GEOLOGIJA *51/2*, 245-255, Ljubljana 2008
https://doi.org/10.5474/geologija.2008.025

Koeficienti prepustnosti razpok in matriksa v slovenskih karbonatnih vodonosnikih

Hydraulic conductivities of fractures and matrix in Slovenian carbonate aquifers

Timotej VERBOVŠEK

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva c. 12, SI-1000 Ljubljana; e-mail: timotej.verbovsek@ntf.uni-lj.si

Ključne besede: karbonatne kamnine, vodonosniki, prepustnost, razpoke, matriks, črpalni poizkusi, Slovenija
Keywords: carbonate rocks, yield, hydraulic conductivity, fractures, matrix, aquifer test, Slovenia

Izvleček

V prispevku so s fraktalno Barkerjevo metodo analize črpalnih poizkusov določene vrednosti koeficientov prepustnosti in koeficientov elastičnega uskladiščenja tako za razpoke in za matriks v slovenskih karbonatnih vodonosnikih, predvsem v dolomitih. Vrednosti so podane za dolomite in apnence skupaj, kot tudi za posamezne vodonosnike, ločene po starostih kamnin in po litoloških značilnostih. Podatki so zbrani iz poročil o 397-ih vrtinah in vodnjakih, z omenjeno metodo pa je reinterpretiranih 79 črpalnih poizkusov. Koeficienti prepustnosti razpok so bistveno višji od koeficientov prepustnosti matriksa, statistične razlike med njimi pa so visoko značilne. Podobno so značilne tudi razlike med koeficienti elastičnega uskladiščenja v razpokah in v matriksu, pri čemer so vrednosti v slednjem večje. Vrednosti vseh koeficientov se razlikujejo v posameznih vodonosnikih, razlike pa se da razložiti z diagenetskimi značilnostmi, velikostjo zrn, stopnjo razpokanosti in čistostjo kamnin. Primerjava med metodami, uporabljenimi v poročilih, in Barkerjevo metodo, kaže, da se podatki bolje prilegajo slednji metodi, ki je za kraško-razpoklinski tip kamnin tudi bolj ustrezna.

Abstract

Hydraulic conductivities and specific storage coefficients of fractures and matrix in Slovenian carbonate aquifers were determined by Barker's method for pumping test analysis, based on fractional flow dimension. Values are presented for limestones and mainly for dolomites, and additionally for separate aquifers, divided by age and lithology in several groups. Data was obtained from hydrogeological reports for 397 water wells, and among these, 79 pumping tests were reinterpreted. Hydraulic conductivities of fractures are higher than the hydraulic conductivities of matrix, and the differences are highly statistically significant. Likewise, differences are significant for specific storage, and the values of these coefficients are higher in the matrix. Values of all coefficients vary in separate aquifers, and the differences can be explained by diagenetic effects, crystal size, degree of fracturing, and carbonate purity. Comparison of the methods, used in the reports, and the Barker's method (being more suitable for karstic and fractured aquifers), shows that the latter fits real data better.

Uvod

V Sloveniji je delež odvzema podzemne vode proti razpoložljivi količini v vodnih telesih podzemne vode s prevladujočimi vodonosniki kraškega, razpoklinskega in mešanega tipa poroznosti še vedno majhen (povprečno 12 %; Andjelov et al., 2006). Kljub dokaj majhnem deležu postajajo ti vodonosniki čedalje pomembnejši vir pitne vode. V primerjavi z medzrnskimi so še vedno manj raziskani, predvsem zaradi svoje heterogenosti in posledično zahtevnejših analiz, zato je o njih znanih manj podatkov, med katere npr. sodijo podatki o prepustnosti oz. izdatnosti. V Sloveniji se veliko raziskovalcev ukvarja z različnimi lastnostmi karbonatnih kamnin, toda sistematičnih analiz parametrov in predvsem analiz, ki bi povezovale vrednosti parametrov z dejanskimi lastnostmi kamnin, ni opravil nihče. Namen prispevka je zato preučiti prepustnosti karbonatnih vodonosnikov v Sloveniji, pridobljene iz podatkov o črpalnih poizkusih. Za obravnavo teh poizkusov v kraško-razpoklinskih vodonosnikih še vedno uporabljajo pristope in metode, ki veljajo za kamnine z medzrnsko poroznostjo (npr. za črpalne poizkuse Theisova metoda in njena Cooper-Jacobova poenostavitev). Ker so slednje kamnine ponavadi bolj homogene, so tudi metode za njihovo obravnavo enostavnejše in uporabnejše, čeprav za kraško-razpoklinske vodonosnike njihove predpostavke večinoma ne veljajo (Verbovšek, 2005). Zato so lahko z omenjenimi izračuni

nekateri parametri vodonosnikov določeni napačno oz. so precenjeni ali podcenjeni, kar lahko posledično vodi do nepravilno določenih hitrosti toka in s tem tudi onesnaževal.

Temeljna razlika pri analiziranju medzrnskih in kraško-razpoklinskih vodonosnikov je ta, da lahko slednje obravnavamo kot vodonosnike z dvojno poroznostjo (Barenblatt et al., 1960; Warren & Root, 1963), če je poroznost matriksa dovolj velika, ali celo s trojno, če so v kamnini prisotni dovolj prevodni kraški kanali (Worthington, 1999). Metode črpalnih poizkusov v razpoklinskih in kraško-razpoklinskih kamninah slonijo na različnih modelih, ki se v glavnem ločijo na tiste z enojno ter na tiste z dvojno poroznostjo, pri katerih ločeno upoštevamo hidravlične lastnosti matriksa in razpok. Za matriks je značilno, da ima veliko primarno poroznost in majhno prepustnost, razpoke pa imajo obratno veliko prepustnost in majhno sposobnost uskladiščenja vode. Poseben pristop, ki še ni širše uveljavljen, so metode, ki temeljijo na fraktalnih lastnostih prevodnih razpok (Verbovšek, 2008b). V tem prispevku je bil za izračun parametrov vodonosnikov (koeficientov prepustnosti in specifičnih koeficientov elastičnega uskladiščenja) uporabljen Barkerjev (1988) posplošeni model radialnega toka GRF (*Generalized Radial Flow*, enačba 1), nadgrajen z modelom dvojne poroznosti (Lods in Gouze, 2004, enačba 2). Fraktalne metode temeljijo na dejstvu, da se lahko nek objekt (v tem primeru razpoke) pojavlja v enaki obliki v različnih merilih. Te metode so še posebej ustrezne za kraško-razpoklinske vodonosnike, zahtevajo pa uvedbo dodatnega parametra, dimenzije toka. GRF model namreč predpostavlja, da so mreže razpok fraktalne in da je geometrija toka odvisna od prostorske razporeditve in povezave razpok. Difuzijska enačba je v tem primeru razširjena na dimenzije toka n, ki niso cela ali naravna števila:

$$\frac{K_R}{r^{n-1}}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{n-1}\frac{\partial h}{\partial r}\right) = Ss_R\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

K_R = *koeficient prepustnosti razpok*
Ss_R = *koeficient elastičnega uskladiščenja v razpokah*
r = *radialna razdalja od centra vrtine oz. vodnjaka*
h = *nivo podzemne vode v vodonosniku*
t = *čas*
n = *dimenzija toka (realno število med 0 in 3). Za n = 2 se zgornja enačba poenostavi v navadno difuzijsko enačbo oz. v Theisovo enačbo za nestacionaren tok.*

Rešitev enačbe je podana analitično (Barker, 1988; Acuna & Yortsos, 1995) in ni nadalje obravnavana v tem prispevku. Barkerjevo (1988) enačbo so dopolnili za model dvojne poroznosti (Lods & Gouze, 2004):

$$\frac{K_R}{r^{n-1}}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{n-1}\frac{\partial h}{\partial r}\right) = Ss_R\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{K_M}{b_M}\left(\frac{\partial h_M}{\partial z}\right)_{z=0} \qquad (2a)$$

$$K_M\frac{\partial^2 h_M}{\partial z^2} = Ss_M\frac{\partial h_M}{\partial t} \qquad (2b)$$

