

HIDRODINAMIČKA ANALIZA OPRAVDANOSTI UTISKIVANJA NOVIH DRENOVA NA VEĆOJ DUBINI NA BUNARIMA BEOGRADSKOG IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA

Đorđije BOŽOVIĆ
JKP Beogradski vodovod i kanalizacija
Dušan POLOMČIĆ, Dragoljub BAJIĆ
Rudarsko–geološki fakultet u Beogradu

REZIME

U uslovima kada je izdan predstavljena policikličnim fluvijalnim sedimentima koji se međusobno razlikuju u pogledu litološkog sastava, obezbeđenje optimalnih uslova eksploatacije podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima se postiže formiranjem drenova u litostratigrafskom sloju najpovoljnijih hidrogeoloških odlika u profilu izdani (granulometrijskog sastava i filtracionih karakteristika). U slučaju beogradskog izvorišta podzemnih voda, drenovi po pravilu nisu utisnuti u ovom sloju, što je u određenoj meri uticalo na intenzivno opadanje kapaciteta bunara tokom vremena eksploatacije. Detaljnim hidrodinamičkim modelima je kvantifikovan potencijal lokacije dva analizirana bunara u pogledu raspoloživih količina podzemnih voda i simulirani različiti scenariji sanacije bunara: formiranje novih drenova na postojećoj i na nižoj koti. Utiskivanjem novih drenova na većoj dubini stižu se uslovi za potpuno iskorišćenje potencijala vodonosne sredine u pogledu eksploatacije podzemnih voda. Utvrđeno je da bi u tom slučaju, zahvatanje podzemnih voda bilo veće, a hidraulički uslovi rada bunara povoljniji.

Ključne reči: bunari sa horizontalnim drenovima, obnavljanje drenova, hidrodinamički model, MODFLOW–USG, CLN paket

UVOD

U poslednjoj deceniji, na izvorištu podzemnih voda Beograda realizovana su istraživanja koja su omogućila detaljno upoznavanje stanja vodozahvatnih objekata, geološke građe i hidrogeoloških odlika fluvijalnih naslaga kvartarne starosti u kojima je formirano izvorište, kao i najvažnijih pojava i procesa prisutnih u

izdani koju kaptiraju bunari, a koji dovode do opadanja kapaciteta (*Dimkić et al., 2011; Zorić et al., 2011; Oparušić & Božović, 2011; Dimkić & Pušić, 2014*).

Zahvaljujući ovim istraživanjima, danas je poznato da na većem broju bunara drenovi nisu formirani u delu profila najpovoljnijeg granulometrijskog sastava i filtracionih karakteristika, odnosno da su utisnuti nedovoljno duboko u okviru kaptirane izdani. Ovakva konstrukcija bunara predstavlja određeno ograničenje u ostvarivanju zadovoljavajućih kapaciteta prilikom zamene dotrajalih drenova, obezbeđenju stabilnosti kapaciteta tokom vremena eksploatacije i minimalizovanju efekata procesa starenja vodozahvatnih objekata.

Božović et al. (2016a) su predložili da se rešenje ograničenja konstrukcije bunara (plitko utisnutih drenova) može tražiti u inoviranoj metodi utiskivanja drenova na većoj dubini u odnosu na dubinu na kojoj su formirani prvobitni drenovi (u međuvremenu degradirani), koja se duže od decenije uspešno primenjuje u Budimpešti.

Na budimpeštanskim izvorištima podzemnih voda se plitki kopani bunari velikog prečnika, na kojima su naknadno utisnuti horizontalni drenovi, rekonstruišu tako što se izvrši probijanje betonskog dna bunara, zatim se hidrauličkim otkopavanjem materijala vodonosne sredine ispod dna bunarskog šahta sve do vodonepropusne podine (uz istovremeno opterećenje sa površine terena) vrši ugradnja novog šahta manjeg prečnika unutar starog šahta. Novi šaht se ugrađuje:

- celom debljinom izdani (od površine terena sve do podine), prema tehnologiji sanacije/rekonstrukcije nazvanoj „bunar u bunaru“, ili

- bunar može dobiti teleskopsku konstrukciju, ugradnjom novog šahta manjeg prečnika samo u produbljenom intervalu.

Izrada bunara sa horizontalnim drenovima koji imaju teleskopsku konstrukciju (jednu ili više promena prečnika bunarskog šahta) je bila poznata u praksi izrade ovog tipa vodozahvatnih objekata i pre inovirane „budimpeštanske“ metode. Ilustrativan je primer bunara u Torinu (Italija), kod kojeg betonski šaht do dubine od 44 m ima tri prečnika (*Babac & Babac, 2008*).

Bez obzira na odabranu tehnologiju rekonstrukcije vodosabirnog šahta, na kraju postupka se iz novog šahta vrši utiskivanje drenova u okviru sedimenata najpovoljnijih hidrogeoloških odlika. U izdanima formiranim u kvartarnim sedimentima složene fluvijalne geneze, po pravilu su to tvorevine najdublje, tj. najstarijeg litostratigrafskog sloja.

Namera autora rada je bila da na primeru dva bunara sa horizontalnim drenovima beogradskog izvorišta podzemnih voda (RB-7m i RB-46), predstave postupak detaljne analize uslova prisutnih u neposrednoj zoni bunara u cilju definisanja optimalnog rešenja njihove sanacije, zadržavajući se pri tom na hidrodinamičkom aspektu režima izdani u zoni uticaja bunara.

Budući da izdan beogradskog izvorišta podzemnih voda odlikuju značajan genitet i tropija filtracionih karakteristika, kao posledica litofacijalnog sastava kompleksne geneze, pozitivni rezultati sanacije bunara zavisiće od uspešnosti identifikacije i analize relevantnih uticaja. Zbog toga je potrebno ukazati na neutemeljenost usvajanja i primene bilo kakvog univerzalnog rešenja sanacije bunara (kao što je to bio slučaj prilikom njihove izgradnje) i periodične regeneracije. Neophodno je da se primenom saznanja i metoda istraživanja aktuelnih u domaćoj i svetskoj hidrogeološkoj praksi, pojedinačno za svaki od bunara dođe do jedinstvene „formule uspeha“ njegove sanacije.

GEOLOŠKA GRAĐA BEOGRADSKOG IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA

Teren beogradskog izvorišta podzemnih voda pripada južnom obodu Panonskog basena, tj. području kontakta Panonskog basena sa peripanonskim, blago brdovitim terenom (*Marović et al., 2002*). Povlačenje Paratetisa tokom mlađeg pliocena i starijeg kvartara (uslovljeno usecanjem klisure Dunava) je dovelo do smanjenja količine voda u „paludinskim jezerima“ (*Nenadić et al., 2010*), zbog čega je široka oblast južnog oboda basena

prošla kroz kopnenu fazu razvoja. Nju su obeležile sedimentacija i zapunjavanje tektonski predisponiranih depozicionih basena, kao dominantan faktor oblikovanja terena (*Toljić et al., 2014*).

Krajem pliocena i tokom donjeg i srednjeg pleistocena kontinuirano se odvijalo izdizanje horsta Fruške Gore i najsevernijih delova Šumadije (beogradskog pobrđa) (*Čalić et al., 2012*). Ono je praćeno istovremenim spuštanjem tektonskog rova Save između dve strukture. Najznačajnija neotektonska struktura u zoni beogradskog izvorišta podzemnih voda je Kalemegdanski rased. U pitanju je složeni rased koji čini asocijacija ešaloniranih raseda pružanja SI-JZ (gotovo paralelno sa savremenim koritom Save), koji se protežu od Kalemegdana do Obrenovca i dalje prema jugozapadu (*Toljić et al., 2014*).

Kao rezultat tektonskih kretanja, ali i jednako značajnih paleoklimatskih uslova tokom pleistocena, na širem prostoru jugoistočnog Srema, kojem pripada i teren beogradskog izvorišta podzemnih voda, došlo je do formiranja policikličnih pleistocenskih naslaga značajne debljine.

