

Geol. vjesnik	Vol. 39	str. 151—164	Zagreb 1986.
---------------	---------	--------------	--------------

UDK 556.332.4.042:556.072

Izvorni znanstveni rad

## Pristup interpretaciji podataka pokusnog crpljenja

Pavao MILETIĆ, Marija HEINRICH-MILETIĆ i Andrea BACANI  
*Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, YU — 41000 Zagreb*

Prikazana je interpretacija kratkotrajnog i dugotrajnog pokusnog crpljenja pomoću grafoanalitičkih metoda i simulacija na analitičkim i numeričkim matematičkim modelima, koja upućuje na utjecaj konsolidacije i vode oslobođene iz susjednih glinenih slojeva na deformaciju krivulje »vrijeme-sniženje«.

This report is an interpretation of the results of the short and prolonged pumping tests by graphoanalytical methods and by simulations on the analytical and numerical mathematical models, which points to the influence of consolidation and water release from neighbouring clay sediments to the deformation of pumping test results.

### OPCENITO

Đakovo je grad s manjom industrijom i u vrijeme provođenja istraživanja samo djelomično riješenom vodoopskrbom. Prostornim planom se predviđa da će Đakovo imati 31.600 stanovnika do 2000. god., a predviđen je i razvoj prehrambene industrije. Vodoopskrba Đakova temeljila se je do 1985. god. na eksploataciji podzemne vode pomoću dva bušena bunara. Količina vode nije mogla zadovoljiti potrebe proširenog i povećanog vodoopskrbnog sistema (Blažević i dr. 1979). Za zadovoljavanje sadašnjih i budućih potreba na vodi izvedeni su stoga istraživački radovi južno od Đakova (Trslana) i to u dva navrata 1974. i 1979. godine (Miletić i dr., 1980). Rezultati istraživačkih radova kao i metoda interpretacije istraživačkim radovima prikupljenih podataka prikazani su u daljem tekstu.

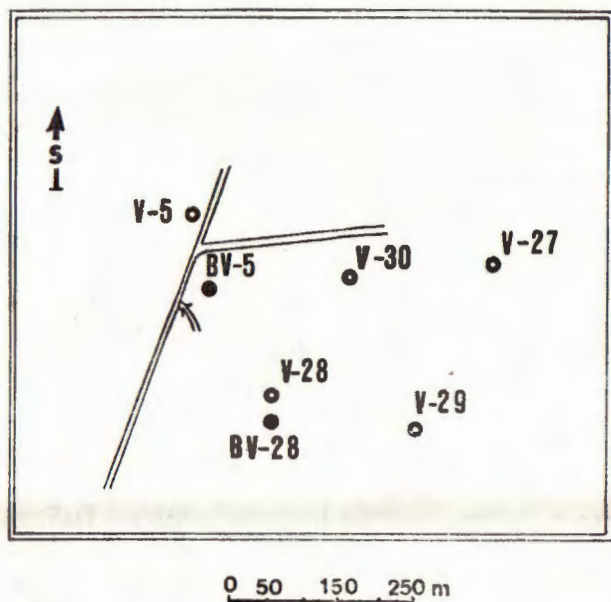
### GEOLOŠKA GRAĐA PODRUČJA

Istraživačkim radovima koji su locirani južno od Đakova (Trslana, vidi sl. 1), a koji se sastoje od dva bušena bunara, pet dubljih i tri pliće istraživačko pijezometarske bušotine (shemu razmještaja istraživačkih radova vidi na sl. 2), utvrđena je geološko litološka građa područja prikazana na profilima (vidi sl. 3 i sl. 4).

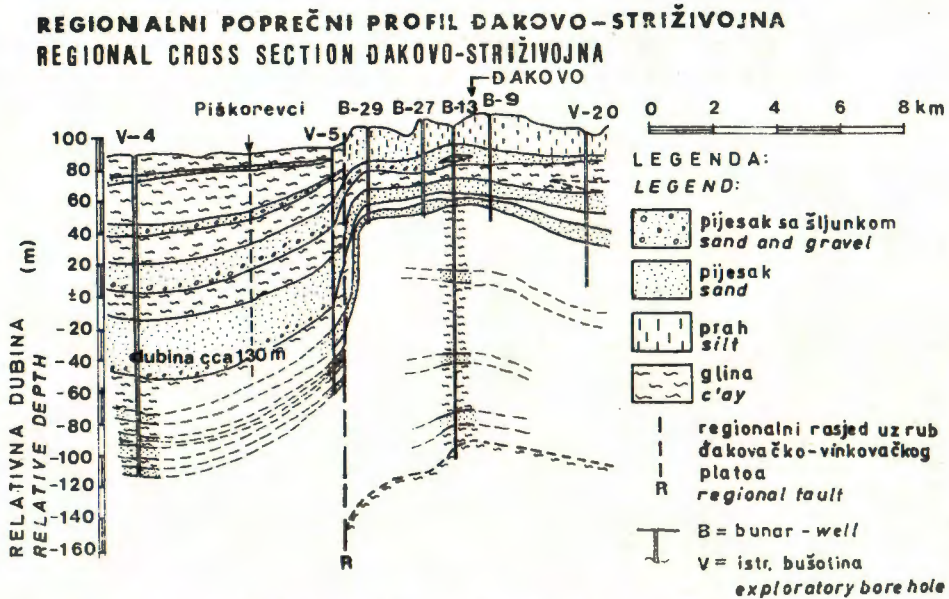
Shematizacijom geoloških podataka prikupljenih istraživačkim radovima, kako je prikazano na profilima vidljivo je da se do 120 m dubine na području Trslane nalaze tri jače izražena pješćana sloja (profil AA'-bušotina BV—5, sl. 4), koji se istanjuju i raslojavaju prema istoku (V—27),



Sl. 1. Položajna skica crpilišta Trslana. Okvir označuje granice numeričkog modela.  
 Fig. 1. Location drawing of the well field Trslana. The frame designates borders of the numerical model.