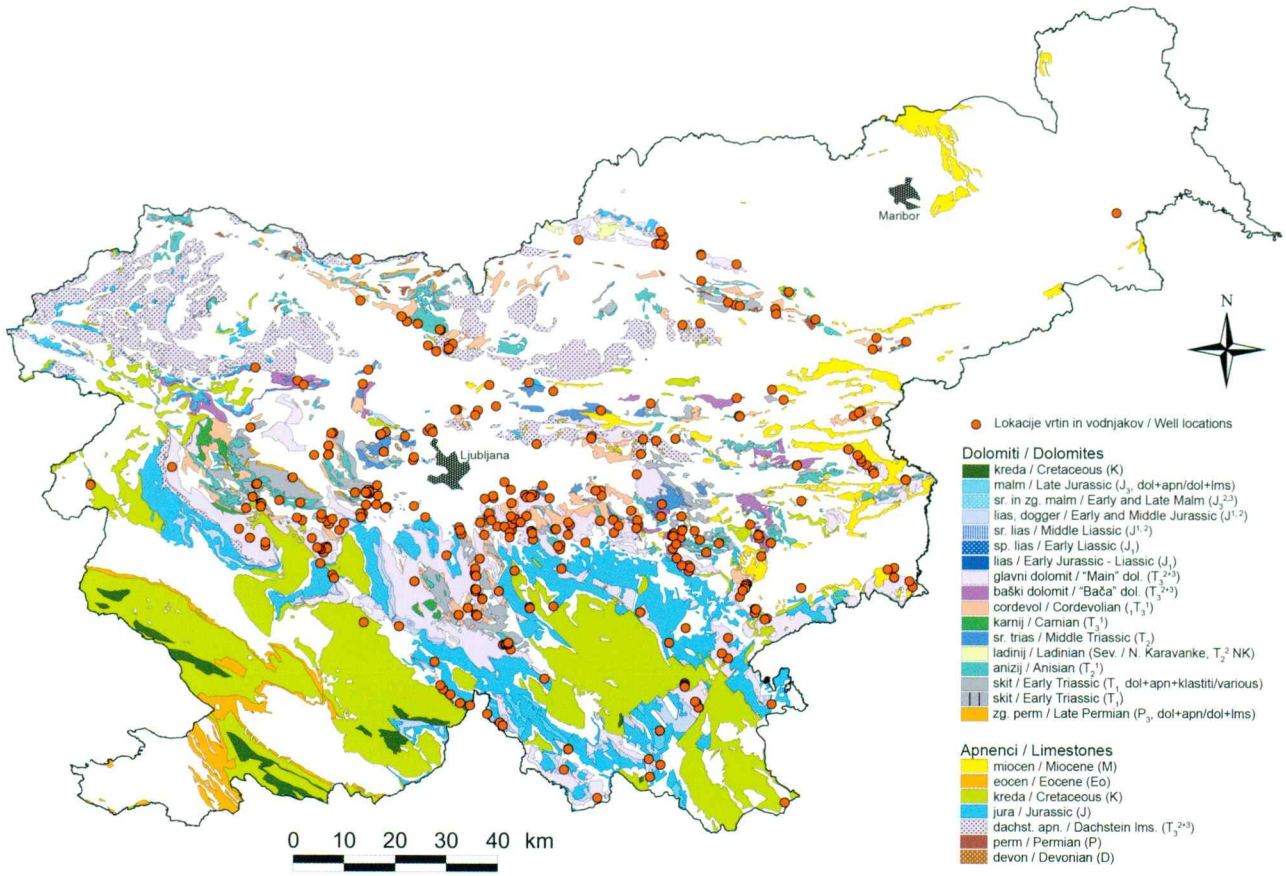
K_M = *koeficient prepustnosti matriksa*
Ss_M = *koeficient elastičnega uskladiščenja v matriksu*
b_M = *povprečna debelina blokov matriksa*
(ostale oznake so enake kot pri enačbi 1)

V prispevku so podane in komentirane vrednosti koeficientov prepustnosti K in koeficientov elastičnega uskladiščenja S za različne dolomitne in apnenčaste vodonosnike v Sloveniji. Vrednosti, prvotno pridobljene iz hidrogeoloških poročil, so bile izračunane z metodami, ustreznimi za kraško-razpoklinske vodonosnike. Podane so tudi primerjavo rezultatov po različnih metodah.

Metode in materiali

Podatki o hidrogeoloških parametrih iz črpalnih poizkusov o 397-ih vrtinah in vodnjakov v Sloveniji so zbrane iz poročil, dostopnih na številnih občinah, po komunalah in podjetjih. Vrtine so locirane večinoma v dolomitnih in manj v apnenčastih vodonosnikih (sl. 1). Karbonatne kamnine so v Sloveniji izredno razširjene in se pojavljajo v več obdobjih: kot redki apnenci v devonu in karbonu (Buser & Cajhen, 1980), kot dolomiti in apnenci v zgornjem permu in spodnjem triasu (Grad & Ogorelec, 1980; Dolenec et al., 1981), kot dolomiti v srednjem triasu oz. aniziju in cordevolu (Buser, 1989; Šmuc & Čar, 2002), v noriju in retiju pa kot dachsteinski apnenci, glavni dolomiti (Ogorelec & Rothe, 1993) in globljevodni baški dolomiti (Buser et al., 2007; Rožič, 2008). V spodnji juri so prisotni kot apnenci in dolomiti (Dozet & Šribar, 1998), v večjem delu jure in krede kot apnenci (Jurkovšek et al., 1996) ter kot terciarni apnenci in zelo redko kot dolomiti (Košir & Wright, 2002). Natančnejši pregled njihovih lastnosti, poroznosti in ostalih parametrov je podan v tabeli 1.

Kljub veliki razprostranjenosti karbonatnih kamnin (sl. 1), te ne tvorijo vedno ekonomsko zanimivih vodonosnikov. Razlogov je več, poleg hidroloških so poglavitni naslednji (tab. 1): litološke značilnosti kamnin, njihova tektonska pretrtost, plastnatost, geokemična sestava, stopnja zakraselosti, debelina vodonosnika, količina in tip poroznosti in velikost mineralnih zrn. Hidrogeološka vloga dolomitov je zelo odvisna od tega, ali nastanejo z zgodnjediagenetsko (nadomeščanjem Ca^{2+} ionov z Mg^{2+} ioni v nevezanem karbonatnem blatu) ali s poznodiagenetsko dolomitizacijo (spremembo v trdnih kamninah). V prispevku je posebna pozornost namenjena dolomitnim vodonosnikom, saj je podatkov za apnence bistveno manj kot za dolomite, ker zaloge vode raje iščejo v dolomitih kot v apnencih, tako zaradi boljših filtracijskih sposobnostih dolomita kot zaradi njegove boljše razpokanosti in izdatnosti. V redkih primerih so vodo zajeli tako v apnencu kot tudi v dolomitu, kar je označeno kot skupina »apn/dol«,



Sl. 1. Lokacije vrtin in razprostranjenost karbonatnih kamnin v Sloveniji (Verbovšek, 2008b). Območja izdanjanja apnencev in dolomitov so digitalizirana po listih Osnovne geološke karte v merilu 1 : 100.000.

Fig. 1. Locations of water wells and outcrops of carbonate rocks in Slovenia (Verbovšek, 2008b). Outcrops are digitized after Basic Geological Map in scale 1 : 100,000.

ponekod pa podatka o starosti dolomitov ni bilo na voljo, kar je označeno kot skupina »dolomit«.

Pridobljeni podatki so bili vneseni v računalniško relacijsko bazo v programu MS Access (Verbovšek, 2008b). Sprva so bili analizirani zabeleženi parametri iz poročil, ki so jih izračunali z različnimi metodami, opisanimi v nadaljevanju. Nato so bili z reinterpretacijo 79-ih črpalnih poizkusov parametre ponovno izračunani z Barkerjevo (1988) metodo. Določanje je potekalo v programu AQTESOLV (Hydrosolve, 2006) s prilagajanjem krivulj modelov dejanskim podatkom in njihovim odvodom, saj so slednji bolj občutljivi na kvaliteto podatkov.

Za testiranje razlik med analiziranimi skupinami so bili uporabljeni parametrični t-test na nivoju stopnje verjetnosti 95 % (de Sá, 2003). Vrednosti vseh hidravličnih parametrov so namreč porazdeljene po logaritemsko normalni distribuciji (Verbovšek, 2003), kar velja za koeficient prepustnosti K, transmisivnost T, specifično izdatnost Q/s in za indeks specifične izdatnosti S_i (Davis & DeWeist, 1966), imenovan tudi linijska specifična izdatnost. Podatki o ostalih parametrih, zabeleženih v hidrogeoloških poročilih (transmisivnosti, maksimalnih pretokih in specifični izdatnosti), so bili natančneje prikazani v posebni obravnavi (Verbovšek & Veselič, 2008).

Lognormalno porazdelitev lahko pretvorimo v normalno z enostavno transformacijo. Izračunane vrednosti so zato podane kot geometrične srednje vrednosti koeficientov prepustnosti (K) in kot geometrični standardni odkloni (s). Parametri, vezani na razpoke (K_R, s_R), so označeni z indeksom R, tisti vezani na matriks (K_M, s_M) pa z indeksom M. V prispevku so sprva sistematično podane analize zabeleženih koeficientov prepustnosti iz poročil, nato pa analize koeficientov prepustnosti in koeficientov specifičnega elastičnega uskladiščenja ločeno za matriks ter za razpoke v dolomitih in apnencih. Transmisivnost v tem prispevku ni analizirana, ker je odvisna od debeline vodonosnika in zato ni ena izmed njegovih osnovnih lastnosti.