Stratigrafskom korelacijom stubova bušotina izvedenih po trasi novog mosta preko Ade Ciganlije, *Knežević et al., (2012)* su utvrdili da su prekvarterne tvorevine razbijene po Kalemegdanskom rasedu na više blokova, koji spuštani u pravcu S-SZ. Zbog toga je došlo do kaskadnog spuštavanja starijih geoloških tvorevina na levij obali Save u odnosu na desnu obalu. Na račun subsidencije starijih stena, u istom smeru se povećava debljina kvartarnih postbasenskih tvorevina.

Najstarije stene i duboki paleoreljef na području savremene aluvijalne ravni Save čine fliševi gornjokredno-paleogene starosti. Lokalno, u zonama složene strukturne građe, preko fliševa diskordantno leže miocenske tvorevine Paratetisa. One su predstavljene badenskim krečnjacima u zoni ušća Save u Dunav (*Rundić et al., 2011*), sarmatskim konglomeratima i brečama, krečnjacima, peskovitim krečnjacima i peščarima, kao i panonskim laporcima i laporovitim glinama.

Kvartarni sedimenti u priobalju Save imaju debljinu 20–30 m. Predstavljani su tipičnim rečnim tvorevinama, u kojima se mogu izdvojiti dve stratigrafske jedinice:

- policiklični rečni sedimenti starijeg pleistocena i
- holocenski sedimenti savremenog toka reke Save i njenih pritoka.

Na gotovo celom prostoru izvorišta, najstariji kvartarni sedimenti diskordantno leže preko panonskih sedimenata, tako da predstavljaju povlatu panonu i podinu pleistocenskim rečnim tvorevinama. Litološki sastav i oskudnost paleontološkog zapisa ukazuju da su tvorevine najstarijeg kvartara nastale u plitkim, akvatičnim depozicionim sredinama (jezerima i barama) koje su povremeno presušivale. Litološki, predstavljene su glinama i prašinstim glinama. U njima se često javljaju pojave oolita, sočiva mangana i oksida gvožđa, sa konkcijama kalcijum karbonata (Nenadić *et al.*, 2015), zbog čega se nazivaju i „šarene gline“. Debljina im je određena na osnovu nekoliko dubljih istražnih bušotina i kreće se preko 100 m na području Bežanije i Zemuna (neposredno izvan severne granice izvorišta, prema Nenadić *et al.*, 2009).

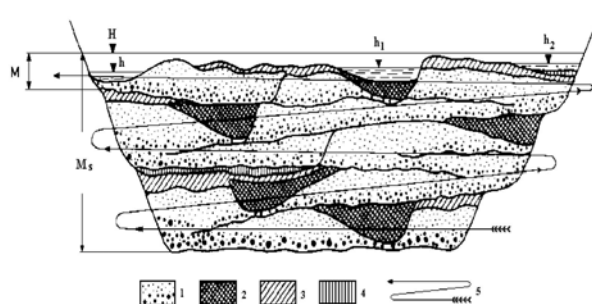
Eksploatacija podzemnih voda bunarima beogradskog izvorišta je vezana stariji, donjopleistocenski deo profila kvartarnih naslaga, koji se paleontološki jasno razlikuje od mlađeg, holocenskog.

Sedimentacija donjopleistocenskih naslaga se odvijala u prostranoj dolini snažnog meandrirajućeg paleo toka reke Save u vreme tople, odnosno umerene klimatske faze (Gaudenyi *et al.*, 2015). Kako je geneza pleistocenskih naslaga vezana za fazu aktivnih tektonskih pokreta (višestrukog spuštanja dna basena i brzog taloženja materijala sa okolnih padina), u pleistocenskim sedimentima je prisutno ciklično smenjivanje sedimentata različitog litološkog sastava. Prema Rakiću (1977), slika 1, „višekratno smenjivanje šljunkovito–peskovitih i alevritičnih naslaga govori o specifičnoj ritmičkoj ili policikličnoj sedimentaciji koja predstavlja glavnu odliku reka koje su dostigle tzv. kontrativnu dinamičku fazu“ (na osnovu Teorije o dinamičkim fazama ruskih reka umerenog pojasa, autora J.V. Shantser, 1951).

U zoni beogradskog izvorišta podzemnih voda identifikovana su tri ciklusa sedimentacije pleistocenskih naslaga. Zajedničko za sve cikluse je da se po pravilu u bazi nalaze sedimenti facije korita, šljunkovito–peskovitog sastava, koji sa smanjenjem dubine prelaze u peskove različite krupnoće zrna sa određenim sadržajem sitnijeg šljunka ili prašine.

Kao završni članovi svakog od ciklusa sedimentacije prisutni su sedimenti facije povodnja ili mrtvaja. Oni se javljaju obično u vidu sočiva i proslojaka. Ograničenog su horizontalnog rasprostranjenja, a u pogledu litološkog sastava predstavljeni su alevritskim glinama, alevritima i muljevima. Njihova debljina može biti do 3

m. Lokalno, umesto fino-zrnih klastita, mogu biti zastupljeni glinci, laporci, peščari ili konglomerati (obično centimetarske debljine). Neretko se istražnim bušenjem konstatuje da neki od ciklusa nije zastupljen, odnosno da su oni nepotpuni, što se može objasniti intenzivnom erozijom baze na početku naredne faze razvoja rečnog korita.



Slika 1. Model kontrativne dinamičke faze (Rakić 1977, Shantser 1951)

Objašnjanje: 1. aluvijum rečnog korita; 2. aluvijum starača; 3. aluvijum povodnja; 4. sedimenti sekundarnih basena; 5. pravac migracije korita; H – nivo povodanjskih voda; h – srednji nivo u koritu; h_1 , h_2 – srednji nivoi u staračama i sekundarnim basenima; M – normalna debljina aluvijuma; M_s – ukupna debljina aluvijuma.

Sedimenti holocena čine mlađu formaciju rečnih naslaga. Deponovani su diskordantno preko sedimenata donjeg pleistocena (u savremenoj dolini Save), budući da su sitnozrne naslage srednjeg i gornjeg pleistocena prethodno intenzivno erodovane u fazi stvaranja korita holocenske reke. Iz ovog razloga se u terenu javlja promenljiva debljina starih policikličnih i recentnih rečnih naslaga. Prosečna debljina holocenskih naslaga se kreće oko 12 m (generalno od 10–15 m). I u okviru paketa sedimenata holocena se mogu izdvojiti dve litofacijalne celine:

- sedimenti facije korita i
- sedimenti facije povodnja.

Sedimentima korita pripada stariji deo depozicionog paketa, koji je izgrađen od šljunkovitih peskova i peskovitih šljunkova u donjem delu i od sitnozrnih i prašinstih peskova u gornjem delu.

Sedimenti povodnja prekrivaju čitavu površinu terena savremene aluvijalne ravni Save (sa izuzetkom veštački nasutih urbanih površina na Novom Beogradu). Čine ih prašine, prašinsti peskovi, prašinsti i sitnopeskovite gline i gline.

HIDROGEOLOŠKE ODLIKE KAPTIRANE IZDANI NA BEOGRADSKOM IZVORIŠTU PODZEMNIH VODA

Kaptirana zbijena izdan je formirana u pleistocenskim i holocenskim sedimentima, odnosno u klastičnim stenama izgrađenim od najrazličitijih granulacija šljunkova, peskova i alevrita. Dominantan uticaj na filtraciona svojstva rečnih naslaga ima njihov granulometrijski sastav.