Sl. 2. Skica razmjesta istraživačko pijezometrijskih bušotina (oznaka V) i istraživačko eksploatacijskih bunara (oznaka BV).  
 Fig. 2. Drawing of arrangement of the exploratory-piezometer wells (designation V) and of the exploratory-exploitation wells (designation BV).



Sl. 3. Regionalni hidrogeološki profil preko budućeg crpilišta.

Fig. 3. Regional hydrogeological profile across the future well field.

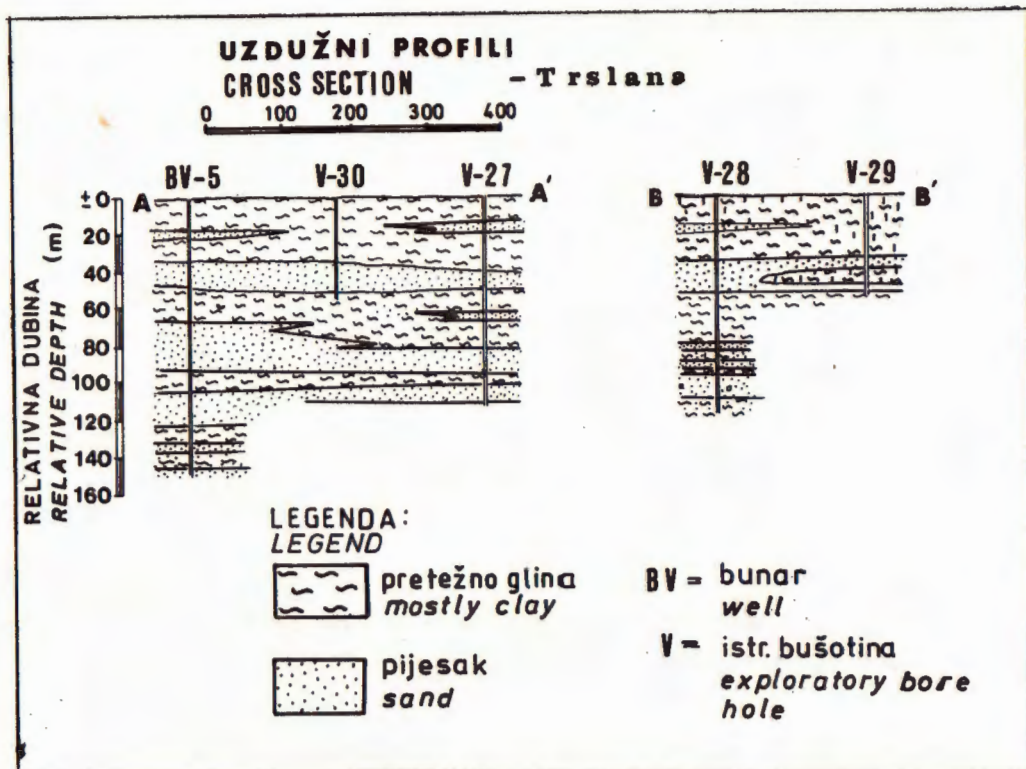
a zadebljavaju prema jugu. Nadalje na regionalnom profilu (Đakovo—Strizivojna, sl. 3) vidljivo je da prema geološkim podacima sjeverno od crpilišta Trslana prema Đakovu dolazi rasjed koji markira nehomogenost pješčanih slojeva.

Prema geološkim podacima koji su prikupljeni za Slavonsku regiju poznato je da je ustanovljen kontinuitet ovdje registriranih slojeva na širem području (Miletić i dr. 1978, 1981).

#### HIDRAULIČKE GRANICE I POKUSNO CRPLJENJE

Hidrauličke granice vodonosnog sloja određuju mogućnost njegovog prihranjivanja vodom. U konkretnom slučaju vodonosni sloj u razrezu može biti zatvorenog ili poluzatvorenog tipa, a u tlocrtu može biti ograničen, djelomično ograničen ili neograničen. Teoretski, tip sloja i njegov kontinuitet u prostoru morali bi se odraziti na ponašanje tokom pokusnog crpljenja (vidi Miletić i Heinrich-Miletić 1981; Domenico, 1972; Walton, 1962; Kruseman i de Ridder, 1970).

Na području južno od Đakova (Trslana) ispitan je prvi od površine vodonosni sloj, kao ekonomski i tehnički najpovoljniji za eksploataciju. Istraživački radovi izvedeni su u dvije faze, pa je i pokusno crpljenje na lokalitetu Trslana izvedeno u dva navrata. Prvi puta 1976. godine nakon završetka bunara BV—5, kada je kod interpretacije podataka pokusnog crpljenja pretpostavljen sloj poluzatvorenog tipa. Interpretacijom podataka određeni su tada slijedeći prosječni parametri sloja:



Sl. 4. Lokalni hidrogeološki profili budućeg crpilišta.

Fig. 4. Local hydrogeologic profiles of the future well field.

Transmisivost (T) =  $2,84 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/sek (245 m<sup>2</sup>/dan)

Koef. uskladištenja (S) =  $5,94 \cdot 10^{-4}$

Faktor procjeđivanja (B) = 2546 m.

Na temelju tih podataka predpostavljen je siguran eksploatacijski kapacitet crpilišta od 180 dm<sup>3</sup>/s kojega je moguće eksploatirati pomoću 10 bunara razmještenih u dvije paralelne linije od 5 bunara svaka i međusobne udaljenosti bunara i linija od 200 m (Urumović, 1975).

U drugoj fazi pokusno crpljenje izvedeno je na drugom bunaru (BV—28), a interpretacija je načinjena 1980. god. (Miletić i dr. 1981).

