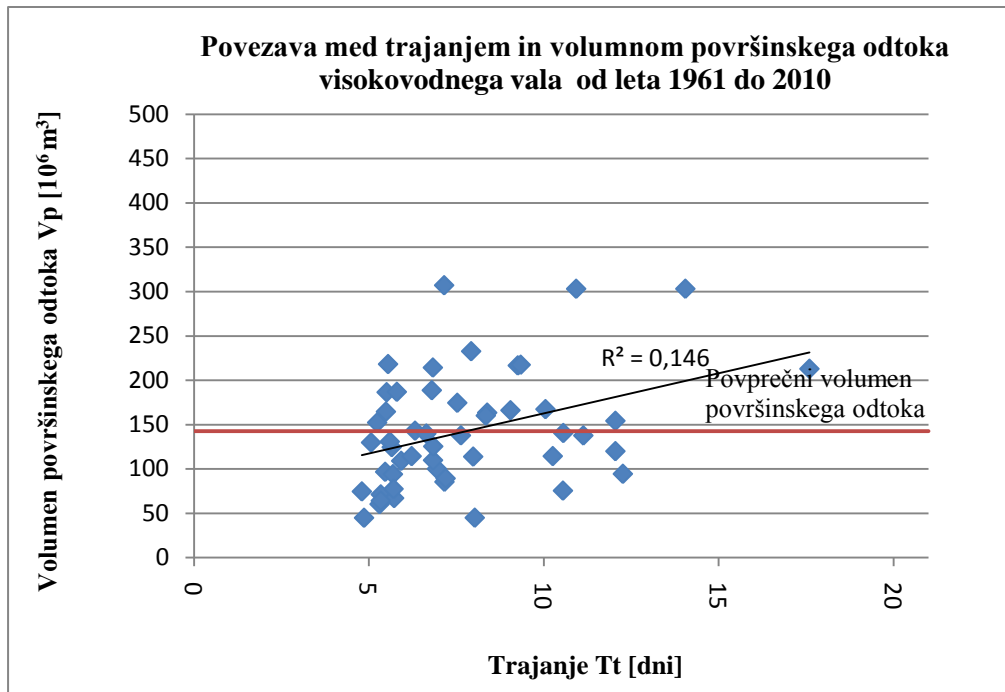
Množici vrednosti $Q_{p,max}$ in V_p , ne vsebujeta nobenih podvojenih podatkovnih vrednosti, zato je v preglednici 13 pri modusu zapis #N/V.



Slika 57: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in $Q_{p,max}$ (Uporabljena metoda 4)

Na sliki 57, znotraj pravokotnika, omejenega z enojno standardno deviacijo $\sigma_v * \sigma_p$, se nahajajo običajni dogodki visokovodnih valov. Dogodki visokovodnih valov z izredno visokimi vodami, se nahajajo v drugem kvadrantu koordinatnega sistema. Izredni poplavni dogodki so se zgodili leta 1980, 2000 in 2009 ter so na hidrogramu prikazani z rdečimi znaki. Med petdesetimi obravnavanimi dogodki je bilo 22 % sušnih dogodkov in 16 % visokih vod.

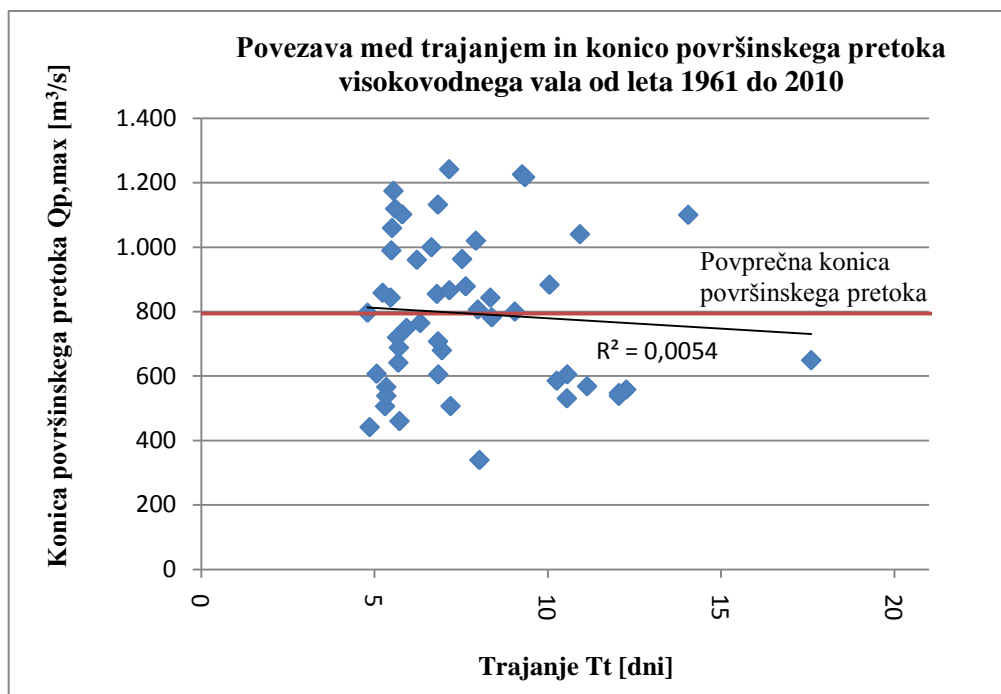
Iz zgornje slike 57 razberemo tudi korelacijski koeficient ($R^2 = 0,5790 \rightarrow R = 0,7609$), katerega vrednost nam pove, da sta konica površinskega pretoka in volumen površinskega odtoka močno pozitivno linearno povezana. Tudi dodatna statistična analiza pokaže, da je odvisnost med tema dvema spremenljivkama zelo močno statistično značilna, saj je p-vrednost zelo nizka ($1,4268 * 10^{-10}$).



Slika 58: Povezava med parametroma visokovodnega vala V_p in T_t (Uporabljena metoda 4)

Linearno odvisnost med volumnom površinskega odtoka in celotnim trajanjem visokovodnega vala vidimo na sliki 58. Povezanost med njima je pozitivna in precej slaba, kar nam kaže korelacijski koeficient z vrednostjo 0,3820. Kljub temu pa je dodatna statistična analiza pokazala, da je odvisnost med njima precej močno statistično značilna s p-vrednostjo 0,0062.

