

Študij toka podzemne vode v nezasičeni coni z metodo izotopske razdružitve hidrogramov

Study of groundwater flow in the coarse gravel unsaturated zone by means of isotope hydrograph separation

Nina MALI

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, SI – 1000 Ljubljana
e-mail: nina.mali@geo-zs.si

Ključne besede: podzemna voda, nezasičena cona, stabilni izotopi, hidrogrami, lizimeter, Selniška Dobrava, Slovenija

Key words: groundwater, unsaturated zone, environmental isotope, hydrographs, lysimeter, Selniška Dobrava, Slovenia

Izvleček

V članku je predstavljena uporaba metode izotopske razdružitve hidrogramov, za določitev vpliva komponente taljenja snega na dinamiko podzemne vode in za preučevanje pojava preferenčnih tokov v visokoprepustni nezasičeni coni prodnega vodonosnika. Preferenčni tokovi in dinamika matričnega toka so pomembni, tako zaradi skladiščenja vode v nezasičeni coni, kot tudi za prenos onesnaženja do zasičene cone. Analiza je bila opravljena na podatkih, zbranih v času izrednega dogodka nenadnega taljenja snega v marcu 2004 v lizimetru na Selniški Dobravi. Rezultati kažejo na pojav batnega efekta tudi v visoko prepustnem prodnem vodonosniku, v kolikor gre za nenadne večje količine infiltrirane vode. Z globino se reducira vpliv preferenčnih tokov. Večje deleže sveže vode smo zaznali do globine 1.5 m (38 %), z globino pa se je delež te vode zmanjšal.

Abstract

The paper presents the use of isotope hydrograph separation method in the determination of snowmelt impact on groundwater dynamics and in the investigation of preferential flow in the high permeable coarse gravel unsaturated zone. Preferential flows as well as matrix flow dynamics are important for groundwater storage in the unsaturated zone and for pollution transport to the saturated zone. Data analysis is based on data collected during the time of sudden snowmelt in March 2004 in the Selniška Dobrava lysimeter. The results indicate the piston flow effect phenomenon also in the high permeable coarse gravel aquifer at the time of infiltration of large quantities of water. The preferential flow influence decreases with depth. A larger share of new water was observed up to 1.5 m depth (38 %), while it decreases with depth.

Uvod

Procesi v visokoprepustni prodni nezasičeni coni še niso čisto dognani saj se v teh materialih le-ti odvijajo popolnoma drugače kot v sredinah s fino granulacijo. Ravno tako je v visokoprepustnih sredinah težko opraviti in-situ meritve, ki so temelj za določitev lastnosti nezasičene cone. Eden od procesov v nezasičeni coni je pojav preferenčnih tokov v visokoprepustnih poroznih sredinah. Osnovna lastnost preferenčnega toka je, da ob infiltraciji vode v nezasičeno cono le-ta obide večji del matričnega toka in se hitro pomika navzdol. Preferenčni tok se odvija skozi makropore in ima velik pomen pri prenosu onesnaženja v vodonosniku. Ocena teh parametrov je pomembna predvsem v vodonosnikih od katerih so odvisni vodooskrbni sistemi. V članku je predstavljena uporaba metode

razdružitve hidrogramov za študij toka podzemne vode v nezasičeni coni.

Metoda razdružitve hidrogramov temelji na določitvi dveh komponent v opazovanem sistemu: vodo, ki je bila v sistemu pred nekim ekstremnim nevihtnim dogodkom in vodo, ki je vstopila v sistem ob nevihti. Napajanje, skladiščenje in praznjenje vodonosnega sistema se kaže v reakcijah sistema med nevihtnim obdobjem in baznim tokom (CLARK & FRITZ, 2000). Razdelitev hidrogramov v matrični tok in v komponento nevihtnega odtoka je osnova za določitev lastnosti napajanja sistema. Razdelitev hidrogramov z uporabo stabilnih izotopov temelji na ločevanju izotopske sestave matričnega toka v podzemni vodi in nevihtnega signala (CLARK & FRITZ, 2000). Izotop kisika lahko uporabimo za razdelitev hidrogramov, če je razlika v izotopski sestavi kom-

