

Ocena dinamike prenikajoče vode skozi vadozno cono Postojnske jame na osnovi izotopskih značilnosti

Estimation of percolating water dynamics through the vadose zone of the Postojna cave on the basis of isotope composition

Janja KOGOVŠEK¹ & Janko URBANČ²

¹Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, Postojna, e-mail: kogovsek@zrc-sazu.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, Ljubljana e-mail: janko.urbanc@geo-zs.si

Ključne besede: kras, vadozna cona, naravna sledila, Postojnska jama
Key words: karst, vadose zone, natural tracers, Postojnska jama

Izvleček

V okviru spremljanja pretakanja vode in prenosa snovi skozi 100 m debelo vadozno cono na območju Postojnske jame so na površju potekale zvezne meritve padavin, v podzemlju pa zvezne meritve pretoka in fizikalno-kemijskih parametrov izbranih curkov. Občasno so bili vzorčevani tudi vzorci prenikajočih vod za analize izotopske sestave kisika v vodi. Uporabljen je bil eksponencialni model pretakanja podzemne vode, s pomočjo katerega smo ocenili zadrževalni čas vode v posameznih curkih. Modelirani zadrževalni časi podzemne vode znašajo od 2,5 meseca do več kot eno leto.

Abstract

Within the scope of monitoring water percolation through the 100-m thick vadose zone in the area of Postojnska jama continuous measurements of precipitation were carried out on the surface, and continuous measurements of water flow and physical and chemical parameters of selected water trickles were performed under the surface. Occasional samples of percolating waters were taken for the analysis of water oxygen isotope composition. An exponential model of groundwater flow was elaborated, by means of which the retention time of water in individual trickles was estimated. Modelled retention times of groundwater range from 2.5 months to over one year.

Uvod

Pretakanje skozi vadozno cono krasa je zelo kompleksno in je bilo tema že številnih raziskav: Mangin (1973), Williams (1983), Smart & Friederich (1986), Kogovšek & Habič (1980), Kogovšek (1981, 1987, 1997a, 1997b, 2000), Urbanč et al. (1990), Jeannin & Grasso (1995), Čenčur Curk (2002), Trček (2003), Kogovšek & Šebela (2004) in drugih.

V kraških jamah, kjer nam je omogočen dostop v vadozno cono, lahko podrobneje spremljamo dogajanje glede na padavine na

površju. Tako smo v Postojnski jami v Kristalnem rovu že v letu 1988 začeli s prvimi opazovanji prenikle vode 100 m pod površjem. Občasne meritve in kemijske analize (tudi do enkrat dnevno) niso dale dovolj informacij o dinamiki pretakanja, saj prihaja pri curkih in kapljanjih do različno hitrih reakcij na padavine na površju, do oblikovanja zelo različnih vodnih valov in pogosto do izostankov reakcij pretokov v jami glede na padavine.

Nekateri od curkov so bili onesnaženi zaradi vojaške dejavnosti na površju, ki se je odvijala do leta 1991. Občasne analize so

tekom let pokazale trend upadanja oz. zmanjševanja kontaminacije zaradi spiranja s padavinami (Kogovšek, 1997a). Dodatne informacije o pretakanju skozi vadozno cono so prispevali sledilni poskusi s fluorescentnimi sledili, prvi je bil izveden z zalivanjem z vodo ob injiciranju na skalno osnovo, drugi pa v razmerah, ko so sledilo spirale le padavine (Kogovšek, 2000; Kogovšek & Šebela, 2004), in tretji z aplikacijo sledila po površini tal in rastju.

Od leta 2003 potekajo nad jamo meritve padavin, v jami pa zvezne meritve temperature, specifične električne prevodnosti (SEP) in pretoka na treh značilnih curkih, medtem ko poteka zbiranje vzorcev vode za kemijske analize in analize fluorescentnih sledil z avtomatskimi zajemalniki. Z izotopskimi analizami kisika v vodi smo želeli pridobiti dodatne informacije o zadrževalnih časih podzemne vode v zaledju izbranih curkov.

