

Primljen / Received: 10.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 25.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 9.12.2017.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

# Hidrauličko-hidrološka sinteza hidrograma istjecanja krškog izvora Golubinka

## Autori:



Prof.dr.sc. **Goran Lončar**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[gloncar@grad.hr](mailto:gloncar@grad.hr)



**Željko Šreng**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku  
Građevinski fakultet  
[zsreng@gfos.hr](mailto:zsreng@gfos.hr)



**Vedran Ivezić**, mag.ing.aedif.  
Hidrokonzalt projektiranje d.o.o.  
[ivezic@hidrokonzalt.hr](mailto:ivezic@hidrokonzalt.hr)

Prethodno priopćenje

**Goran Lončar, Željko Šreng, Vedran Ivezić**

## Hidrauličko-hidrološka sinteza hidrograma istjecanja krškog izvora Golubinka

Prikazana je hidrauličko-hidrološka analiza i rezultati hidrograma istjecanja za krški izvor Golubinka, što obuhvaća razdoblje 7. rujna 2012. do 1. listopada 2013. Cilj je bio stjecanje uvida u procese koji se javljaju na slivnom području izvora Golubinka, u smislu količine istjecanja, razina podzemne vode i procjeđivanja unutar krškog vodonosnika, u odnosu na količinu oborina izmjerenih tijekom analiziranog razdoblja. Na osnovi dvaju pristupa određen je odgovarajući koeficijent turbulentnog procjeđivanja kroz krške kanale analiziranog vodonosnika koji se potom može koristiti u numeričkom modeliranju.

### Ključne riječi:

krš, krški kanali i pukotine, izvor, oborina, istjecanje, turbulentno procjeđivanje

Preliminary report

**Goran Lončar, Željko Šreng, Vedran Ivezić**

## Hydraulic-hydrology synthesis of Golubinka karst spring discharge hydrograph

The hydraulic-hydrology analysis and discharge hydrograph results for the Golubinka karst spring are presented for the period from 7 September 2012 to 1 October 2013. The objective was to gain insight into processes occurring in the Golubinka spring drainage area, in terms of quantities of discharge, groundwater levels, and seepage within the karst aquifer, as related to the precipitation measured during the analysed period. An appropriate coefficient of turbulent seepage through karst channels in the analysed aquifer was determined based on two approaches. This coefficient can subsequently be used in numerical modelling.

### Key words:

karst, karst channels and fractures, spring, precipitation, discharge, turbulent seepage

Vorherige Mitteilung

**Goran Lončar, Željko Šreng, Vedran Ivezić**

## Hydraulisch-hydrologische Synthese des Ausflusses der Karstquelle Golubinka

Dargestellt werden die hydraulisch-hydrologische Analyse und die Ergebnisse des Hydrogramms des Ausflusses für die Karstquelle Golubinka, was den Zeitraum vom 7. September 2012 bis zum 1. Oktober 2013 umfasst. Das Ziel war es, Einblick in die Prozesse zu erlangen, die im Wassersammelgebiet der Quelle Golubinka im Sinne der Ausflussmenge, des Grundwasserniveaus und der Filterung innerhalb des Karstgrundwasserleiters auftreten, im Vergleich zur Niederschlagsmenge, die während des analysierten Zeitraums gemessen wurde. Aufgrund zweier Ansätze wurde ein entsprechender Koeffizient der turbulenten Filterung durch die Karstkanäle des analysierten Grundwasserleiters festgelegt, der dann bei der numerischen Modellierung angewendet werden kann.

### Schlüsselwörter:

Karst, Karstkanäle und -spalten, Quelle, Niederschläge, Ausfluss, turbulente Filterung

