

Ustrezne analize črpalnih poizkusov v razpoklinskih vodonosnikih

Appropriate analysis methods of pumping tests in fractured aquifers

TIMOTEJ VERBOVŠEK

Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geologijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija;

E-mail: timotejverbovsek@ntfgeo.uni-lj.si

University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva 12, Ljubljana, Slovenia;

E-mail: timotejverbovsek@ntfgeo.uni-lj.si

Received: June 8, 2005 Accepted: November 24, 2005

Izvleček: Kljub dejstvu, da so nekatere metode črpalnih poizkusov v razpoklinskih vodonosnikih že uveljavljene, se v Sloveniji za analizo razpoklinskih kamnin še vedno uporabljajo neustrezne metode, razvite za medzrnske vodonosnike. Namen prispevka je opozoriti na uporabo ustreznih postopkov, podati kratek pregled uveljavljenih metod ter na nekaj primerih analizirati rezultate črpalnih poizkusov v dolomitih predvsem z modeli dvojne poroznosti.

Abstract: Despite the fact that methods for analyzing pumping test data in fractured aquifers are at the present time developed to the practical level of use, in Slovenia they are still not used correctly. Even for the fractured aquifers the preferable analysis methods are Theis and Cooper-Jacob equations, which are applicable only to single-porosity homogeneous aquifers. The purpose of this paper is to warn against erroneous applications of inappropriate methods and to give a brief summary of suitable methods. Finally few examples of pumping tests in dolomites are analyzed and interpreted with methods based on double porosity model.

Ključne besede: črpalni poizkusi, vodonosnik, razpoklinska poroznost, model dvojne poroznosti, dolomit

Key words: pumping tests, aquifer, fracture porosity, double porosity model, dolomite.

UVOD

Karbonatni vodonosniki pripadajo razpoklinskemu ali kraško-razpoklinskemu tipu. Tako pri nas kot drugod so ti vodonosniki čedalje bolj zanimivi zaradi izkoriščanja pitne vode, v tujini pa so pomembni tudi kot naftni rezervoarji. Trenutni svetovni trendi kažejo, da se

raziskave razpoklinskih vodonosnikov šele začinjajo (NEUMAN, 2005).

Najbolj zanesljive podatke o vodonosnikih, t.j. hidravlične parametre pridobimo s pomočjo črpalnih poizkusov. Tudi za kamnine z razpoklinsko poroznostjo se uporabljajo metode črpalnih poizkusov, razvite za medzrnske vodonosnike;

predvsem Theisova in Cooper-Jacobova. Te metode za razpoklinske kamnine večinoma niso primerne, zato so z njimi določeni rezultati pogosto napačni in tudi nelogični.

Namen prispevka je opozoriti na ustrezno uporabo metod v razpoklinskih vodonosnikih ter podati njihov pregled, prav tako pa na izbranih primerih podati obdelave in komentarje nekaterih metod za razpoklinske vodonosnike.

METODE

V strokovni literaturi je v primerjavi z metodami črpalnih poizkusov, razvitimi za kamnine z medzrnsko poroznostjo, metod za razpoklinske kamnine bistveno manj oz. jih nekateri celo v celoti izpuščajo (BATU, 1998). Pri prvih je namreč mogoče upoštevati popolnost vodnjakov, stacionarnost toka, anizotropnost, različno debelino vodonosnika, večplastni sistem, odprtost vodonosnikov itd. Za razpoklinske kamnine pa se uporablja precej manj metod, saj so te mlajše in še ne dovolj uveljavljene, predvsem zaradi:

- težko določljivih lastnosti razpok (terensko kartiranje, geofizikalne raziskave),
- zapletenih izračunov, ki zahtevajo precej parametrov,
- uporabe posebne tehnologije pri črpalnih poizkusih (npr. tesnil oz. 'packerjev'),
- dejstva, da so modeli dvojne poroznosti računalniško podprti šele malo časa.

Številni računalniški programi za obdelavo črpalnih poizkusov podpirajo predvsem

najenostavnejše metode za medzrnske vodonosnike, le redki pa tudi za razpoklinske, npr. *Aquifer Test* (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2001), *AQTESOLV* (HydroSOLVE, Inc., 2003) in *AquiferWin32* (RUMBAUGH & RUMBAUGH, 2003).

V prispevku je poudarek na metodah v razpoklinskih vodonosnikih in ne tudi na kraško-razpoklinskih, ker ti zahtevajo poseben pristop. Kraški vodonosniki so izredno heterogeni, saj je bilo ugotovljeno, da se lahko transmisivnost blokov matriksa kamnine in razpok razlikuje tudi za faktor 100.000 (KRIVIC, 1983).

Modeli razpoklinskih vodonosnikov

Stanje v naravi opišemo z modelom, ki predstavlja poenostavitev realnega sistema. Za razpoklinske kamnine je razvitih precej modelov, v glavnem pa jih lahko ločimo na diskretne modele, na modele kontinuuma in multikontinuuma ter na kombinirane hibridne modele (ČENČUR CURK, 2002). Pri *diskretnih modelih* moramo poznati geometrijo ter različne lastnosti razpok (položaj v prostoru, gostoto, povezanost, odprtost, hrapavost ipd.), razpoke pa nato obravnavamo deterministično, stohastično ali s fraktalnimi metodami. Pri *diskretnih modelih* je geometrijo razpok ponavadi zelo težko opisati, zato uporabljamo *modele kontinuuma*. Pri teh obravnavamo prostor kot ekvivalenten izotropen homogen prostor na makroskopskem nivoju tako, da upoštevamo povprečne vrednosti merjenih parametrov. Podoben pristop velja za *modele multikontinuuma*, kjer je prostor razdeljen na dva ali več prekrivajočih se homogenih podsistemov kontinuuma. Najbolj znan