Iako se geološka sredina odlikuje složenim litofacijalnim i granulometrijskim sastavom, na osnovu brojnih rezultata istražnog bušenja (kartiranja nabušenih sedimenata i granulometrijskih analiza) moguće je vršiti određeno unificiranje. Ono se sastoji u determinaciji, paralelizaciji i prostornom povezivanju litostratigrafski srodnih članova, koji mogu imati kontinualno ili ograničeno rasprostranjenje u okviru mikro (okolina jednog bunara) ili makro razmere posmatranja (prostor sektora izvorišta). Na ovaj način, upotrebom savremenih računarskih alata, omogućeno je kreiranje trodimenzionalnog geološkog modela analiziranog dela terena sa detaljnom geometrijom litostratigrafskih članova (slojeva, proslojaka ili sočiva).

Šematizovanim litostratigrafskim članovima modela se zatim dodeljuju hidrogeološka svojstva, čime geološki modeli postaju hidrogeološki modeli (slika 2). Oni služe za sagledavanje prostornih odnosa slabijepropusnih i vodonosnih sedimenata, za analizu uslova prihranjivanja tako što se na modelu nanose podaci o geometriji rečnog korita Save (dubini usecanja u sedimente), za analizu uslova rada bunara na osnovu podataka o vertikalnoj devijaciji drenova u odnosu na litološke slojeve. Hidrogeološki modeli predstavljaju podlogu, konceptualni model, za izradu hidrodinamičkih modela.

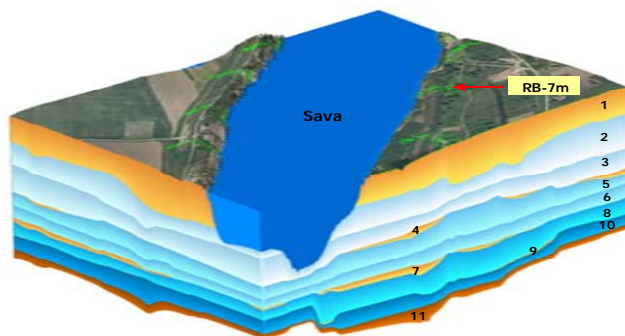
Potpuno razviće kvartarnih naslaga u granicama izvorišta se sastoji od 11 hidrogeološko-litostratigrafskih članova (Zorić *et al.*, 2011; Božović *et al.*, 2015). Idući od površine terena, holocenskim tvorevinama pripadaju prva tri člana u vertikalnom preseku terena (1–3). Prvi član je slabijepropusna povlata, prosečne debljine oko 5 m, koja pruža dobru zaštitu izdani od zagađenja sa površine terena. Drugi i treći član su sedimenti facije korita, koji se međusobno razlikuju u pogledu litološkog sastava.

Četvrti, sedmi i deveti član (tzv. „međusloj“) predstavljaju završne faze sedimentacije svakog od tri pleistocenska ciklusa taloženja. Prisustvo ovih litoloških članova je od najvećeg značaja za hidrodinamičke

uslove rada bunara sa horizontalnim drenovima. Oni imaju svojstva slabijepropusnih do nepropusnih stena zbog čega, u slučaju kontinualnog ili značajnijeg rasprostranjenja u zoni lepeze drenova, stvaraju otpor filtraciji podzemnih voda prema drenovima i otežavaju uslove eksploatacije podzemnih voda.

Svi ostali slojevi (peti, šesti, osmi i deseti) predstavljaju sedimente facije korita i imaju svojstva vodopropusnih stena. Njihove litološke i filtracione karakteristike mogu značajno varirati čak i na malom prostoru (u zoni lepeze drenova jednog bunara).

Budući da je formacija jezersko-barskih „šarenih glina“ plio–pleistocena izgrađena dominantno od glina i prašinih glina znatne debljine, one u hidrogeološkom smislu predstavljaju vodonepropusnu podinu i donju granicu kvartarne izdani koju kaptiraju bunari beogradskog izvorišta. Geometrijske karakteristike ovog sloja su na hidrogeološkom modelu prikazane pod brojem 11.



Slika 2. 3D hidrogeološki model šire zone bunara RB–7m sa prikazom šematizovanih hidrogeoloških članova

Legenda:

1. povlata, slabije propusni prašinato–glinoviti sedimenti; facija povodnja.
2. vodonosni, pretežno peskoviti sedimenti; facija korita.
3. vodonosni, peskovito–šljunkoviti sedimenti; facija korita.
4. slabo propusni glinovito–prašinski sedimenti „međusloja“, lokalnog rasprostranjenja; facija povodnja.
5. vodonosni sloj, sitnozrni do srednjozrni peskovi sa manjim sadržajem šljunka, facija korita.
6. vodonosni sedimenti, peskovito–šljunkovitog litološkog sastava; facija korita.
7. „međusloj“, lokalnog rasprostranjenja, facija povodnja.
8. vodonosni sloj, sitnozrni do srednjozrni peskovi sa manjim sadržajem sitnijeg šljunka; facija korita.
9. „međusloj“, lokalnog rasprostranjenja, facija povodnja.
10. vodonosni, peskovito–šljunkoviti sedimenti; facija korita.
11. podina kaptirane izdani, glinovito–prašinski sedimenti.

OSNOVNE INFORMACIJE O ANALIZIRANIM BUNARIMA RB-7M I RB-46

Analizirani bunari RB-7m i RB-46 su izgrađeni na nizvodnom sektoru beogradskog izvorišta (nizvodno od Ostružničkog mosta). U pitanju su tipični vodozahvatni objekti sa horizontalnim drenovima, koji se sastoje od nadzemne konstrukcije, bunarskog šahta i drenova. Iz šahta je utisnuto po 8 drenova, prosečne dužine oko 55 m, od čega početnih 10 m čini puna cev. Drenovi prečnika 0,2 m su utisnuti po modifikovanoj (tzv. „beogradskoj“) Reni metodi, sa slotovanim filterskim cevima i sa perforacijama dimenzija 80x6 mm.

Drenovi oba bunara su fizički degradirani zbog čega je došlo do prodiranja materijala vodonosne sredine unutar drenova, a usled toga i do njihovog značajnog skraćenja. Na bunaru RB-7m, 4 drena su zatvorena već duže vreme, dok su 4 preostala drena u funkciji, ali su zasuti materijalom sredine u toj meri, tako da prilikom inspekcije stanja drenova podvodnom kamerom nisu mogli biti snimljeni u dužini većoj od nekoliko metara. Na bunaru RB-46 u funkciji je 6 drenova, koji su, takođe, zasuti već u punoj cevi. Kao posledica ovakvog stanja vodoprijemnih delova, kapaciteti bunara su već dugi niz godina manji od 20 l/s.

HIDRODINAMIČKA ANALIZA POSTOJEĆEG REŽIMA EKSPLOATACIJE PODZEMNIH VODA

Hidrodinamička analiza režima podzemnih voda u zoni uticaja bunara RB-7m i RB-46 je sprovedena kroz izradu hidrodinamičkog modela režima izdani. Cilj hidrodinamičkih istraživanja je bio da se putem izrade detaljnih hidrodinamičkih modela kvantifikuje kapacitet lokacije bunara u pogledu količina podzemnih voda koje se mogu zahvatiti i da se analiziraju različite varijante u pogledu dubine utiskivanja drenova u cilju optimalnog rešenja sanacije.

Za svaki od analiziranih bunara formiran je po jedan hidrodinamički model na kojem su analizirani ostvareni uslovi režima podzemnih voda za relativno dug vremenski period. Budući da je za bunar RB-46 prethodno bio verifikovan hidrodinamički model (Božović *et al.*, 2015), ista koncepcija izrade modela je primenjena i na modelu bunara RB-7m. Iz tog razloga se rezultati kalibracije modela bunara RB-46 u postojećim uslovima eksploatacije u ovom radu neće ponavljati, već će za ovaj bunar biti predstavljeni rezultati prognoznih proračuna u uslovima zamene starih, dotrajalih drenova. U slučaju bunara RB-7m, analiziran je period od 1.1.2012. do 31.05.2016. Jedan

proračunski vremenski period je bio trajanja 5 dana, što znači da model ima ukupno 323 „stres perioda“.

