

## PROCENA FILTRACIONIH KARAKTERISTIKA KOLMIRAJUĆEG SLOJA REČNOG DNA NA OSNOVU REZULTATA TESTA PROBNOG CRPLJENJA

Miloš MILAŠINOVIĆ, Nenad JACIMOVIĆ  
Građevinski fakultet u Beogradu

### REZIME

Ugradnja drenažnih bunara je jedan od najčešće primenjivanih postupaka za sniženje nivoa podzemnih voda (NPV) za potrebe izvođenja građevinskih radova u suvom, pri čemu je u fazi projektovanja potrebno odrediti potreban broj bunara i protok koji se na njima crpi. Rešenje zavisi od zahtevanog sniženja NPV, filtracionih karakteristika izdani, uslova na granicama, npr. nivoa u reci, kao i od raspoložive tehnologije izvođenja bunara. Projektovanje drenažnog sistema obično podrazumeva izradu numeričkog modela strujanja podzemnih voda i analizu varijantnih rešenja na modelu. U slučaju blizine rečnog toka iz koga se prihranjuje izdan koja se drenira, sniženje NPV je često moguće analizirati primenom jednostavnih analitičkih metoda, kao što je metoda ogledalnih slika. Pri tome, bez obzira na primenjenu metodu analize, veoma značajan uticaj na rešenje imaju filtracione karakteristike kolmirajućeg sloja na dnu reke. Zbog značaja ovog parametra kod rešavanja praktičnih problema projektovanja bunarskih drenažnih sistema, u ovom radu je prikazana metoda za određivanje karakteristika kolmirajućeg sloja na osnovu rezultata testa probnog crpljenja, primenom metode ogledalnih slika. Predložena metodologija je primenjena na konkretnom primeru iz prakse.

**Ključne reči:** sniženje NPV, drenažni bunar, kolmirajući sloj, metoda ogledalnih slika

### 1. UVOD

Izgradnja podzemnih delova različitih građevinskih objekata često podrazumeva potrebu za sniženjem NPV u cilju obezbeđivanja uslova za realizaciju građevinskih radova, posebno ukoliko se radovi izvode u aluvijalnim dolinama rečnih tokova. Preblem visokih nivoa podzemnih voda, koji su uslovljeni nivoima u reci,

najčešće se rešava izgradnjom drenažnih bunara i crpljenjem potrebne količine vode koja će obezbediti zahtevano sniženje. Kapaciteti tih bunara, kao i njihov broj i raspored uslovljeni su nizom parametara kao što su zahtevano sniženje NPV, blizina reke, hidrogeološke, odnosno hidrauličke karakteristike sredine, raspoloživa tehnologija izvođenja bunara, blizina drugih objekata u urbanim sredinama, itd. Jednačine kojima se opisuje tečenje vode u poroznoj sredini pri radu jednog ili grupe bunara opisano je jednačinama kojima se opisuje linijsko, ravansko ili prostorno strujanje. Rešenje tih jednačina koje kao rezultat imaju raspored nivoa podzemne vode zavisi upravo od pomenutih filtracionih karakteristika izdani koje je potrebno unapred znati [1].

Terenska ispitivanja u vidu testova probnog crpljenja najpouzdanija su metoda za određivanje hidrogeoloških parametara kao što su koeficijent filtracije, transmisivnost izdani ili specifična izdašnost sredine [2].

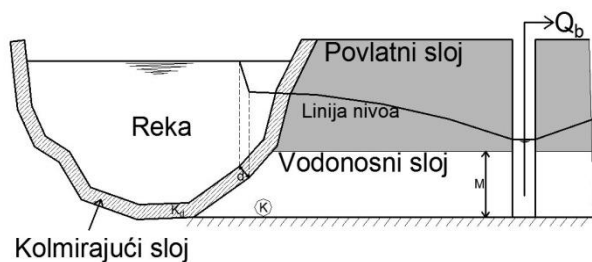
U slučaju blizine rečnog toka, pored pomenutih hidrogeoloških parametara same izdani (akvifera), potrebno je poznavati i karakteristike hidrauličke veze između reke i vodonosnog sloja, koja se obično kvantifikuje kroz ocenu karakteristika slabije propusnog (kolmirajućeg) sloja na rečnom dnu, a koji se formira na kao posledica taloženja organskih i neorganskih sedimenata, karbonata, jedinjenja gvoždja i mangana, ali i kao posledica biohemijskih procesa [3].