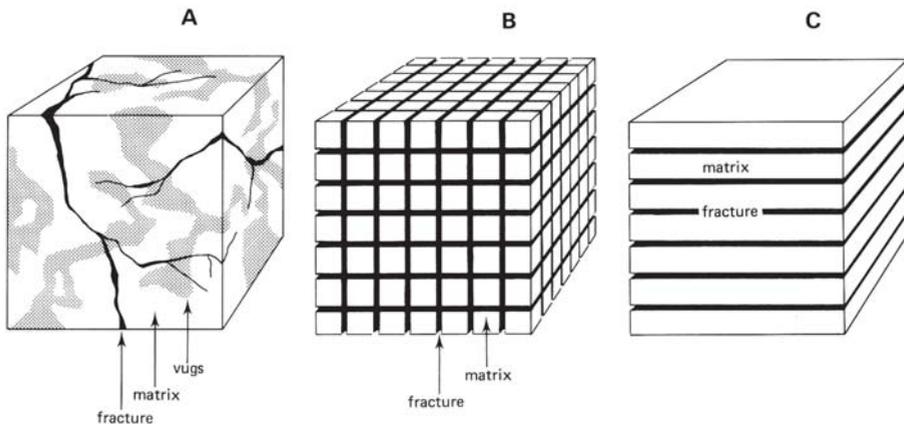
model iz te skupine je model dvojne poroznosti, in je zaradi široke uporabe natančneje opisan v nadaljevanju. *Hibridni modeli* združujejo modele kontinuuma ter diskretne modele.

Model dvojne poroznosti

Pri tem modelu upoštevamo koncept dvojne poroznosti (BARENBLATT ET AL., 1960). Zanj je značilno, da prostor ločimo na dva prekrivajoča se dela, na razpoke in na vmesne bloke matriksa, tako da tok v njih obravnavamo ločeno. Geometrija razpok je odvisna od modela, v vsakem primeru pa je zelo poenostavljena. Največkrat se uporabljata tridimenzionalni model ortogonalnih razpok, katere razdelijo prostor v kocke enakih dimenzij (WARREN & ROOT, 1963) ali pa model med seboj vzporednih horizontalnih razpok, ki razdelijo prostor v ploščate bloke (*slab-shaped blocks*). Redkeje

se uporabljajo tudi modeli dveh sistemov razpok. Ti ločijo prostor na bloke v obliki navpičnih stolpcev (npr. pri modeliranju razpok v bazaltih; AGUILERA, 1987).

Za bloke matriksa je značilno, da imajo primarno poroznost ter veliko sposobnost vskladiščenja, tok v njih pa je majhen. Za razpoke velja nasprotno. Imajo namreč majhno sposobnost vskladiščenja, tok skozi vodonosnik pa teče večinoma po njih. Dodatni predpostavki sta, da je tok vode iz blokov matriksa možen le v razpoke, ter da je tok v vodnjak mogoč le iz razpok in ne iz matriksa zaradi bistveno večje prepustnosti razpok. Ločimo lahko dva režima toka. Pri *psevdo-stacionarnem toku* je prisoten tok iz matriksa v razpoke in se nivo gladine v matriksu ne spreminja. Pri *nestacionarnem toku* gladina v blokkih matriksa ni stalna in se spreminja s časom. Kvantitativno opišemo tok v obeh sistemih z modificirano difuzijsko



Slika 1. Razpoklinska poroznost v realni kamnini (A) ter poenostavitev z modelom dvojne poroznosti s sistemom treh pravokotnih sistemov (B) in vzporednim sistemom razpok (C) KRUSEMAN & DERIDDER, 1991)

Figure 1. Fractured rock formations. (A) A naturally fractured rock formation, (B) Warren-Root's idealized three-dimensional, orthogonal fracture system, (C) Idealized horizontal fracture system (KRUSEMAN & DERIDDER, 1991)

enačbo (MOENCH, 1984; DOMENICO & SCHWARTZ, 1998):

$$\text{Tok v razpokah: } K\nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (1)$$

$$\text{Tok v matriksu: } K'\nabla^2 h = S_s' \frac{\partial h'}{\partial t} - q \quad (2)$$

q predstavlja tok iz blokov matriksa v razpoke, ki ga za psevdostacionarne razmere opišemo kot:

$$q = -\alpha K'(h' - h) \quad (3)$$

h' = prostorska povprečna vrednost hidravličnega nivoja v blokih matriksa
 a = geometrijski faktor [dolžina²]

K predstavlja koeficient prepustnosti sistema razpok ($K = K_f \cdot V_f$), K' pa analogno koeficient prepustnosti sistema blokov matriksa ($K' = K_m \cdot V_m$). (4)

K_f = koeficient prepustnosti razpok
 V_f = razmerje med prostornino razpok ter prostornino celotnega volumna
 K_m = koeficient prepustnosti matriksa
 V_m = razmerje med prostornino matriksa ter prostornino celotnega volumna

Podobno sta definirana koeficient specifičnega elastičnega vskladiščenja za sistem razpok $S_s = S_{sf} \cdot V_f$ ter za sistem blokov matriksa $S_s' = S_{sm} \cdot V_m$. (5)