Linearna korelacija med konico površinskega pretoka in celotnim trajanjem visokovodnega vala (slika 59) je zelo slaba (0,0738) in tudi visoka p-vrednost (0,6106) kaže na zelo slabo statistično značilno odvisnost.



Slika 59: Povezava med parametroma visokovodnega vala $Q_{p,max}$ in T_t (Uporabljena metoda 4)

5.3.4 Analiza ekstremnih visokovodnih valov

Dogodki, ki smo jih spoznali za ekstremne, so zaradi razsežnosti parametrov izjemni. Ti dogodki so se zgodili leta 1980, 2000 in 2009. Te dogodke smo podrobneje raziskali in poskušali ugotoviti ali so ti dogodki predstavljali poplavne dogodke.

Preglednica 14: Prikaz parametrov ekstremnih visokovodnih valov glede na uporabljeno metodo

Leto	Konica površinskega pretoka $Q_{p,max}$ [$m^3 s^{-1}$]	Volumen površinskega odtoka V_p [$10^6 m^3$]	Trajanje T_t [dni]	Uporabljena metoda
1980	1.126,00	319	14,05	Metoda 1
2000	1.182,00	370	10,93	Metoda 1
2009	1.312,61	329	7,15	Metoda 1
1980	1.126,00	371	17,00	Metoda 3
2000	1.182,00	386	12,00	Metoda 3
2009	1.312,61	351	9,01	Metoda 3
1980	1.100,51	303	14,05	Metoda 4

se nadaljuje ...

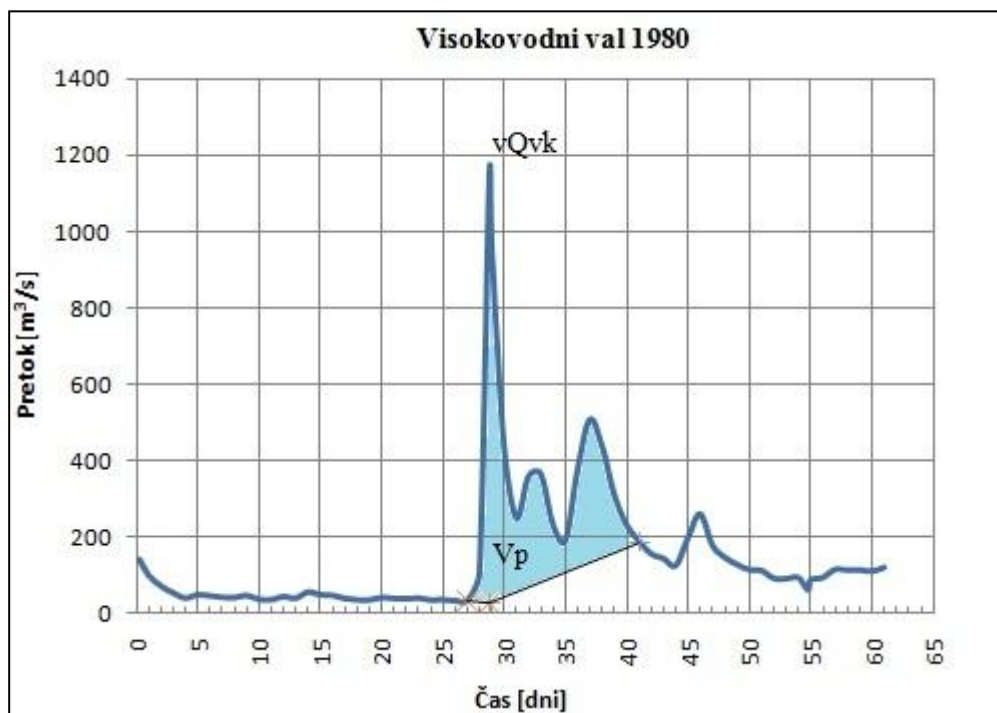
... nadaljevanje Preglednice 14

2000	1.040,48	303	10,93	Metoda 4
2009	1.242,01	307	7,15	Metoda 4

V preglednici 14 so prikazani ekstremni dogodki in velikost njihovih parametrov glede na uporabljeno metodo izločanja baznega odtoka. Ne glede na to katero metodo izločanja baznega odtoka (metoda 1, 3 ali 4) smo uporabili, so rezultati parametrov visokovodnih valov pokazali na ista leta ekstremnih dogodkov. Poleg prikazanih pomembnih parametrov visokovodnega vala, veliko vlogo pri poplavnem dogodku igra tudi oblika hidrograma.

Ekstremni visokovodni val leta 1980

Visokovodni val leta 1980 se je zgodil meseca oktobra. Posebnost tega vala je, da imamo visokovodni val z večimi konicami oz. kompleksni hidrogram (slika 60).



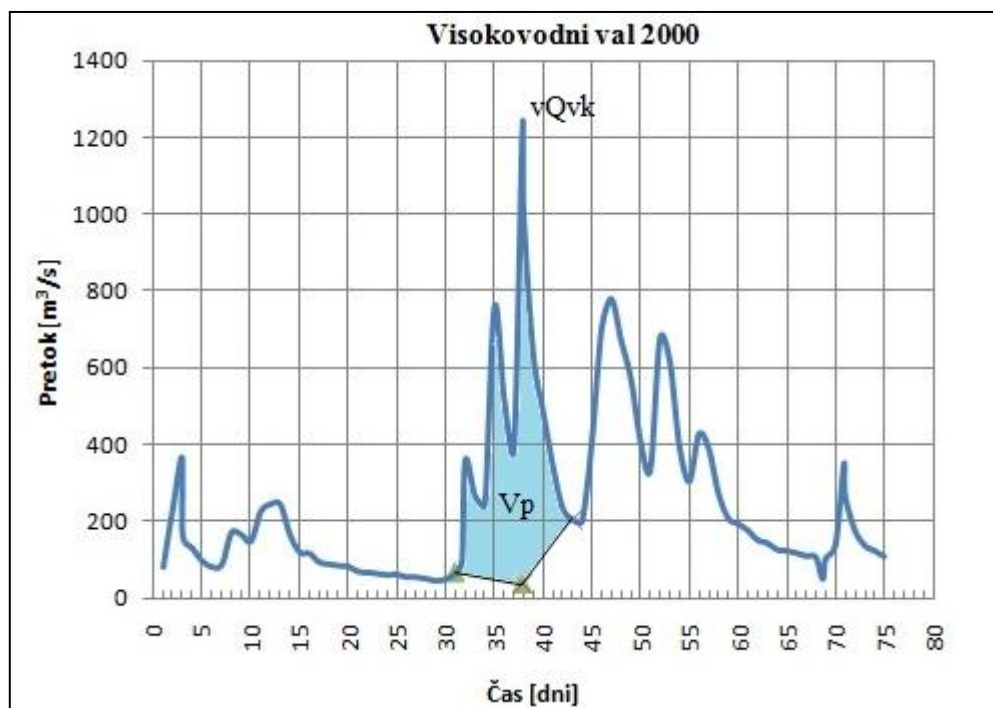
Slika 60: Kompleksni hidrogram leta 1980 (Uporabljena metoda 1)