Uticaj kolmirajućeg sloja ogleda se u smanjenju hidrauličke propusnosti rečnog dna. Efekat je pozitivan u smislu zahtevanog broja i kapaciteta bunara kada je potrebno sniženje NPV. Sa druge strane, efekat je nepovoljan ako se radi o projektovanju eksploatacionih bunara (izvorišta). Fizičko – hemijske karakteristike kolmirajućeg sloja takođe imaju značajan uticaj na kvalitet podzemne vode, što kasnije može uticati na tehnologije prečišćavanja vode za piće [4].

Navedeno ukazuje na značaj istraživanja karakteristika kolmirajućeg sloja. Različitim metodama koje se zasnivaju na granulometrijskom sastavu uzoraka kolmirajućeg sloja može da se da procena filtracionih karakteristika [5] koja, kao u slučaju filtracionih karakteristika izdani, često ne daje dovoljno pouzdane reprezentativne vrednosti koje bi se mogle koristiti za projektovanje. Nasuprot zahtevnim detaljnim terenskim istraživanjima [6] i [7] za određivanje karakteristika kolmirajućeg sloja, u ovom radu se prikazuje relativno jednostavan metod koji se zasniva na obradi rezultata testa probnog crpljenja, a koji je istovremeno neophodan za određivanje karakteristike vodonosnog sloja.

## 2. METODOLOGIJA

Analiitička metoda za procenu filtracionih karakteristika slabije propusnog (kolmirajućeg) sloja formuliše se pod pretpostavkom unapred poznatih, filtracionih karakteristika izdani (akvifera), transmisivnosti i specifične izdašnosti, koji se takođe mogu dobiti kao rezultat obrade rezultata testa probnog crpljenja ([2], [8], [9] i [10]).

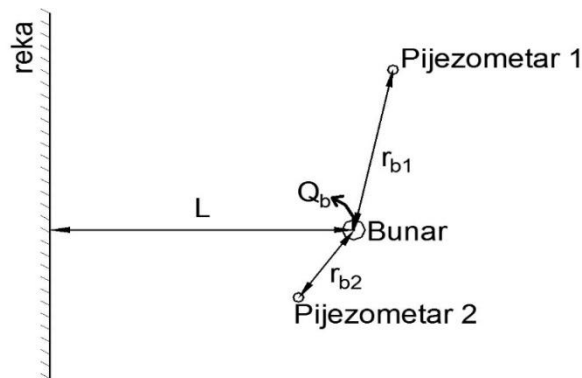


Kolmirajući sloj

Slika 1. Shematski prikaz kolmirajućeg i vodonosnog sloja

Metodologija se zasniva na merenjima promene nivoa podzemne vode na dva pijeziometra kao posledice crpljenja vode iz jednog bunara. U nastavku je prikazan postupak za procenu filtracionih karakteristika kolmirajućeg sloja.

Za proračun sniženja nivoa podzemne vode na bilo kom rastojanju koristi se Theis-ovo rešenje [11] koje je izvedeno pod pretpostavkama da je akvifer homogen, izotropan, neograničen i konstantne debljine. U slučaju ograničene sredine (u ovom slučaju izdan je ograničena rekam), Theis-ovo rešenje se može primeniti tako što se problem svede na neograničenu sredinu uvođenjem fiktivnih bunara/izvora prema principu ogledalnih slika.



Slika 2. Raspored pijeziometra za test probnog crpljenja

Na taj način sniženje nivoa u bilo kojoj tački može se izračunati superpozicijom rešenja za stvarni bunar i fiktivni izvor [10]:

$$s(t) = \frac{Q_b}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \left( \frac{2.25 \cdot t \cdot T}{r_b^2 \cdot S_e} \right) + \frac{Q_i}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \left( \frac{2.25 \cdot t \cdot T}{r_i^2 \cdot S_e} \right) \quad (1)$$

gde je:

$Q_b$  – protok koji se crpi na bunaru

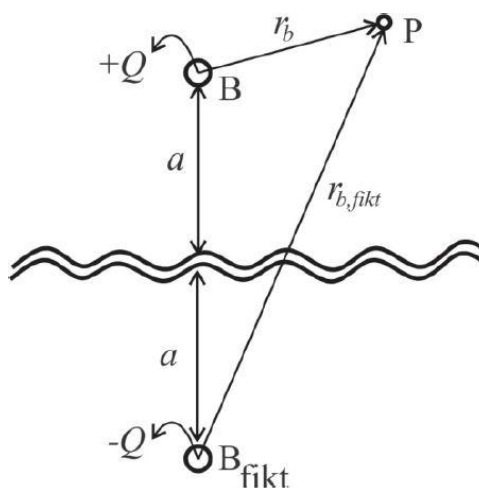
$Q_i$  – protok na fiktivnom izvoru istog intenziteta kao i  $Q_b$  ali suprotnog znaka

$T$  – transmisivnost akvifera

$R_b$  – rastojanje tačke u kojoj se računa sniženje NPV od bunara

$R_i$  – rastojanje tačke u kojoj se računa sniženje NPV od fiktivnog izvora

$S_e$  – specifična izdašnost akvifera



Slika 3. Metoda ogledalnih slika sa граниčnim uslovom sa konstantnim nivoom

Zbog teškoće da se odredi posebno debljina a posebno koeficijent filtracije kolmirajućeg sloja, reprezentativna veličina ovog sloja definiše se kao  $K_d/d$  i ima dimenziju 1/s. Ovde je  $d$  debljina slabije propusnog, kolmirajućeg sloja i ima dimenziju dužine dok je  $K_d$  koeficijent filtracije slabije propusnog sloja izražen u m/s.

Efekat slabije propusnog sloja na raspored pijezometrijskih nivoa u izdani može se modelirati tako što se slabije propusni sloj debljine  $d$  zameni slojem istih filtracionih karakteristika kao i vodonosni sloj, ali odgovarajuće debljine. Drugim rečima, uticaj slabije propusnog sloja na dnu reke rešava se tako što se u uvodi fiktivna granica na većem rastojanju, a koja se dobija kada se na rastojanje bunara od reke ( $L$ ) doda i fiktivna dužina kojoj odgovara pad pijezometrijske linije kroz slabije propusni sloj. Ovo rastojanje se računa kao:

$$p = d \cdot \frac{K}{K_d} \quad (2)$$

gde je:

$K$  [m/s] – koeficijent filtracije vodonosnog sloja

Pošto su protoci na bunaru  $Q_b$  i fiktivnom izvoru  $Q_i$  isti po apsolutnoj vrednosti, a različiti po znaku, jednačina (1) se svodi na:

$$s(t) = \frac{Q_b}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \left( \frac{r_i^2}{r_b^2} \right) \quad (3)$$

gde je:

$r_b$  – rastojanje pijezometra u kom se određuje sniženje NPV od bunara

$r_i$  – rastojanje pijezometra u kom se određuje sniženje NPV od fiktivnog izvora.

Pod veličinom  $r_i$  se krije i nepoznata veličina  $p$  definisana jednačinom (2). Uvođenjem lokalnog koordinatnog sistema XY jednačina (3) se može napisati na sledeći način:

$$s = \frac{Q_b}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \left( \frac{(2 \cdot L + 2 \cdot p + x_{pi})^2 + y_{pi}^2}{x_{pi}^2 + y_{pi}^2} \right) \quad (4)$$

gde je:

$L$  – rastojanje bunara od reke

$p$  – rastojanje od stvarne granice reke do fiktivne granice reke

$x_{pi}, y_{pi}$  – rastojanje pijezometra i od bunara po apscisi i ordinati lokalnog koordinatnog sistema ( $r_b^2 = x_{pi}^2 + y_{pi}^2$ )

Jednačina (4) daje sniženje nivoa podzemne vode nakon što uticaj dejstva bunara stigne do granice reke, pri čemu uticaj kolmirajućeg sloja prikazuje nepoznata dužina  $p$ . Ista jednačina se može napisati za proizvoljan broj pijezometara.