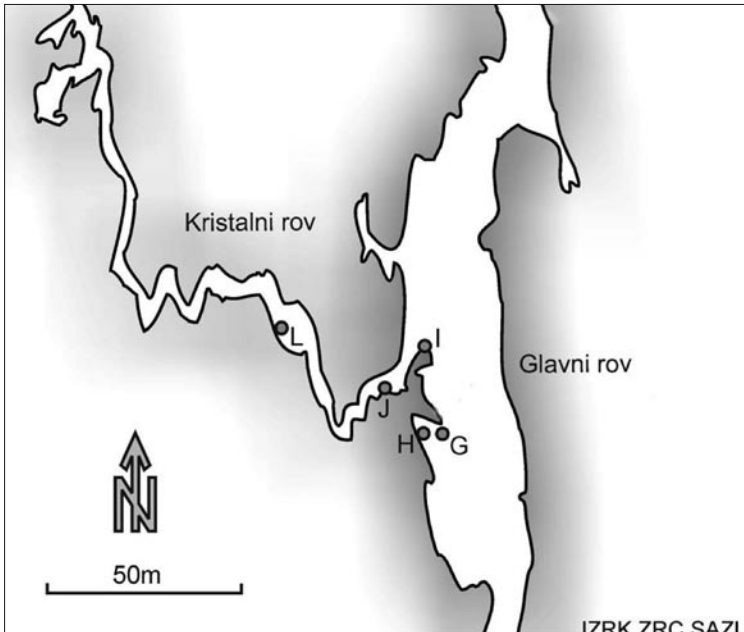
Metode

Na površju nad jamo so potekale meritve padavin z dežemerom HOBO Event Logger (sliki 1 in 3). Vzorčevanje mesečnih padavin za izotopske analize je potekalo z zbiralnikom, ki je sestavljen iz cevi s premerom 7 cm in posode za zbiranje vzorca, ki je bila nameščena pod zemljo in termično izolirana, tako da se vzorci niso pregrevali, niti zmr-



Slika 1. Merjenje padavin in zbiranje mesečnega vzorca za izotopske analize kisika.

Figure 1. Measuring of precipitation and the collection of monthly samples for oxygen isotope composition analyses.



Slika 2. Položaj opazovanih curkov I in J v Postojnski jami.

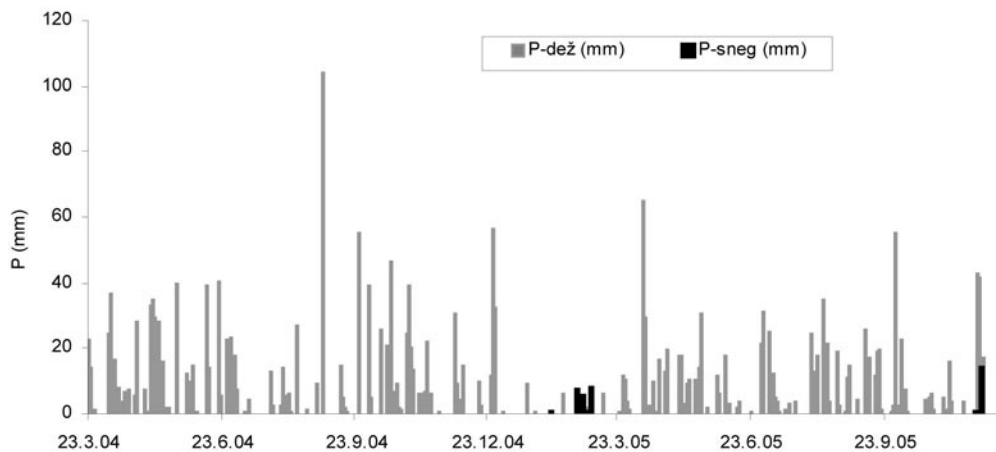
Figure 2. Location of observed trickles I and J in the Postojna cave.

zovali. Zajemali smo mesečne kompozitne vzorce. Ob odvzemu vzorca smo vsakokrat izmerili volumen mesečnega vzorca in količino primerjali z meritvami dežemera.

V Kristalnem rovu 100 m pod površjem smo vzorčevali manjši stalni curek J, za katerega so večletne meritve pokazale nihanje pretoka med 0,2 in 120 ml/min ter izdatnejši curek I s pretokom do prek 4000 ml/min (slika 2), ki pa občasno presahne (Kogovšek & Šebela, 2004). Zajem vzorcev za izotopske in kemijske analize je potekal z avtomatskima zajemalnikoma. Za izotopske analize smo izbrali trenutne vzorce obeh curkov 1-krat mesečno in sicer v upadajočem delu vodnih valov, ko je curek I dosegel pretok okoli 400 ml/min (slika 4) oziroma ko

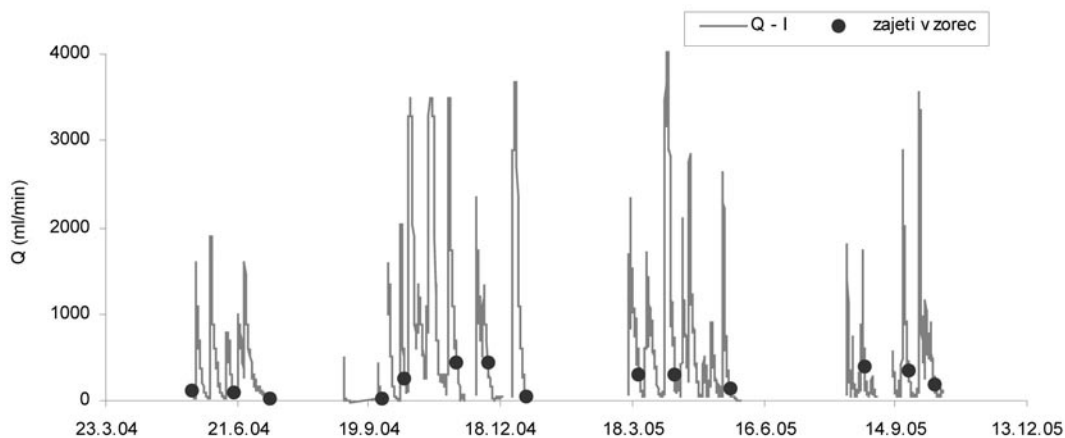
je curek J dosegal pretok okoli 20 ml/min (slika 5) in sicer v obdobju od maja 2004 do novembra 2005.