Površinski odtok je začel naglo naraščati dne 7. 10. 1980, dosegel konico že čez 1,81 dneva in nato začel tudi naglo upadati. Sledila so manjša nihanja pretoka, kot posledica ponovnega dežja. Volumen površinskega odtoka je tako dosegel visoko vrednost. Iz istega razloga ima ta visokovodni val tudi zelo dolgo celotno trajanje, ki je z uporabo metode 3 doseglo kar 17 dni (preglednica 14). Naš zaključek je, da visokovodni val Save v Šentjakobu, leta 1980, ni mogel povzročiti večjega poplavnega dogodka, kar

sklepamo iz oblike hidrograma in porazdeljenosti volumna površinskega odtoka. Skozi pregled večjih zgodovinskih poplav na reki Savi, oktobra 1980 tudi nismo zasledili poplavnega dogodka.

Ekstremni visokovodni val leta 2000

Leto 2000 velja za zelo mokro leto (Mikoš et al., 2004). Ekstremni visokovodni val leta 2000 se je zgodil v začetku meseca novembra. PGD Zadobrova ima na svoji spletni strani zabeleženo intervencijo zaradi poplave dne 6. 11. 2000 (PGD Zadobrova, 2012). Dan zabeležene poplave se je zgodil slab dan pred konico hidrograma. To leto je pri uporabi metode 3 zabeležen največji volumen površinskega odtoka visokovodnih valov od leta 1961 do leta 2010. Tudi ta ekstremni visokovodni val je kompleksen, kot je prikazano na sliki 61. Hitro naraščanje izjemnih vrednosti volumna površinskega odtoka je lahko povzročitelj poplavnega dogodka.

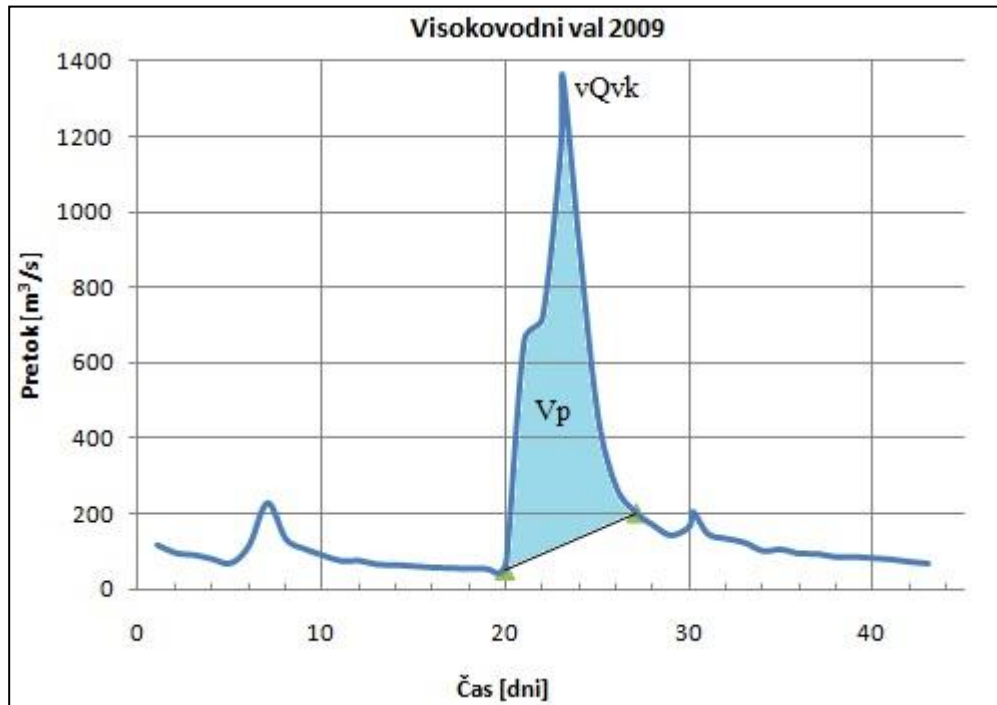


Slika 61: Kompleksni hidrogram leta 2000 (Uporabljena metoda 3)

Ekstremni visokovodni val leta 2009

Leta 2009 smo po nenadni otoplitvi, taljenju snežne odeje in obilnih padavinah doživeli obsežne božične poplave (Strojan in sod., 2010), ki so zajele večji del države (Kobold, 2011). Ekstremni visokovodni val Save v Šentjakobu se je začel 22. 12. 2009 in dosegel konico dne 25. 12. 2009 ob 14:15. PGD Zadobrova ima na svoji spletni strani zabeleženo intervencijo zaradi poplave dne 25. 12. 2009 (PGD Zadobrova, 2012). Visoka konica hidrograma ($1.357,61 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) in širša oblika v spodnjem delu hidrograma, sta

povzročitelja velikega volumna površinskega odtoka naraščajočega dela hidrograma, ki je povzročil poplavni dogodek.



Slika 62: Enostavni hidrogram leta 2009 (Uporabljena metoda 4)

Naš zaključek je, da ekstremni visokovodni val načeloma lahko predstavlja poplavni dogodek, vendar to ni pravilo. Poleg ekstremnih vrednosti parametrov, kot sta volumen površinskega odtoka in konica površinskega pretoka, pri pojavu poplavnega dogodka veliko vlogo igra tudi oblika in trajanje hidrograma.