## 1. Uvod

Kod modeliranja podzemnih voda krških vodonosnika, potrebno je detaljno proučiti analizirano područje, opisati hidrod disperzivne karakteristike vodonosnika, definirati granične uvjete u smislu nepropusnih granica, izvora i ponora. Geomorfološka i topografska istraživanja su potrebna kako bi se utvrdilo područje prihranjivanja vodonosnika oborinom radi identificiranja procesa infiltracije. Također je potrebno poznavati meteorološke uvjete na analiziranom području. Usvajanje zaključaka istraživanja s drugih područja i vodonosnika te njihova primjena na analiziranom području ne preporučuju se zbog heterogenosti terena u jer da će se pojednostavljenja i pogreške unutar njega odraziti na numerički model. U kršu se tečenje podzemnih voda uglavnom odvija kroz pukotine i krške kanale. Premda matrica može biti vrlo porozna, zbog male primarne propusnosti ona ne pridonosi tečenju u velikoj mjeri, tako da je difuzno tečenje koje se odvija unutar matrice često zanemarivo. Hidraulička provodljivost se mijenja unutar krškog terena i vodonosnika. Poznato je da se stupanj karstifikacije karbonatnih sedimentnih stijena općenito smanjuje s dubinom. Zbog rekristalizacije i konsolidacije, matrica starijeg vapnenca manje je propusna od matrice mlađeg vapnenca [2]. Prilikom određivanja hidrauličke provodljivosti krša potrebno je obratiti pažnju na "efekt veličine", jer se provodljivost razlikuje ovisno o volumenu uzorka [3]. Hidraulička vodljivost vodonosnika, određena testnim crpljenjima, varira između 20 i 100 m/d, što je pet puta veće od hidrauličke provodljivosti matrice [4]. Mangin [5] je 1975. godine predstavio konceptualni model krša u kojem glavnina toka protječe u blizini kontakta zasićene i nezasićene zone, kroz aktivni sustav pukotina i krških kanala. Ovaj glavni sustav pukotina, tzv. preferencijalni tok, pronosi vodu prema krškom izvoru te je slabo povezan s drugim velikim prazninama u okolnim stijenama. Mangin je također uveo pojam epikrša, plitke, visoko propusne zone neposredno ispod površine tla, koji privremeno pohranjuje oborinu i drenira ju prema nesaturiranoj zoni, gdje se tok uglavnom odvija u vertikalnom smjeru, čime se pojačava i količina koncentrirane infiltracije u vodonosnik. Prilikom proračuna podzemnog tečenja, najlakše je primijeniti Darcyjevu jednadžbu i pretpostaviti da se pukotinski medij ponaša jednako mediju međurznske poroznosti [6]. Ova se metoda naziva pristup ekvivalentnog poroznog medija. Mjerenje razina podzemne vode u krškom vodonosniku i njeno tumačenje često je neujednačeno te je za procjenu tečenja podzemnih voda ova informacija nedovoljna. Osim toga, vrlo je teško odrediti glavne veličine Darcyjeve jednadžbe zbog različitih poroznosti koje upravljaju protokom (matrica, mikropukotine i makropukotine, špilje). Prema tome, da bi se postigla realna vrijednost protoka podzemnih voda, potrebno je integrirati Darcyovu jednadžbu laminarnog protoka kroz stijensku matricu s hidrauličkim jednadžbama turbulentnog tečenja kroz niz pukotina, cijevi i kanala, te kombinirati mjerenja razina podzemne vode s drugim terenskim testovima, kao što je trasiranje bojilima.

U ovom istraživanju bili smo prisiljeni suočiti se s problemom nedostatka informacija o analiziranom slivnom području. Položaj pukotina i preferencijalnih tokova nisu bili u potpunosti poznati. Nije bilo dostupnih podataka o razinama podzemne vode, osim istraživanja iz 2013. godine kada su djelatnici Instituta IGH proveli istražno bušenje na analiziranom slivnu. Ciljevi su ovog rada odrediti hidrogram istjecanja krškog izvora Golubinka, utvrditi nivogram podzemne vode te količinu procjeđivanja unutar vodonosnika sliva Golubinka, unatoč nedostatku terenskih mjerenja, koristeći svojstvene pretpostavke i hidrauličke jednadžbe. Dostupni ulazni podaci upotrijebljeni za ovo istraživanje bili su podaci o oborini dobiveni iz obližnje ombrografske postaje i podaci s limnografske stanice smještene na izvoru Golubinka. Analiza je provedena tijekom 389 dana. Pomoću limnografskih mjerenja utvrđena je razlika između razine mora i podzemne vode, koja je služila za određivanje hidrograma istjecanja izvora Golubinka. Pretpostavljen je linearni odnos između razlika u razinama vode i istjecanja. Također, pretpostavljeno je da je ukupni volumen infiltrirane oborine jednak ukupnom volumenu istjecanja na izvoru Golubinka. To je omogućilo analizu predmetnog područja kao zatvorenog sustava, gdje izvor Golubinka predstavlja jedino mjesto istjecanja. Predstavljen je i drugi pristup određivanja količine istjecanja iz izvora, koji je predložio Beara 1979. godine, gdje je oborina jedini i osnovni ulazni parametar. Nakon toga, cilj nam je simulirati promjene razina podzemne vode na referentnoj poziciji za isto razdoblje, uz jednostavan pristup temeljen na jednadžbi kontinuiteta. Na kraju je proveden proračun turbulentnog procjeđivanja kroz vodonosnik sliva Golubinke, koristeći rezultate iz prijašnjih proračuna, tj. količina istjecanja na izvoru i razina podzemne voda. Nelinearna Manningova jednadžba upotrijebljena je za izračun turbulentnog procjeđivanja kroz sustav pukotina slivnog područja izvora Golubinka, a glavni rezultat tog izračuna je koeficijent turbulentnog procjeđivanja ( $k_t$ ) koji će se kasnije moći koristiti prilikom numeričkog modeliranja analiziranog vodonosnika.