Metode črpalnih poizkusov

Pri analizi rezultatov črpalnih poizkusov v razpoklinskih kamninah moramo izbrati enega od naštetih modelov razpoklinskih vodonosnikov, nato pa upoštevati še lastnosti črpalnih in opazovalnih vodnjakov ter toka v vodonosniku (popolnost vodnjaka, število opazovalnih vodnjakov, režim toka, odprtost

vodonosnika itd.). Metode glede na izbrane lastnosti ločimo v več skupini:

1. *Modeli z eno razpoko (horizontalna ali vertikalna razpoka)*. Ti primeri so v naravi precej redki, izjeme so le umetno povzročene razpoke, ki nastanejo zaradi namernega povečanja izdatnosti vodnjaka s hidravličnim razpokanjem (*hydraulic fracturing*). Tok je sprva pravokoten na ploskev razpoke, pozneje pa se spremeni v psevdoradialnega. Med metodami obdelav črpalnih poizkusov so najbolj znane (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991):

- metoda GRINGARTEN-WITHERSPOON (1972) za opazovalne vodnjake v homogenih izotropnih zaprtih vodonosnikih,
- metoda GRINGARTEN & RAMEY (1974) za črpalni vodnjak v homogenih izotropnih zaprtih vodonosnikih,
- metoda RAMEY-GRINGARTEN (1976) za črpalni vodnjak v homogenih izotropnih zaprtih vodonosnikih z upoštevanjem neplanarne razpoke s sposobnostjo uskladiščenja.

2. *Modeli dvojne poroznosti*. Med vsemi modeli za razpoklinske vodonosnike so te metode najbolj razširjene. Pri večini metod predpostavimo, da je vodonosnik izotropen, homogen, zaprt, enake debeline ter se razširja neskončno daleč. Bistvenega pomena je tudi, da je črpani pretok ves črpalni poizkus konstanten. Najbolj uveljavljene metode slonijo na naštetih predpostavkah, razlikujejo pa se predvsem v režimu toka in v številu opazovalnih vodnjakov:

- WARREN-ROOT (1963): psevdostacionaren tok (nivo gladine v matriksu se ne spreminja), velja za črpalni vodnjak,
- BOURDET & GRINGARTEN (1980): psevdostacionaren tok iz matriksa v razpoke, velja za opazovalne vodnjake,

- KAZEMI ET AL. (1969): nestacionaren tok (nivo gladine se v matriksu spreminja), velja za opazovalne vodnjake,
- BOULTON & STRELTSOVA (1977): črpalni vodnjak, vodonosnik razdeljen na porozne horizontalne bloke, ločene z razpokami,
- MOENCH (1984): psevdostacionaren in nestacionaren tok, uvedba koncepta tanke mineralne plasti.

Prve tri metode so si med seboj dokaj podobne, saj za vse veljajo naslednje matematične predpostavke. Znižanje v vodnjakih opišemo z enačbo, analogno Theisovi (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991):

$$s = \frac{Q}{4\pi T_f} F(u^*, \lambda, \omega) \quad (6)$$

Theisovo funkcijo vodnjaka torej nadomešča funkcija $F(u^*, \lambda, \omega)$, ki je odvisna od treh parametrov. Prvi, u^* predstavlja modificirano vrednost Theisovega parametra u in je podan kot

$$u^* = \frac{T_f t}{(S_f + \beta S_m) r^2} \quad (7)$$

T_f predstavlja transmisivnost razpok, S_f in S_m koeficienta elastičnega vskladiščenja v razpokah ter v blokii matriksa in β koeficient, ki je pri zgodnjih časih črpanja enak 0, pri poznih pa enak 1/3 (ortogonalni bloki) ali 1 (plasti). Dodatna parametra, s katerima opišemo tok v vodonosniku z dvojno poroznostjo, sta koeficient interporoznega toka λ , odvisen od oblike, velikosti in prepustnosti blokov matriksa, ter ω , razmerje med vskladiščenjem v razpokah

ter vskladiščenjem v celotnem sistemu (oba parametra sta brez dimenzije):

$$\lambda = \alpha r^2 \frac{K_m}{K_f} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{S_f}{S_f + \beta S_m} \quad (9)$$

α = geometrijski faktor, odvisen od odnosa med razpokami in matriksom [površina⁻¹]

Tipičen primer odziva znižanja v vodnjaku oz. v piezometrih v odvisnosti od logaritma časa je prikazan na sliki 2. Krivuljo lahko v idealnem primeru ločimo na tri dele:

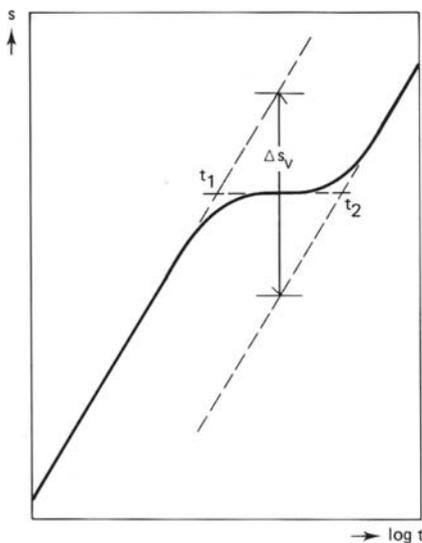
- Pri zgodnjih časih črpanja (začetni del krivulje) je odvisnost $s - \log t$ linearna, saj je $\beta=0$ in takrat se enačba poenostavi v Theisovo enačbo, za katero lahko uporabimo Cooper-Jacobovo poenostavitev. Tok v vodnjak prihaja tedaj le iz razpok:

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T_f} \log \frac{2,25T_f t}{S_f r^2} \quad (10)$$

- Po določenem času črpanja (srednji del krivulje) se ustvari prehodno obdobje, ko začne zaradi ustvarjenega gradienta voda teči iz blokov matriksa v razpoke. Znižanje poteka tedaj počasneje, kar se odraža v manjšem naklonu krivulje oz. tudi horizontalnem poteku pri večjih prepustnostih matriksa.
- V zadnjem delu krivulje pri poznih časih črpanja priteka voda tako iz matriksa kot tudi iz razpok, krivulja se podobno poenostavi v Theisovo, le da je faktor $\beta=1/3$ oz. 1 in znižanje enako

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T_f} \log \frac{2,25T_f t}{(S_f + \beta S_m) r^2} \quad (11)$$

Moenchova metoda (1984) predstavlja nadgradnjo metod WARREN-ROOT (1963) za psevdostacionaren tok in KAZEMI ET AL. (1969) za nestacionaren tok. Z uvedbo koncepta tanke plasti na površini razpok (*angl. fracture skin*) je Moench razložil, zakaj prihaja tako do psevdostacionarnega kot tudi nestacionarnega toka. Ta plast predstavlja delno prepusten material, ki zavira tok iz matriksa v razpoke. Če je plast zelo slabo prepustna, je največji gradient hidravličnega nivoja med matriksom in razpokami prisoten na površini plasti in nestacionarni tok se poenostavi v psevdostacionarnega. Vsi računalniški programi, ki podpirajo obdelavo črpalnih poizkusov v vodonosnikih z dvojno poroznostjo, podpirajo le Moenchovo metodo, saj ta združuje koncepte vseh prej omenjenih metod. Za računalniško reševanje metode je potrebno imeti podatke o opazovalnih vodnjakih.



Slika 2. Odvisnost $s - \log t$ pri modelu dvojne poroznosti KRUSEMAN & DERIDDER, 1991)

Figure 2. Semi-log time-drawdown plot in a fractured rock formation of the double porosity type (KRUSEMAN & DERIDDER, 1991)

3. *Diskretni oz. stohastični modeli.* Za analizo črpalnih poizkusov se precej manj kot zgoraj opisani modeli uporabljajo diskretni modeli, ki temeljijo na modeliranju realne geometrije razpok z vsemi izmerjenimi razpokami (naklon, vpad, odprtost, raztezanje itd.). Hidravlične lastnosti razpoklinskega sistema se nato izračunajo s statističnimi oz. stohastičnimi metodami (National Research Council, 1996). Metode temeljijo na povezavi posameznih razpok v modele mreže razpok (DFN, *Discrete Fracture Network*) in prav tako kot fraktalne še niso širše uveljavljene.

4. *Fraktalni modeli.* Predvsem v zadnjih letih so za analizo črpalnih poizkusov v razpoklinskih kamninah pričeli razvijati fraktalne metode (ACUNA & YORTSOS, 1995; HAMM & BIDAUX, 1996; LEVEINEN, 2000). Metodam je skupna predpostavka, da se nek pojav pojavlja v enaki obliki v različnih merilih. Tako lahko npr. na bloku kamnin določen vzorec razpok pričakujemo v regionalnem merilu. Večina teh metod je razvitih za nestacionaren tok, rešitve pa podobno kot pri Theisovi in ostalih metodah omogoči prilagajanje podatkov tipskim krivuljam.

Pri fraktalnih metodah je lahko dimenzija toka tudi realno število n , ki ima vrednosti med 1 (enodimenzijski tok), 2 (cilindrični dvodimenzionalni tok) ali 3 (radialni sferni tok v prostoru). Splošno difuzijsko enačbo, ki opisuje nestacionaren tok za te primere, je določil BARKER (1988) v svojem *Generalized Radial Flow (GRF)* modelu:

$$\frac{K_f}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial h}{\partial r} \right) = S_{sf} \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (12)$$

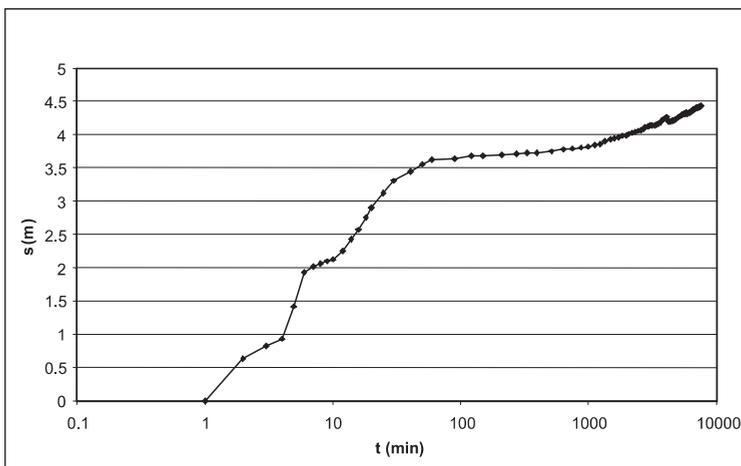
Podatki iz literature kažejo, da taki primeri v naravi obstajajo, saj so rezultate črpalnih poizkusov v različnih kamninah prilagodili krivuljam z različno dimenzijo n , npr. $n=1,8$ v granitih, 1,7 v gabrih (LODS & GOUZE, 2004). Za $n=2$ se Barkerjeve enačbe poenostavijo v znani formuli Theisa in Cooper-Jacoba za nestacionaren tok ter v Thiemovo formulo za stacionaren tok.