5.4 Primerjava rezultatov dobljenih po različnih grafičnih metodah izločanja baznega odtoka

Grafične metode, ki smo jih primerjali so metoda 1 (kombinacija tro-točkovne metode in razdalje N), metoda 3 (tro-točkovna metoda) in metoda 4 (dvo-točkovna metoda) izločanja baznega odtoka na visokovodnih valovih od leta 1961 do leta 2010 (50-letno obdobje). Cilj primerjave teh grafičnih metod je bilo ugotoviti do kakšnih razlik pride pri pomembnih parametrih hidrograma, kot so volumen površinskega odtoka V_p , časovno trajanje T_t in konica površinskega pretoka $Q_{p,max}$ visokovodnega vala ter ali so v medsebojni povezavi.

5.4.1 Primerjava volumnov visokovodnih valov

Za določitev volumna površinskega odtoka, je potrebno hidrogram ločiti na ustrezne komponente. Nekateri od novejših konceptualnih modelov za simulacijo pretoka obravnavajo tri komponente. Prva komponenta je površinski odtok določenega dogodka padavin. Druga komponenta je pretok prejšnjih dogodkov padavin, ki prispeva k trenutnemu pretoku. Tretja komponenta pa je pretok določenega dogodka padavin, ki z zakasnitvijo pronica skozi zemljo. Pretežni del te tretje komponente je znan kot medtok in ga pogosto obravnavamo kot del površinskega odtoka (WFD, 2008) . V našem primeru smo lahko izvedli analizo s pomočjo merjenega hidrograma, ki temelji na določitvi dveh komponent. Z uporabljenimi grafičnimi metodami izločanja baznega odtoka smo ocenili delež površinskega in baznega odtoka. Iz vrednosti teh dveh komponent, smo nato izračunali površinski volumen po enačbi (17).

Preglednica 15: Razmerja volumnov med metodami

Leto	Razmerje volumnov med metodo 3 in metodo 1 V_{p3}/V_{p1}	Razmerje volumnov med metodo 3 in metodo 4 V_{p3}/V_{p4}	Razmerje volumnov med metodo 1 in metodo 4 V_{p1}/V_{p4}
1961	1,12	1,17	1,05
1962	1,08	1,15	1,06
1963	1,10	1,19	1,09
1964	1,10	1,23	1,12
1965	1,14	1,21	1,06
1966	1,10	1,18	1,07
1967	1,05	1,12	1,07
1968	1,10	1,50	1,37
1969	1,19	1,33	1,12
1970	1,10	1,45	1,31
1971	1,22	1,81	1,48
1972	1,23	1,64	1,33
1973	1,04	1,27	1,23
1974	1,21	1,59	1,31
1975	1,11	1,26	1,13
1976	1,09	1,26	1,15
1977	1,24	1,45	1,17
1978	1,25	1,31	1,05
1979	1,07	1,12	1,05
1980	1,17	1,22	1,05

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 15

1981	1,13	1,21	1,06
1982	1,12	1,29	1,15
1983	1,21	1,44	1,19
1984	1,19	1,33	1,12
1985	1,26	1,40	1,11
1986	1,07	1,15	1,08
1987	1,22	1,26	1,03
1988	1,26	1,36	1,08
1989	1,12	1,24	1,11
1990	1,08	1,27	1,17
1991	1,21	1,47	1,22
1992	1,11	1,26	1,14
1993	1,23	1,33	1,08
1994	1,26	1,43	1,14
1995	1,22	1,38	1,13
1996	1,19	1,56	1,31
1997	1,27	1,45	1,14
1998	1,08	1,16	1,08
1999	1,02	1,53	1,51
2000	1,04	1,27	1,22
2001	1,27	1,35	1,07
2002	1,04	1,21	1,17
2003	1,09	1,21	1,11
2004	1,06	1,17	1,11
2005	1,11	1,22	1,10
2006	1,06	1,15	1,08
2007	1,06	1,10	1,04
2008	1,01	1,20	1,19
2009	1,07	1,14	1,07
2010	1,05	1,15	1,09
Povprečje:	1,14	1,30	1,15

Kjer je:

- V_{p1} površinski volumen visokovodnega vala izračunan po metodi 1 izločanja baznega odtoka,
- V_{p2} površinski volumen visokovodnega vala izračunan po metodi 2 izločanja baznega odtoka,
- V_{p3} površinski volumen visokovodnega vala izračunan po metodi 3 izločanja baznega odtoka.

Vrednosti volumna površinskega odtoka so pri uporabi metode 3 do 27 % večje od volumna površinskega odtoka pridobljenega z metodo 1 izločanja baznega odtoka. Do razlik pride zaradi različne določitve druge prevojnne točke na upadajočem delu hidrograma. Pri metodi 1 je ta točka določena računsko, medtem ko je

pri metodi 3 določena subjektivno. Povprečno razmerje volumnov površinskega odtoka med metodo 3 in metodo 1 je 1,14.

Največjo razliko med volumni smo dobili pri primerjavi metode 3 in 4. Pri uporabi metode 3 je volumen površinskega odtoka v povprečju za 30 % večji kot pri uporabi metode 4. Največja razlika pa je bila kar 81 %. Razlog za večje volumne pri uporabi metode 3 je konkavna razmejitvena črta, zaradi katere je volumen baznega odtoka manjši kot pri uporabi metode 4. Manjši volumen baznega odtoka pa pomeni večji volumen površinskega odtoka.

Povprečno razmerje volumnov površinskega odtoka med metodo 1 in metodo 4 je 1,15. Volumen površinskega odtoka je bil pri uporabi metode 1 do 48 % večji kot pri uporabi metode 4.

Največje vrednosti volumnov površinskega odtoka smo dobili pri uporabi metode 3, sledile so vrednosti pri uporabi metode 1. Najmanjše vrednosti volumnov pa smo dobili z uporabo metode 4 (preglednica 18).

