Određivanje glavne krivulje recesije izvora Rude, Jadro, Žrnovnice, Omble i Vrljike

Brkić, Maja

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:322133

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Maja Brkić

Split, 2014.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Maja Brkić

Određivanje glavne krivulje recesije izvora Rude, Jadro, Žrnovnice, Omble i Vrljike

Diplomski rad

Split,2014.

Određivanje glavne krivulje recesije izvora Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble

Sažetak:

Prikazan je postupak određivanja krivulja recesije hidrograma otjecanja te pripadajuće glavne krivulje recesije izvora Ruda, Jadra, Žrnovnice, Vrljike i Omble za razdoblje od 2000. do 2004. godine. Koeficijenti recesije su određeni pomoću četiri metode te su međusobno uspoređeni.

Ključne riječi:

rijeka Ruda, rijeka Jadro, rijeka Žrnovnica, rijeka Vrljika, rijeka Ombla, krš, hidrogram otjecanja, krivulja recesije, glavna krivulja recesije, koeficijent recesije

Determination of master recession curve of spring Ruda, Jadro, Žrnovnica, Vrljika and Ombla

Abstract:

Procedure of determination of recession curve and its master recession curve for springs Ruda, Jadro, Žrnovnica, Vrljika, Ombla during the period from 2000. till 2004. are given in this study. The recession coefficients will be defined using four methods.

Ključne riječi:

river Ruda, river Jadro, river Žrnovnica, river Vrljika, river Ombla, karst, runoff hydrograph, recession curve, master recession curve, recession coefficient

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Maja Brkić

BROJ INDEKSA: 376/2012

KATEDRA: **Katedra za hidrologiju**

PREDMET: Inženjerska hidrologija

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Određivanje glavne krivulje recesije izvora Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble

Opis zadatka: Na temelju izmjerenih vrijednosti dnevnih protoka izvora rijeka Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble u razdoblju od 2000. do 2004. godine, potrebno je odrediti i analizirati recesijska razdoblja za svaku godinu, odrediti glavnu krivulju recesije, te pripadajući koeficijent recesije. Analiza recesijskog dijela hidrograma otjecanja izvršena je pomoću četiri metode: metoda superpozicije koristeći pristup matematičkog izražavanja krivulje recesije (Petraš, 1985.), metoda „matching strip“ (Snyder, 1939.), „tabulation“ metoda, metoda korelacije (Langbein, 1938.)

U Splitu, 17.03.2014.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc. Vesna Denić-Jukić

Predsjednica Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:

Prof.dr.sc. Mirela Galić

..mentorici Prof. dr. sc. Vesni Denić-Jukić
..svim prijateljima i kolegama
..roditeljima,sestri i Goranu

Sadržaj

Sadržaj 1
1 UVOD 3
2 OTJECANJE VODE U KRŠU 4
3 OSNOVNE KARAKTERISTIKE SLIVNIH PODRUČJA 6
3.1 Sliv rijeke Cetine 6
3.1.1 Rijeka Ruda 6
3.2 Slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice 9
3.2.1 Rijeka Jadro 9
3.2.2 Rijeka Žrnovnica 11
3.3 Sliv izvora Imotskog polja 14
3.3.1 Rijeka Vrljika 14
3.4 Sliv rijeke Omble 16
3.4.1 Rijeka Ombla 16
4 MALE VODE 19
5 ANALIZA RECESIJSKOG DIJELA HIDROGRAMA OTJECANJA 21
5.1 Hidrogram otjecanja 21
5.2 Analiza krivulja recesije 24
5.3 Izdvajanje krivulje recesije iz hidrograma otjecanja 28
5.3.1 Hidrogram i recesija rijeke Rude 28
5.3.2 Hidrogram i recesija rijeke Jadro 30
5.3.3 Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice 33
5.3.4 Hidrogram i recesija rijeke Vrljike 35
5.3.5 Hidrogram i recesija rijeke Omble 38
5.4 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema metodi „matching strip“ 41
5.5 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema „tabulation method“ 47
5.6 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema metodi korelacije (Langbein,1938.) 62
5.7 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema Petrašu 63
5.7.1 Konstrukcija krivulje pražnjenja koristeći princip superpozicije 64
5.7.2 Konstrukcija glavne recesijske krivulje 93

6 Zaključak 106
7 Literatura 107

1 UVOD

U ovom diplomskom radu provedena je analiza krivulje recesije i određena je glavna recesijska krivulja (MRC- master recession curve) izvora rijeka Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble, u razdoblju od 2000.- 2004. godine.

Korišteni podaci su protoci izmjereni na mjernim stanicama izvora rijeke Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble, te dani su u tablicama u Prilogu.

Analiza je provedena kroz četiri metode: „matching strip“ metoda (Snyder, 1939.), „tabulation method“, metoda korelacije (Langbein, 1938.), i metoda superpozicije koristeći pristup matematičkog izražavanja krivulje recesije (Petraš, 1985.).

Kao rezultat analize dobiven je koeficijent recesije koji je važan u procjeni rezervi podzemnih voda u vodonosniku, te mogućnosti korištenja vodotoka za vodoopskrbu i navodnjavanje u tim bezoborinskim razdobljima.

2 OTJECANJE VODE U KRŠU

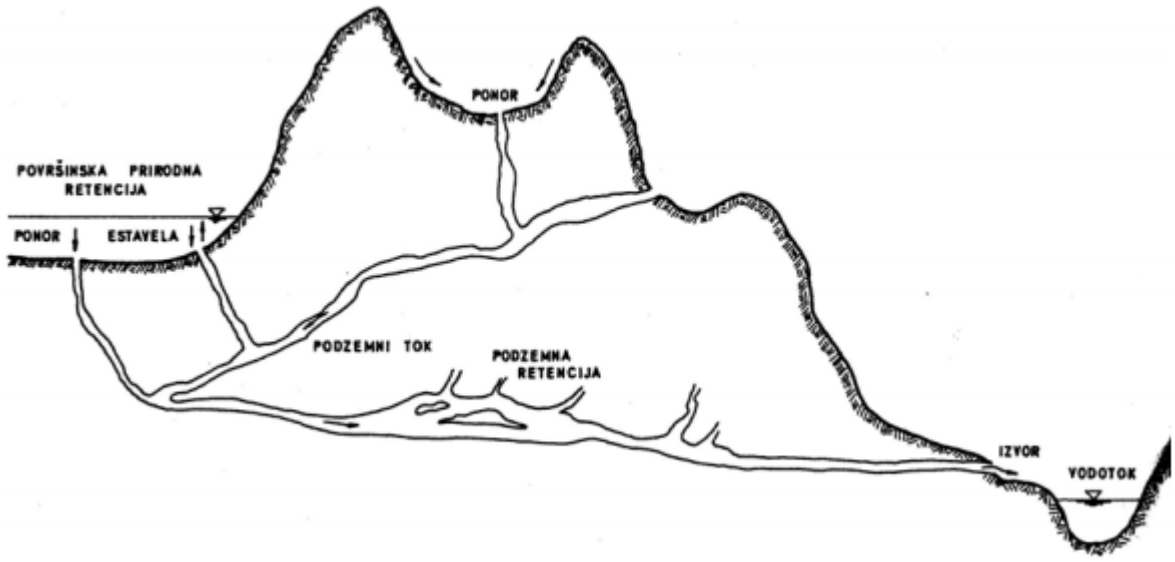
Krš je reljef sa pretežno podzemnim tokom vode kroz topljive stijene (vapnenac, dolomit, sadru, kredu i halit. U Hrvatskoj obuhvaća površinu oko 26 000 km^2 tj. polovicu njenog ukupnog teritorija.

Snažni tektonski procesi u karbonatnim stijenama stvorili su cijeli niz pukotina i rasjeda, koji omogućuju prodiranje vode u dublje zone. Ova dva preduvjeta zajedno sa velikom količinom oborina dovode do procesa okršavanja. Rezultat tog procesa su različiti krški oblici na površini terena i u podzemlju. Maksimalno okršavanje nastaje u područjima s velikom količinom oborina gdje se sezonski izmjenjuju izrazito vlažna i suha razdoblja.Voda zajedno sa CO_2 otapa kalcijev karbonat te se na površini stvaraju izbrazdane udoline ili škrape. Proširivanjem te urušavanjem nastaju udubine ponikve, doci ili vrtače. Uvale su zavale duž većim pukotinama, a najveće zavale sa rijekom su krška polja.

Za ukupne količine vode koje padnu na sliv te otječu, karakeristično obilježje krša je da je veliki prikupljač. Zbog brzog poniranja vode u podzemlje, gubitci uslijed isparavanja manju su u krškim nego u nekrškim područjima.

Što se tiče gustoće hidrografske mreže, krš je izrazito siromašan. Više vode se nalazi u podzemlju nego na površini, stoga su krški tereni uglavnom bezvodni. Najčešća pojava je glavni vodotok sa nekoliko glavnih pritoka. U slučaju da glavni vodotoci završavaju u ponorima krških polja, zbog ograničenog kapaciteta ponora, česta pojava su sezonske poplave polja.

Najvažnija osobina krša je kapacitet podzemlja. U podzemlje ulazi oborinska voda koja padne na slivnu površinu, a veličina podzemne retencije i propusna moć izvorišta u najvećoj mjeri upravljaju izlazom iz podzemnog sustava, odnosno otjecanjem u obliku površinskog vodotoka.



Slika 2.1.Krški podzemni sustav

Dimenzije pukotina u kršu mogu biti različite: od prostranih špilja, podzemnih rijeka pa sve do mikro pukotina koje ako su ispunjene pijeskom i glinom, mogu dugoročno usporiti prolaz vode kroz podzemlje.

Otjecanje vode kroz krš ostaje nepoznanica, tj. „crna kutija“ za koju znamo samo ulaz i izlaz. Točna putanja vode, stvarna dužina pa ni stvarna brzina vode nije poznata.

3 OSNOVNE KARAKTERISTIKE SLIVNIH PODRUČJA

3.1 Sliv rijeke Cetine

Sliv rijeke Cetine je najveći sliv u Splitsko – Dalmatinskoj Županiji. Izvorište rijeke je u podnožju Dinare , a duljina toka do ušća kraj Omiša je 100,5 km. Zona napajanja ovog krškog izvora i slivno područje seže duboko na sjever, van granice. S ovog velikog krškog sliva slijevaju se, uglavnom podzemno, velike količine vode prema koritu rijeke Cetine. Ukupna površina sliva je 4090 km^2.

Sliv gornjeg toka je karakterističan po tome što se istjecanje podzemnih voda s viših razina polja jugozapadne Bosne odvija duž rasjedne zone Vrlika - Sinj – Trilj uzduž koje su propusni mezozoiski karbonati došli u kontakt s nepropusnim neogenskim laporima Sinjskog polja, stvarajući tako barijeru podzemnim vodama i lokalnu erozijsku bazu. Prosječna količina oborina na slivu je 1.450mm što na širokom području omogućava koncentraciju velikih količina vode.

U Sinjskom polju javljaju se mnogobrojni jaki krški izvori: Šilovka, Rumin Veliki i Mali, Kosinac, Ruda Velika i Mala, Grab. Izvorište se sastoji od nekoliko jakih vrela, ali također i nizvodno se javljaju obilata krška vrela Dabar, Dragovića vrelo, Radonjino vrelo koje su dijelom potopljena akumulacijom Peruća. Srednji i najveći godišnji protok u gornjem toku je 140 m^3/s , a u srednjem toku ispod Trilja je 1000 m^3/s. Vidljivo je da sliv gornjeg toka se prazni u kanjon rijeke Cetine, južno od Trilja.

3.1.1 Rijeka Ruda

Izvor Rude se nalazi u gornjem dijelu sliva rijeke Cetine, sjeveroistočno od Trilja, kod HE Orlovac u selu Ruda. Voda izvire na visini cca 320 m n.m. i formira rijeku Rudu, koja utječe u Cetinu uzvodno od Trilja. Glavni izvor rijeke je Velika Ruda, a također ima tri pritoka – desni Mala Ruda i Ovrlja, te lijevi Grab.



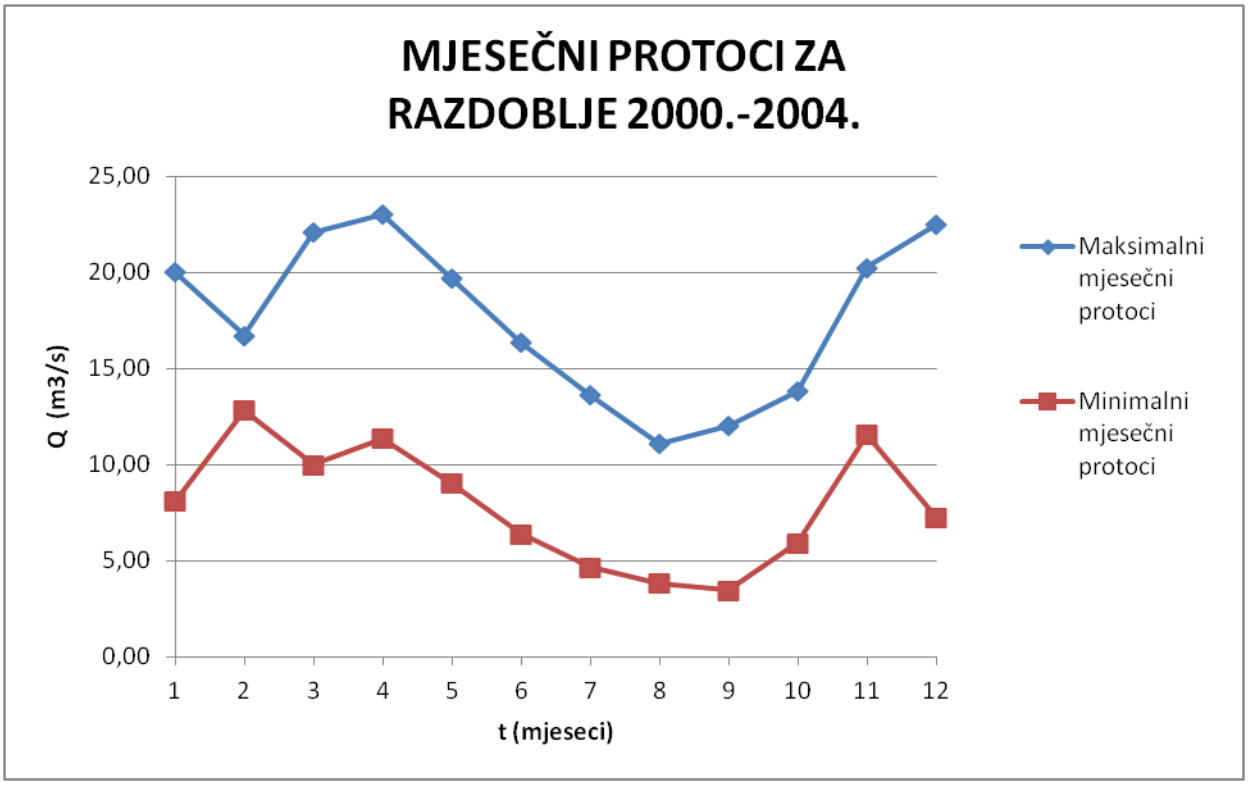
Slika 3.1. Izvor rijeke Rude

Izvor Ruda Velika koristi se za potrebe uzgoja ribe, ali zbog svoje izdašnosti i u ljetnim mjesecima predstavlja veliki potencijal za vodoopskrbu potrebe Splitko-Dalmatinske županije, te kao takav treba postati sastavni dio dugoročnog rješenja.

Izvor Ruda (tunel) se nalazi u gornjem dijelu sliva Cetine, sjevernoistočno od Trilja, kod HE „Orlovac“. Voda izvire na visini od 298 m n.m. i utječe u riječicu Rudu. Izvor Ruda (tunel) se koristi za potrebe vodoopskrbe, kao glavni zahvat za sustav Grupnog vodovoda Sinjske krajine.

Izvor Ruda Mala se nalazi u gornjem dijelu sliva rijeke Cetine, sjeveroistočno od Trilja, kod HE „Orlovac“ , u blizini postojećeg zahvata. Voda izvire na visini 298 m n.m. i utječe u riječicu Rudu. Vodotok Ruda Mala je bujičnog karaktera i u ljetnom periodu presušuje, te kao takav nije od značaja za vodoopskrbu.

.



3.2. Prikaz mjesečnih protoka u razdoblju od 2000.-2004.

Na *slici 3.2.* prikazani su maksimalni i minimalni mjesečni protoci u razdoblju od 2000. do 2004. koji su bili analizirani u ovom radu. Vidljivo je da je najmanji protok 3,45 m^3/s , dok je makismalni opaženi protok 23,03 m^3/s.

3.2 Slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

Ovo područje je najznačajnije s obzirom na broj stanovnika koji se opskrbljuje pitkom vodom s ovih izvorišta. Obuhvaća specifičan prirodno-geografski prostor u širem zaleđu Splita, površine oko 430 km^2. Jako složeni i promjenjivi hidrogrološki i hidrološki odnosi na slivnom području ne dopuštaju jednoznačno određivanje granice sliva. Slivne površine izvora Jadra i Žrnovnice su zajedničke te se nemogu promatrati odvojeno.

Sjevernu razvodnicu sliva uvjetuje hidrogeološka barijera sjeverno od Mućkog polja. Barijeru izgrađuju nepropusne stijene trijasa. Oborine koje padnu stvaraju više povremenih bujičnih tokova koje se slijevaju u polje u koje poniru na kontaktu s propusnim stijenama. Zapadna granica je podzemna razvodnica kojom ovaj sliv graniči sa slivom izvora Pantan. Južnu granicu određuje kontakt propusnih stijena Zagore i nepropusnih stijena priobalnog područja. Nepropusne stijene sežu duboko ispod razine mora i vrše funkciju hidrogeološke barijere. Istočnu granicu je teško odredit zbog vrlo složenih hidrogeoloških odnosa u srednjem toku Cetine. Pretpostavlja se zonarna razvodnica koja se pomiče u zavisnosti od hidroloških uvjeta. Dokazana je podzemna veza sliva Cetine sa izvorom Jadra i Žrnovnice. Izgradnjom akumulacije Pranjčevići povećala se izdašnost izvora Žrnovnice pa više ne presušuje.

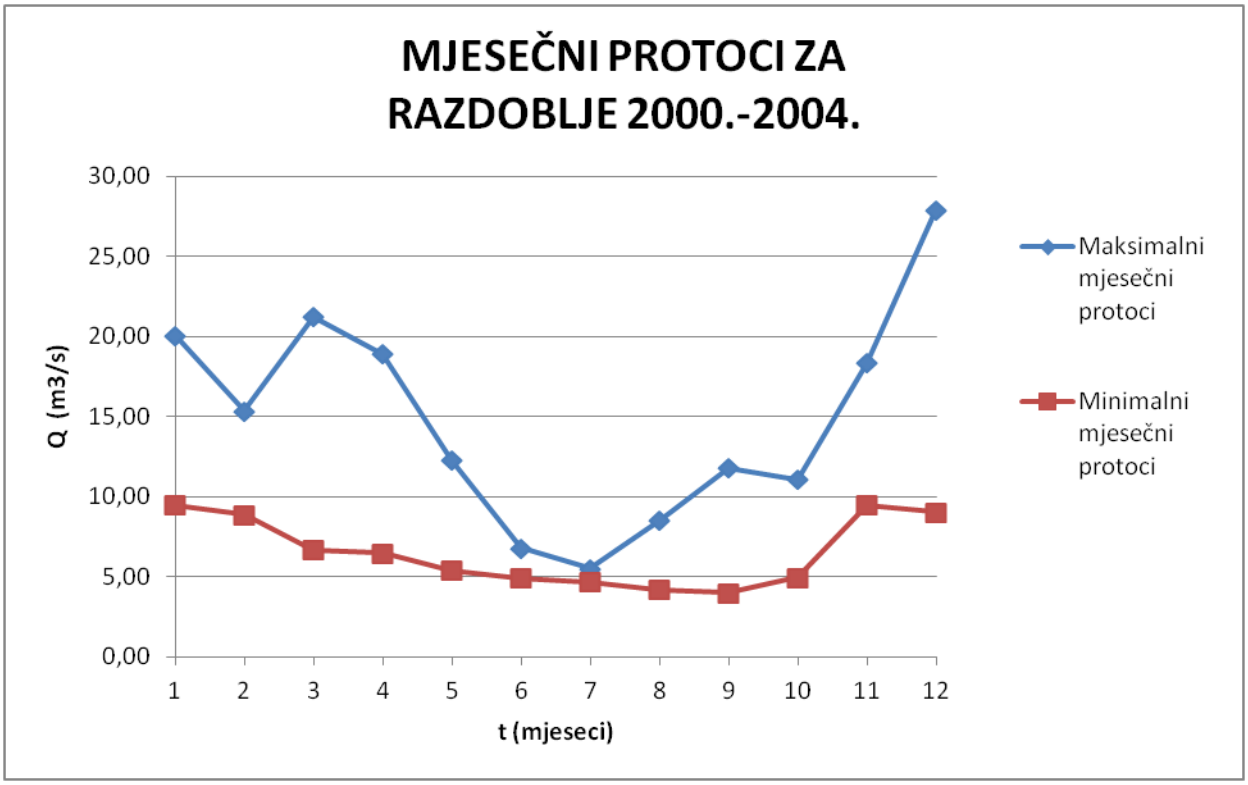
3.2.1 Rijeka Jadro

Rijeka Jadro nastaje trenutno od podzemnog toka s gornjih horizonta, koji izbija na površinu. Izvor rijeke nalazi se u podnožju krajnjeg zapadnog dijela planine Mosor 32,5 m n.m..



Slika 3.3. Izvor rijeke Jadro

U srednjem toku se sastoji od glavnog korita i tri rukavca koja su oko 1,0 km prije ušća u more opet spojena u zajedničko korito. Najveći dio rijeke je reguliran, ali još uvijek ne u potpunosti. Gornji tok rijeke je prograšen zaštićenim područjem prirode u kategoriji posebnog ihtiološkog rezervata. Protok Jadra brzo reagira na oborine na slivu. Najmanji izmjereni protok je 0,22 m^3/s , a najveći je 78,1 m^3/s. Srednji godišnji protok iznosi 9,7 m^3/s. Cijelom svojom dužinom od 4,3 km protječe kroz grad Solin. Sa stanovišta vodoopskrbe rijeka Jadro je značajna jer se na njoj nalazi izvorište i vodozahvat koji se koristi za vodoopskrbu gradova Split, Solin, Kaštela i Trogir.



3.4 Prikaz mjesečnih protoka rijeke Jadro za razdoblje 2000.-2004.

Na *slici 3.4.* prikazani su maksimalni i minimalni mjesečni protoci u razdoblju od 2000. do 2004. koji su bili analizirani u ovom radu. Vidljivo je da je najmanji protok 3,97 m^3/s , dok je makismalni opaženi protok 27,90 m^3/s

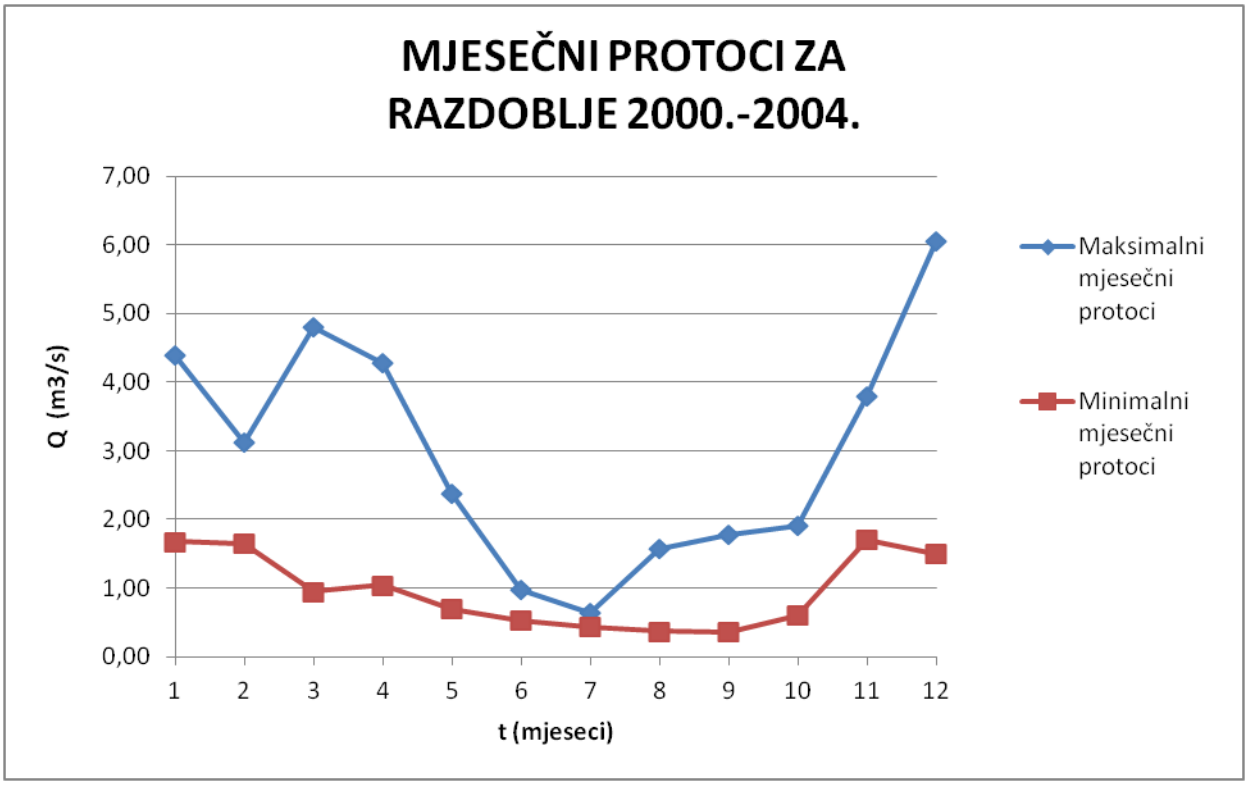
3.2.2 Rijeka Žrnovnica

Rijeka Žrnovnica je bujični vodotok dužine 5,1 km. U gornjem toku proizvodi znatne količine vučenog nanosa koje taloži u srednjem i donjem toku, te nakon prolaza kroz Stobrečko polje ulazi u more. Zbog urbanizacije prostora oko rijeke, nametnuto je provođenje uređenja korita radi očuvanja i zaštite pjezažne i fizionomske raznolikosti. Regulacija ove rijeke se intezivno provodi zadnjih godina.



Slika 3.5. Izvor rijeke Žrnovnice

Izvor rijeke se nalazi 2 km od naselja Žrnovnica. Sastoji se od niza manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77 do 88 m n.m. Minimalna izdašnost izvorišta je 0,25 m^3/s, a maksimalna je 19,2 m^3/s, dok srednji godišnji protok iznosi 1,8 m^3/s. Dio izvorišta se koristi za potrebe vodoopskrbe naselja Sitno Donje i Žrnovnica, a dio se koristi za navodnjavanje.



3.6. Prikaz mjesečnih protoka rijeke Žrnovnice za razdoblje 2000.-2004

Na *slici 3.6.* prikazani su maksimalni i minimalni mjesečni protoci u razdoblju od 2000. do 2004. koji su bili analizirani u ovom radu. Vidljivo je da je najmanji protok 0,35 m^3/s , dok je makismalni opaženi protok 6,05 m^3/s.

3.3 Sliv izvora Imotskog polja

Prostire se van državne granice te predstavlja dio regionalnog sliva desne obale donje Neretve. Imotsko polje je prva veća krška pojava u visokom dijelu ovog sliva. Polje je zapunjeno debelim laporovitim naslagama neogena koji predstavljaju djelomičinu barijeru vodama iz krškog zaleđa. Zbog visokog položaja u slivu, izvori na sjeveroistočnom rubu polja imaju velike oscilacije istjecanja.

S obzirom da je Imotsko-grudsko polje tipično kraško polje zatvorenog tipa, često plavi i poplave dugo traju, što zavisi od hidroloških i hidrogeoloških uvjeta. Prije izgradnje tunela Pećnik (1951. godine), u prirodnim uvjetima poplave su skoro svake godine trajale od 120 do 180 dana, a nakon izgradnje tunela, trajanje poplava je smanjeno na 30-35 dana. Ukupne maksimalne količine dosežu preko 12 m^3/s kada se cijela sjeveroistočna strana polja pretvara u izvorište.

U sušnim razdobljima izviranje se javlja na nekoliko mjesta od kojih je najveći izvor Opačac. Veoma zanimljive pojave su Crveno i Modro jezero kraj Imotskog. To su izdanska oka podzemnog kršog vodonosnika. Istraživanja su pokazala da postoje velike količine vode u podzemlju karbonatnog zaleđa Imotskog polja, koje se dijelom prelijevaju i formiraju tok rijeke Vrljike u polju, a dijelom protječu ispod polja.

3.3.1 Rijeka Vrljika

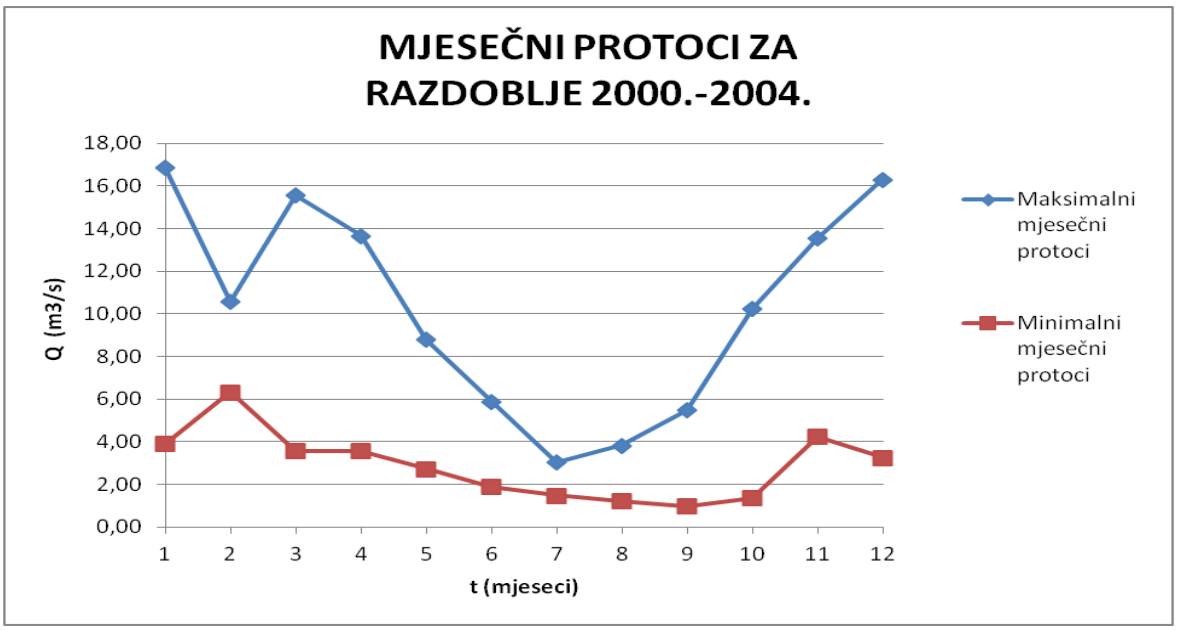
Rijeka Vrljika je najizdašniji stalni vodotok Imotsko – Bekijskog polja čija ukupna dužina iznosi 18,3 km, od toga 12,7 km pripada Republici Hrvatskoj dok ostatak BiH. Izvire iz grupe stalnih izvora u Prološcu-Glavini na nadmorskoj visini od 270 m i to iz aluvijalnih naslaga na sjevemom obodu Polja. Izliva se u Jezero Nugao u Bijelom polju, koje je sastavni dio Bekijskog polja. Izvorišni dio i obalni pojas rijeke od 100 m sa svake strane do izvora do mosta na Perinuši proglašen je posebnim ihtiološkim rezervatom.

Vrljika prima nekoliko pritoka sa sjeverne strane Polja, od kojih je najizdašniji grudska Matica u Hercegovini. Velike se vode Grudskog vrela prelijevaju preko obale Matice i slivaju u Kongoru, a odatle u Vrljiku u Bijelom polju



Slika 3.7. Izvor rijeke Vrljike

Sa stanovišta vodoopskrbe je značajna jer se na njoj nalazi izvorište i vodozahvat Opačac koji se koristi za vodoopskrbu stanovništva Imotske krajine. Sama rijeka se koristi prvenstveno za potrebe navodnjavanja, rekreacije i ribolova. Na *slici 3.8.* prikazani su maksimalni i minimalni mjesečni protoci u razdoblju od 2000. do 2004. koji su bili analizirani u ovom radu. Vidljivo je da je najmanji protok 0,97 m^3/s , dok je makismalni opaženi protok 16,88 m^3/s.



3.8. Prikaz minimalnih i maksimalnih mjesečnih protoka za razdoblje 2000.-2004

3.4 Sliv rijeke Omble

Sliv rijeke se većim dijelom nalazi na teritoriju Bosne i Hercegovine, a sam izvor je lociran u Hrvatskoj. Već ga ta činjenica čini osobito zanimljivim sa stanovišta upravljanja i korištenja njegovih vodnih resursa. Površina sliva Omble iznosi oko 600 km^2. Granice sliva definirane su geološkim i topografskim analizama te dijelom hidrogeološkim pretpostavkama.

Promjene razine podzemne vode u krškom vodonosniku općenito i vrlo često naglo utječu na promjenu površine sliva s kojeg se prihranjuje analizirani krški izvor. To znači da neko područje prihranjivanja ne mora isključivo pripadati samo jednom izvoru. Od ostalih prirodnih procesa koji su stalno prisutni te utječu na promjenu područja prihranjivanja navode se sljedeći: erozija, transport i odlaganje sedimenata u podzemlju i na površini terena, razvoj i urušavanje ponikvi te otvaranje i zatvaranje ponora i ponorskih zona, čepljenje, ali i odčepljivanje velikih krških provodnika. U slučaju izvora Omble, koji spada u priobalne krške fenomene, o prethodno spomenutom treba voditi posebno ozbiljno računa. Razlog tome je u činjenici što je pred oko 21 tisuću godina globalna razina površine vodnog ogledala oceana na Zemlji bila za oko 100 m do 130 m niža od one današnje (Šegota, 1968.). Postoji realna mogućnost da je tada izlaz izvora Omble na površinu terena bio mnogo niži nego što je ovaj današnji. U uvjetima dubokog i slabo izučenog Dinarskog krša taj zadatak je često vrlo teško, pa i nemoguće precizno i pouzdano riješiti. Upravo takav je slučaj određivanja granica i površine sliva krškog izvora Omble. Antropogeni utjecaji u slivu izvora Omble brojni su i snažni. Na promjenu površine sliva izvora Omble, a time i na smanjenje mogućnosti prihranjivanja njegovog vodonosnika, utjecalo je reguliranje i betoniranje korita Trebišnjice.

3.4.1 Rijeka Ombla

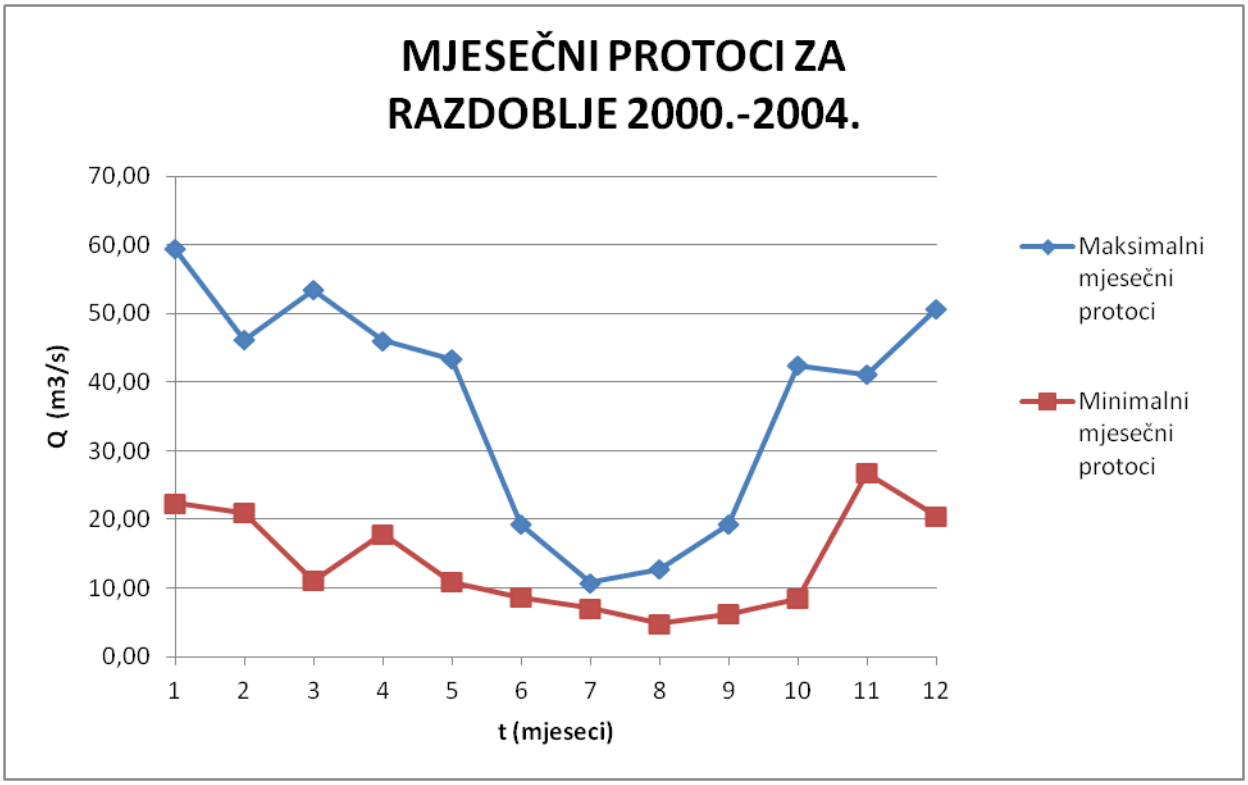
Izvor rijeke Omble se nalazi sjevero-zapadno, oko 5 kilometara daleko od Dubrovnika, u mjestu Komolac, podno stijene poznatije kao Golubov kamen. Sa izvora rijeke Omble grad Dubrovnik se još od vremena Dubrovačke Republike, kad je izgrađen prvi dubrovački vodovod, napajao vodom za piće. Prosječna količina vode koja izvire na vrelu rijeke Omble je 24 m^3/s.



Slika 3.9. Izvor rijeke Omble

Ombla je jedna od brojnih rijeka koja izvire kao dio Trebišnjice, rijeke ponornice koja ponire u Popovom polju u dubrovačkom zaleđu. Tridesetak metara od izvora rijeke Omble nalazi se mali slap visine 70-ak cm nakon kojeg Ombla utječe u Jadransko more u 5 km dugačkom zaljevu Rijeke dubrovačke kod mjesta Komolac, pa se stoga smatra da je njen vodotok dugačak 30 metara i da je Ombla najkraća rijeka na svijetu.

Prosječna vrijednost minimalnog godišnjeg protoka izvora iznosi 5,85 m^3/s, a kreće se u rasponu između 4,3 m^3/s i 8,61 m^3/s. Može se zaključiti da se radi o krškom izvoru koji se hrani izdašnim i stabilnim krškim vodonosnikom smještenim u njegovom zaleđu.Prosječna vrijednost maksimalnog godišnjeg protoka izvora iznosi 93,1m^3/s, a kreće se u rasponu između 69,6 m^3/si 117 m^3/s . Ako se uzme u obzir da se sliv prostire na području koje spada među one na kojima padaju najobilnije godišnje oborine u Europi, s hidrološkog stanovišta maksimalni protok od samo oko 100 m^3/s zasigurno je premalen. Objašnjenje se može naći u činjenici da izvor Omble spada u krške izvore s ograničenim maksimalnim kapacitetom istjecanja zbog prelijevanja voda u okolne slivove, akumuliranjem vode u jako raspucanoj krškoj vadoznoj i epikrškoj zoni, ograničenim dimenzijama izlaznog krškog provodnika i tečenjem vode pod pritiskom.



3.10. Mjesečni protoci rijeke Omble u razdoblju od 2000.-2004.

Na *slici 3.10.* prikazani su maksimalni i minimalni mjesečni protoci u razdoblju od 2000. do 2004. koji su bili analizirani u ovom radu. Vidljivo je da je najmanji protok 4,79 m^3/s , dok je makismalni opaženi protok 59,38 m^3/s

4 MALE VODE

S meteorološkog stanovišta suša se pojavljuje kad je količina oborine niža od neke kritične vrijednosti. Glavni uzrok suše je deficit oborina na nekom području u odnosu sa prosječnim oborinama tog područja. Suša se manifestira pojavom značajnog deficita vode u prostoru i vremenu. U hidrološkom smislu suša predstavlja duže razdoblje s protocima znatno manjim od prosječnih protoka tzv. male vode. Posljedica je nedostatak oborina koji dovodi do smanjenja protoka i zaliha podzemne vode. Dolazi do problema u navodnjavanju, otežane vodoopskrbe ali i do smanjenja kvalitete vode zbog povećane koncentracije zagađivača te povećane potrošnje kisika u vodi.

Za razliku od većine prirodnih katastrofa (potresi, poplave, plimni valovi itd.) , suša se pojavljuje polagano, traje dugo te zahvaća velika prostranstva. Kao takva sve je češća u suvremenom svijetu. Zbog pojave gladi uzrokovane sušom, gubici ljudske i životinjske populacije su drastičniji od bilo koje druge prirodne nesreće.

U hidrološkoj praksi proučavaju se karakteristike malovodnih perioda kao što su: vrijednosti ekstremno malih proticaja (Q_{min}), trajanje malovodnih perioda (T) i deficit voda tokom malovodnih perioda (D), karakter recesijske grane hidrograma, karakteristična trajanja dnevnih i srednjih protoka,indeks baznog protoka. Analiza malih voda na hidrološki proučenom vodotoku vrši se na osnovu podataka dugogodišnjih promatranja na vodomijernim stanicama. Serija minimalnih godišnjih protoka, kao i serija minimalnih protoka određenog trajanja, podvrgavaju se analizi vjerojatnosti.

Karakteristike malih voda su vrlo važne u upravljanju vodnim resursima. Poznavajući režim malih voda moguće je projektirati, graditi, održavati i upravljati raznim vodoprivrednim sustavima i objektima. Također, analizom malih voda ocjenjuje se da li je vodotok u mogućnosti da se koristi za vodoopskrbu naselja i industrije, da primi otpadne vode, da osigura vodu za navodnjavanje te da omogući povoljne uvjete za razvoj flore i faune. Na osnovu raspoloživih hidroloških podataka, mogu se osigurati karakteristike malih voda kao što su minimalni vodostaji/protoci, krivulje trajanja, funkcije raspodjele vjerojatnosti prosječnih malih voda.

Hidrološki režim je uvjetovan režimom padalina. Transformacija režima padalina u režim otjecanja ovisi o mnogo faktora koji karakteriziraju osobine slivne površine (topografski

faktori, hidrogeološki parametri, vegetacija itd.). U doba suše režim otjecanja opisan je krivuljom iscrpljenja sliva (recesijskom krivuljom hidrograma otjecanja).

Male vode su posljedica prirodnih uvjeta na nekom slivu ili su rezultat poželjnih te nepoželjnih aktivnosti čovjeka. Prirodni režim malih voda je uzrokovan zbog različitih meteoroloških, hidroloških, hidrogeoloških i drugih faktora kao što su požari, potresi, vulkanske aktivnosti i drugo. Utjecaj čovjeka je najintezivniji u gusto naseljenim područjima gdje se voda zahvaća za različite potrebe društva. Tako izgradnja brane sa umjetnom akumulacijom, zahvat podzemnih voda, poljoprivredne aktivnosti, urbanizacija, izgradnja objekata za zahvaćenje voda pogoršava raspoloživost malih voda.

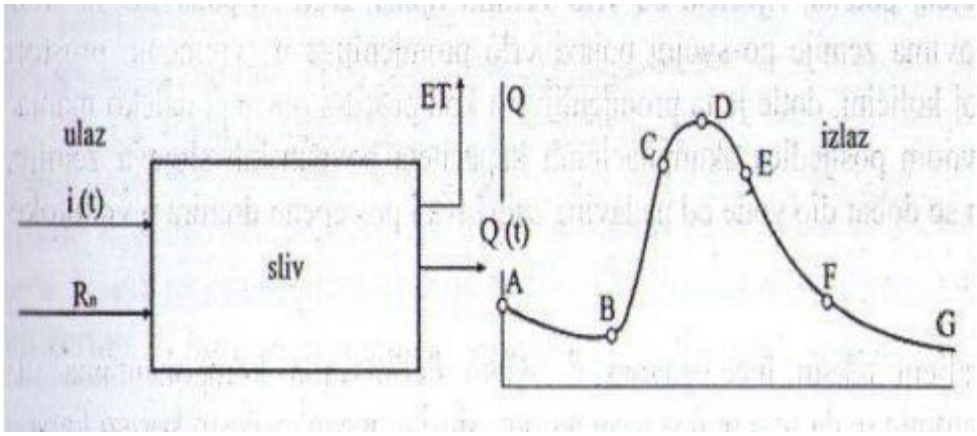
Od svih problema u hidrologiji, najmanje je proučena pojava malih voda. U mnogim zemljama, pa i u onim najrazvijenijim, postoji popriličan vakum po pitanju obrade i opisa kompletnog režima malih voda većine vodotoka od interesa za praksu i gospodarstvo.