Rezultati in diskusija

Koeficienti prepustnosti razpok in matriksa

Koeficienti prepustnosti so bili določeni z Barkerjevo (1988) metodo, dopolnjeno z modelom dvojne poroznosti (Hamm & Bidaux, 1996). Rezultati kažejo, da razlike med koeficientom prepustnosti razpok in matriksa obstajajo (tab. 2) in so tudi visoko značilne ($p < 0{,}001$). Razpoke in matriks imajo torej različne hidrogeološke značilnosti, tako da je tok v razpokah precej hitrejši kot v matriksu, obenem pa je uskladiščenje v matriksu ponavadi večje, kar potrjujejo tudi izračuni. Pri daljših časih črpanja so pomembni koeficienti prepustnosti razpok, saj razpoke prevajajo vodo

Tab. 1. Pregled dolomitnih plasti v Sloveniji in njihovih poglavitnih sedimentoloških in ostalih lastnosti (povzeto in delno spremenjeno po VERBOVŠEK, 2003). Podatki o apnencih v tabeli niso vključeni, ker zaradi majhnega števila podatkov niso primerljivi v primerjavi z dolomiti.

Tab. 1. Summary of dolomite rocks in Slovenia and their main sedimentological and other properties (modified after VERBOVŠEK, 2003). Data on limestones are not included, as available number of observations is too small to be comparable with dolomites.

starost/ age	**stopnja diageneze/ diagenesis**	**plastnatost, debelina/ bedded or massive, thickness**	**vsebnost karbonata/ carbonate percent**	**primarna poroznost/ primary porosity % (min–max)**	**tip primarne poroznosti/ primary porosity type**	**velikost zrn sr. vrednost/ mean crystal size (μm), (min–max)**	**debelina plasti/ bed thickness (m)**	**viri/ references**
eocen/ Eocene	pozna/ late	masiven/ massive	94–98 %	5–15			50–300	Košir & Wright, 2002
kreda/ Cretaceous (cenomanij/ Cenomanian, K)	zgodnja, redko tudi pozna/ early and rarely late	plastnat, redko masiven/ bedded, rarely massive	zelo velik/ very high	6–7	medzrnska/ intercrystalline	100–200	200–300	Ogorelec et al., 2000; Šikič & Pleničar, 1975
srednji in zgornji malm/ Middle and Late Malm ($J_3^{2,3}$)	pozna/ late	plastnat/ bedded	zelo velik/ very high				200–600	Dozet & Šribar, 1998
spodnji in srednji malm/ Early and Middle Malm ($J_3^{1,2}$)	pozna/ late	plastnat/ bedded, (0,4–0,6 m)	zelo velik/ very high				200–600	Bukovac et al., 1983
lias/ Liassic (J_1)	pozna, tudi zgodnja/ early and late	plastnat/ bedded	zelo velik/ very high		medzrnska/ intercrystalline	velika	100–700	Dozet & Šribar, 1998
norij in retij, dolom. deli dachsteinskega apnenca/ Late Triassic (T_3^{2+3} dach.)	zgodnja in pozna/ early and late	plastnat in masiven/ bedded and massive	zelo velik/ very high		medzrnska, izsušitvene pore/ intercrystalline, dessication pores		30–1000	Ogorelec & Rothe, 1993
norij in retij, »glavni dolomit« /Late Triassic, "Main" dolomite (T_3^{2+3} glavni/ "Main")	zgodnja, delno tudi pozna/ early and rarely late	plastnat/ bedded, (0,3–2 m)	98,5–95,5 %	5 (2–10)	medzrnska, izsušitvene pore/ intercrystalline, dessication pores	150	500–1200	Ogorelec & Rothe 1993; Aničić & Juriša 1985
norij in retij, baški dolomit (T_3^{2+3} baški)	pozna/ late	plastnat/ bedded	srednje do zelo velik/ middle to very high				40–350	Ogorelec et al. 2000; Rožič, 2008
cordevol/ Cordevolian ($_1T_3^1$)	pozna/ late	masiven/ massive	zelo velik/ very high	0,33 (0–5)	medzrnska/ intercrystalline		50–500	Aničić & Juriša, 1985; Šmuc & Čar, 2002
ladinij/Ladinian (Sev.Karavanke/ N Karavanke, T_2^2 NK)	pozna/ late	masiven in plastnat/ massive and bedded	zelo velik/ very high	0,03	izsušitvene pore/ dessication pores	(50–500)	500–1200	Ogorelec et al., 2000
anizij/Anisian (T_2^1)	zgodnja in pozna/ early and late	masiven ali zelo debeloplastnat/ massive and thick-bedded	98 %	1 (0–5)	medzrnska, (izsušitvene pore) /intercrystalline, dessication pores	60 (15–200)	100–600	Grad & Ogorelec, 1980; Dolenec et al., 1981
zg. skitij/ Olenekian (zg. T_1)	pozna/ late	masiven/ massive	96–99 %	2 (0–20)		40–80 (40–200)	40–200	Grad & Ogorelec, 1980; Ogorelec et al., 2000
sp. skitij/Induan (sp. T_1)	zgodnja in pozna/ early and late	plastnat/ bedded	60–94 %	2–10	medzrnska/ intercrystalline	40 (20–300)	80–120	Grad & Ogorelec, 1980; Dolenec et al., 1981
skitij/Early Triassic (T_1)	zgodnja in pozna/ early and late	plastnat/ bedded	54–89 %			(20–120)		Novak, 2001
zg. perm/ Late Permian (Karavanška formacija/ Karavanke Fm., P_3)	zgodnja/ early	plastnat/ bedded, (15–30 cm)	94–96 %	7,3 (0–20)	medzrnska/ intercrystalline	(30–50)	150–300	Grad & Ogorelec, 1980; Dolenec et al., 1981
zg. perm/ Late Permian (Žažarska formacija/Žažar Fm., P_3)	pozna, tudi zgodnja/early and rarely late	plastnat/ bedded, (5–30 cm)	94–98%	0–10		80 (30–400)	50–500	Grad & Ogorelec, 1980

v večji količini kot matriks, zato so vrednosti K_R tudi za nekaj redov velikosti višje. Matriks vpliva na krivulje črpalnih poizkusov pri krajših časih črpanja, kar se odraža kot efekti dvojne poroznosti. Vrednosti koeficienta prepustnosti matriksa pri analizi prenosa snovi v kraško-razpoklinskih vodonosnikih vselej niso zanemarljive, saj se npr. interpretacija sledilnih poizkusov bistveno razlikuje, če vanjo vključimo tudi lastnosti matriksa (Motyka et al., 1998).

Po razvrstitvi podatkov v starostno-litološke skupine (sl. 2) se pojavijo dodatne razlike. Če ne upoštevamo skupin z le enim opazovanjem, lahko med seboj primerjamo pet skupin. Pri teh je razvidno, da je koeficient prepustnosti matriksa K_M za tri do štiri rede velikosti manjši kot koeficient prepustnosti razpok K_R (tab. 3). Kljub majhnemu številu podatkov je največja razlika opazna pri baškem dolomitu, kjer ima matriks okoli 10.000-krat manjšo prepustnost kot razpoke. Najverjetneje je to posledica okremenjenega matriksa, saj je za ta dolomit značilna velika količina rožencev. Manjše razlike so pri glavnem (T_3^{2+3} glavni), anizijskem (T_2^1) ter spodnjetriasnem dolomitu (T_1), kjer znašajo malo nad tri rede velikosti. Najmanjša je razlika pri cordevolskem ($_1T_3^1$) dolomitu, manj kot 2,5 reda velikosti. Prepustnost matriksa je v teh dolomitih tolikšna, da v njih že opazimo efekte dvojne poroznosti. Je tudi za red velikosti večja od prepustnosti matriksa ostalih dolomitov. Cordevolski dolomiti se tudi edini značilno ločijo od ostalih (anizijskih, glavnih in spodnjetriasnih). Očitno je, da imajo ti dolomiti precej višjo prepustnost. To najlažje razlagamo z dejstvom, da so ti dolomiti nastali izključno s pozno diagenezo, ki povzroči precejšnjo rast zrn in s tem tudi zveča poroznost. Poleg tega so debelozrnati dolomiti bolj dovzetni za razpokanje kot drobnozrnati, zato imajo posledično tudi večjo prepustnost razpok (Gaswirth et al., 2006). Na razpokanje vplivata tudi količina in tip poroznosti (predvsem moldična in medzrnska), saj so manj porozne kamnine manj dovzetne za razpokanje. Glavni in anizijski dolomiti imajo manjše vrednosti K_R zaradi drugačnega tipa in manjše poroznosti (tab. 1), toda kljub vsemu visoke glede na ostale skupine, kar lahko razlagamo s tem, da imajo tudi ti dolomiti velik odstotek karbonata (so »čisti«) in so ponekod zaradi načina nastanka tudi bolj debelozrnati, zato se obnašajo podobno kot cordevolski. Za baške dolomite je podatkov seveda premalo za ustrezno komentiranje. Manjše število podatkov v večini skupin se pojavlja zaradi manjše razprostranjenosti nekaterih kamnin. Poleg tega se načrtovalci zavedajo njihovih slabših izdatnosti in zato vodnjakov ne izdelujejo na teh območjih.