REZULTATI IN RAZPRAVA

V nadaljevanju je podanih nekaj značilnih primerov rezultatov in analiz črpalnih poizkusov v dolomitih. Podobne grafe bi lahko analizirali tudi v nekaterih drugih kamninah, za katere veljajo predpostavke modela dvojne poroznosti (npr. razpokani peščenjaki, razpokane magmatske kamnine itd.). Za dolomite je značilno, da spadajo med zelo razpokane kamnine, saj so razpoke v njih precej bolj pogoste kot v peščenjaki in apnencih (AGUILERA, 1980). To potrjujejo

tudi opazovanja dolomitnih plasti v Sloveniji. Poroznost matriksa lahko v dolomitih niha v precej širokem razponu, od skoraj nič do nekaj odstotkov in pripada večinoma medkristalni poroznosti, nastali pri dolomitizaciji, redkeje pa poroznosti, nastali z raztapljanjem (*vugs*), ter fenestralni poroznosti, značilni za medplimske dolomite (MOORE, 2001).

Na sliki 3 je prikazan graf znižanja s v odvisnosti od časa pri črpalnem poizkusu v dolomitu cordevolske starosti pri konstantnem pretoku $Q = 15$ l/s (VERBOVŠEK, 2003). Na njem je prikazana tridelna krivulja, značilna za model dvojne poroznosti. V začetnem delu krivulje (prvih nekaj minut) je opaznih nekaj odstopanj od premice, nato sledi položni del in kasneje (od 1000 minut dalje) spet počasno naraščanje znižanja. Podatki veljajo za črpalni vodnjak, zato je bila za analizo primerna obdelava po metodi WARREN-ROOTA (1963), ki je dala naslednje rezultate: $T_f = 4,43 \cdot 10^{-3}$ m²/s, $S_f = 1,85 \cdot 10^{-2}$,



Slika 3. Diagram znižanja s v odvisnosti od časa (črpalni poizkus v dolomitu cordevolske starosti, $Q=15$ l/s) (VERBOVŠEK, 2003)

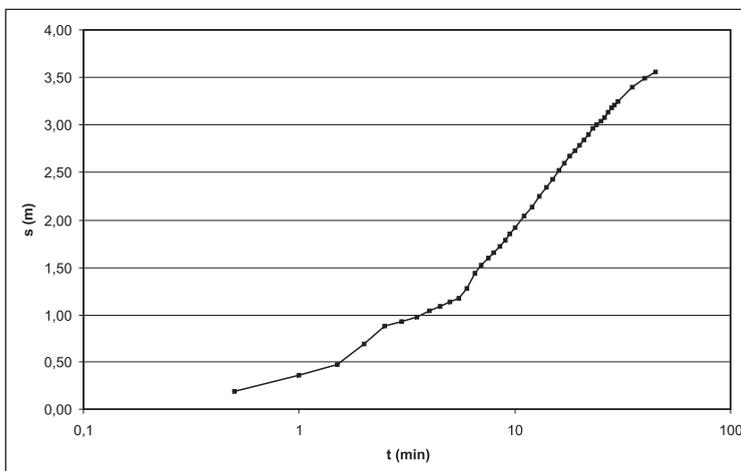
Figure 3. Semi-log plot for pumping test data in dolomite (Cordevolian age, discharge $Q = 15$ l/s) (VERBOVŠEK, 2003).

$S_m = 0,34$ in koeficienta $\lambda = 1,35 \cdot 10^{-6}$ ter $\omega = 0,05$. Primerljive vrednosti smo dobili tudi pri analizi Moenchovih podatkov za črpalni vodnjak po metodi Warren-Roota (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991). Transmisivnosti blokov matriksa po tej metodi ni mogoče določiti. Obnašanje po modelu dvojne poroznosti je posledica dejstva, da ima dolomit cordevolske starosti veliko medkristalno poroznost, saj je nastal s pozno diagenozo.

Na drugem diagramu (sl. 4) je vidno znižanje v dolomitu zgornjetriasne starosti pri črpanju $Q = 0,1$ l/s (VERBOVŠEK, 2003). Črpanje je trajalo bistveno manj časa kot pri prejšnjem primeru, zato iz oblike krivulje ni jasno, kakšen bi bil nadaljni potek podatkov na grafu. Mogoče je namreč, da so meritve zajele le začetni del krivulje, ko je prisoten tok le iz razpok, saj leži večina podatkov na linearnem delu. To potrjuje nekaj zadnjih meritev, kjer se znižanje počasi izravnava v bolj položno krivuljo, ki je tipična za model