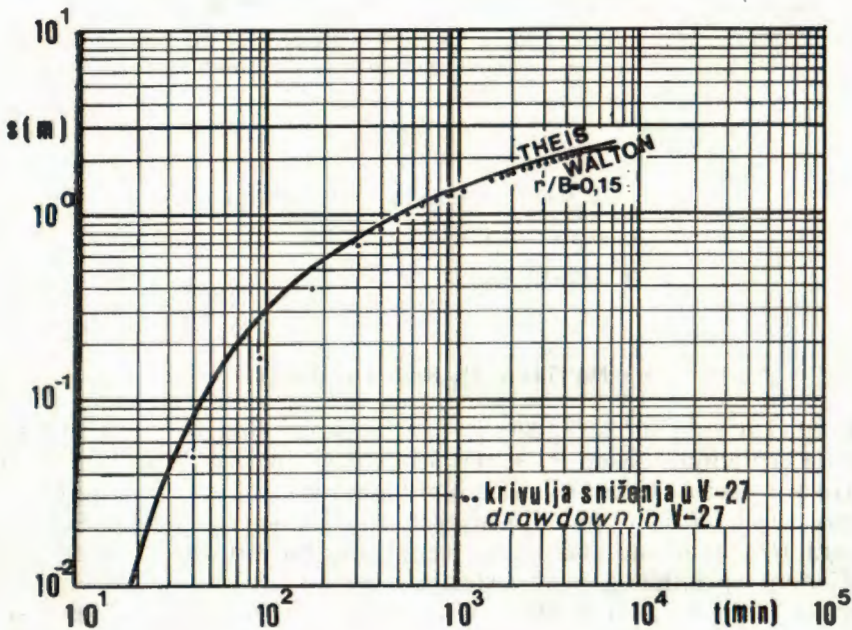
Kod pristupa interpretaciji podataka crpljenja bilo je međutim vidljivo da je u oba slučaja moguća interpretacija na dva načina. Sloj se prema značajkama podataka može smatrati poluzatvorenim ili zatvorenim. Pogledamo li naime slike 5 i 6 na kojima su prikazane Theisova tipiska krivulja, Waltonova tipiska krivulja ( $r/B = 0,15$  i  $0,01$ ) zajedno s mjerenim podacima sniženja za pijeometre (V—27 i V—28) vidimo da je moguće pretpostaviti podudaranje mjerenih točaka s bilo kojom od navedenih krivulja. Način interpretacije najvećim dijelom ovisi o subjektivnom

pristupu interpretatora. To tim više što se uistinu radi o prirodno nehomogenoj i anizotropnoj sredini čija shematizacija traži određene aproksimacije. U konkretnom slučaju realno postoji izvjesno odstupanje od Theisove krivulje, pa je to odstupanje interpretatoru najjednostavnije protumačiti međuslojnim procjeđivanjem. U posljednjem slučaju postoje naime jednostavne metode interpretacije pokusnog crpljenja i proračun zaliha podzemnih voda. Osim elastičnih značajki sloja i fluida, nehomogenosti sloja i njegovih hidrauličkih granica na ponašanje sniženja u sloju imaju utjecaja i geomehaničke značajke sloja i njegovog neposrednog okoliša. Zbog malih odstupanja krivulja sniženje — vrijeme od Theisove tipske krivulje kod interpretacije podataka crpljenja bunara BV—28 pretpostavili smo zato utjecaj procesa konsolidacije. Utjecaj konsolidacije na sniženje je kod interpretacije znanemaren za prvi dio crpljenja pa su hidrogeološki parametri izračunati pomoću tipskih postupaka za zatvoreni sloj. Srednje vrijednosti parametara izračunatih na osnovu podataka crpljenja BV—28 pomoću Theisovog i Jacobovog postupka su:

$$T = 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (252 m}^2/\text{dan)}$$

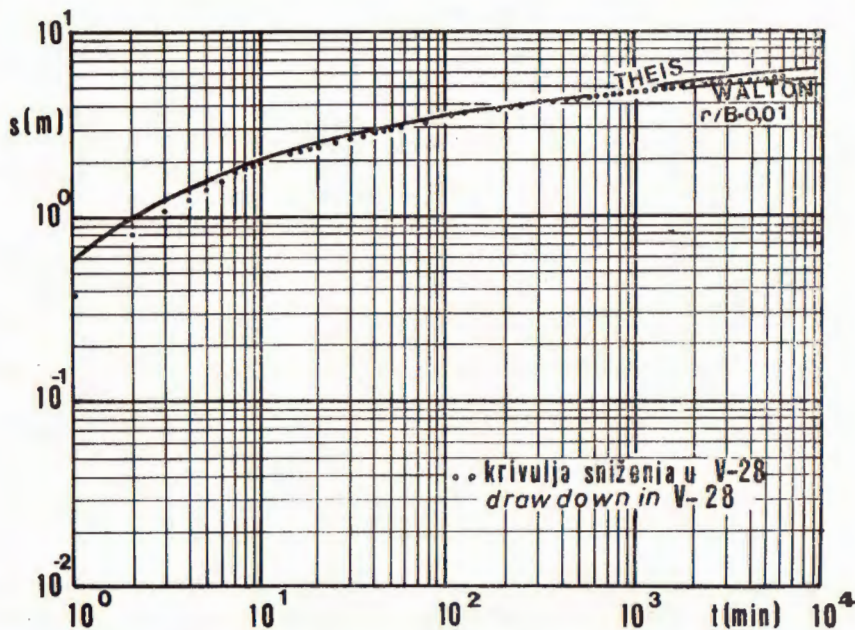
$$S = 2,10 \cdot 10^{-4}$$

Zbog komparacije i kasnijeg uspoređivanja izvršena je interpretacija istih podataka i pomoću Waltonovih tipskih krivulja, a srednje vrijednosti tako polučenih podataka su za bunar BV—28:



Sl. 5. Theisova i Waltonova tipska krivulja zajedno s podacima mjerenja sniženja na piezometru V—27 za vrijeme pokusnog crpljenja bunara BV—28.

Fig. 5. Theis and Walton's type curve together with data of measuring the decrease on the piezometer V—27 during pumping testing of the water well BV—28.



Sl. 6. Theisova i Waltonova tipaska krivulja zajedno s podacima mjerenja sniženja na piezometru V-28 za vrijeme crpljenja bunara V-28.