Ukoliko se raspolaže sa dva pijezometra, izrazi se mogu podeliti, čime se iz izraza uklanja radijus dejstva bunara. Rezultujući izraz ukazuje da je odnos sniženja nivoa konstantan, odnosno:

$$\frac{s_{p1}}{s_{p2}} = \frac{\ln \left( \frac{(2 \cdot L + 2 \cdot p + x_{p1})^2 + y_{p1}^2}{x_{p1}^2 + y_{p1}^2} \right)}{\ln \left( \frac{(2 \cdot L + 2 \cdot p + x_{p2})^2 + y_{p2}^2}{x_{p2}^2 + y_{p2}^2} \right)} = const. \quad (5)$$

Kada se na osnovu izmerenih nivoa  $s_{p1}$  i  $s_{p2}$  na dva pijezometra odredi odnos  $s_{p1}/s_{p2}$  jedina nepoznata koja figuriše u prethodnoj jednačini je rastojanje između stvarne i fiktivne granice reke  $p$ . Rešavanjem jednačine (5) dolazi se do nepoznate vrednosti veličine  $p$ , odnosno, vrednosti veličine  $K_d/d$  kojom se definišu filtracione karakteristike slabije propusnog, kolmirajućeg sloja.

$$\frac{K_d}{d} = \frac{K}{p} \quad (6)$$

gde je  $K$  koeficijent filtracije vodonosnog sloja, koji je prethodno određen nekom od pogodnih metoda ([18, 19]).

### 3. PRIMER

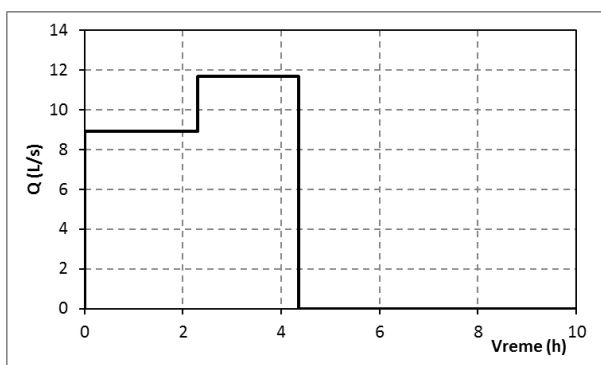
Prethodno opisana metodologija za procenu filtracionih karakteristika kolmirajućeg sloja rečnog dna testirana je na podacima dobijenim tokom testa probnog crpljenja. Lokacija bunara i pratećih pijezometara je desna obala reke Save, u blizini mosta Gazela u Beogradu.

Bunar na kome je izvršeno ispitivanje, udaljen je od korita reke 45 metara, dok su pijezometri za osmatranje promene nivoa podzemne vode formirani tako da se jedan nalazi u neposrednoj blizini bunara, na rastojanju od 3 m, dok je drugi udaljen 30 m od bunara. Sa ovakvim rasporedom bunara i pijezometara izvršen je test probnog crpljenja sa promenljivim protokom. Promena protoka u toku testa probnog crpljenja prikazana je na slici 4.

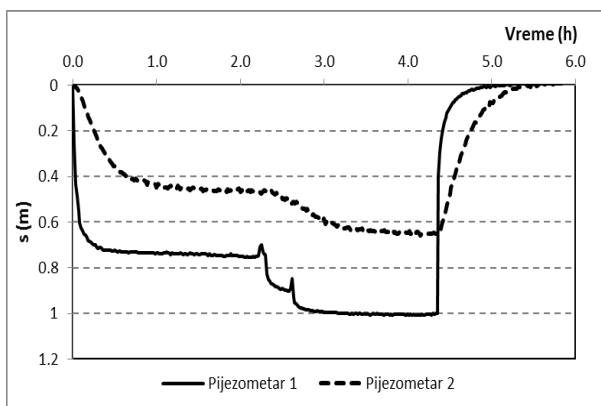
Zabeležene promene nivoa podzemne vode u dva piježometra u toku testa probnog crpljenja prikazane su na slici 5.

#### 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Za osmotrene rezultate sniženja podzemne vode, sračunat je odnos ovih veličina, uz poznate vrednosti koeficijenta filtracije i specifične izdašnosti. Odnos sniženja nivoa na piježometrima ( $s_{p1}/s_{p2}$ ) u toku probnog crpljenja prikazan je slici 6, dok je promena sračunatog radijusa dejstva bunara prikazana na slici 7.