ponent dogodka in vode pred dogodkom relativno večja od izotopske variabilnosti znotraj vsake komponente. Izračun masne bilance z uporabo naravnih izotopov z metodo razdružitve hidrogramov za razčlenitev v različne komponente je zelo privlačen zaradi enostavnega izračuna. Cilj predstavljene analize je bil določiti kje je tok podzemne vode v nezasičeni coni podvržen preferenčnim tokovom oz. kakšni so deleži nove vode v matričnem toku. Predstavljeni so terenski podatki opazovanja vpliva ekstremnega dogodka nenadnega taljenja snega na podlagi vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v vodi nezasičene cone v lizimetru visokoprepustnega prodnega vodonosnika Selniške Dobrave.

Opis območja

Raziskava je bila opravljena v lizimetru na Selniški Dobravi. Lizimeter je lociran v območju glavnega visokoprepustnega prodnega vodonosnika (slika 1). Debelina prodnega zasipa na tem mestu je 37.5 m, gladina podzemne vode je na 27.5 m in debelina omočenega sloja je 10 m (MALI, 1996, 2006; MALI et al., 2005). Na podlagi granulometričnih analiz je prepustnost proda ocenjena na 2.9×10^{-3} do 6.9×10^{-2} m/s. Vegetacijski pokrov predstavlja mešani gozd, tla pa so določena kot distrična rjava tla s prepustnostjo 1.5 do 4.5×10^{-5} m/s.

Območje pripada kontinentalnemu podnebjju centralne Slovenije s tipičnim celinskim deževnim režimom. Povprečne letne padavine so ocenjene na 900–1200 mm, srednja letna temperatura je med 8 in 12 °C.

Metode raziskav

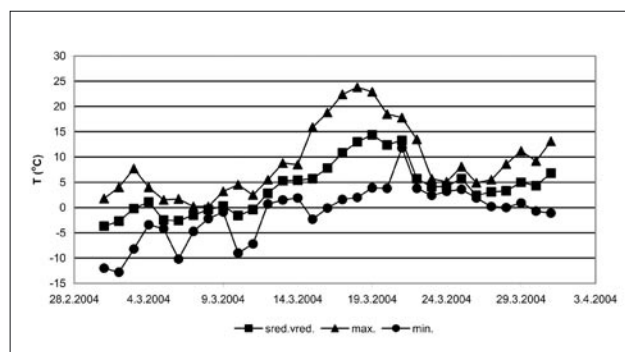
Eksperimentalni sistem

Lizimeter je izdelan kot betonska škatla 2 m x 2 m, globine 5 m, s stenami debeline 0.2 m (MALI, 2006; MALI & URBANC, 2006). Ima 10 vzorčnih mest na različnih globinah z oznakami JV-1 do JV-10 (slika 1). Pozicija vzorčnih mest je naključna. Za vzorčenje vode v nezasičeni coni so nameščene drenaže. Drenaže so 1.7 m dolgi profili (10 cm x 10 cm) z inverznim perforiranim profilom (5 cm x 5 cm) z zbiralnim sistemom vode na koncu. Jeklene

drenaže so vtisnjene horizontalno v neporušeno steno. Ob lizimetru je postavljen merilec količine padavin z izhodom za zbiranje in vzorčenje padavin. Sam lizimeter je lociran ob piezometru PS-5, ki omogoča vzorčenje podzemne vode v vodonosniku.