Fig. 6. Theis and Walton's type curve together with data of measuring the decrease on the piezometer V-28 during pumping of the water well BV-28.

$$T = 2,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (219 m}^2/\text{dan)}$$

$$S = 2,51 \cdot 10^{-4}$$

$$B = 2655 \text{ m}$$

#### ISPITIVANJE KONSOLIDACIJE

Imajući u vidu mogući utjecaj procesa konsolidacije na rezultate pokusnog crpljenja, tokom bušenja strukturno piezometarskih bušotina uzeti su uzorci za laboratorijsko ispitivanje konsolidacije. Uzorci su uzeti kao na slici 7, a na temelju mjerenih podataka i geomehaničkih parametara izračunati su koeficijent vertikalne hidrauličke provodljivosti i koeficijent specifičnog uskladištenja omeđujućih slojeva na način koji opisuju Domenico i Mifflin (1965). Izračunati parametri su prikazani u slijedećoj tablici.

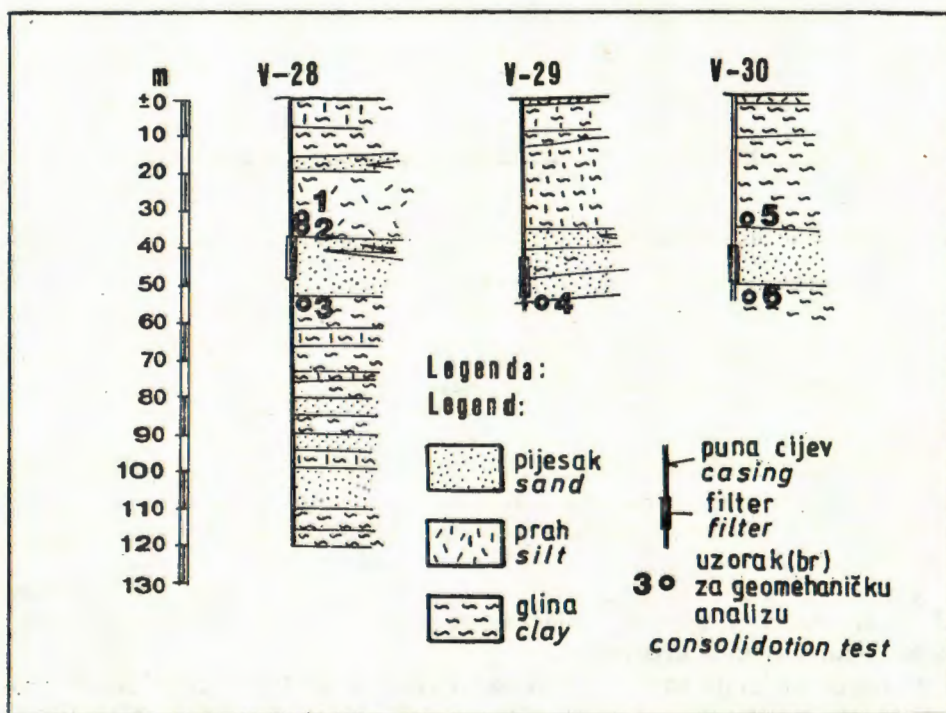
Iz podataka u tablici vidljiv je relativno veliki koeficijent specifičnog uskladištenja krovinskih i podinskih naslaga, ali isto tako i njihova vrlo mala vertikalna propusnost.

Uzorak br.	$K'$ (cm/s)	$S'_s$ (m <sup>-1</sup> )
V-28/34 (1)	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-3}$
V-28/35 (2)	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-3}$
V-28/54 (3)	$1,25 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-3}$
V-29/55 (4)	$4,2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-3}$
V-30/33,5 (5)	$5,3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-3}$
V-30/52 (6)	$5,2 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-3}$

#### VERIFIKACIJA HIDROGEOLOŠKIH PODATAKA POKUSNIM CRPLJENJEM I SIMULACIJOM POMOCU MATEMATIČKIH MODELA

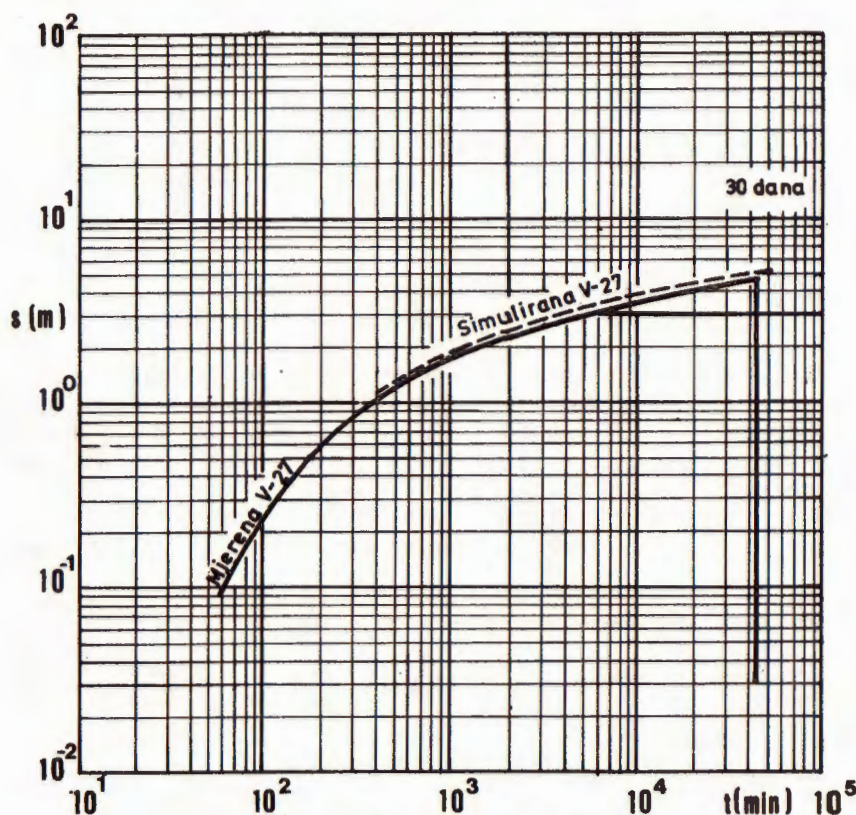
Izračunate parametre kako je to prikazano u prethodnim poglavljima bilo je potrebno verificirati zbog njihovog značenja za usmjeravanje razvoja vodoopskrbnog sistema Đakova. Verifikacija je sprovedena pomoću produženog pokusnog crpljenja postojeća dva bunara i pomoću analitičkih i numeričkih matematičkih modela.