5.4.2 Primerjava časovnih trajanj visokovodnih valov

Preglednica 16: Razmerja časovnih trajanj med metodami

Leto	Razmerje trajanj med metodo 3 in metodo 1 ali 4 T_{t3}/T_{t1} ali T_{t3}/T_{t4}
1961	1,46
1962	1,24
1963	1,31
1964	1,32
1965	1,63
1966	1,38
1967	1,19
1968	1,14
1969	1,42
1970	1,17
1971	1,27
1972	1,46
1973	1,07

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 16

1974	1,42
1975	1,39
1976	1,08
1977	1,35
1978	1,65
1979	1,26
1980	1,21
1981	1,44
1982	1,40
1983	1,30
1984	1,46
1985	1,77
1986	1,28
1987	1,88
1988	1,51
1989	1,40
1990	1,18
1991	1,24
1992	1,33
1993	1,38
1994	1,40
1995	1,31
1996	1,32
1997	1,46
1998	1,15
1999	1,02
2000	1,10
2001	1,76
2002	1,14
2003	1,31
2004	1,20
2005	1,25
2006	1,30
2007	1,25
2008	1,04
2009	1,26
2010	1,17
Povprečje:	1,33

Kjer je:

- T_{t1} časovno trajanje visokovodnega vala določeno po metodi 1 izločanja baznega odtoka,
- T_{t3} časovno trajanje visokovodnega vala določeno po metodi 3 izločanja baznega odtoka,
- T_{t4} časovno trajanje visokovodnega vala določeno po metodi 4 izločanja baznega odtoka.

Časovno trajanje visokovodnih valov je skoraj enako dolgo pri uporabi metode 1 ali metode 4, saj je razlika manjša od 3 %.

Pri uporabi metode 3 je trajanje visokovodnega vala v povprečju za 33 % daljše kot pri uporabi metode 4 ali metode 1. Najdaljše trajanje visokovodnega vala smo torej dobili z metodo 1, s skoraj enakim trajanjem pa sledita metodi 1 in 4.

Najdaljše povprečno trajanje visokovodnega vala je 10,17 dni pri uporabi metode 3 (preglednica 18). Povprečno trajanje visokovodnega vala pri uporabi metode 1 ali 4 pa je med 7,8 in 7,9 dni.

5.4.3 Primerjava konic površinskega pretoka visokovodnih valov

Preglednica 17: Razmerja konic površinskega pretoka med metodami

Leto	Razmerje konic površinskega pretoka med metodo 1 ali 3 in metodo 4 Q_{p1}/Q_{p4} ali Q_{p3}/Q_{p4}
1961	1,04
1962	1,05
1963	1,05
1964	1,09
1965	1,04
1966	1,05
1967	1,03
1968	1,12
1969	1,08
1970	1,16
1971	1,18
1972	1,15
1973	1,13
1974	1,10

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 17

1975	1,09
1976	1,06
1977	1,10
1978	1,03
1979	1,04
1980	1,02
1981	1,08
1982	1,07
1983	1,10
1984	1,06
1985	1,05
1986	1,03
1987	1,02
1988	1,04
1989	1,03
1990	1,08
1991	1,12
1992	1,08
1993	1,08
1994	1,08
1995	1,07
1996	1,17
1997	1,10
1998	1,06
1999	1,15
2000	1,14
2001	1,04
2002	1,08
2003	1,05
2004	1,05
2005	1,06
2006	1,04
2007	1,02
2008	1,09
2009	1,06
2010	1,06
Povprečje:	1,07

Kjer je:

- Q_{p1} konica površinskega pretoka določena po metodi 1 izločanja baznega odtoka,

- Q_{p3} konica površinskega pretoka določena po metodi 3 izločanja baznega odtoka,
- Q_{p4} konica površinskega pretoka določena po metodi 4 izločanja baznega odtoka.

Konica površinskega dela pretoka je enaka pri uporabi metode 3 in metode 1. Razlika med konicama površinskega pretoka je pri uporabi metode 1 (ali 3) do 18 % večja kot pri uporabi metode 4. Manjša vrednost konice površinskega pretoka pri uporabi metode 4 je posledica dvo-točkovne metode, ki vertikalo konice hidrograma seka višje, kot jo metodi 1 ali 3, ki sta tro-točkovni metodi.

Velika konica pretoka ni neposredni pokazatelj dolgega časovnega trajanja in velikega površinskega odtoka visokovodnega vala.

Preglednica 18: Povprečne vrednosti parametrov visokovodnih valov glede na uporabljeno metodo izločanja baznega odtoka

Povprečni parameter visokovodnega vala	Metoda 1	Metoda 3	Metoda 4
Povprečni volumen površinskega odtoka \bar{V}_p	162.302.527,46	181.819.458,80	142.491.415,01
Povprečna konica površinskega pretoka $\bar{Q}_{p,max}$	849,35	849,35	794
Povprečno trajanje \bar{T}_t	7,86	10,17	7,76

V preglednici 18 vidimo vrednosti povprečnih parametrov visokovodnih valov, ki so bili izračunani iz petdesetletnih podatkov. Z analiziranjem smo pokazali, da z metodo 3 dobimo največje vrednosti parametrov hidrograma. Manjše trajanje, volumen in enako konico kot pri metodi 3, dobimo z uporabo metode 1. Najmanjšo vrednost volumna in konice pa dobimo z metodo 4.

Obravnavane grafične metode so bolj primerne za uporabo na enostavnih kot na kompleksnih hidrogramih.

Rezultati analize in primerjave vseh treh metod kažejo, da ni vseeno, katero metodo uporabimo za izločanje baznega odtoka. Ocenjujem, da je za reko Savo v Šentjakobu bolj primerna tro-točkovna (metoda 3) kot dvo-točkovna (metoda 1 in 4) grafična metoda izločanja baznega odtoka.

5.4.4 Primerjava povprečnih koeficientov in razmerij parametrov visokovodnih valov

V preglednici 19 so prikazane povprečne vrednosti koeficientov in razmerij parametrov visokovodnih valov glede na uporabljeno metodo izločanja baznega odtoka. Vse vrednosti v preglednici 19 so *povprečne vrednosti*, ki smo jih izračunali iz množice enajstletnih (od leta 2000 do leta 2010) vrednosti parametrov visokovodnih valov.