Z vzorčevanjem smo želeli ugotoviti izotopske značilnosti baznega toka v obeh curkih. Ker meritve pretokov, SEP in koncentracije injiciranega sledila na površju kažejo na večji delež padavinske vode v začetku vodnega vala, smo vzorce zajemali v pojemajočem delu vodnih valov, kjer že prične prevladovati komponenta baznega toka. Z izotopskimi analizami smo želeli dopolniti dolgoročne meritve pretokov ter fizikalnih in kemijskih parametrov prenikajoče vode skozi vadozno cono, ki potekajo na Inštitutu za raziskovanje krasa ZRC SAZU. Zvezne meritve na obeh curkih potekajo že od leta



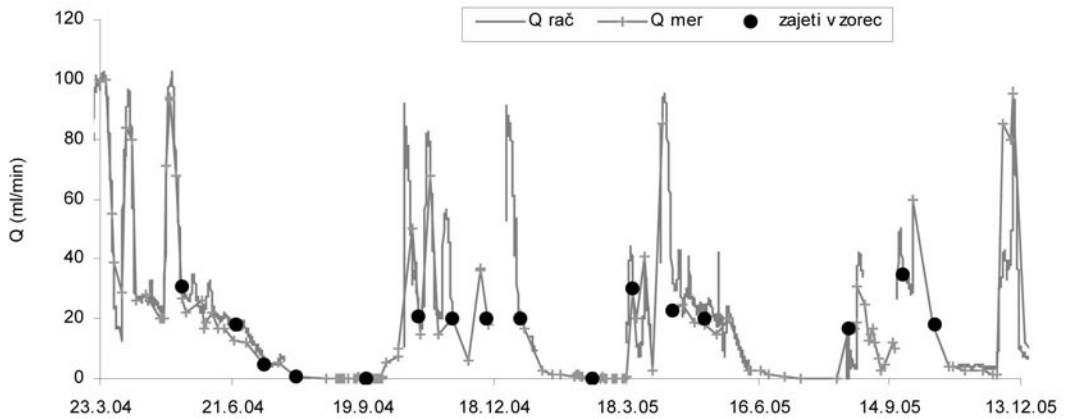
Slika 3. Padavine v obdobju vzorčenja padavin za izotopske analize kisika.

Figure 3. Precipitation during the period of precipitation sampling for oxygen isotope composition analyses.

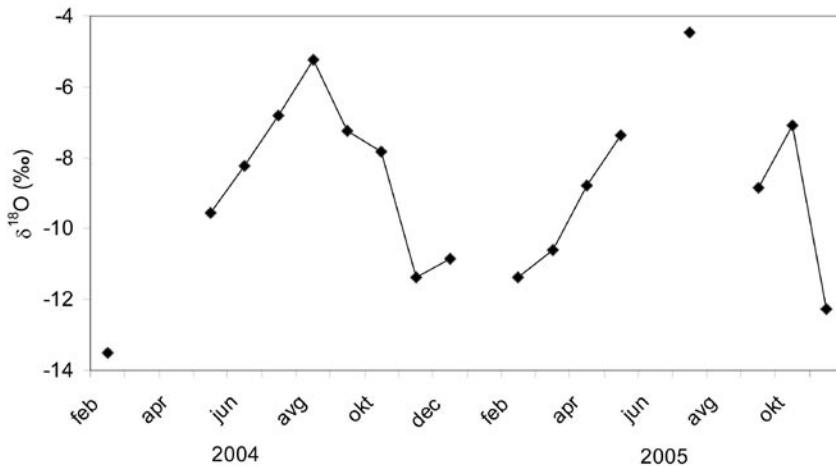


Slika 4. Hidrogram curka I za opazovano obdobje in odvzem vzorcev za izotopske analize.

Figure 4. Hydrograph of trickle I in the observed period and sampling for isotope analyses.



Slika 5. Hidrogram curka J za opazovano obdobje in odvzem vzorcev za izotopske analize.
Figure 5. Hydrograph of trickle J in the observed period and sampling for isotope analyses.



Slika 6. Izotopska sestava kisika padavin v opazovanem obdobju.

Figure 6. Oxygen isotope composition of precipitation in the observed period.