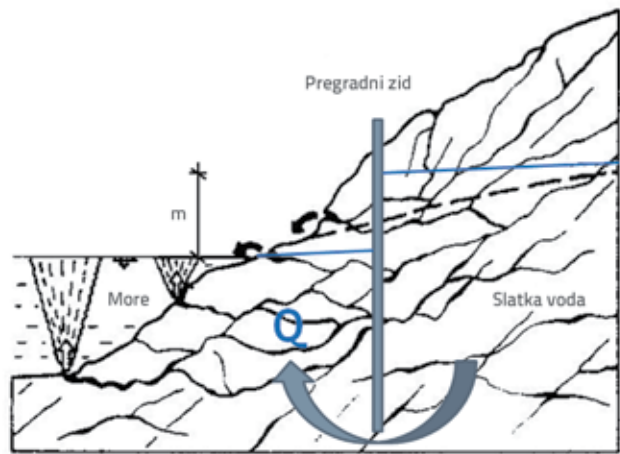
## 2. Područje istraživanja

Područje istraživanja nalazi se između jadranske mikroploče na jugozapadu i dinarske regionalne strukturne jedinice na sjeveroistoku. Njihov kontakt predstavljen je rasjedima koji se pružaju u smjeru sjeveroistok-jugozapad [7]. Eocenski i kredni vapnenici su glavna komponenta terena [8, 9]. Izvor Golubinka predstavlja tipičan krški izvor koji se uglavnom sastoji od vapnenca iz razdoblja krede i paleogena, s dolomitnim dijelovima. Vidljivi kanali i špilje na mjestu izvora Golubinka i susjednih izvora (izvori Pod Gredom i Šušnjara) upućuju na postojanje tipičnih uvjeta krškog tečenja. Slivno područje izvora Golubinka (slika 1) sastavni je dio većeg sliva Bokanjac-Poličnik koji pokriva cijelo zaleđe grada Zadra. Hidrogeološki, slivno područje izvora Golubinka može se odvojiti od ostatka slivnog područja Bokanjac-Poličnik zbog postojanja zonskih vododjelica podzemne vode, koje nažalost nisu u potpunosti

poznate. U priobalnom području, karbonatne stijene su u dodiru s morskom vodom na uskom prostoru, jer flišne naslage u Ljubačkom zaljevu djeluju kao podvodna barijera. Na taj način podzemna voda može spriječiti prodor morske vode sve do kraja ljeta, kada padne razina podzemne vode i smanji se količina otjecanja unutar vodonosnika. Još jedna prepreka za podzemne vode nalazi se jugozapadno od izvora Golubinka, gdje je prisutan pet metara debeli sloj rezidualnog tla [10]. Ipak, dio podzemne vode se procjeđuje ispod prema izvoru Bokanjac. Morfološki, krška polja i brežuljci s najvišim vrhovina na 120 m n.m., dominiraju unutar slivnog područja. Postoji nekoliko antiklinala i sinklinala koje određuju izgled terena [11]. Opaženi smjer tečenja podzemnih voda u većini je slučajeva u smjeru sjeverozapada. Postoji podzemna veza između ponora u Biljane Donje (slika 1.) i izvora Golubinka gdje su detektirane brzine i do 8,1 cm/s [11]. To potvrđuje i razina podzemnih voda u blizini izvora Oko (slika 1.), s visinom od 60 m n.m., što predstavlja značajan gradijent podzemnih voda u smjeru izvora Golubinka [11]. Na izvoru Golubinka voda izvire otprilike 15 metara od obale, na nadmorskoj visini manjoj od 1 m. Blizina obale uzrokuje povremeno prodiranje morske vode u vodonosnik u blizini izvora. Prodiranje je izraženije u ljetnim mjesecima kada se razina vode u vodonosniku smanjuje, zajedno s istjecanjem iz izvora. Taj se fenomen mijenja iz godine u godinu, ovisno o količini oborina na području, a zbog brzog odziva na oborine, istjecanje naglo raste i voda brzo ponovno postaje slatka. Prema podacima [12] koji su obuhvaćali 30-godišnje razdoblje (1961.-1990.), najveće istjecanje javljalo se u veljači s prosjekom od 1000 l/s. Najmanja količina

istjecanja bila je u srpnju, prosječno 100 l/s. Prosječno godišnje istjecanje iznosilo je oko 417 l/s, a prosječna godišnja količina oborina 992 mm.

Pregradni zid sagrađen je na samom izvoru Golubinka, gdje je postavljena limnografska stanica (15° 15' 22,5" I; 44° 15' 22,5" S) i gdje se mjeri razlika razina vode između "morske" i "slatkovodne" strane pregradnog zida (slika 1.). Shema izvora Golubinka s pregradnim zidom prikazana je na slici 2. Podaci o oborinama mjereni su na ombrografskoj postaji Zadar-aerodrom (15° 20' 50,3" I; 44° 06' 09" S) na dnevnoj bazi. Ombrografska točnost je ± 0,1 mm ili ± 1% pri oborinama < 6 mm/min i ± 2% pri oborinama > 6 mm/min, a intenziteta ± 0,1 mm/min.