Preglednica 19: Povprečni koeficienti in razmerja parametrov visokovodnih valov

	$\bar{\epsilon}$	$\bar{\gamma}$	\overline{BFI}	$\frac{\overline{T_{gr}}}{\overline{T_t}}$	$\frac{\overline{T_{gr}}}{\overline{T_{des}}}$	$\frac{\overline{V_{gr}}}{\overline{V_p}}$	$\frac{\overline{V_{gr}}}{\overline{V_{des}}}$	$\overline{q_t}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]	$\overline{q_{b,0}}$ [$m^3 s^{-1} km^{-2}$]
Metoda 1	3,52	0,38	0,24	0,38	0,63	0,44	0,82	0,42	0,03
Metoda 3	3,43	0,33	0,25	0,29	0,43	0,39	0,69	0,42	0,03
Metoda 4	2,45	0,39	0,32	0,36	0,59	0,44	0,83	0,42	0,03

Kjer je:

- $\bar{\epsilon}$ povprečni koeficient izločevanja,
- $\bar{\gamma}$ povprečni koeficient oblike,
- \overline{BFI} povprečni indeks baznega odtoka,
- $\frac{\overline{T_{gr}}}{\overline{T_t}}$ povprečno časovno razmerje med časom rasti in celotnim časom trajanja hidrograma,
- $\frac{\overline{T_{gr}}}{\overline{T_{des}}}$ povprečno časovno razmerje med časom rasti in časom upadanja hidrograma,
- $\frac{\overline{V_{gr}}}{\overline{V_p}}$ povprečno volumensko razmerje med volumnom naraščajočega dela in volumnom površinskega odtoka hidrograma,
- $\frac{\overline{V_{gr}}}{\overline{V_{des}}}$ povprečno volumensko razmerje med volumnom naraščajočega dela in volumnom padajočega dela hidrograma,
- $\overline{q_t}$ povprečni specifični največji pretok [$m^3 s^{-1} km^{-2}$],
- $\overline{q_{b,0}}$ povprečni specifični začetni bazni odtok [$m^3 s^{-1} km^{-2}$].

Koeficient izločevanja nam pove, da je volumen površinskega odtoka za približno 250 % večji od volumna baznega odtoka pri uporabi metode 1 ali 3. Pri uporabi metode 4 pa je volumen površinskega odtoka za 145 % večji od volumna baznega odtoka, kar je za 100 % manj kot pri uporabi metode 1 ali 3.

Pri vseh treh metodah smo dobili nizko vrednost koeficienta oblike (od 0,33 do 0,39). Nizka vrednost koeficienta oblike pa predstavlja bolj trikotno obliko hidrograma kot štirikotno.

Indeks baznega odtoka (*BFI*) je podan z razmerjem med volumnom baznega odtoka in celotnim volumnom dogodka za čas trajanja dogodka. Indeks baznega odtoka nam pove oceno deleža baznega odtoka, ki prispeva k celotnemu volumnu dogodka. Pri uporabi metode 1 ali 3 je izračunan povprečni *BFI* med 0,24 in 0,25. Volumen baznega odtoka torej v tem primeru predstavlja do 25 % celotnega volumna vala. Pri uporabi metode 4 je volumen baznega odtoka za manj kot 10 % višji in tako volumen baznega odtoka predstavlja 32 % celotnega volumna vala.

Časovno razmerje med časom rasti in celotnim časom trajanja hidrograma smo pri uporabi metode 3 dobili 0,29 in pri uporabi metode (1 ali 4) približno 0,39. Po študiji romunskih vodotokov, naj bi bilo razmerje za porečja z majhno prispevno površino običajno med 0,50 in 0,33 (Pandi, 2010). Pri uporabi metode 1 (ali 4), bi torej lahko sklepali, da gre za porečje z majhno prispevno površino (50-100 km²), kar bi bil napačen zaključek, saj je naša prispevna površina velikosti 2.284,80 km². Pri uporabi metode 3 dobimo primerljiv rezultat, da obravnavani valovi pripadajo porečju z veliko prispevno površino.

Običajno je čas rasti krajši od časa upadanja, ker je čas odtekanja vode daljši od časa naraščanja vode (Pandi, 2010). Tudi v našem primeru smo dobili take rezultate. Pri uporabi metode 1 ($\frac{\overline{T_{gr}}}{T_{des}} = 0,63$) in metode 4 ($\frac{\overline{T_{gr}}}{T_{des}} = 0,59$) je bilo to razmerje nekoliko večje kot pri uporabi metode 3 ($\frac{\overline{T_{gr}}}{T_{des}} = 0,43$).

Volumensko razmerje med volumnom rasti in volumnom upadanja hidrograma je pri uporabi metode 1 ali 4 enako 0,44, pri uporabi metode 3 pa je 0,39. Vrednosti predstavljajo vodotok s precej hitro rastočo koncentracijo toka (Pandi, 2010).

Navedena specifična pretoka v preglednici 19 predstavljata razmerje med konico ali baznim odtokom in prispevno površino (poglavje 2.3.6). Ocena vrha celotnega odtoka je 420 l/s/km² in seveda predstavlja največji specifični pretok v času konice hidrograma. Specifični začetni bazni odtok znaša za obravnavano obdobje 30 l/s/km². Vrednosti specifičnih pretokov so enake ne glede na uporabljeno metodo izločanja baznega odtoka. Povprečni specifični odtoki na osnovi izmerjenih pretokov od leta 1971 do leta 2000, so po oceni ARSO na vodomerni postaji Šentjakob na reki Savi med 10 in 25 l/s/km² (Bat et al., 2008).

6 ZAKLJUČEK

Vodotok je kot živ organizem, ki se neprestano spreminja, bodisi zaradi zoba časa, naravnih nesreč ali človeškega vpliva. Prav zato, ker vodotoki po naravi niso konsistentni, so hidrološke analize potrebne tako kot temelji hiše.

Boljše kot imamo osnovne podatke (hidrološke podatke in analize), bolje lahko upravljamo z vodnimi viri. Potrebno je poudariti, da podatki sami po sebi nimajo nobene vrednosti, njihovo vrednost dobimo s pomočjo analiz. Podatki, ki jih zbiramo danes, za analitike že sedaj predstavljajo veliko vrednost (Anzeljc et al., 1998). Večje število kvalitetnih podatkov pripomore k večji natančnosti analiz ter posledično tudi točnejšim rezultatom. Kljub temu, da so hidrološke analize v primerjavi z zbiranjem podatkov manjši strošek, so le te vse prevečkrat zanemarjene in se jih vključuje v projekte prepozno.

Slovenija je hidrološko zelo raznolika, kar neposredno vpliva na raznolikost hidroloških procesov. Hidrološke procese, kot so padavine, odtok, infiltracija itd.. lahko uspešno predvidevamo šele, ko jih temeljito razumemo. Pri razumevanju hidroloških procesov so zato hidrološke analize neizogibne. Predvidevanje procesov v današnjem svetu precej vpliva na kvaliteto in varnost življenja.