5 ANALIZA RECESIJSKOG DIJELA HIDROGRAMA OTJECANJA

5.1 Hidrogram otjecanja

Hidrogram otjecanja neke rijeke ili izvora predstavlja raspored protoka u vremenu na određenoj lokaciji. Oblik samog hidrograma uvjetuju fizičko-geografski čimbenici i klimatski čimbenici sliva tog izvora ili rijeke. Tako se smatra jednim integralnim izrazom tih fizičko-geografskih i klimatskih karakteristika i procesa koji određuju odnose i zavisnosti između padalina i otjecanja sliva sa neke lokacije na vodotoku. Hidrogramom se mogu prikazati srednji dnevni, mjesečni protoci unutar jedne ili više godina, srednji godišnji protoci unutar nekoga razdoblja i prosječni mjesečni protoci nekoga razdoblja.

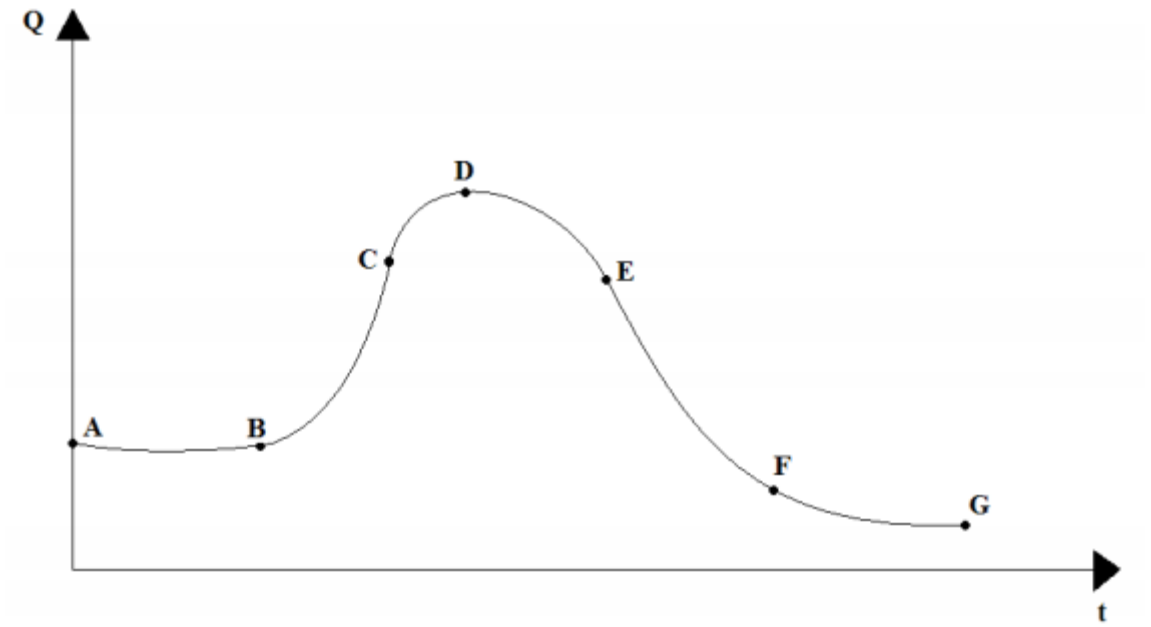
Izlaz hidrološkog sustava je hidrogram otjecanja te gubici sa slivi koji se prikazuju kao isparavanje sa vlažne površine i isparavanje kroz biljke. Na *slici 5.1*. prikazan je ulaz i izlaz sustava gdje je sa i(t) označen bruto intezitet kiše, sa Rn(t) neto radijacija, a Q(t) je hidrogram dok je ET evapotranspiracija.



Slika 5.1. Ulaz i izlaz hidrološkog sustava

Osnovni su elementi hidrograma vodnoga vala uspon, kruna i recesija (opadanje).Na *slici 5.2*. prikazan je hidrogram sa osnovnim elementima.

Period povećanja protoka u vremenu (na *slici 5.2*. označen sa BC) je *grana porasta hidrograma* ili *krivulja koncetracije*. Oblik krivulje koncetracije ovisi o trajanju, intezitetu i vremenskoj raspodjeli padalina, o prethodnoj vlažnosti sliva, infiltracijskim karakteristikama tla, o obliku i nagibu sliva.



Slika 5.2. Shema hidrograma otjecanja

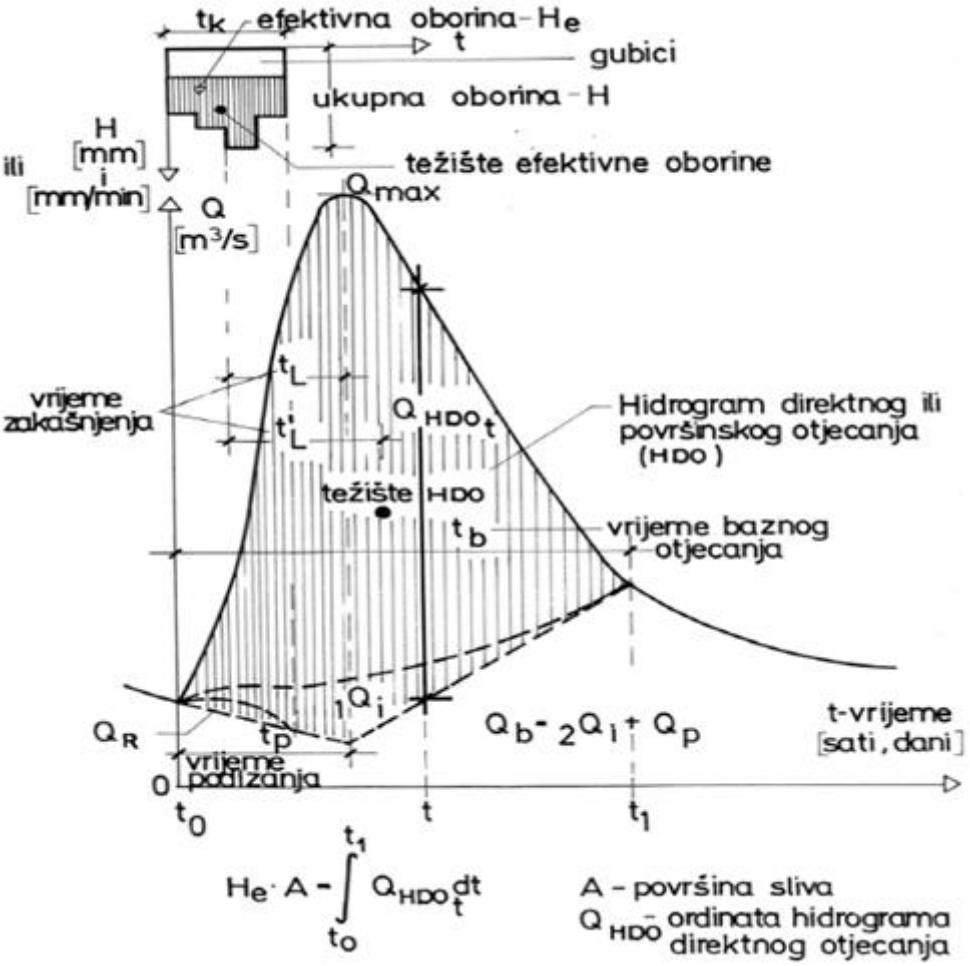
Vršni dio ili *kruna* hidrograma sadrži hidrogram od točke infleksije na grani rasta do točke infleksije na opadajućoj grani hidrograma. Na *slici 5.2.* to je dio krivulje od točke C do točke E. Maksimalni protok se javlja kada cijela slivna površina sudjeluje u otjecanju, prikazano je točkom D na *slici 5.2.*

Krivulja recesije uključuje opadajući dio hidrograma, koji može ili ne mora opadati do protoka čija je vrijednost nula, ovisno o veličini baznog otjecanja. Na *slici 5.2.* prikazana je krivulja recesije od točke E do točke F, predstavljajući otjecanje akumulirane vode u slivu čija akumulacije je najveća u točki E. Oblik ove krivulje ne ovisi o karakteristikama kiše i infiltracije već o fizičkim karakteristikama sliva i hidrografske mreže. Točka F predstavlja vrijeme kada je količina vode u rijeci samo doprinos dotjecanja podzemnih voda u vodotok. Karakteristike korita uglavnom određuju tip opadajuće grane hidrograma. Nagib recesijske krivulje pokazuje na intezitet otjecanja akumulirane vode u riječnom koritu.

Često je u hidrogramu otjecanja potrebno odvojiti direktni (površinski) od baznoga (potpovršinskog i podzemnoga) dotoka .

Direktno otjecanje je ono otjecanje nastalo uslijed oborine koja je direktno pala na površinu vodotoka, površinu terena kao i usljed brzog potpovršinskog otjecanja.

Bazno otjecanje obuhvaća komponentu sporog potpovršinskog otjecanja i otjecanja podzemnih voda. Direktno otjecanje izaziva efektivna oborina. Efektivna oborina predstavlja onaj dio ukupne oborine pale na sliv nakon što se oduzmu svi gubitci. *Slika 5.3.* prikazuje jedan ukupni hidrogram otjecanja sa najvažnijim komponentama.



Slika 5.3. Hidrogram otjecanja i njegove komponente

5.2 Analiza krivulja recesije

Nakon prestanka površinskog otjecanja, dolazi do podzemnog otjecanja koje se ovisno o karakteristikama slivnog područja može odvijati kroz dulje ili kraće vremensko razdoblje. Najvažnija karakteristika sliva je vodu koja je pala na teren zadrži u podzemlju. U bezoborinskom vremenu, izvori i rijeke se napajaju samo podzemnim vodama i predstavljaju one zalihe koje su uskladištene u hidrološkom bazenu. Ova osobina ima velik utjecaj na režim otjecanja vode, tj. na oblik recesijske krivulje , kao i ovisnost o poroznosti te prihranjivanju iz susjednih slivova.

Ako je određena funkcijonalna veza protoka i vremena za krivulju recesije, može se vršiti prognoza o količini istjecanja za buduće periode, uz uvjet da za prognozirana razdoblja recesije neće bit velikih oborina. Često se krivulja recesije radi posebno za vegetacijsku, a posebno za zimsku sezonu zbog različitih uvjeta u slivu.

Bazni protok u rijeci nastaje od priljeva vode u korito rijeke i u korita njenih pritoka od podzemne vode iz priobalja. Sa porastom bezkišnog perioda nad slivom, taj doljev podzemne vode je sve manji i oblik njegovog hidrograma je sličan eksponencijalnom krivuljom prema izrazu :

$$Q\,(t) = Q_{\,0}(t_0) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - t_0)} \qquad (5.1)$$

gdje su : Q (t) - protok u trenutku (t)

$Q_0\,(t_0)$ - protok u proizvoljnom trenutku t_0 koji prethodi trenutku t

e - baza prirodnog logaritma

α - koeficijent recesije (pražnjenja vodonosnika) čija je dimenzija $[T^{-1}]$

$(t - t_0)$ - vrijeme trajanja recesije

Izraz (5.1.) predložio je 1905. godine francuski inženjer Maillet, kako bi opisao protok izvora u periodu kada se ne vrši nikakvo obnavljanje zaliha podzemne vode.

Eksponencijalna formula približno opisuje desaturiranje vodonosnika konstantne površine uz uvjet da je laminaran tok. (Urumović et al., 2009.)

Koeficijent α ovisi o retencijskim karakteristikama podzemnog rezervoara, tj. o transmisivnosti i specifičnosti uskladištenju (α = 0,003 do 0,03 s^{-1}). Ako je koeficijent recesije $\alpha > 10^{-2}$ upućuje na brzo dreniranje krupnih krških kanala i pukotina, dok $\alpha < 10^{-2}$ ukazuje na sporo dreniranje vode iz manjih pora i pukotina, tj. dominaciju stijenskog matriksa u toku vode kroz krško podzemlje. (Krešić, 1997.)

Jednadžba (5.1.), kojom se analitički može predstaviti recesijska grana hidrograma otjecanja može poslužiti za određivanje točke F (*slika 5.2.*) tj. određivanja vremena kada prestaje direktno otjecanje te se nastavlja samo bazno otjecanje.

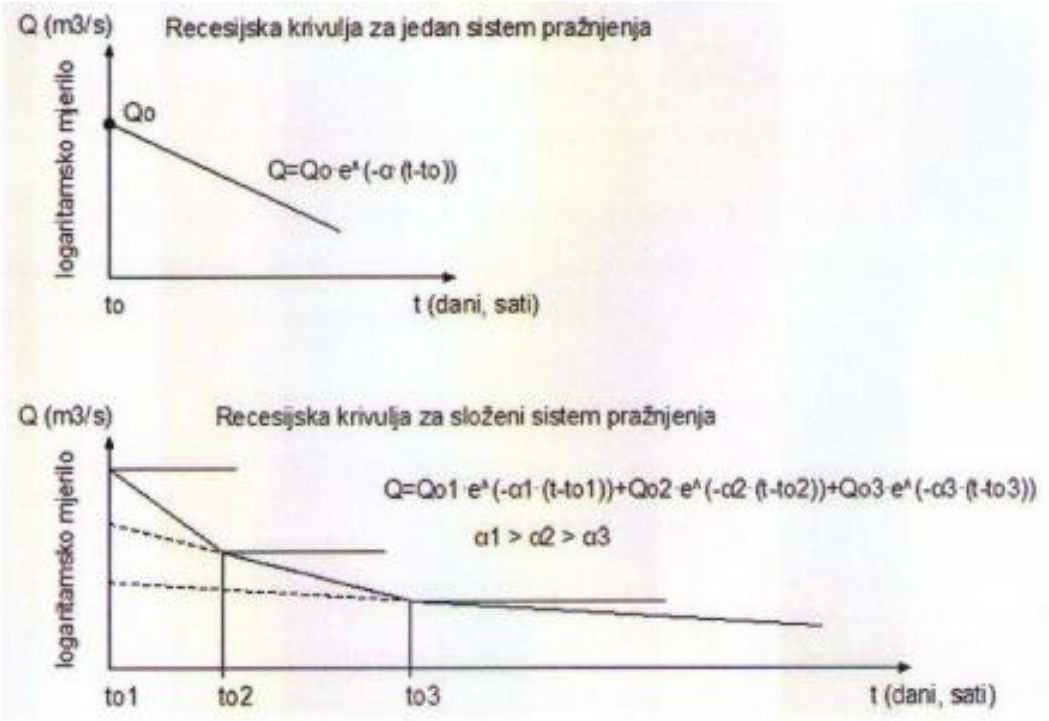
Ako se krivulja recesije prikaže u polu-logaritamskom mjerilu i to tako da se na ordinatu nanesu logaritmi protoka, a na apcisu vrijeme (t) po jedadžbi (5.1.), onda će se recesijska krivulja koja pripada podzemnim vodama predstaviti pravcem, a dio recesijske krivulje koja pripada direktom otjecanju bit će krivulja.

Eksponencijalna jednadžba je dijelom zbog svoje jednostavnosti do danas ostala najčešće korištena za prognozu minimalnih protoka u slučaju dugotrajnih suša iako rijetko opisuje cijeli recesijski događaj (Dewandel et al., 2003.).

U periodu malih voda jedan recipijent se prihranjuje iz više izvora. U trenutku (t) protok u rijeci predstavljat će suma :

$$Q = Q_1 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t} + Q_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t} + \cdots + Q_n \cdot e^{-\alpha_n \cdot t} \qquad (5.2.)$$

Na *slici 5.4.* prikazana su dva tipa recesijskih krivulja prikazanih u polu-logaritamskom mjerilu, Bonacci (1987.)



Slika 5.4. Dva tipa recesijskih krivulja

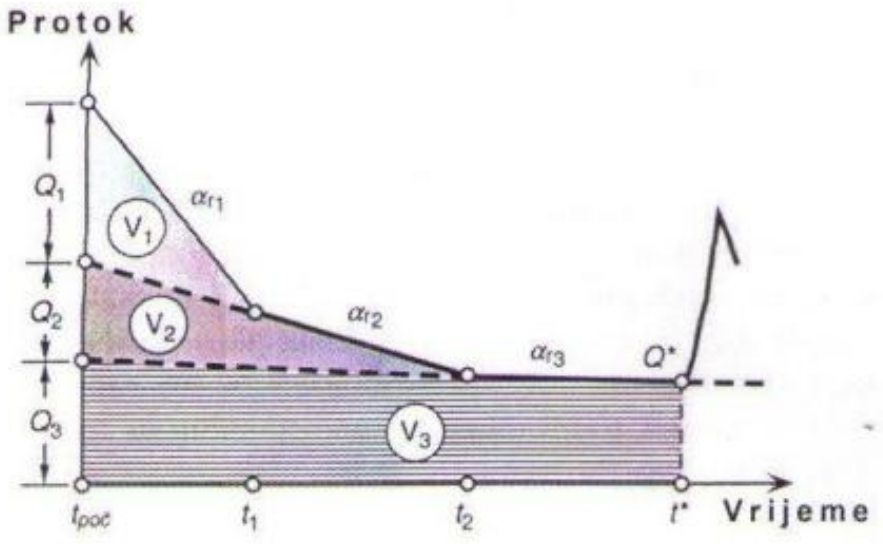
Kod svake složene recesijske krivulje svali lom tj. promjena nagiba pravca posljedica je promjene u samoj strukturi krša u podzemlju, geometrijskoj i geomorfološkoj. Koeficijent pražnjenja će biti veći što je veća propustivljost u krškom podzemlju, što su veće krške pukotine i što je veća efektivna poroznost.

Pomoću koeficijenta recesije može se izračunati volumen vode uskladištene u vodonosniku koji će gravitacijski isteći tijekom recesije tj. dinamičke rezerve, prema izrazu

$$\alpha = \frac{Q_t}{V_t} \qquad (5.3.)$$

gdje je Q_t količina istjecanja u vremenu t , a V_t volumen uskladištene vode iznad razine izvora. (Krešić, 1997.)

U slučaju više mikrorežima pražnjenja vodonosnika, sumiraju se volumeni pojedinih mikrorežima tj. pripadajućih koeficijenata recesije kao što je prikazano na *slici 5.5*.



Slika 5.5. Shematski prikaz recesije s tri mikrorežima pražnjenja vodonosnika i odgovarajućih volumena vode (Krešić, 1997.)

Ukupni volumen na primjer s tri mikrorežima računa se pomoću izraza :

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 = \left[\frac{Q_1}{\alpha_1} + \frac{Q_2}{\alpha_2} + \frac{Q_3}{\alpha_3}\right] \quad (5.4.)$$

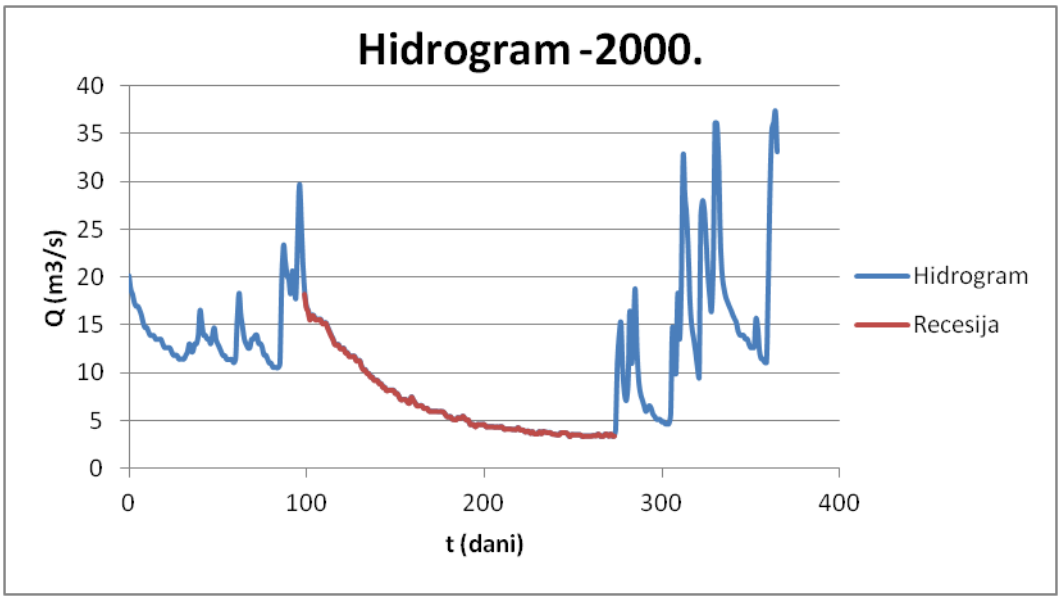
Prema veličini koeficijenta recesije mogu se okarakterizirati akumulacijske sposobnosti vodonosnika. Ako su vrijednosti koeficijenta veće, dinamičke sposobnosti rezerve se brzo troše i vodonosnik je slabije akumulacijske sposobnosti.

Idealni uvjeti za analizu recesije su bezoborinska razdoblja u trajanju nekoliko dana, jer tada recesijska krivulja daje najbolji uvid u strukturne značajke vodonosnika, ali to je rijetka pojava. Oborine pale za vrijeme recesije otežavaju analizu jer uzrokuju promjenu recesijske krivulje na istom izvoru. Zbog toga definiranje značajki na temelju jednog recesijskog razdoblja je nesigurno. Veći broj krivulja omogućava definiranje zajedničke prosječne recesijske krivulje kao i anvelope minimuma. Na taj se način s mnogo većom sigurnošću mogu izvoditi zaključco o akumulacijskoj spospobnosti krškog hidrogeološkog sustava, očekivanim minimalnim protocima i sl.

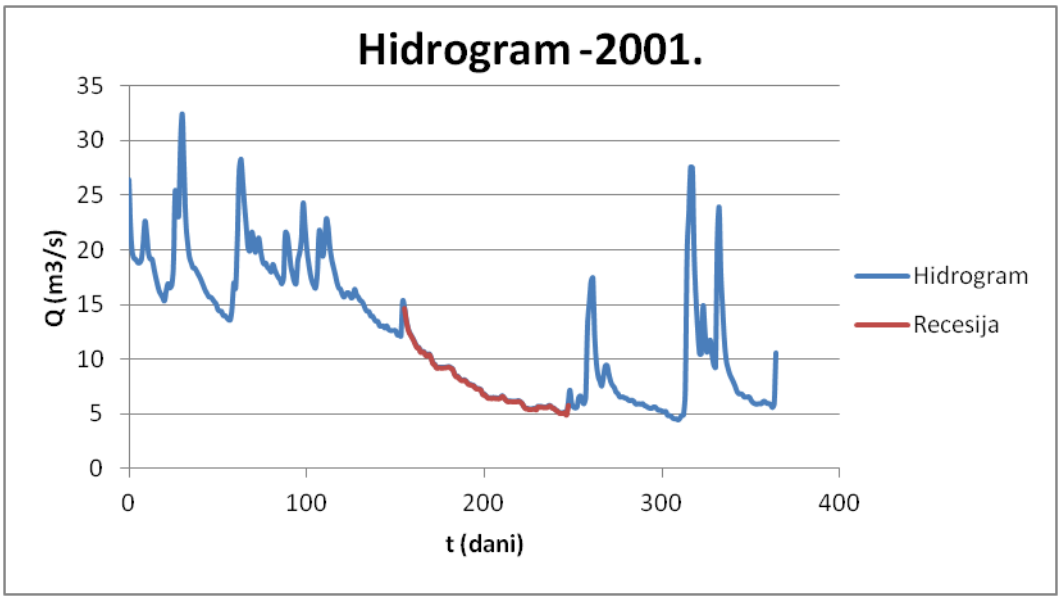
5.3 Izdvajanje krivulje recesije iz hidrograma otjecanja

U ovom radu analizirane su recesije izvora rijeke Rude, Jadra, Žrnovnice, Vrljike i Omble u razdoblju 2000. – 2004. godine. Na *slikama 5.6* do *5.30*. su prikazani hidrogrami pripadajućim izvorima sa izdvojenom recesijom.

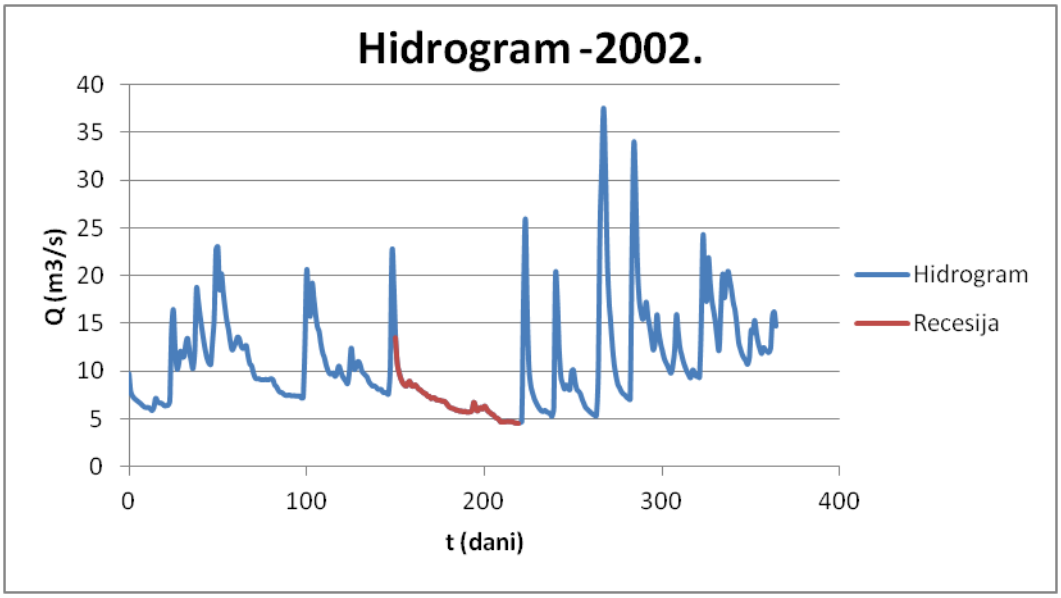
5.3.1 Hidrogram i recesija rijeke Rude



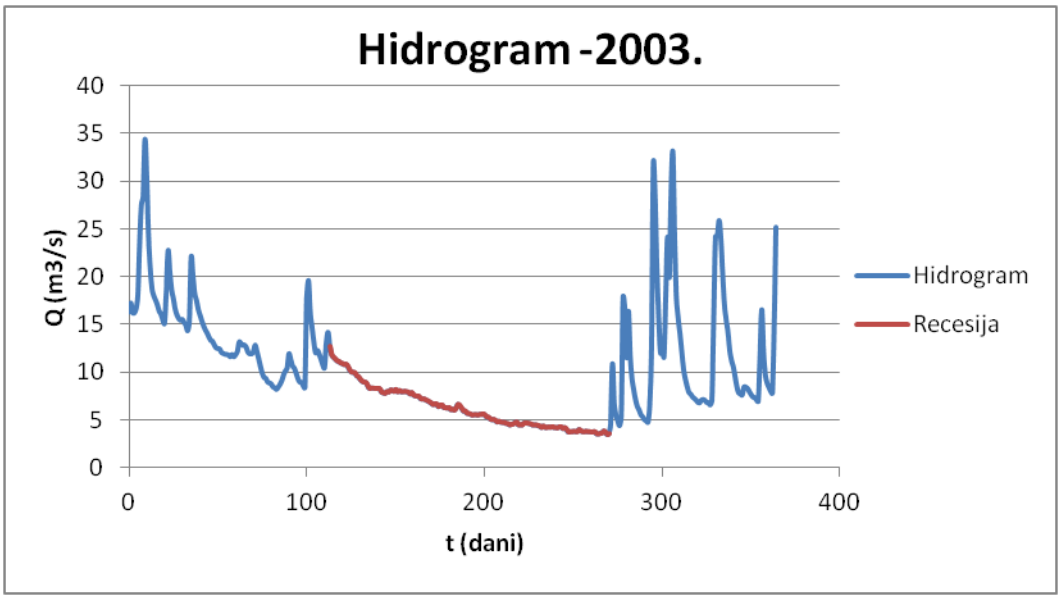
Slika 5.6. Hidrogram i recesija rijeke Rude za 2000.g



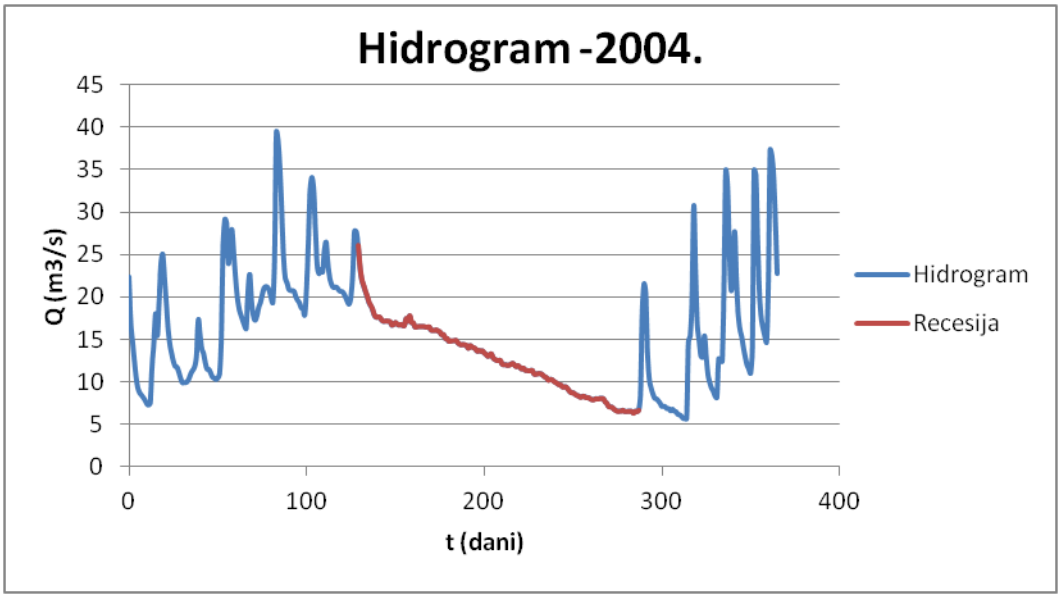
Slika 5.7. Hidrogram i recesija rijeke Rude za 2001.g



Slika 5.8. Hidrogram i recesija rijeke Rude za 2002.g.

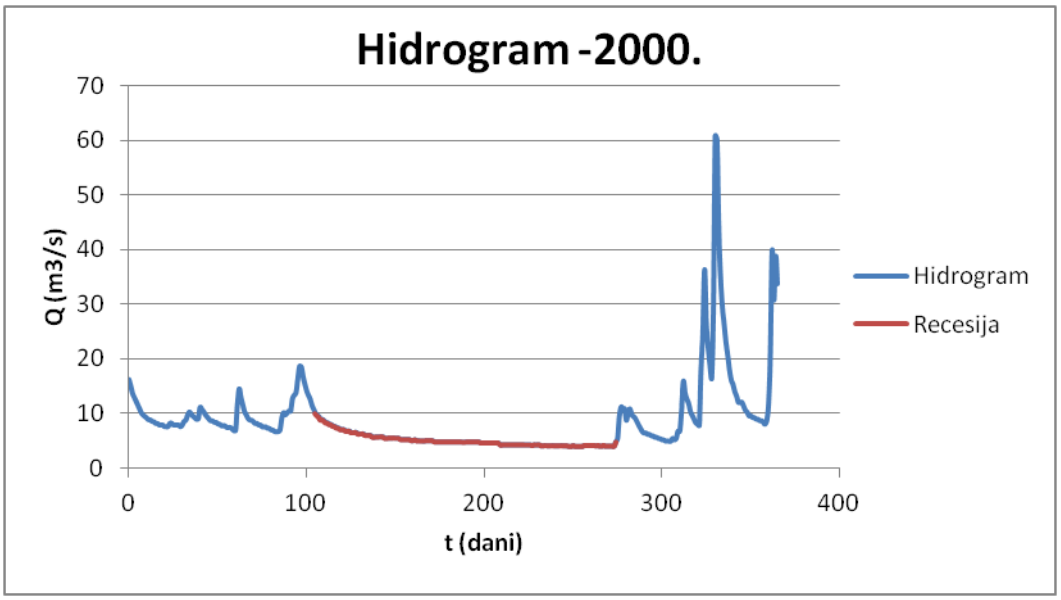


Slika 5.9. Hidrogram i recesija rijeke Rude za 2003.g.

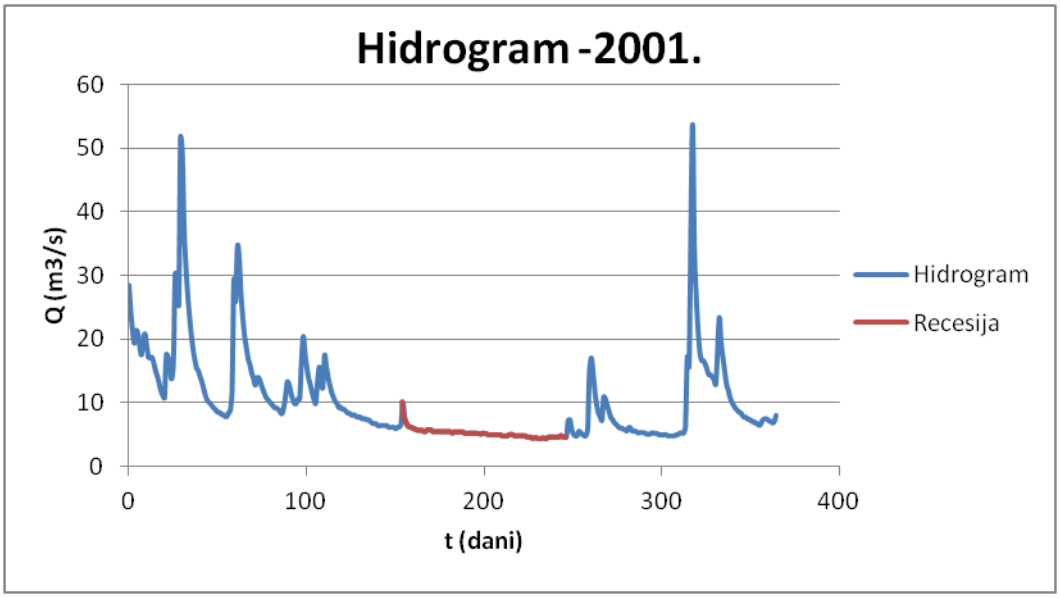


Slika 5.10. Hidrogram i recesija rijeke Rude za 2004.g.

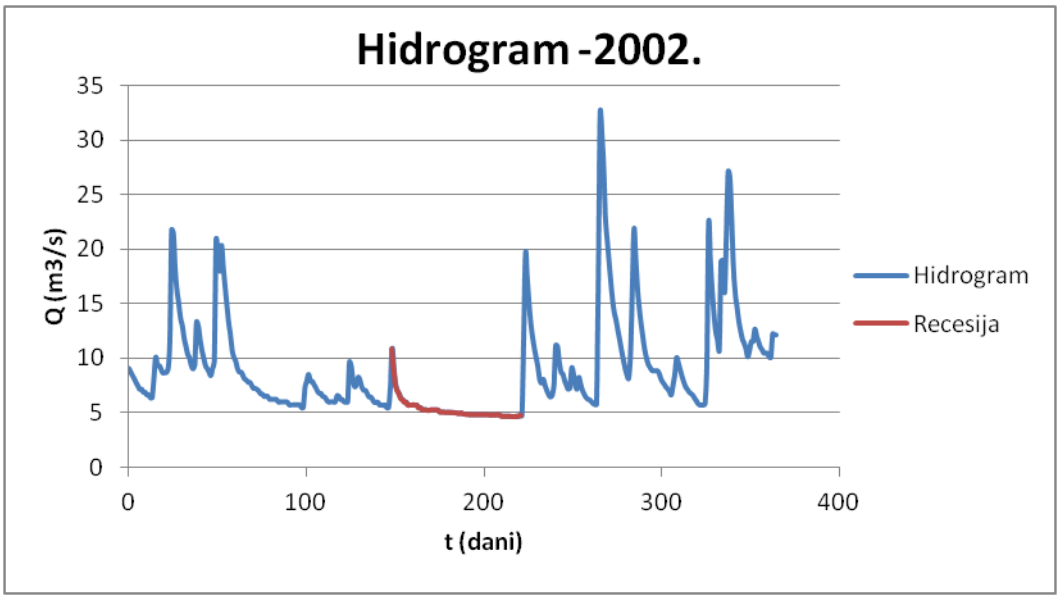
5.3.2 Hidrogram i recesija rijeke Jadro



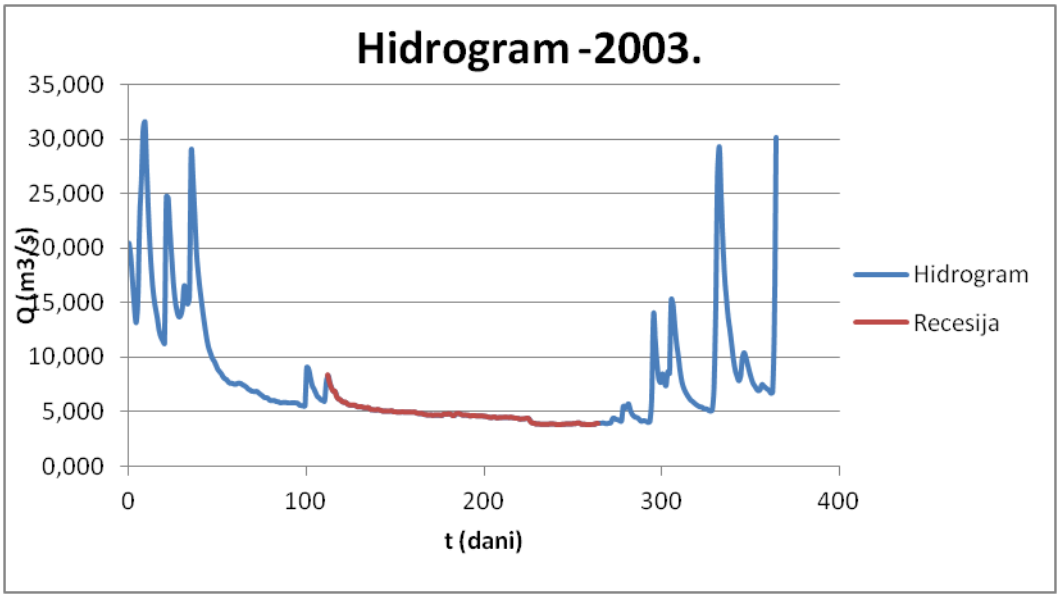
Slika 5.11. Hidrogram i recesija rijeke Jadro za 2000.g.



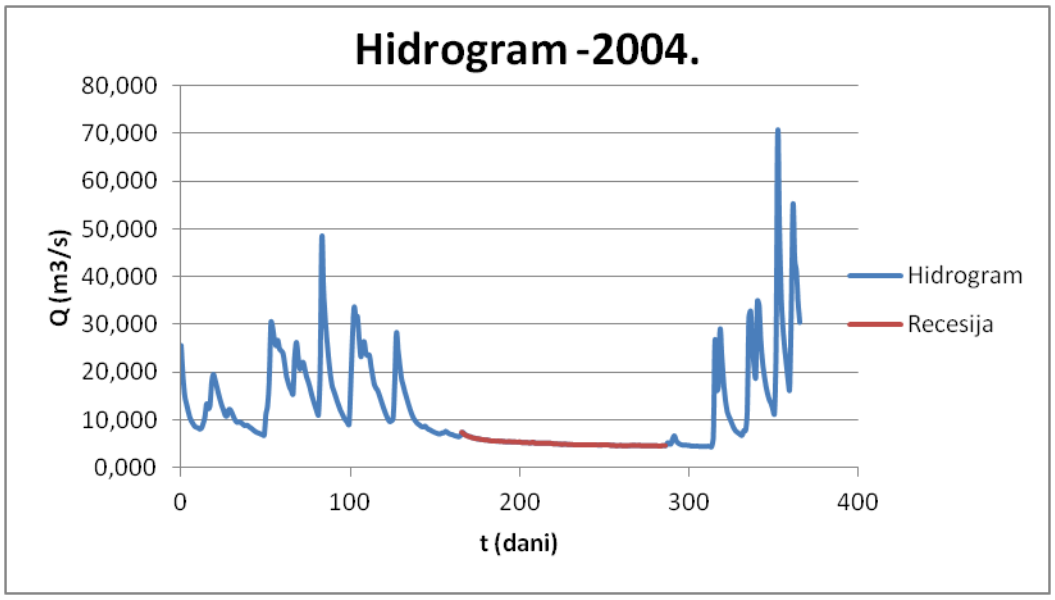
Slika 5.12. Hidrogram i recesija rijeke Jadro za 2001.g.



Slika 5.13. Hidrogram i recesija rijeke Jadro za 2002.g.

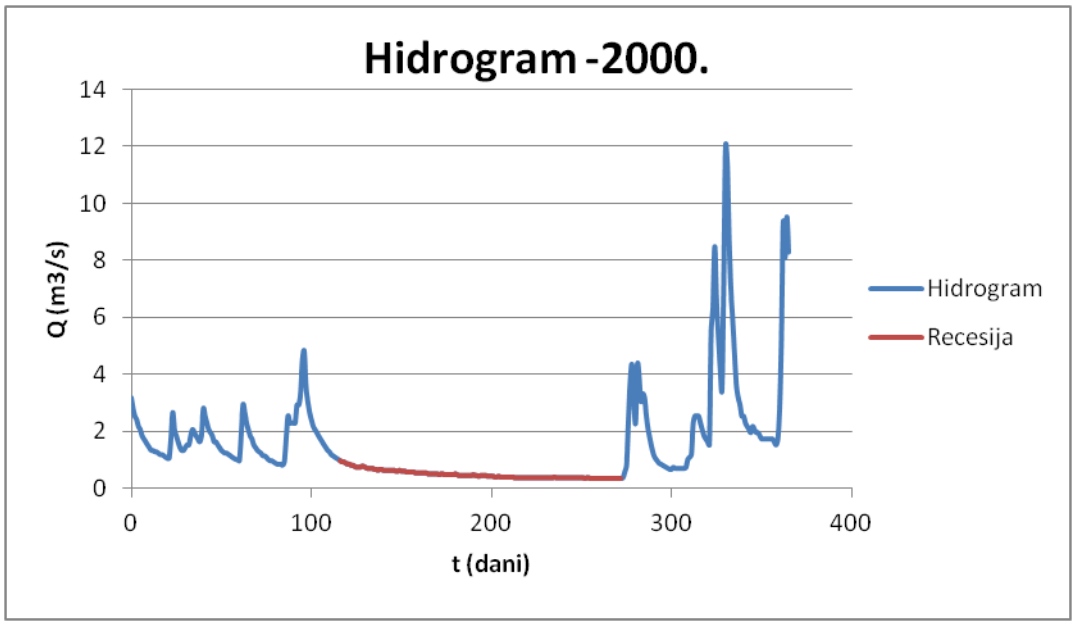


Slika 5.14. Hidrogram i recesija rijeke Jadro za 2003.g.