2002 oz. 2003 (15 minutni interval). Meritve pretoka, temperature in SEP se izvajajo s sondami, ki so opremljene z registratorji (na merilnem mestu J sonda Gealog S proizvajalca Logotronic in na merilnem mestu I sonda YSI v sklopu avtomatskega zajemalnika ISCO).

Izotopske analize so bile opravljene na inštitutu Joenneum Research v Gradcu.

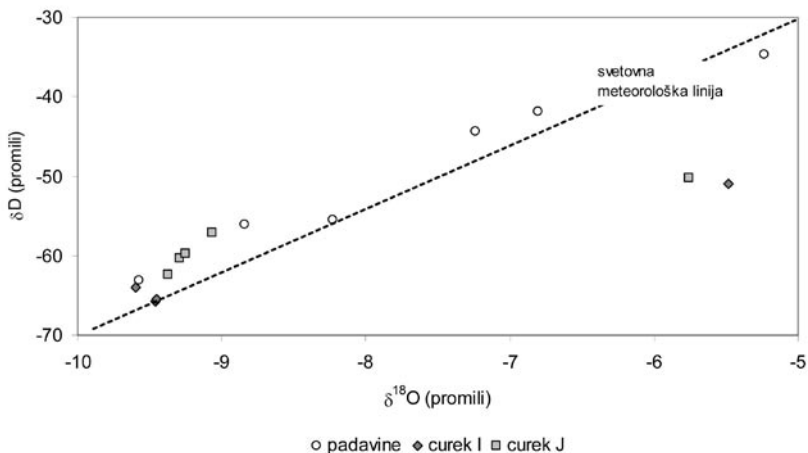
Rezultati

Padavine

Krivulja povprečne mesečne izotopske sestave padavin ima v opazovalnem obdobju približno obliko sinusoide (slika 6). Najbolj

pozitivne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ beležimo v poletnem obdobju, medtem ko najnižje vrednosti beležimo večinoma v zimskem obdobju. Povprečna izotopska sestava mesečnih padavin znaša -9‰ . V opazovalnem obdobju so imele padavine večinoma razpon med -5‰ in -12‰ , kar pomeni, da znaša amplituda izotopskega signala 7‰ .

V prvi seriji vzorcev v letu 2004 sta bila v padavinah in prenikajoči vodi analizirana izotopa ^{18}O in deuterij. Primerjava med obema parametroma je prikazana na sliki 7. Iz grafa je razvidno, da večina meritev leži blizu oziroma tik nad meteorno linijo. V tem pogledu predstavljata izjemo le vzorca prenikajoče vode odvzeta v poletnem času, pri katerih je očitno prišlo do premika vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v pozitivno smer zaradi izotopskega evaporacijskega efekta.



Slika 7.
Razmerje med
izotopsko sestavo
kisika in deuterija
v opazovanih vodah.

Figure 7.
Relation between
 ^{18}O and deuterium
isotope composition
in the observed
waters.

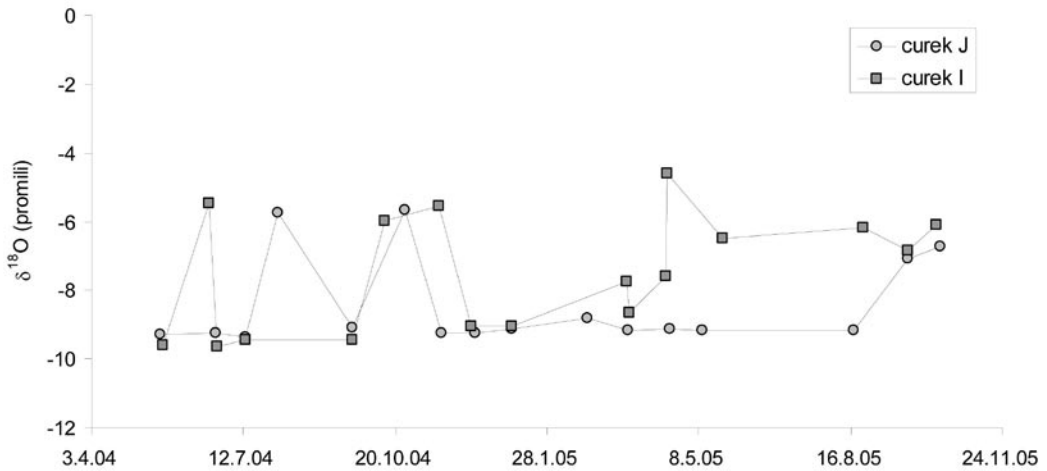
Prenikla voda curkov I in J

Izotopska sestava kisika v vodi obeh curkov je podana na sliki 8. Že na prvi pogled lahko opazimo povsem različne značilnosti krivulje sprememb izotopske sestave iztoka

v opazovalnem obdobju. Izotopska sestava kisika v vodi curka J se v celotnem obdobju razen v nekaj izjemnih primerih giblje nekoliko pod vrednostjo -9‰ , kar je praktično identično povprečni izotopski sestavi padavin na območju Postojnske jame. V curku

Tabela 1. Izotopske meritve ^{18}O mesečnih vzorcev padavin, vzorcev curkov I in J (v promilih).