Formiranje konceptualnog modela, diskretizacija prostora obuhvaćenog modelom, diskretizacija vremena, zadavanje graničnih uslova i interpretacija rezultata modela je izvršena u interfejs softveru Groundwater Vistas, verzija 6.79 (Rumbaugh & Rumbaugh, 2011). Numerički proračuni su realizovani putem savremenog MODFLOW-USG koda (Panday *et al.*, 2013).

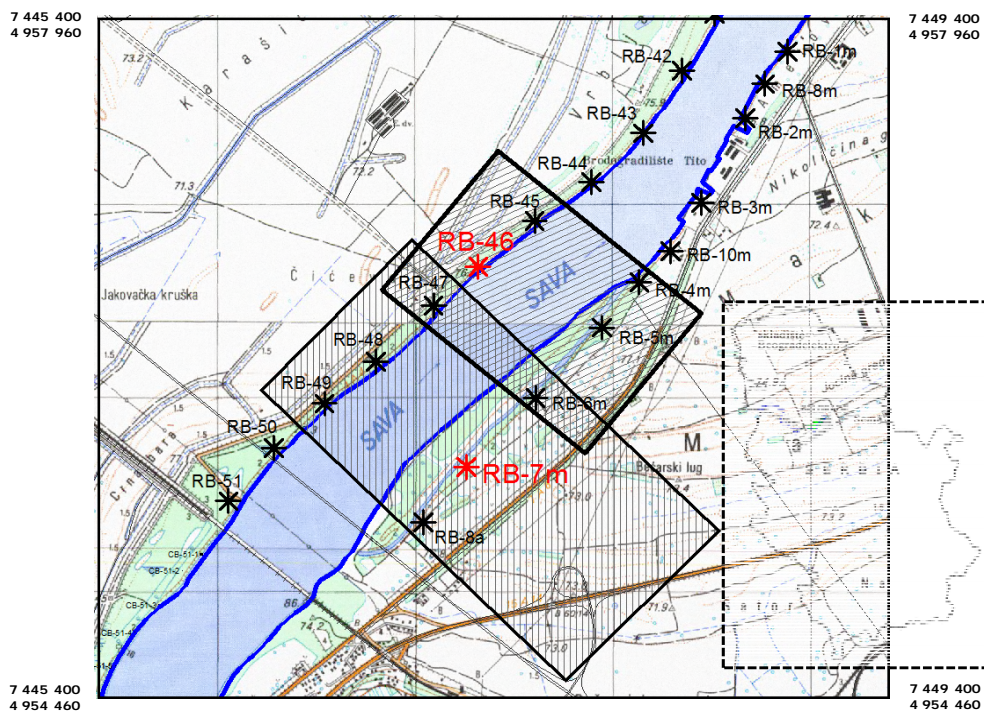
Prostor modela je diskretizovan mrežom kvadrata promenljivih dimenzija, u skladu sa metodom konačnih zapremina na kojoj se zasniva programski kod MODFLOW-USG. Osnovna polja su dimenzija 32x32 m. Poguščavanje je izvršeno u zoni lepeze drenova bunara preko umetnute nepravilne mreže (*quadtree refinement* opcije). Polja su u zoni bunara umanjena do dimenzija 2x2 m.

Pri izradi hidrodinamičkog modela upotrebljeni su sledeći granični uslovi: reka, uslov opšteg pijezometarskog nivoa, konstantan nivo i dren (bunara sa horizontalnim drenovima).

Elementi vertikalnog bilansa su zanemareni u formiranim hidrodinamičkim modelima. Autori su mišljenja da je ovakav pristup opravdan ako se ima u vidu da deo istražnog prostora pripada površini vodnog ogledala Save i da je vodonosna sredina prekrivena debelim slabopropusnim povlatnim slojem koji delimično onemogućava prihranjivanje analiziranih delova izdani infiltracijom atmosferskih taloga u okvirima detaljnih modela.

Budući da su postojali podaci o geometriji korita reke Save, još je u fazi izrade hidrogeološkog modela definisana usečenost rečnog korita u hidrogeološke slojeve i kao takva je šematizovana na konceptualnom hidrogeološkom modelu. Izlivanje reke iz korita prilikom visokih vodostaja nije predstavljeno na modelu jer je simulirani period obeležio nizak vodostaj, sa izuzetkom perioda poplava na Savi tokom aprila i maja 2014. godine, koje na vodomernom profilu kod Beograda nisu bile izražene. Graničnim uslovom **Reka** je simuliran i obližnji rukavac, paralelan sa rekom, sa kojom je u hidrauličkoj vezi.

Opštim pijezometarskim nivoom (Anderson & Woessner, 1992) su simulirani vremenski promenljivi uslovi (pijezometarski nivoi) na spoljnim konturama modela. Položaj ovog graničnog uslova je određen na osnovu položaja osmatračkih objekata u zaleđu



Slika 3. Položaj analiziranih bunara u okviru dela nizvodnog sektora beogradskog izvorišta podzemnih voda sa granicama hidrodinamičkih modela

bunarskog niza na levoj, kao i na desnoj obali reke (slika 3). Nivoi su zadati u skladu sa oscilacijama nivoa izdani registrovanim u pijezometrima koji se nalaze izvan zone uticaja bunara, kao i na osnovu analize gradjenata nivoa podzemnih voda iz pravca zaleđa prema bunarima.

Modelom su obuhvaćeni praktično svi registrovani ili potencijalni izvori uticaja na analizirane bunare. Zbog toga su na modelu zadati susedni bunari, po jedan nizvodno i uzvodno od bunara RB-7m, odnosno bunara RB-46, kao i po tri bunara na suprotnoj obali. Oni su predstavljeni nižim nivoom detaljnosti – preko graničnog uslova **konstantnog nivoa** u diskretnim poljima u kojima se realno nalazi lepeza drenova bunara. Broj modelskih ćelija u kojima su zadati okolni bunari je bio u funkciji kapaciteta bunara, odnosno stanja i dužine drenova na svakom od njih. Konstantni nivoi su vremenski promenljivi, u skladu sa merenjima nivoa u bunarskom šahtu.

Za simulaciju drenova analiziranih bunara RB-7m i RB-46 je upotrebljena napredna verzija CLN programskog paketa (Connected Linear Network Package). Izbor vrste graničnog uslova kojim su simulirani drenovi je bio uslovljen raspoloživim

podacima o eksploataciji podzemnih voda, tj. hidrodinamičkom mehanizmu prema kojem se ona odvija u realnim uslovima (Božović et al., 2016b). U tom smislu, dostupni su bili podaci o nivou podzemnih voda u bunarskom šahtu, kapaciteti bunara i podaci o registrovanim nivoima podzemnih voda u zoni bunara.

Upotrebom CLN paketa se realno simuliraju hidrodinamički uslovi, tj. eksploatacija podzemnih voda preko bunara sa horizontalnim drenovima. Za pijezometarski nivo u unutrašnjosti drenova se smatra da je ekvivalentan nivou u bunarskom šahtu, što je zadovoljavajuća pretpostavka u kontekstu rešavanja praktičnih zadataka. Otpor kretanju vode u unutrašnjosti drenova je zanemaren u sprovedenoj hidrodinamičkoj analizi, budući da su Dahlstrom et al., (2015) izvestili da se simulacijom turbulentnih uslova strujanja vode unutar drenova, sa otporom na račun trenja o zidove filterskih cevi, kapacitet realnog analiziranog bunara redukuje za svega oko 1,5%. Imajući u vidu fizičko stanje drenova na analiziranim bunarima, kao i to da se kapaciteti bunara na beogradskom izvorištu mere zapreminskom metodom (za greške koje nastaju u merenju se smatra da su reda $\pm 5\%$ Q), nije bilo potrebno težiti većem stepenu detaljnosti, niti su za to postojale odgovarajuće podloge.