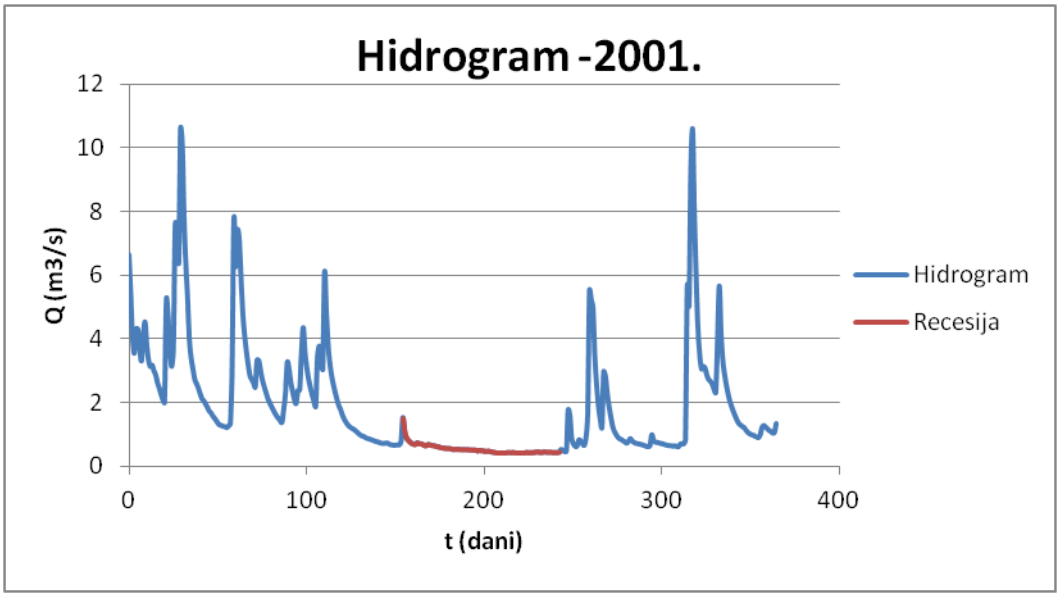


Slika 5.15. Hidrogram i recesija rijeke Jadro za 2004.g.

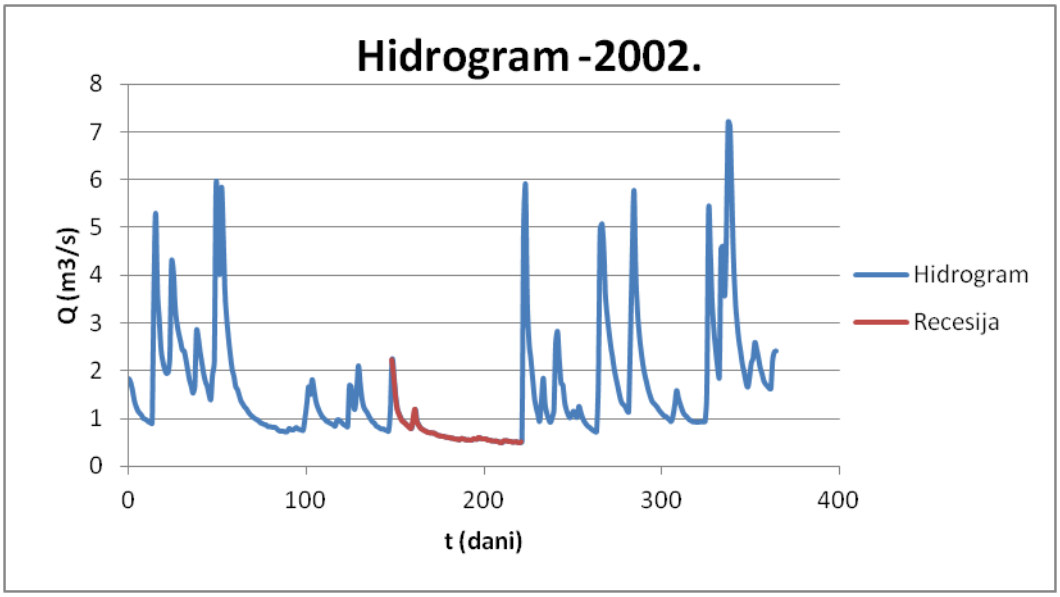
5.3.3 Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice



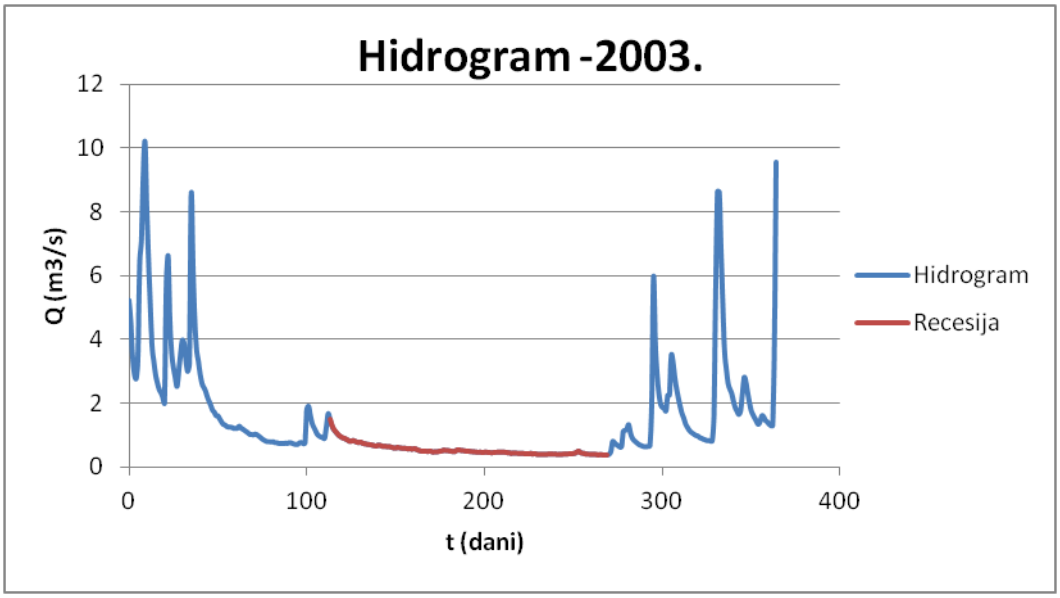
Slika 5.16. Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice za 2000.g.



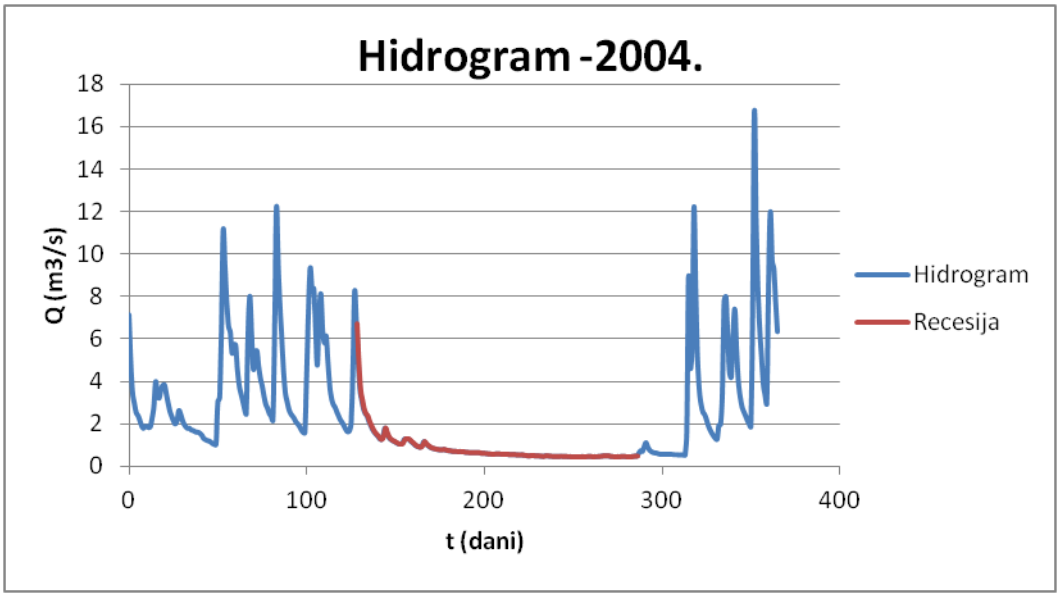
Slika 5.17. Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice za 2001.g.



Slika 5.18. Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice za 2002.g.

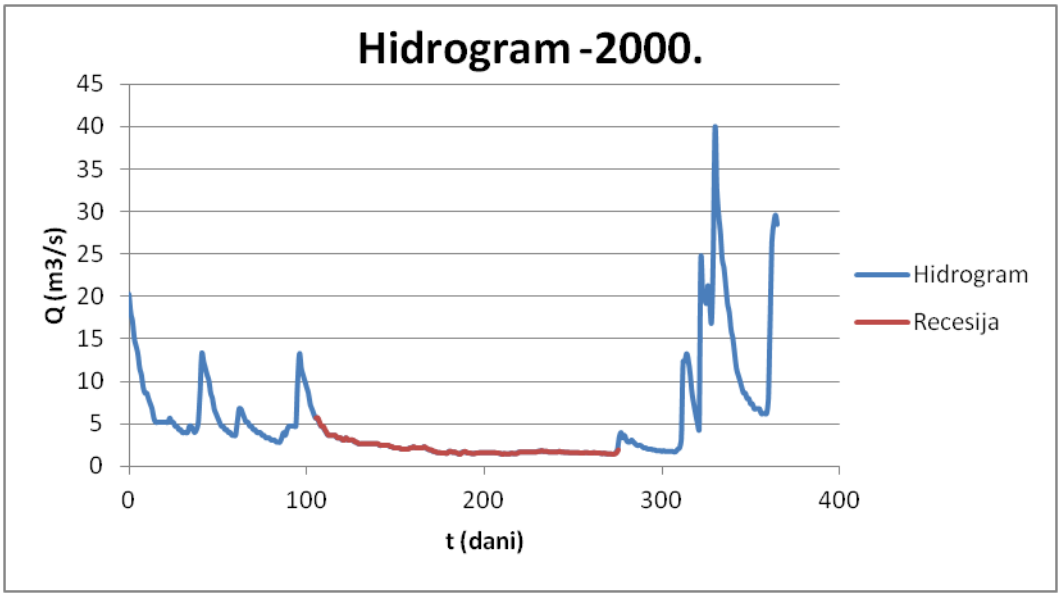


Slika 5.19. Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice za 2003.g.

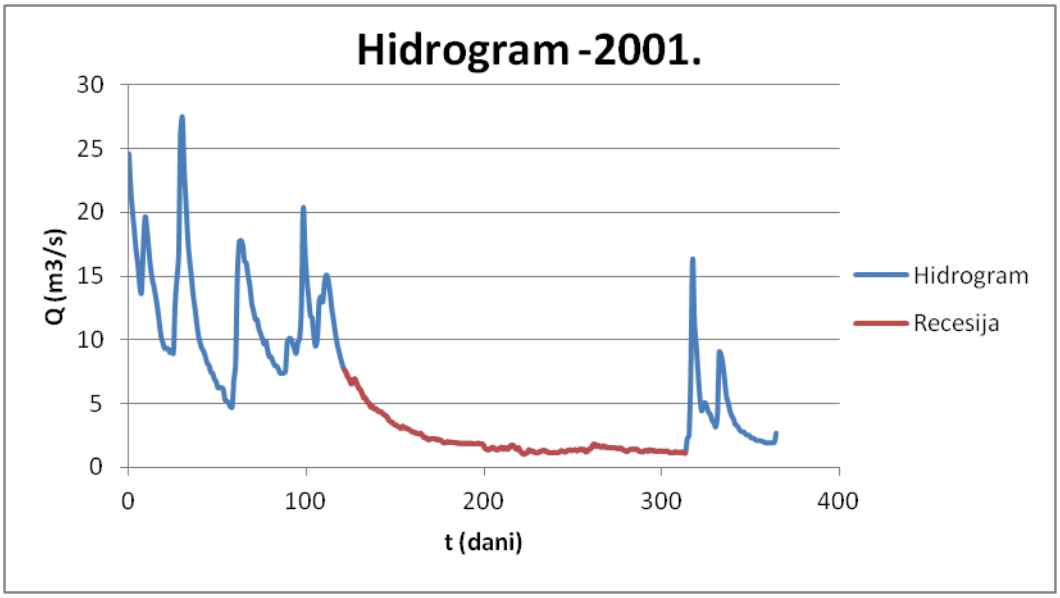


Slika 5.20. Hidrogram i recesija rijeke Žrnovnice za 2004g.

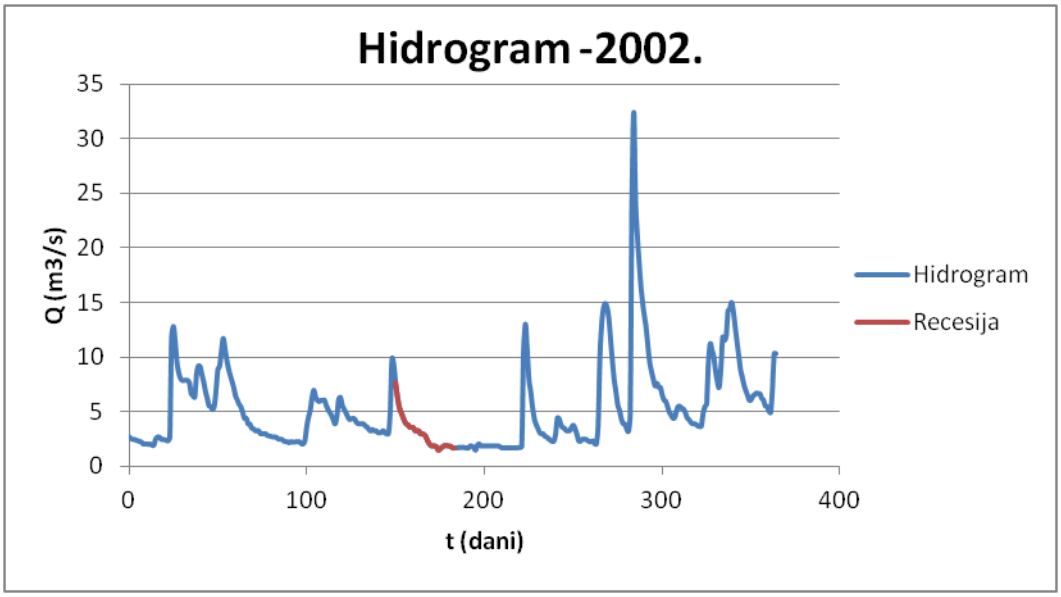
5.3.4 Hidrogram i recesija rijeke Vrljike



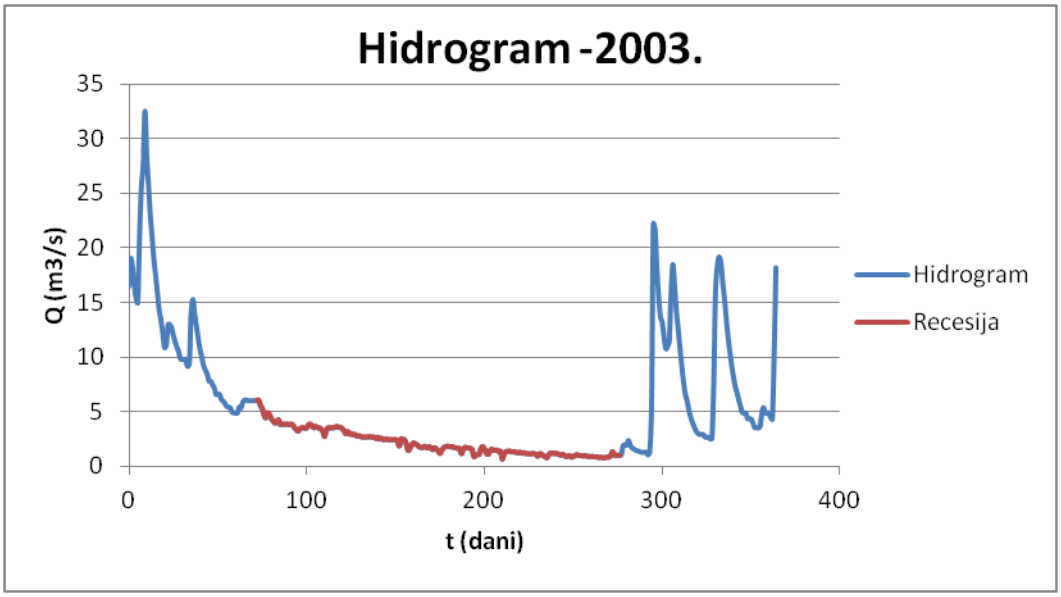
Slika 5.21. Hidrogram i recesija rijeke Vrljike za 2000.g.



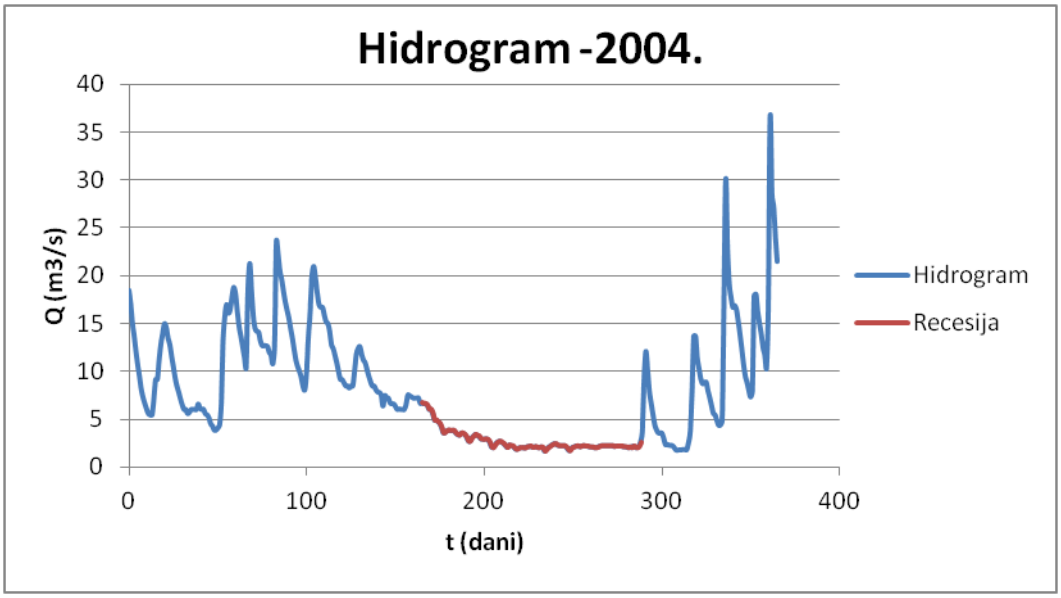
Slika 5.22. Hidrogram i recesija rijeke Vrljike za 2001.g.



Slika 5.23. Hidrogram i recesija rijeke Vrljike za 2002.g.

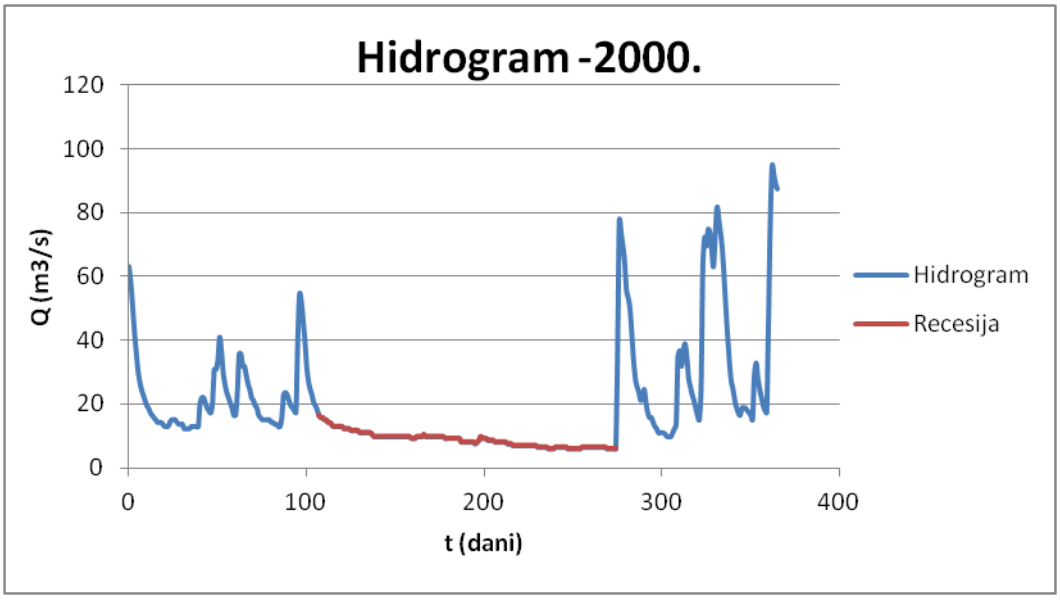


Slika 5.24. Hidrogram i recesija rijeke Vrljike za 2003.g.

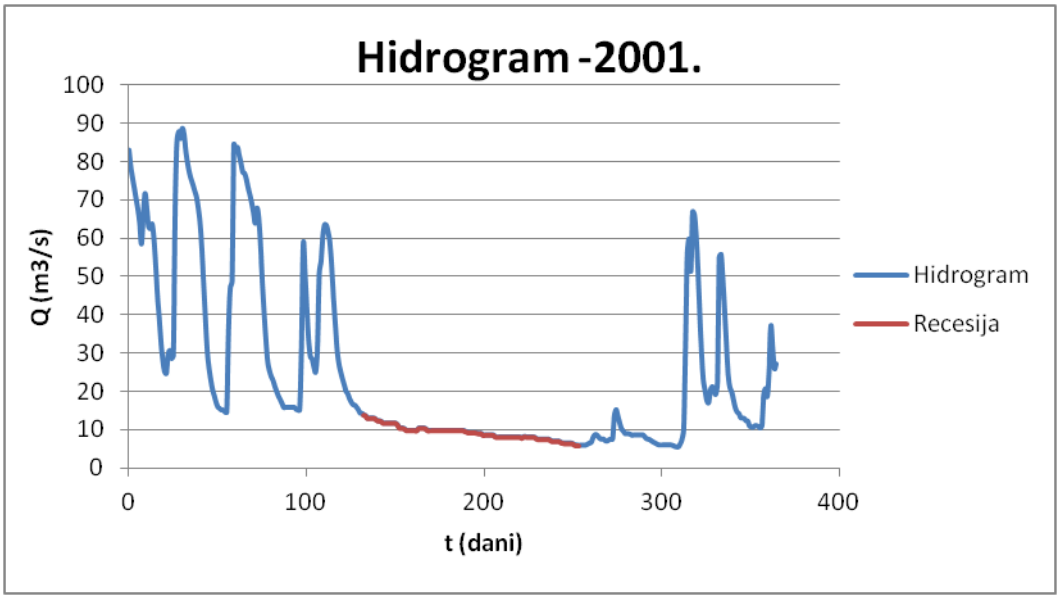


Slika 5.25. Hidrogram i recesija rijeke Vrljike za 2004.g.

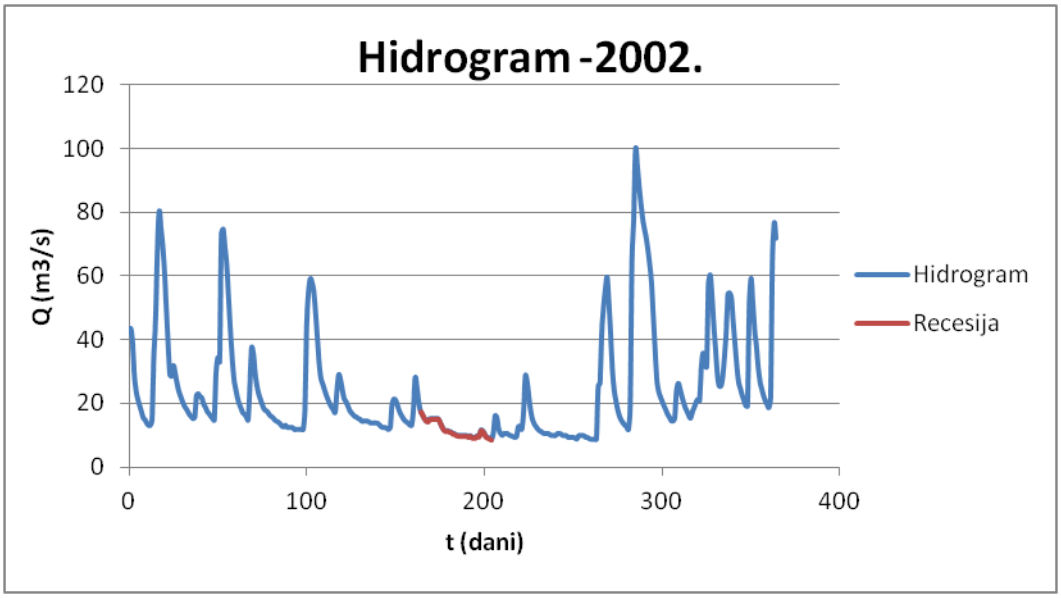
5.3.5 Hidrogram i recesija rijeke Omble



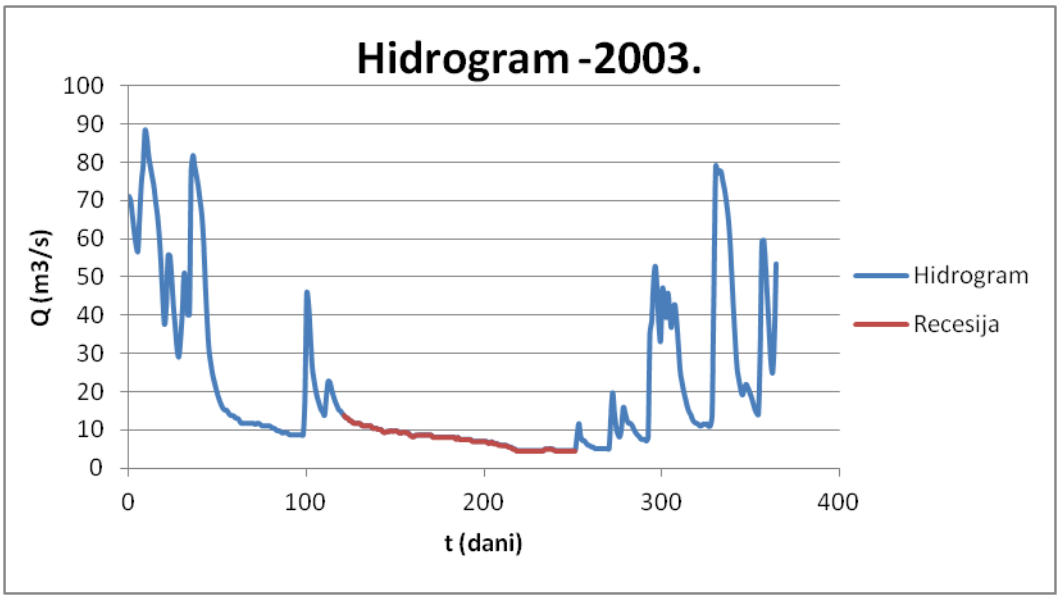
Slika 5.26. Hidrogram i recesija rijeke Omble za 2000.g.



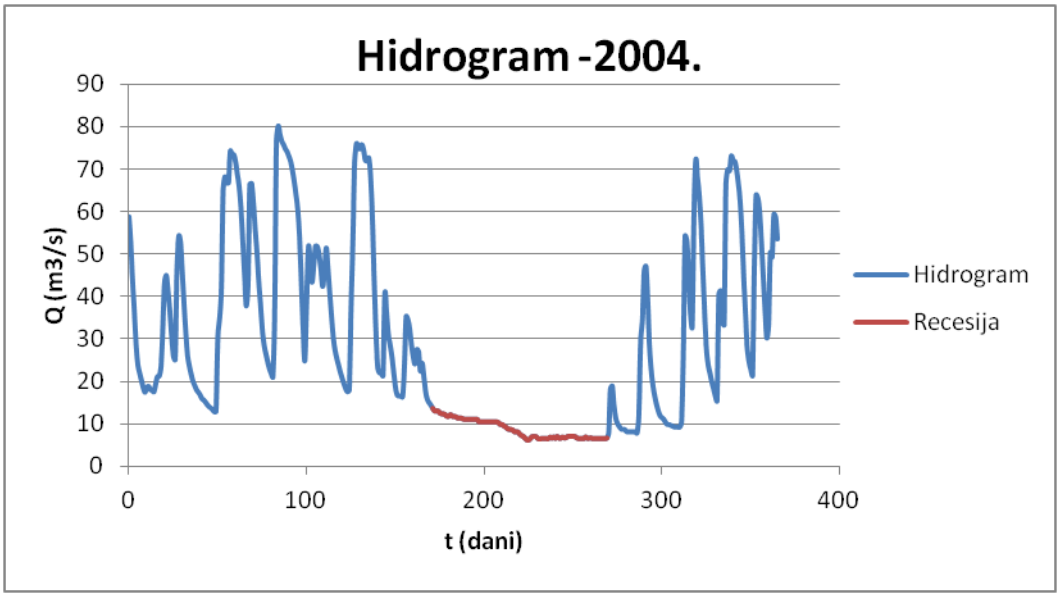
Slika 5.27. Hidrogram i recesija rijeke Omble za 2001.g



Slika 5.28. Hidrogram i recesija rijeke Omble za 2002.g



Slika 5.29. Hidrogram i recesija rijeke Omble za 2003.g



Slika 5.30. Hidrogram i recesija rijeke Omble za 2004.g

5.4 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema metodi „matching strip“

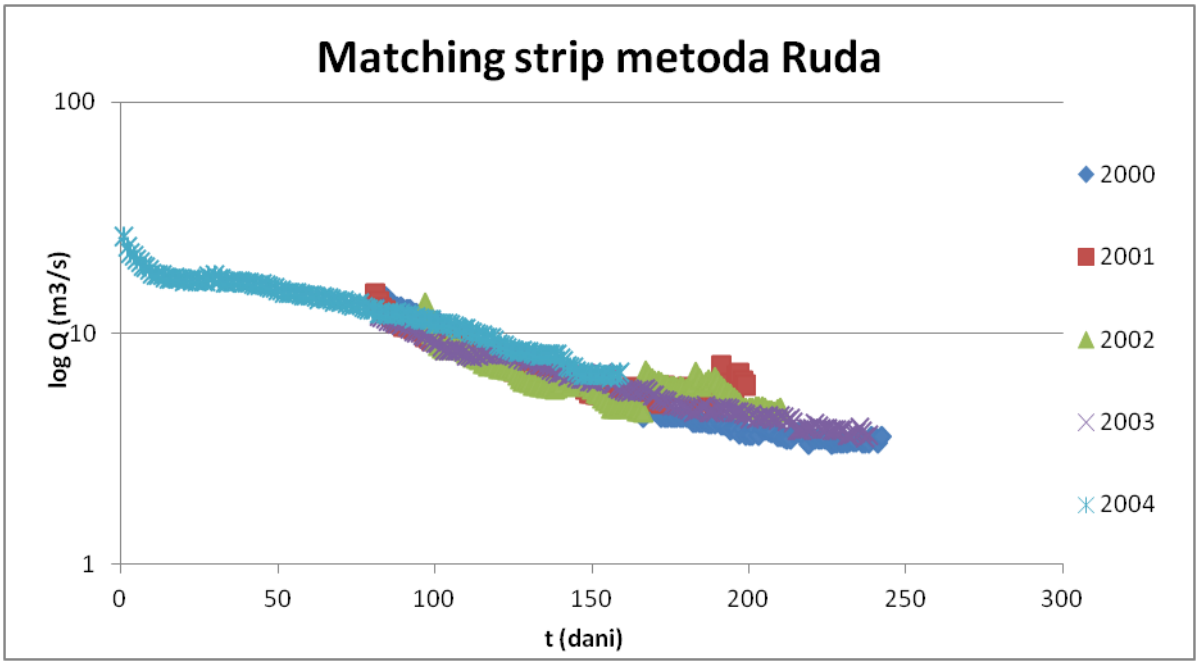
Matching strip metoda se temelji na eksponencijalnoj krivulji izraza : $Q\,(t) = Q\,_0(t_0) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - t_0)}$, koja logaritme protoka naprema vremenu razmješta u jednu liniju kako bi se mogao očitati nagib koji je jednak koeficijentu recesije. U ovoj metodi krivulje recesije se pomiču horizontalno dok se glavni dijelovi recesije ne poklope, te tako formiraju set zajedničkih linija. Srednje linija predstavlja krivulju pražnjenja (MRC – master recession curve), iz čije jednadžbe se očita koeficijent recesije.

Ovakav način izvođenja metode je naporan i nepraktičan, posebno ako se promatra duži niz godina. Ako se iprogramira postupak može postati poluautomatski. Program izdvaja za svaku godinu protoke sa hidrograma otjecanja koji čine recesiju. Zatim se recesijski periodi poredaju i prikažu u opadajućem nizu krivulja na polu-logaritamskom mjerilu, sa fiksnim intervalima koji ovise o duljini individualnih recesijskih razdoblja. Krivulja pražnjenja se nacrta između prvog i zadnjeg recesijskog traga.

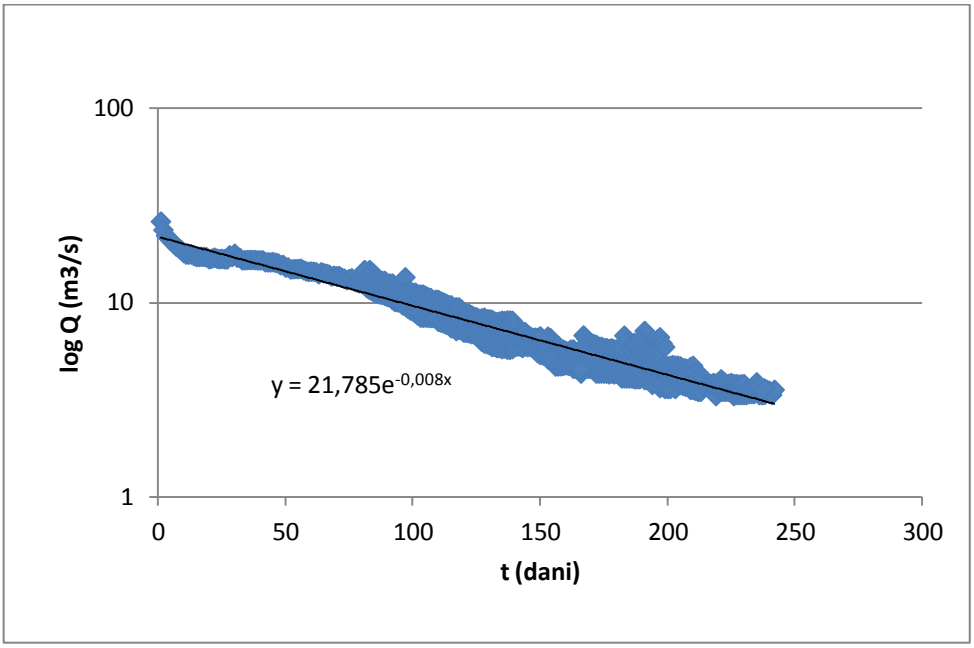
Konačno, operator interaktivno pomiče individualne recesije duž osi ordinata ili mijenja nagib krivulje pražnjenja dok se recesije ne poklope na željeni način. Ovakav pristup omogućava pronalaženje krivulje pražnjenja za razdoblja od više desetljeća u samo nekoliko minuta.

Kod određivanja koeficijenta recesije, matching strip metoda daje veću točnosti nego metoda korelacije koja će biti obrađena u nastavku.

Opisan postupak je korišten za analizu recesije u razdoblju 2000.-2004. za rijeke Rudu, Jadro, Žrnovnicu, Omblu i Vrljiku te je prikazan na sljedećim slikama.



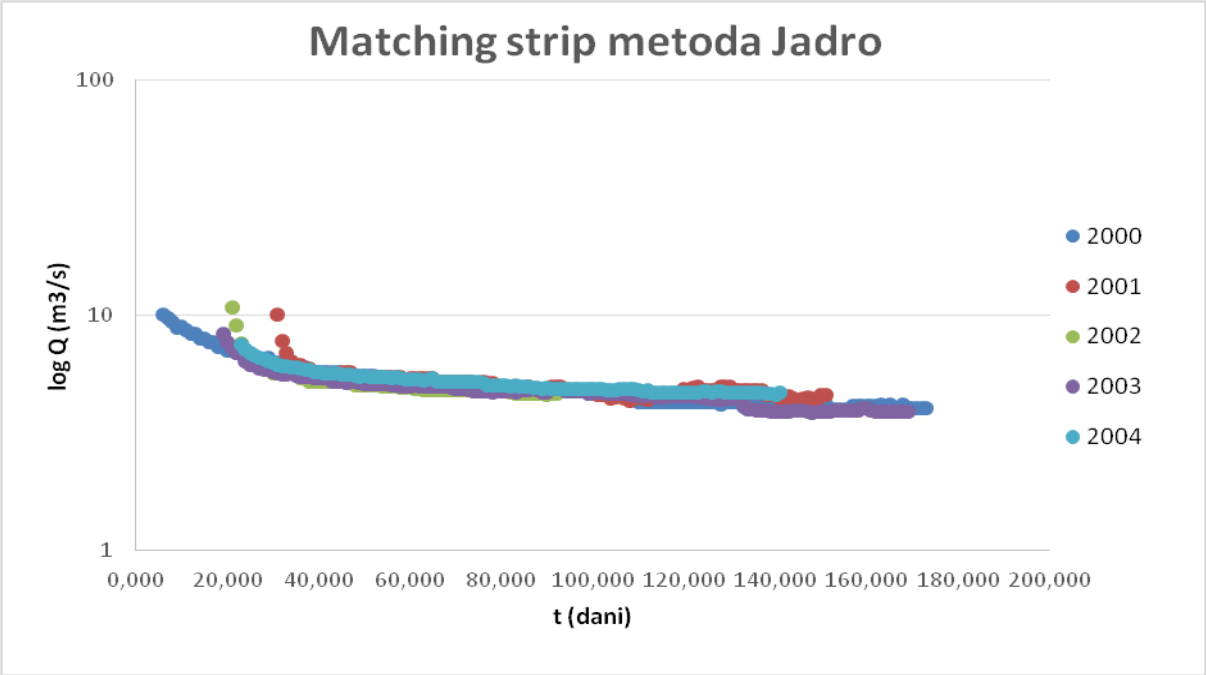
Slika 5.31.Metoda matching strip za Rudu (2000.-2004.)



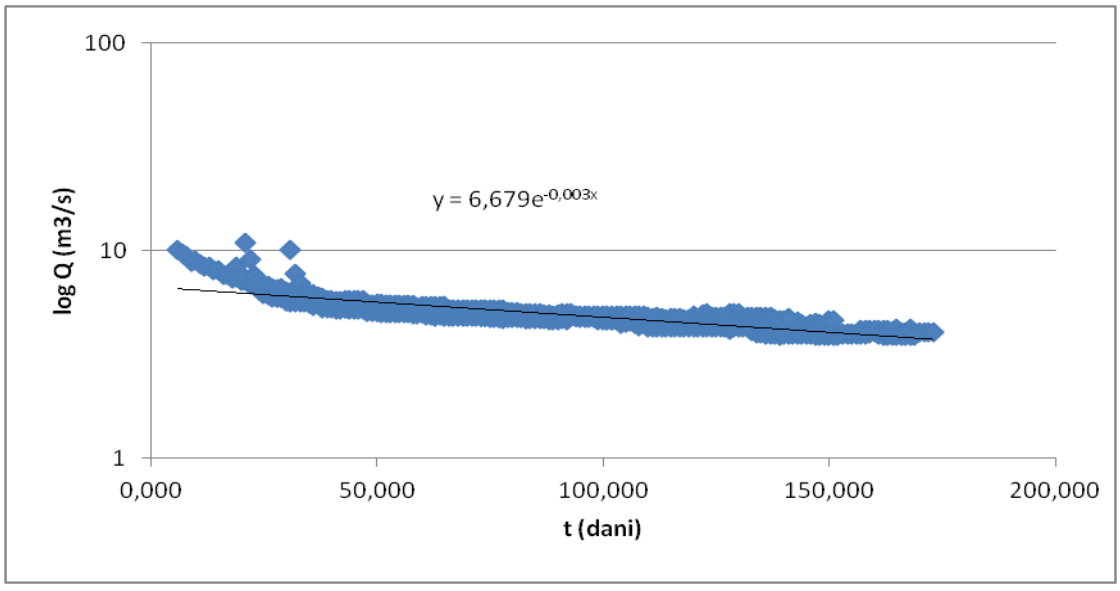
Slika 5.32. Glavna krivulja pražnjenja rijeke Rude

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja sa *slike 5.32.* očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}008\ (dan^{-1})$$



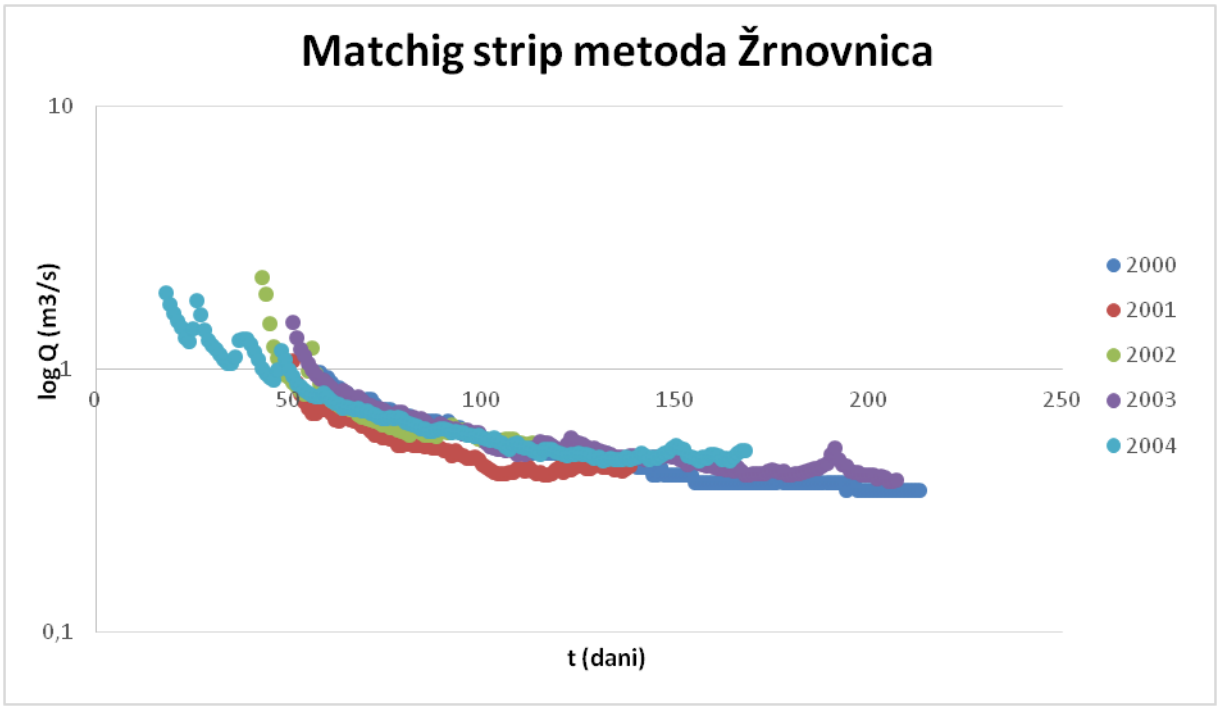
Slika 5.33. Metoda matching strip rijeke Jadro (2000.-2004.)