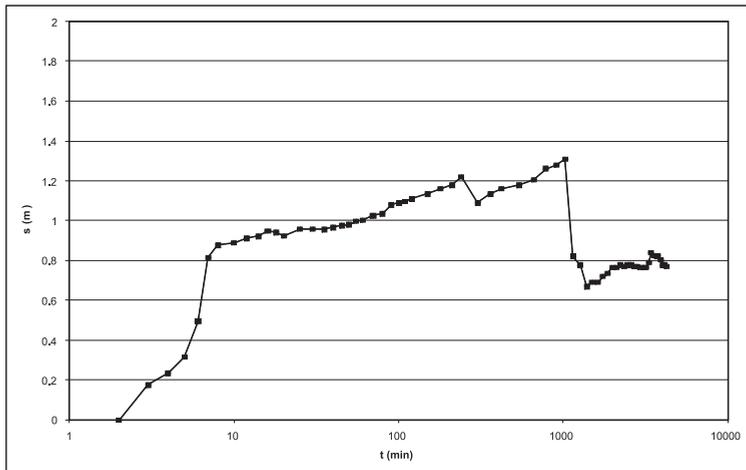
dvojne poroznosti. Druga možnost pa je, da ima dolomit zelo majhno poroznost matriksa in sta tako tok kot vskladiščenje prisotna le v razpokah in ne tudi v matriksu. V tem primeru velja izračunani koeficient elastičnega vskladiščenja $S = 0,31$ tako za bloke matriksa kot tudi za razpoke ($S_f + \beta S_m$), zadnjih nekaj meritev pa lahko predstavlja vpliv slabše prepustne bariere ali pa manjše merske napake. Za analizo linearnega dela je lahko tedaj primerna Cooper-Jacobova metoda, kateri izračunani podatek $T = 6,54 \cdot 10^{-6}$ m²/s predstavlja transmisivnost razpok T_f in ne transmisivnosti kamnine z medzrnsko poroznostjo T_m .

Na sliki 5 (VERBOVŠEK, 2003) je prikazan primer črpalnega poizkusa, kjer modela dvojne poroznosti žal zaradi prevelikih nihanj pretoka ne moremo direktno uporabiti na s-t diagramu. Zato moramo v ta namen uporabiti za pretok normirani s/Q-t diagram, na kar se često pozablja. Takih situacij je precej, saj se pogosto uporabljajo t.i. *step testi*, s katerimi



Slika 4. Diagram znižanja s v odvisnosti od časa (črpalni poizkus v dolomitu zgornjetriasne starosti, $Q=0,1$ l/s)

Figure 4. Semi-log plot for pumping test data in dolomite (Norian-Rhaetian age, discharge $Q = 0.1$ l/s) (Verbovšek, 2003)



Slika 5. Diagram znižanja s v odvisnosti od časa (črpalni poizkus v “glavnem dolomitu” norijsko-retijske starosti), variabilen pretok (VERBOVŠEK, 2003)

Figure 5. Semi-log plot for pumping test data in dolomite (upper Triassic age), variable discharge (VERBOVŠEK, 2003)

določujejo učinkovitosti delovanja vodnjakov. Kadar sta v takem obravnavanem sistemu prisotni obe vrsti poroznosti, so efekti dvojne poroznosti zaradi nihanja pretokov zabrisani.

ZAKLJUČKI

Temeljna razlika med analizami črpalnih poizkusov v medzrnskih in v razpoklinskih vodonosnikih je v izračunu hidravličnih parametrov, saj dobimo v prvem primeru podatka o transmisivnosti (T) in specifičnem elastičnem vskladiščenju vodonosnika (S_s), v drugem pa ločene rezultate transmisivnosti (T_f) in specifičnega elastičnega vskladiščenja razpok (S_{sf}) ter transmisivnosti (T_m) in specifičnega elastičnega vskladiščenja blokov matriksa (S_{sm}). Razlika je opazna tudi na grafu odvisnosti znižanja od časa ($s - \log t$), kjer je za medzrnske kamnine odvisnost linearna, za razpoklinske pa se kaže v obliki tridelne krivulje v obliki črke S (sl. 2 in sl. 3). Za prvi

del krivulje je značilen tok le iz razpok ($T_f \gg T_m$), nato pride do upočasnitve naraščanja znižanja zaradi toka iz matriksa v razpoke, na koncu pa se blažilni učinek dotoka vode iz matriksa izgubi.

V začetnem delu so zaradi kratkih merskih časovnih intervalov na krivulji mogoče manjše napake pri meritvah, prav tako pa na ta del krivulje vplivajo efekti vskladiščenja vode v vodnjaku ter “kožni” oz. *skin* efekti, zato premici (sl. 2) skoraj nikoli nista vzporedni. Tridelna krivulja je lahko zabrisana tudi, kadar je parameter λ izredno majhen, saj je tedaj transmisivnost blokov matriksa zanemarljiva in tok je v celotnem črpalnem poizkusu prisoten le v razpokah. Kamnina se tedaj obnaša podobno kot homogen vodonosnik z medzrnsko poroznostjo.

Analiza izbranih črpalnih poizkusov v dolomitnih vodonosnikih kaže, da nekatere krivulje sledijo modelu dvojne poroznosti in jih je zato potrebno tako tudi razlagati.

Rezultati samodejnega računalniškega prilagajanja rezultatov krivulj za medzrnsko poroznost skozi vse točke na sliki 3 so nelogični, dobljene vrednosti pa so napačne, saj naj bi parametre v razpokah in v matriksu obravnavali ločeno (RUMBAUGH AND RUMBAUGH, 2003).

Nekateri črpalni poizkusi v dolomitih na grafu $s - \log t$ vseeno ne prikazujejo omenjene krivulje v treh delih, temveč le v linearni odvisnosti, podobno kot pri medzrnskih kamninah (sl. 4). Vzrokov je več. Če je črpanje prekratko, pridobimo podatke le za prvi del krivulje, saj tedaj še ne prihaja do izcejanja vode iz matriksa v razpoke. Črpalni poizkusi bi v takih primerih torej morali biti daljši (primer na sliki 2). Če so razpoke drobne in je kamnina z njimi gosto prežeta ter če zanjo veljajo pogoji laminarnega toka oz. Darcyjev zakon, potem lahko za razpoklinske vodonosnike uporabimo tudi metode, razvite za medzrnske vodonosnike (VASVARI & KRIEGL, 2003). Model dvojne poroznosti tedaj namreč izgubi pomen in se poenostavi v model z enojno poroznostjo, za katerega veljajo metode Theisa in Cooper-Jacoba. Seveda moramo upoštevati, da predstavlja izračunani podatek T transmisivnost razpok T_f , hkrati pa podatek o elastičnem koeficientu vskladiščenja S velja za razpoke (S_f). Tretja razlaga za linearen potek krivulje je mogoča pri analizi podatkov iz opazovalnih vodnjakov. Tridelna krivulja je namreč značilna le za bližnjo okolico črpalnega vodnjaka, saj je na določeni oddaljenosti od vodnjaka prisoten le združen tok iz matriksa in iz razpok (KAZEMI ET AL., 1969).