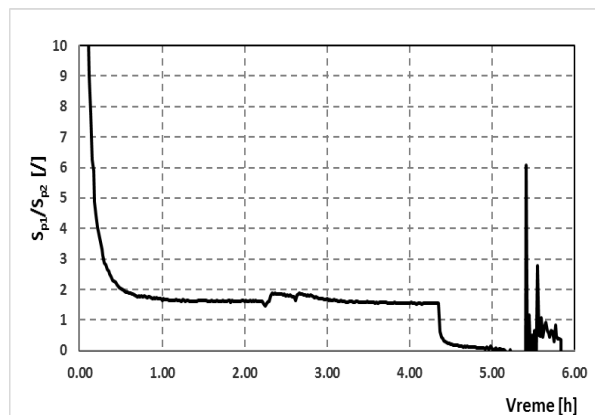
Slika 4. Promena protoka tokom testa probnog crpljenja



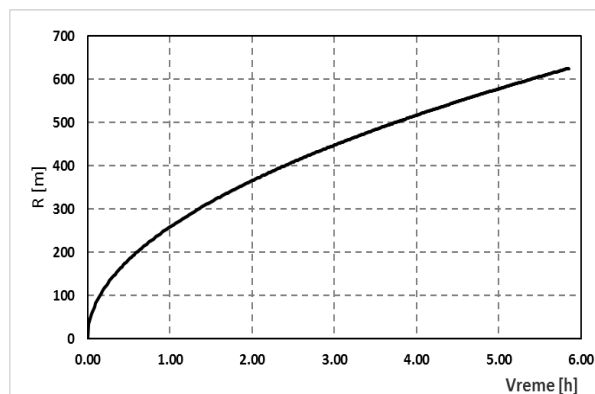
Slika 5. Promena nivoa vode zabeležena u piježometrima 1 i 2

Na slici 6. može se uočiti da pretpostavka o konstantnoj vrednosti veličine  $s_{p1}/s_{p2}$  važi tokom dužeg perioda, pri čemu je početni deo onaj u kome radijus dejstva bunara nije još stigao do granice reke, a verovatno ni do udaljenijeg piježometra. Manja odstupanja od konstantne vrednosti (između 2. i 3. sata na dijagramu) posledica su promene protoka na bunaru kada je vršeno

merenje protoka (uočava se i na slici 5, usled savijanja vatrogasnog creva). Sa slike 6 se vidi da odnos postaje konstantan  $s_{p1}/s_{p2}=1,642$  kada radijus dejstva bunara pređe vrednost 300m. Za sračunatu vrednost  $s_{p1}/s_{p2}=1,642$ , rešavanjem jednačine (5) dolazi se do vrednosti rastojanja između stvarne i fiktivne granice reke  $p=472,7$  m, iz čega se dolazi do vrednosti veličine  $K_d/d = 1,27 \cdot 10^{-6}$  1/s na osnovu jednačine (6).



Slika 6. Odnos sniženja nivoa podzemne vode  $s_{p1}/s_{p2}$  prema zabeleženim podacima tokom testa probnog crpljenja



Slika 7. Promena radijusa dejstva bunara  $R$  od početka testa probnog crpljenja

#### 5. ZAKLJUČAK

Kod projektovanja sistema za sniženje nivoa podzemnih voda u fazi izvođenja građevinskih radova pored reke, filtracione karakteristike kolmirajućeg sloja na rečnom dnu imaju veliki uticaj na konačno rešenje sistema, pa je njegovo poznavanje od izuzetne važnosti.

U radu je prikazan postupak korišćenja rezultata testa probnog crpljenja za određivanje ovog parametra. Uslov za to je osmatranje promene nivoa na najmanje dva pijezometra. Takođe, metoda se može primeniti i u slučaju osmatranja nivoa na jednom pijezometru i samom bunaru, ukoliko su poznati koeficijenti parazitskih gubitaka prifilterske zone bunara.

Treba naglasiti da se filtracione karakteristike kolmirajućeg sloja, zbog prirode ovog slabije propusnog sloja rečnog dna, menjaju sezonski, tokom godine, zbog promena nivoa u reci, protoka i količine transportovanog materijala u reci. Stoga bi opisane testove trebalo ponoviti na istim lokacijama u različitim periodima godine.