Pokusno crpljenje izvedeno je tokom 30 dana, a ukupni kapacitet crpljenja na oba bunara iznosio je 2496 m<sup>3</sup>/dan (28,8 dm<sup>3</sup>/s). Mjereni podaci



Sl. 7. Geološki profili strukturno-piezometarskih bušotina s označenim mjestima na kojima su uzeti uzorci za laboratorijsko ispitivanje konsolidacije.

Fig. 7. Geological profiles of the structure-piezometer wells with designated points at which specimens were taken for laboratory investigation of consolidation.



Sl. 8. Analitički matematički model: simulirana i mjerena krivulja sniženje — vrijeme za slučaj zatvorenog, neograničenog i homogenog sloja. Pojačanom horizontalnom linijom označen položaj stacionarnog stanja za slučaj sloja s vertikalnim procjeđivanjem (poluzatvoren sloj).

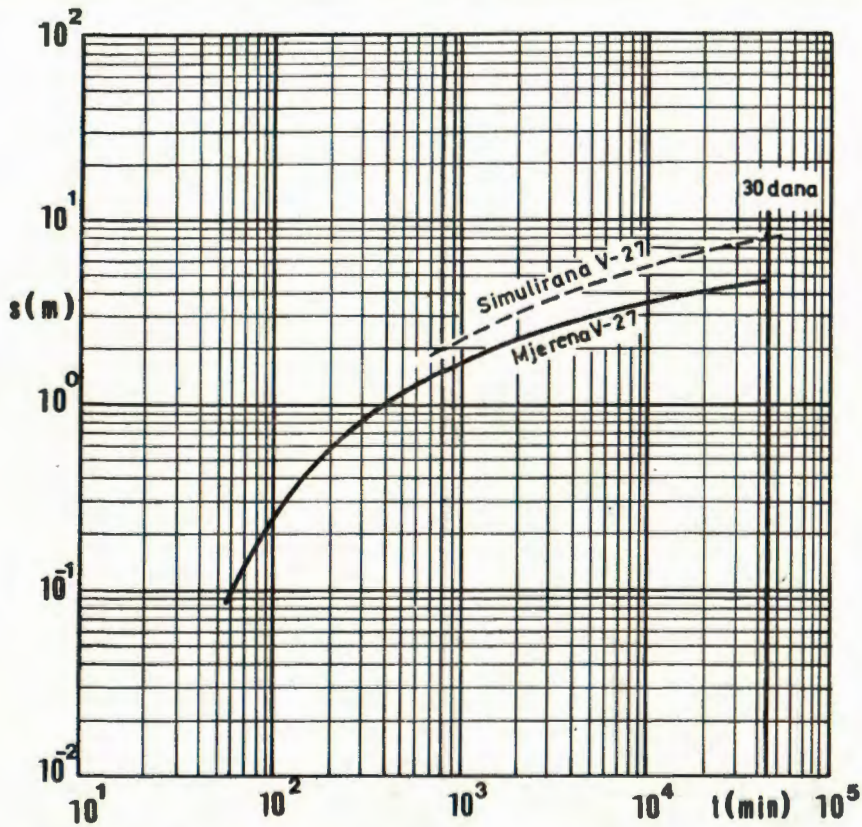
Fig. 8. Analytical mathematical model: simulated and measured curve decrease / time for the case of confined, infinite and homogeneous layers. Location of stationary state (condition) for the case of a layer with vertical seepage (semiclosed layer), designated by intensified horizontal line.

sniženja razine podzemne vode na crpilištu simulirani su zatim pomoću matematičkih modela. Korišteni matematički modeli obzirom na do sada opisane prilike (vidljive i na geološkim profilima) bili su sljedeći:

Analičkim modelima simuliran je zatvoren, neograničen sloj, zatvoren i na sjeveru rasjedom ograničen sloj, te poluzatvoren sloj (s procjeđivanjem iz krovine).

Numeričkim modelom pokriveno je područje crpilišta i okolice sa 757 čvorne točke unutar granica prikazanih na slici 1. Simulirane su sljedeće varijante: zatvoren i poluzatvoren homogen sloj, zatvoren i poluzatvoren nehomogen sloj (granica nehomogenosti podudarala se je s trasom rasjeda (?)). Posebno je simuliran zatvoren sloj s pozitivnim fluxom od  $3,3 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/dan/m<sup>2</sup> (ukupno 363 m<sup>3</sup>/dan ili 14 % od crpljene





Sl. 9. Analitički matematički model: simulirana i mjerena krivulja vrijeme — sniženje za slučaj zatvorenog, homogenog i na sjeveru rasjedom ograničenog vodoravnog sloja.