Slika 2. Pregradni zid na izvoru Golubinka



Slika 1. Shematska hidrogeološka karta slivnog područja izvora Golubinka

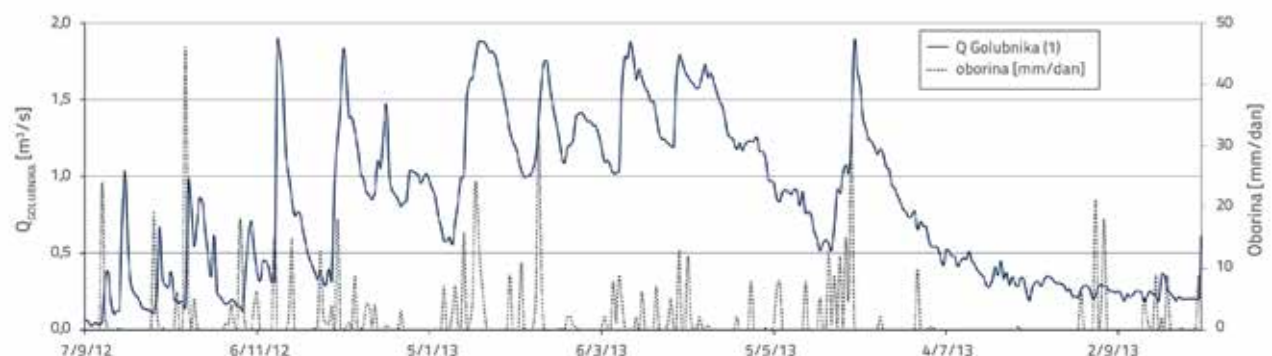
### 3. Postavke i rezultati modela procjeđivanja kroz krški vodonosnik

Raspoloživi dnevni limnografski podaci o razlici razina vode s "morske" i "slatkovodne" strane pregradnog zida ( $m$ ) te podaci o oborini s ombrografske postaje Zadar-aerodrom prikazani su na slici 3. Potrebno je napomenuti da se ti podaci ne odnose na preljevnu visina preko baždarnog praga, već samo na nadvišene iznad razine mora na mjestu izvora uz more. Shodno tome nema ni pouzdanog hidrograma  $Q(t)$  za izvor Golubinka.

Pretpostavljeno je da analizirano razdoblje (7. rujna 2012. do 1. listopada 2013., 389 dana) predstavlja hidrološki ciklus nakon kojeg je volumen podzemne vode jednak kao i na početku promatranog razdoblja, te da je izvor Golubinka jedina relevantna pozicija "pražnjenja" sliva. Tako onda ukupni infiltrirani volumen



Slika 3. Limnografski podaci o razlici razina vode s "morske" i "slatkovodne" strane pregradnog zida izvedenog na samom izvoru te podaci o oborini s ombrografske postaje Zadar-aerodrom



Slika 4. Hidrogram istjecanja za izvor Golubinka u analiziranom razdoblju

oborine na slivu odgovara ukupnom istjecanju na samom izvoru Golubinka ( $V_{infiltrirana}$  oborina za 389 dana = srednji protok izvora  $Q_{sred} \cdot 389$  dana  $\cdot 86400$  s). Pretpostavljen je linearni odnos između istjecanja izvora i razlike u razini vode ( $m$ ),  $Q_{Golubinka} = k_m \cdot m$ , pri čemu  $k_m$  predstavlja koeficijent linearnog odnosa. Istjecanje izvora postiže se Darcyovom jednadžbom, gdje površina ( $A$ ), hidraulička vodljivost ( $k$ ) i duljina ( $L$ ) predstavljaju kalibrirane parametre, a vrijednost visine ( $h$ ) iz Darcyove jednadžbe odgovara visini  $m$ . Usvajanjem ove pretpostavke i podataka za površinu sliva  $R = 65$  km<sup>2</sup> [11] i koeficijent infiltracije  $\gamma = 0,6$  [13] za potrebe određivanja infiltriranog volumena oborine, dobiven je linearan korelacijski odnos između protoka istjecanja  $Q_{Golubinka}$  i razlike razina vode ( $m$ )  $Q_{Golubinka}(t) = f(m) = 0,65 \cdot m$ . Rezultantni hidrogram dobiven primjenom ovog pristupa (pristup 1) prikazan je na slici 4. Srednji protok istjecanja za analizirano razdoblje iznosi 810 l/s, što je dvostruko veća vrijednost od iskazane u [11]. Veće vrijednosti istjecanja posljedica su pretpostavke da je izvor Golubinka jedini relevantni izvor na tom području. Stoga, ovi rezultati mogu predstavljati kumulativno otjecanje s tog područja.

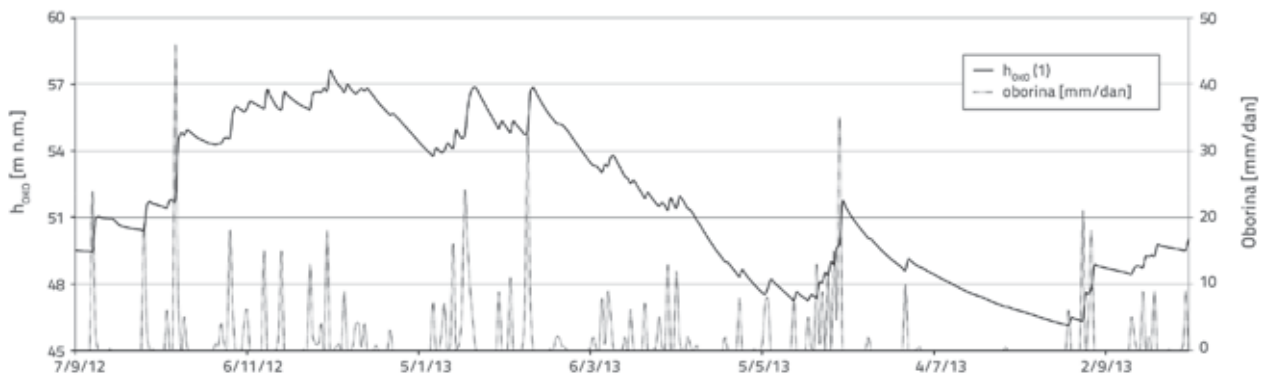
Kako bi se definirao nivogram podzemnih voda za isto razdoblje, primjenjen je jednostavan pristup zasnovan na jednadžbi kontinuiteta (1) [14]. Pri tome je usvojena pretpostavka da razina podzemne vode na poziciji piezometra Oko (slika 1.) predstavlja referentnu vrijednost za cijeli sliv.