Taljenje snega 2004

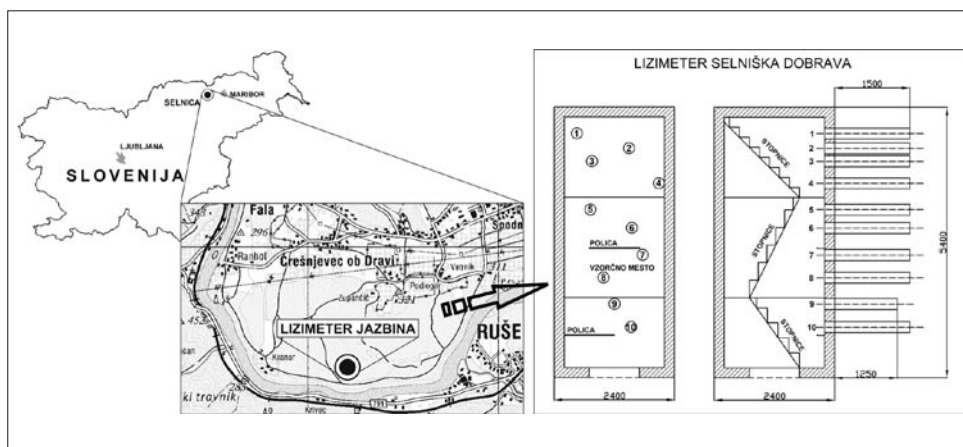
V marcu 2004 je prišlo za to obdobje do neobičajne ekstremne otoplitve. V tednu od



Sl. 2. Najvišje, najnižje in srednje vrednosti dnevni temperatur za meteorološko postajo Maribor

Fig. 2. Maximum, minimum and mean day temperature for Maribor meteorological station

15.3.2004 in 23.3.2004 je dnevna temperatura zraka dosegla 20 °C, kar je povzročilo hitro taljenje snega. Na sliki 2 so prikazane najvišje, najnižje in povprečne temperature zraka za meteorološko postajo Maribor (ARSO, 2004). Lokacija lizimetra je na območju mešanega gozda, kjer je temperatura zraka nekoliko nižja od temperatur na meteorološki postaji. Taljenje snega je nekoliko zamujalo glede na meteorološke podatke s postaje. Pred otoplitvijo je bilo na lokaciji lizimetra 40 cm snežne odeje. Močan tok podzemne vode v nezasičeni coni smo zasledili 23.3.2004. Od takrat smo redno vzorčili vodo v nezasičeni coni za izotopske analize na vseh 10 vzorčnih mestih. V času vzorčenja smo merili elektroprevodnost in količino iztoka na posameznem vzorčnem mestu. 24.3.2004 je dodatno padlo 70 mm padavin. Vsi ti vremenski pogoji so povzročili izredno močan tok podzemne vode v nezasičeni coni.



Sl. 1. Lokacija in prerez lizimetra v Selniški Dobravi

Fig.1. Location and cross-section of the lysimeter Selniška Dobrava

Vzorčenje in analitika

Vzorčenje je potekalo od 23.3.2004 do 8.4.2004. Pogostnost vzorčenja smo prilagodili količini iztoka v lizimetru. Začeli smo z večkratnim vzorčenjem na dan, kasneje pa smo vzorčili enkrat dnevno oz. na dva dni. Vzorce smo odvzeli na iztoku iz drenaž v lizimetru v 120 ml plastenke. Istočasno so bili odvzeti vzorci snežne odeje in padavin v obdobju spremljanja vplivov taljenja snega.

Vse analize stabilnih izotopov so bile opravljene v laboratoriju Joanneum Reserch Forshungs-geesellschaft mbH, Institute of Water Resources Management, Hydrogeology and Geophysics. Vrednosti izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ so podane glede na VSMOW standard (Vienna Standard Mean Ocean Water). Razmerje je predstavljeno z δ :

$$\delta_{vzorec} = \left(\frac{R_x}{R_{st}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰ VSMOW} \quad (1)$$

R_x predstavlja razmerje izotopa ($\text{O}_{18}/\text{O}_{16}$) v vzorcu, R_{st} je razmerje v VSMOW standardu.

Analiza hidrogramov

Dvokomponentna razdelitev hidrograma v nevihtni odtok in pred nevihtni osnovni tok lahko opišemo z enačbo masne bilance. Osnovna enačba masne bilance je (VAN DER HOVEN et al., 2002)

$$Q_s = Q_n + Q_o \quad (2)$$

s- skupna voda
n- nova voda
o- stara voda

in

$$Q_s C_s = Q_n C_n + Q_o C_o \quad (3)$$

Kjer je Q odtok, C koncentracija sledila, označka s označuje skupni iztok vode, n vodo med dogodkom (novo vodo) in o vodo pred dogodkom (stara vodo). V našem primeru gre za podzemno vodo v nenasičeni coni pred taljenjem snega in po njem.