Če je iz podatkov črpalnega poizkusa razvidno, da ima vodonosnik dvojno

poroznost, lahko zaradi metode samodejnega računalniškega prilagajanja krivulj za medzrnsko poroznost nastanejo temeljne napake. Namesto realnih vrednosti hidravličnih parametrov dobimo prevelike ali premajhne vrednosti, kar je odvisno od načina samodejnega prilagajanja. Tako lahko npr. izračunamo večjo transmisivnost ali specifično elastično vskladiščenje vodonosnika, kot je dejanska, s tem pa precenimo sposobnost izkoriščanja vode iz vodonosnika. Napačni so lahko tudi izračuni hitrosti pretakanja vode v vodonosnikih, dejansko širjenje polutantov je lahko npr. mnogo hitrejše, kot smo izračunali, ker se polutanti v razpokah in v matriksu gibljejo s precej različno hitrostjo.

Čeprav so obdelave črpalnih poizkusov v razpoklinskih vodonosnikih bolj zapletene in manj razširjene kot metode za medzrnske kamnine, jih je vsekakor potrebno uporabljati, ko analiziramo črpalne poizkuse v razpoklinskih kamninah. Ker moramo včasih potrebne parametre določiti že med črpanjem, je za pravilne rezultate ključnega pomena predhodno poznavanje ustreznih metod.

Zahvale

Hvala izr. prof. dr. M. Veseliču za kritične pripombe pri izdelavi prispevka.

SUMMARY

Appropriate analysis methods of pumping tests in fractured aquifers

Carbonate aquifers belong to fractured or karstic-fractured type. Although the appropriate methods for analyzing pumping

test data are those developed for fractured aquifers, unsuitable methods like Theis or Cooper-Jacob are still currently used for analysis in Slovenia. Use of these methods leads to erroneous calculations of hydraulic parameters. However, even in some recent aquifer test data books the methods for fractured reservoirs are completely omitted (BATU, 1998). The reason for their absence is probably the fact that they are still “being developed” and are not widely in use, mostly because of complex mathematical theory used for analysis, hard-to-obtain fracture properties and the need for special drilling equipment.

Modeling of fractured aquifers can be divided in four categories: discrete models, continuum, multicontinuum and hybrid models. Most aquifer test analysis methods are based on the double porosity model (BARENBLATT ET AL., 1960), which belongs to the multicontinuum type. Characteristic for this model is that the heterogeneous space is divided into two overlapping media: the fractures and the matrix blocks (Fig. 1), both of them having their own characteristics. The fractures have high permeability and low storage capacity and the matrix blocks the opposite, low permeability and high storage capacity.

There are several aquifer test data analysis methods, which fall into different categories:

- Discrete and stochastic models: different methods, based on Discrete Fracture Network (DFN) models (National Research Council, 1996).
 - Fractal analysis: most methods are based on BARKER'S (1988) Generalized Radial Flow (GRF) model, which allows non-integer values for flow dimension.
- Single vertical or horizontal fractures: methods of GRINGARTEN-WITHERSPOON (1972), GRINGARTEN & RAMEY (1974) AND RAMEY-GRINGARTEN (1976).
 - Double porosity models: WARREN-ROOT (1963), BOURDET & GRINGARTEN (1980), KAZEMI ET AL. (1969), BOULTON & STRELTSOVA (1977) AND MOENCH (1984).

Most methods, used for analysis of dolomite and other fractured-type aquifers, belong to double porosity models. Drawdown in these systems can be divided in three time periods (Fig. 2): early pumping time, when all the flow comes from the storage in the fractures, medium pumping time, which represents transition period during which the matrix blocks feed the water to the fractures and late pumping times, when the water comes both from the storage in fractures and matrix blocks (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991).

On Figure 3 is shown the semi-log plot for aquifer test data of dolomite of cordevolian age (VERBOVŠEK, 2003). The curve follows the ideal double porosity type curve of early, middle and late pumping times. The parallel lines however do not occur, because the early time linear relationship is hidden by well-storage and skin effects. Data have been analyzed by WARREN-ROOT (1963) method, which supports single pumping well conditions with no observation wells and it showed the following results: $T_f = 4.43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $S_f = 1.85 \cdot 10^{-2}$, $S_m = 0.34$, $\lambda = 1.35 \cdot 10^{-6}$ and $\omega = 0.05$, which are comparable to those of Moench (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1991). The double porosity behaviour can be explained by large intercrystalline porosity of dolomite, which was developed by burial diagenesis. On the next figure (Fig. 4; VERBOVŠEK, 2003) is

shown the plot which does not show the typical double porosity curve. In comparison with previous data the pumping times are much shorter, which can result in "missing" transition and late pumping times parts of the curve. Pumping test should be longer in this case. Another explanation is that dolomite has very low matrix porosity, which simplifies the double porosity model into single-porosity one, having only fracture porosity. In this case the usual Theis or Cooper-Jacob methods can be used. The last plot (Fig. 5; VERBOVŠEK, 2003) shows the data obtained by using variable discharge. Drawdown significantly deviates from the ideal three-part curve and the double porosity methods can generally not be used due to the too short later steps.