Izbrani dogodki visokovodnih valov so bili analizirani na podlagi meritev o pretokih. Hidrogram odtoka visokovodnih valov smo vzeli za izhodišče primera analize, ki je temeljila na opazovanju. Vedno moramo upoštevati s kakšnimi podatki razpolagamo. V našem primeru, smo se zato skozi krajši primer analize odločili ali bomo analizirali urne ali srednje dnevne vrednosti pretokov. Zaključili smo, da smo iz urnih vrednosti pretokov sicer dobili bolj natančne rezultate kot s srednjimi dnevnimi vrednostmi pretokov, vendar pa so se slednji podatki izkazali bolj primerni za apliciranje grafičnih metod izločevanja baznega odtoka, poleg tega pa so ti podatki dosegljivi za veliko daljše časovno obdobje, kar je pri verjetnostnih analizah bistvenega pomena.

Razmerje med baznim in površinskim odtokom vodotoka smo določili s tremi grafičnimi metodami izločanja baznega odtoka. Pri prenašanju tujih metod v naš prostor, je potrebno poznati pogoje nastanka same metode in preveriti ali je uporaba izbrane metode primerna za naš prostor. Nato jo je potrebno smiselno aplicirati. Z analizo pretokov na vodomerni postaji Šentjakob na vodotoku Sava, smo za daljše časovno obdobje, od leta 1961 do leta 2010 (50 let), določili pomembne parametre visokovodnih valov: konico površinskega pretoka, volumen površinskega odtoka in trajanje. Iz dobljenih nizov podatkov, smo raziskali razmerja med konico, volumnom in trajanjem visokovodnega vala ter ali izbira metod izločanja

baznega odtoka vpliva na ta razmerja. Razmerja med parametri visokovodnih valov smo preverili s korelacijskimi koeficienti in z osnovno statistično analizo.

Med konicami in volumni visokovodnih valov smo ugotovili močno pozitivno linearno povezanost z visokimi korelacijskimi koeficienti (od 0,7 do 0,8). Statistična analiza je potrdila, da je odvisnost med tema dvema spremenljivkama zelo močno statistično značilna.

Srednje močno pozitivno linearno odvisnost smo ugotovili med volumnom površinskega odtoka in trajanjem visokovodnega vala. Korelacijski koeficient je približno enkrat manjši kot korelacijski koeficient med konico in volumnom. Kljub vsemu pa odvisnost obstaja, saj je dodatna statistična analiza pokazala zelo močno statistično značilno odvisnost.

Pozitivno in zelo slabo linearno povezanost ($R < 0,08$) smo dobili med konico in trajanjem visokovodnega vala. Odvisnost med njima ni pokazala tudi dodatna statistična analiza.

Dokazali smo, da spreminjanje mejne vrednosti pretoka vpliva na parametre visokovodnega vala in njihova razmerja. Z višanjem mejne vrednosti se vrednosti parametrov visokovodnega vala zmanjšujejo. Korelacijski koeficient med konico in volumnom se s spreminjanjem mejnih vrednosti pretoka zelo malo spreminja. Velikost korelacijskega koeficienta med konico in trajanjem ter med volumnom in trajanjem, pa se večja z večanjem mejne vrednosti pretoka.

Pri primerjavi rezultatov po različnih grafičnih metodah, smo ugotovili, da si v splošnem po velikosti, od najvišjih do najmanjših vrednosti parametrov visokovodnih valov, sledijo uporabljene metode izločanja baznega odtoka po sledečem vrstnem redu: metoda 3, metoda 1 in metoda 4.

VIRI

Agencija republike Slovenije za okolje (ARSO). 2011a. Hidrološki podatki. Sporočilo za: Šraj. M. 7.9.2011.

Agencija republike Slovenije za okolje (ARSO). 2011b. Hidrološki podatki.
<http://www.arso.gov.si/> (Pridobljeno 15. 9. 2011.)

Akintuğ, B. 2005. Hydrograph analysis. Middle East Technical University: Department of Civil Engineering: 77 str.
<http://www.metu.edu.tr/~bertug/CVE376/CVE%20376%20HYDROLOGY%20-%205.%20Hydrographs.pdf> (Pridobljeno 20. 11. 2011.)

Anzeljc, D., Burja, D. 1998. Hidrologija!? Zakaj? V: Mišičevi vodarski dan: zbornik referatov. Maribor: Vodnogospodarski biro Maribor: 6 str.
<http://mvd20.com/LETO1998/R1.pdf> (Pridobljeno 4. 12. 2011.)

Bat, M. Dolinar, M., Frantur, P., Hrvatina, M., Kobold, M., Kurnik, B., Nadbath, M., Ožura, V., Uhan, J., Ulaga, F. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971-2000 = Water balance of Slovenia 1971-2000. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 119 str.

Bergmann, H., Sackl, B. 1990. Development of a flood data base and its application in water resources management. Beijing Symposium, International Association of Hydrological Sciences (IAHS): 197, str. 211-217.
http://iahs.info/redbooks/a197/iahs_197_0211.pdf (Pridobljeno 18. 10. 2011.)

Blume, T., Zehe, E., Bronstert, A. 2007. Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. Hydrological Sciences Journal 52: 5, str. 843-862.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.52.5.843> (Pridobljeno 17. 11. 2011.)

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Cheng, K. 2011. Hydrology rainfall-runoff modeling (I). National Taiwan University:Department of Bioenvironmental Systems Engineering: 42 str.

[http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=hydrology%0Brainfall%20-%20runoff%20modeling%20\(i\)&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rslabntu.net%2FHYDROLOGY%2FRainfall_Runoff_1.ppt&ei=g67CTv-wK-rg4QTt1cm9DQ&usg=AFQjCNGse-DI20wftE3LA4mH7W6gDSqPyQ&cad=rja](http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=hydrology%0Brainfall%20-%20runoff%20modeling%20(i)&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rslabntu.net%2FHYDROLOGY%2FRainfall_Runoff_1.ppt&ei=g67CTv-wK-rg4QTt1cm9DQ&usg=AFQjCNGse-DI20wftE3LA4mH7W6gDSqPyQ&cad=rja) (Pridobljeno 15. 11. 2011.)