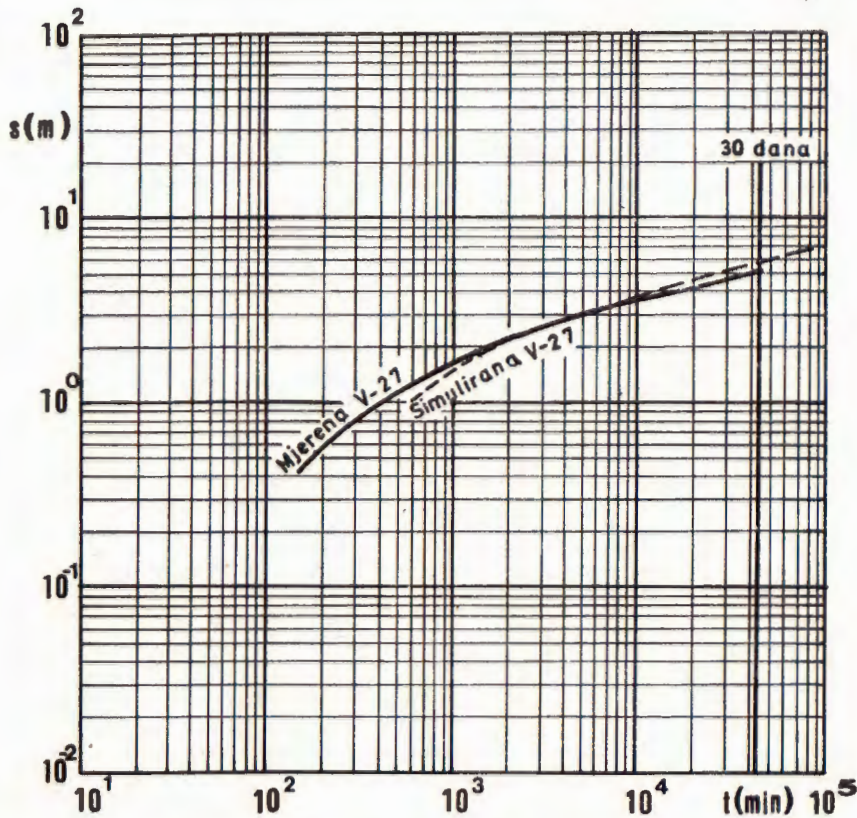
Fig. 9. Analytical mathematical model: simulated and measured curve time / decrease for the case of closed, homogenous and on the North by a fault framed water-bearing layers.

količine). Kod matematičkog modela korišteni su srednji parametri  $T = 235 \text{ m}^2/\text{dan}$ ;  $S = 2,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $B = 2652 \text{ m}$ , a u slučaju nehomogenog sloja sjeverno od rasjedne granice (?)  $T = 117,5 \text{ m}^2/\text{dan}$ .

Rezultati stvarnih sniženja mjerenih tokom pokusnog crpljenja i simuliranih sniženja pomoću matematičkih modela za različite uvjete prikazani su zajednički na slikama 8, 9, 10, 11, 12 i 13.

Nivogrami na navedenim slikama odnose se samo na piježometar V—27. Posljednji je izabran kao najudaljeniji od bunara (oko 400 m). Ostali piježometri, koji zbog štednje prostora nisu ovdje priloženi, pokazuju isto ili bolje podudaranje (vidi Miletić i dr. 1980). Kod simuliranih krivulja sniženje — vrijeme na numeričkom modelu primjećuje se u zadnjem dijelu deformacija koja je posljedica granica modela.

Iz prikazanih dijagrama vidljivo je izrazito dobro podudaranje krivulja konstruiranih na temelju mjerenja za vrijeme crpljenja i pomoću ma-



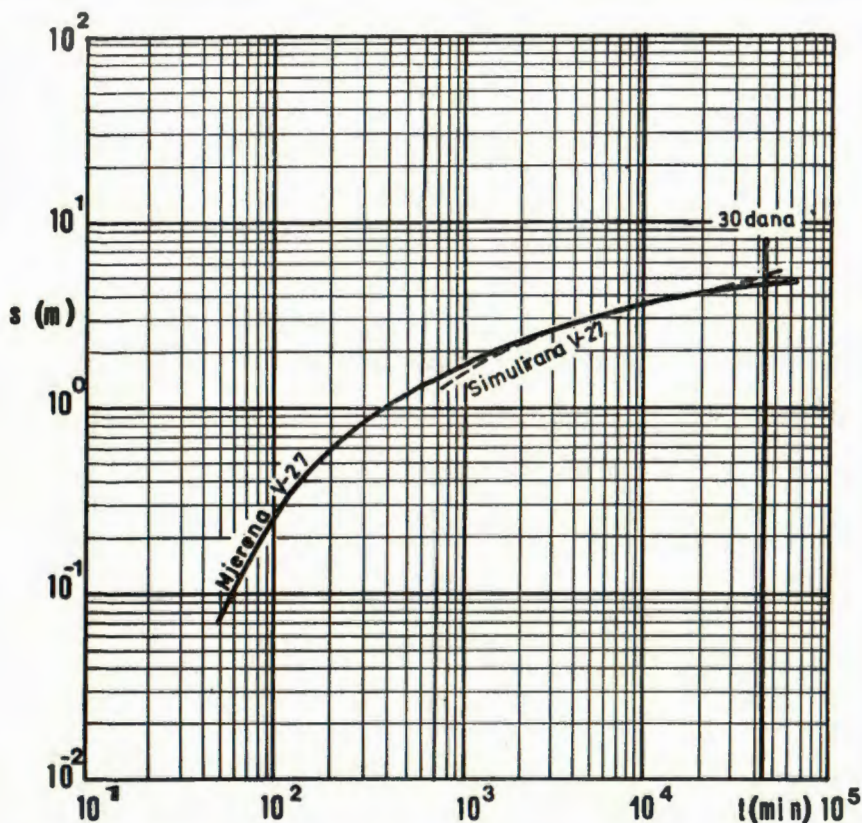
Sl. 10. Numerički matematički model: simulirana i mjerena krivulja vrijeme — sniženje za slučaj homogenog, zatvorenog neograničenog sloja s infiltracijom čiji izvor nije međuslojno procjeđivanje.

Fig. 10. Numerical mathematical model: simulated and measured curve time / decrease for the case of homogeneous, confined, infinite layer with the infiltration, the source of which is not the seepage through the semipermeable layer.

tematičkih modela simuliranih sniženja za zatvoren homogen neograničen vodonosni sloj. Izrazito nepodudaranje je između mjerenih sniženja i simuliranih sniženja za sve ostale slučajeve kao za slučaj nehomogenosti na sjevernoj granici, diskontinuiteta na sjevernoj granici i za slučaj međuslojnog procjeđivanja. Neznatne deformacije simuliranih sniženja u smislu približavanja mjerenim sniženjima dobijene su kod uvođenja pozitivnog fluxa (pritoke) u području najvećeg sniženja izazvanog pokusnim crpljenjem.