Zaradi premajhnega števila vzorcev (povsod po $N = 1$) žal ni mogoče ustrezno komentirati podatkov v apnencih, v splošnem pa so manj prepustni kot dolomiti (tako K_R kot K_M). Za primerjavo lahko navedem le Krivičeve (1984) rezultate, ki je ugotovil, da imajo drenažne prepustne cone v apnencih na Krasu transmisivnost 10^{-1} m^2/s ali več, in da je ta v vmesnih blokih tudi 100.000-krat manjša. V splošnem lahko te manjše vrednosti koeficientov prepustnosti razpok pojasnimo tako, da se v apnencih v primerjavi z dolomiti pojavlja precej manj razpok (Purser et al., 1994), saj

Tab. 2. Vrednosti koeficientov prepustnosti razpok (K_R) in matriksa (K_M) za vse vodonosnike skupaj. Koeficient prepustnosti in standardni odklon sta podana kot geometrična srednja vrednost (K) in geometrični standardni odklon (s), kar velja tudi za ostale tabele. Zvezdica * označuje značilen t-test oz. značilne razlike med skupinama. p = dejanska statistična značilnost.

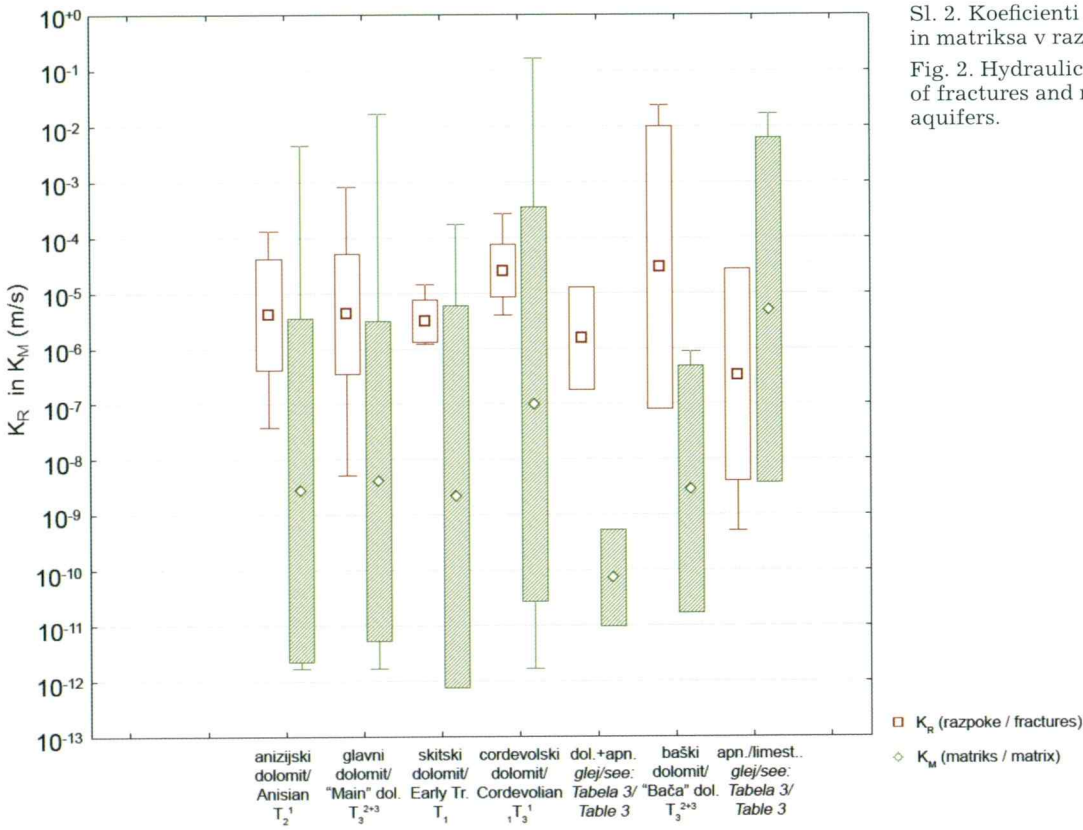
Tab. 2. Values of hydraulic conductivities of fractures (K_R) and matrix (K_M) for all aquifers. Hydraulic conductivity and standard deviation are gives as geometric mean (K) and geometric standard deviation (s), as presented also in other tables. Asterisk marks a significant t-test and significant differences between groups. p =probability value of test statistics.

	N	K (m/s)	s (m/s)	min	max	t-test
razpoke/ fractures: K_R	79	$4{,}79\cdot10^{-6}$	$1{,}41\cdot10^{+1}$	$5{,}13\cdot10^{-10}$	$2{,}40\cdot10^{-2}$	DA/YES ($p < 0.001$*)
matriks/ matrix: K_M	79	$9{,}11\cdot10^{-9}$	$1{,}21\cdot10^{+3}$	$1{,}66\cdot10^{-12}$	$1{,}66\cdot10^{-1}$	

			razpoke/fractures		matriks/matrix	
starost/age	kamnina/rock	N	K_R (m/s)	s_R (m/s)	K_M (m/s)	s_M (m/s)
K_2	apn/lms	1	$5{,}13\cdot10^{-10}$	-	$5{,}25\cdot10^{-9}$	-
K_1^{4+5}	apn/lms	1	$6{,}17\cdot10^{-6}$	-	$3{,}55\cdot10^{-3}$	-
K_1^1	apn/lms	1	$3{,}16\cdot10^{-8}$	-	$1{,}82\cdot10^{-6}$	-
J_1	apn/lms	1	$1{,}45\cdot10^{-6}$	-	$4{,}68\cdot10^{-9}$	-
J, K?	dol+apn/lms	1	$3{,}31\cdot10^{-7}$	-	$1{,}78\cdot10^{-11}$	-
J_1, T_3^{2+3}	dol	1	$1{,}29\cdot10^{-7}$	-	$1{,}58\cdot10^{-8}$	-
T_3^{2+3} baški/"Bača"	apn/lms	1	$2{,}51\cdot10^{-5}$	-	$1{,}66\cdot10^{-2}$	-
T_3^{2+3} baški/"Bača"	dol	3	$2{,}82\cdot10^{-5}$	$3{,}55\cdot10^{+2}$	$2{,}82\cdot10^{-9}$	$1{,}70\cdot10^{+2}$
T_3^{2+3} glavni/"Main"	dol	37	$4{,}17\cdot10^{-6}$	$1{,}20\cdot10^{+1}$	$4{,}07\cdot10^{-9}$	$7{,}76\cdot10^{+2}$
$_1T_3^1$ cordevol	dol	14	$2{,}45\cdot10^{-5}$	$3{,}02\cdot10^{+0}$	$9{,}55\cdot10^{-8}$	$3{,}63\cdot10^{+3}$
T_2^2 (ladinij/Ladinian)	apn/lms	1	$6{,}76\cdot10^{-6}$	-	$3{,}02\cdot10^{-10}$	-
T_2^1 (anizij/Anisian)	dol	11	$4{,}17\cdot10^{-6}$	$1{,}00\cdot10^{+1}$	$2{,}75\cdot10^{-9}$	$1{,}26\cdot10^{+3}$
T_1 (skit/Early Triassic)	dol	6	$3{,}16\cdot10^{-6}$	$2{,}45\cdot10^{+0}$	$2{,}14\cdot10^{-9}$	$2{,}82\cdot10^{+3}$
vsi vodonosniki/ all aquifers		*79*	*$4{,}79\cdot10^{-6}$*	*$1{,}41\cdot10^{+1}$*	*$9{,}11\cdot10^{-9}$*	*$1{,}21\cdot10^{+3}$*
vsi dolomiti/dolomites		*72*	*$5{,}96\cdot10^{-6}$*	*$1{,}14\cdot10^{+1}$*	*$6{,}74\cdot10^{-9}$*	*$1{,}09\cdot10^{+3}$*
vsi apnenci/limestones		*5*	*$3{,}27\cdot10^{-7}$*	*$8{,}06\cdot10^{+1}$*	*$4{,}83\cdot10^{-6}$*	*$1{,}30\cdot10^{+3}$*

Tab. 3. Vrednosti koeficientov prepustnosti razpok (K_R) in matriksa (K_M) v različnih vodonosnikih. Kratice za kamnine: apn = apnenec, dol = dolomit.

Tab. 3. Hydraulic conductivities of fractures (K_R) and matrix (K_M) in different aquifers. Rock abbreviations: lms = limestone, dol = dolomite.



Sl. 2. Koeficienti prepustnosti razpok in matriksa v različnih vodonosnikih.

Fig. 2. Hydraulic conductivities of fractures and matrix in different aquifers.

je število razpok v kamninah najbolj odvisno od njihove sestave (STEARNS & FRIEDMAN, 1972).