Cimen, M., Saplioglu, K. 2004. A Procedure for separation of baseflow. V: BALWOIS Conference 2004, Macedonia: 7 str.

http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-8o-140.pdf (Pridobljeno 7. 11. 2011.)

EU Water Framework Directive (WFD). 2008. SurfacewaterGroundwaterInteraction. Appendix 8: Hydrograph separation techniques and recharge in Ireland: str. 195-244.

http://www.wfdireland.ie/docs/18_SurfacewaterGroundwaterInteraction/SWGW%20Interaction%20POM%20-%20Appendices%208%20and%209.pdf (Pridobljeno 17. 11. 2011.)

Gonzales, A. L., Nonner, J., Heijkers, J., Uhlenbroo, S. 2009. Comparison of different base flow separation methods in a lowland. Hydrology and Earth System Sciences, Hydrology and Earth System Sciences Discussions 6: str. 3483-3515.

<http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/3483/2009/hessd-6-3483-2009.pdf> (Pridobljeno 30. 9. 2011.)

Huff, D. D., Begovich C. L. 1976. An evaluation of two hydrograph separation methods of potential use in regional water quality assessment. OAK Ridge National Laboratory: Environmental Sciences Division Publication 714: 112 str.

http://walkerbranch.ornl.gov/reports/tm_5258.pdf (Pridobljeno 4. 12. 2011.)

Karmakar, S., Simonovic, S. 2007. Flood frequency analysis using copula with mixed marginal distributions. Water resources research report 5: 142 str.

<http://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/products/55.pdf> (Pridobljeno 3. 11. 2011.)

Kobold, M. 2011. Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki = Comparison of floods in september 2010 with registered historic flood events. UJMA 25: 56 str.

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2011/048.pdf> (Pridobljeno 1. 2. 2012.)

Mekong River Commission (MRC). 2007. Annual Mekong flood report 2006. Vientiane: 76 str.

<http://www.mrcmekong.org/assets/Publications/basin-reports/Annual-Mekong-Flood-Report-2006.pdf>

(Pridobljeno 1. 2. 2012.)

Microsoft Office Excel 2003 (Microsoft Slovenija). 2011. Orodja za statistično analizo.

<http://office.microsoft.com/sl-si/excel-help/orodja-za-statisticno-analizo-HP005203873.aspx> (Pridobljeno 1. 12. 2011.)

Mikoš, M., Brilly, M., Ribičič, M. 2004. Poplave in zemeljski plazovi v Sloveniji = Floods and landslides in Slovenia. Acta hydrotehnica 22, 37: 113-133.

http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/izdane_st/22_37.html (Pridobljeno 1. 2. 2012.)

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Muller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotehnica 20, 32: 70, 106, 188, 224, 258.

ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 17. 10. 2011.)

Ministry of Science and Technology (MOST): Department of Tehnical and Vocational Education. B.Tech. (Second Year). 2011. CE-04026 Engineering hydrology-chapter five runoff: str. 50-78.

http://www.most.gov.mm/techuni/media/CE_04026_chap56.pdf (Pridobljeno 7. 11. 2011.)

Murphy, R., Graszkiwicz, Z., Hill, P., Neal, B., Nathan, R., Ladson, T. 2009. Australian rainfall and runoff. Revision project 7: Baseflow for catchment simulation. Stage 1 report – volume 1 – selection of approach. Barton, Engineers Australia, Engineering House: 111 str.

http://www.ncwe.org.au/arr/Website_links/ARR_Project_7_Stage1_report_Final.pdf (Pridobljeno 22. 9. 2011.)

Nadarajah, S., Shiau, J.T. 2005. Analysis of extreme flood events for the Pachang river, Taiwan. Water resources management 19: str. 363-374.

<http://www.springerlink.com/content/k7j3802383612235/> (Pridobljeno 11. 9. 2011.)

National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL). 2011. Module 2: The science of surface and ground water. Lesson 2: Runoff and infiltration. Version 2 CE IIT. Kharagpur: 13 str.

<http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Water%20Resource%20Engg/pdf/m2102.pdf> (Pridobljeno 30. 9. 2011.)

Pandi, G. 2010. The analysis of flood waves. Air and water components of the environment conference, "Babes-Bolyai" University Cluj, Napoca Faculty of Geography: 10 str.

http://conference.ubbcluj.ro/aerapa/2010/pdf/PGabor_1.pdf (Pridobljeno 11. 10. 2011.)

PGD Zadobrova. 2012. Intervencije.

<http://www.pg-dzadobrova.si/index.htm> (Pridobljeno 6. 2. 2012.)

Stream Processes. 2011. Stream parameters.

http://myweb.cwpost.liu.edu/vdivener/notes/streams_601.htm (Pridobljeno 30. 11. 2011.)

Texas Tech University (TTU). 2009. CE 5361 - Surface water hydrology: Hydrographs and base flow: 7 str.

http://cleveland2.ce.ttu.edu/teaching/ce_5361F09/5-Hydrographs/meeting_011/ce_5361_meeting_011.pdf (Pridobljeno 30. 11. 2011.)

The World Meteorological Organization (WMO). 1994. Guide to hydrological practises: 770 str.

<http://www.scribd.com/doc/18116781/WMO168-Guide-to-Hydro-Logical-Practices> (Pridobljeno 17. 11. 2011.)

Tularam, G. A., Ilahee, M. 2007. Base flow separation using exponential smoothing and its impact on continuous loss estimates. Modeling and simulation society of Australia and New Zeland: 7str.

http://www.mssanz.org.au/MODSIM07/papers/28_s21/BaseFlow_s21_Tularam_.pdf (Pridobljeno 25. 11. 2011.)

Turk, G. 2011. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 240 str.

<http://km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/sei/vrs.pdf> (Pridobljeno 8. 2. 2012.)

Willems, P. 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software archive* 24: 311-321.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815208001606> (Pridobljeno 15. 9. 2011.)

Yue, S., Ouard, T., Bobe'e. B., Legendre P., Bruneau, P. 2002. Approach for describing statistical properties of flood hydrograph. A construction of annual typical flood hydrograph. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:2(147): 7 str.

http://ascelibrary.org/heo/resource/1/jhyeff/v7/i2/p147_s1?isAuthorized=no (Pridobljeno 11. 9. 2011.)