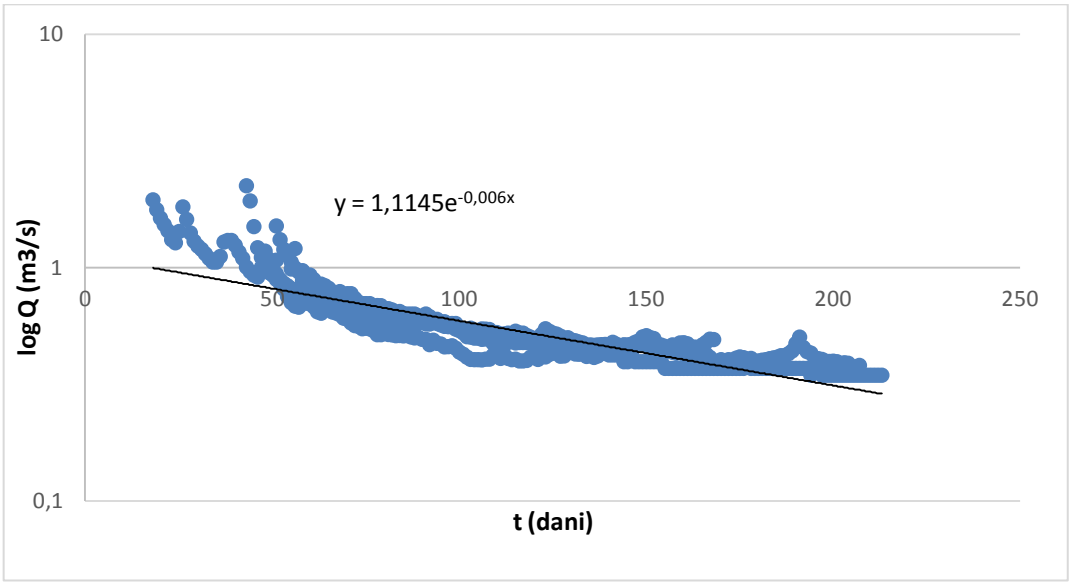
Slika 5.34.Glavna krivulja pražnjenja rijeke Jadro

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja sa slike 5.34. očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}003\ (dan^{-1})$$



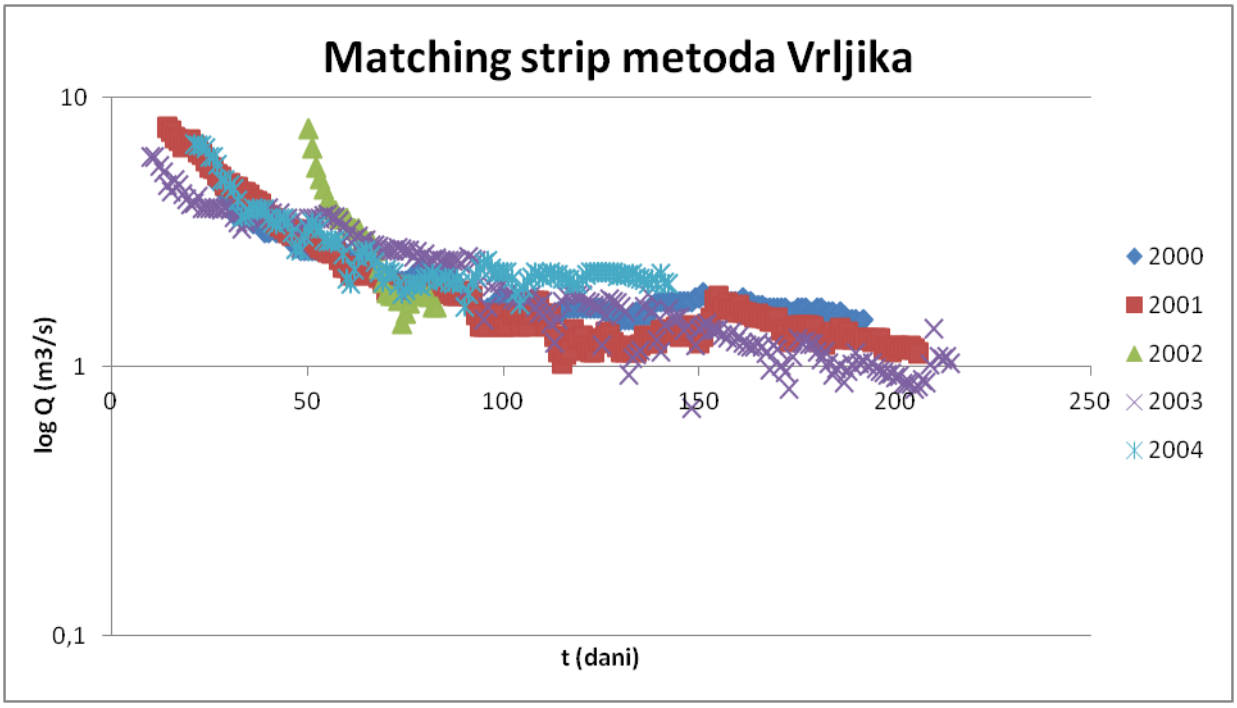
Slika 5.35. Metoda matching strip rijeke Žrnovnice (2000.-2004.)



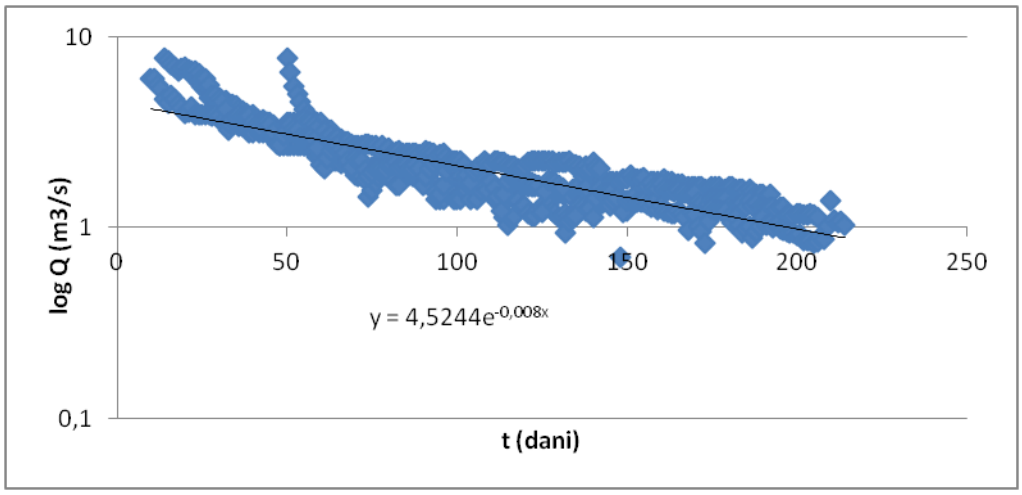
Slika 5.36. Glavna krivulja pražnjenja rijeke Žrnovnice

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja sa slike 5.36. očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}006\ (dan^{-1})$$



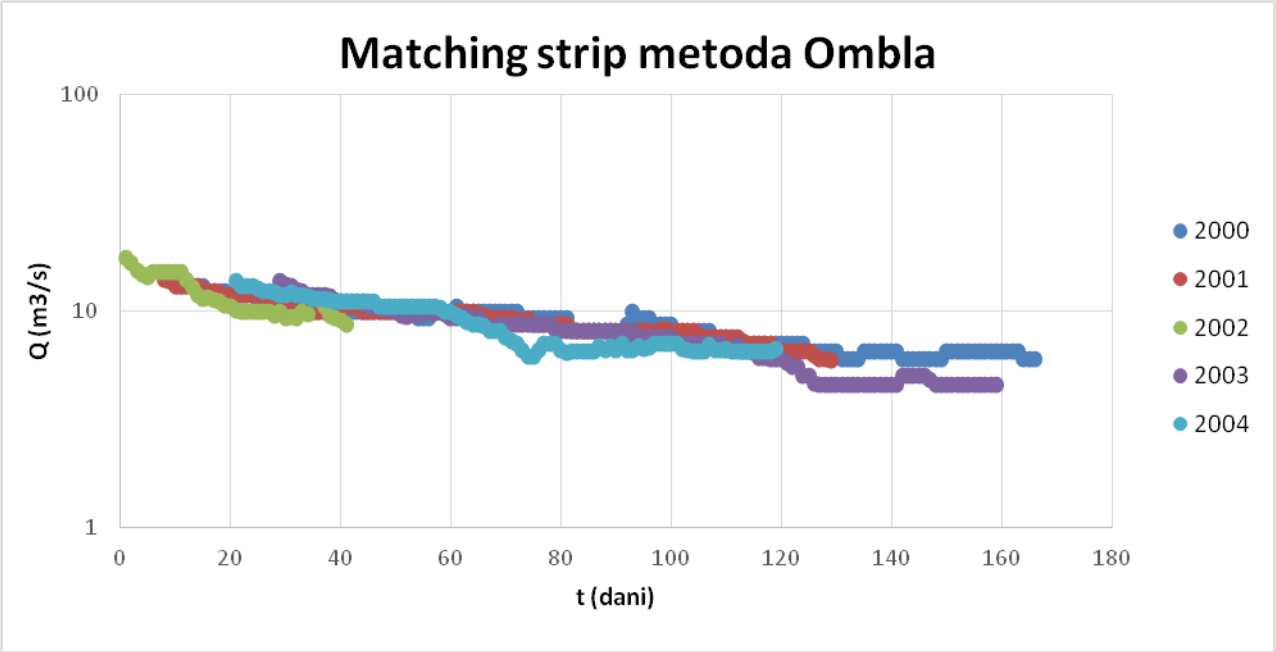
Slika 5.37.. Metoda matching strip rijeke Vrljike (2000.-2004.)



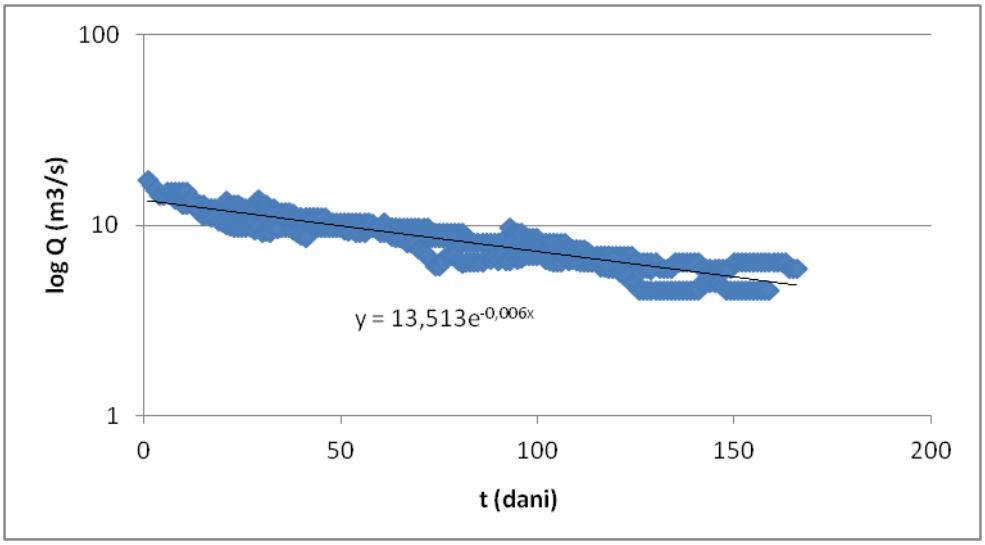
Slika 5.38. Glavna krivulja pražnjenja rijeke Vrljike

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja sa slike 5.38. očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}008\ (dan^{-1})$$



Slika 5.39.. Metoda matching strip rijeke Omble (2000.-2004.)



Slika 5.40. Glavna krivulja pražnjenja rijeke Omble

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja sa slike 5.40. očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}006\ (dan^{-1})$$

5.5 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema „tabulation method“

Tabulation metoda je slična metodi „matching strip“ , samo što se koristi tabelarni prikaz. Za svaku godinu, u ovom slučaju u razdoblju od 2000. do 2004. izdvaja se recesijsko razdoblje na pripadajućim hidrogramima. Formira se tablica tako da su stupci u tablici protoci koji čine recesiju (slika 5.41). Nakon formiranja, stupci se pomiču vertikalno sve dok se protoci u retku približno ne izjednače. Potom se nađe srednja vrijednost protoka u retku, koja zapravočini krivulju pražnjenja (master recession curve).

3 Aug 1200hrs	6 Sep 0000hrs	19 Jul 0000hrs	5 Jun 0000hrs	3 Nov 1200hrs	24 Dec 0000hrs	Average Discharge (cusecs)
2.431						2.431
2.025						2.025
1.917						1.917
1.882						1.882
1.632						1.632
1.567						1.567
1.520	1.520					1.520
1.429	1.429	1.474				1.444
1.342	1.342	1.342				1.342
1.299	1.258	1.258				1.272
1.217	1.138	1.217				1.191
1.138	1.099	1.138				1.125
1.099	1.062	1.099				1.087
1.025	1.025	1.025				1.025
	0.989	0.989				0.989
	0.954	0.920	0.820			0.937
	0.820	0.885	0.758			0.852
	0.788		0.698			0.804
	0.758		0.642			0.758
	0.698		0.615			0.698
	0.670		0.588			0.656
	0.642		0.562	0.513	0.489	0.628
	0.615		0.513	0.466	0.444	0.601
	0.562		0.489	0.422	0.401	0.562
	0.537		0.466	0.380	0.361	0.525
	0.513		0.422	0.361	0.323	0.501
			0.401	0.341	0.305	0.474
				0.305		0.429
				0.288		0.394
						0.361
						0.331
						0.305
						0.288

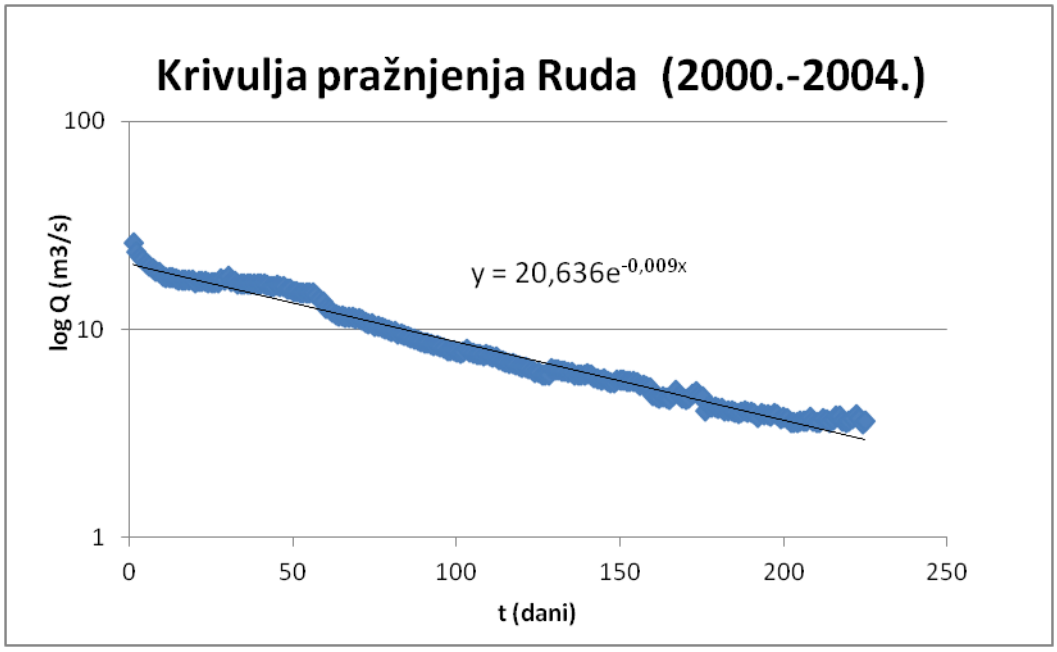
Slika 5.41. Primjer „tabulation“ metode

Ova metoda daje dobru kontrolu protoka te je manje vjerojatno da će srednja krivulja biti preduga ili prekratka. Nedostatak ove metode je naizgled beznačajni dijelovi recesijske krivulje ne mogu biti izostavljeni bez detaljnog pregleda.

Tabela 5.1. Tabelarni prikaz protoka u ovisnosti o vremenu glavne krivulje rijeke Rude

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
26,10	1	16,56	35	12,09	69	8,97	103
23,60	2	16,58	36	11,86	70	8,76	104
22,12	3	16,57	37	11,71	71	8,58	105
21,43	4	16,56	38	11,45	72	8,36	106
20,75	5	16,50	39	11,98	73	8,34	107
20,16	6	16,49	40	11,74	74	8,32	108
19,45	7	16,51	41	11,68	75	8,34	109
19,05	8	16,15	42	11,94	76	8,16	110
18,63	9	16,12	43	11,47	77	8,10	111
17,97	10	16,10	44	11,11	78	8,08	112
17,67	11	16,16	45	11,06	79	7,91	113
17,68	12	16,03	46	10,93	80	7,81	114
17,68	13	15,92	47	10,79	81	7,73	115
17,39	14	15,59	48	10,49	82	7,62	116
17,19	15	15,63	49	10,28	83	7,57	117
17,19	16	15,16	50	10,22	84	7,46	118
17,21	17	15,06	51	10,04	85	7,31	119
17,19	18	14,68	52	9,85	86	7,21	120
17,10	19	14,60	53	9,72	87	7,09	121
16,72	20	14,61	54	9,72	88	7,04	122
16,84	21	14,40	55	9,50	89	6,94	123
17,04	22	14,52	56	9,27	90	6,84	124
16,84	23	14,31	57	9,28	91	6,80	125
16,73	24	13,98	58	9,12	92	6,68	126
16,80	25	13,53	59	9,08	93	6,68	127
16,71	26	13,09	60	8,97	94	6,70	128
16,68	27	12,93	61	8,92	95	6,67	129
17,51	28	12,72	62	8,82	96	6,60	130
17,18	29	12,36	63	8,67	97	6,51	131
17,84	30	12,40	64	9,21	98	6,42	132
17,04	31	12,28	65	11,63	99	6,35	133
16,99	32	12,14	66	10,87	100	6,29	134
16,51	33	12,02	67	9,68	101	6,30	135
16,53	34	12,11	68	9,10	102	6,15	136

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
6,16	137	4,66	171	3,62	205
6,15	138	4,88	172	3,61	206
6,12	139	5,01	173	3,60	207
6,15	140	4,76	174	3,79	208
6,02	141	4,76	175	3,63	209
5,85	142	4,05	176	3,58	210
5,78	143	4,26	177	3,58	211
5,78	144	4,24	178	3,71	212
5,82	145	4,22	179	3,65	213
5,69	146	4,19	180	3,58	214
5,58	147	4,18	181	3,67	215
5,59	148	4,04	182	3,80	216
5,67	149	4,04	183	3,81	217
5,65	150	4,02	184	3,59	218
5,69	151	3,97	185	3,58	219
5,64	152	3,94	186	3,64	220
5,59	153	3,98	187	3,70	221
5,57	154	4,05	188	3,89	222
5,49	155	3,98	189	3,72	223
5,40	156	3,99	190	3,51	224
5,35	157	3,91	191	3,62	225
5,28	158	3,79	192		
5,23	159	3,93	193		
4,77	160	3,87	194		
4,71	161	3,86	195		
4,67	162	3,85	196		
4,73	163	3,91	197		
4,68	164	3,90	198		
4,62	165	3,72	199		
4,82	166	3,79	200		
5,08	167	3,71	201		
4,78	168	3,57	202		
4,64	169	3,58	203		
4,57	170	3,58	204		



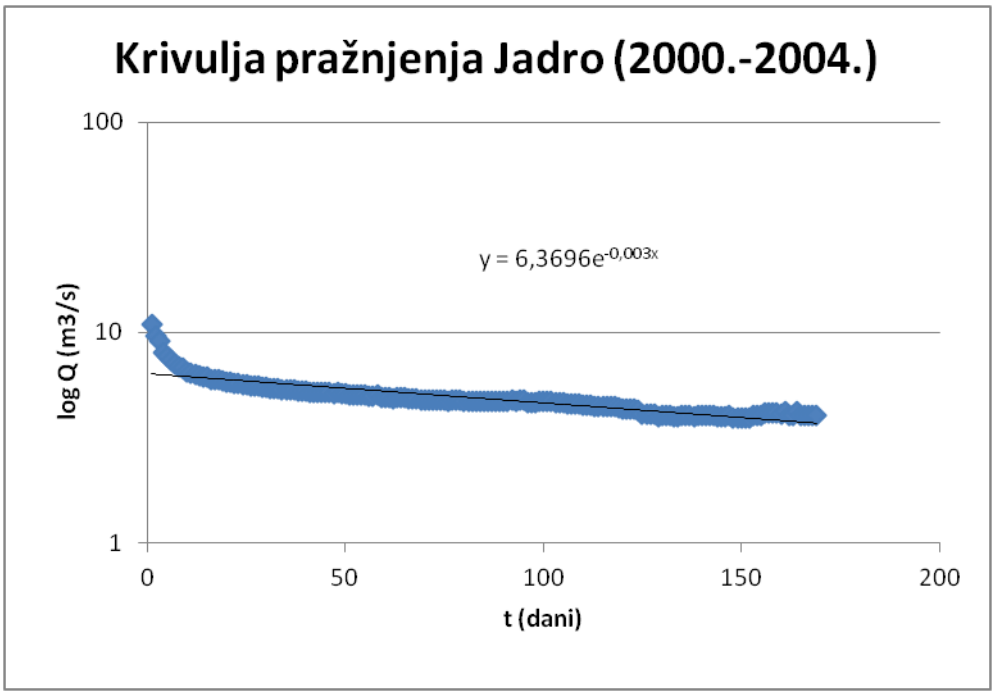
Slika 5.42. Krivulja pražnjenja rijeke Rude i njena jednadžba

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja po tabulation metodi sa slike očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}009\ (dan^{-1})$$

Tabela 5.2. Tabelarni prikaz protoka u ovisnosti o vremenu glave krivulje rijeke Jadro

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
10,88	1	5,96	35	5,06	69	4,74	103	4,24	137
10,09	2	5,83	36	5,04	70	4,74	104	4,23	138
9,68	3	5,86	37	5,04	71	4,73	105	4,25	139
9,24	4	5,85	38	5,05	72	4,63	106	4,25	140
8,81	5	5,94	39	5,00	73	4,62	107	4,26	141
8,42	6	6,58	40	5,01	74	4,61	108	4,25	142
8,28	7	6,05	41	4,95	75	4,62	109	4,25	143
8,23	8	5,82	42	4,96	76	4,57	110	4,22	144
7,95	9	5,70	43	4,96	77	4,55	111	4,17	145
7,65	10	5,61	44	4,96	78	4,56	112	4,17	146
7,48	11	5,61	45	4,96	79	4,52	113	4,21	147
7,34	12	5,53	46	4,95	80	4,54	114	4,20	148
7,23	13	5,49	47	4,97	81	4,55	115	4,21	149
7,00	14	5,44	48	4,97	82	4,50	116	4,21	150
7,33	15	5,44	49	4,95	83	4,50	117	3,96	151
7,32	16	5,39	50	4,93	84	4,50	118	3,96	152
7,07	17	5,39	51	4,93	85	4,52	119	4,05	153
7,03	18	5,35	52	4,91	86	4,48	120	4,06	154
6,91	19	5,32	53	4,91	87	4,46	121	4,05	155
6,87	20	5,34	54	4,88	88	4,51	122	4,08	156
6,75	21	5,32	55	4,87	89	4,51	123	4,10	157
6,53	22	5,27	56	4,87	90	4,47	124	4,05	158
6,43	23	5,22	57	4,85	91	4,49	125	4,03	159
6,34	24	5,25	58	4,83	92	4,49	126	4,01	160
6,30	25	5,21	59	4,83	93	4,50	127	4,05	161
6,55	26	5,21	60	4,82	94	4,52	128	3,95	162
7,19	27	5,20	61	4,78	95	4,52	129	3,95	163
6,80	28	5,19	62	4,72	96	4,40	130	4,05	164
6,58	29	5,17	63	4,74	97	4,38	131	3,96	165
6,53	30	5,19	64	4,73	98	4,38	132	3,97	166
6,41	31	5,16	65	4,75	99	4,25	133	4,00	167
6,20	32	5,15	66	4,78	100	4,27	134	4,00	168
6,13	33	5,12	67	4,80	101	4,27	135	4,03	169
5,99	34	5,07	68	4,80	102	4,24	136		



Slika 5.43. Krivulja pražnjenja rijeke Jadro i njena jednadžba

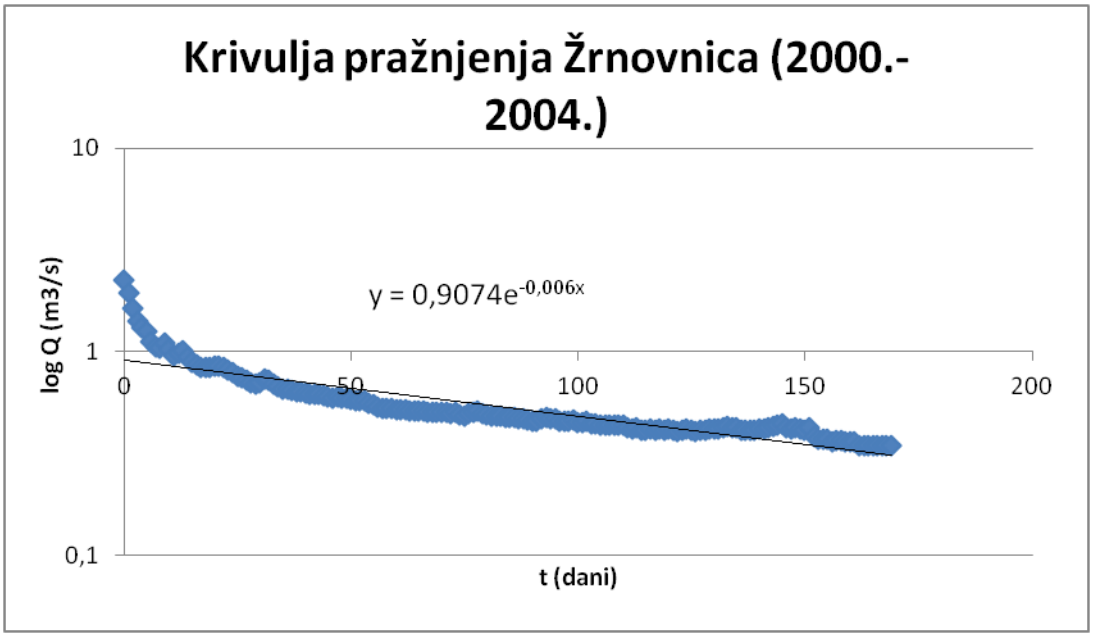
Iz jednadžbe krivulje pražnjenja po tabulation metodi sa slike očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}003\ (dan^{-1})$$

Tabela 5.3. Tabelarni prikaz protoka u ovisnosti o vremenu glave krivulje rijeke Žrnovnice

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
4,87	1	0,70	35	0,53	69	0,44	103
3,80	2	0,73	36	0,53	70	0,44	104
3,22	3	0,76	37	0,53	71	0,44	105
2,82	4	0,74	38	0,53	72	0,44	106
2,54	5	0,71	39	0,52	73	0,43	107
2,30	6	0,70	40	0,52	74	0,44	108
2,08	7	0,68	41	0,52	75	0,43	109
1,85	8	0,68	42	0,52	76	0,43	110
1,62	9	0,69	43	0,52	77	0,42	111
1,44	10	0,83	44	0,51	78	0,42	112
1,37	11	0,73	45	0,51	79	0,42	113
1,25	12	0,69	46	0,51	80	0,43	114
1,17	13	0,67	47	0,50	81	0,42	115
1,17	14	0,67	48	0,51	82	0,42	116
1,23	15	0,65	49	0,52	83	0,41	117
1,15	16	0,64	50	0,52	84	0,41	118
1,07	17	0,63	51	0,51	85	0,42	119
1,01	18	0,63	52	0,49	86	0,41	120
1,03	19	0,64	53	0,49	87	0,41	121
1,04	20	0,63	54	0,49	88	0,41	122
0,96	21	0,62	55	0,49	89	0,41	123
0,92	22	0,62	56	0,48	90	0,41	124
0,88	23	0,61	57	0,48	91	0,41	125
0,87	24	0,61	58	0,48	92	0,41	126
0,87	25	0,61	59	0,47	93	0,41	127
0,88	26	0,60	60	0,47	94	0,40	128
0,88	27	0,58	61	0,46	95	0,41	129
0,86	28	0,57	62	0,45	96	0,41	130
0,83	29	0,56	63	0,44	97	0,41	131
0,81	30	0,56	64	0,45	98	0,41	132
0,79	31	0,55	65	0,45	99	0,43	133
0,77	32	0,55	66	0,45	100	0,42	134
0,75	33	0,55	67	0,45	101	0,42	135
0,74	34	0,54	68	0,44	102	0,42	136

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
0,75	137	0,56	171
0,70	138	0,54	172
0,53	139	0,53	173
0,48	140	0,51	174
0,46	141	0,51	175
0,41	142	0,57	176
0,41	143	0,56	177
0,41	144	0,55	178
0,40	145	0,55	179
0,41	146	0,54	180
0,41	147	0,53	181
0,42	148	0,54	182
0,42	149	0,54	183
0,43	150	0,53	184
0,44	151		
0,42	152		
0,41	153		
0,42	154		
0,41	155		
0,41	156		
0,41	157		
0,46	158		
0,49	159		
0,48	160		
0,55	161		
0,61	162		
0,54	163		
0,50	164		
0,47	165		
0,45	166		
0,45	167		
0,45	168		
0,47	169		
0,57	170		



Slika 5.44. Krivulja pražnjenja rijeke Žrnovnice i njena jednadžba

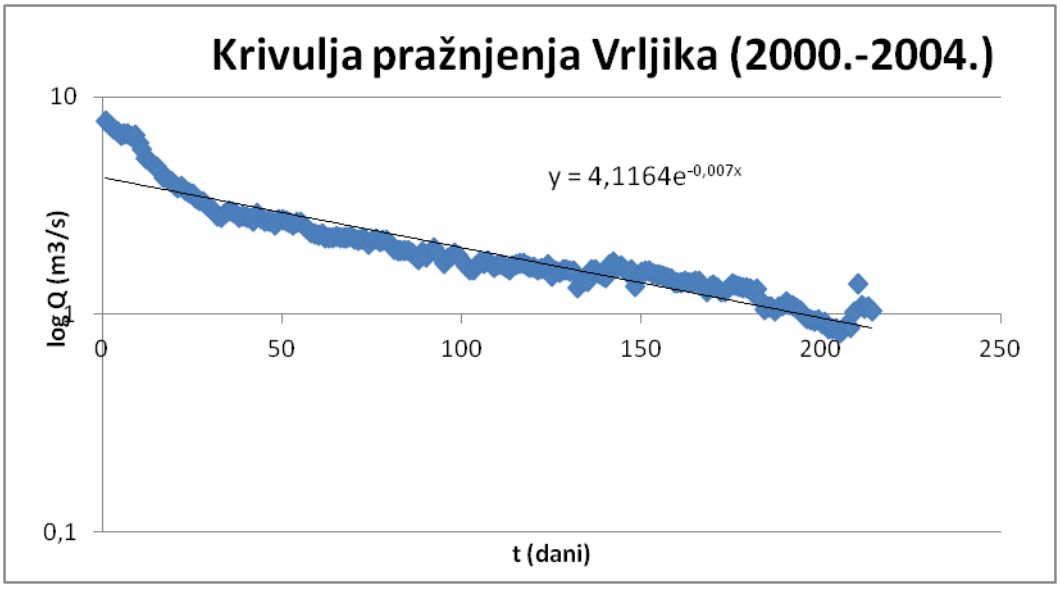
Iz jednadžbe krivulje pražnjenja po tabulation metodi sa slike očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}006\ (dan^{-1})$$

Tabela 5.4. . Tabelarni prikaz protoka u ovisnosti o vremenu glave krivulje rijeke Vrljike

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
7,70	1	3,01	35	2,21	69	1,66	103
7,47	2	3,00	36	2,13	70	1,68	104
7,16	3	3,02	37	2,09	71	1,66	105
7,07	4	2,98	38	2,14	72	1,58	106
6,64	5	3,00	39	2,14	73	1,68	107
6,71	6	2,99	40	2,13	74	1,64	108
6,78	7	2,92	41	2,11	75	1,62	109
6,47	8	2,82	42	2,06	76	1,68	110
6,66	9	2,82	43	2,01	77	1,66	111
6,18	10	2,78	44	2,04	78	1,62	112
5,84	11	2,80	45	2,00	79	1,60	113
5,50	12	2,74	46	1,96	80	1,67	114
5,32	13	2,68	47	1,91	81	1,70	115
5,24	14	2,49	48	1,93	82	1,70	116
5,32	15	2,52	49	1,93	83	1,68	117
5,22	16	2,53	50	1,96	84	1,66	118
5,03	17	2,63	51	1,92	85	1,64	119
4,90	18	2,66	52	1,90	86	1,63	120
4,77	19	2,67	53	1,90	87	1,60	121
4,57	20	2,61	54	1,87	88	1,62	122
4,51	21	2,69	55	1,95	89	1,66	123
4,44	22	2,59	56	1,84	90	1,69	124
4,27	23	2,52	57	1,91	91	1,55	125
4,24	24	2,47	58	1,86	92	1,63	126
4,21	25	2,45	59	1,84	93	1,72	127
4,02	26	2,38	60	1,80	94	1,75	128
3,84	27	2,36	61	1,71	95	1,75	129
3,76	28	2,19	62	1,83	96	1,74	130
3,57	29	2,18	63	1,92	97	1,72	131
3,40	30	2,20	64	1,96	98	1,53	132
3,39	31	2,26	65	1,89	99	1,59	133
3,24	32	2,25	66	1,79	100	1,61	134
3,09	33	2,28	67	1,70	101	1,61	135
3,096	34	2,238	68	1,6475	102	1,735	136

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
1,73	137	1,33	171	0,82	205
1,68	138	1,27	172	0,84	206
1,62	139	1,26	173	0,88	207
1,63	140	1,32	174	0,87	208
1,77	141	1,37	175	1,02	209
1,86	142	1,36	176	1,38	210
1,75	143	1,34	177	1,09	211
1,76	144	1,32	178	1,06	212
1,76	145	1,32	179	1,08	213
1,82	146	1,30	180	1,03	214
1,61	147	1,25	181	1,09	215
1,33	148	1,30	182	1,93	216
1,50	149	1,15	183	2,02	217
1,55	150	1,05	184	1,98	218
1,58	151	1,07	185	2,40	219
1,58	152	1,07	186	2,01	220
1,53	153	1,03	187	1,73	221
1,51	154	1,07	188	1,64	222
1,50	155	1,09	189	1,51	223
1,49	156	1,14	190	1,48	224
1,47	157	1,11	191	1,43	225
1,44	158	1,10	192	1,35	226
1,40	159	1,06	193	1,33	227
1,39	160	1,03	194	1,34	228
1,39	161	0,98	195	1,33	229
1,41	162	0,96	196	1,08	230
1,39	163	0,94	197	1,35	231
1,39	164	0,93	198		
1,42	165	0,94	199		
1,41	166	0,90	200		
1,34	167	0,92	201		
1,26	168	0,86	202		
1,33	169	0,85	203		
1,36	170	0,86	204		



Slika 5.45. . Krivulja pražnjenja rijeke Vrljike i njena jednadžba

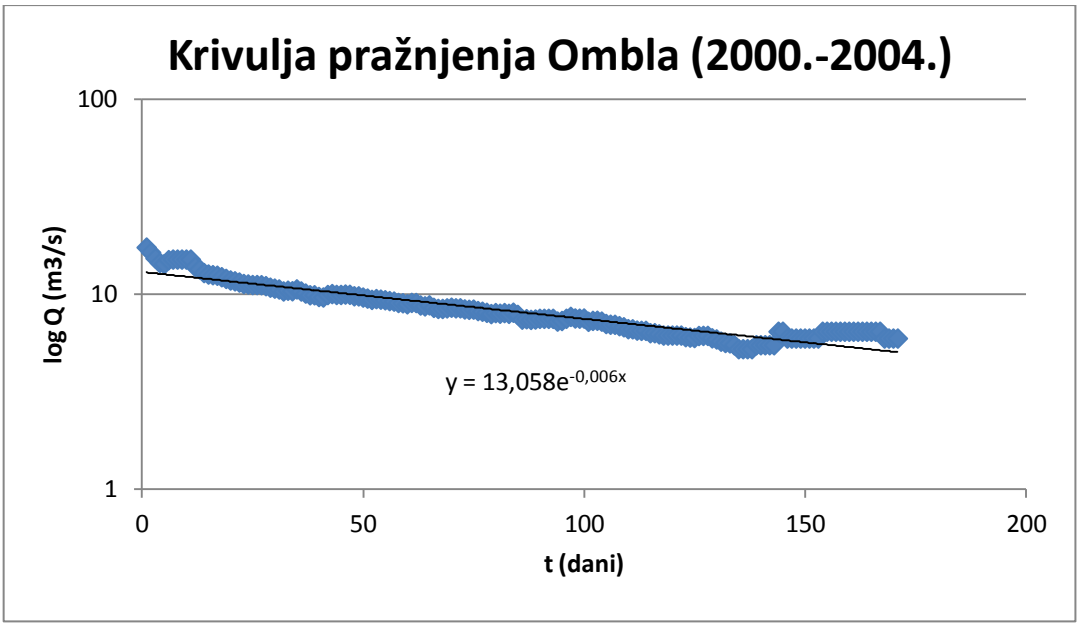
Iz jednadžbe krivulje pražnjenja po tabulation metodi sa slike 5.45 očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}007\ (dan^{-1})$$

Tabela 5.5. Tabelarni prikaz protoka u ovisnosti o vremenu glave krivulje rijeke Omble

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
13,80	1	10,99	35	8,13	69	7,18	103
13,70	2	10,98	36	8,06	70	7,07	104
13,20	3	10,85	37	8,46	71	7,19	105
13,17	4	10,84	38	9,62	72	7,12	106
13,02	5	10,73	39	9,43	73	7,21	107
13,10	6	10,68	40	8,70	74	7,21	108
12,78	7	10,40	41	8,03	75	7,19	109
12,56	8	10,24	42	7,97	76	7,06	110
12,32	9	10,01	43	7,99	77	7,06	111
12,22	10	9,85	44	7,99	78	6,97	112
12,08	11	9,87	45	8,05	79	6,81	113
11,82	12	9,74	46	7,90	80	6,78	114
11,78	13	9,55	47	7,90	81	6,89	115
13,12	14	9,38	48	7,88	82	6,89	116
13,46	15	9,31	49	7,65	83	6,84	117
13,48	16	9,35	50	7,79	84	6,65	118
13,10	17	9,30	51	8,59	85	6,84	119
12,48	18	9,09	52	8,80	86	6,74	120
12,22	19	9,08	53	8,41	87	6,67	121
11,88	20	9,20	54	9,44	88	6,64	122
11,50	21	8,97	55	11,66	89	6,51	123
11,38	22	8,90	56	11,12	90	6,40	124
11,22	23	8,80	57	10,19	91	6,28	125
10,93	24	8,74	58	9,43	92	6,25	126
10,70	25	8,51	59	8,79	93	6,32	127
11,58	26	8,47	60	8,35	94	6,50	128
13,59	27	8,55	61	8,15	95	6,56	129
13,04	28	8,75	62	7,95	96	6,28	130
12,10	29	8,71	63	7,76	97	6,53	131
11,52	30	9,09	64	7,63	98	6,53	132
11,34	31	8,85	65	7,41	99	7,26	133
11,09	32	8,58	66	7,38	100	7,01	134
10,85	33	8,33	67	7,27	101	6,71	135
10,81	34	8,18	68	7,27	102	6,71	136

$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)	$Q_{srednje}$ (m3/s)	t (dani)
6,48	137	5,94	171
6,45	138	5,94	172
6,63	139	5,94	173
6,71	140	5,94	174
6,71	141	5,80	175
9,77	142	5,56	176
10,82	143	5,46	177
9,92	144	5,46	178
9,07	145	5,94	171
8,32	146		
8,02	147		
7,68	148		
7,71	149		
7,67	150		
7,59	151		
7,46	152		
7,52	153		
7,52	154		
7,52	155		
7,52	156		
7,27	157		
7,27	158		
7,05	159		
6,77	160		
7,49	161		
7,29	162		
6,96	163		
6,66	164		
6,44	165		
6,17	166		
5,98	167		
5,94	168		
5,94	169		
5,94	170		



Slika 5.46. Krivulja pražnjenja rijeke Omble i njena jednadžba

Iz jednadžbe krivulje pražnjenja po tabulation metodi sa slike 5.46 očita se koeficijent recesije:

$$\alpha = 0{,}006\ (dan^{-1})$$

5.6 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema metodi korelacije (Langbein,1938.)

Metoda korelacije prikazuje grafički odnos protoka Q(t) u nekom trenutku (t) naspram protoka Q (t_n) u trenutku (t_n) u nekom promatranom razdoblju recesije.

Na apcisi se nanose protoci Q(t), dok se na ordinati nanose protoci Q (t_n) gdje je n = 1,2,3... proizvoljni vremenski korak u danima. Kad se unesu svi podaci za promatrani period postavlja se srednja linija koja predstavlja krivulju pražnjenja. Iz izraza (5.1) dobije se:

$$k = e^{-\alpha} = \left(\frac{Q\,(t)}{Q_0(t_0)}\right)^{\frac{1}{t}} \qquad (5.5.)$$

gdje *k* predstavlja nagib krivulje pražnjenja.

Stoga, vrijednost koeficijenta recesije α iznosi:

$$\alpha = -\ln(k) \qquad (5.6.)$$

Metodu korelacije je razvio Langbein (1938.) za istraživanje recesije kanala tijekom poplavnih razdoblja. On je koristio interval zakašnjenja od 1 dan, koji je možda bio prikladan za brze recesije povezane sa ispražnjivanjem kanala.

U ovom radu obrađen je period recesije rijeka Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble u razdoblju od 2000. – 2004. Korišten je vremenski korak n = 1,2,3,4,5.

Povećnjem vremenskog koraka *n* dolazi do gubitaka određenih podataka, pa su tako podaci na grafu sve raspršeniji. Analogno tome, povećanjem broja *n* koeficijent *k* je manji, a s njim koeficijent *α* je veći. Za sve obrađene krške izvore (Ruda, Jadro, Žrnovnica, Vrljika, Ombla) koeficijent recesije *α* kreće se van norme veličine koeficijenta za krške rijeke.

Primjenom ove metode dobiveni su rezultati koji su različiti od rezultata dobivenih dvijema prethodno spomenutim metodama. Razlog tome je prevelika osjetljivost same metode, te tako bilo koja mala promjena nagiba pravca utječe na velike promjene koeficijenta recesije.

5.7 Konstrukcija krivulje pražnjenja prema Petrašu

Recesijska krivulje opisana je koristeći princip superpozicije eksponencijalne jednadžbe $Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$ te je ocjenjena pomoću parametara jednadžbe α (koeficijent recesije) i početnog protoka Q_0. Opis krivulja različitih gradijenata i zakrivljenosti istom formulom omogućuje njihovu usporedbu na istoj osnovi. Tako je razvijena metoda za konstruiranje glavne recesijske krivulje i anvelope recesijskih krivulja.

Određenu seriju podataka o protoku koja se nalazi u recesijskoj grani hidrograma moguće je razdvojiti na dvije ili više serija podataka te svaku od njih opisati spomenutom Maillet-ovom jednadžbom. Koristeći princip superpozicija, sve krivulje se spajaju u jedinstvenu krivulju recesije ili krivulju pražnjenja podzemlja.

Jednadžba $$Q\,(t) = Q_{\,0}(t_0) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - t_0)} \tag{5.7}$$

za $t_0 = 0$ poprima oblik $$Q\,(t) = Q_{\,0}(t_0) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \tag{5.8}$$

Koeficijent recesije je najbitniji parametar jer o njemu ovisi oblik krivulje recesije i intezitet pražnjenja vodonosnika. Struktura formule za opis koeficijenta recesije u jednadžbi (5.7) ukazuje na neke faktore koji kontroliraju smjer pražnjenja. Koeficijent α za ograničene akvifere prema Schoeller-u (1962.) ima oblik:

$$\alpha = \frac{K \cdot \sin\beta}{m \cdot l} \tag{5.9}$$

gdje je: K – koeficijent propusnosti

m – akumulacijski koeficijent

l – dužina vodonosnika

β – kut nagiba dna riječnog korita

Jednadžba (5.7) za pražnjenje neograničenih vodonosnika izvedena je iz osnovne nelinearne diferencijalne jednadžbe procjeđivanja nestacionarnog strujanja sa neograničenom razinom vode u anizotropnoj stijenskoj sredini, koju je izveo Boussinesq (1904.)

Nakon pojednostavljenja jednodimenzijonalne jednadžbe na nestacionarnu nelinearnu formu za izotropni vodonosnik sa horizontalnim nepropusnim dnom i pod pretpostavkom da nivo podzemne vode nema značajnih oscilacija tijekom vremena uslijed pražnjenja vodonosnika, jednadžba je linearizirana:

$$\alpha = 2{,}467 \cdot \frac{K \cdot h_0}{m \cdot X^2} \tag{5.10}$$

gdje je: h_0 – debljina vodonosnika

X – dužina vodonosnika

U ovim dvjema jednadžbama koeficijent α je izravno proporcionalan koeficijentu propusnosti i obrnuto proporcionalan akumulacijskom koeficijentu.