Čas zajema	Padavine	curek I	curek J
maj 2004	-9,57	-9,60	-9,29
junij 2004	-8,23	-5,48; -9,62	-9,25
julij 2004	-6,80	-9,46	-9,37
avgust 2004	-5,23	curek je suh!	-5,76
september 2004	-7,24	-9,45	-9,07
oktober 2004	-7,84	-5,98	-5,68
november 2004	-11,37	-5,56	-9,24
december 2004	-10,86	-9,06	-9,24
januar 2005		-9,03	-9,11
januar + februar 2005	-11,37	curek je suh!	
marec 2005	-10,60	-7,74; -8,66	-9,15
april 2005	-8,77	-7,60; -4,62	-9,12
maj 2005	-7,37	-6,51	-9,17
maj + junij 2005	-4,47		
junij 2005		curek je suh!	Q_{\min}
julij 2005		curek je suh!	Q_{\min}
avgust 2005		-6,16	-9,18
september 2005	-8,86	-6,86	-7,07
oktober 2005	-7,09	-6,11	-6,74
november 2005	-12,28		



Slika 8. Izotopska sestava kisika curkov I in J.

Figure 8. Oxygen isotope composition of trickles I and J.

J razen v primerih izotopskega evaporacijskega efekta amplituda izotopskega signala ne presega niti 0,5 ‰ kar kaže na izrazito homogenizacijo padavinske vode v tej vodonosni strukturi.

V primerjavi s curkom J ima curek I povsem drugačne izotopske značilnosti. Amplituda izotopskega signala je izrazito večja in presega 4 ‰. Posebej v letu 2005 je v poletnem obdobju prišlo do izrazite obogatitve vode s težjim kisikovim izotopom oziroma do povečanja vrednosti $\delta^{18}\text{O}$. Takšni rezultati kažejo, da se ob posameznih padavinah v curku v mnogo večjem volumskem deležu pojavlja voda zadnjih padavin. Stopnja obnavljanja vode v vodonosni strukturi je torej mnogo večja, kar pomeni tudi bistveno manjšo povprečno starost vode.

Tudi meritve pretoka in letne bilance infiltriranih padavin ter iztekle vode skozi curke v prvem opazovalnem obdobju 2003/04 (23. 9. 03 do 31. 8. 04) ter drugem opazovalnem obdobju 2004/05 (1. 9. 04 do 12. 8. 05) so pokazale na občutne razlike med obema obdobjema. V obdobju 2004/05 je padlo namreč 1560 mm padavin, kar je 58 mm manj kot v predhodnem obdobju 2003/04, ter ob nekoliko večji evapotranspiraciji, kar je dodatno zmanjšalo količino infiltriranih padavin v tem obdobju (Kogovšek, 2007).

Meritve količine iztekle vode skozi curka I in J so pokazale, da je v obdobju 2004/05 skozi curka izteklo kar 40 % manj infiltrirane vode in da se je torej velik delež padavin porabil za zapolnjevanje zaledja curkov. To je razvidno tudi iz hidrogramov obeh cur-

kov (sliki 4 in 5), saj pretoki niso dosegali maksimalnih pretokov v predhodnem obdobju. Poleg skromnejših vodnih valov, je za obdobje od septembra 2004 do avgusta 2005 značilna tudi presušitev curka I ter minimalni pretoki curka J v obdobju od januarja do srede marca 2005.

Tudi zvezne meritve SEP in fluorescentnega sledila v curku I, ki je bilo injicirano na površju, so pokazale drugačne značilnosti kot v predhodnem obdobju. Vse to kaže na spremembe v režimu polnjenja oziroma praznjenja obeh curkov, kar bo v bodoče potrebno podrobneje pojasniti z dodatnimi raziskavami.

Pri curku I lahko opazimo še eno podrobnost, ki nam lahko nudi podrobnejši vpogled v mehanizem delovanja vodonosne strukture, ki napaja curek I. V poletnem obdobju leta 2005 (marec–oktober) je znašala povprečna izotopska sestava padavin – 7,5 ‰, medtem ko se je izotopska sestava vode v curku I dvignila kar na – 6,1 ‰, torej je v curku prišlo do še večje obogatitve s težjim kisikovim izotopom ^{18}O kot v padavinah.