Pri analizi prepustnosti v razpokah in v matriksu je potrebno omeniti pomembno glede na rezultate prejšnjih raziskav (VERBOVŠEK, 2008a), kjer so bili obravnavani vplivi diagenetskih faktorjev na izdatnost dolomitnih vodonosnikov, ločenih v dve skupini, na tiste, nastale izključno s pozno diagenezo, in na tiste, nastale tako z zgodnjo kot tudi s pozno diagenezo. V prejšnji raziskavi je bilo namreč na osnovi podatkov iz hidrogeoloških poročil (torej uporabljene metode Cooper-Jacoba in Theisa) ugotovljeno, da so dolomiti, nastali izključno s pozno diagenezo, bolj izdatni in imajo višje vrednosti parametrov (transmisivnosti, specifičnih izdatnosti, indeksov specifičnih izdatnosti ter maksimalnih pretokov), razen koeficienta prepustnosti. Odstopanja koeficienta prepustnosti od ostalih štirih parametrov so bila pripisana nepravilni uporabi metod določanja ter dejstvu, da je koeficient prepustnosti določen iz transmisivnosti preko neznane debeline plasti. Novost predstavlja podatek, da vrednosti, določene po BARKERJEVI (1988) metodi, kažejo, da so tokrat tudi vrednosti koeficientov višje v tistih dolomitih, ki so nastali le s pozno diagenezo. Rezultati (tab. 4) so torej v skladu s teoretičnimi predpostavkami in z ostalimi parametri. Razlike med vrednostmi K_R v dveh skupinah dolomitov, nastalih le s pozno, in dolomitov, nastalih tako z zgodnjo kot tudi s pozno diagenezo), so značilne na več kot 99 % stopnji verjetnosti.

Koeficient specifičnega elastičnega uskladiščenja

Poleg koeficientov prepustnosti so bili z BARKERJEVO (1988) metodo določeni tudi koeficiente specifičnega elastičnega uskladiščenja vodonosnikov (KRUSEMAN & DE RIDDER, 1994), ločeno za matriks in razpoke. Pričakovano so uskladiščenja v matriksu bistveno večja kot v razpokah (tab. 5), skoraj za tri rede velikosti.

Tab. 4. Vrednosti koeficienta prepustnosti razpok (K_R) in matriksa (K_M) za različni diagenetski skupini v dolomitnih vodonosnikih.

		N	K (m/s)	s (m/s)	t-test
razpoke/fractures	K_R (zgodnja in pozna/early and late)	54	$4{,}07 \cdot 10^{-6}$	$9{,}77 \cdot 10^{+0}$	DA/YES (p = 0,00*)
	K_R (pozna/late)	16	$2{,}95 \cdot 10^{-5}$	$9{,}77 \cdot 10^{+0}$	
matriks/matrix	K_M (zgodnja in pozna/early and late)	54	$3{,}47 \cdot 10^{-9}$	$8{,}51 \cdot 10^{-2}$	NE/NO (p = 0,12)
	K_M (pozna/late)	16	$7{,}94 \cdot 10^{-8}$	$2{,}34 \cdot 10^{-3}$	

Tab. 4. Hydraulic conductivities of fractures (K_R) and matrix (K_M) for different diagenetic groups in dolomite aquifers.

Tab. 5. Vrednosti koeficientov specifičnega elastičnega uskladiščenja razpok (Ss_R) in matriksa (Ss_M) v vseh vodonosnikih skupaj.

	N	Ss (m^{-1})	s (m^{-1})	min	max	t-test
razpoke/fractures: Ss_R	79	$3{,}09 \cdot 10^{-6}$	$3{,}31 \cdot 10^{-3}$	$1{,}95 \cdot 10^{-17}$	$1{,}20 \cdot 10^{-1}$	DA/YES (p = 0,00*)
matriks/matrix: Ss_M	79	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$2{,}51 \cdot 10^{-3}$	$1{,}66 \cdot 10^{-13}$	$1{,}00 \cdot 10^{+0}$	

Tab. 5. Specific storage coefficients of fractures (Ss_R) and matrix (Ss_M) in all aquifers.

Razlika med skupinama razpok (Ss_R) in matriksa (Ss_M) je visoko značilna ($p < 0,001$). Drugače kot pri koeficientih prepustnosti so razponi vrednosti precej večji. Pav tako je bistveno večji tudi standardni odklon za oba koeficienta (tab. 5). Ugotovitve se skladajo s teoretičnimi predpostavkami (Hamm & Bidaux, 1996). Geometrične povprečne vrednosti za matriks ($Ss_M = 1,29 \cdot 10^{-3}\ m^{-1}$) se z vrednostmi za dolomite izredno dobro ujemajo v raziskavi, namenjeni hidrogeološkim lastnostim matriksa v karbonatnih kamninah (Motyka et al., 1998), v kateri so določili geometrično povprečje $Ss_M = 1,3 * 10^{-3}\ m^{-1}$.

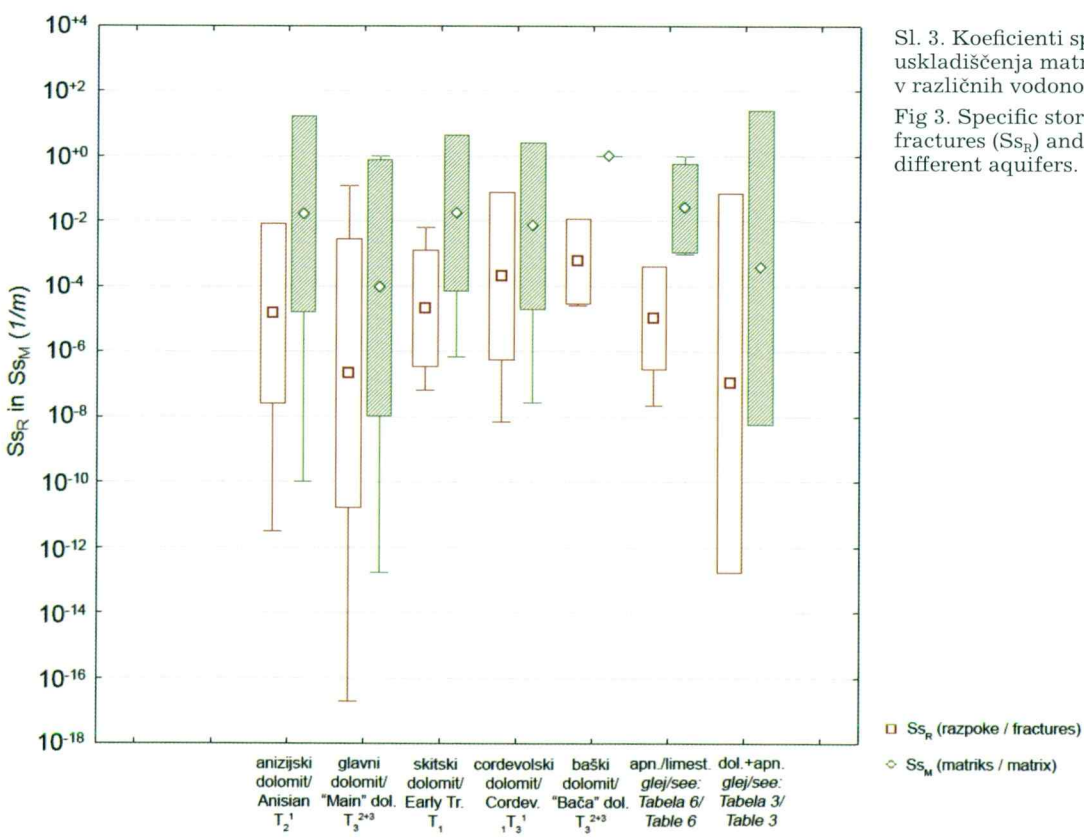
V nadaljevanju so bili podobno kot za koeficiente prepustnosti določeni tudi koeficiente specifičnega elastičnega uskladiščenja ločeno za razpoke in matriks, glede na starostno-litološke skupine (sl. 3).

Rezultati kažejo, da so geometrične povprečne vrednosti koeficienta specifičnega elastičnega uskladiščenja v vseh primerih višje v matriksu kot v razpokah (sl. 3; tab. 6). Največje razlike se pojavljajo pri apnencih, čeprav je za njih izredno malo podatkov in zato komentarji niso zanesljivi. Ta odkritja se skladajo z rezultati raziskav Gaswirthove in sodelavcev (2006), ki kažejo, da je poroznost matriksa apnencev lahko desetkrat večja kot poroznost matriksa dolomitov. Pri skupinah dolomitnih vodonosnikov pri katerih je število opazovanj večje od ena, so rezultati nepričakovani. Spodnjetriasni dolomit (T_1) ima npr. višje vrednosti koeficienta specifičnega elastičnega uskladiščenja kot cordevolski ali anizijski, čeprav je znano, da imata slednja višjo primarno poroznost. Od vseh skupin se značilno ločita med seboj le cordevolski in glavni dolomit. Verjetno na te rezultate vpliva tudi velik razpon podatkov. Standardni odkloni za nekatere skupine so namreč večji kot sama razlika med vrednostmi razpok in matriksa, kar prav gotovo vpliva, da so končni podatki manj zanesljivi. Preverili bi jih lahko s sedimentološkimi analizami, tako da bi primarno poroznost določili kvantitativno in jo nato uporabili kot oceno lastnosti matriksa.