$$H_{t+\Delta t} = H_t + [(-Q_{GOLUBNIKA} - Q_{PUMP} + \gamma \cdot P \cdot R) / S \cdot R] \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdje je:

- $H_t, H_{t+\Delta t}$  - razina podzemne vode [L] na početku i kraju proračunskog koraka
- $Q_{GOLUBNIKA}$  - protok istjecanja na izvoru Golubinka [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]
- $Q_{PUMP}$  - crpljenje [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]
- $\gamma$  - koeficijent infiltracije [-]
- $R$  - površina sliva [L<sup>2</sup>]
- $S$  - koeficijent uskladištenja [-].

Za provedbu proračuna potrebno je usvojiti inicijalnu razinu podzemne vode (početni uvjet), tako što će se mjeriti razina podzemne vode na poziciji Oko (15° 19' 47,8" I; 44° 11' 19,2" S; k.t. 55 m n.m.; [15]) na dan 29. rujna 2013., kada je izmjerena razina podzemne vode na koti 49,5 m n.m. Početni uvjet razine podzemne vode (7. rujna 2013.) usvojen je na način da se provedbom proračuna na dan 29. rujna 2013. dobije izmjerena vrijednost 49,5 m n.m., uz usvojene vrijednosti koeficijenta infiltracije  $\gamma = 0,6$ , površine sliva  $R = 65$  km<sup>2</sup> i koeficijenta uskladištenja  $S = 0,01$  [15]. Nadalje, podaci iz [17, 18] pokazuju da srednja vrijednost razine podzemne vode za razdoblje 1966.-1968. iznosi 52 m n.m., što odgovara vrijednostima dobivenima provedbom proračuna ovim pristupom (slika 5.). U nastavku se opisuje strujanje podzemne vode kroz sliv izvora Golubinka.



Slika 5. Nivogram podzemnih voda u analiziranom razdoblju za poziciju piezometra Oko (proračun temeljem rezultata pristupa 1)

S obzirom na specifičnost procjeđivanja u krškom vodonosniku, potrebno je napomenuti da Darcyjev zakon procjeđivanja u linearnom obliku vrijedi do kritičnog Reynoldsovog broja  $Re < 1$ . Za vrijednosti  $Re > 1$  razvija se prijelazno i turbulentno strujanje u kojem su otpori nelinearni, odnosno nagib piezometarske linije izražava se u obliku  $J \propto v^n$ . Za turbulentno strujanje vrijedi,  $n = 2$ , a odgovarajući zakon procjeđivanja u turbulentnom strujanju glasi:  $v = k_t \sqrt{I}$ , gdje je  $k_t$  koeficijent turbulentnog procjeđivanja. Strujanje podzemne vode kroz sliv izvora Golubinka odvija se kroz nejednoliki kanalski sustav s promjenom provodljivosti uzduž osi strujanja, pri čemu se veći dio tečenja odvija kroz krške kanale, a manji dio kroz prostor oko njih. Za proračun turbulentnog strujanja kroz krške kanale može se koristiti Darcy-Weisbachov ili Manningov izraz za proračun protoka:  $Q(y) = K(y) \cdot \sqrt{I}$ , gdje je  $K(y)$  predstavlja relativnu kumulativnu funkciju provodljivosti. Nejednoliki kanalski sustav predstavljen je kanalom u kojem se provodljivost mijenja uzduž osi strujanja, gdje je srednja vrijednost provodljivosti jednaka aritmetičkoj sredini između provodljivosti na rubovima dionice, piezometar Oko na jednoj strani i izvor Golubinka na drugoj. Provodljivost je izračunana prema izrazu:  $K = k_t \cdot A$ , gdje je  $A$  poprečni presjek vodonosnika,  $A = h \cdot W$ , gdje  $h$  odgovara razini podzemne vode dobivenoj u prethodnom koraku proračuna, a širina  $W$  odgovara geometriji slivnog područja.