Izrazito obogatitev izotopske sestave kisika v curku I si razlagamo s separacijo padavinske vode ob padavinskem valu: očitno imajo na vodonosno strukturo večji vpliv začetne padavine, ki so običajno bolj obogatene s težjim kisikovim izotopom ^{18}O in manjši vpliv nadaljnje padavine, v katerih je postopoma vse manj težjega kisikovega izotopa. Dopuščamo tudi možnost, da je v drugem delu padavinskega vala vodonos-

sna struktura povsem zapolnjena z vodo, tako da ta padavinska voda odteče mimo strukture po drugih poteh. To je skladno z meritvami pretoka jeseni 2004, saj smo ugotavljali, da je pretok ko se približuje vrednosti okoli 4000 ml/min maksimiran, in da v hidrogramu manjkajo vrhovi vodnih valov, iz česar smo sklepali, da prihaja do odtoka vode mimo curka I. Bolj pozitivne vrednosti izotopske sestave prenikle vode smo beležili tudi v času skromnejših vodnih valov z maksimalnimi pretoki pod 3000 ml/min, ki sledijo manj izdatnim in intenzivnim padavinam.

Modeliranje zadrževalnega časa prenikajoče vode

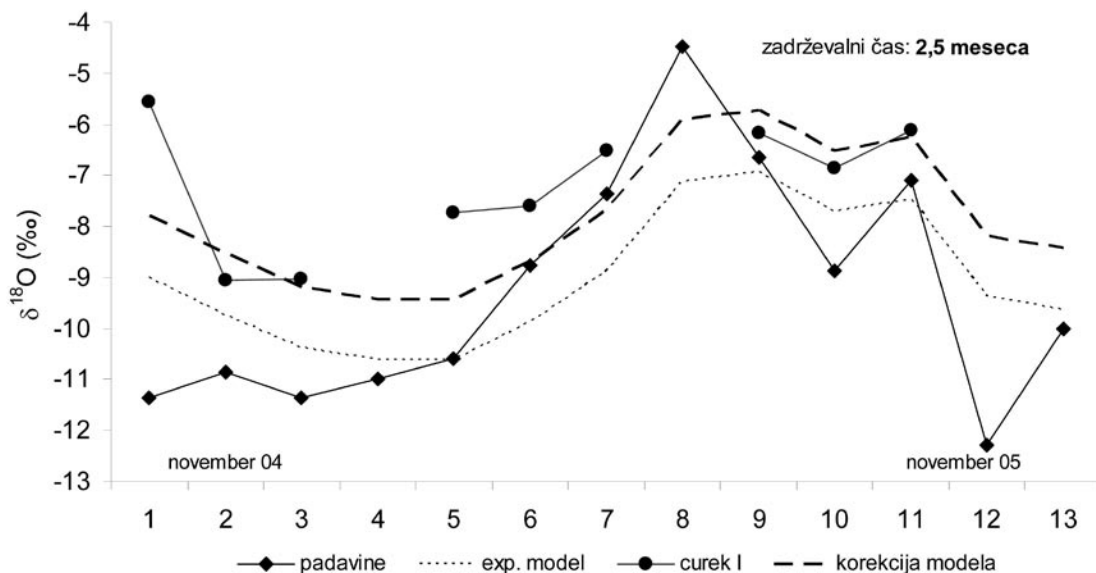
Vhodni parameter pri modeliranju zadrževalnega časa baznega toka vode v curkih iz Postojnske jame je bila časovna serija podatkov o izotopski sestavi padavin nad jamo. Modelirani padavinski izotopski signal smo primerjali z izotopsko sestavo iztoka, to je curkov v jami.

Za modeliranje zadrževalnega časa je bil uporabljen eksponencialni model oziroma model popolnega mešanja (Maloszewski & Zuber, 1982). Pri eksponencialnem modelu

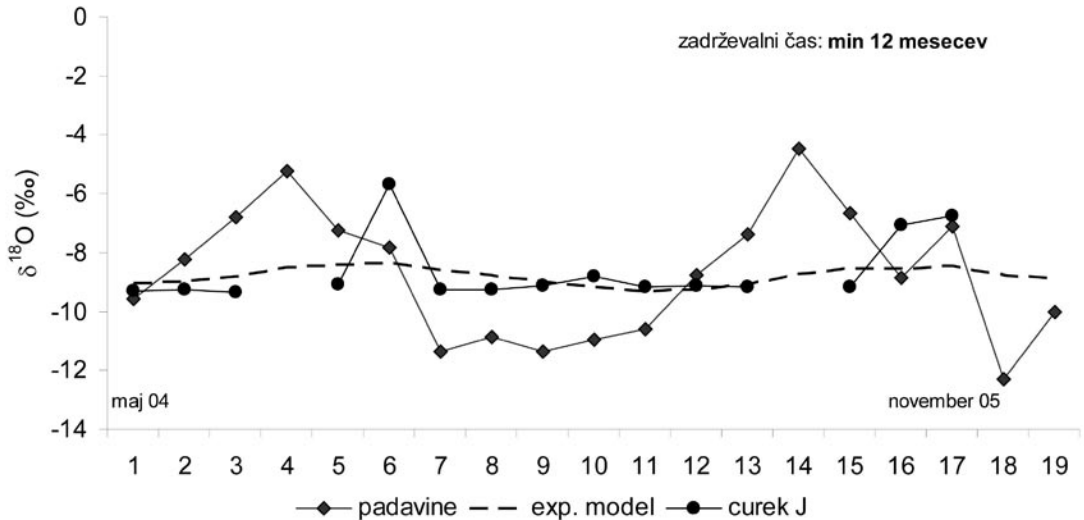
privzamemo, da se vhodna voda popolnoma zmeša z vodo v vodonosni strukturi. Vhodni izotopski signal na izhodu iz sistema izteka v obliki eksponencialne krivulje, katere oblika je odvisna od zadrževalnega časa vode v sistemu. Čim večji je zadrževalni čas, tem počasnejše je upadanje krivulje, ki jo imenujemo tudi porazdelitvena funkcija (distribution function, weighting function).