Bunarski šaht i drenovi su zadati u skladu sa realnom geometrijom, što znači da su drenovi na modelu predstavljeni sa utvrđenim vertikalnim devijacijama. Filterske cevi su prečnika 0,2 m, dok su njihove dužine morale biti pretpostavljene na modelu, budući da se nije raspolagalo tačnim podacima (drenovi su zapunjeni materijalom sredine u toj meri da ih nije bilo moguće snimiti podvodnom kamerom u stvarnoj dužini). Zbog toga su svi otvoreni drenovi na hidrodinamičkom modelu bunara RB–7m predstavljeni početnim dužinama (oko 50 m).

Svi hidraulički gubici koje se javljaju na filterskoj konstrukciji i u prifilterskoj zoni su predstavljeni i kvantifikovani preko koeficijenta propusnosti drenova [K_{prif}/d], prema Polomčić *et al.*, 2016 (gde su: K_{prif} – koeficijent filtracije prifilterske zone drena, d – debljina prifilterske zone).

Kalibracija modela je vršena primenom „trial and error“ metode, sve dok nije postignut zadovoljavajući stepen saglasnosti računskih kapaciteta i nivoa podzemnih voda sa registrovanim vrednostima. Rezultati su predstavljeni tabelarnim prikazom bilansa bunara RB–7m, kao i dijagramom oscilacija nivoa podzemnih voda u jednom od tri pijeziometra u zoni drenova (slika 4).

Postignute razlike između izmerenih i proračunskih kapaciteta bunara na kraju postupka kalibracije modela su zadovoljavajuće (manje od 1 l/s), osim u slučaju jednog od ukupno 9 merenja kapaciteta u višegodišnjem periodu obuhvaćenom analizom (tabela 1).

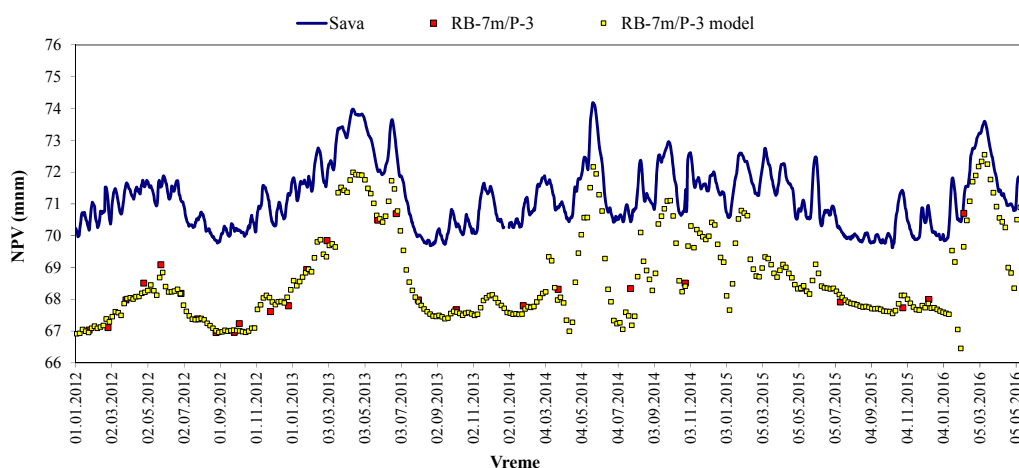
Najveći uticaj na stepen greške u sprovedenoj simulaciji je imao rukavac, koji se nalazi neposredno uz liniju bunara RB–8a do RB–5m i koji je usečen u vodopropusne sedimente facije korita (hidrogeološko–litolološki član 2 na slici 2). Podaci o oscilacijama nivoa vode u pijeziometrima nisu činili dovoljan element za detaljnije upoznavanje njegove hidrauličke uloge. Utisak je da je ona vrlo delikatna.

Kalibracijom modela došlo se do reprezentativne vrednosti koeficijenta propusnosti naslaga na dnu rečnog korita, $K_{\text{reka}}/d_{\text{reka}}=3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (K_{reka} : koeficijent filtracije sedimenata na dnu rečnog korita i d_{reka} : debljina naslaga na dnu korita).

Kalibracijom modela dobijene su i reprezentativne vrednosti koeficijenta propusnosti drenova, čime pretpostavljena dužina drenova postaje hidraulički ekvivalentna realnoj.

Tabela 1. Rezultati bilansa bunara RB–7m

Datum merenja	Kapacitet bunara (l/s)		
	mereno (l/s)	model (l/s)	ΔQ (l/s)
26.04.2012.	18,0	17,7	0,3
15.10.2012.	18,0	16,2	1,8
27.05.2013.	19,6	19,9	-0,3
24.10.2013.	16,0	15,9	0,1
27.02.2014.	20,0	20,1	-0,1
04.11.2014.	23,2	23,8	-0,6
07.04.2015.	20,9	20,7	0,2
01.09.2015.	12,0	12,0	0,0
17.05.2015.	15,3	15,4	-0,1



Slika 4. Rezultat kalibracije hidrodinamičkog modela, pijeziometar RB–7m/P–3

Koeficijent propusnosti je isti za sva tri drena koji učestuju u eksploataciji i iznosi: $K_{\text{prif}}/d=2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Ovakav pristup, uslovljen objektivnim nedostatkom podataka o realnom stanju, nema naročiti uticaj na tačnost rezultata modela jer se bilans modela i sa pretpostavljenim dužinama drenova može „zatvoriti“ isključivo definisanjem reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije izdani u neposrednoj zoni bunara i naročito u sloju u kojem se nalaze drenovi. Navedeno pokazuje opravdanost primene CLN paketa u simulaciji bunarskih drenova.

Kroz proces kalibracije hidrodinamičkih modela dobijene su reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije svakog sloja i proslojka kojim je predstavljen deo geološke sredine. Najznačajnije je bilo definisati filtracione karakteristike vodonosnih sedimenata u neposrednoj zoni bunara, a među njima posebno sloja u kojem su utisnuti drenovi. Tako je za bunar RB-7m dobijeno da u sloju u kojem se nalaze postojeći drenovi, koeficijent filtracije ima vrednost $K_f=2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Anizotropija nije izražena. U zoni bunara RB-46 koeficijent filtracije ima vrednost $K_f=1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Filtracione karakteristike oko ovog bunara dodatno pogoršava anizotropija koja je određena odnosom: $K_z=0,3 \times K_{x,y}$.

PROGNOZNI VARIJANTNI HIDRODINAMIČKI PRORAČUNI

Prognozni proračuni za oba analizirana bunara su urađeni za dve varijante utiskivanja novih drenova:

- na postojećoj koti i
- na koti na kojoj je rezultatima istražnog bušenja i granulometrijskih analiza najperspektivnije utisnuti nove drenove.

U prvoj varijanti drenovi na bunaru RB-7m su simulirani na sadašnjoj koti 51,50 mnm, a u drugoj 3 m ispod sadašnje kote, tj. na koti 48,50 mnm. Na modelu bunara RB-46 drenovi su u prvom koraku simulirani na postojećoj koti 52,40 mnm, a potom na koti 50,00 mnm.

Analiza je urađena tako da je na modelu bunara RB-7m simulirano 5 novih drenova dužine po 30 m. Od toga prvih 5 m čini puna cev, a 25 m pripada filterskoj konstrukciji. Jedan dren je usmeren prema zaleđu, dok su 4 drena prema Savi, odnosno kanalu.

Simulirani uslovi utiskivanja novih drenova na bunaru RB-46 su podrazumevali 6 novih drenova dužine 50 m, sa takvim rasporedom da su 4 drena usmerena prema Savi, a dva prema zaleđu.