Enačbe masne bilance En. (2) in (3) lahko uporabimo za izračun deleža nove in stare vode v toku podzemne vode:

$$R = \frac{Q_o}{Q_s} \quad (4)$$

Uporaba metode razdelitve hidrogramov z masno bilanco naravnih sledil zahteva nekaj predpostavk (SKLASH & FARVOLDEN, 1982):

Osnovni tok podzemne vode lahko opišemo s konstantno sestavo

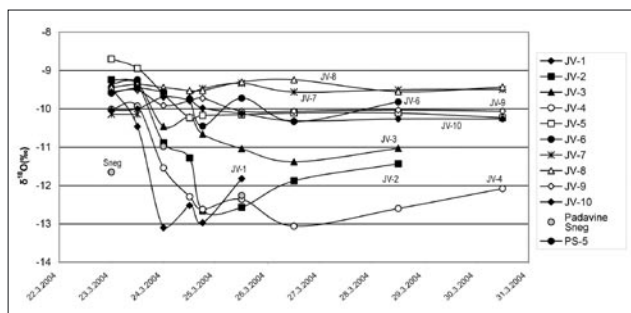
- (1) Dež ali taljenje snega lahko opišemo s konstantno sestavo. Če to ni, moramo variranje v sestavi zabeležiti.
- (2) Sestava deževnice je značilno drugačna od podzemne vode/osnovnega toka.

Tabela 1. Izotopska sestave $\delta^{18}\text{O}$ podzemne vode nezasičene cone v času taljenja snegaTable 1. $\delta^{18}\text{O}$ isotope composition of unsaturated zone water at the time of snow melting

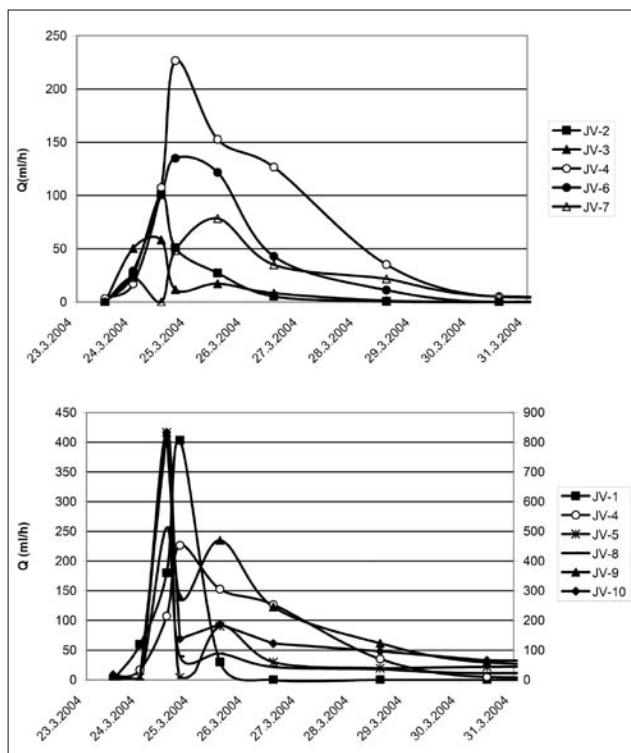
	<i>JV-1</i>	<i>JV-2</i>	<i>JV-3</i>	<i>JV-4</i>	<i>JV-5</i>	<i>JV-6</i>	<i>JV-7</i>	<i>JV-8</i>	<i>JV-9</i>	<i>JV-10</i>	<i>Padavine</i>	<i>PS-5</i>
13.2.2004 12:00	-10.46	-9.38	-9.34	-9.93	-8.94	-9.24	-10.14	-9.36	-9.51	-10.00	-17.62	-9.46
24.3.2004 0:00	-13.10	-10.88	-10.46	-11.54	-9.61			-9.44	-9.91	-9.69	-10.98	-9.56
24.3.2004 12:00	-12.52	-11.28	-10.21	-12.29	-10.23	-9.75	-9.63	-9.52	-9.79	-9.78		
24.3.2004 18:00	-12.97	-12.66	-10.66	-12.62	-10.17	-10.45	-9.47	-9.52	-9.72	-9.98		
25.3.2004 12:00	-11.82	-12.57	-11.04	-12.36	-10.15	-9.72	-9.33	-9.30	-10.06	-10.12	-12.26	
26.3.2004 12:00		-11.88	-11.38	-13.06	-10.11	-10.33	-9.56	-9.24	-10.06	-10.31		
28.3.2004 12:00		-11.43	-11.03	-12.60	-10.11	-9.82	-9.50	-9.55	-10.03	-10.26		
30.3.2004 12:00				-12.08	-10.23		-9.49	-9.43	-10.06	-10.26		
8.4.2004 12:00	-11.58	-12.84	-11.36	-12.83	-10.69	-10.59	-9.57	-9.75	-10.08	-10.32	-10.06	
21.4.2004	-9.1	-12.27			-11.58	-10.06	-9.7	-9.9	-10.5	-10.44	-8.36	-9.66