#### DISKUSIJA

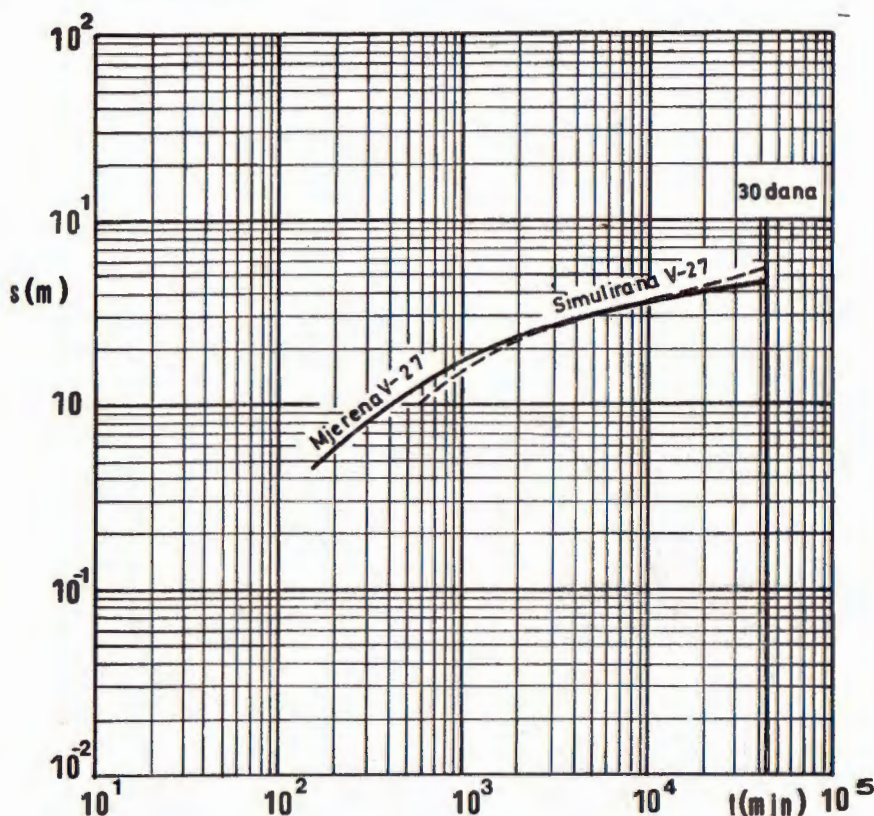
Najčešća, a mogli bi kazati i najtočnija metoda kada je u pitanju određivanje prosječnih hidrogeoloških parametara je metoda koja koristi podatke pokusnog crpljenja. Interpretacija podataka pokusnog crpljenja



Sl. 11. Numerički matematički model: simulirana i mjerena krivulja vrijeme — sniženje za slučaj homogenog i zatvorenog vodonosnog sloja.

Fig. 11. Numerical mathematical model: simulated and measured curve time / decrease for the case of homogeneous and closed layer.

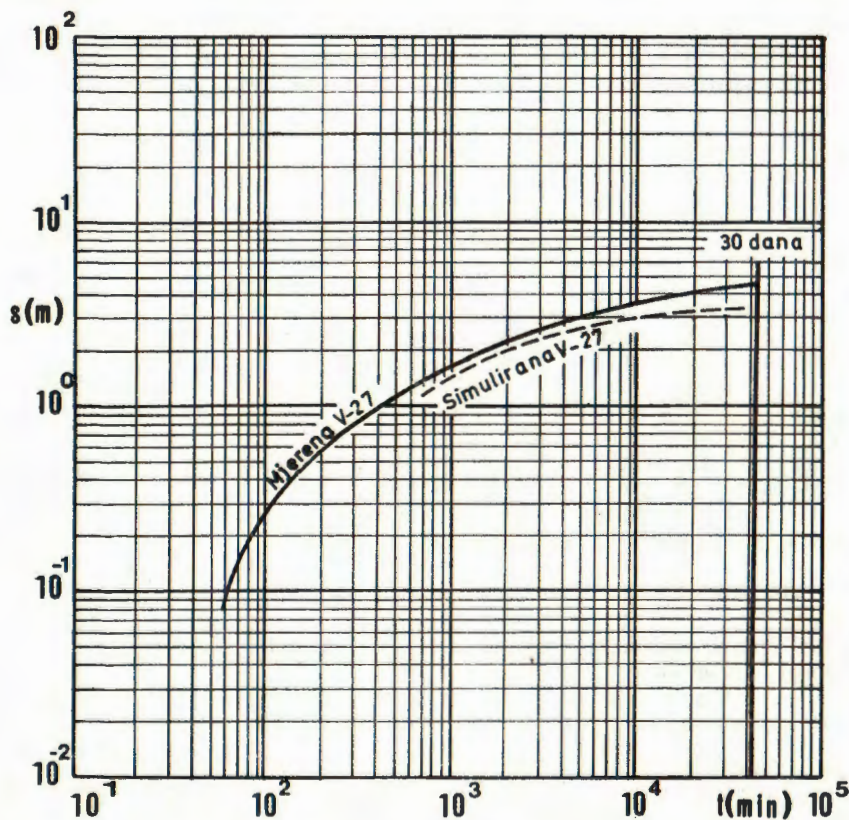
vrši se za nestacionarni tok grafoanalitičkim metodama temeljenim na analitičkim rješenjima jednadžbe koja opisuje radijalni tok bunaru. Ono što ograničava primjenu ove metode je geološka i hidraulička shematizacija i tipizacija prostora bez koje je praktički nemoguće izvesti partikularno rješenje diferencijalne jednadžbe toka. Veliki broj mogućih shema koje se odnose kako na kaptažni objekt (bunar), tako i na geološki prostor te hidrauličke granice doveo je do toga da postoji mnoštvo tzv. tipskih krivulja. Istovremeno, broj mogućih kombinacija geoloških i hidrauličkih značajki u prirodi premašuje broj postojećih i mogućih rješenja. Prema tome, relativno teško snalaženje u mnoštvu postojećih rješenja, a istovremeno odstupanje prirodnih uvjeta od uvjeta koji se nalaze u temelju izabranog rješenja dozvoljava pristran pristup interpretatora rješavanju zadatka, tim više što čitav niz različitih prirodnih kombinacija imade slične posljedice na odvijanje sniženja tokom pokusnog crpljenja. Jedan od mogućih načina izbjegavanja tako izazvanih pogrešaka kod određivanja



Sl. 12. Numerički matematički model: simulirana i mjerena krivulja vrijeme — sniženje za slučaj nehomogenog zatvorenog vodonosnog sloja.