Primerjava koeficientov prepustnosti, pridobljenih po različnih metodah

Primerjava uporabljenih metod, s katerimi so v poročilih določili hidrogeološke parametre, je pokazala, da v 72 % (526 od 726) zabeleženih parametrov ni zabeleženih informacij o uporabljeni metodi. Ostalih 200 primerov (28 %) so analizirali po različnih metodah (tab. 7), med katerimi so prevladovale tri (79 %), razvite za vodonosnike z medzrnsko poroznostjo; Cooper-Jacobova, Theisova za padanje in Theisova za dvig gladine podzemne vode po koncu črpanja (Kruseman & de Ridder, 1994).

Le v treh primerih (tab. 7) oz. v 1,5 % vseh analiziranih metod so uporabili metodi, ki veljata za razpoklinske vodonosnike, v tabeli označeni s ležečo pisavo. V nadaljevanju so bili koeficienti prepustnosti iz poročil primerjani z novo izračunanimi vrednostmi po Barkerjevi (1988) metodi. Za vse metode je bilo kvantitativno določeno, koliko se realni podatki o znižanju podzemne vode pri črpanju razlikujejo od modeliranih. Za oceno odstopanj so bile uporabljeni rezidualne vrednosti RSS (enačba 3; *Residual Sum of Squares*), ki jih izračunamo po enačbi: $e_i = y_i - \hat{y}_i$, kjer je e_i = rezidualna vrednost, y_i = realna vrednost in $\hat{y}_i$ =



Sl. 3. Koeficienti specifičnega elastičnega uskladiščenja matriksa in razpok v različnih vodonosnikih.

Fig 3. Specific storage coefficients of fractures (Ss_R) and matrix (Ss_M) in different aquifers.

			razpoke/fractures		matriks/matrix	
starost/age	**kamnina/rock**	**N**	**Ss_R (m^{-1})**	**s_R(m^{-1})**	**Ss_M (m^{-1})**	**s_M(m^{-1})**
K_2	apn/lms	1	$1{,}07 \cdot 10^{-4}$	-	$5{,}25 \cdot 10^{-1}$	-
K_1^{4+5}	apn/lms	1	$2{,}24 \cdot 10^{-8}$	-	$9{,}55 \cdot 10^{-4}$	-
K_1^{1}	apn/lms	1	$1{,}95 \cdot 10^{-4}$	-	$7{,}94 \cdot 10^{-3}$	-
J_1	apn/lms	1	$1{,}51 \cdot 10^{-5}$	-	$1{,}00 \cdot 10^{+0}$	-
J, K?	dol+apn/lms	1	$8{,}51 \cdot 10^{-12}$	-	$1{,}48E \cdot 10^{-7}$	-
J_1, T_3^{2+3}	dol	1	$2{,}00 \cdot 10^{-8}$	-	$1{,}20 \cdot 10^{-4}$	-
T_3^{2+3} baški/"Bača"	apn/lms	1	$2{,}04 \cdot 10^{-5}$	-	$3{,}02 \cdot 10^{-3}$	-
T_3^{2+3} baški/"Bača"	dol	3	$6{,}03 \cdot 10^{-4}$	$2{,}00 \cdot 10^{+1}$	$1{,}00 \cdot 10^{+0}$	-
T_3^{2+3} glavni/"Main"	dol	37	$2{,}19 \cdot 10^{-7}$	$1{,}32 \cdot 10^{+4}$	$8{,}91 \cdot 10^{-5}$	$8{,}32 \cdot 10^{-3}$
$_1T_3^1$ cordevol	dol	14	$2{,}04 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{+2}$	$7{,}24 \cdot 10^{-3}$	$3{,}55 \cdot 10^{-2}$
T_2^2 (ladinij/Ladinian)	apn/lms	1	$1{,}45 \cdot 10^{-3}$	-	$1{,}00 \cdot 10^{+0}$	-
T_2^1 (anizij/Anisian)	dol	11	$1{,}48 \cdot 10^{-5}$	$5{,}89 \cdot 10^{+2}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$1{,}02 \cdot 10^{-3}$
T_1 (skit/Early Triassic)	dol	6	$2{,}14 \cdot 10^{-5}$	$6{,}03 \cdot 10^{+1}$	$1{,}78 \cdot 10^{-2}$	$2{,}51 \cdot 10^{-2}$
vsi vodonosniki/all aquifers		*79*	$3{,}09 \cdot 10^{-6}$	$3{,}31 \cdot 10^{+3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$2{,}51 \cdot 10^{+3}$
vsi dolomiti/dolomites		*72*	$3{,}10 \cdot 10^{-6}$	$3{,}93 \cdot 10^{+3}$	$1{,}08 \cdot 10^{-3}$	$3{,}04 \cdot 10^{+3}$
vsi apnenci/limestones		*5*	$1{,}08 \cdot 10^{-5}$	$3{,}70 \cdot 10^{+1}$	$2{,}61 \cdot 10^{-2}$	$2{,}30 \cdot 10^{+1}$

Tab. 6. Vrednosti koeficientov specifičnega elastičnega uskladiščenja razpok in matriksa v posameznih vodonosnikih. Kratice za kamnine: apn = apnenec, dol = dolomit.

Tab. 6. Specific storage coefficients of fractures (Ss_R) and matrix (Ss_M) in different aquifers. Rock abbreviations: lms = limestone, dol = dolomite.

Uporabljena metoda/Used method	**N**	**%**
Cooper-Jacob	68	34,0 %
Theis – dvig/recovery	48	24,0 %
Theis	41	20,5 %
ostalo/other (Hantush-Jacob, Logan, Hvorslev, Dupuit, ...)	40	20,0 %
Kazemi	*2*	*1,0 %*
Moench fracture flow	*1*	*0,5 %*

Tab. 7. Uporabljene metode analize črpalnih poizkusov, zabeležene v poročilih.

Tab. 7. Aquifer test methods, used in hydrogeological reports.

modelirani približek. Odstopanja med metodami so podana tudi z izražanjem RSS v odstotkih (enačba 4) glede na Barkerjev model:

$$RSS = \sum_{i=1}^{N} e_i^2 \tag{3}$$

$$\% \, RSS_{Theis} = \frac{(RSS_{Theis} - RSS_{Bar\,ker})}{RSS_{Bar\,ker}} \tag{4}$$

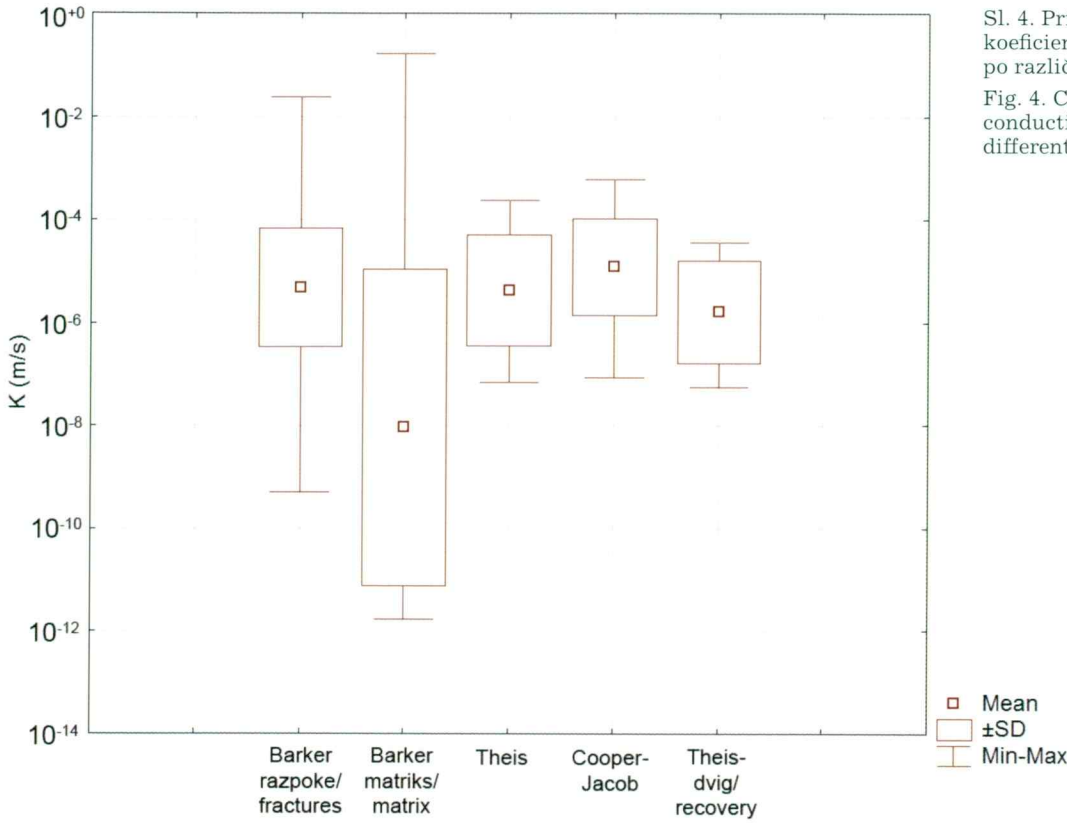
Rezidualne vrednosti najenostavneje pokažejo, kako dobro se modelirani podatki ujemajo z realnimi, pri čemer manjše vrednosti RSS kažejo boljša ujemanja in boljši model. Za kvalitativno primerjavo vseh treh metod je bilo potrebno izločiti nekatere manjkajoče vrednosti, za katere ni bilo na voljo podatkov o rezidualnih vrednostih, zato je primerjava opravljena na manjšem številu vzorcev (46), kot je celotnih podatkov o črpalnih poizkusih. V tem primeru (tab. 8) vidimo, da sta tako vsota RSS kot tudi povprečna vrednost rezidualnih vrednosti za Barkerjev model manjši kot za Cooper-Jacobovo ter za Theisovo metodo. Razlike so podane na dva načina, kot absolutne vrednosti *RSS* ter tudi kot razlike v odstotkih % *RSS*. Negativne vrednosti RSS v odstotkih ustrezajo situaciji, ko se Cooper-Jacobov ali Theisov model nekoliko bolje prilegata podatkom kot Barkerjev, kar je bilo pri Cooper-Jacobovem modelu zabeleženo le v pet primerih, pri Theisovem pa v štirih. Iz primerjave rezidualnih vrednosti lahko torej sklepamo, da je uporaba slednjih dveh metod manj primerna za obdelavo, saj se podatki v večini primerov slabše ujemajo z modeliranimi vrednostmi. Hkrati je potrebno omeniti tudi, da Cooper-Jacobova metoda ne upošteva vseh podatkov, temveč le njihov linearni del, ki velja za kasnejše čase črpanja, zato je še dodatno vprašljiva.