Pri curku I (slika 9) iz Postojnske jame znaša modelirani zadrževalni čas vode okoli 2,5 meseca. Gre torej za dokaj hitro pretočni sistem, kar se odraža tudi v precejšnjem nihanju izotopske sestave kisika v vodnem curku.

Pri curku J zaradi velikega dušenja oziroma zelo majhne amplitude izotopskega signala le-tega nismo mogli modelirati s primerjavo oblike izhodnega ter modeliranega padavinskega signala, ampak smo iz amplitude izhodnega signala ocenili, da znaša zadrževalni čas podzemne vode v tem curku najmanj 12 mesecev, seveda pa je lahko še občutno daljši (slika 10). V tem primeru odmikov od homogenizirane krivulje nismo obravnavali kot resnični izotopski signal, ampak jih pripisujemo vplivu direktne padavinske vode, ki se je ob določenih meteoroloških pogojih mešala z vodo baznega toka.



Slika 9. Eksponencialni model dinamike vode v curku I
Figure 9. Exponential model of water dynamics in trickle I



Slika 10. Eksponencialni model dinamike vode v curku J
Figure 10. Exponential model of water dynamics in trickle J

Zaključki

Krivulja povprečne mesečne izotopske sestave padavin ima v opazovalnem obdobju približno obliko sinusoide z minimalnimi vrednostmi v zimskem času ter najbolj pozitivnimi vrednostmi v poletnih obdobjih. Povprečna izotopska sestava mesečnih padavin znaša -9‰ , vrednosti pa so nihale med -5‰ in -12‰ .

Izotopska sestava kisika v vodi curka J se v celotnem obdobju razen nekaj izjemnih primerov giblje nekoliko pod vrednostjo -9‰ , kar je praktično identično povprečni izotopski sestavi padavin. Ocenjeni povprečni zadrževalni čas znaša najmanj 1 leto, kar kaže na izrazito homogenizacijo izotopske sestave padavinske vode v tej vodonosni strukturi, kar potrjujejo tudi meritve temperature in specifične električne prevodnosti (SEP).

Amplituda izotopskega signala curka I je večja in presega 4‰ . Posebej v letu 2005 je v poletnem obdobju prišlo do izrazite obogatitve vode s težjim kisikovim izotopom oziroma do povečanja vrednosti $\delta^{18}\text{O}$. Takšni rezultati kažejo, da se ob posameznem padavinskem valu v curku pojavlja voda zadnjih padavin v izrazito večjem volumskem deležu. Stopnja obnavljanja vode v vodonosni strukturi je torej mnogo večja, kar pomeni tudi manjšo povprečno starost vode, le 2,5 meseca. To sovпада z manjšimi nihanji temperature ter z izrazitejšimi znižanji SEP na višku padavinskih valov.

Obogatitev s težjim kisikovim izotopom ^{18}O v primerjavi s padavinami v poletnem obdobju leta 2005 si razlagamo s separacijo padavinske vode v padavinskem valu, ki imajo na vodonosno strukturo večji vpliv začetne padavine, ki so običajno bolj obogatene s težjim kisikovim izotopom ^{18}O . Dopusčamo možnost, da je v drugem delu padavinskega vala vodonosna struktura večinoma zapolnjena z vodo, tako da padavinska voda odteče mimo strukture po drugih poteh.

Estimation of percolating water dynamics through the vadose zone of the Postojna cave on the basis of isotope composition

Summary

A detailed research of precipitation flow through the 100-m thick vadose zone of Postojna jama included the measurement of two trickles of water in the cave: the smaller constant trickle J with a flow from 0.2 to 120 ml/min and the bigger intermittent trickle I with a maximum flow of over 4000 ml/min. Continuous measurements of flow, physical parameters and precipitation on the surface above the cave were performed. Momentary samples of trickles in the cave were taken by automatic samplers.

They were taken in the decreasing sector of the hydrograph. Monthly precipitation samples for isotope analysis were taken by a sample collector with its tank placed under the soil and isolated to prevent the samples from getting warm.