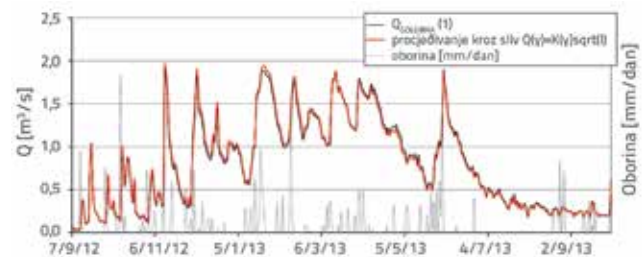
$$\bar{K} = \frac{K(I_1, h_1) + K(I_2, h_2)}{2} \quad (2)$$

$$h_2 - h_1 + \frac{|Q|Q}{K^2} L = 0 \quad (3)$$

gdje je:  $\bar{K}$  aritmetička sredina hidrauličke provodljivosti [ $LT^{-1}$ ],  $K(I_1, h_1)$  i  $K(I_2, h_2)$  hidraulička provodljivost [ $LT^{-1}$ ],  $L$  je udaljenost između rubova dionice [ $L$ ],  $h_1$  je razina podzemne vode na Oku [ $L$ ],  $h_2$  je razina podzemne vode na izvoru Golubinka [ $L$ ],  $Q$  je procjeđivanje kroz vodonosnik [ $L^3T^{-1}$ ].

Primejnom izraza (2) i (3) uz varijaciju vrijednosti koeficijenta  $k_t$  te usvajanjem vrijednosti  $L = 10$  km (udaljenost Oko – izvor

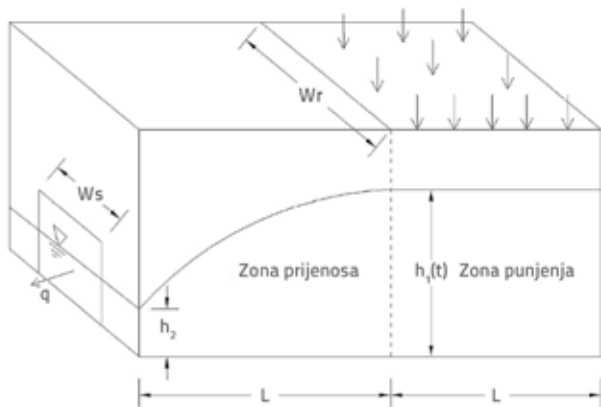
Golubinka, slika 1.),  $W_{Oko} = 2000$  m (širina vodonosnika na poziciji Oko),  $W_{Golubinka} = 250$  m (širina vodonosnika na poziciji izvora Golubinka),  $h_1(t)$  sa slike 5,  $h_2(t)$  sa slike 3., dobiven je vremenski niz procjednih količina kroz sliv Golubinke (slika 6.). Pri proračunu, koeficijent  $k_t$  predstavlja kalibracijski parametar, a prikazani rezultati dobiveni su primjenom vrijednosti  $k_{t,Oko} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s (za poziciju Oko) i  $k_{t,GOLUBINKA} = 7,3 \cdot 10^{-2}$  m/s (za poziciju izvora Golubinka). Cilj je bio taj da se dobije hidrogram procjeđivanja sličan hidrogramu istjecanja dobivenom u prvom koraku ovog pristupa.



Slika 6. Vremenski niz procjednih količina kroz sliv Golubinke (strujanja podzemnih voda u vodonosniku) i protoka istjecanja na izvoru Golubinka (pristup 1)

Drugi pristup zasnovan je na linearnom matematičkom modelu istjecanja iz izvora predstavljenom u [19]. U ovom pristupu oborina je osnovni ulazni parametar, a domena tečenja je hidrološki razdvojena na dva dijela, zone punjenja i prijenosa, kao što je prikazano na slici 7. Dubina  $h_2(t)$  na mjestu istjecanja određena je visinom nadsloja  $m$ ,  $h_1(t)$  na području punjenja je dobivena provedbom proračuna. Nadalje, usvojene su vrijednosti  $L = 24$  km (duljina zone punjenja),  $Wr = 2700$  m (širina zone punjenja),  $l = 750$  m (duljina zone prijenosa),  $Ws = 250$  m (širina izvora),  $f_1 = 0,01$  (specifično uskladištenje),  $k = 2,9 \cdot 10^{-2}$  m/s (koeficijent filtracije na razini vodonosnika). Vrijednosti  $L$  i  $Wr$  odgovaraju geometriji sliva (slika 2.). Vrijednosti  $l$  i  $Ws$  su varirane (baždarni parametri modela) s ciljem dobivanja sumarnog otjecanja za analizirano razdoblje kao i u slučaju prethodnog pristupa. Usvojena vrijednost  $f_1$ , istovjetna je vrijednost koeficijenta uskladištenja

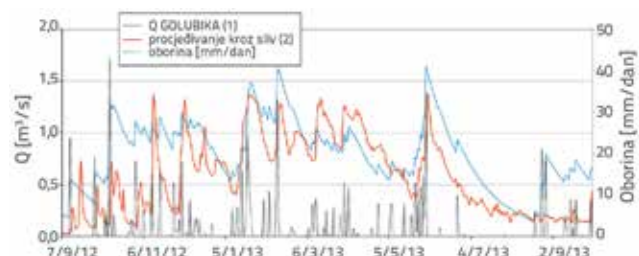
S iz prethodnog pristupa. Vrijednost  $k$  dobivena je temeljem istražnih radova na prostornoj skali probnih zdenaca te iznosi  $2,9 \cdot 10^{-4}$  m/s [17, 18]. S obzirom na to da je odnos  $k$  na prostornoj skali vodonosnika i probnih zdenaca  $k \gg 100$  [4], za potrebe proračuna je usvojena vrijednost  $k = 100 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4}$  m/s =  $2,9 \cdot 10^{-2}$  m/s.