Najjednostavnije pražnjenje vodonosnika može se simulirati pražnjenjem rezervoara kroz porozni plutao (Roche, 1963.), opisano jednadžbom:

$$\alpha = \frac{K \cdot P \cdot s}{S \cdot L} \tag{5.11}$$

gdje su: P – porozitet

s – površina poprečnog poroznog pluta

L – duljina poroznog pluta

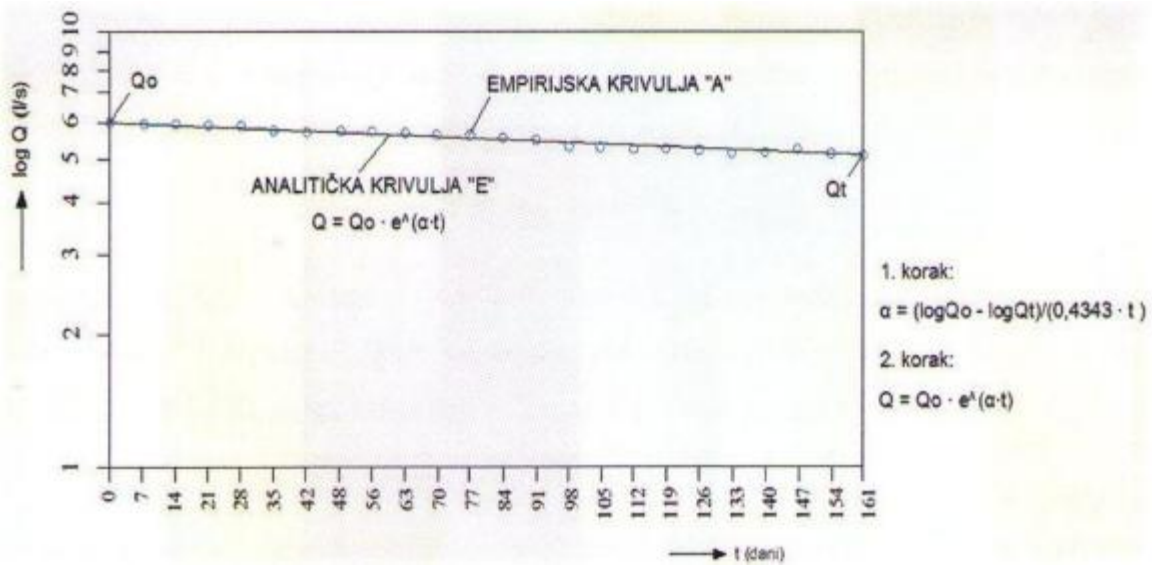
S – tlocrtna površina rezervoara

5.7.1 Konstrukcija krivulje pražnjenja koristeći princip superpozicije

Jednadžba (5.8) može biti izražena u logaritamskom obliku:

$$\log Q = \log Q_0 - 0{,}4343 \cdot t \cdot \alpha \tag{5.12}$$

Prikaz ove krivulje u polu-logaritamskom koordinatnom sustavu je pravac. Koeficijent recesije α je nagib tog pravca te jednadžba vrijedi za cijelu krivulju. Drugi parametar početni protok Q_0 nalazi se na ordinati ove krivulje u vremenu t = 0. (*slika 5.52*)



5.47. Krivulja pražnjenja u polu-logaritamskom mjerilu za homogenu sredinu

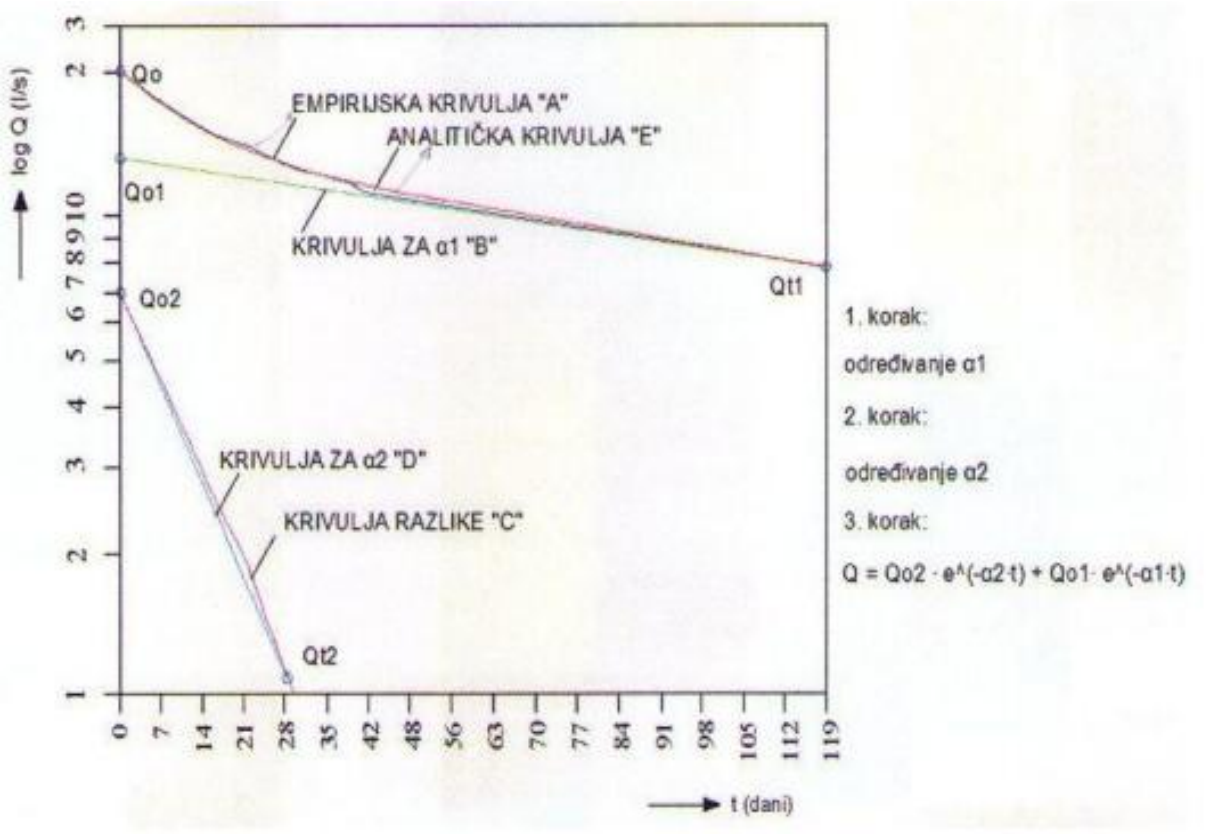
Sam pravac predstavlja pražnjenje iz homogenske stijenske sredine. Što je vodonosnik propusniji to je krivulja strmija i veća je vrijednost koeficijenta α. Pri prikazivanju recesije na polu-logaritamskoj skali kod heterogenoh vodonosnika javljaju se zakrivljene linije. Tada α nije konstantna za cijelu krivulju, već je u funkciji vremena.

Parametre Q_{0i} i α_i mogu se odrediti na slijedeći način. Vrijeme se nanosi na linearnu skalu, a protok na logaritamsku što je vidljivo na *slici 5.53*. Donji dio empirijske krivulje A je aproksimiran pravcem B koji je produžen do ordinate. Linija B presjeca logaritamsku os u točki Q_{01} i α_1 je gradijent linije B. Ostale točke na krivulji A, dobivena je krivulja C kao razlika ordinata na krivulji A i pravca B. Pravac D je postavljen kroz niži dio ili cijelu krivulju C, što omogućava nalaženje Q_{02} i α_2 na isti način kao za liniju B.

Vrijednost α_i se izračuna iz slijedeće jednadžbe:

$$\alpha = \frac{\log Q_{oi} - \log Q_{ti}}{0{,}4343 \cdot t_i} \qquad (5.13)$$

gdje Q_{ti} označava protok na nižem dijelu krivulja A i C, koji odgovara kraju vremenskog intervala t_i. Druge veličine korištene u postupku prikazane su na slici *5.53*. Tako se čitava empirijska krivulja A može izraziti u formi grupe pravaca.



5.48. Krivulja pražnjenja

Protok Q u vremenu t računa se iz jednadžbe analitičke recesijske krivulje E dobivene prema opisanom postupku. Tako jednadžba ima oblik:

$$Q = Q_{01} \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t} + Q_{02} \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t} + \cdots + Q_{0n} \cdot e^{-\alpha_n \cdot t} \qquad (5.14)$$

Q_{0i} i α_i (i = 1,2,3...n) odgovaraju i-toj liniji unutar serije pravaca na polu-logaritamskoj sklai, dobivani superpozicijom jednadžbe (5.8)

Prijelaz iz direktnog otjecanja prema baznom popraćen je promjenom zakrivljenosti krivulje recesije. Slična promjena uočena je na krivulji pražnjenja zbog heterogenosti vodonosnika. Q_0 se može odrediti preciznije, tijekom konstrukcije krivulje pražnjenja zbog toga što se promjene u vrijednosti α mogu identificirati.

Volumen podzemne vode raspložive u vodonosniku neposredno nakon t = 0, koji odgovara Q_0 može se procijeniti na osnovu jednadžbe:

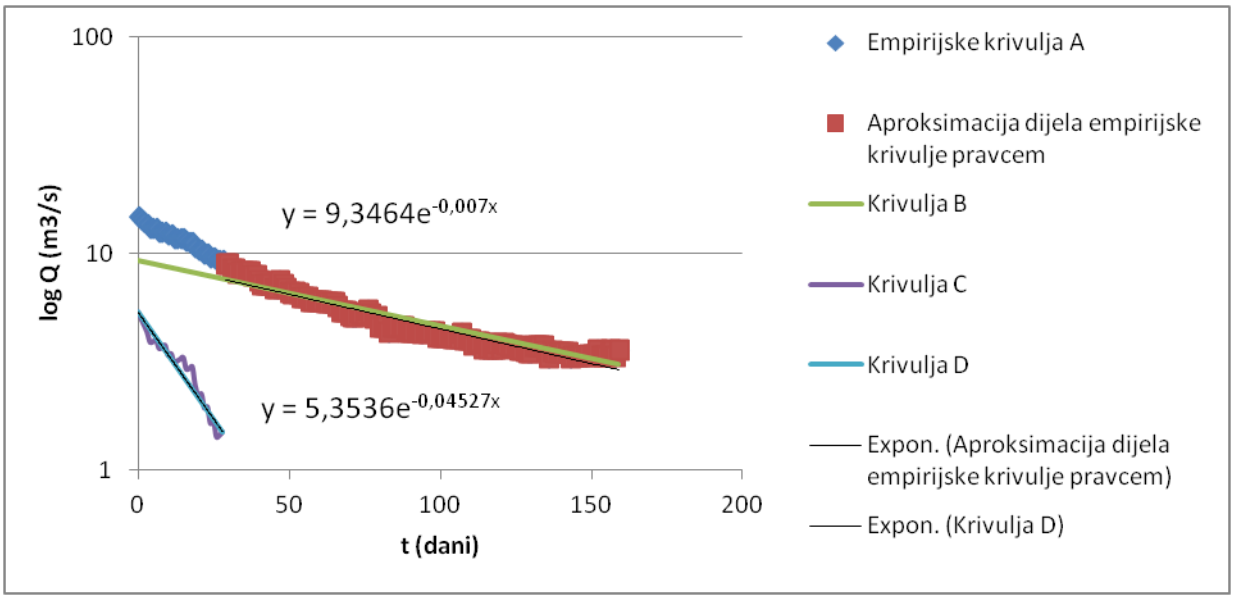
$$V = \sum_{i=1}^{n}\left[Q_{oi}\int_0^{\infty} e^{-\alpha t}\right] = \sum_{i=i}^{n}\frac{Q_{0i}}{\alpha_i \cdot k} \qquad (5.15)$$

gdje je k integralna konstanta neovisna o vremenu. Dimenzija α je recipročna vrijednosti vremena $\left[\frac{1}{T}\right]$.

Analiza krivulje pražnjenja generalno pokazuje, za opis krivulje pražnjenja, da dva ili tri pravca adekvatno prikazuju krivulju. Znači, dvije ili tri vrijednosti α mogu opisati režim pražnjenja.

Na slikama u nastavku prikazana su razdoblja recesije sa svojim koeficijentima za rijeke Rudu, Jadro, Žrnovnicu, Vrljiku i Omblu.

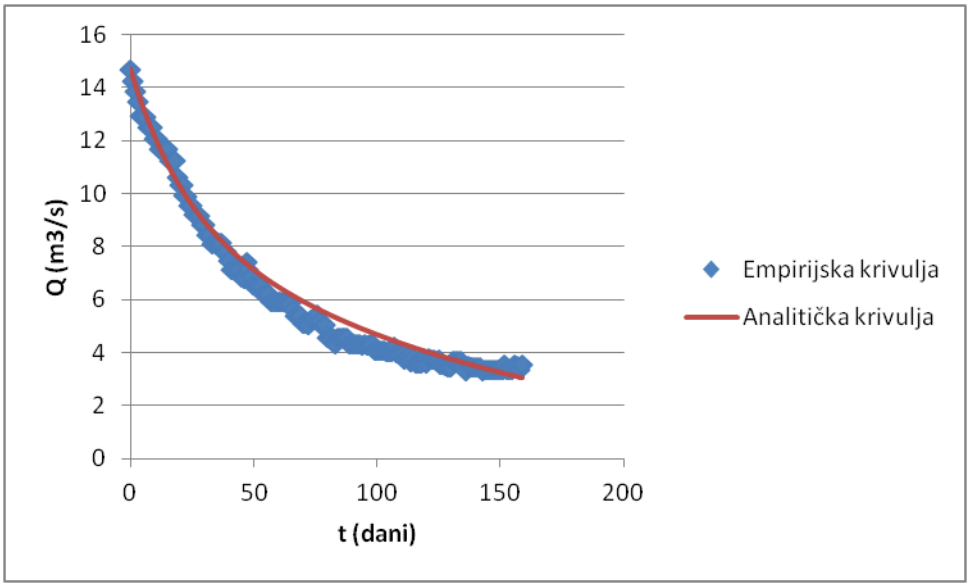
5.7.1.1 Krivulja pražnjenja rijeke Rude



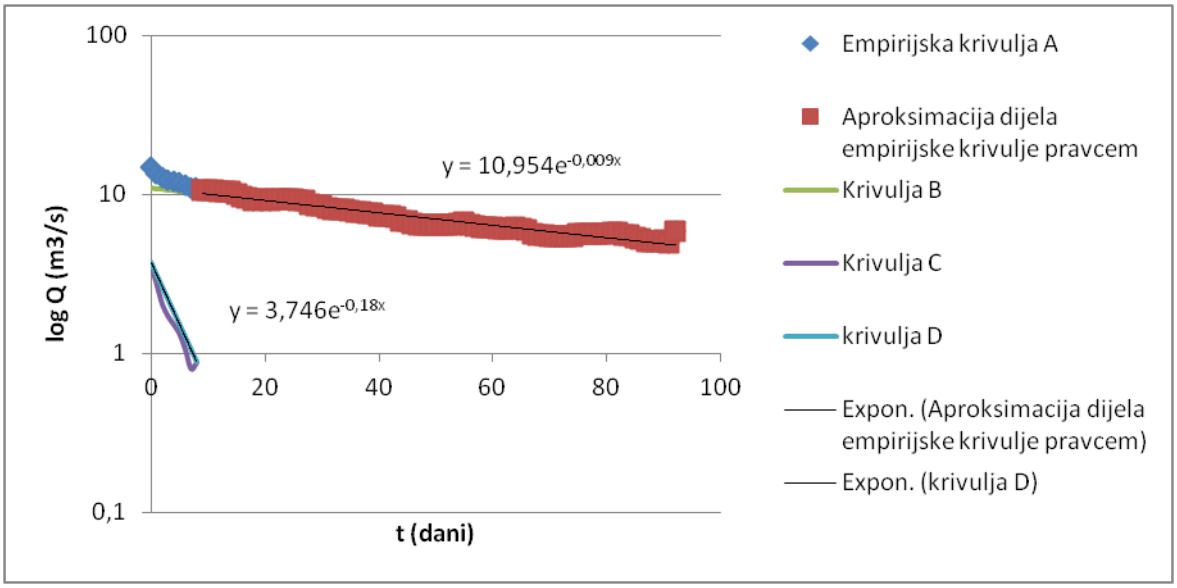
5.49. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 9.4. - 30.9.2000.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 9.4. – 30.9. 2000. godine, za rijeku Rudu glasi:

$$Q = 9{,}3464 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} + 5{,}3536 \cdot e^{-0{,}04527 \cdot t}$$



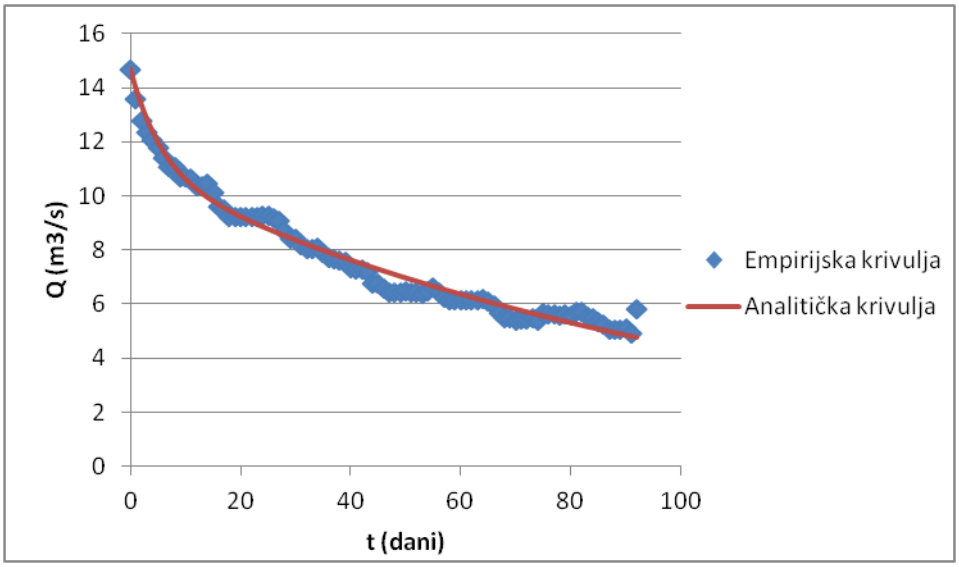
5.50. . Krivulja recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 9.4. - 30.9.2000.



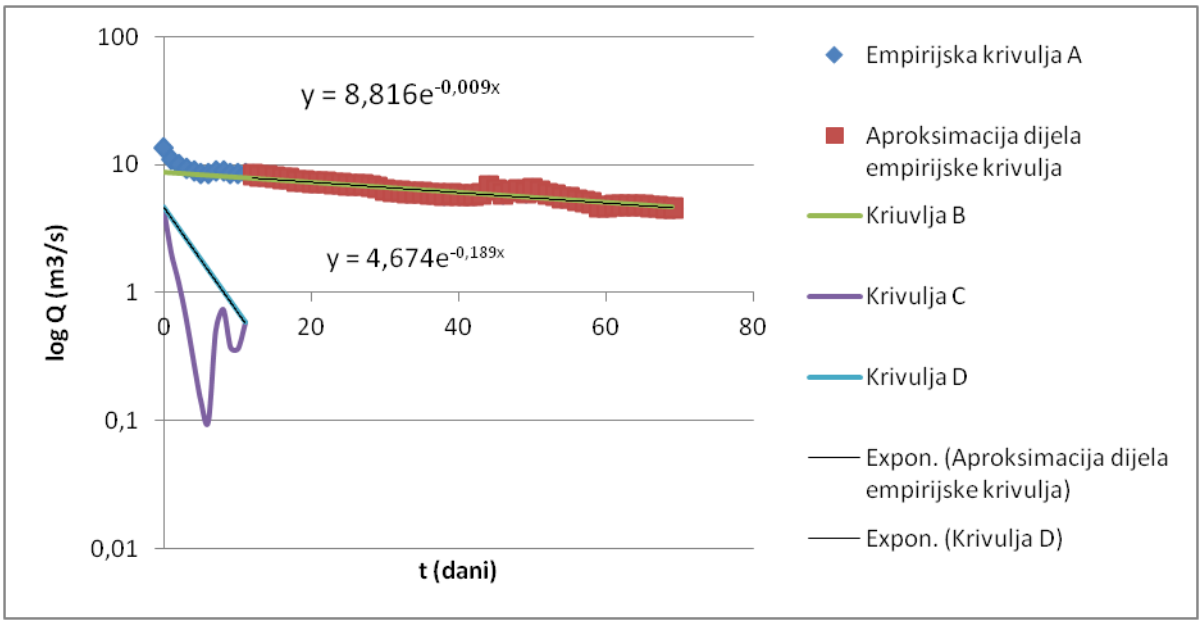
5.51. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 5. 6.- 5.9.2001.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 5.6. – 5.9. 2001. godine, za rijeku Rudu glasi:

$$Q = 10{,}954 \cdot e^{-0{,}00900 \cdot t} + 3{,}746 \cdot e^{-0{,}18 \cdot t}$$



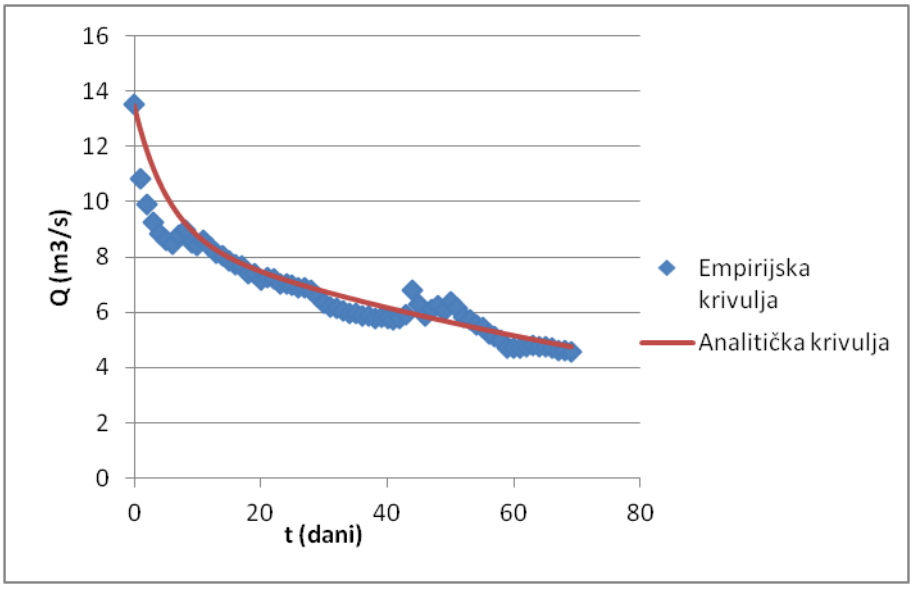
5.52 Krivulja recesije za rijeku Rudu u razdoblju od.5.6. - 5.9.2001



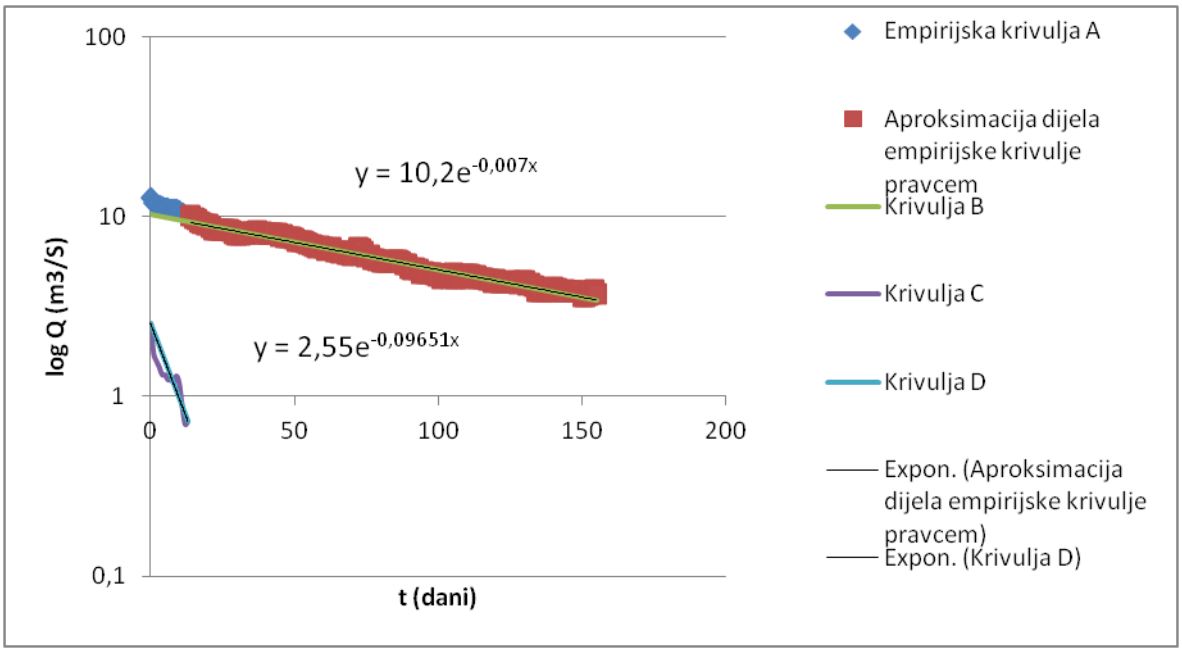
5.53. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 31.5. – 8.8.2002.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 31.5. – 8.8. 2002. godine, za rijeku Rudu glasi:

$$Q = 8{,}816 \cdot e^{-0{,}00900 \cdot t} + 4{,}674 \cdot e^{-0{,}189 \cdot t}$$



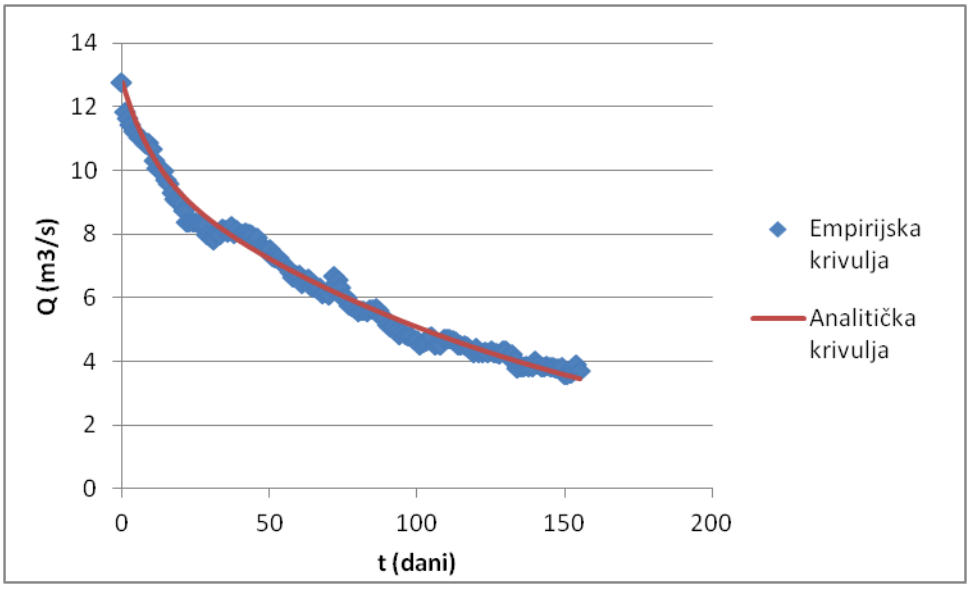
5.54. Krivulja recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 17.4. – 8.8.2002



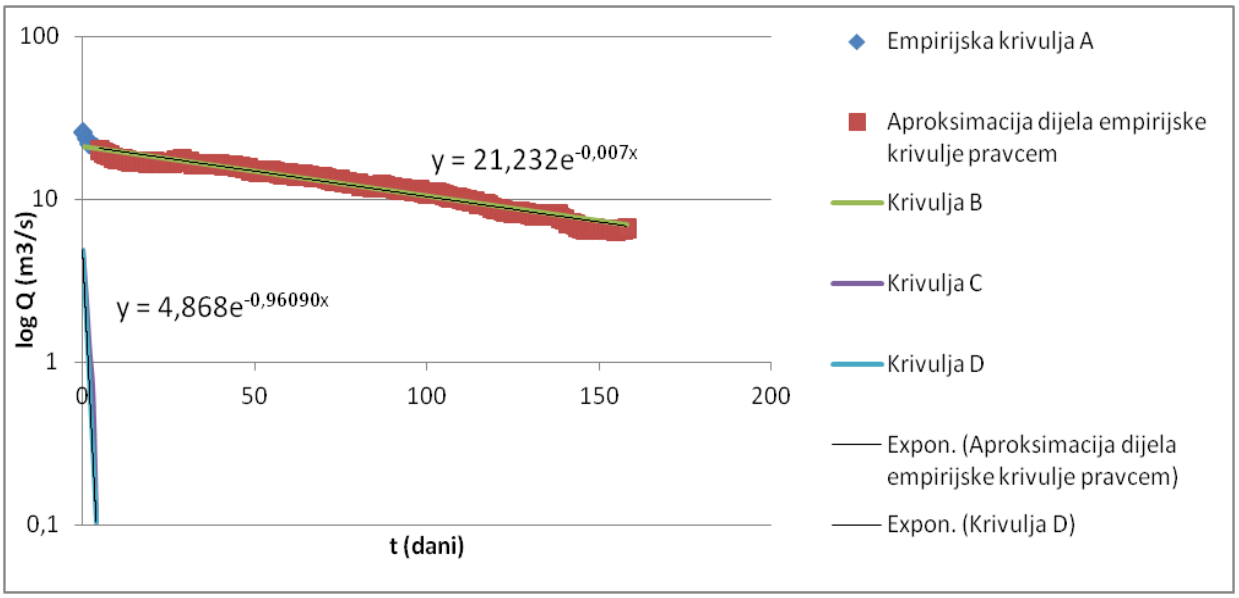
5.55. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 24.4. – 28.9.2003.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 24.4. – 28.9. 2003. godine, za rijeku Rudu glasi:

$$Q = 10{,}2 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} + 2{,}55 \cdot e^{-0{,}09651 \cdot t}$$



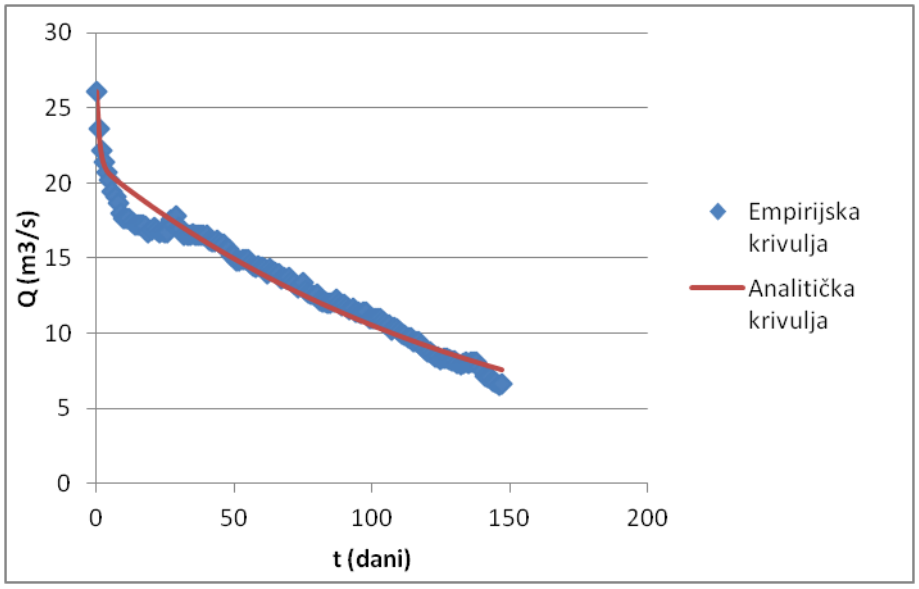
5.56. Krivulja recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 24.4. – 28.9.2003



5.57. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 9.5. - 14.10.2004.(polu-logaritamsko mjerilo)

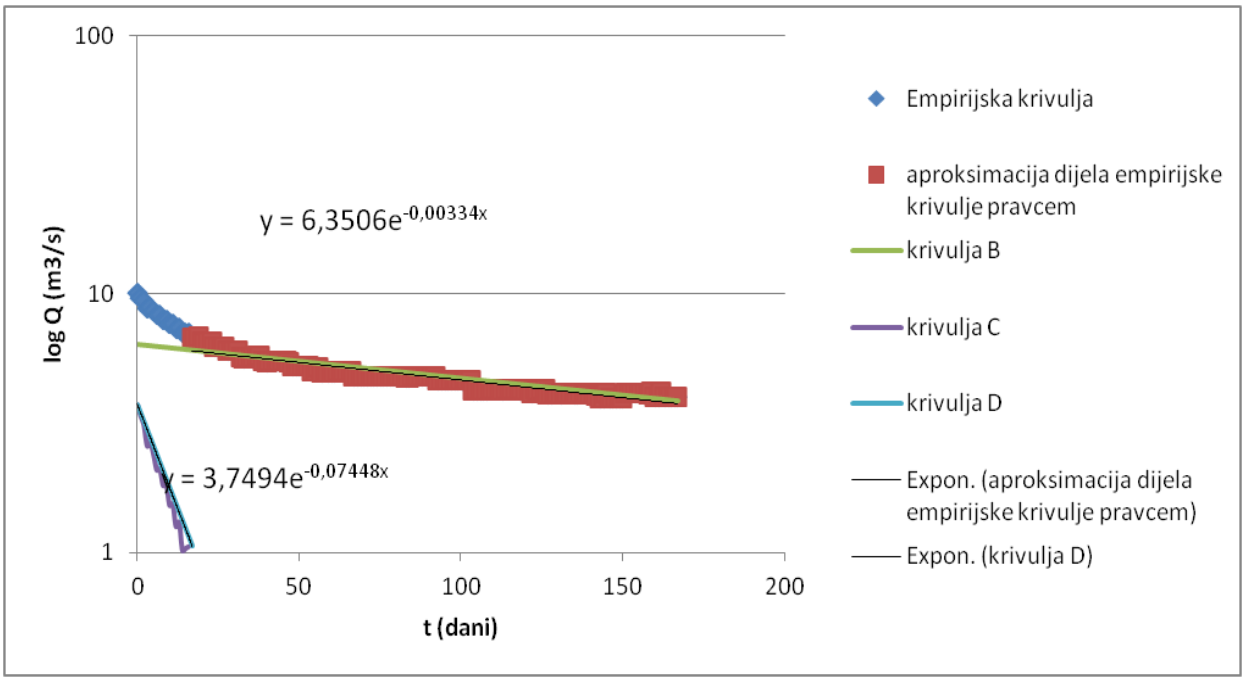
Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 9.5. – 14.10. 2004. godine, za rijeku Rudu glasi:

$$Q = 21{,}232 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} + 4{,}868 \cdot e^{-0{,}96090 \cdot t}$$



5.58 Krivulja recesije za rijeku Rudu u razdoblju od 9.5. - 14.10.2004

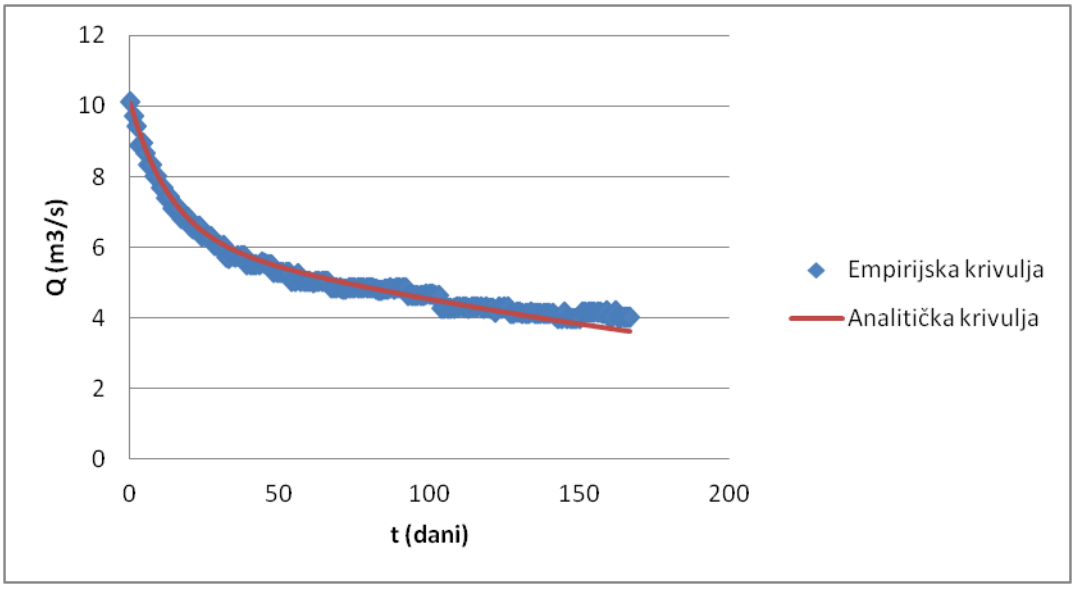
5.7.1.2 Krivulja pražnjenja rijeke Jadro



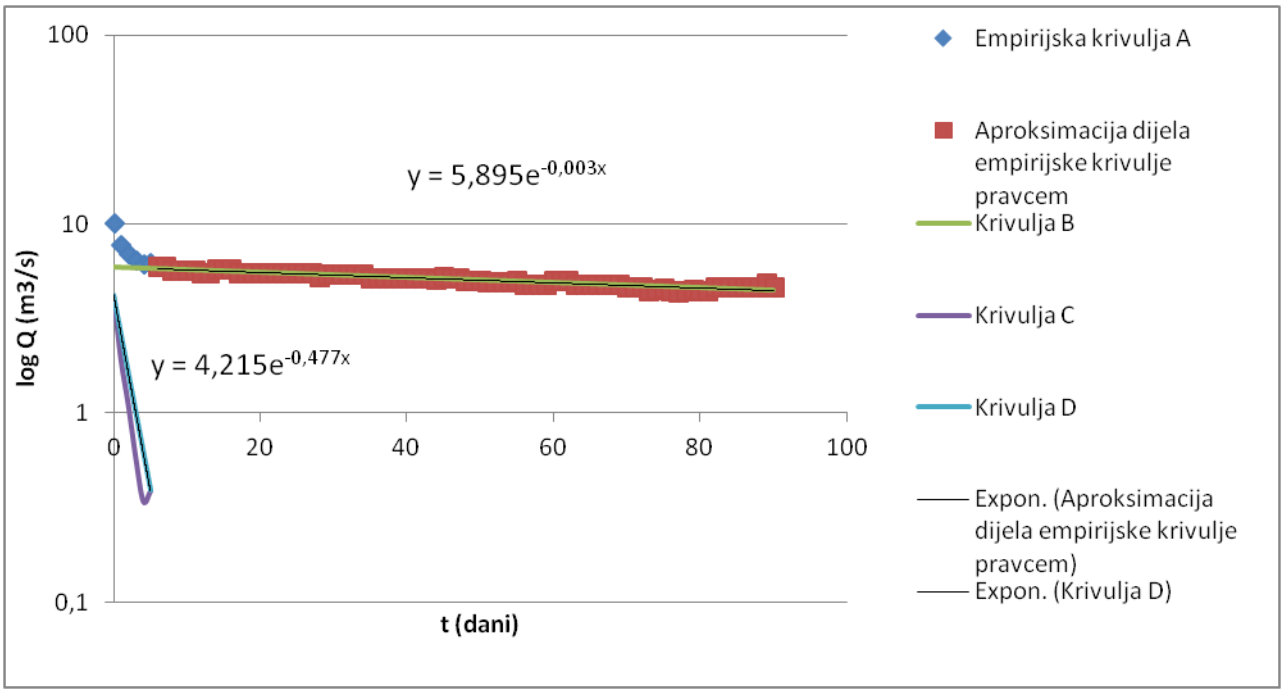
5.59. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 15.4. – 1.10.2000.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 15.4. – 1.10. 2000. godine, za rijeku Jadro glasi:

$$Q = 6{,}3506 \cdot e^{-0{,}00334 \cdot t} + 3{,}7494 \cdot e^{-0{,}07448 \cdot t}$$



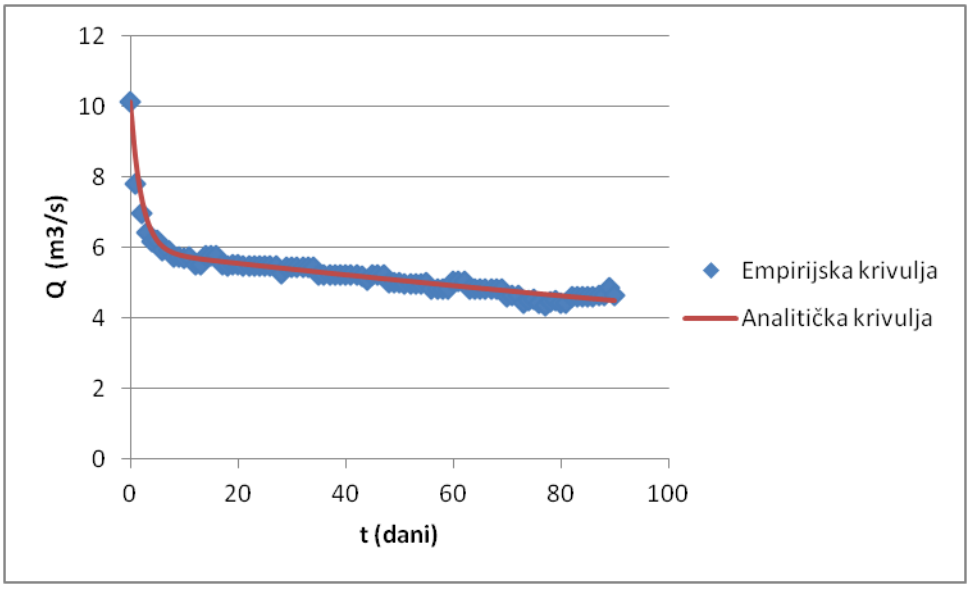
5.60. Krivulja recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 15.4. – 1.10.2000



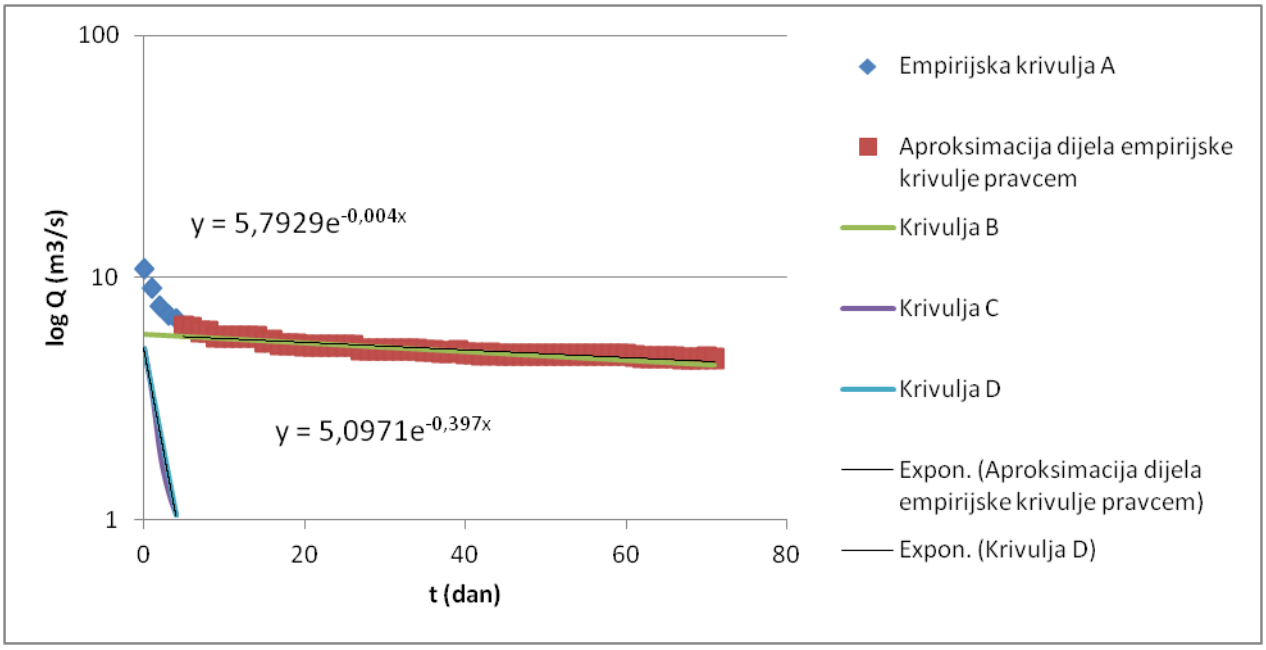
5.61. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 4. 6.– 4.9.2001.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 26.4. – 4.9. 2001. godine, za rijeku Jadro glasi:

$$Q = 5{,}895 \cdot e^{-0{,}003 \cdot t} + 4{,}215 \cdot e^{-0{,}4770 \cdot t}$$



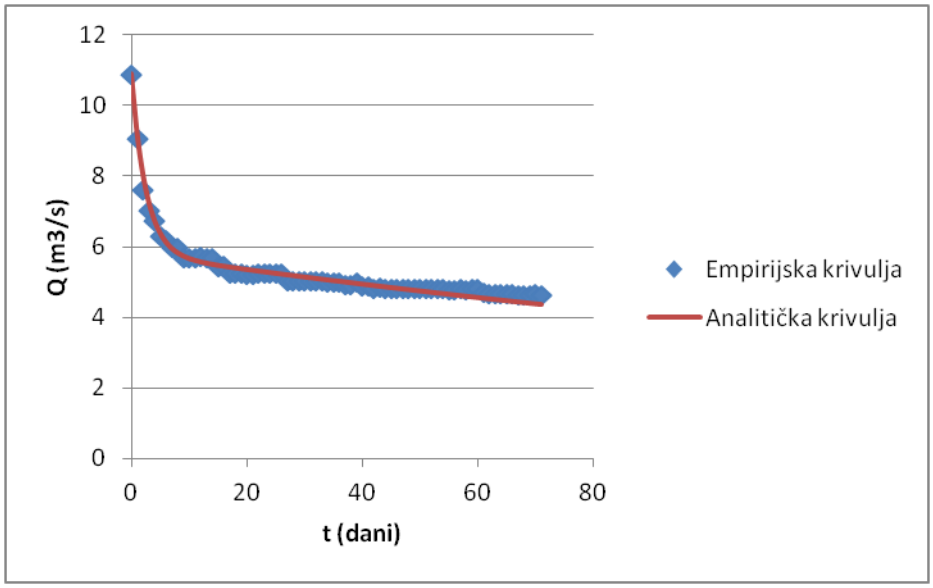
5.62. Krivulja recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 4.6. – 4.9.2001.