The main difference between the single porosity and double porosity models is that the last ones give the results of transmissivities and storativities of both fractures and matrix. We can also detect the double porosity behaviour on the semi-log plot of drawdown versus time, which shows two lines (usually not parallel due to well-storage and skin effects) with transition time in between (Fig. 2). Use of automatic computer-fitting linear curve to all the data in Figure 2 or Figure 3 would lead to erroneous and illogical results, as there are actually two transmissivities and storativities of the system (fracture and matrix). One can therefore calculate incorrect transmissivities and storativities, and this could lead to misinterpreted flow and pollutant velocities. The proper use of fractured aquifer methods is therefore of utmost importance.

VIRI

- ACUNA, J. A. & YORTSOS, Y. C. (1995): Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient.- *Water Resources Research* Vol. 31, No. 3,: pp. 527-540.
- AGUILERA, R. (1980): Naturally Fractured Reservoirs.- *Pennwell Books*, 703 p.
- AGUILERA, R. (1987): Well Test Analysis of Naturally Fractured Reservoirs.- *SPE Formation Evaluation*, Society of Petroleum Engineers.
- BARENBLATT, G.I., ZHELTOV, I.U.P., KOCHINA, I.N. (1960): Basic concepts in the theory of seepage of homogenous liquids in fissured rocks. - *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 24 (5): pp. 1286-1303.
- BARKER, J. A. (1988): A Generalized Radial Flow Model for Hydraulic Tests in Fractured Rock.- *Water Resources Research*.: 24, No. 10, pp. 1796-1804.
- BATU, V. (1998): Aquifer Hydraulics. A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis.- *John Wiley & Sons Inc.*, 727 p.
- BOULTON, N.S. & STRELSTOVA, T.D. (1977): Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation.- *J. Hydrol.*: 30, pp. 29-46.
- BOURDET, D. & GRINGARTEN, A. C. (1980): Determination of fissure volume and block size reservoirs by type-curve analysis.- Paper SPE 9293, Presented at 1980 *SPE Annual Fall Techn. Conf. and Exhib.*, Dallas
- ČENČUR CURK, B. (2002): Tok in prenos snovi v kamnini s kraško in razpoklinsko poroznostjo: *Doktorska disertacija*. Univerza v Ljubljani, NTF, 253 p.
- DOMENICO, P. A. AND SCHWARTZ, F. W. (1998): Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd ed.- *Wiley*, 528 p.
- GRINGARTEN, A. C. & WITHERSPOON, P. A. (1972): A method of analyzing pump test data from fractured aquifers.- *Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Ass. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics*, Stuttgart, Vol. 3-B, pp.1-9.
- HAMM, S-Y. & BIDAUX, P. (1996): Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks.- *Water Resources Research*. 32, No. 9, pp. 2733-2745.

- HYDROSOLVE INC. (2005): AQTESOLV for Windows. Version 3.5. <http://www.aqtesolv.com>.
- KAZEMI, H., SETH, M.S., THOMAS, G.W. (1969): The Interpretation of Interference Tests in Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution.- *Soc. of Petrol. Engrs. J.*, pp. 463-472.
- KRIVIC, P. (1983): Študija hidrodinamike kraškega vodonosnika (Slovenski povzetek).- *Geologija*: 26, pp. 149-186.
- KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1991): Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd ed. - International Institute for Land Reclamation and Improvement, *Wageningen, (ILRI Publication 47)*, 377 p.
- LEVEINEN, J. (2000): Composite model with fractional flow dimensions for well test analysis in fractured rocks.- *Journal of Hydrology*. 234, pp. 116-141.
- LODS, G. & GOUZE, P. (2004): WTFM, software for well test analysis in fractured media combining fractional flow with double porosity and leakance approaches. *Computers & Geosciences*: 30, pp. 937-947.
- MOENCH, A. F. (1984): Double porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir With Fracture Skin.- *Water Resources Research*. 20, No. 7, pp. 831-846.
- MOORE, C. H. (2001): Carbonate Reservoirs, Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework, *Elsevier Science B.V.*, Amsterdam.
- National Research Council (1996): Rock fractures and fluid flow. Contemporary Understanding and Applications.- *National Academy Press*, 551 p.
- NEUMAN, S.P. (2005): Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks.- *Hydrogeology Journal*. 13, 124-147, DOI: 10.1007/s10040-004-0397-2
- RUMBAUGH, D. & RUMBAUGH, J. (2003): Program AquiferWin32, Version 3.00.- *Environmental Simulations, Inc.*
- VASVÁRI, V. & KRIEGL, C. (2003): Determination of hydraulic properties in fractured aquifers in Austria.- V: Krásný, J., Zbynek, H., Bruthans, J.: *International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, pp. 109-110, Prague.
- VERBOVŠEK, T. (2003): Izdatnost vodnjakov in vrtin v Sloveniji – skupina dolomitnih vodonosnikov.- *Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, NTF*, 206 p.
- WARREN, J.E. & ROOT, P.J. (1963): The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs.- *Soc. of Petrol. Engrs. J.* 3, pp. 245-255.
- Waterloo hydrogeologic inc. (2001): WHI AquiferTest, Version 3.01, Waterloo Hydrogeologic Inc., Canada (Interna pomoč programa), <http://www.waterloohydrogeologic.com>.