Fig. 12. Numerical mathematical model: simulated and measured curve time / decrease for the case of unhomogeneous, confined waterbearing layer.

rezervi podzemnih voda je analiza hidrogeološkog sistema pomoću matematičkih modela, te usklađivanja izvršene analize i po mogućnosti provedenog pokusnog crpljenja. Na matematičkim modelima predvide se razne, a vjerovatne geološke i hidrauličke mogućnosti kao i odgovarajući raspored parametara i traži se najbolje podudaranje u takvim uvjetima simuliranog sniženja i sniženja mjenenog za vrijeme pokusnog crpljenja. Na takav način postupilo se je u ovom slučaju. Rezultati provedene analize opravdali su navedeni postupak jer su pokazali da su dosadašnji proračuni zaliha podzemnih voda temeljeni na suviše optimističkim pretpostavkama, a da je pretpostavka prihranjivanja sloja s površine človela do zanemarivanja posljedice procesa konsolidacije koji imade isti u tjecaj na oblik krivulje vrijeme — sniženje kao i međuslojno procjeđivanje. Kako je međutim proces konsolidacije vrlo spor to u odnosu na vrijeme pokusnog crpljenja efekti konsolidacije mogu biti zanemareni kod interpretacije hidrogeoloških parametara na temelju podataka ranih mjerenja



Sl. 13. Numerički matematički model: simulirana i mjerena krivulja vrijeme — sniženje za slučaj homogenog zatvorenog sloja s međuslojnim procjeđivanjem.

Fig. 13. Numerical mathematical model: simulated and measured curve time / decrease for the case of homogenous confined layer with the seepage through the semipervious layer.

sniženja. Na takav zaključak upućuju rezultati ovdje sprovedene analize. Proračunati parametri na osnovu Theisove tipske krivulje pokazali su se primjenjivim kod kasnijih interpretacija događaja u sloju pomoću matematičkih simulacija.

#### ZAKLJUČAK

Provedena analiza podataka pokusnog crpljenja ukazala je na nužnost uzimanja u obzir procesa konsolidacije i otpuštanja vode iz omeđujućih naslaga kod interpretacije prikupljenih podataka. S tim u vezi rezultati upućuju na pogreške do kojih se dolazi ako se odgovarajuće efekte na krivuljama sniženje — vrijeme tumači međuslojnim procjeđivanjem. Analize provedene na analitičkim i numeričkim matematičkim modelima

potvrdile su takve zaključke. Rezultati također upućuju na potrebu proširenih i detaljnijih studija u vezi istraživanja sigurnog eksploatacijskog kapaciteta crpilišta i bunara na našim ravničarskim područjima.

*Primljeno: 27. 12. 1985.*

#### LITERATURA

##### Objavljeni radovi:

- Domenico, P. A. & Mifflin, M. D. (1965): Water from Low-Permeability Sediments and Land Subsidence. *Water Resour. Res.*, vol. 1 (4).
- Domenico, P. A. (1972): Concepts and models in ground water hydrology. McGraw-Hill Book Comp., New York.
- Kruseman, G. P. & De Ridder, N. A. (1970): Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen.
- Miletić, P. & Heinrich-Miletić, M. (1981): Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju, I dio, stijene međuzrnske poroznosti. RGN fak. sveuč. u Zagrebu, OOUR Studij geotehnike Varaždin i NIŠRO Varaždin.
- Walton, W. C. (1962): Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois state Water surv., Bull.* 49.

##### Neobjavljeni radovi:

- Blažević, Z., Pančić, J., Tvrčković, T., Hrelec, F. i Macan, S. (1979): Studija regionalnog vodovoda istočne Slavonije. Fond struč. dokum. Hidroprojekt, Zagreb.
- Miletić, P., Mayer, D., Pfaff, S., Heinrich-Miletić, M. & Kapelj, J. (1978): Studija rezervi podzemnih voda istočne Slavonije, II faza s rezultatima radova prema programu istraživanja u 1976/77. Fond struč. dokum. Vodovod i kanalizacija, Vinkovci.
- Miletić, P., Capar, A., Mayer, D., Turić, G., Plančić, A. & Zuparić, A. (1981): Studija rezervi podzemne vode istočne Slavonije, III faza, za radove izvedene 1978/80. Fond struč. dokum. Vodovod i kanalizacija, Vinkovci.
- Urumović, K. (1975): Hidrogeološke značajke šireg područja Đakova i proračun crpilišta za vodoopskrbu Đakova. Fond struč. dokum. RGN fakultet, Zagreb.

### An Approach to the Interpretation of Parameters of Pumping Test. Example: Well Field Đakovo—Trslana

*P. Miletić, M. Heinrich-Miletić and A. Bačani*

Pumping tests of two wells were performed — a short (3 days) and a prolonged (30 days) one — at the location of the future well field site Trslana. Curves of draw-down / time for the short pumping demonstrate some deformations that point to the effect of the seepage through the semipervious layer. The prolonged pumping interpreted by the analytical and numerical mathematical models proved, however, that the previously mentioned deformations should be attributed to the process of consolidation and water release from the storage of neighbouring clay sediments. This conclusion points to the need for revision of the so far applied methods of estimation of the safe yield in clastic sediments of the Pannonian basin.