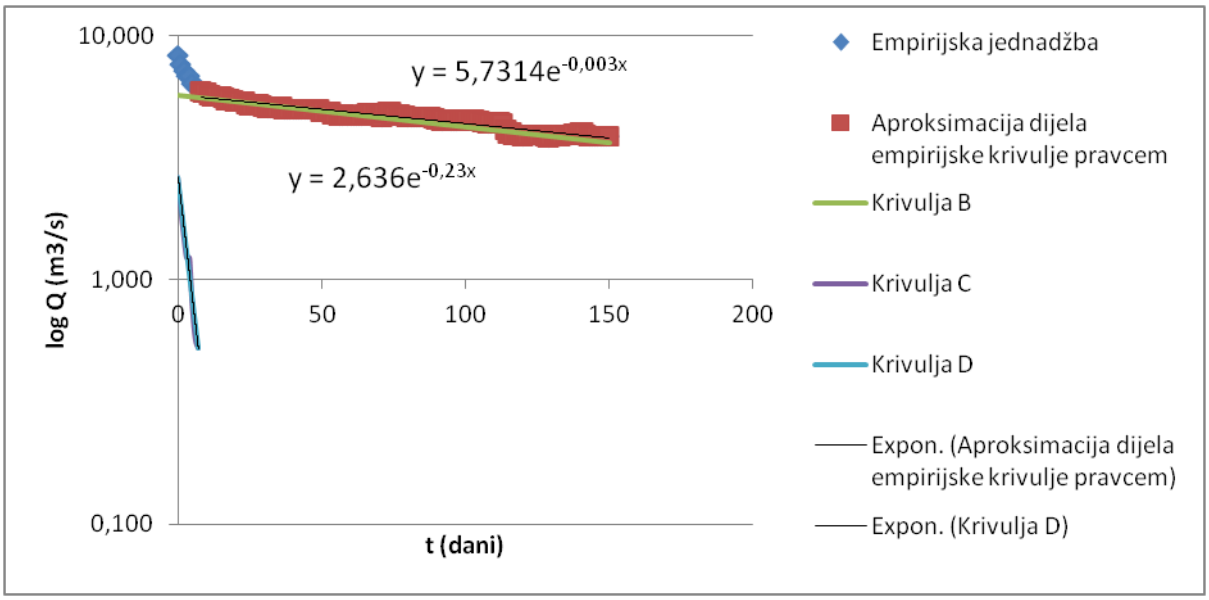
5.63. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 29.5. – 10.8.2002.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 29.5. – 10.8. 2002. godine, za rijeku Jadro glasi:

$$Q = 5{,}7929 \cdot e^{-0{,}004 \cdot t} + 5{,}0971 \cdot e^{-0{,}397 \cdot t}$$



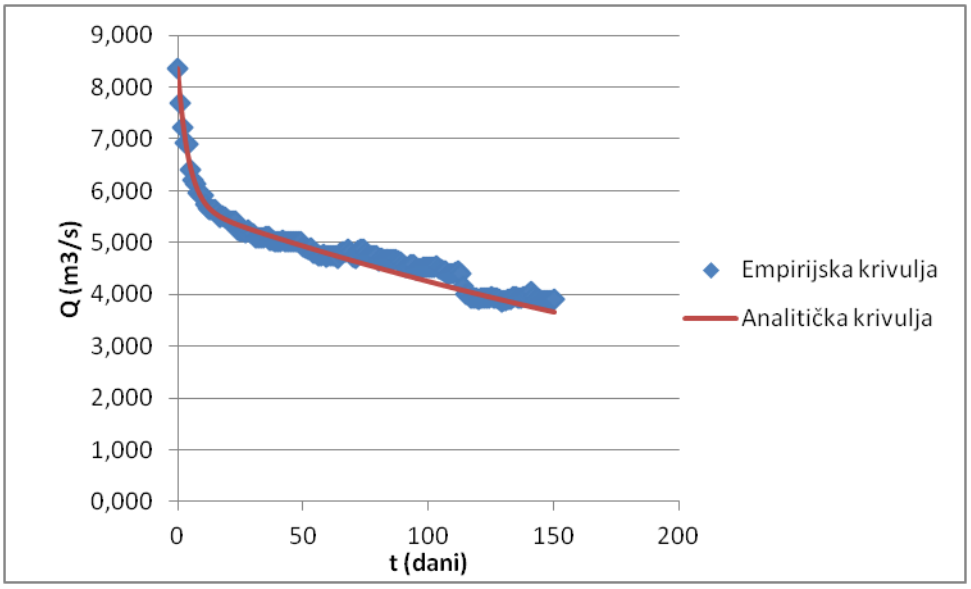
5.64 Krivulja recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 29.5. – 10.8.2002



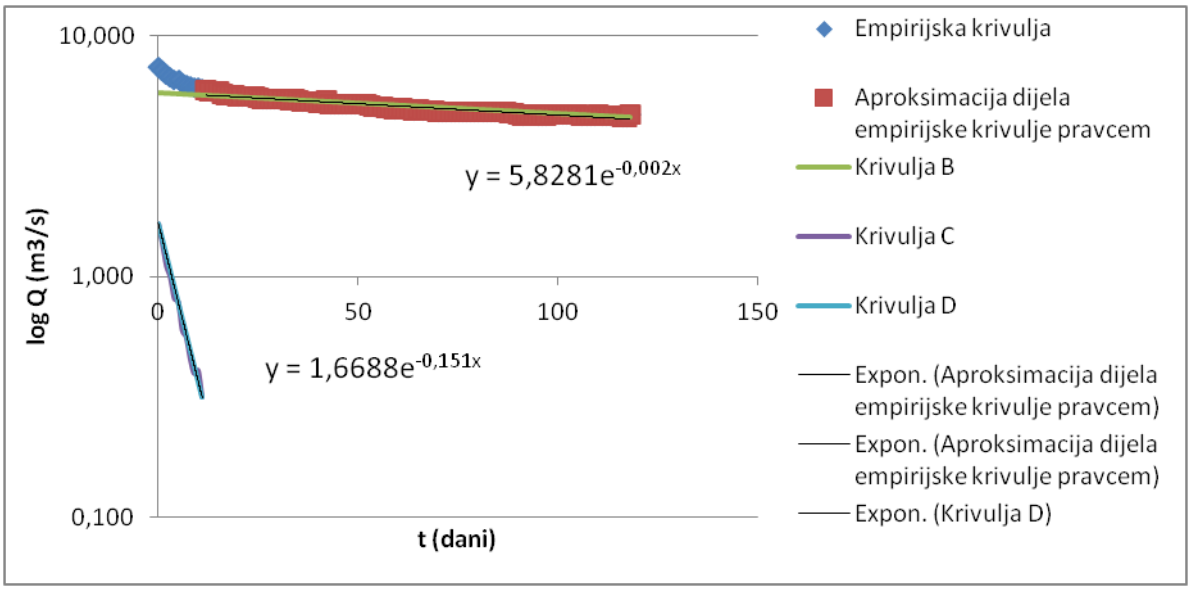
5.65. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 23.4. – 22.9.2003.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 23.4. – 22.9. 2003. godine, za rijeku Jadro glasi:

$$Q = 5{,}7314 \cdot e^{-0{,}003 \cdot t} + 3{,}6360 \cdot e^{-0{,}23 \cdot t}$$



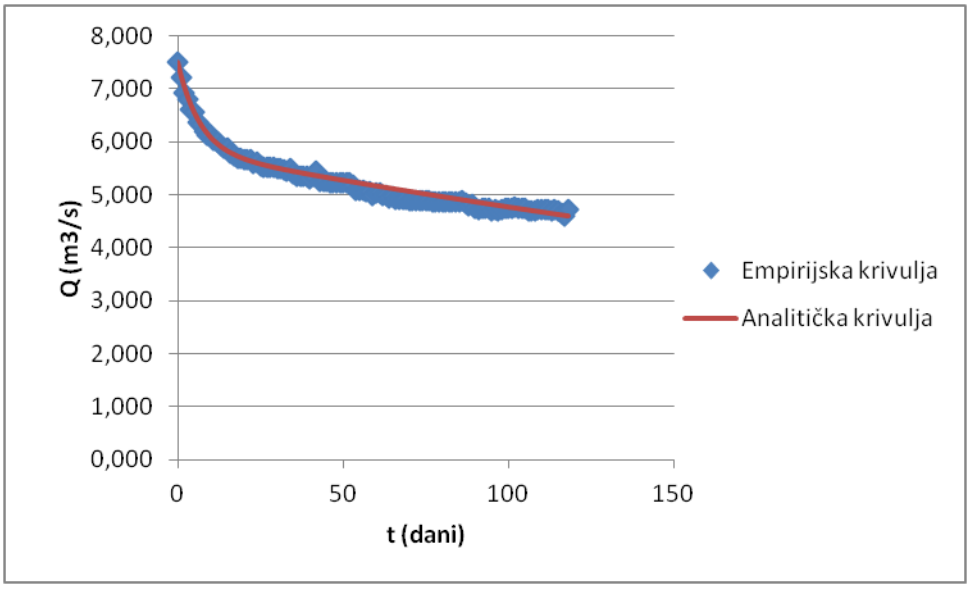
5.66 Krivulja recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 23.4. – 22.9.2003



5.67. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 15.6. – 13.10.2004.(polu-logaritamsko mjerilo)

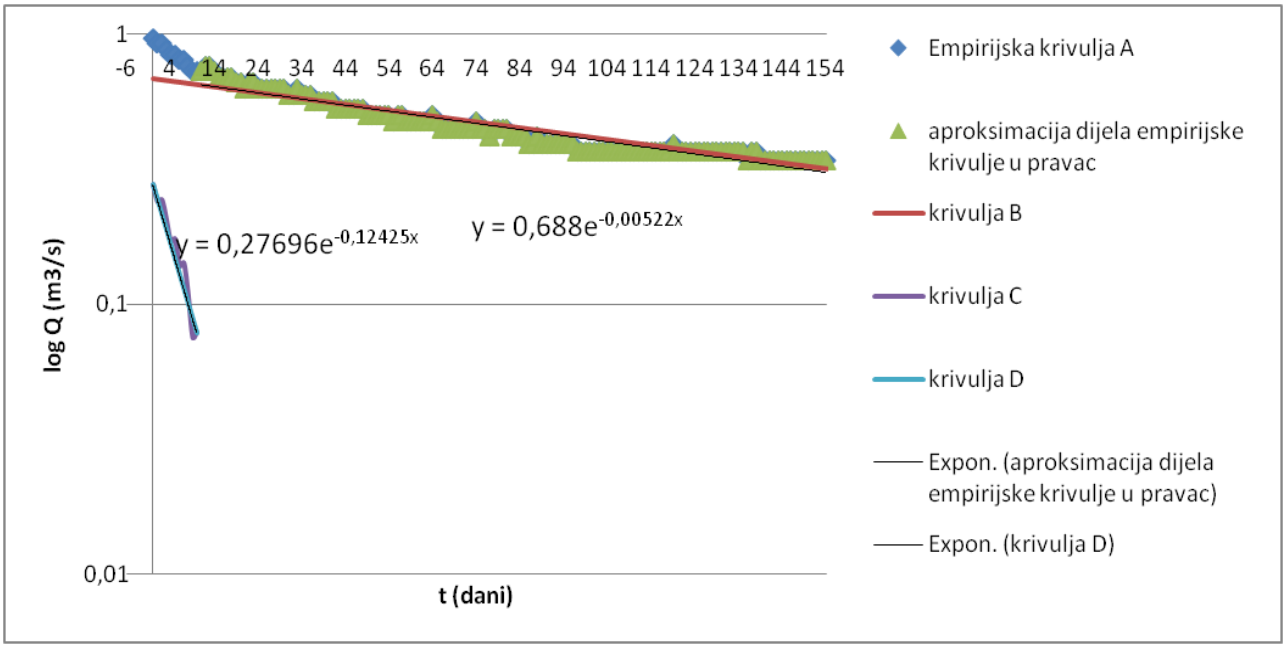
Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 15.6. – 13.10. 2004. godine, za rijeku Jadro glasi:

$$Q = 5{,}8281 \cdot e^{-0{,}002 \cdot t} + 1{,}6688 \cdot e^{-0{,}151 \cdot t}$$



5.68 Krivulja recesije za rijeku Jadro u razdoblju od 15.6. – 13.10.2004

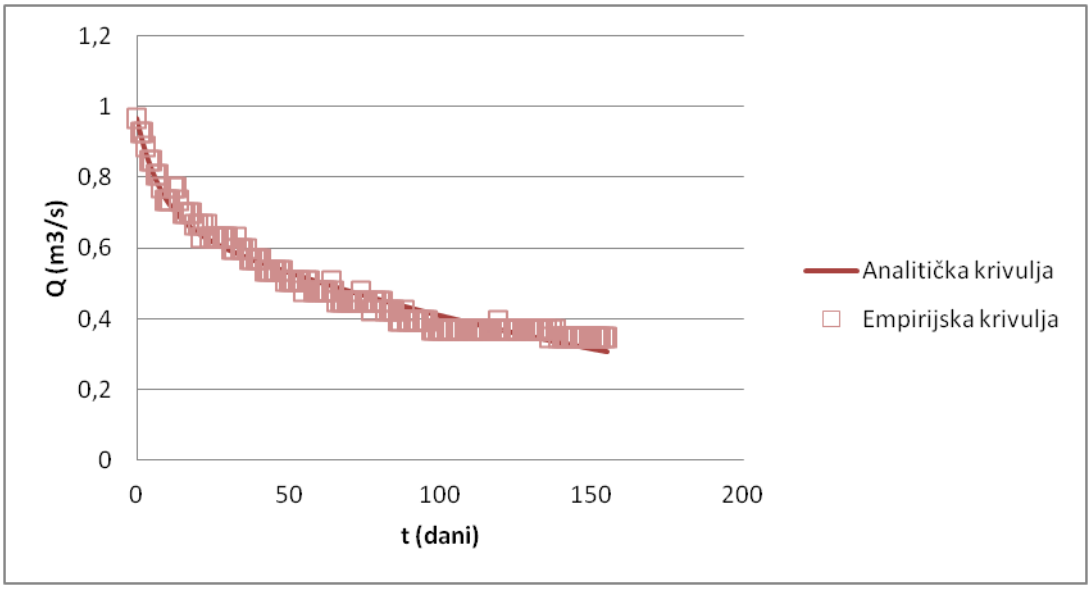
5.7.1.3 Krivulja pražnjenja rijeke Žrnovnice



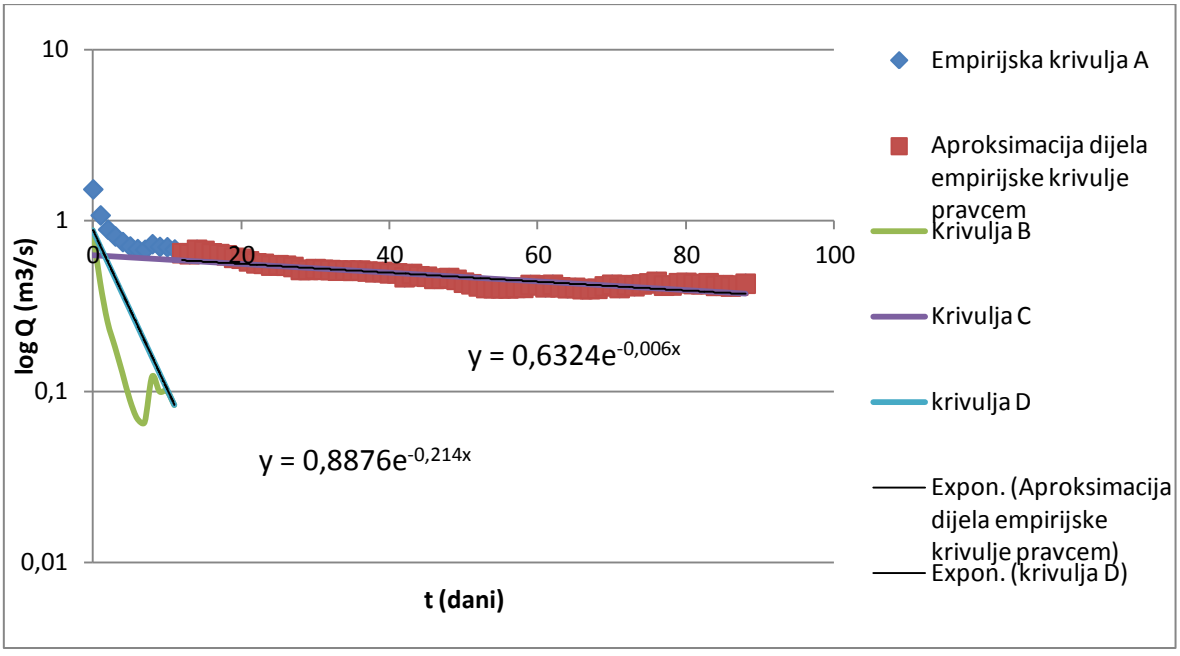
5.69. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 26.4. – 30.9.2000.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 26.4. – 30.9. 2000. godine, za rijeku Žrnovnicu glasi:

$$Q = 0{,}688 \cdot e^{-0{,}00522 \cdot t} + 0{,}27696 \cdot e^{-0{,}12425 \cdot t}$$



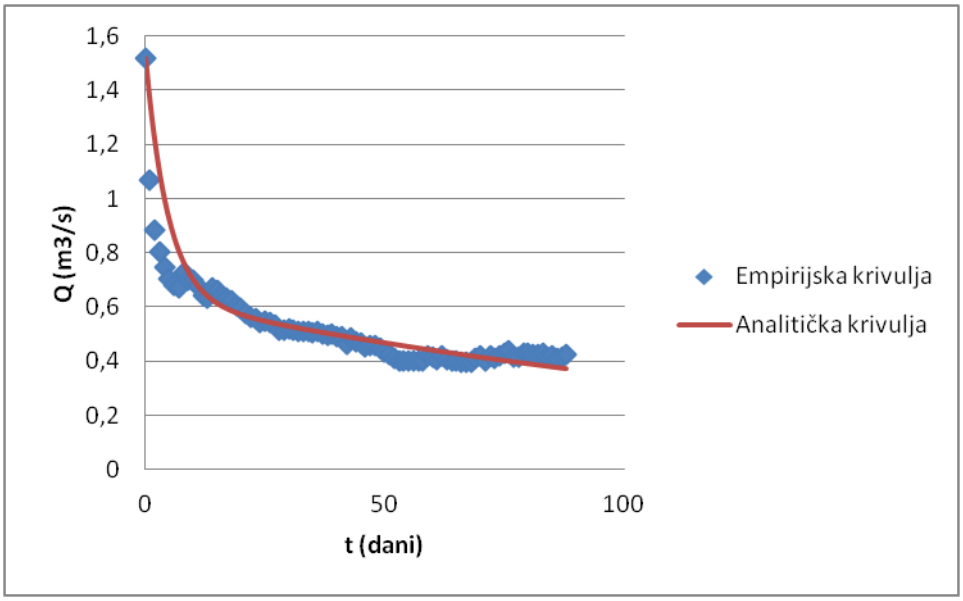
5.70. Krivulja recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 26.4. – 30.9.2000.



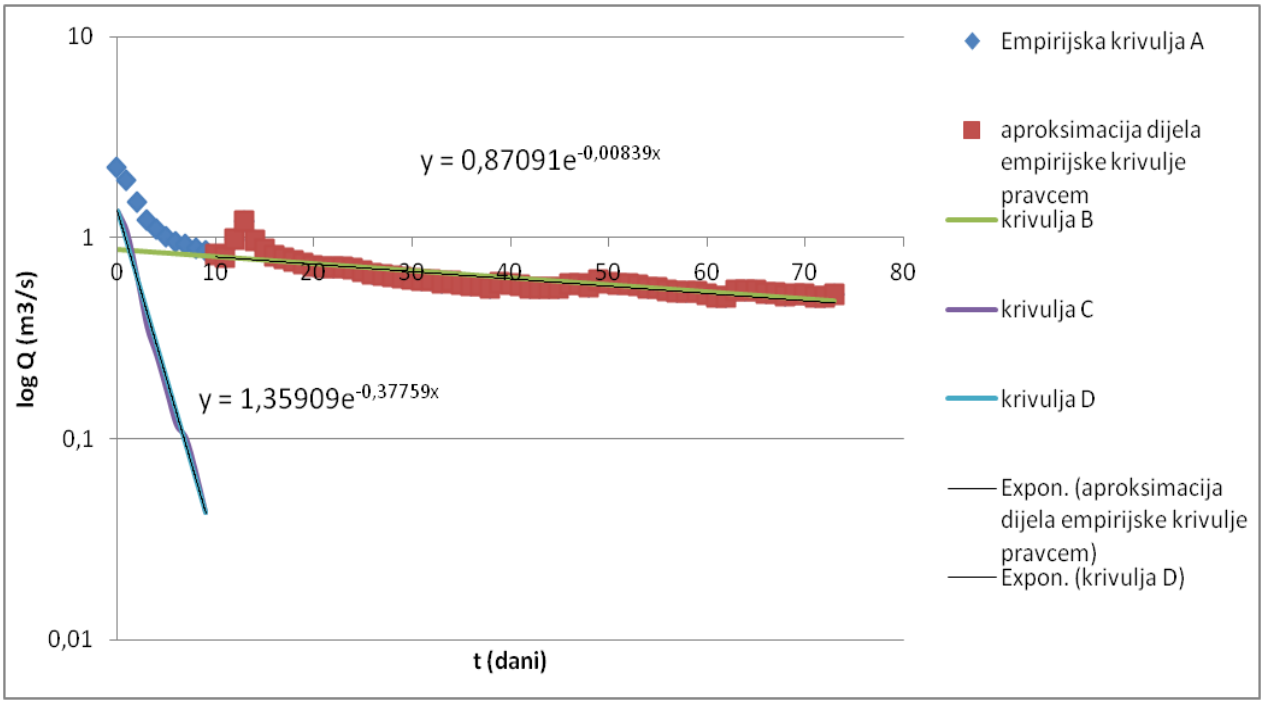
5.71. . Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 31.5. – 9.9.2001.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 31.5. – 9.9. 2001. godine, za rijeku Žrnovnicu glasi:

$$Q = 0{,}6324 \cdot e^{-0{,}00600 \cdot t} + 0{,}8876 \cdot e^{-0{,}214 \cdot t}$$



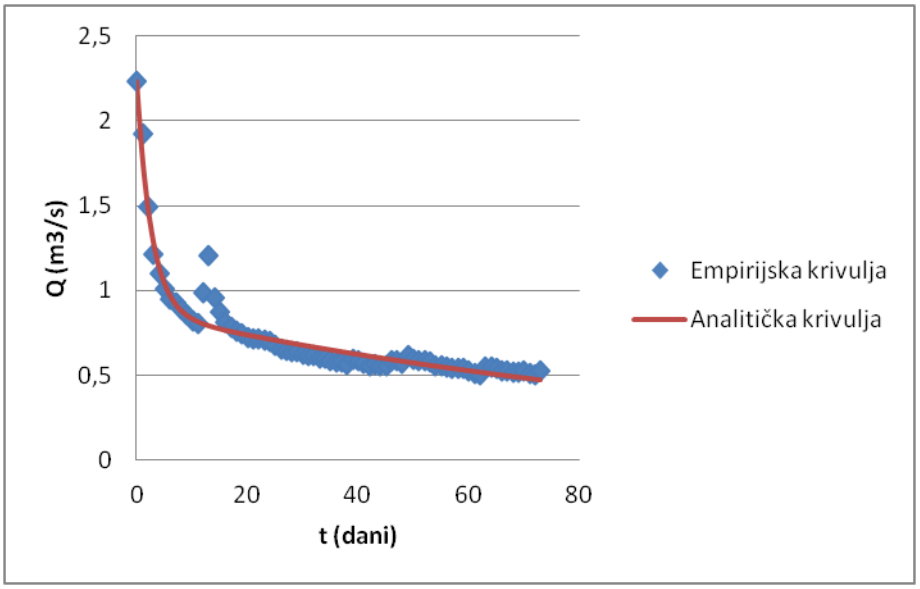
5.72 Krivulja recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od .4. – 9.9.2001



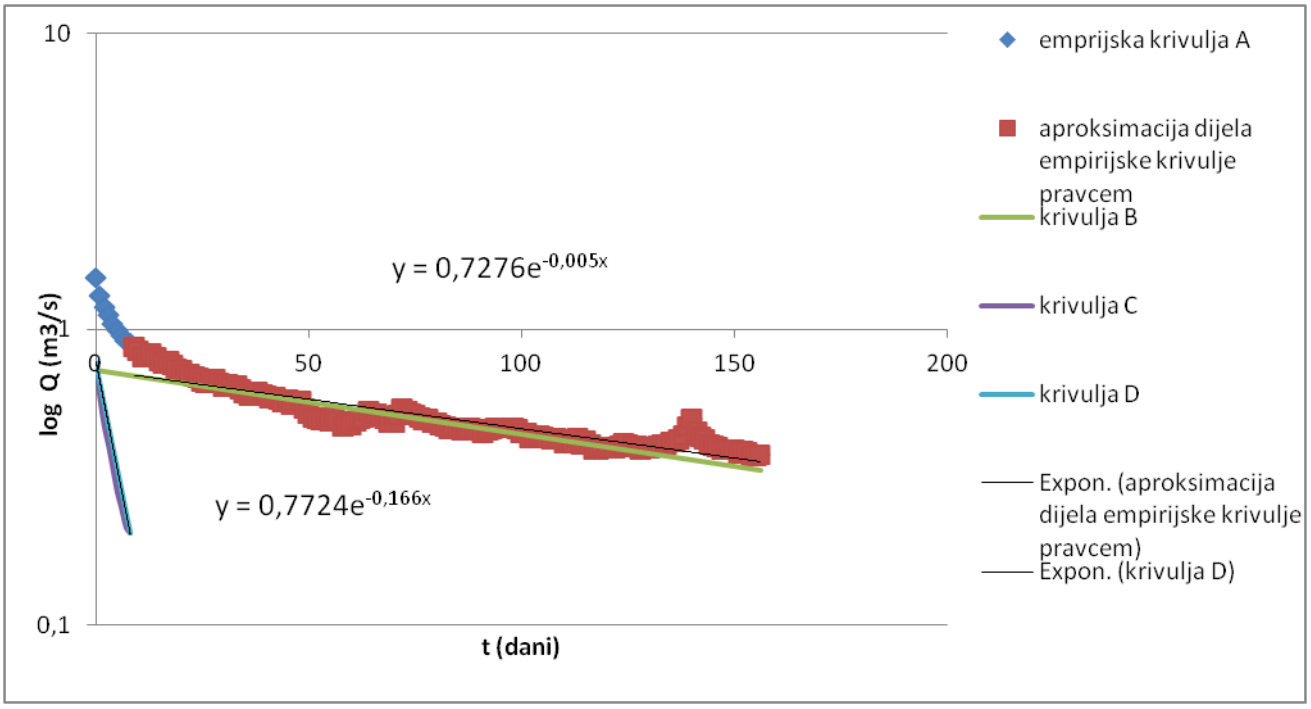
5.73. . Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 29.5. – 10.8.2002.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 29.5. – 10.8. 2002. godine, za rijeku Žrnovnicu glasi:

$$Q = 0{,}87091 \cdot e^{-0{,}00839 \cdot t} + 1{,}35909 \cdot e^{-0{,}37759 \cdot t}$$



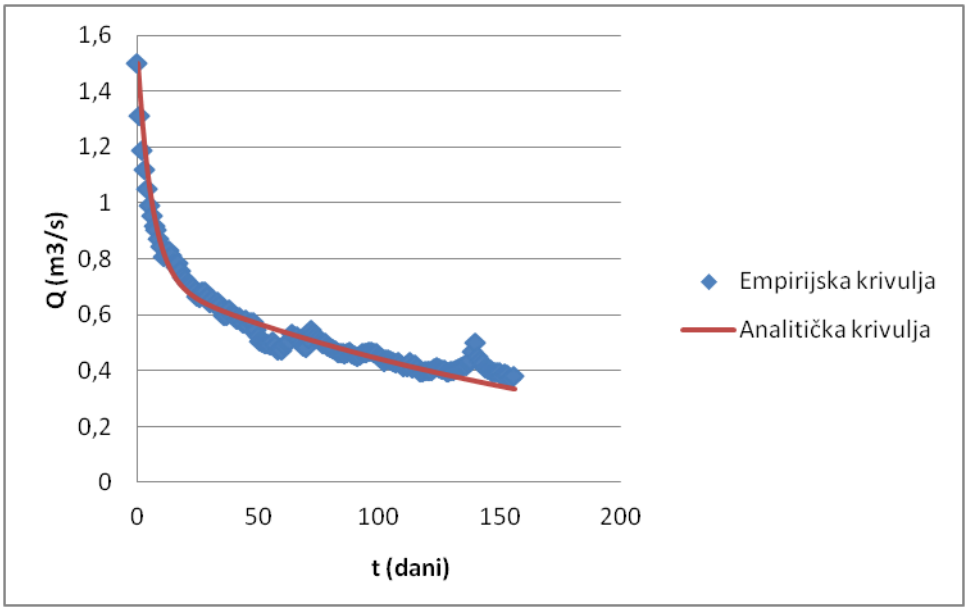
5.74 Krivulja recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 29.5. – 10.8.2002



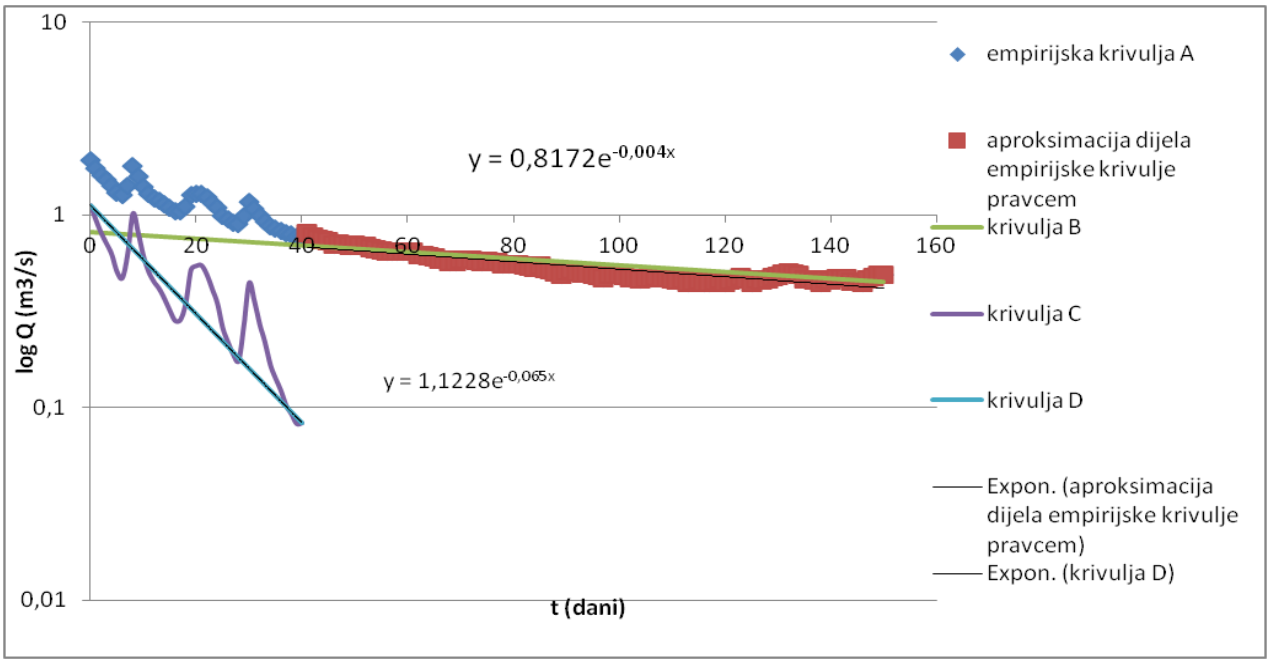
5.75. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 29.5. – 27.9.2003.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 29.5. – 27.9. 2003. godine, za rijeku Žrnovnicu glasi:

$$Q = 0{,}7276 \cdot e^{-0{,}005 \cdot t} + 0{,}7724 \cdot e^{-0{,}166 \cdot t}$$



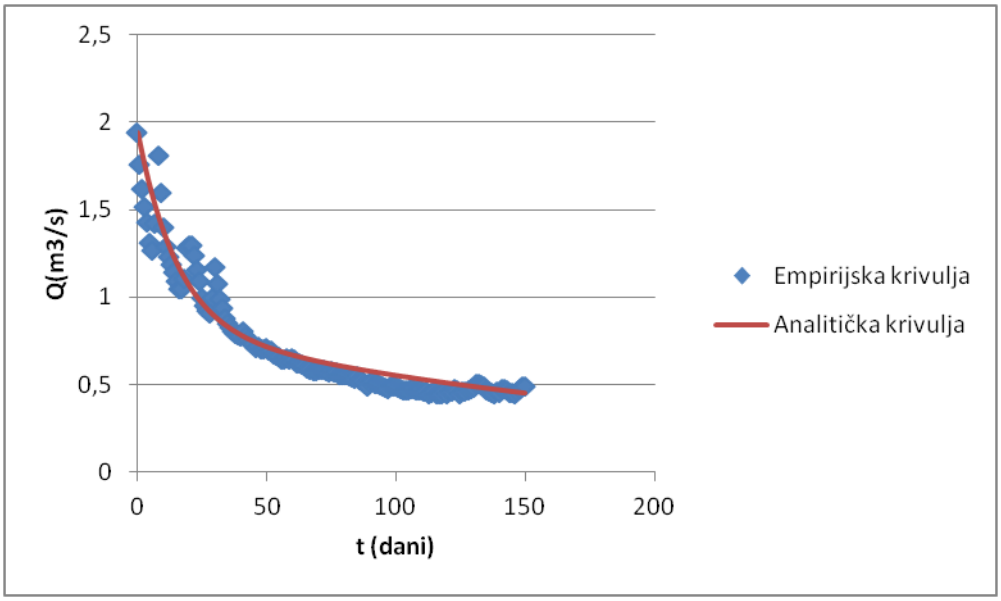
5.76 Krivulja recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 29.5. – 27.9.2003



5.77. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 8.5. – 13.10.2004.(polu-logaritamsko mjerilo)

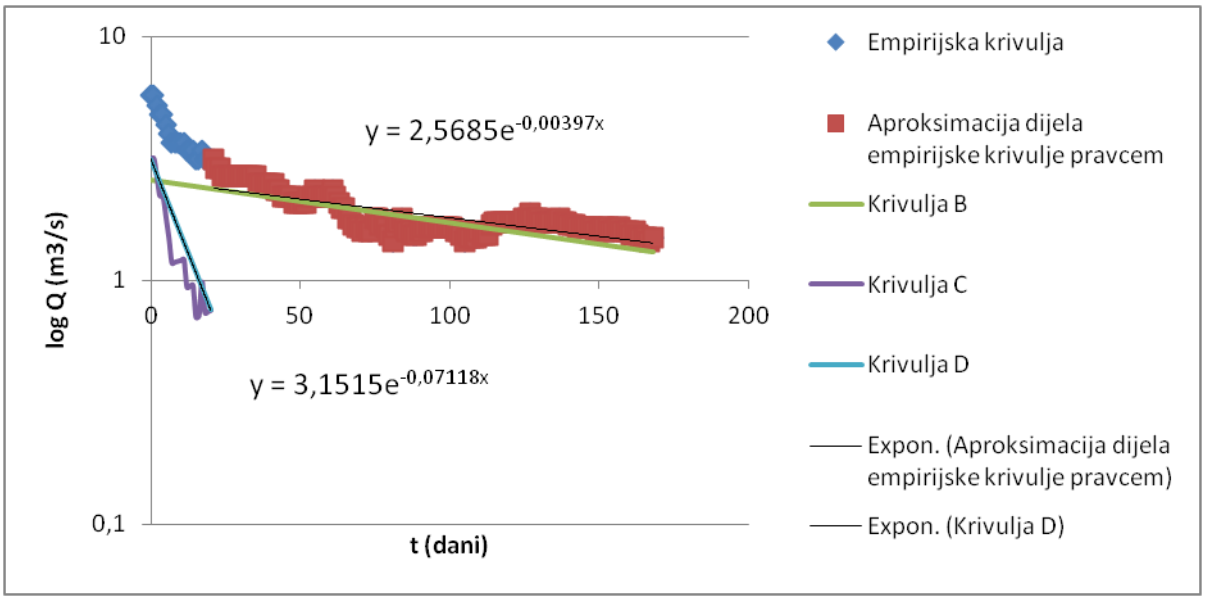
Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 8.5. – 13.10. 2004. godine, za rijeku Žrnovnicu glasi:

$$Q = 0{,}8172 \cdot e^{-0{,}004 \cdot t} + 1{,}1228 \cdot e^{-0{,}0065 \cdot t}$$



5.78. Krivulja recesije za rijeku Žrnovnicu u razdoblju od 8.5. – 13.10.2004

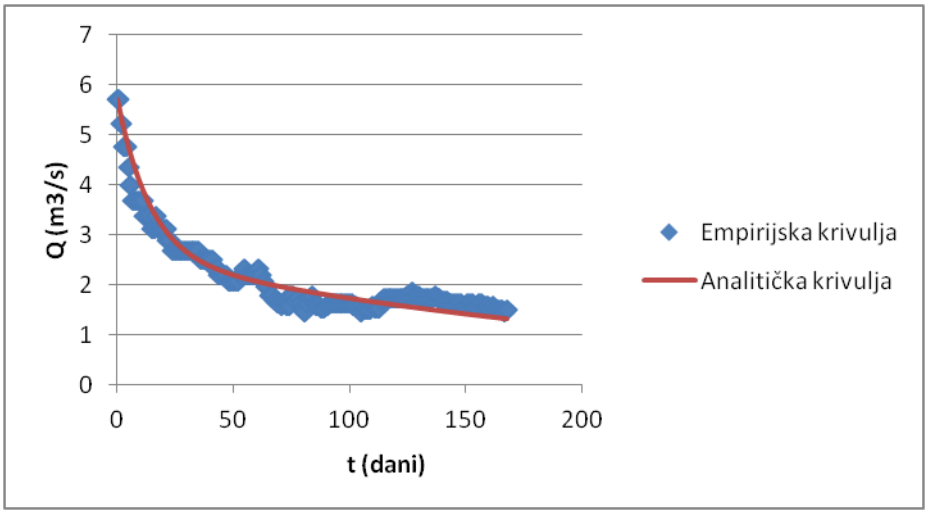
5.7.1.4 Krivulja pražnjenja rijeke Vrljike



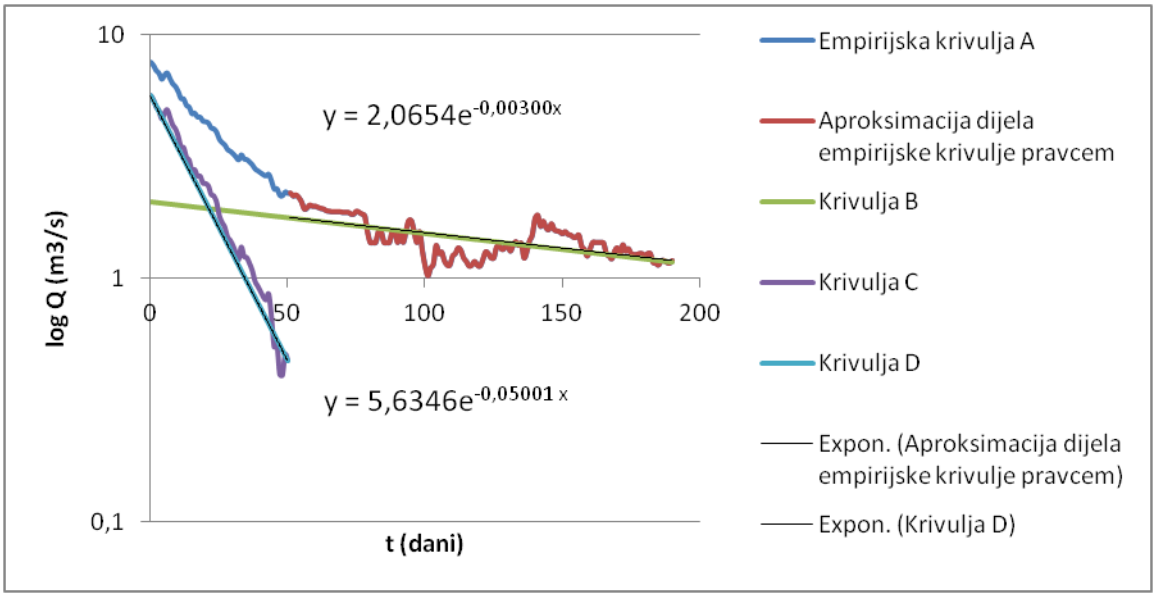
5.79. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 15.4. – 2.10.2000.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 15.4. – 2.10. 2000. godine, za rijeku Vrljiku glasi:

$$Q = 2{,}55638 \cdot e^{-0{,}00397 \cdot t} + 3{,}1515 \cdot e^{-0{,}07118 \cdot t}$$



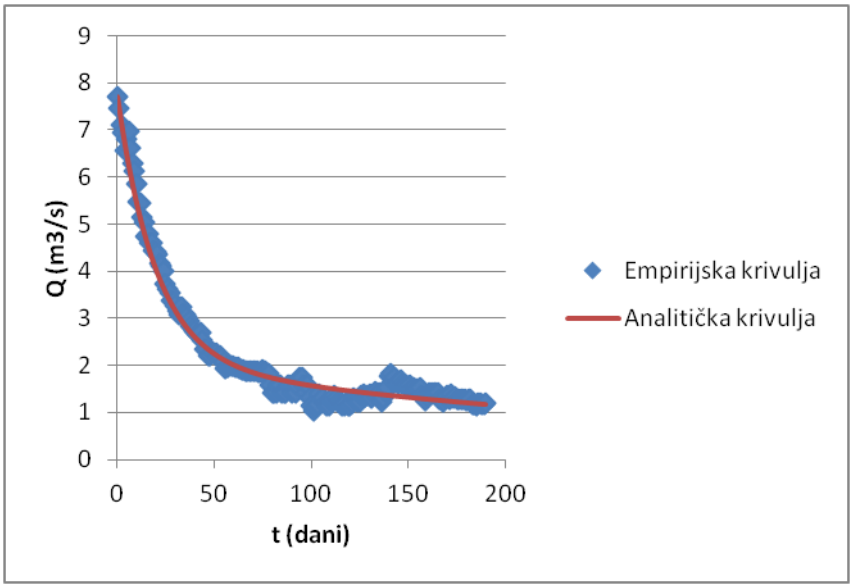
5.80. Krivulja recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 15.4. – 2.10.2000