Tabela 2. Statistične vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v času taljenja snegaTable 2. $\delta^{18}\text{O}$ statistics of unsaturated water at the time of snow melting

	<i>JV-1</i>	<i>JV-2</i>	<i>JV-3</i>	<i>JV-4</i>	<i>JV-5</i>	<i>JV-6</i>	<i>JV-7</i>	<i>JV-8</i>	<i>JV-9</i>	<i>JV-10</i>	<i>Padavine</i>	<i>PS-5</i>
n	6	8	7	8	9	7	8	9	9	9	4	2
mean	-11.85	-11.98	-10.88	-12.42	-10.32	-10.10	-9.53	-9.52	-10.02	-10.13	-10.42	-9.61
max	-9.10	-10.88	-10.21	-11.54	-9.61	-9.72	-9.33	-9.24	-9.72	-9.69	-8.36	-9.56
min	-13.10	-12.84	-11.38	-13.06	-11.58	-10.59	-9.70	-9.90	-10.50	-10.44	-12.26	-9.66
range	-4.00	-1.96	-1.17	-1.52	-1.97	-0.87	-0.37	-0.66	-0.78	-0.75	-3.90	-0.10



Sl. 3. Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v času taljenja snega
Fig. 3. $\delta^{18}\text{O}$ values at the time of snow melting



Sl. 4. Meritve iztokov vode v nezasičeni coni v času taljenja snega

Fig.4. Discharge of the water in unsaturated zone in time of snow melting

- (3) Prispevek vode iz zemljine je zanemarljiv, ali pa je sestava enaka podzemni vodi v nezasičeni coni
- (4) Prispevek površinskih vod je zanemarljiv

Rezultati in diskusija

S preučevanjem lastnosti toka v nezasičeni coni v času taljenje snega, ki je povzročil značilen sledilni signal, smo lahko opisali preferenčne tokove in dinamiko matričnega toka. Rezultati izotopskih analiz v $\delta^{18}\text{O}$ v času taljenja snega smo obdelali z metodo razdelitve hidrogramov.

Rezultati analiz izotopa $\delta^{18}\text{O}$ med sledenjem vpliva taljenja snega so podani v tabeli 1. Iz statistik (tabela 2) je razvidno, da so najbolj negativne vrednosti izotopa $\delta^{18}\text{O}$ dosežene na vzorčnih mestih JV-1, JV-2 in JV-4. V naslednji skupini so vzorčna mesta JV-5, JV-3 in JV-6. Na vzorčnih mestih, ki so globlje v lizimetru, je sprememba v izotopski sestavi neznatna. Minimalne vrednosti v času vzorčenja in vrednosti pred opazovanim dogodkom so v istem razponu.