Za oba bunara su pretpostavljeni isti uslovi eksploatacije u prognoznim proračunima. To znači da je nivo u bunarskom šahtu, odnosno u unutrašnjosti drenova, određen preko uslova „kota drena + 6 m“. Na osnovu ovog polaznog uslova rada bunara, režim eksploatacije bunara RB-7m je takav da se nivo vode u šahtu održava na koti 57,50 mnm u prvoj varijanti i 54,50 mnm u drugoj varijanti sanacije. Kod bunara RB-46, nivo je prvo zadat na koti 58,40 mnm (varijanta 1), a nakon toga na 56,00 mnm (varijanta 2).

Iz razloga obezbeđenja većeg stepena sigurnosti dobijenih rezultata, svi prognozni proračuni su realizovani sa hidrološkim uslovima reke Save koji odgovaraju 95% učešću sa krive trajanja vodostaja, tj. vodostaju od 70,00 mnm. Dakle, prognozni hidrodinamički uslovi su odabrani tako da je Sava zadata na hidrološkom minimumu (prihranjivanje izdani iz pravca reke je minimalno), a nivo vode u šahtu na najvećoj dubini, opravdanoj sa aspekta procesa starenja bunara (eksploatacija je maksimalna ali održiva).

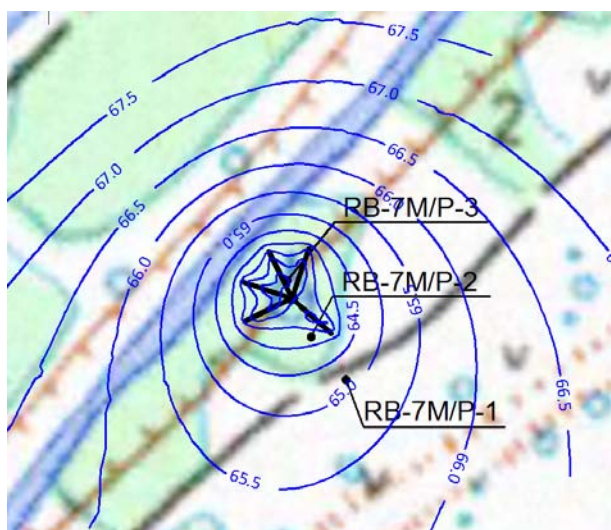
Prva varijanta je podrazumevala da su drenovi obnovljeni po *Preussag* tehnologiji na oba bunara, zbog sitnozrnog granulometrijskog sastava sedimenata na koti utiskivanja postojećih drenova. Debljina omotača filterskog zasipa je $d=0,1 \text{ m}$. U drugoj varijanti su analizirani efekti formiranja drenova direktnim utiskivanjem filterskih cevi po *Ranney* metodi. Oko filterske cevi prečnika $D=0,2 \text{ m}$ zadata je prifilterska zona na rastojanju $d=1,0 \text{ m}$.

Reprezentativne vrednosti koeficijenta filtracije slojeva u zoni analiziranih bunara su određene u procesu kalibracije hidrodinamičkog modela. Prognozni kapacitet bunara u uslovima rada sa novim drenovima u dubljem sloju je funkcija vrednosti koeficijenta filtracije ovog sloja. Ona je definisana kalibracijom, budući da između ovog sloja i sloja u kojem se nalaze stari drenovi ne postoji slabije propusni međusloj. Usvojena vrednost u zoni bunara RB-7m je $K_f=4,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Kako se preko bunara RB-46 crpi svega 20-tak l/s, a formiraju se značajno sniženje i kompleksni gradijenti nivoa izdani, dobijeno je da najnižem sloju odgovara ista vrednost kao sloju u kojem se nalaze stari drenovi, $K_f=1,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

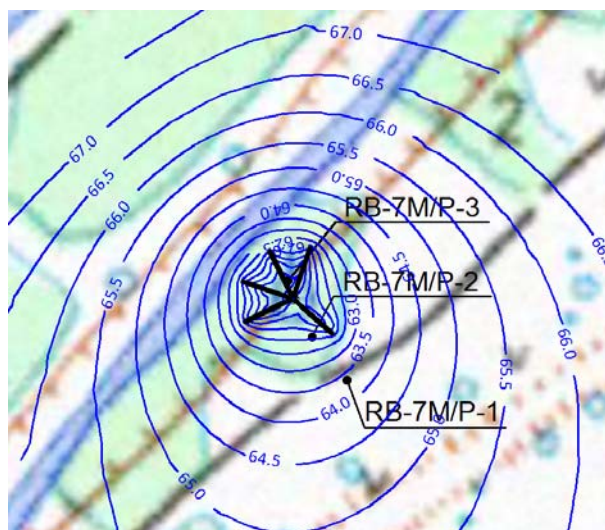
Početne vrednosti koeficijenta propusnosti drenova su usvojene prema relativno nepovoljnom scenariju. To znači da u slučaju ugradnje filterskog zasipa, prema prvoj varijanti utiskivanja novih drenova, njegove filtracione karakteristike neće biti bolje od prirodnih karakteristika sedimenata u kojima se drenovi formiraju

na postojećim kotama. U slučaju druge varijante (*Ranney* metoda), pošlo se od toga da će prilikom formiranja drenova i njihove razrade doći do određenog pogoršanja karakteristika prifilterske zone. Ovo pogoršanje je simulirano zadavanjem prifilterske zone čiji je koeficijent filtracije 50% niže vrednosti od

vrednosti kaptiranog sloja. Na ovaj način je zadat početni otpor na drenovima. Ova ograničenja rezultate prognoznih proračuna u određenoj meri stavljaju na stranu sigurnosti. Rezultati proračuna su predstavljeni na slikama 5 i 6.

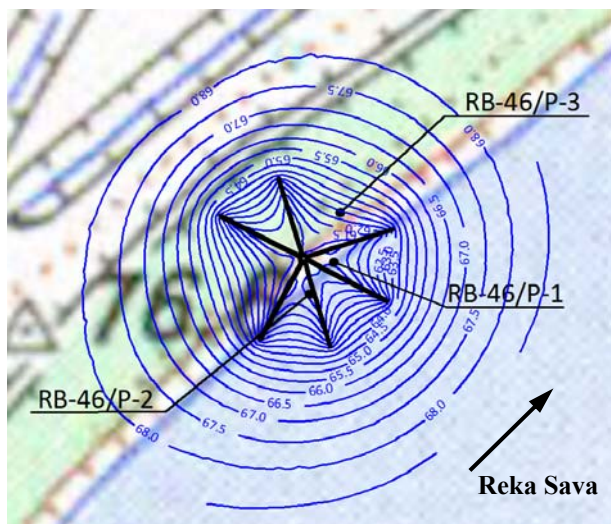


varijanta 1: $Q=74,0$ l/s

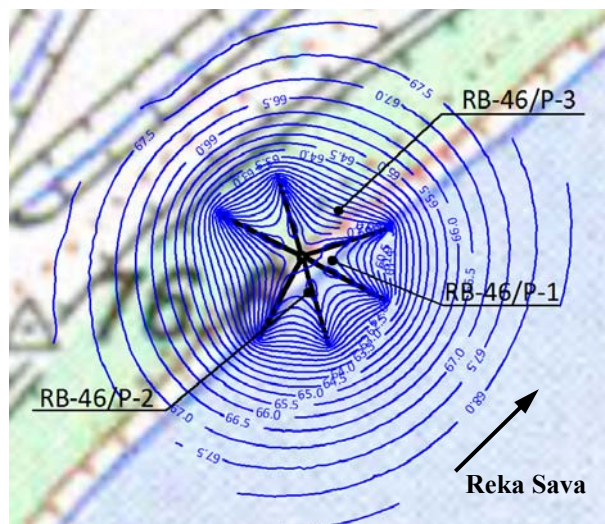


varijanta 2: $Q=98,2$ l/s

Slika 5. Raspored ekvipotencijalnih linija u zoni bunara RB-7m; varijanta 1 (levo) i varijanta 2 (desno)



varijanta 1: $Q=34,5$ l/s



varijanta 2: $Q=45,3$ l/s

Slika 6. Raspored ekvipotencijalnih linija u zoni bunara RB-46; varijanta 1 (levo) i varijanta 2 (desno)

Proračunima pretpostavljenog budućeg stanja eksploatacije podzemnih voda su određeni kapaciteti bunara i nivoi podzemnih voda. Za bunar RB-7m je dobijeno da bi se u slučaju prve analizirane varijante utiskivanja novih drenova, mogao ostvariti kapacitet od 74,0 l/s, dok bi druga varijanta omogućila zahvatanje podzemnih voda kapacitetom od 98,2 l/s.