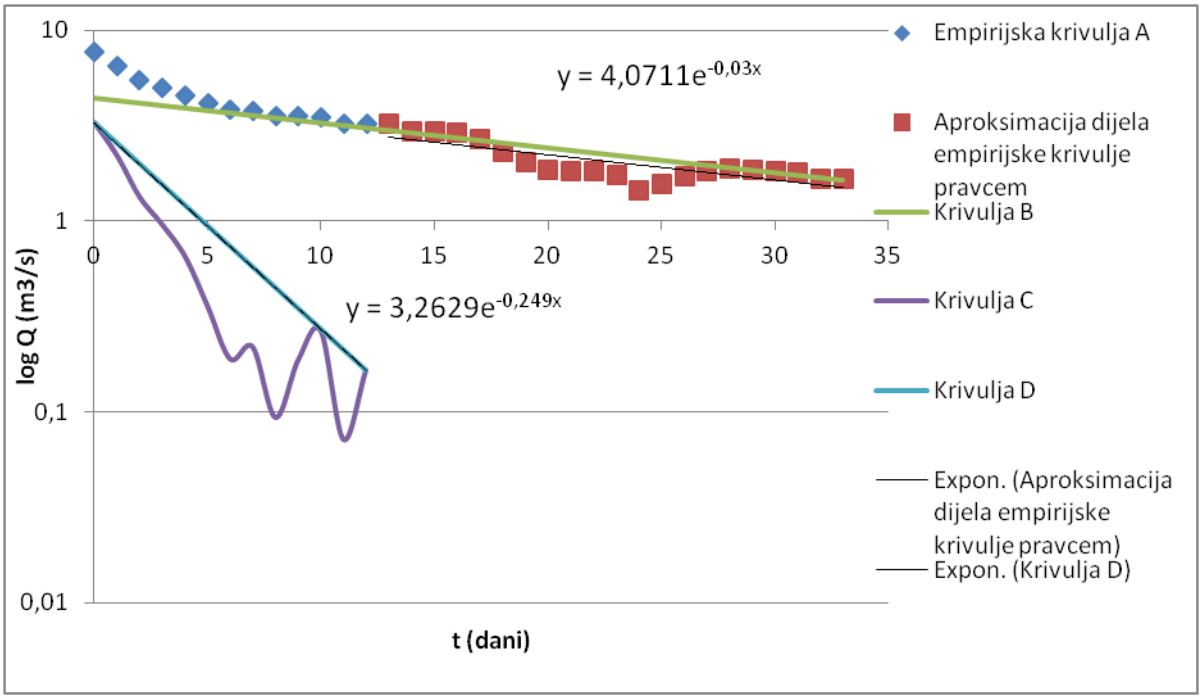
5.81 Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 2.5. – 10.11.2001.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 2.5. – 10.11. 2001. godine, za rijeku Vrljiku glasi:

$$Q = 2{,}06540 \cdot e^{-0{,}00300 \cdot t} + 5{,}6346 \cdot e^{-0{,}05001 \cdot t}$$



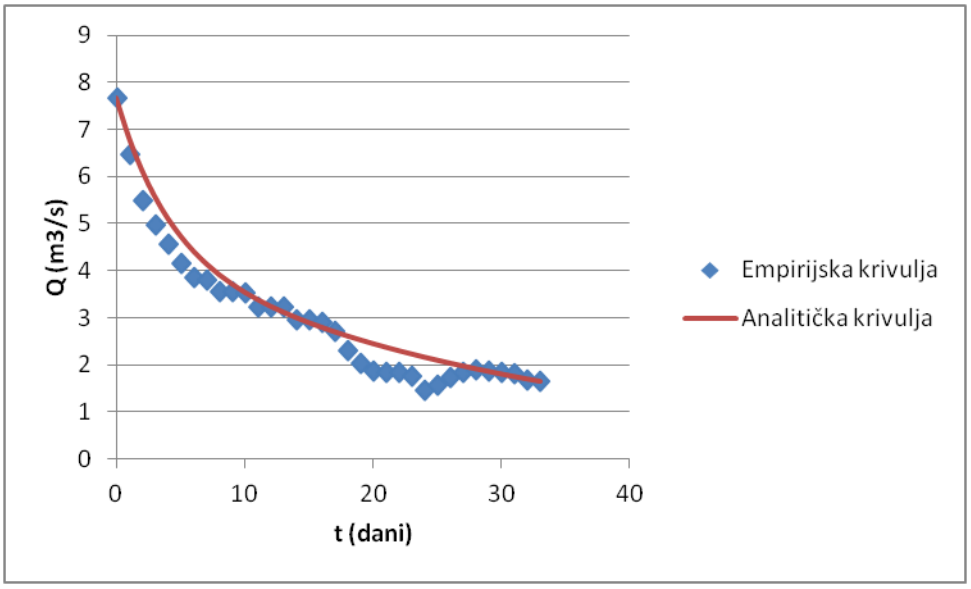
5.82. Krivulja recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 2.5. – 10.11.2001



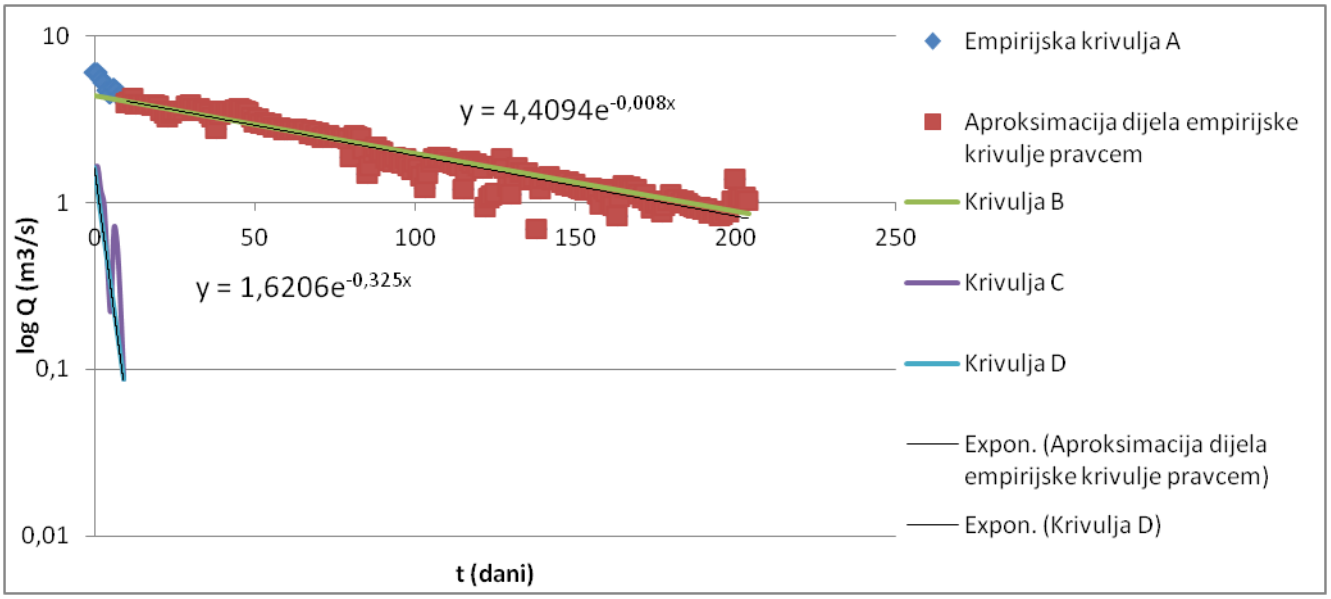
5.83 Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 31.5.. – 3.7.2002.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 31.5. – 3.7. 2002. godine, za rijeku Vrljiku glasi:

$$Q = 4{,}0711 \cdot e^{-0{,}03 \cdot t} + 3{,}2629 \cdot e^{-0{,}249 \cdot t}$$



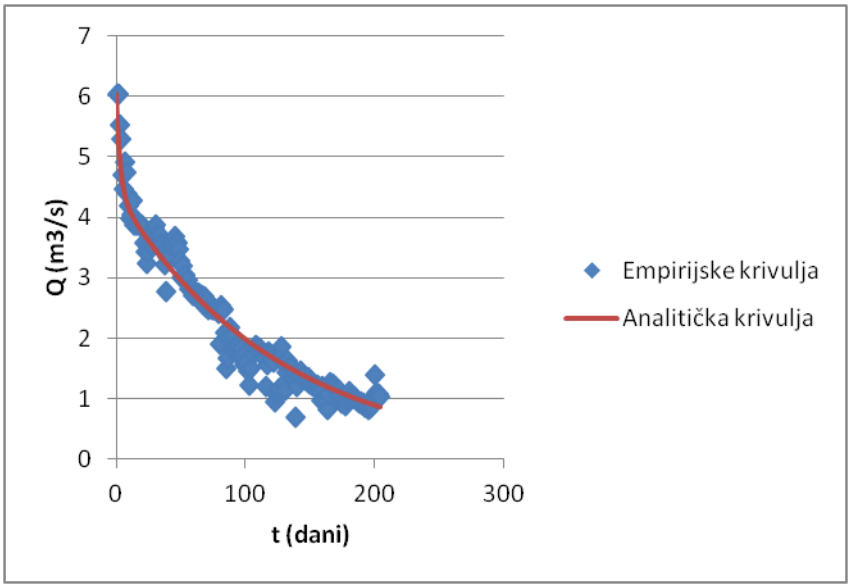
5.84. Krivulja recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 31.5.. – 3.7.2002.



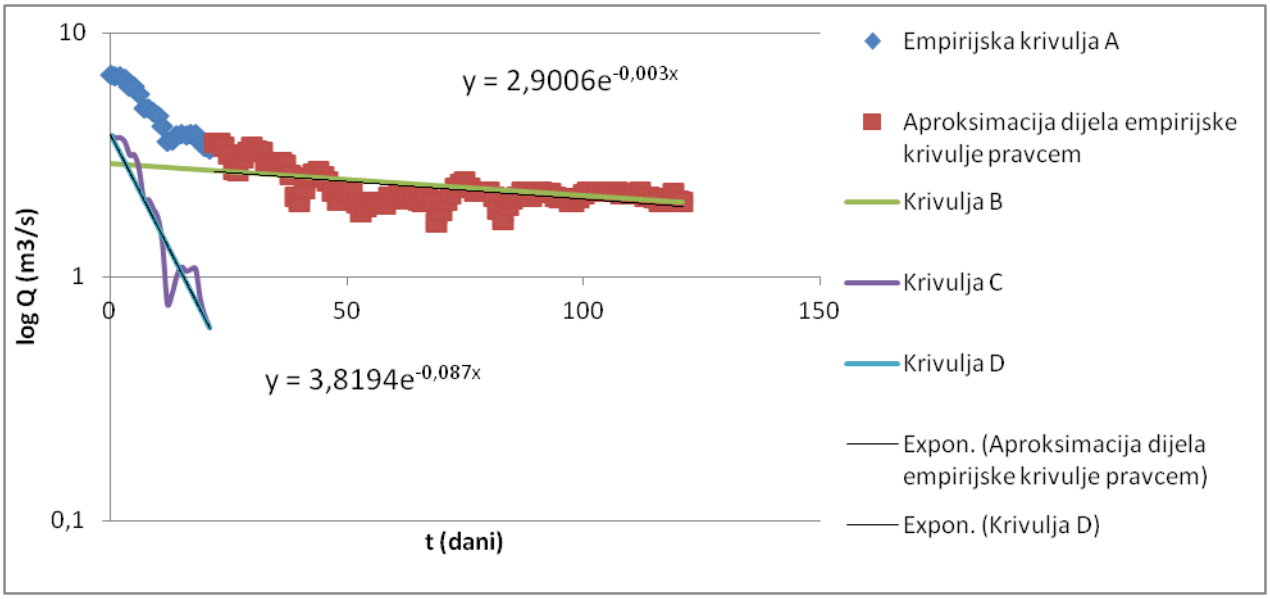
5.85. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 14.3. – 21.10.2003.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 14.3 – 4.10. 2003. godine, za rijeku Vrljiku glasi:

$$Q = 4{,}4094e^{-0{,}00800 \cdot t} + 1{,}6206 \cdot e^{-0{,}325 \cdot t}$$



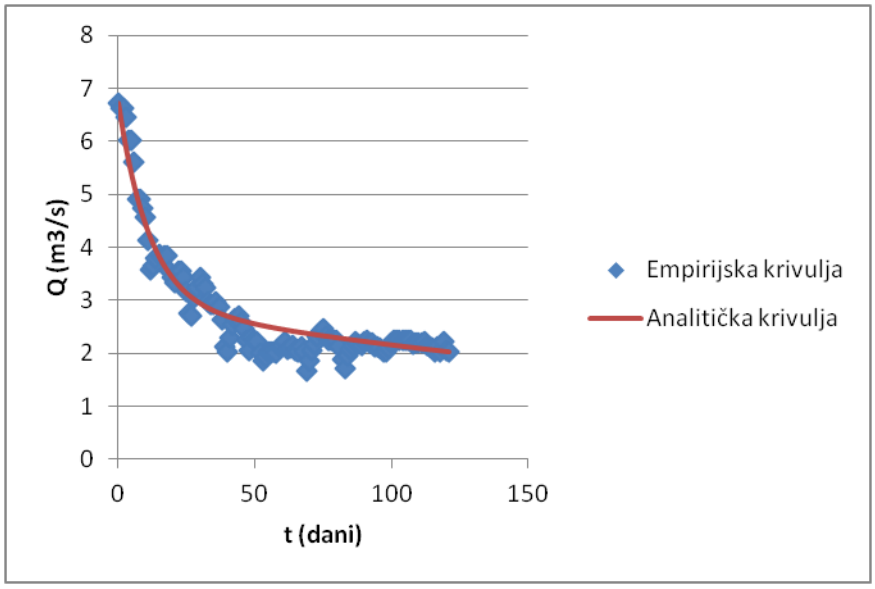
5.86. Krivulja recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 14.3. – 21.10.2003



5.87. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 14.6. – 15.10.2004.(polu-logaritamsko mjerilo)

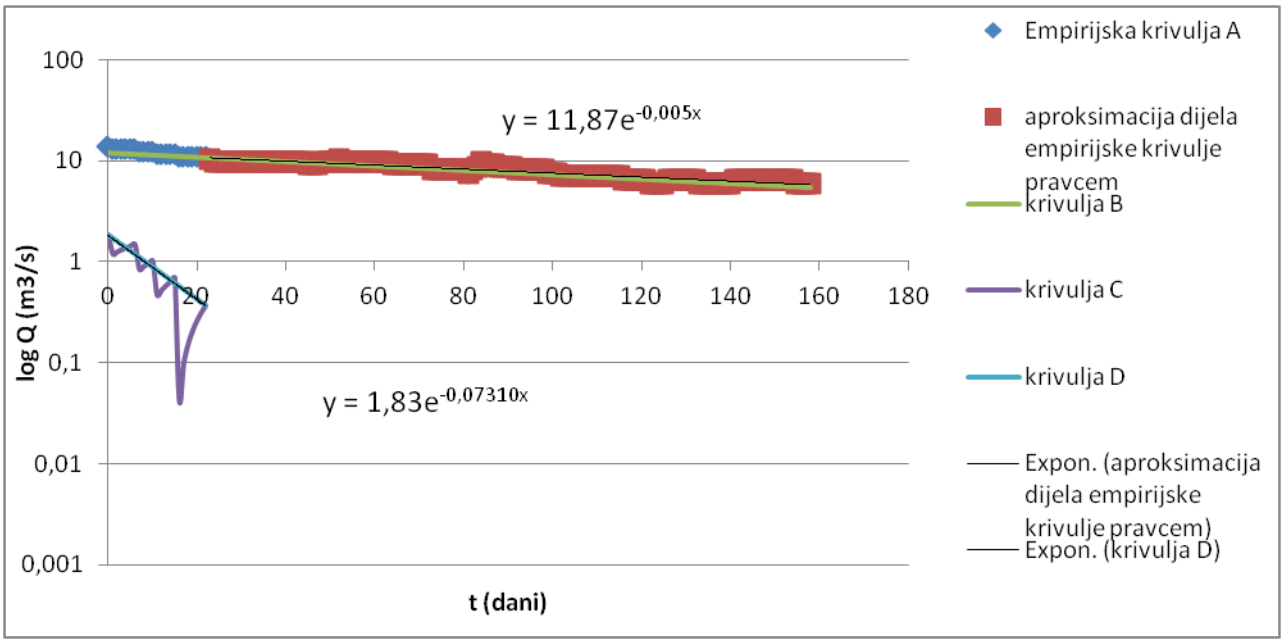
Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 14.6. – 15.10. 2004. godine, za rijeku Vrljiku glasi:

$$Q = 2{,}9006 \cdot e^{-0{,}003 \cdot t} + 3{,}8194 \cdot e^{-0{,}087 \cdot t}$$



5.88. Krivulja recesije za rijeku Vrljiku u razdoblju od 14.6. – 15.10.2004

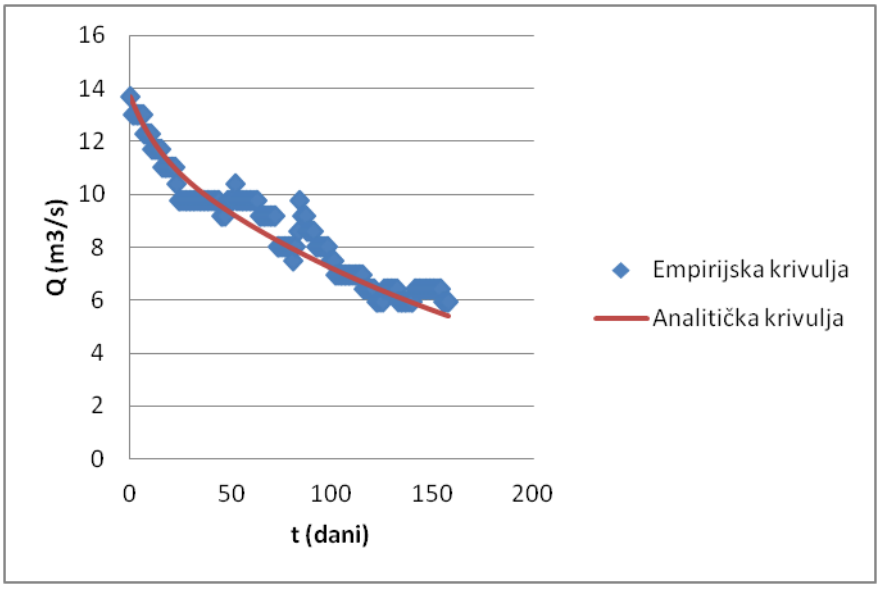
5.7.1.5 Krivulja pražnjenja rijeke Omble



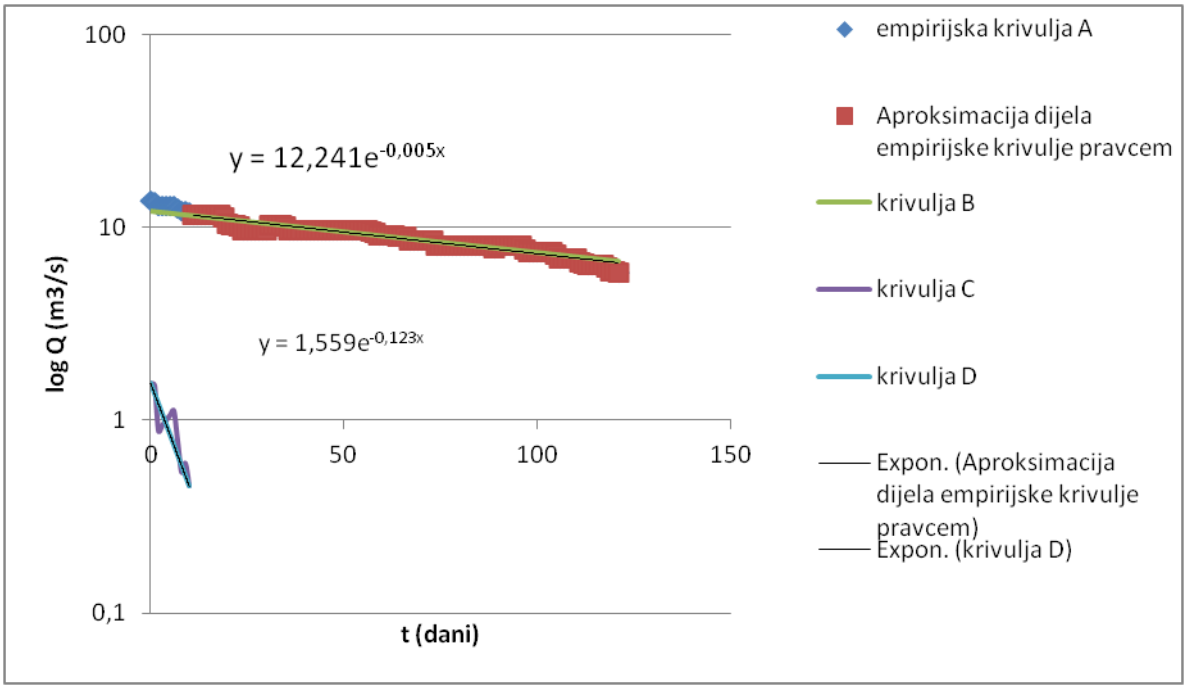
5.89. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 17.4. – 1.10.2000.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 17.4 – 1.10. 2000. godine, za rijeku Omblu glasi:

$$Q = 11{,}8700 \cdot e^{-0{,}00500 \cdot t} + 1{,}8300 \cdot e^{-0{,}07310 \cdot t}$$



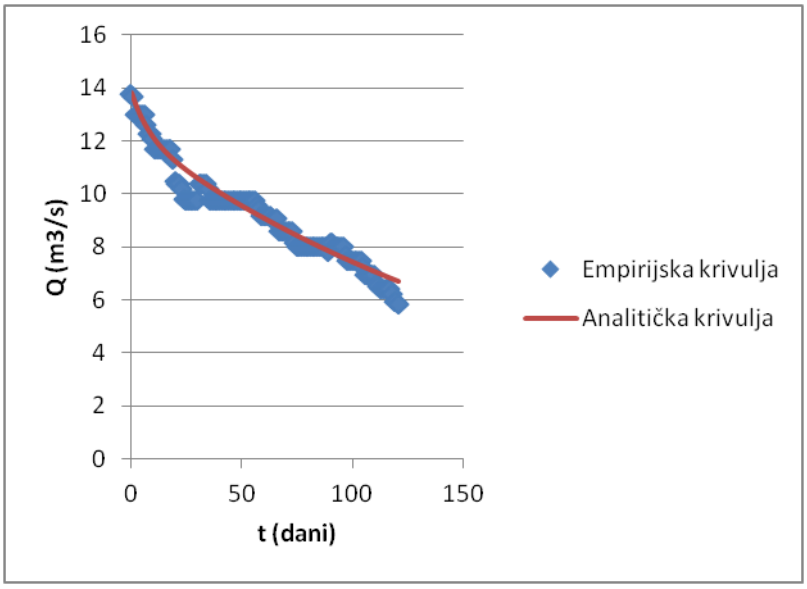
5.90. Krivulja recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 17.4. – 1.10.2000



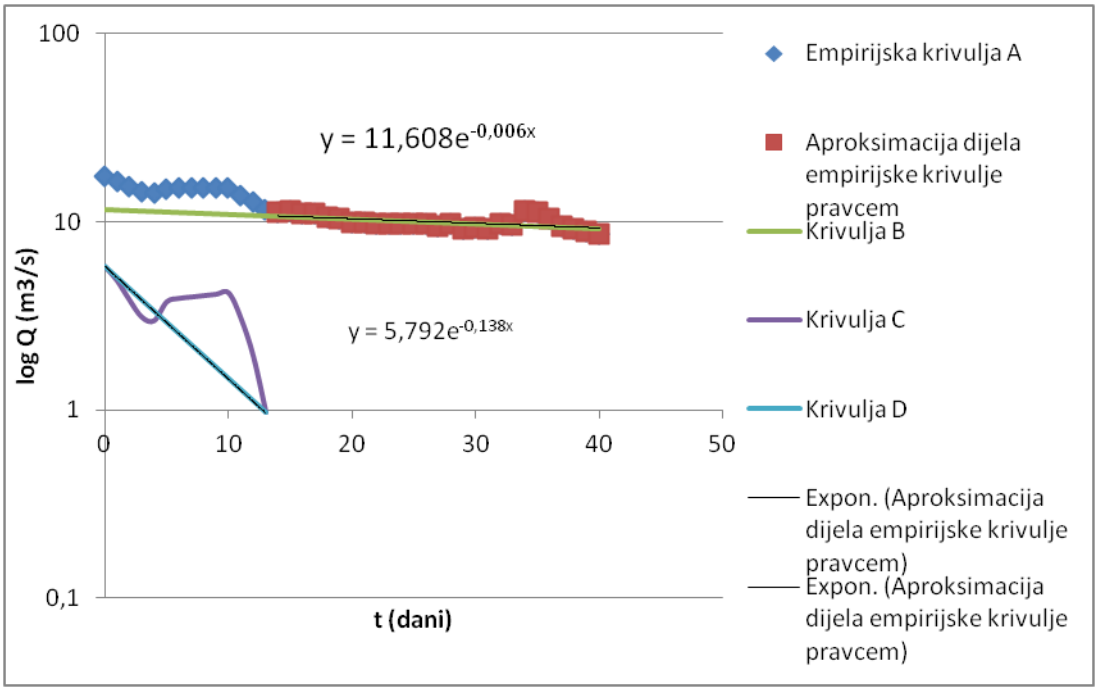
5.91 Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 13.5. – 11.9.2001.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 13.5 – 11. 9.2001. godine, za rijeku Omblu glasi:

$$Q = 12{,}241 \cdot e^{-0{,}00500 \cdot t} + 1{,}559 \cdot e^{-0{,}123 \cdot t}$$



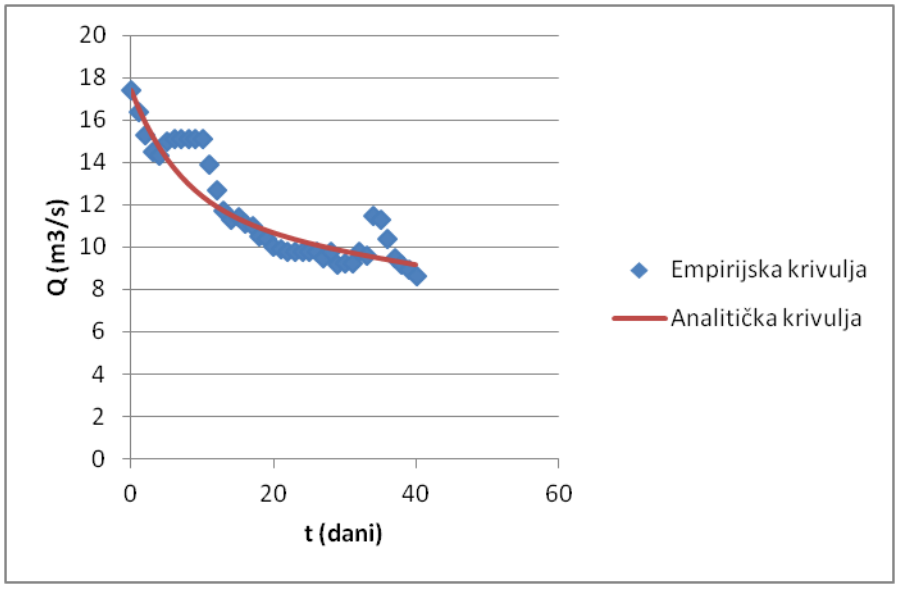
5.92. .Krivulja recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 13.5. –11.9.2001



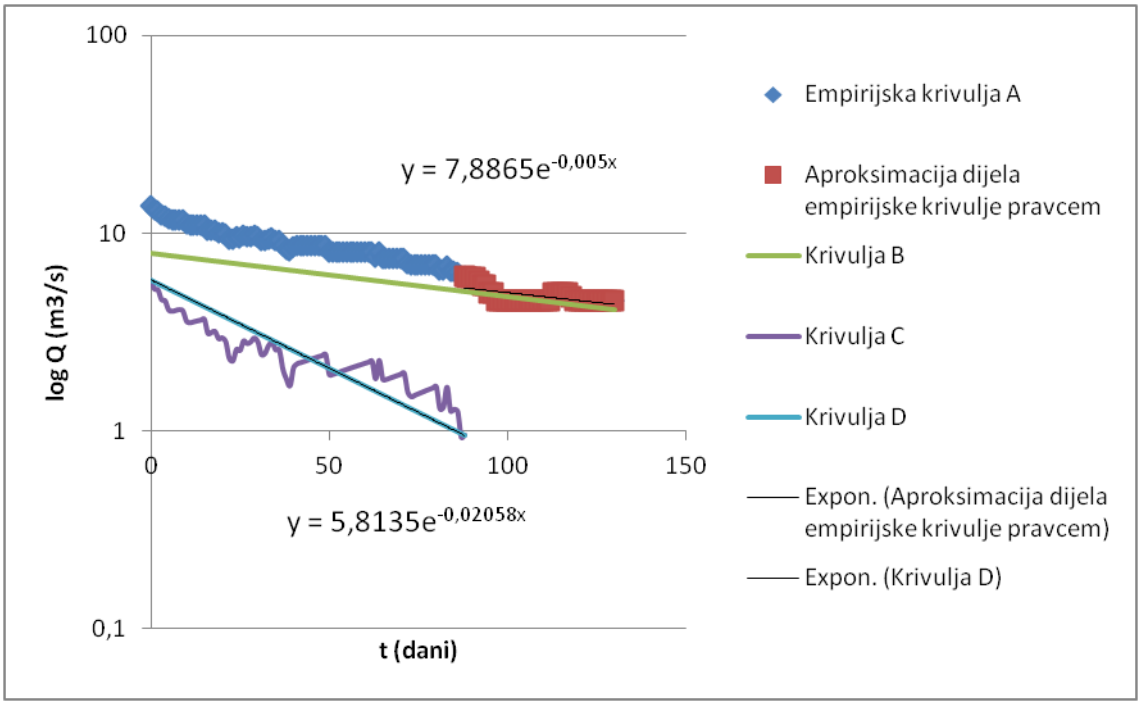
5.93 Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 14.6. – 24.7.2002.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 17.5 – 21.9. 2002. godine, za rijeku Omblu glasi:

$$Q = 11{,}608 \cdot e^{-0{,}006 \cdot t} + 5{,}792 \cdot e^{-0{,}138 \cdot t}$$



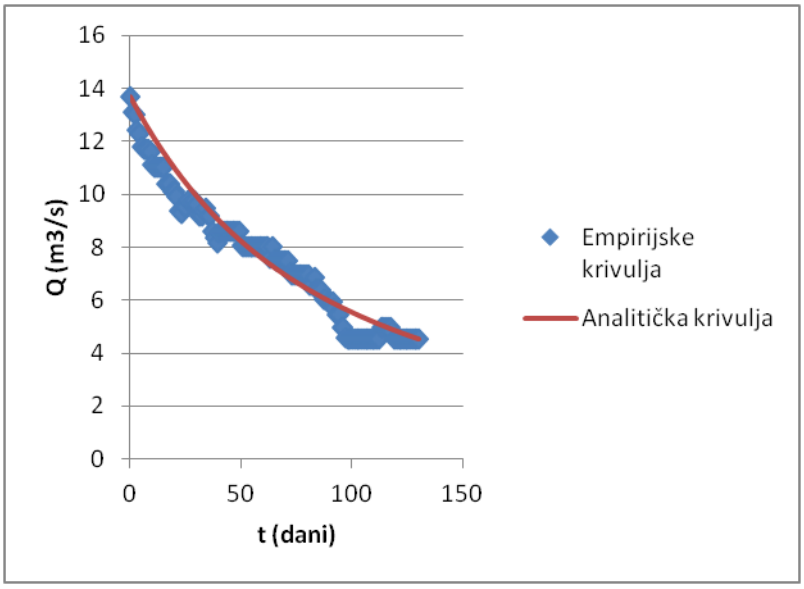
5.94 Krivulja recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 14.6. – 24.7.2002



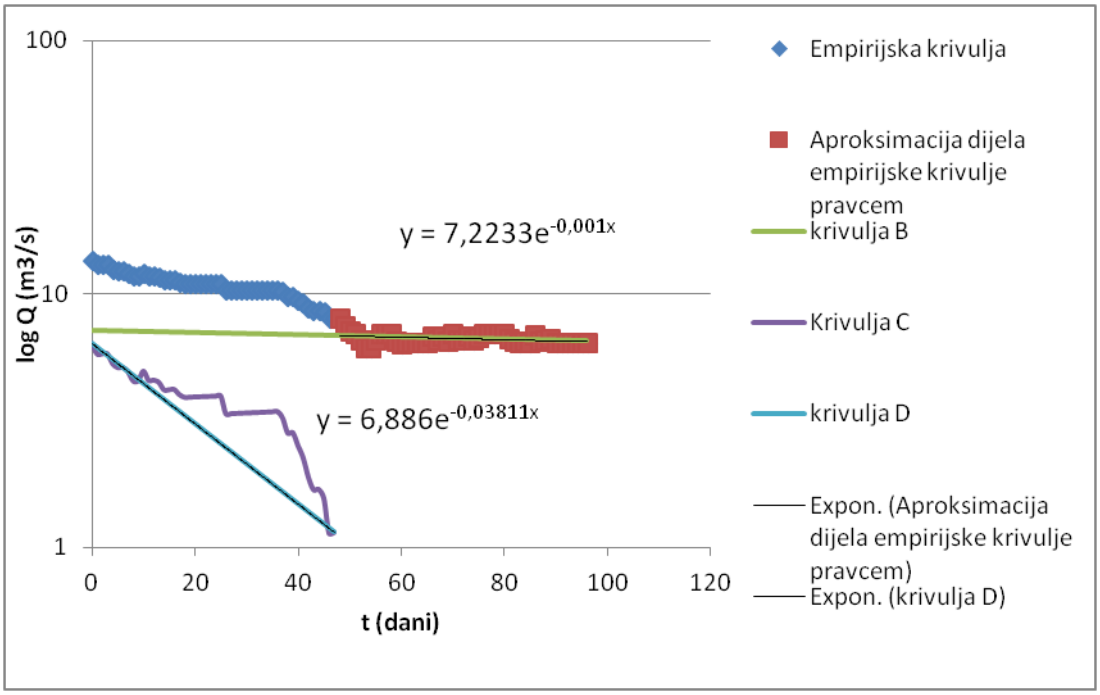
5.95. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 2.5. – 9.9.2003.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 2.5 – 9.9. 2003. godine, za rijeku Omblu glasi:

$$Q = 7{,}88650 \cdot e^{-0{,}00500 \cdot t} + 5{,}8135 \cdot e^{-0{,}02058 \cdot t}$$



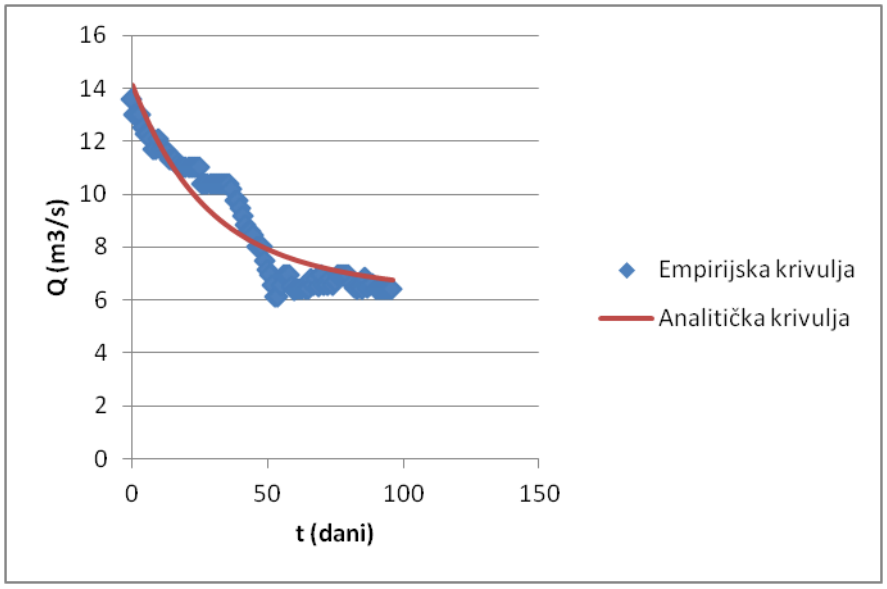
5.96 Krivulja recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 2.5. – 9.9.2003



5.97. Aproksimacija krivulje recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 20.6. – 26.9.2004.(polu-logaritamsko mjerilo)

Jednadžba krivulje recesije za razdoblje od 20.6 – 26.9. 2004. godine, za rijeku Omblu glasi:

$$Q = 7{,}22330 \cdot e^{-0{,}00100 \cdot t} + 6{,}886 \cdot e^{-0{,}03811 \cdot t}$$



5.98 Krivulja recesije za rijeku Omblu u razdoblju od 20.6. – 26.9.2004.

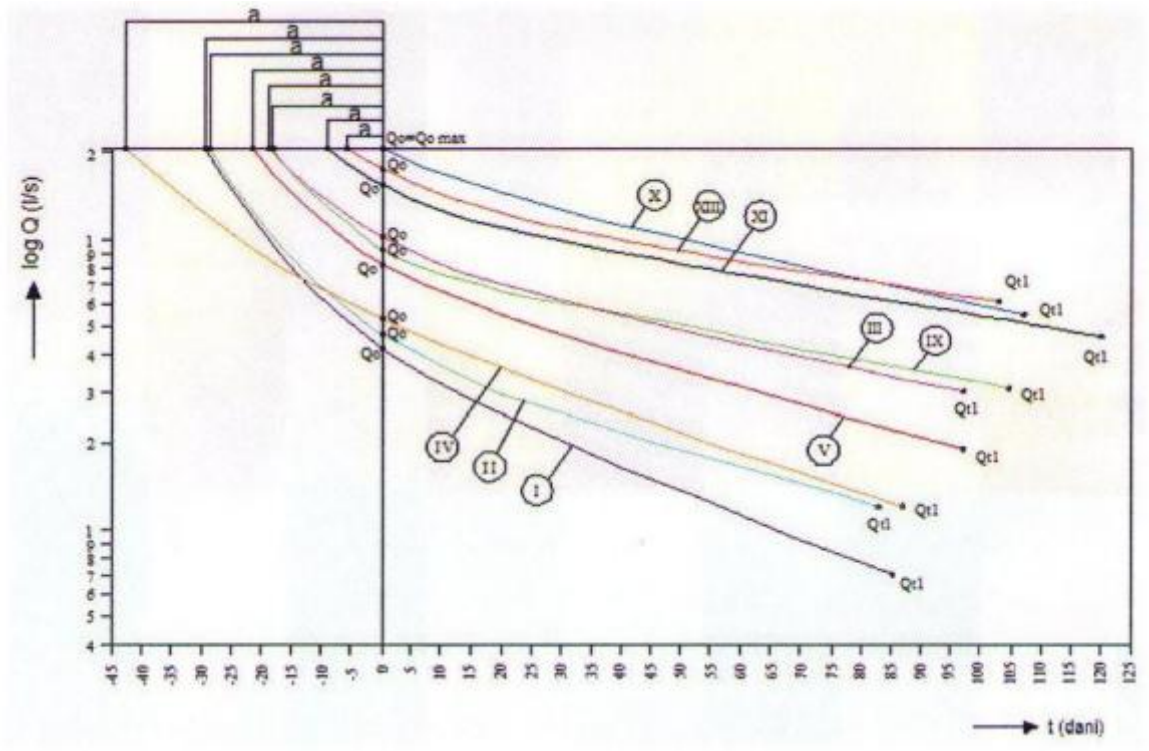
5.7.2 Konstrukcija glavne recesijske krivulje

Glavna recesijska krivulja tj. njena konstrukcija, se temelji na analitičkoj recesijskoj krivulji. Krivulje su prikazane na polu-logaritamskom koordinatnom sustavu (slika) te su opisan jednadžbom :

$$Q_j = Q_{01j} \cdot e^{-\alpha_{1j} \cdot t} + Q_{02j} \cdot e^{-\alpha_{2j} \cdot t} + \cdots + Q_{0nj} \cdot e^{-\alpha_{nj} \cdot t} \quad (5.16.)$$

gdje je j = I,II,...,N redni broj krivulje.

Broj krivulja ovisi o pojavljivanju neutjecajnih perioda tijekom promatranja. Padaline tijekom pražnjenja često deformiraju krivulju značajno i njihov utjecaj se više ili manje postupno smanjuje. Broj izraza unutar jednadžbe ovisi o zakrivljenosti krivulje.



5.99. Ekstrapolacija krivulje pražnjenja

Svaka krivulja opisana jednadžbom (5.16) počinje od neke vrijednosti: $Q_j = Q_{01j} + Q_{02j} + \cdots + Q_{0nj}$ koja odgovara vremenu t = 0. Simbol a_j označava vremenski interval između novog inicijalnog protoka $Q_{0j} = Q_{0max}$ dobivenog ekstrapolacijom, iz ishodišta koordinatnog sustava.

Vrijednost a_j je utvrđena iteracijskim postupkom, korištenjem jednadžbe (5.16) za svaku krivulju odvojeno, zamjenjujući vrijednost Q_{0max} za Q_j , i negativne vrijednosti a_j za vrijeme t. Opći oblik jednadžbe za proračun a_j je:

$$Q'_{0j} = Q_{01j} \cdot e^{\alpha_{1j} \cdot a_j} + Q_{02j} \cdot e^{\alpha_{2j} \cdot a_j} + \cdots + Q_{0nj} \cdot e^{\alpha_{nj} \cdot a_j} \quad (5.17.)$$

Nakon što su poznate vrijednosti a_j , vrijednosti Q'_{0ij} , koje odgovaraju vremenu $t = -a_{ji}$ izračunaju se za svaku ekstrapoliranu krivulju iz pojedinačnih izraza jednadžbe (5.17), tj. koristeći relaciju: $Q'_{0j} = Q'_{01j} \cdot e^{-\alpha_{1j} \cdot a_j}$

Supstitucijom Q_{0ij} sa Q'_{0ij} i t sa t' (gdje je $t' = t + |a_j|$) u jednadžbi (5.14), krivulje su pomaknute za vremenski interval a_j . Njihovi početni protoci Q'_{0j} dobiveni ekstrapolacijom sada označavaju vrijeme t = 0 na ishodištu koordinatnog sustava. slika. Jednadžba ekstrapoliranih i pomaknutih krivulja sada ima oblik :

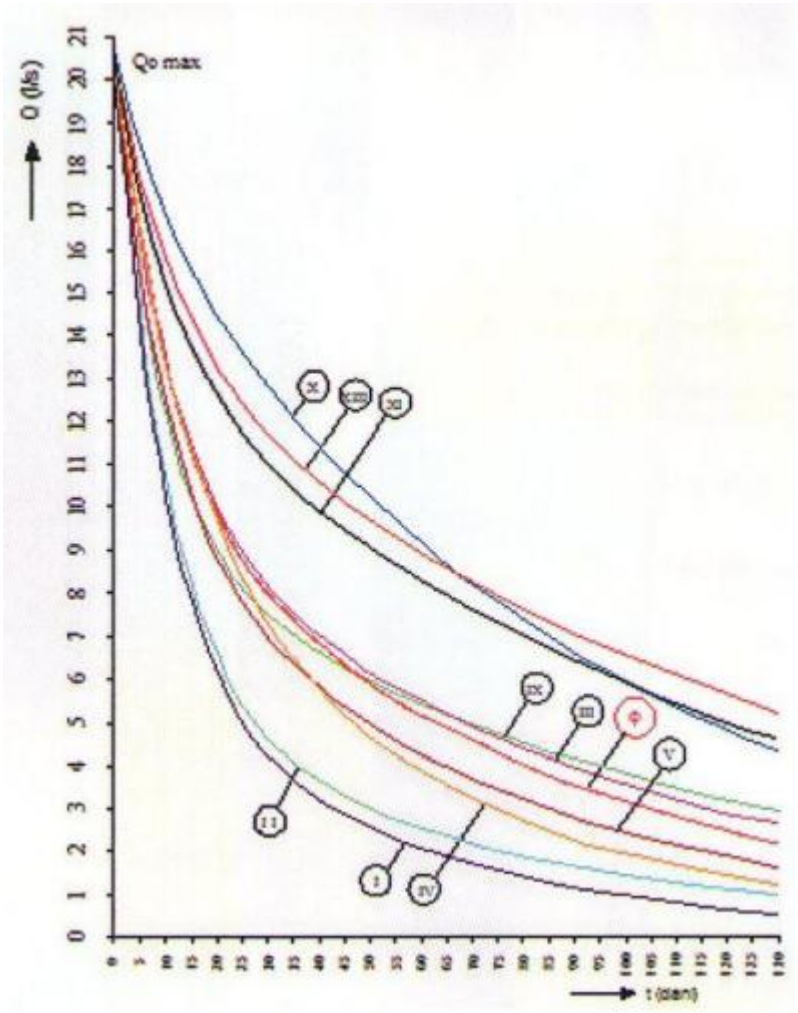
$$Q_j = Q'_{01j} \cdot e^{-\alpha_{1j} \cdot t} + Q'_{02j} \cdot e^{-\alpha_{2j} \cdot t} + \cdots + Q'_{0nj} \cdot e^{-\alpha_{nj} \cdot t} \quad (5.18)$$

Jednadžba glavne recesijske krivulje je dobivena osrednjavanjem osnovnih parametara Q_{0ij} i a_{ij} unutar grupe krivulja izraženih jednadžbom (5.18). Njen oblik je sljedeći:

$$\bar{Q} = \bar{Q}'_{01} \cdot e^{-\bar{\alpha}_1 \cdot t} + \bar{Q}'_{02} \cdot e^{-\bar{\alpha}_2 \cdot t} + \cdots + \bar{Q}'_{0n} \cdot e^{-\bar{\alpha}_n \cdot t} \quad (5.20)$$

gdje je: $\bar{Q}'_{01} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} Q'_{01j}$; $\bar{Q}'_{02} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} Q'_{02j}$; ... ; $\bar{Q}'_{0N} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} Q'_{0nj}$

i $\overline{\alpha_1} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \alpha_{ij}$; $\overline{\alpha_2} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \alpha_{2j}$; ... ; $\overline{\alpha_n} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \alpha_{nj}$



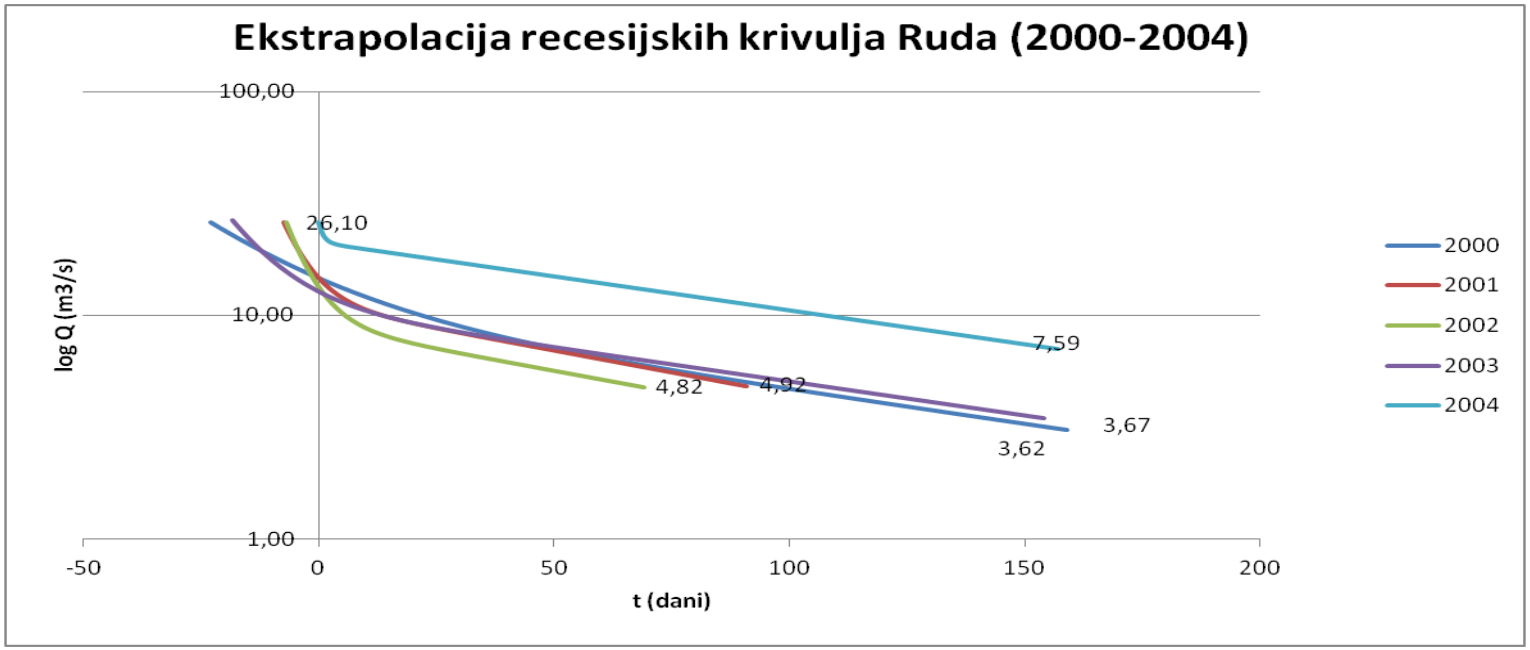
5.100. Glavna krivulja pražnjenja

Anvelope recesijskih krivulja obično se poklapaju sa gornjom i donjom krivuljom unutar grupe krivulja, koja je dobivena postupkom vremenskog pomicanja krivulja recesije. U slučaju da se dvije krivulje recesije sijeku u gornjoj ili donjoj granici anvelope, nove granice se dobiju metodom superpozicije presijecajućih krivulja recesije.