V diagramu na sliki 3 so prikazane spremembe vrednosti izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ zaradi vpliva taljenja snega. Krivulje prikazujejo različne reakcijske čase. Najbolj razločni so signali na vzorčnih mestih JV-1, JV-2, JV-3 in JV-4. Značilno nihanje smo zaznali na vzorčnem mestu JV-6. Na vzorčnih mestih JV-8, JV-9, JV-10 in predvsem v JV-7 je signal zreduciran. Iz iztokov vode na posameznih vzorčnih mestih (slika 4, tabela 3) lahko razločimo dve skupini vzorčnih mest. Vzorčna mesta JV-5, JV-9, JV-10 in nekoliko manj JV-8 imajo zaradi vpliva taljenja snega povečano količino iztoka in dobro prepoznaven dvojni signal izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$, ki je posledica padavin 24.4.2004. Največji iztok je na vzorčnem mestu JV-10 (833 ml/h). JV-4 ima podoben iztok kot JV-8 vendar ne tako razločen dvojni signal v izotopski sestavi. Na vzorčnih mestih JV-2, JV-6 in JV-7 smo zaznali manjši iztok in manj čist dvojni signal. Signal v JV-7 zaostaja za ostalimi. Na podlagi obeh diagramov sklepamo, da v globljih

Tabela 3. Iztok vode v nezasičeni coni v času taljenja snega

Table 3. Water discharge in time of snow melting

Q (ml/h)	JV-1	JV-2	JV-3	JV-4	JV-5	JV-6	JV-7	JV-8	JV-9	JV-10
23.3.2004 0:00	0	0	0	3	1	0	0	3	4	17
24.3.2004 0:00	60	25	50	17	4	29	23	0	0	0
24.3.2004 12:00	180	101	58	108	417	101	0	257	417	833
24.3.2004 18:00	403	51	12	227	0	135	48	39	140	138
25.3.2004 12:00	30	27	17	153	91	122	78	44	235	187
26.3.2004 12:00	0	5	8	127	30	43	35	22	123	122
28.3.2004 12:00	0	1	1	35	20	11	22	18	62	97
30.3.2004 12:00	0	0	0	5	22	0	5	11	30	65
8.4.2004 12:00	1	3	2	10	25	6	10	19	7	50
21.4.2004 12:00	0	2	0	4	46	1	29	62	13	39

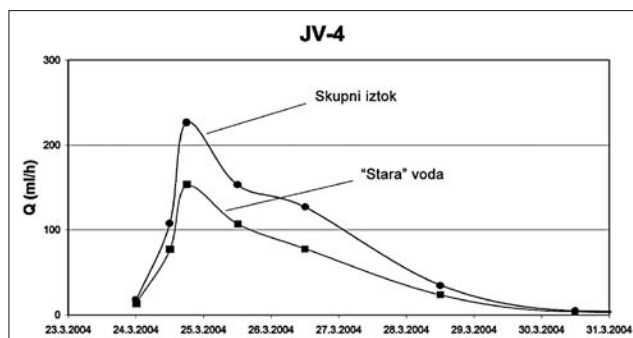
Tabela 4. Deleži stare in nove vode v iztoku
Table 4. Old and new flow shares in discharge water