Glede na rezultate primerjave je bila opravljena tudi primerjava koeficientov prepustnosti razpok K_R in matriksa K_M z vrednostmi K, izračunanimi v hidrogeoloških poročilih. Primerjalne metode med različnimi koeficienti prepustnosti sta uporabila tudi Ratej & Brenčič (2005); metode Cooper-Jacoba in Theisa za kratke črpalne in nalivalne poizkuse ter tri druge metode za impulzne oz. slug teste. Njune metode sicer niso namenjene kraško-razpoklinskih kamninam, vseeno pa je tudi v tem primeru možno opaziti velike razlike med koeficienti, tudi do več kot dva reda velikosti. Razlike sta

N = 46	**RSS Barker (m^2)**	**RSS Cooper-Jacob (m^2)**	**RSS Theis (m^2)**	***% RSS Cooper-Jacob***	***% RSS Theis***
vsota/sum	9774	14884	61021	*585*	*1050*
povprečna vrednost/mean	212,49	323,57	1326,53	*12,71*	*22,84*
minimum/minimum	0,00	0,00	0,00	*-0,98*	*-0,92*
maksimum/maximun	5472,80	6612,00	50680,00	*225,24*	*332,74*

Tab. 8. Rezidualne vrednosti (RSS) za različne metode črpalnih poizkusov.

Tab. 8. Residual values (RSS) for different aquifer test methods.



Sl. 4. Primerjava vrednosti koeficientov prepustnosti po različnih metodah.

Fig. 4. Comparison of hydraulic conductivities obtained by different aquifer test methods.

pripisala tehničnim lastnostim izvedbe vrtin, času črpanja in metodi preizkusov, saj so bili nekateri testi nalivalni, drugi pa črpalni. Končni rezultati so torej po njunih ugotovitvah odvisni od izbire metode, razen tega pa na dobljene vrednosti deloma vplivata tudi izbira merila opazovanja in način izvedbe poizkusov (Nastev et al., 2004).

Rezultati primerjave koeficientov prepustnosti (tab. 9; sl. 4) sicer kažejo, da so vrednosti koeficienta razpok, določene po metodi Barkerja (1988), primerljive z ostalimi vrednostmi, čeprav takšno vzporejanje ni popolnoma ustrezno, saj za omenjene tri metode ni določeno, kaj koeficient prepustnosti sploh predstavlja. Te metode so namreč namenjene kamninam z medzrnsko poroznostjo, kjer je prisoten le en tip poroznosti. V večini primerov gre za razpoke, ki so bolj prepustne. Iz rezultatov lahko torej sklepamo, da so glede na Barkerjev model rezultati iz poročil primerljivih vrednosti, ki jih dobimo po metodi Theisa za padanje podzemne vode, medtem ko so vrednosti po Theisu za dvig podzemne vode glede na Barkerjeve vrednosti podcenjene in vrednosti po Cooper-Jacobovi metodi precenjene. Dobljene vrednosti koeficientov prepustnosti so torej vsekakor odvisne od uporabe metode. Razlike K_R so glede na ostale tri metode v območju reda velikosti, najbolj pa se po vrednostih ujemajo s Theisovo metodo. Cooper-Jacobova metoda bolj odstopa, saj predstavlja Theisovo poenostavitev in upošteva le podatke pri kasnejših časih črpanja. Theisova metoda za dvig pa ni popolnoma primerljiva zaradi drugačne metode izvedbe črpalnega poizkusa, saj gre v tem primeru za dvig vode po koncu črpanja in ne med črpanjem.

Zaključek

Poglavitne ugotovitve so podane v naslednjih točkah:

1. Geometrične srednje vrednosti koeficientov prepustnosti analiziranih karbonatnih vodonosnikov v Sloveniji, določene z Barkerjevo (1988) metodo za črpalne poizkuse, znašajo za razpoke $K_R = 4{,}79 \cdot 10^{-6}$ m/s in za matriks $K_M = 9{,}11 \cdot 10^{-9}$ m/s. Vrednosti se gibljejo v razponu od $K_R = 5{,}13 \cdot 10^{-10}$ do $2{,}40 \cdot 10^{-2}$ m/s za razpoke in od $K_M = 1{,}66 \cdot 10^{-12}$ in $1{,}66 \cdot 10^{-1}$ m/s za matriks. Razlike med skupinama so visoko značilne. Koeficienti za razpoke veljajo kot ocena koeficientov prepustnosti vodonosnika pri daljših časih črpanja. Vrednosti koeficientov razpok za dolomitne vodonosnike znašajo $K_R = 5{,}96 \cdot 10^{-6}$ m/s, za matriks pa $K_M = 9{,}11 \cdot 10^{-9}$ m/s in za apnence $K_R = 3{,}27 \cdot 10^{-7}$ m/s in $K_M = 4{,}38 \cdot 10^{-6}$ m/s, čeprav je potrebno opozoriti, da je podatkov za apnence precej manj in da so zanje standardni odkloni precej večji.

	N	K (m/s)	s (m/s)	min	max
K_R (Barker)	79	$4{,}79 \cdot 10^{-6}$	$1{,}41 \cdot 10^{+1}$	$5{,}13 \cdot 10^{-10}$	$2{,}40 \cdot 10^{-2}$
K_M (Barker)	79	$9{,}12 \cdot 10^{-9}$	$1{,}20 \cdot 10^{+3}$	$1{,}66 \cdot 10^{-12}$	$1{,}66 \cdot 10^{-1}$
K (Theis)	11	$4{,}27 \cdot 10^{-6}$	$1{,}20 \cdot 10^{+1}$	$7{,}08 \cdot 10^{-8}$	$2{,}40 \cdot 10^{-4}$
K (Cooper-Jacob)	31	$1{,}23 \cdot 10^{-5}$	$8{,}71 \cdot 10^{+0}$	$8{,}51 \cdot 10^{-8}$	$6{,}03 \cdot 10^{-4}$
K (Theis – dvig/recovrey)	11	$1{,}62 \cdot 10^{-6}$	$1{,}00 \cdot 10^{+1}$	$5{,}62 \cdot 10^{-8}$	$3{,}55 \cdot 10^{-5}$

Tab. 9. Vrednosti koeficientov prepustnosti, določenih po različnih metodah.

Tab. 9. Comparison of hydraulic conductivities obtained by different aquifer test methods.

2. Koeficienti prepustnosti se razlikujejo v posameznih starostno-litoloških skupinah. Če upoštevamo skupine z zadovoljivim številom podatkov, so najvišje vrednosti zabeležene v skupini cordevolskih dolomitov, ki imajo zaradi čistosti, poznodiagenetskega nastanka in posledično večjih zrn, poroznosti in razpokanosti tudi najmanjšo razliko med koeficienti prepustnosti razpok in matriksa.

3. Koeficient prepustnosti je v poznodiagenetskih skupinah dolomitov večji kot v tistih, nastalih tako z zgodnjo kot tudi s pozno diagenezo, česar pri koeficientih, določenih z metodami Theisa in Cooper-Jacoba ni opaziti.

4. Koeficienti specifičnega elastičnega uskladiščenja so značilno različni v razpokah (Ss_R = $3{,}09 \cdot 10^{-6}$ m^{-1}) in v matriksu (Ss_M = $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ m^{-1}). Razlike so visoko značilne. V vseh vodonosnikih je uskladiščenje v matriksu večje kot v razpokah, kar se sklada s teoretičnimi predpostavkami. Vrednosti koeficientov za dolomitne vodonosnike znašajo Ss_R = $3{,}10 \cdot 10^{-6}$ m^{-1} za razpoke in Ss_M = $1{,}08 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} za matriks, za apnence pa Ss_R = $1{,}08 \cdot 10^{-5}$ m^{-1} in Ss_M = $2{,}61 \cdot 10^{-2}$ m^{-1}, pri čemer je podobno kot pri koeficientih prepustnosti potrebno opozoriti na manjše število podatkov za apnence.