U simuliranim uslovima eksploatacije podzemnih voda, sniženje nivoa u zoni lepeze drenova je takvo da bi se nivo u pijezometrima RB-7m/P-3 i RB-7m/P-2, u prvoj analiziranoj varijanti mogao očekivati na koti 62,50 mnm, odnosno 63,75 mnm. Druga varijanta utiskivanja novih drenova bi generisala strujnu sliku pri kojoj bi u pijezometru RB-7m/P-3 nivo podzemnih voda bio na koti 59,90 mnm, dok bi u RB-7m/P-2 nivo na koti 61,95 mnm.

Relativno nepovoljni rezultati su dobijeni za bunar RB-46. Ukoliko bi se drenovi pretpostavljenih tehničkih karakteristika utisnuli u sredini u kojoj se nalaze stari drenovi, dakle u okviru postojeće lepeze drenova, bio bi ostvaren kapacitet bunara od 34,5 l/s. Tom prilikom bi pijezometri RB-46/P-1 i RB-46/P-3 registrovali nivoe podzemnih voda na kotama 60,50 mnm i 63,00 mnm.

Nekoliko godina se nivo u ovom bunaru nalazio na svega 3 m iznad drenova, a kapacitet je bio oko 20 l/s. Pijezometar RB-46/P-1 je u tim uslovima beležio nivoe na koti od 58-60 mnm, a RB-46/P-2 na koti 65-66 mnm. Ovi parametri govore da bi se utiskivanjem novih drenova i pri režimu rada bunara sa nivoom vode u šahtu od 3 m iznad sadašnjeg, kapacitet bunara uvećao za više od 50% na račun veće dužine i povoljnijih hidrauličkih karakteristika drenova.

U drugoj varijanti (na većoj dubini utiskivanja novih drenova) je dobijeno praktično zanemarljivo povećanje kapaciteta, uz polaznu pretpostavku da će prifilterska zona biti neadekvatno razrađena. Zbog toga su dodatno analizirane još dve podvarijante. Prvo je prifilterska zona simulirana sa koeficijentom filtracije ekvivalentnim sredini ($K_{\text{pfit}}=1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), što znači da je povećanje kapaciteta u odnosu na prvu varijantu nastalo samo na račun većeg sniženja nivoa u šahtu. Utiskivanje drenova 2,4 m niže od postojećih drenova doprinelo je uvećanju kapaciteta do 41,8 l/s.

U slučaju da se razradom drenova formira prifilterska zona sa $K_f=1,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, na 1 m oko filterskih cevi (druga podvarijanta), što je objektivno maksimum koji se može očekivati razradom drenova, tada bi se mogao ostvariti kapacitet od oko 45,3 l/s. Nivo u pijezometru

RB-46/P-1 bi se tada nalazio na koti 58,00 mnm a u pijezometru RB-46/P-3 na 61,00 mnm. U odnosu na period kada su pijezometarski nivoi u osmatračkim objektima u dužem prethodnom periodu registrovani na ovim kotama, kapacitet bunara RB-46 bi bio više nego dvostruko veći. Očigledno je da bi za ostvarenje zadovoljavajućeg kapaciteta na bunaru RB-46 bila potrebna izuzetna pažnja pri projektovanju karakteristika drenova i pri izvođenju radova.

ZAKLJUČAK

Drenovi na velikom broju bunara na beogradskom izvorištu podzemnih voda nisu utisnuti u sloju najpovoljnijih hidrogeoloških odlika u okviru paketa policikličnih fluvijalnih naslaga pleistocenske starosti, što predstavlja određenu prepreku u postizanju zadovoljavajućih kapaciteta bunara prilikom njihove sanacije. Pleistocenske sedimente deponovane na prostoru izvorišta u okviru najstarijeg litostratigrafskog ciklusa odlikuju krupniji granulometrijski sastav i povoljnije filtracione odlike, zbog čega oni predstavljaju sredinu većeg potencijala za utiskivanje novih drenova.

Izrada detaljnih hidrodinamičkih modela bunara je ukazala da u slučaju da se novi drenovi formiraju na koti na kojoj su utisnuti stari drenovi, mogao bi se ostvariti kapacitet bunara RB-7m od $Q=74 \text{ l/s}$ i bunara RB-46 od $Q=34,5 \text{ l/s}$, uz održavanje nivoa vode u šahtu na visini od 6 metara iznad drenova i za vodostaj reke Save na koti 70,0 mnm. Ukoliko bi se novi drenovi formirali na većoj dubini, tj. u okviru povoljnijeg dela profila vodonosne sredine, mogao bi se očekivati kapacitet bunara RB-7m od $Q=98,2 \text{ l/s}$ i bunara RB-46 od $Q=41,8 \text{ l/s}$ (eventualno 45,3 l/s).

Hidrodinamička analiza je pokazala da je je potencijal vodonosne sredine na lokaciji bunara RB-7m značajan, zbog čega sniženje nivoa u zoni lepeze drenova u simuliranim uslovima nije veliko. Kod bunara RB-46 bi i dalje postojalo značajno sniženje nivoa, sa strmim gradijentima, što govori da je otpor na račun filtracije podzemnih voda kroz vodonosnu sredinu u zoni lepeze drenova ovog bunara visok. Ovakvo stanje je svakako posledica geneze, litološkog i granulometrijskog sastava deponovanih sedimenata, stepena zbijenosti i zaobljenosti zrna, slojevitosti i dr. Iz tog razloga se ne može preporučiti obnavljanje drenova ovog bunara u ovom trenutku, budući da se za istu cenu izvođenja radova može sanirati neki drugi bunar, kod kojeg je potencijal vodonosne sredine visok (u kontekstu obezbeđenja značajnijeg kapaciteta bunara).

Prednost utiskivanja novih drenova na većoj dubini se ne ogleda samo u većem kapacitetu bunara, već i u podjednako važnom obezbeđenju povoljnih hidrauličkih uslova rada vodozahvatnog objekta i smanjenju rizika od nastupanja intenzivnog opadanja kapaciteta tokom vremena eksploatacije na račun procesa kolmiranja, uzrokovanog biohemijskim sastavom podzemnih voda.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansiranje projekata „OI-176022“, „TR-33039“ i „III-43004“.