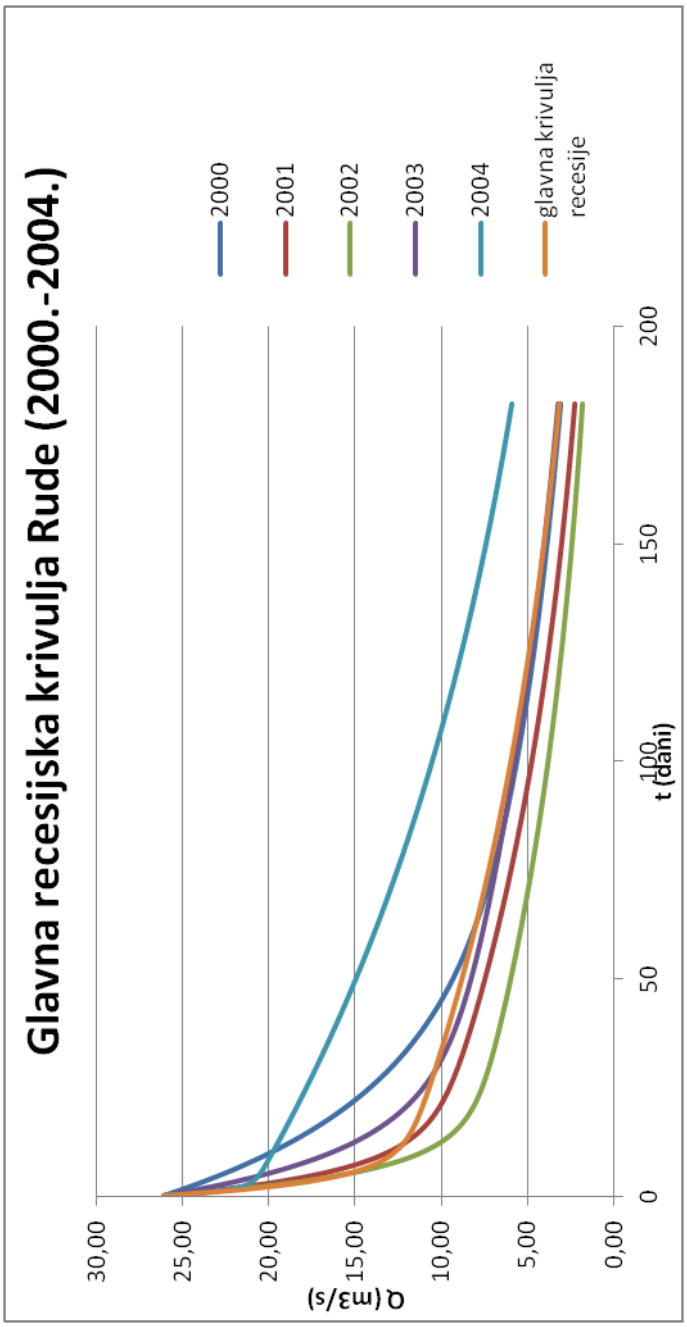
5.6.Tabelarni prikaz parametara Rude za razdoblje 2000.-2004.

Krivulja recesije	Godina	Period	Q0 (m3/s)	Q01 (m3/s)	Qt1 (m3/s	t1 (dani)	α1 (1/dan)	Q02 (m3/s	Qt2 (m3/s)	t2 (dani)	α2 (1/dan)	a (dani)	Q'_{01}	Q'_{02}	t'_1 (dani)
I	2000	9.4. - 30.9.	14,70	9,34640	3,070963	159	0,00700	5,3536	1,507145	28	0,04527	22,9400	2,531049	5,1685672	182
II	2001	5.6. - 5.9.	14,70	10,954	4,786046	92	0,00900	3,746	0,886965	8	0,18008	7,4700	2,0654	5,6346	99
III	2002	31.5. - 8.8.	13,49	8,81600	4,737778	69	0,00900	4,674	0,584972	11	0,18893	6,7500	4,486139	3,2154818	76
IV	2003	24.4. - 28.9.	12,75	10,20000	3,446598	155	0,00700	2,55	0,727219	13	0,09651	18,0300	4,484461	3,2177352	173
V	2004	9.5. - 14.10.	26,10	21,23200	7,025241	158	0,00700	4,868	0,10425	4	0,96090	0,0000	2,923137	4,7786403	158

glavna krivulja	Q_{0max} = 26,10	α1 =0,00780	α2 = 0,29434	Q'_{01} = 12,97249	Q'_{02} = 13,12632



5.101Ekstrapolacija recesijskih krivulja Rude za razdoblje 2000.-2004.

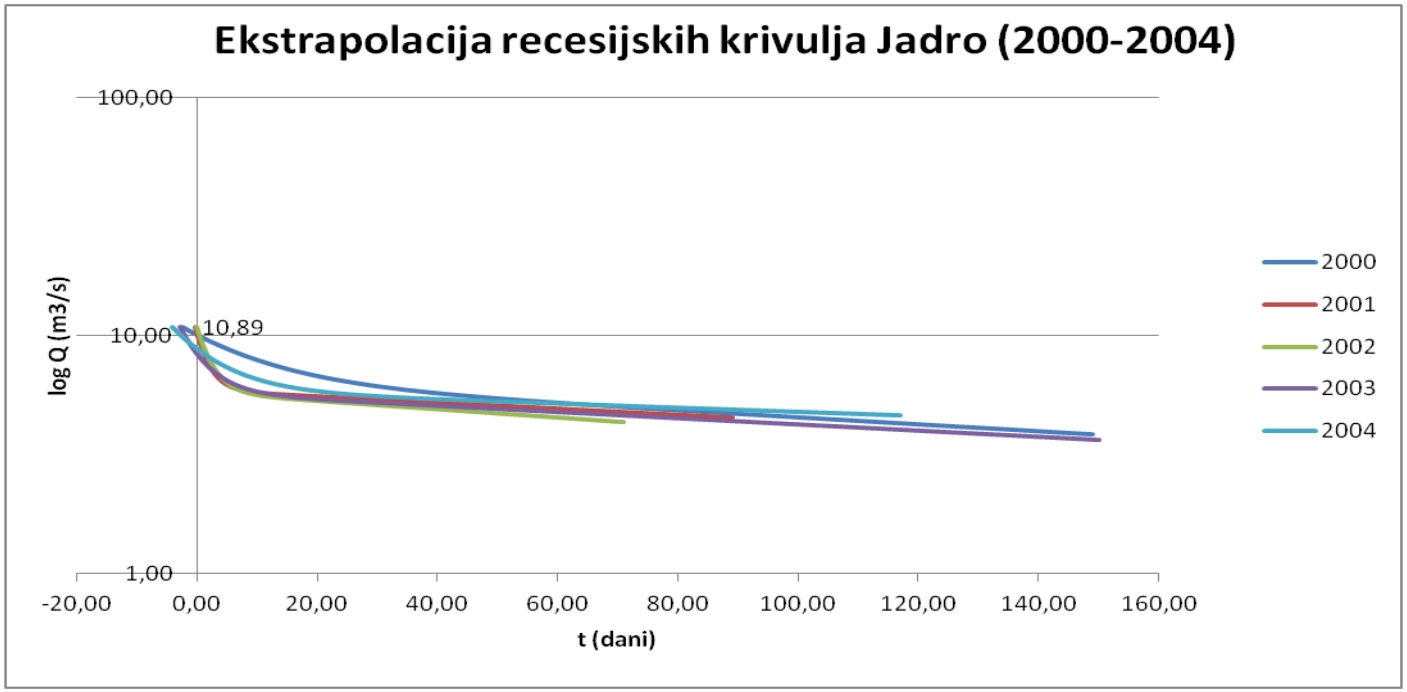


5.102. Glavna krivulja recesije rijeke Rude

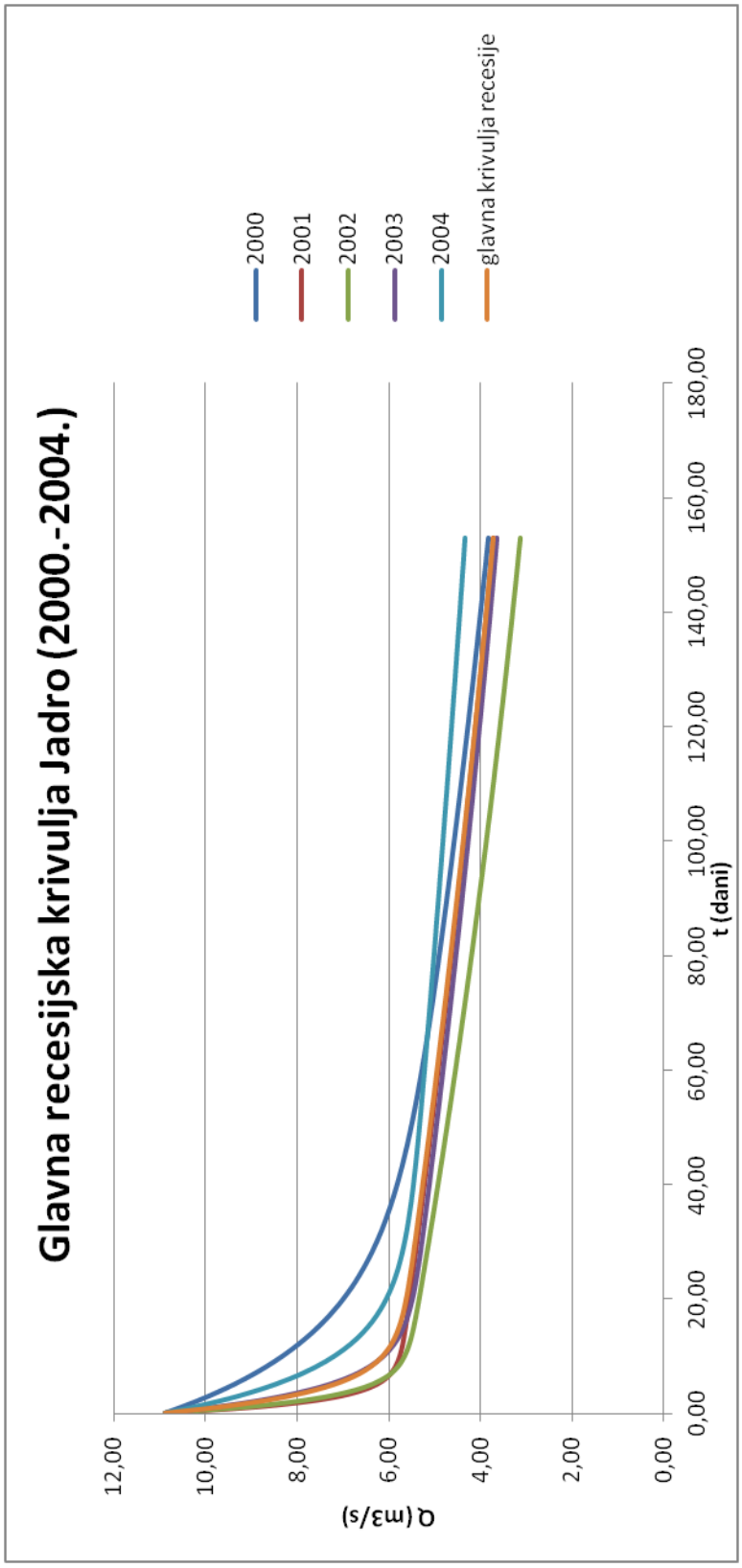
5.7 Tabelarni prikaz parametara rijeke Jadro za razdoblje 2000.-2004

Krivulja recesije	Godina	Period	Q0 (m3/s)	Q01 (m3/s)	Qt1 (m3/s	t1 (dani)	α1 (1/dan)	Q02 (m3/s	Qt2 (m3/s)	t2 (dani)	α2 (1/dan)	a (dani)	Q'_{01}	Q'_{02}	t'_1 (dani)
I	2000	15.4. - 1.10.	10,10	6,35060	3,84798	150	0,00334	3,7494	1,057029	17	0,07448	2,4100	6,401924	4,4865618	152
II	2001	4.6. - 4.9.	10,11	5,89500	4,50012	90	0,00300	4,215	0,388765	5	0,47668	0,3550	5,901281	4,9921713	90
III	2002	29.5. - 10.8.	10,89	5,79290	4,360702	71	0,00400	5,0971	1,041049	4	0,39711	0,0000	5,7929	5,0971	71
IV	2003	23.4. - 22.9.	8,37	5,73140	3,65450	150	0,00300	2,635963	0,525814	7	0,23029	2,8700	5,78096	5,1048114	153
V	2004	15.6. - 13.10	7,50	5,82810	4,602921	118	0,00200	2,959241	0,650598	12	0,12623	4,1800	5,877027	5,0157357	122

glavna krivulja	Q_{0max} = 10,89	α1 = 0,00307	α2 = 0,26096	Q'_{01} = 5,95082	Q'_{02} = 4,93928



5.103 Ekstrapolacija recesijskih krivulja rijeke Jadro za razdoblje 2000.-2004

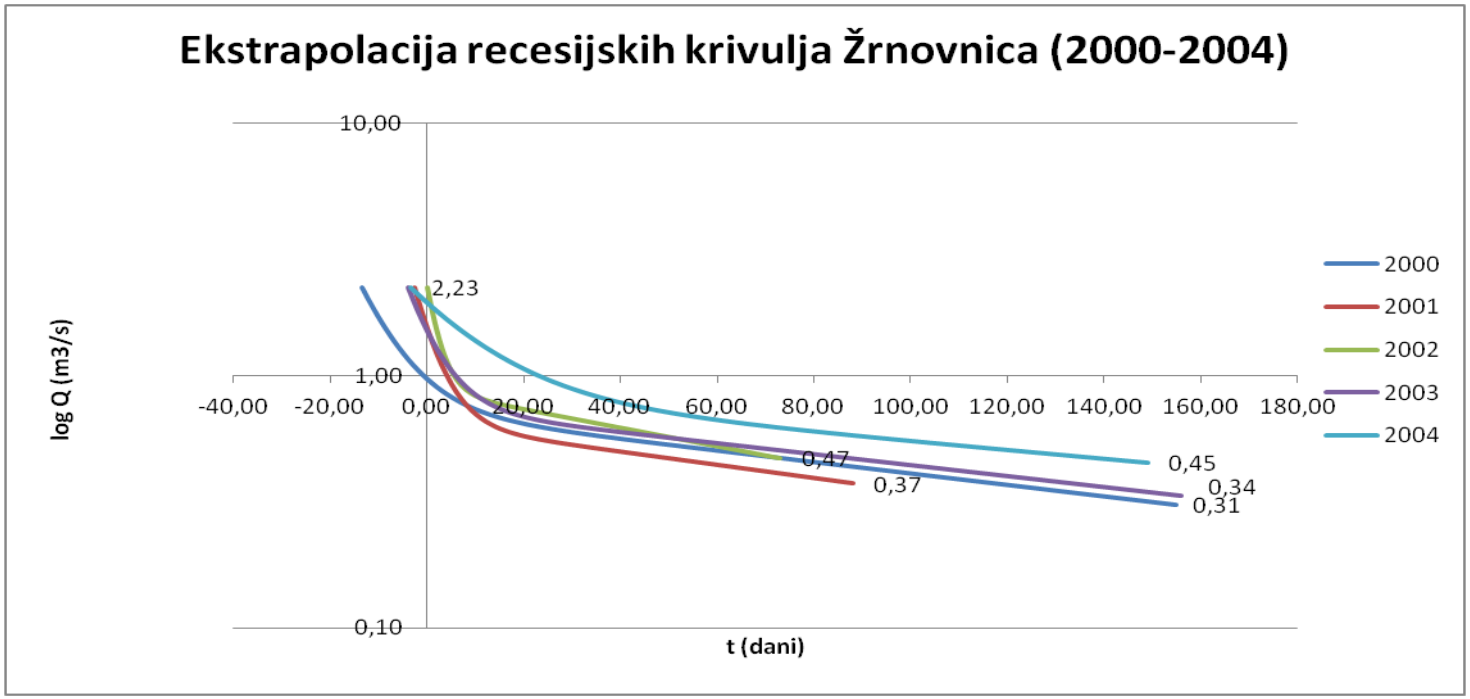


Slika 5.104. Glavna recesijska krivulja rijeke Jadro

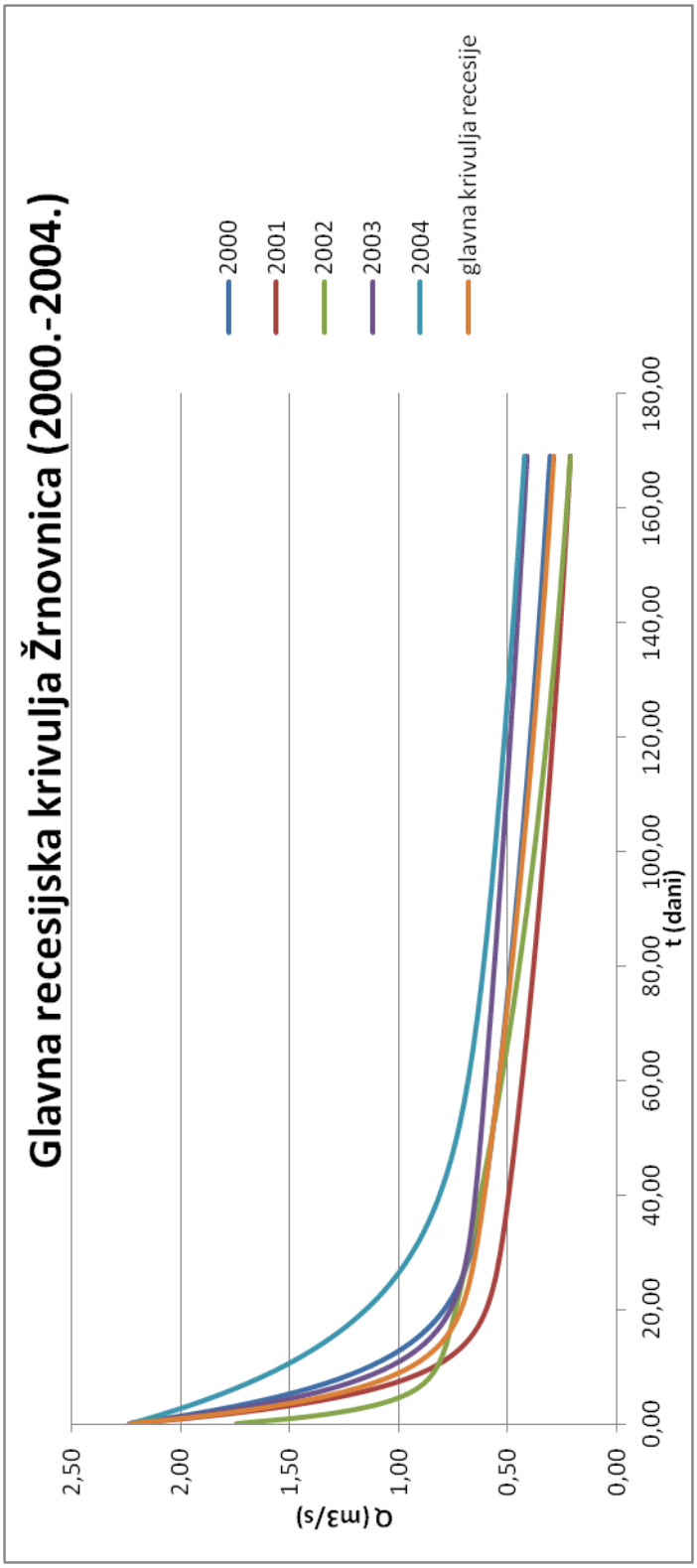
5.8 Tabelarni prikaz parametara rijeke Žrnovnice za razdoblje 2000.-2004

Krivulja recesije	Godina	Period	Q0 (m3/s)	Q01 (m3/s)	Qt1 (m3/s	t1 (dani)	α1 (1/dan)	Q02 (m3/s	Qt2 (m3/s)	t2 (dani)	α2 (1/dan)	a (dani)	Q'_{01}	Q'_{02}	t'_1 (dani)
I	2000	26.4. - 30.9.	0,96000	0,68800	0,30636	155	0,00522	0,27696	0,07995	10	0,12425	13,55	0,738425	1,4913851	169
II	2001	4.6. - 31.8.	1,52000	0,63240	0,37298	88	0,00600	0,88760	0,08399	11	0,21434	2,7000	0,642728	1,5832736	91
III	2002	29.5. - 10.8.	2,23000	0,87091	0,47204	73	0,00839	1,35909	0,04543	9	0,37759	0,0000	0,87091	1,35909	73
IV	2003	24.4. - 27.9.	1,50000	0,72760	0,33354	156	0,00500	0,77240	0,20393	8	0,16646	3,9500	0,742113	1,4907502	160
V	2004	8.5. - 13.10.	1,94000	0,81720	0,44849	150	0,00400	1,12280	0,08363	40	0,06493	3,4000	0,82839	1,4001577	153

glavna krivulja	Q_{0max} = 2,23	α1 =0,00572	α2 = 0,18852	Q'_{01} = 0,76451	Q'_{02} = 1,46493



5.105.Ekstrapolacija recesijskih krivulja Rude za razdoblje 2000.-2004

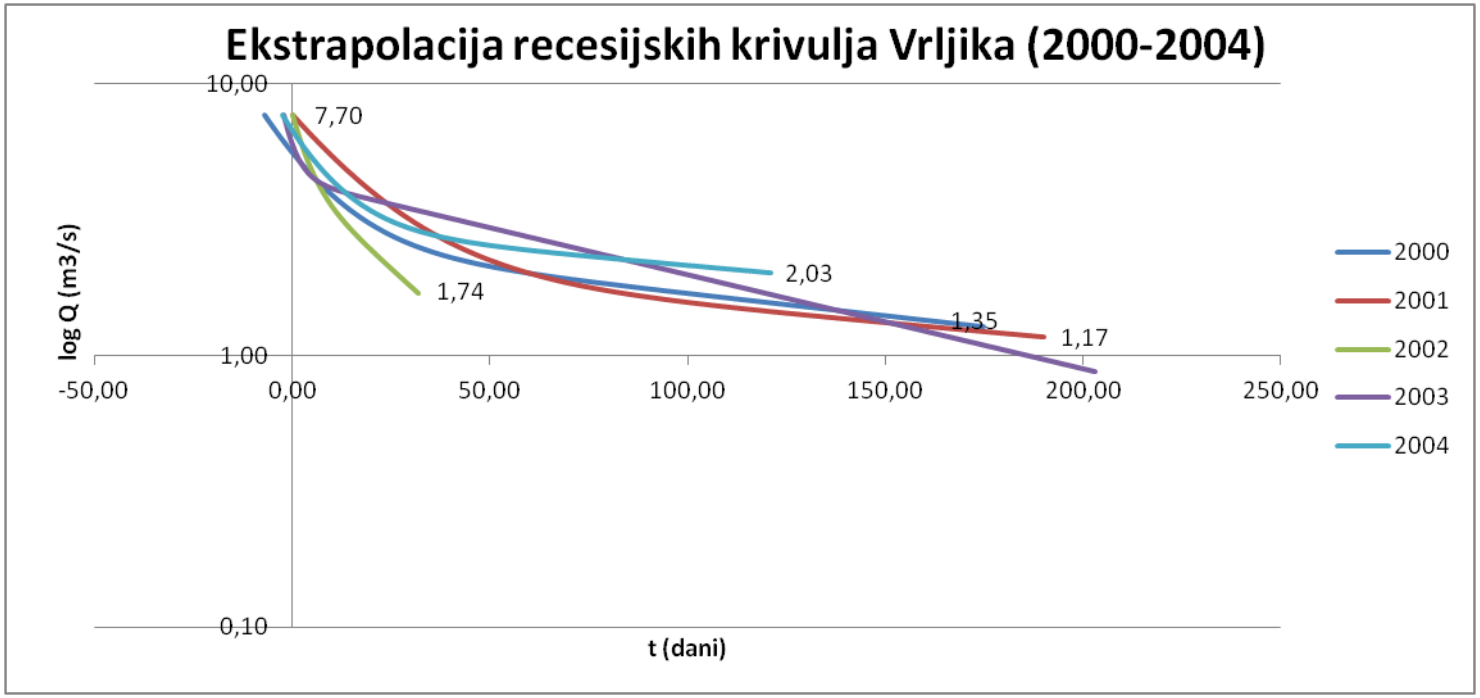


5.106 Glavna recesijska krivulja rijeke Žrnovnice

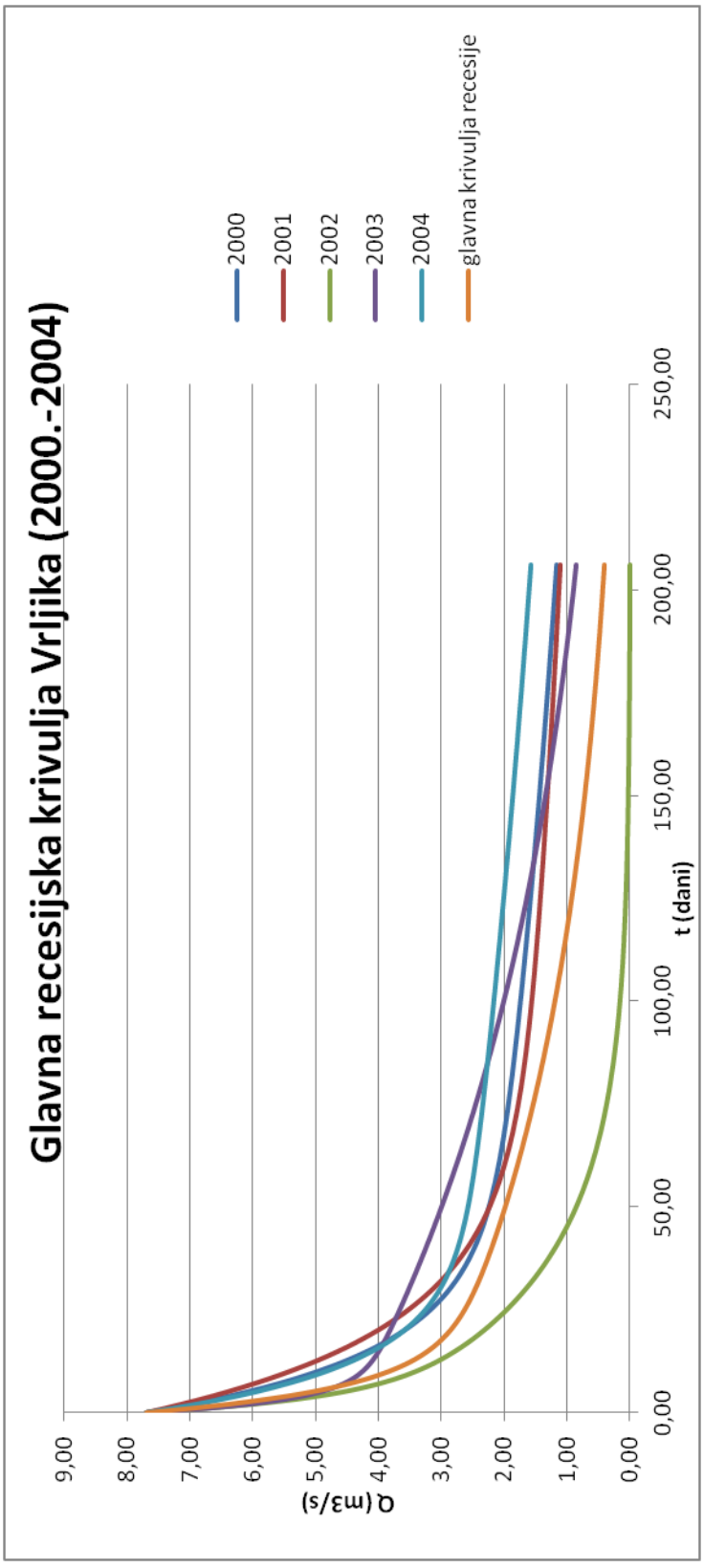
5.9 Tabelarni prikaz parametara rijeke Vrljike za razdoblje 2000.-2004

Krivulja recesije	Godina	Period	Q0 (m3/s)	Q01 (m3/s)	Qt1 (m3/s	t1 (dani)	α1 (1/dan)	Q02 (m3/s	Qt2 (m3/s)	t2 (dani)	α2 (1/dan)	a (dani)	Q'_{01}	Q'_{02}	t'_1 (dani)
I	2000	15.4. - 2.10.	5,71	2,46581423	1,31170	168	0,00376	3,1515	0,758976	20	0,07118	6,9500	2,531049	5,1685672	175
II	2001	2.5. - 10.11.	7,70	2,06540	1,16804	190	0,00300	5,6346	0,462294	50	0,05001	0,0000	2,0654	5,6346	190
III	2002	31.5. - 3.7.	7,67	4,40711	1,63758	33	0,03000	3,26289	0,165264	12	0,24857	0,0300	4,411078	3,2873122	33
IV	2003	14.3. - 4.10.	6,03	4,40940	0,86221	204	0,00800	1,6206	0,086917	9	0,32506	2,1100	4,484461	3,2177352	206
V	2004	24.5. - 15.10	6,72	2,90060	2,01762	121	0,00300	3,8194	0,616501	21	0,08685	2,5800	2,923137	4,7786403	124

glavna krivulja	Q_{0max} = 7,70	α1 =0,00955	α2 = 0,15633	Q'_{01} = 3,28303	Q'_{02} = 4,41737



Slika 5.107 Ekstrapolacija recesijskih krivulja rijeke Vrljike za razdoblje 2000.-2004

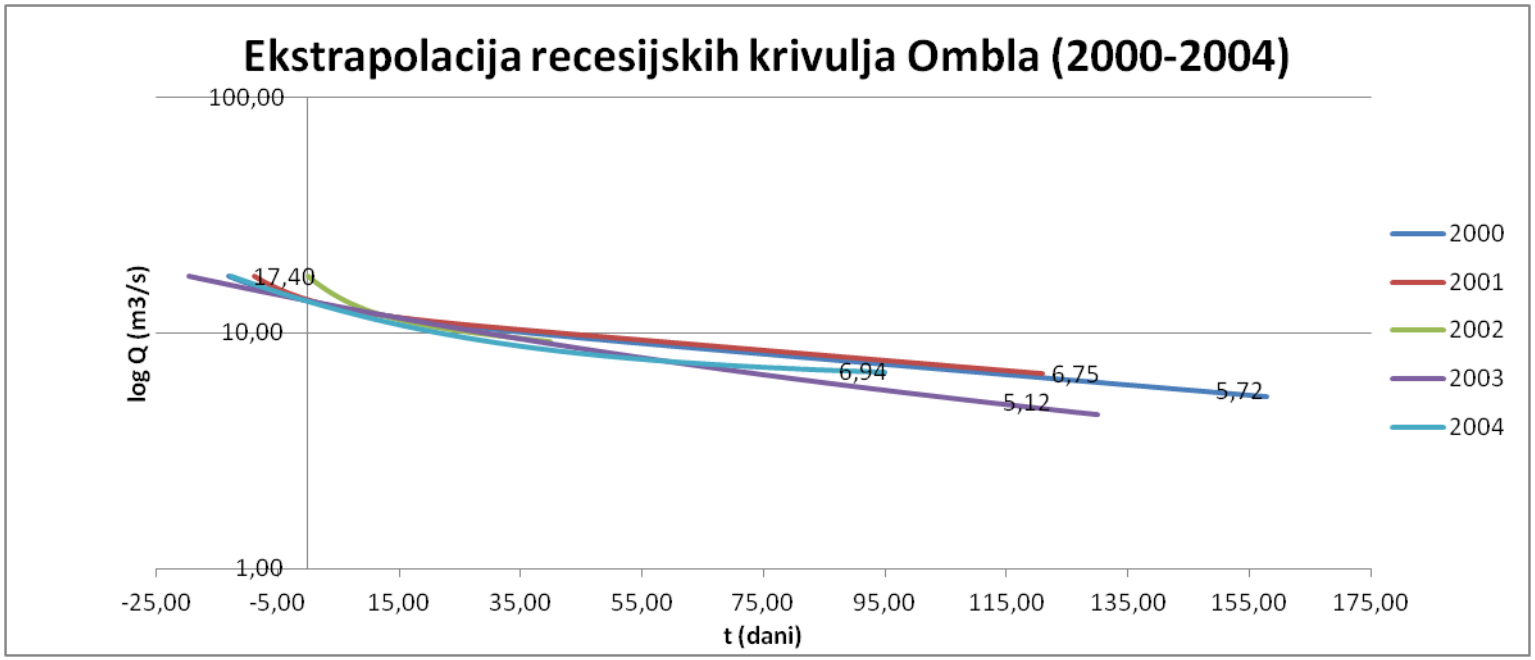


Slika 5.108. Glavna recesijska krivulja rijeke Vrljike

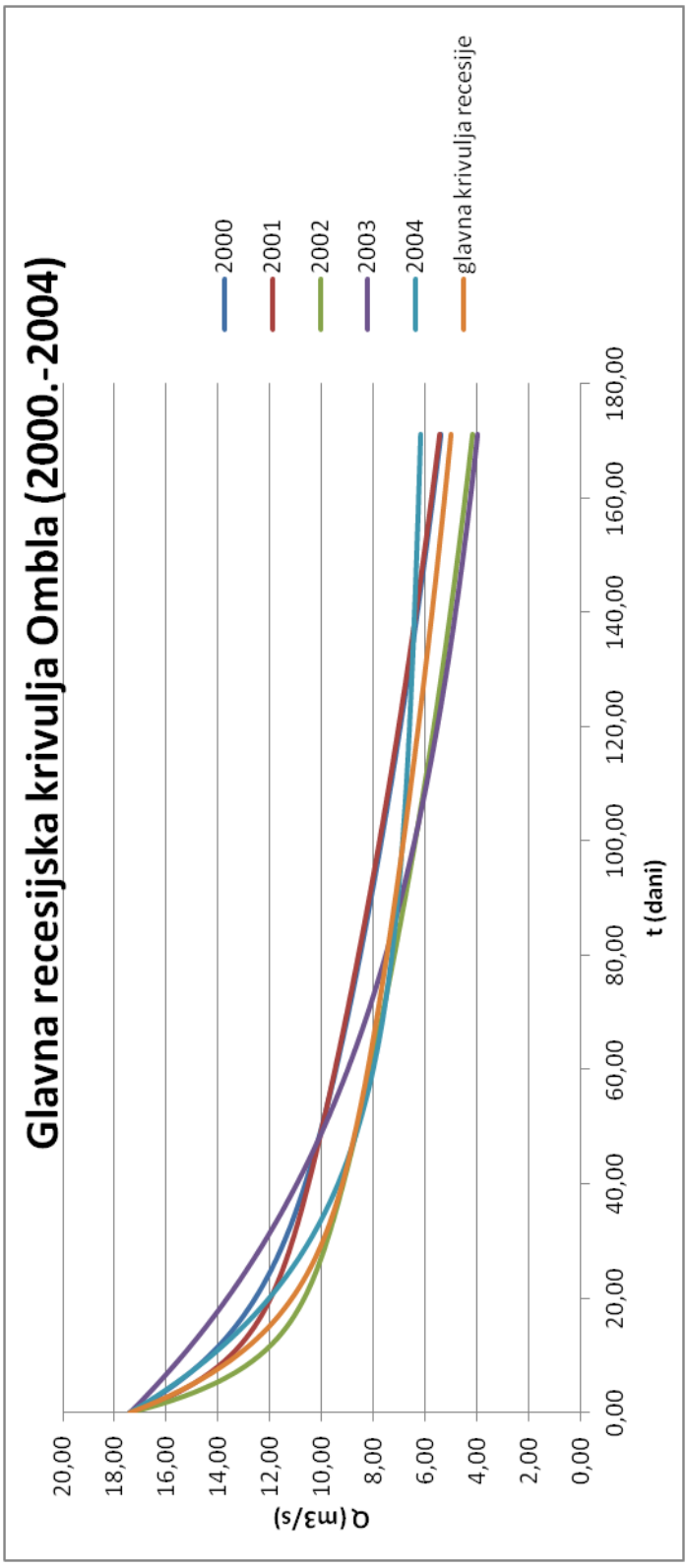
5.10 Tabelarni prikaz parametara rijeke Omble za razdoblje 2000.-2004

Krivulja recesije	Godina	Period	Q0 (m3/s)	Q01 (m3/s)	Qt1 (m3/s	t1 (dani)	α1 (1/dan)	Q02 (m3/s	Qt2 (m3/s)	t2 (dani)	α2 (1/dan)	a (dani)	Q'_{01}	Q'_{02}	t'_1 (dani)
I	2000	17.4. - 1.10.	13,70	11,87000	5,38714	158	0,00500	1,83	0,366449	22	0,07310	13,0000	12,66717	4,73325	171
II	2001	13.5. - 6.11.	13,80	12,24100	6,684497	121	0,00500	1,559	0,456001	10	0,12293	8,8200	12,7929	4,61023	130
III	2002	14.6. - 30.7.	17,40	11,60800	9,131176	40	0,00600	5,792	0,963013	13	0,13801	0,0000	11,608	5,79200	40
IV	2003	2.5. - 9.9.	13,70	7,88650	4,117114	130	0,00500	5,8135	0,950807	88	0,02058	19,6200	8,699375	8,70472	150
V	2004	20.6 - 26.9.	13,60	7,22330	6,562108	96	0,00100	6,3767	1,148341	47	0,03647	12,5800	7,314742	10,08957	109

glavna krivulja	Q_{0max} = 17,40	α1 =0,00440	α2 = 0,07822	Q'_{01} = 10,61644	Q'_{02} = 6,78595



Slika 5.109. Ekstrapolacija recesijskih krivulja rijeke Omble za razdoblje 2000.-2004



Slika 5.110 Glavna recesijska krivulja rijeke Omble

6 Zaključak

Na temelju izmjerenih protoka na izvoru rijeka Rude, Jadro, Žrnovnice, Vrljike i Omble za period od 2000. do 2004. godine, izvršena je analiza krivulje recesije. Izdvajanje recesijskih razdoblja sa hidrograma je osnova za daljnji proračun koeficijenta recesije. Analiza je izvršena putem četiri metode.

Korištenjem metode „matching strip method“ (Snyder, 1939.) te metode „tabulation method“, metodom superpozicije (Petraš,1985.) dobiveni su koeficijenta recesije prikazani u tablici 6.1:

6.1 Prikaz koeficijenata recesije za svih pet rijeka, dobiveni preko tri metode

α (dan^{-1})	„Matching strip“ metoda	„Tabulaton“ metoda	Petraš
Ruda	0,008	0,009	0,0078
Jadro	0,003	0,003	0,0031
Žrnovnica	0,006	0,006	0,0057
Vrljika	0,008	0,007	0,0095
Ombla	0,006	0,006	0,0044

Vrijednosti koeficijenta recesije po sve tri metode su približno jednake $\alpha < 10^{-2}$, što se objašnjava kao sporo dreniranje vode iz manjih pora i pukotina, tj. sporo pražnjenje podzemnih zaliha.

Primjenom metode korelacije (Langbein, 1938.) nisu uočeni rezultati koji bi bili u skladu s rezultatima dobivenim na temelju prethodno spomenutih metoda. Koeficijenti recesije su bili izrazito veliki. Razlog je, najvjerojatnije, u prevelikoj osjetljivosti same metode, pa tako mala promjena nagiba pravca utječe na velike promjene koeficijenta recesije.

7 Literatura

[1] Husno Hrelja, „Inženjerska hidrologija“, Građevinski fakultet u Sarajevu, 2007.

[2] Damir Jukić - Predavanja iz hidrologije krša

[3] Ognjen Bonacci, Tanja Roje-Bonacci, „Posebnosti krških vodonosnika“, Građevni godišnjak ... (1332-0033) (2004); 89-187

[4] „Vodoopskrbni plan Splitsko-dalmatinske županije“, Hrvatske vode, 2008.

[5] Pertaš I., „An aproach to the matematical expression of recession curves“, 1986.

[6] R. J. Nathan and T. A. McMahon, „Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses“, 1990.

[7] C. Toebes, W. B. Morrissey, R. Shorter, M. Hendy, „Handbook of hydrological procedures: Procedure No. 8 (BASE-FLOW-RECESSION CURVES)“, 1969.

[8] Ognjen Bonacci et al., „Analiza vodnih resursa izvora Omble“, Stručni članak, Hrvatske vode, 2013.

[9] Tea Juras, „Analiza recesijskog dijela hidrograma otjecanja rijeke Omble“, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2011.

[10] Zvonimir Malbaša, Završni rad, Sveučilište u Splitu, 2013.

.