<i>Delež stare vode (%)</i>	<i>JV-1</i>	<i>JV-2</i>	<i>JV-3</i>	<i>JV-4</i>	<i>JV-5</i>	<i>JV-6</i>	<i>JV-7</i>	<i>JV-8</i>	<i>JV-9</i>	<i>JV-10</i>
24.3.2004 0:00	0.65	0.83	0.87	0.80	0.93			0.99	0.95	1.04
24.3.2004 12:00	0.73	0.78	0.90	0.71	0.86	0.94	1.06	0.98	0.97	1.03
24.3.2004 18:00	0.67	0.62	0.85	0.67	0.87	0.86	1.08	0.98	0.98	1.00
25.3.2004 12:00	0.82	0.63	0.81	0.70	0.87	0.95	1.10	1.01	0.94	0.99
26.3.2004 12:00		0.71	0.77	0.62	0.87	0.88	1.07	1.01	0.94	0.96
28.3.2004 12:00		0.76	0.81	0.67	0.87	0.93	1.08	0.98	0.94	0.97
30.3.2004 12:00				0.74	0.86		1.08	0.99	0.94	0.97
8.4.2004 12:00	0.85	0.60	0.77	0.64	0.81	0.85	1.07	0.96	0.93	0.96
21.4.2004 12:00	1.18	0.67			0.71	0.91	1.06	0.94	0.88	0.95
<i>Delež nove vode (%)</i>	<i>JV-1</i>	<i>JV-2</i>	<i>JV-3</i>	<i>JV-4</i>	<i>JV-5</i>	<i>JV-6</i>	<i>JV-7</i>	<i>JV-8</i>	<i>JV-9</i>	<i>JV-10</i>
24.3.2004 0:00	0.35	0.17	0.13	0.20	0.07			0.01	0.05	
24.3.2004 12:00	0.27	0.22	0.10	0.29	0.14	0.06		0.02	0.03	
24.3.2004 18:00	0.33	0.38	0.15	0.33	0.13	0.14		0.02	0.02	
25.3.2004 12:00	0.18	0.37	0.19	0.30	0.13	0.05			0.06	0.01
26.3.2004 12:00		0.29	0.23	0.38	0.13	0.12			0.06	0.04
28.3.2004 12:00		0.24	0.19	0.33	0.13	0.07		0.02	0.06	0.03
30.3.2004 12:00				0.26	0.14			0.01	0.06	0.03
8.4.2004 12:00	0.15	0.40	0.23	0.36	0.19	0.15		0.04	0.07	0.04
21.4.2004 12:00		0.33			0.29	0.09		0.06	0.12	0.05

delih lizimetra, batni efekt povzroči večji iztok z izrivanjem stare vode uskladiščene v nezasičeni coni. V teh predelih skoraj nismo zaznali deležev nove vode. Na drugi strani, na zgornjih vzorčnih mestih zaznamo vpliv taljenja snega tako v povečani količini iztoka kot tudi v deležu sveže (nove) vode. Delež sveže vode narašča še po tem, ko iztok upada. To je lahko posledica povečanega deleža nove vode v matričnem toku.

Na podlagi spremembe izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ smo izvedli razdelitev hidrogramov za posamezna

vzorčna mesta. Ocenili smo delež nove vode v iztoku v nezasičeni coni. Kot vrednost izotopa $\delta^{18}\text{O}$ v vodi pred taljenjem snega smo privzeli vrednosti zadnjih meritev v februarju. Vrednost izotopa $\delta^{18}\text{O}$ v snegu -18.06% (16.3.2004) smo privzeli kot vstopni signal nove vode. Izračun deležev stare vode v iztoku smo podali v tabeli 4. V diagramu (slika 5) je prikazana tipična razdelitev s hidrogramom za vzorčno mesto JV-4. V obdelavi smo upoštevali podatke do 30.3.2004 ker je signal taljenja snega do tega dne jasen v vzorčni vodi (iztoku). Največji delež sveže vode smo zabeležili na vzorčnem mestu JV-1 (35 %), JV-2 (38 %), JV-3(23 %) in JV-4(38 %). Delež nove vode ima najdlje vpliv na vzorčno mesto JV-4. V vzorčnem mestu JV-5 se je povečal delež sveže vode in ostal konstanten. V JV-6 je delež nove vode dosegel največ 14 %. Največji deleži nove vode sovpadajo z vrhom $\delta^{18}\text{O}$ vrednosti 24.3.2004. Domnevamo na preferenčne tokove. Globlje od JV-6 sklepamo na batni efekt, ki poveča iztok vode v nezasičeni coni, ne prepoznamo pa značilnega povečanja deležev sveže vode. Izračun več kot 100 % stare vode v globljih delih lizimetra je posledica višjih vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v matričnem toku in ne vpliv sveže vode.