#### LITERATURA

- [1] Kinzelbach W. : Groundwater Modelling – An introduction with Sample Programs in Basic, Elsevier, 1986.
- [2] Sterret R. J. : Groundwater and Wells – Third edition, Johnson Screens, New Brighton, MN, 2007.
- [3] Grischek T., Bartak R. : Riverbed Clogging and Sustainability of Riverbank Filtration, Water, vol. 8, Issue 12, doi:10.3390/w8120604, 2017.
- [4] Hubbs S. A.: Changes in riverbed hydraulic conductivity and specific capacity at Louisville, Earth and Environmental Sciences, pp. 199-220, Dordrecht, The Netherlands, 2006.
- [5] Beyer, W.: Methodology for Riverbank Filtration Site Investigation, Unpublished work, Dresden University of Technology, Department of Water Sciences, Dresden, Germany, 1974.
- [6] Wojnar A. J., Mutiti S., Levy J.: Assessment of geophysical surveys as a tool to estimate riverbed hydraulic conductivity, Journal of Hydrology, vol. 482, pages 40-56, 2013.
- [7] Ekwe A. C., Nnodu I. N., Ugwumbah K. I., Onwuka O. S.: Estimation of Aquifer Hydraulic Characteristics of Low Permeability Formation from Geosounding Data: A Case Study of Oduma Town, Enugu State, Journal of Earth Sciences, vol. 4, pages 19-26, 2010.
- [8] Kruseman G. P., de Ridder N. A.: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data – Second edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 1994.
- [9] Jaćimović N.: Hidraulika podzemnih voda, Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd, Srbija, 2016.
- [10] Pušić M.: Dinamika podzemnih voda, Rudarsko – Geološki fakultet, Balby International, Beograd, Srbija, 2000.
- [11] Theis C. V.: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Department of the interior geological survey – Water resources division – Groundwater branch, Washington D.C., 1952.
- [12] Walton W. C.: Selected methods for Well and Aquifer Evaluation, Department of Registration and Education, bulletin 49, Urbana, Illinois state, 1962.
- [13] Sanders L.: A manual of field hidrogeology Chapter 5 – Aquifer and Aquitard Testing, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [14] Bara M. K., Veliskova Y., Dulovičova R., Schurgel R.: Influence of surface water level fluctuation and riverbed sediment deposits on groundwater regime, Journal of Hydrology and Hydromechanics, vol. 62, issue 3, pages 177-185, DOI: 10.2478/johh-2014-0030, 2014.
- [15] Mucha I., Banský L., Hlavaty Z., Rodak D.: Impact of riverbed clogging-colmation on groundwater, GROUNDWATER Consulting Ltd, Bratislava, Slovakia
- [16] Moench A., Garabedian S. P., LeBlanc D. R.: Estimation of Hydraulic parameters from an unconfined aquifer Test Conducted in a Glacial Outwash Deposit – Cape Cod Massachusetts, USGS, Profesional paper, Reston, Virginia, 2001.
- [17] Rosenberry D. O., LaBaugh J. W.: Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Groundwater, USGS, Reston, Virginia, 2008.
- [18] Stallman R. W.: Aquifer-test design, observation and data analysis, USGS, Washington, USA, 1971.
- [19] Ferris J. G., Knowles D. B., Brown R. H., Stallman R. W.: Theory of aquifer test, USGS, Washington, USA, 1962.
- [20] Reed J. E.: Type curves for selected problems of flow to wells in confined aquifers, USGS, Washington, USA, 1980.

## ESTIMATION OF RIVERBED CLOGGING LAYER FILTRATION CHARACTERISTICS BASED ON AQUIFER PUMPING TEST

by

Miloš MILAŠINOVIĆ, Nenad JAĆIMOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

### Summary

Design of drainage wells is one of the most commonly used methods for groundwater dewatering where number of required wells and their capacity has to be designed. Asside the aquifer filtration properties, river water level and distance between wells and the river, final design heavily depend on riverbed clogging layer filtration characteristics. In this paper, these characteristics are estimated by analysis of pumping test results, i.e. based on monitoring of groundwater level changes at the two piezometers during the pumping test.

Proposed methodology is based on simple analytical solution for groundwater flow in the vicinity of pumping well with modification due to existence of riverbed clogging layer. Its applicability is demonstrated at the field experiment conducted near the river Sava in Belgrade.

Key words: Groundwater dewatering, well hydraulics, riverbed clogging layer

Redigovano 13.10.2017.