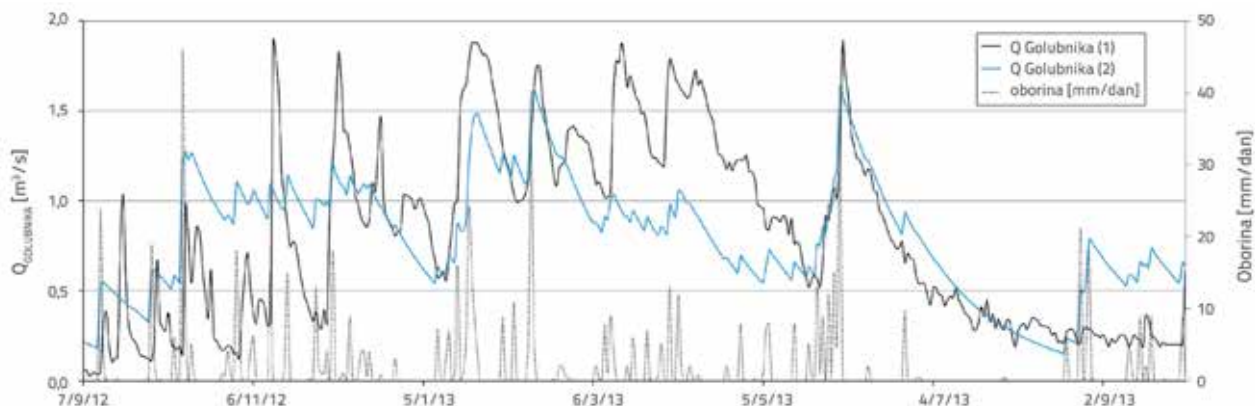
Slika 7. Konceptualni model prema Bharu i Mishrau [19]

Rezultantni hidrogram istjecanja dobiven primjenom ovog pristupa (pristup 2) prikazan je na slici 8., uz hidrogram dobiven prvim pristupom. Pripadni nivogram podzemnih voda prikazan je na slici 9.

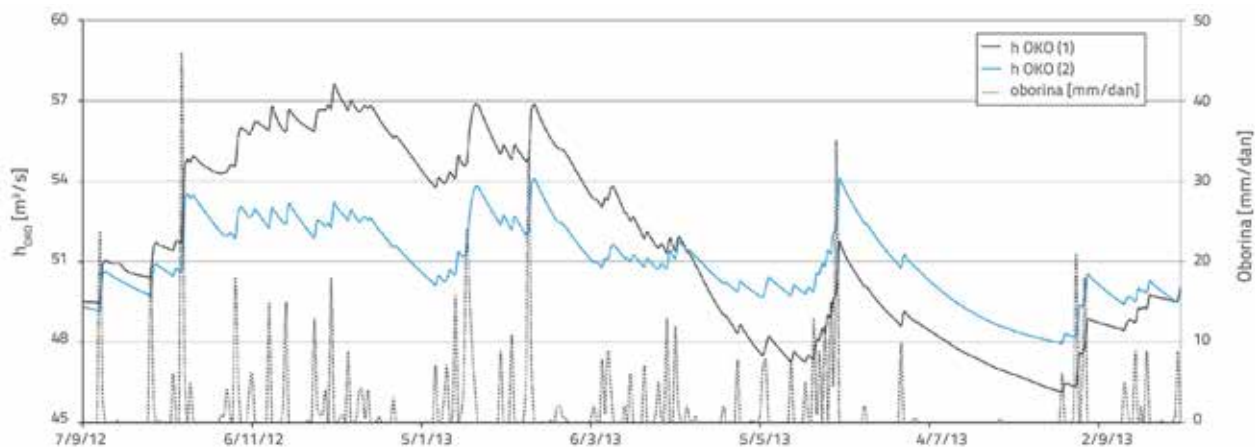
Usvajanjem  $h_1(t)$  sa slike 9. (plava linija) i  $h_2(t)$  sa slike 3. dobiven je vremenski niz procjernih količina kroz sliv Golubinke (slika 10.). U proračunu su korištene iste vrijednosti  $L$ ,  $W_{Oko}$ ,  $W_{Golubinka}$  kao i u prethodno provedenom proračunu vezanom uz pristup 1. Rezultati prikazani na slici 10. su dobiveni korištenjem  $k_{t-Oko} = 1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s (za poziciju Oko) i  $k_{t-GOLUBINKA} = 5,3 \cdot 10^{-2}$  m/s (za poziciju izvora Golubinka).