Sl. 5. Razdružitveni diagram za vzorčno mesto JV-4
Fig.5. Hydrographs separation for sampling point JV-4

Zaključki

Tok podzemne vode in transportni procesi v visokoprepustni prodni nezasičeni coni so kompleksni in se odvijajo drugače kot v vodonosnikih s fino granulacijo. Proučevanje ekstremnih dogodkov kot je taljenje snega, se je pokazalo za zelo primerno za študij toka in transportnih procesov v nezasičeni coni. Poleg preferenčnih tokov lahko na ta način proučujemo tudi obnavljanje in dinamiko matričnega toka.

Rezultati kažejo, da ima batni efekt pomembno vlogo tudi pri toku podzemne vode v nezasičeni coni prodnega vodonosnika. Povečan iztok v spodnjih delih lizimetra je posledica batnega efekta iz zgornjega dela nezasičene cone. Z nenadnim polnjenjem zgornjega dela nezasičene cone z vodo, v času ekstremnih dogodkov, nova voda povzroči pritisk in potisne staro vodo navzdol.

Na podlagi spremljanja vpliva taljenja snega v nezasičeni coni, smo prepoznali vpliv preferenčnih tokov v lizimetru do globine 2.4 m, na vzorčnih mestih JV-1, JV-2, JV-3, JV-4, JV-5 in JV-6. Na podlagi vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v iztoku nezasičene cone v času taljenja snega smo določili deleže sveže vode na posameznih vzorčnih mestih. V zgornjem delu lizimetra, do vzorčnega mesta JV-4 (1.5 m), dosega delež nove vode 38 % v iztoku, z globino pa delež nove vode pade na 5 %. Lahko sklepamo, da se z globino reducira vpliv preferenčnih tokov.

Rezultati kažejo, da lokalna struktura nezasičene cone pomembno vpliva na lastnosti toka podzemne vode v nezasičeni coni, še posebej na pojav preferenčnih tokov. Voda v preferenčnem toku količinsko ne pomeni značilnega napajalnega deleža v določenem času, ima pa preferenčen tok pomembno vlogo pri prenosu onesnaženja. Metoda razdružitve hidrogramov z uporabo stabilnih izotopov se je izkazala za primerno za oceno lastnosti dinamike vode v nezasičeni coni prodnega vodonosnika.

Zahvala

Predstavljene raziskave so bile opravljene v okviru projekta Urbana hidrogeologija – Vpliv infrastrukturnih objektov na podzemno vodo (Pr. št. L-1-6670-0215) in v okviru programa Podzemne vode in geoekologija, ki ju financira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

CLARK, I. & FRITZ, P. 2000: Environmental Isotopes in hydrogeology. 2nd edition. Lewis publishers (Boca Raton) 328 pp.

MALI, N. 1996: Določitev varstvenih območij in vodnih zalog podtalnice kvartarnega zasipa Selniške Dobrave. GeoZS (Ljubljana), 22 pp., 13 app.

MALI, N. & URBANC, J. 2006: Uporaba stabilnih izotopov za študij toka podzemne vode v nezasičeni coni prodnega vodonosnika Selniške Dobrave. Geologija (Ljubljana), 49/2: 371-381.

MALI, N. 2006: Characterization of transport processes in the unsaturated zone of a gravel aquifer by natural and artificial tracers. Doktorska naloga 96 pp, 24 app., Univerza v Novi Gorici.

MALI, N., JANŽA, M., RIKANOVIC, R., MARINKO, M., HERIČ, J., LEVIČNIK, L. & MOZETIČ, S. 2005: Raziskave Selniške Dobrave, Raziskovalna dela z določitvijo lokacij vodnjakov in ogroženosti vodnega vira na Selniški Dobravi. GeoZS (Ljubljana) 48 pp., 16 p.

SKLASH, M.G. & FARVOLDEN, R.N. 1982: The use of environmental isotopes in the study of high-runoff episodes in streams. In: Isotope studies of hydrologic processes. Perry E.C. Jr., Montgomery C.W. (Eds.). Northern Illinois University Press: 65-73, Dekalb, IL.

VAN DER HOVEN, S.J., SOLOMON, D.K. & MOLINE, G.R. 2002: Numerical simulation of unsaturated flow along preferential pathways: implications for the use of mass balance calculations for isotope storm hydrograph separation. Journal of Hydrology, 268: 214-233.