5. Primerjava metod kaže, da so večinoma uporabljene metode Theisa in Cooper-Jacoba (v 79 % primerih), metode za kraško-razpoklinske vodonosnike pa le v 1,5 % primerih. Pri primerjavi modeliranih vrednosti z dejanskimi podatki je očitno, da so najboljša ujemanja zabeležena pri Barkerjevi metodi, najslabša pa pri Cooper-Jacobovi. Za analizo črpalnih poizkusov v kraško-razpoklinskih vodonosnikih je zato potrebno uporabljati ustrezne metode, saj dajo te bolj logične rezultate in ločene vrednosti koeficientov prepustnosti in koeficientov elastičnih specifičnih uskladiščenj za razpoke in za matriks.

Reference

Andjelov, M., Gale, U., Kukar, N., Trišić, N. & Uhan, J. 2006: Ocena količinskega stanja podzemnih voda v Sloveniji (Groundwater quantitative status assessment in Slovenia). Geologija (Ljubljana) 49/2: 383–391.

Aničić, B. & Juriša, M. 1985: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Tolmač lista Rogatec: L33-68. Zvezni geološki zavod (Beograd).

Barenblatt, G. I., Zheltov, Iu. P. & Kochina, I. N. 1960: Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks [Strata]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 24(5): 1286–1303.

Barker, J. A. 1988: Generalized Radial Flow Model for Hydraulic Tests in Fractured Rock. Water Resources Research 24(10): 1796–1804.

Bukovac, J., Poljak, M., Šušnjar, M. & Čakalo, M. 1983: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, List L33-68 Črnomelj. Geološki zavod Zagreb in Geološki zavod Ljubljana.

Buser, S. & Cajhen, J. 1980: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Tolmač lista Celovec (Klagenfurt): L33-53. Zvezni geološki zavod (Beograd).

Buser, S. 1989: Development of the Dinaric and Julian carbonate platforms and the intermediate Slovenian basin (NW-Yugoslavia). V: Evolution of the Karstic carbonate platform: relation with other periadriatic carbonate platforms. Carulli, G. B., Cucchi, F. & Radrizzani, C. P. Mem. Soc. Geol. Ital., 40: 313–320.

Buser, S., Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B. 2007: Triasni konodonti Slovenskega bazena. Geologija (Ljubljana) 50/1: 19–28.

Davis, S. N. & de Wiest, R. J. M. 1966: Hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc. de SÁ. M. 2003: Applied statistics using SPSS, Mathematica and MATLAB. Springer (Berlin).

Dolenec, T., Ogorelec, B. & Pezdič, J. 1981: Zgornjepermske in skitske plasti pri Tržiču. (Upper Permian and Scythian beds in the Tržič area). Geologija (Ljubljana) 24/2: 217–238.

Dozet, S. & Šribar, L. 1998: Biostratigraphy of Shallow Marine Jurassic beds in Southeastern Slovenia. Geologija (Ljubljana) 40: 187–221.

Gaswirth, S. B., Budd, D. A. & Crawford, B. R. 2006: Textural and stratigraphic controls on fractured dolomite in a carbonate aquifer system, Ocala limestone, west-central Florida. Sedimentary Geology 184: 241–254.

Grad, K. & Ogorelec, B. 1980: Zgornjepermske, skitske in anizične kamenine na žirovskem ozemlju. (Upper Permian, Scythian, and Anisian rocks in the Žiri area). Geologija (Ljubljana) 23/2: 189–220.

Hamm, S-Y. & Bidaux, P. 1996: Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks. Water Resources Research 32(9): 2733–2745.

Hydrosolve Inc. Aqtesolv for Windows. Version 3.5. 2006. Dostopno na svetovnem spletu: http://www.aqtesolv.com.

Jurkovšek. B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M. & Šribar, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote. Kredne in paleogenske karbonatne kamnine. Geološki zavod Slovenije (Ljubljana): 143 str.

Košir, A. & Wright, P. 2002: Dolomitization and porosity pattern in Eocene hydrocarbon-stained limestones (alveolina-nummulites limestone, SW Slovenia). V: 1. Slovenski geološki kongres. (1st Slovenian Geological Congress, Book of abstracts). Horvat, A., Košir, A., Vreča, P., Brenčič, M. (ured.) Geološki zavod Slovenije (Ljubljana).

Krivic, P. 1984: Interprétation des essais par pompage réalisés dans un aquifère karstique. Obdelava črpalnih poizkusov v kraškem vodonosniku. Geologija (Ljubljana) 26: 149–186.

Kruseman, G. P. & de Ridder, N. A. 1994: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd ed. ILRI Publication 47. International Institute for Land Reclamation and Improvement (Wageningen): 377 p.

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: 937–947.

Motyka, J., Pulido-Bosch, A., Borczak, S. & Gisbert, J. 1998: Matrix hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks of Olkusz (Southern Poland). Journal of Hydrology 211: 140–150.

Nastev, M., Savard, M. M., Lapcevic, P., Lefebvre, R. & Martel, R. 2004: Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. Hydrogeology Journal 12: 257–269.

Novak, M. 2001: Skitijske plasti Toškega Čela (Scythian beds in the Toško Čelo area (Slovenia). Geologija (Ljubljana) 44/2: 295–303.

Ogorelec, B., Dolenec, T. & Pezdič, J. 2000: Izotopska sestava O in C v mezozojskih karbonatnih kamninan Slovenije – vpliv faciesa in diageneze. Isotope composition of O and C in Mesozoic carbonate rocks of Slovenia – effect of facies and diagenesis. Geologija (Ljubljana) 42: 171–205.

Ogorelec, B. & Rothe, P. 1993: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien. Mikrofacies, diageneza in geokemija dachsteinskega apnenca in glavnega dolomita v jugozahodni Sloveniji. Geologija (Ljubljana) 35: 81–191.

Purser, B. H., Brown, A. & Aissaoui, D. M. 1994: Nature, origins and evolution of porosity in dolomites. V: Dolomites. The International Association of Sedimentologists special publication, vol. 21. Purser, B., Tucker. M. & Zenger, D. (eds.). The International Association of Sedimentologists (Cambridge): 283–308.

Ratej, J. & Brenčič, M. 2005: Comparative Analysis of Single Well Aquifer Test Methods on the Mill Taining Site of Boršt Žirovski vrh, Slovenia. Primerjalna analiza metod obdelave hidravličnih poizkusov v črpanem vodnjaku na odlagališču hidrometalurške jalovine Boršt, Žirovski vrh, Slovenija. RMZ – Materials and Geoenvironment (Ljubljana) 52(4): 669–684.

Rožič, B. 2008: Upper Triassic–Lower Jurassic limestones from Mt. Kobla in the northern Tolmin Basin: tectonically repeated or continuous succession? RMZ – Materials and Geoenvironment (Ljubljana) 55/3: 345–362.

Stearns, D. W., & Friedman, M. 1972: Reservoirs in fractured rock. V: King, R. E. (ed.). AAPG Memoir 16, Stratigraphic oil and gas fields: 82–106.

Šikić, D. & Pleničar, M. 1975: Osnovna geološka karta SFRJ. 1 : 100.000 Tolmač lista Ilirska Bistrica : L33-89. Zvezni geološki zavod (Beograd).

Šmuc, A. & Čar, J. 2002: Upper Ladinian to Lower Carnian Sedimentary Evolution in the Idrija-Cerkno Region, Western Slovenia. Facies 46: 205–216.

Verbovšek, T. 2008a: Diagenetic effects on well yield of dolomite aquifers in Slovenia. Environmental Geology 53(6): 1173–1182.

Verbovšek, T. 2003: Izdatnost vrtin in vodnjakov v Sloveniji: skupina dolomitnih vodonosnikov. Diplomska naloga. Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za geologijo (Ljubljana): 206 str.

Verbovšek, T. 2005: Ustrezne analize črpalnih poizkusov v razpoklinskih vodonosnikih. Appropriate analysis methods of pumping tests in fractured aquifers. RMZ – Materials and Geoenvironment (Ljubljana) 52(4): 723–735.

Verbovšek, T. 2008b: Vpliv prevodnih struktur na tok in prenos snovi v kraško-razpoklinskih vodonosnikih. Doktorska disertacija. Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za geologijo (Ljubljana): 457 str.

Verbovšek, T. & Veselič, M. 2008: Factors influencing the hydraulic properties of wells in dolomite aquifers. Hydrogeology Journal 16(4): 779–795.

Warren, J. E. & Root, P. J. 1963: The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. Soc. of Petrol. Engrs. J. 3: 245–255.

Worthington, S. R. H. 1999: A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. V Karst Modeling: Special Publication 5. Palmer, A. N. Palmer, M. V. & Sasowsky, I. D. (eds.). Karst Waters Institute, Inc. (Charles Town): 30–37.