The graph of average monthly isotope composition of precipitation is a relatively correct sinusoidal curve. The most positive $\delta^{18}\text{O}$ values are found in the summer period, while the isotope composition curve reaches its minimum during the winter. The average isotope composition of monthly precipitation is -9% . During the observation period, precipitation values mostly ranged between -5% and -12% .

The oxygen isotope composition of water from stream J has, except in some cases, values slightly under -9% over the entire observation period, which is practically identical with the average isotope composition of precipitation. Except in some cases, the amplitude of the isotope signal does not exceed $0,5\%$. This indicates a highly homogeneous isotope composition of precipitation water in this aquifer. This is evident also from temperature measurements, since no changes are recorded precipitation events, and the specific electrical conductivity shows lesser continuous changes.

The amplitude of the isotope signal of trickle I is larger and exceeds 4% . Especially in 2005 during the summer period the water was highly enriched in the heavier oxygen isotope, i.e. the $\delta^{18}\text{O}$ value was increased. These results show that during individual precipitation events the trickle contains a much larger volume share of water from the latest precipitation. Consequently the rate of water replenishment in the aquifer is much higher, resulting in a markedly lower average age of water. The temperature of trickle I during precipitation events in the spring fluctuates from 0.2 to $0.3\text{ }^\circ\text{C}$. Each increase in flow during the precipitation events results in a simultaneous decrease in specific electrical conductivity, which is in agreement with isotope analyses results.

During the summer of 2005, trickle I showed an enrichment in ^{18}O compared to precipitation. This can be explained by the separation of precipitation water in the precipitation event: initial precipitation, usually enriched in ^{18}O , has a stronger impact on the water bearing structure, and further precipitation with decreasing values of the

heavier oxygen isotope has a lesser impact. It is possible that the water bearing structure is mostly filled up with water during the second part of the precipitation event, so that this precipitation flows by this structure along other paths.

Literatura

Čenčur, B. 2002: Tok in prenos snovi v kamnini s kraško in razpoklinsko poroznostjo. Doktorska disertacija. 253 pp, Univerza v Ljubljani.

Jeannin, P-Y & A. D. Grasso, 1995: Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. - Bulletin d'Hydrologie, 14, 95-111, Neuchatel.

Kogovšek, J. & Habič, P. 1980: Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. - Acta carsol., (1981), 9, 129-148, Ljubljana.

Kogovšek, J. 1981: Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. - Acta carsol., 10, 110-125, Ljubljana.

Kogovšek, J. 1987: Naravno čiščenje sanitarnih odpadkov pri vertikalnem prenikanju v Pivki jami = Natural purifications of sanitary sewage during the vertical percolation in Pivka jama. - Acta carsol., 16, 121-139, Ljubljana.

Kogovšek, J. 1997a: Water tracing tests in vadose zone. V: KRANJČ, Andrej (ur.). Tracer hydrology 97 : proceedings of the 7th International Symposium on Water Tracing, Portorož, Slovenia, 26-31 May 1997. Rotterdam: A. A. Balkema, 167-172.

Kogovšek, J. 1997b: Pollution transport in the vadose zone. V: GÜNAY, Gültekin (ur.), JOHN-SON, A. Ivan (ur.), TEZCAN, Levent (ur.), ATIL-LA, A. Özlem (ur.). Karst waters & environmental impacts : proceedings. Rotterdam; Brookfield: A. A. Balkema, 161-165.

Kogovšek, J. 2000: Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. - Ann, Ser. hist. nat., 10, 133-142, Koper.

Kogovšek, J. 2007: Ugotavljanje dinamike pretakanja padavin skozi vadozno cono kraska na osnovi meritev pretoka. - Acta carsologica, 36/2, 245-253, Ljubljana.

Kogovšek, J. & Šebela, S. 2004: Water tracing through the vadose zone above Postojnska Jama, Slovenia. - Environ. geol. 45/7, 992-1001, Berlin.

Maloszewski, P. & Zuber, A. 1982: Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers - 1. Models and their applicability. - Journal of Hydrology, 57, 207-231.

Mangin, A. 1973: Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. Proc. of the 6th Inter. - Cong. of Speleology, Olomuc, 4, 157-162.

Smart, P.L. & Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: Proceedings of the Conference on environmental problems of karst terranes and their solutions, National Water Well Association, 59-87, Dublin.

Trček, B. 2003: Epikarst zone and the karst aquifer behaviour. A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. Geološki zavod Slovenije, 100 pp, Ljubljana.

Urbanc, J., Kogovšek, J. & Pezdič, J. 1990: Izotopska sestava kisika in ogljika v vodi

iz Taborske jame. – *Acta carsologica*, 19, 157–163.

Williams, P. W. 1983: The role of the sub-cutaneous zone in karst hydrology. – *Journal of Hydrol.*, 61, 45–67, Amsterdam.