LITERATURA

- [1] Anderson M.P. and Woessner W.W.: Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport, Academic Press, 1992.
- [2] Babac D. i Babac, P.: Bunari sa horizontalnim drenovima, Balby International, Beograd, 2008.
- [3] Božović Đ., Polomčić D. i Bajić D.: Inovirana „budimpeštanska“ metoda revitalizacije bunara sa horizontalnim drenovima i mogućnosti njene primene na beogradskom izvorištu podzemnih voda, Tehnika, 67, 5, 2016a.
- [4] Božović Dj., Polomčić D. and Bajić D.: Characteristic groundwater level regimes in the capture zones of radial collector wells and importance of identification (case study of Belgrade Groundwater Source), Geološki anali Balkanskoga poluostrva (in press), 2016b.
- [5] Božović Đ., Polomčić D. i Bajić D.: Hidrodinamička simulacija i analiza režima podzemnih voda pod uticajem bunara sa horizontalnim drenovima (primer beogradskog izvorišta), Tehnika, 70, 5, 777–786, 2015.
- [6] Čalić J., Milošević M.V., Gaudényi T., Štrbac D. and Milivojević M.: Pannonian Plain as a morphostructure unit of Serbia. Bulletin of the Serbian geographical society, XCII-1, 47–70, 2012.
- [7] Dahlstrom D.J., Janzen A.K., Rash V.D. and Mechenich M.F.: Simulating Radial Collector Wells—a Comparison of Methods, In: Maxwell, Hill, Zheng & Tonkin (eds), MODFLOW and More 2015: Modeling a Complex World–IGWMC, 350–353, 2015.
- [8] Dimkić M. and Pušić M.: Correlation Between Entrance Velocities, Increase in Local Hydraulic Resistances and Redox Potential of Alluvial Groundwater Sources, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, Vol. 4, 4, 3–23, 2014.
- [9] Dimkić M., Pušić M., Vidović D., Petković A. & Boreli–Zdravković Dj.: Several natural indicators of radial well ageing at the Belgrade Groundwater Source, Part 1. Water Science & Technology, IWA Publishing, London, 63 (11), 2560–2566, 2011.
- [10] Gaudényi T., Nenadić D., Stejić P., Jovanović M. and Bogićević K.: The stratigraphy of the Serbian Pleistocene Corbicula beds, Quaternary International, 357, 4–21, 2015.
- [11] Knežević S., Rundić Lj. and Ganić M.: The subsurface geology along the route of the new bridge at Ada Ciganlija Island (Belgrade, Serbia). Geološki anali Balkanskoga poluostrva, 73: 9–19, 2012.
- [12] Marović M., Djoković I., Pešić L., Radovanović S., Toljić M. and Gerzina N.: Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian basin in Serbia, EGU Stephan Mueller Special Publication Series, 3: 277–295, 2012.
- [13] Nenadić D., Gaudényi T., Tošović R. and Bogićević K.: Stratigraphical characteristics of Pleistocene fluvial deposits of Southeastern Srem near Belgrade (Serbia), Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences, 8, 2, 225–230, 2015.
- [14] Nenadić D., Bogićević K., Lazarević Z. and Milivojević J.: Lower and Middle Pleistocene sediments of Eastern Srem (Northern Serbia) – paleogeographical reconstruction, Bulletin of the Natural History Museum, 3: 7–25, 2010.
- [15] Nenadić D., Knežević S. and Bogićević K.: Stratigraphical and paleogeographical characteristics of Pleistocene series in the Sava riparian area at Belgrade (Serbia), Bulletin of the Natural History Museum, 2: 63–80, 2009.
- [16] Oparašić I, Božović Đ.: Definisavanje devijacije drenova na bunarima beogradskog izvorišta podzemnih voda. XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, pp. 75–79, 2012.

- [17] Panday S., Langevin C.D., Niswonger R.G., Ibaraki M. and Hughes J.D.: MODFLOW–USG Version 1: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite–Difference Formulation, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2013.
- [18] Polomčić D., Božović Dj. and Bajić D.: Hydraulic characterization of laterals as applied to selected radial collector wells at Belgrade Groundwater Source, *Geološki anali Balkanskoga poluostrva* (in press), 2016.
- [19] Rakić M.: The genesis and stratigraphy of Quaternary sediments in the drainage basins of Južna Morava river (with short review of sedimentary conditions in Dacian and Pannonian Basin), *Memoires du Service geologique et geophysique*, XVII, 88 (in Serbian with English summary), 1977.
- [20] Rundić Lj., Ganić M., Knežević S. and Soliman A.: Upper Miocene Pannonian sediments from Belgrade (Serbia): new evidence and paleoenvironmental considerations, *Geologica Carpathica*, 62, 3, 267–278, 2011.
- [21] Rumbaugh J.O., Rumbaugh D.B.: Tutorial Manual for Groundwater Vistas, version 6, Environmental Simulations, 2011.
- [22] Shantser Ye.V.: Alluvium of plain rivers of the temperate zone and its role in studies of the structure and formation of alluvial formations, *Proceedings of the Institute of Geology, USSR Academy of Sciences, Geology. series, N 55* (In Russian), 1951.
- [23] Toljić M., Nenadić D., Stojadinović U., Gaudényi T. and Bogičević K.: Quaternary tectonic and depositional evolution of eastern Srem (northwest Serbia), *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*, 75: 43–57, 2014.
- [24] Zorić M., Slimak T., Vrvic N.: Metodologija izrade hidrogeološkog modela na primeru bunara sa horizontalnim drenovima RB–16 na Adi Ciganliji, XIV Srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, pp. 57–62, 2012.

HYDRODYNAMIC ASSESSMENT OF THE VALIDITY OF EMPLACING NEW RADIAL WELL LATERALS AT A GREATER DEPTH AT BELGRADE GROUNDWATER SOURCE

by

Đorđije BOŽOVIĆ
PUC Belgrade Waterworks & Sewerage
Dušan POLOMČIĆ, Dragoljub BAJIĆ
Faculty of Mining and Geology, Belgrade

Summary

If an aquifer is comprised of polycyclic fluvial sediments whose lithology differs, optimal conditions for groundwater extraction by means of radial wells are created by extending laterals into the lithostratigraphic layer that features the best hydrogeologic properties (grain-size distribution and percolation). At Belgrade Groundwater Source, this is the deepest lithologic layer, whose gravel and sand sediments have been deposited during the first (oldest) Lower Pleistocene

sedimentation cycle. A large number of the existing laterals do not reach this layer, which has led to a characteristic decline in well discharge capacity over time.

It is possible to overcome the constraint imposed by insufficiently deep laterals by adapting the radial well rehabilitation technology used at groundwater sources in Budapest to the hydrogeologic conditions and design of

the wells at Belgrade Groundwater Source. The paper assesses the validity of applying such a solution – installation of new laterals at a greater depth than that of the existing laterals, which have degraded over time. The criteria for evaluating the studied well rehabilitation options include predicted well discharge capacity and hydraulic conditions (permeability of the near-lateral zone and drawdown in the well caisson).

The research was conducted by developing a hydrodynamic model and detailed analysis of the groundwater regime in the zone of influence of two selected wells. The calculations were made applying cutting-edge MODFLOW–USG code for groundwater flow analysis and the laterals were simulated with the Connected Linear Network (CLN) package.

The model was calibrated using groundwater regime elements of the studied parts of the aquifer, monitored over multiple years, and the potential of the well locations was quantified in terms of groundwater availability. The filtration characteristics of the modeled hydrogeologic layers and the quality of the hydraulic contact between the river and the aquifer are defined.

To conduct prognostic calculations, a certain number, length and distribution of laterals around the well caisson were selected, along with the well operating mode and the hydrologic conditions of the Sava River, which is the main source of aquifer recharge. Two installation methods were tested: with gravel pack

around the screen pipe (Preussag) and direct emplacement of the screen pipe (Ranney). Conservative characteristics of the skin zone were selected in both cases, meaning that some resistance of the laterals to groundwater infiltration was assumed.

Installation of new laterals at a greater depth will create conditions for full utilization of the potential of the water-bearing medium with regard to groundwater extraction. Estimates show that deeper laterals of both wells, compared to the existing laterals, will result in a higher well discharge. However, if there is no significant difference in filtration characteristics between the lithologic layer in which the existing laterals are installed and the underlying layer, the increase in discharge capacity will be on account of a larger drawdown in the well caisson (or of the aquifer in the immediate vicinity of the radial collector well).

The advantage of extending new laterals to a greater depth should not only be viewed as achieving a higher well capacity, but also, equally importantly, creating favorable hydraulic conditions for well operation and reducing the risk of rapid capacity decline over the wells' service life due to an unfavorable biochemical composition of the groundwater.

Key words: radial collector wells, laterals renewing, hydrodynamic model, MODFLOW–USG, CLN package

Redigovano 08.11.2016.