Slika 10. Vremenski niz procjernih količina kroz sliv Golubinke (strujanja podzemnih voda u vodonosniku) i protoka istjecanja na izvoru Golubinka (pristup 2)



Slika 8. Hidrogram istjecanja za izvor Golubinka u analiziranom razdoblju (pristup 1 i 2)



Slika 9. Nivogram podzemnih voda u analiziranom razdoblju za poziciju Oko (pristup 1 i 2)

## 4. Zaključak

Upotrijebljena su dva pristupa za određivanje hidrograma istjecanja krškog izvora. Prvi pristup uzima u obzir oborinu i limnografske podatke, a drugi koristi samo podatke o oborinama. Iako oba koriste iste ulazne podatke za oborinu, koeficijent infiltracije, efektivnu poroznost, površinu i geometrijske karakteristike sliva, oni rezultiraju različitim hidrogramima istjecanja. Usporedba rezultata upućuje na to da hidrogram istjecanja na izvoru dobiven drugim pristupom značajnije reagira na oborinu. Drugi je pristup također rezultirao ujednačenijim količinama istjecanja s manjim "skokovima" u usporedbi s vrijednostima dobivenim prvim pristupom,

gdje su očita intenzivna i nagla povećanja količine istjecanja. Ti su rezultati u skladu s nivogramom podzemnih voda. Hidrogram izvora Golubinka dobiven prvim pristupom može se poduprijeti rezultatima nelinearnog jednodimenzijskog modela procjeđivanja kroz krški kanal, dok rezultati drugog pristupa sugeriraju znatno nižu korelaciju s nelinearnim modelom procjeđivanja.

Rezultati pokazuju da su primijenjeni pristupi prikladni za procjenu tečenja i razine podzemnih voda, posebno kao preliminarna procjena za daljnju detaljniju analizu, ali i upozoravaju na potrebu terenskih ispitivanja kako bi se prikupili podaci potrebni za kalibriranje modela tečenja podzemnih voda.

## LITERATURA

- [1] Bahun, S.: Geološka osnova zaštite podzemnih voda u kršu (Geological basis for water protection in karst), Geol. vjesnik, 42 (1989), pp. 201-211.
- [2] Moore, C.H.: Carbonate diagenesis and porosity, Development in sedimentology, 46. Amsterdam: Elsevier, pp. 338, 1989
- [3] Kiraly L.: Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaines des caractères physiques des roches karstiques, In: Burger A. and Dubertret L. (Eds), Hydrogeology of karstic terrains, Int. Union of Geol. Sciences, B, 3 (1975), pp.53- 67.
- [4] Cook, P.G.: A guide to regional groundwater flow in fractured aquifers, CSIRO Land and Water, Seaview Press, Henley Beach, South Australia, pp. 108, 2003.
- [5] Mangin, A.: Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse, Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon, 1975.
- [6] Kresic, N.: Hydrogeology and groundwater modeling, Second edition, CRC Press, 2006
- [7] Kuk, V., Prelogović, E., Dragičević, I.: Seismotectonically active zones in the Dinarides, Geol. Croatica, 53 (2000) 2, pp. 295–303.
- [8] Majcen, Ž., Korolija, B.: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Zadar L33–139 (Basic Geological Map of the SFRY, scale 1:100.000, Zadar Sheet), Institut za geološka istraživanja Zagreb (1963–1969), Savezni geološki zavod, Beograd, 1973.
- [9] Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I., Matičec, D.: Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 220 (2005), pp. 333–360, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.01.011>
- [10] Fritz, F., Pavičić, A.: The Boljkovac spring, Croatia – a case of the overexploitation of a karst spring, XXIII I.A.H. Congress "Aquifer overexploitation", Proceedings, Canary Islands, Spain, pp. 515–518, 1991.
- [11] Fritz, F.: Ravni kotari–Bukovica, Hidrogeološka studija (Ravni Kotari–Bukovica, Hydrogeological study), Unpublished report, Archive of the Croatian Geological Survey, Zagreb, pp. 134, 1976.
- [12] Žugaj, R.: Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske (Regional Hydrological Analysis in Croatian Karst), Croatian Hydrological Society, Zagreb, 139 p., 1995.
- [13] Bonacci, O.: Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 46 (2001) 2, pp. 287-299, <https://doi.org/10.1080/02626660109492822>
- [14] Katsanou, K., Maramathas, A., Lambrakis, N.: Simulation of Karst Springs Discharge in Case of Incomplete Time Series, Water Resour Manage, 29 (2015), pp. 1623-1633, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0898-2>
- [15] IGH: Vodoistražni radovi na području Zadra – Istražno bušenje, IZV-13-015, 2013.
- [16] Kovács, A.: Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: a hydrodynamic modeling approach, 1–131, PNR61, DN\_Haute\_Ajoie, 2003.
- [17] Geotehnika: Vodoistražni radovi Zadar, Knjiga II – Crpljenja i saliniteti, 1968.
- [18] Geotehnika: Vodoistražni radovi Zadar, Knjiga III - Vodostaji, 1968.
- [19] Bhar, A.K., Mishra, G.C.: One-dimensional springflow model for time variant recharge, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 42 (1997) 3, pp. 381-390, <https://doi.org/10.1080/02626669709492035>