

Hidrogeologija Vetrovne jame v vodonosniku severno od Planinskega polja

Hydrogeology of the cave Vetrovna jama in karst aquifer north from Planinsko polje (Notranjska region, central Slovenia)

Janez TURK & Franci GABROVŠEK

Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija; e-mail: janez.turk@zrc-sazu.si; gabrovsek@zrc-sazu.si

Prejeto / Received 11. 11. 2008; Sprejeto / Accepted 12. 2. 2009

Ključne besede: Vetrovna jama, Slavendolski prelom, udornice, Laška kukava, Gradišnica, kraški vodonosnik, Planinsko polje, podzemna Unica, Slovenija

Key words: Vetrovna jama cave, Slavendol fault, collapse doline, Laška kukava, Gradišnica cave, karst aquifer, Planinsko polje, underground Unica river, Slovenia

Izvleček

V Vetrovni jami smo eno leto merili nivo in temperaturo podzemne vode, da bi ugotavljali njen izvor in hidravlične značilnosti pretakanja. Jama se nahaja le 2,7 km severno od Planinskega polja in jo napaja reka Unica. Proti pričakovanju v njej nismo neposredno zaznali podzemnega toka, ki priteka iz požiralnikov na dnu Cerkniškega jezera. Hidrograme iz Vetrovne jame smo primerjali s hidrogrami v nekaterih drugih jamah v istem vodonosniku. Hidrogrami iz Vetrovne jame so le deloma primerljivi s hidrogrami v ostalih jamah, korelacija ni statistično značilna. Na podlagi tega in še nekaterih drugih dejstev smo sklepali, da je pretakanje med »vzhodnim« in »zahodnim« delom vodonosnika severno od Planinskega polja omejeno. Odtokanje vode iz Vetrovne jame je močno odvisno tudi od lokalnih hidrogeoloških preprek, kot je podor pod udornico Laška kukava.

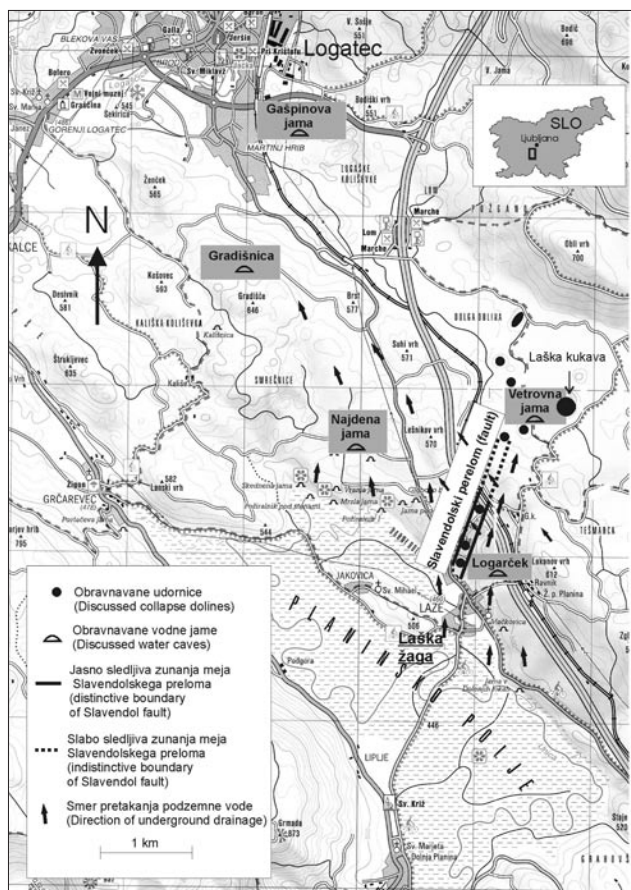
Abstract

For one year we have been measuring level and temperature of underground water in Vetrovna jama, to find out the origin of underground water and hydraulic characteristics of the cave and karst aquifer north east of Planinsko polje (karst of Notranjska region, central Slovenia). Similar parameters as in Vetrovna jama were measured also at the Unica River and at the Cerknica Lake. Cave is located only 2.7 km north from the polje and is fed by the Unica River, according to measurements. But in contrast with our expectations, we did not directly detect underground water flow, which drains from the Cerknica Lake. Hydrographs measured in Vetrovna jama were compared with those measured in some other caves within the aquifer. Hydrographs from Vetrovna jama are only partly comparable with hydrographs obtained in other monitored caves, as comparison shows no statistical significant correlation. Final conclusion would be that drainage of water between "eastern" and "western" part of karst aquifer is limited. Moreover, outflow from Vetrovna jama strongly depends on local hydrogeological restriction, such as supposed rockfall under Laška kukava collapse doline.

Uvod

Vetrovna jama se nahaja na območju Laškega ravnika, SV od Planinskega polja, v neposredni bližini velike udornice Laška kukava. Jama je zelo pomembna s hidrogeološkega vidika, kar je predvsem posledica njene lege. Gre za najbolj vzhodno izmed maloštevilnih znanih vodnih jam na raziskanem območju (sl. 1). Skupaj z Gradišnico in Gašpinovo jamo spada med tri znane vodne jame, ki so relativno oddaljene od obrobja Planinskega polja. Zračna razdalja med severovzhodnim robom polja in Vetrovno jamo znaša slabe tri ki-

lometre. Voda iz jame odteka pod udornico Laška kukava, ki je ena največjih udornic na Notranjskem krasu (sl. 2). Zaradi svojstvene lege in predvsem nekaterih hidrogeoloških posebnosti smo se odločili, da Vetrovni jami posvetimo posebno obravnavo. Raziskave so sicer istočasno potekale tudi v Gradišnici in Gašpinovi jami (TURK, 2008) ter v Najdeni jami. Vse omenjene jame in celotno obravnavano območje Ravnika pripadajo kraškemu porečju Ljubljani, ki obsega površinske in podzemne vode od Babnega polja in Pivške kotline na jugu, do roba Ljubljanskega barja na severu.



Slika 1. Zemljevid območja s položajem raziskanih vodnih, kraških jam. Vir: Izletniška karta Notranjski kras 1 : 50 000, Geodetski zavod Slovenije.

Figure 1. Geographical map of studied area with discussed investigated water caves.

Namen hidrogeoloških raziskav v Vetrovni in ostalih treh jamah je bil preučiti hidrogeološke in hidravlične značilnosti vodonosnika vzdolž Planinskega polja. V prispevku poskušamo razložiti nekatere hidrogeološke odvisnosti med Vetrovno jamo in ostalimi tremi jamami zahodno od nje (Najdeno jamo, Gradišnico in Gašpinovo jamo, sl. 1). Želeli smo tudi potrditi napajanje Vetrovne jame z Unico in preveriti morebitno napajanje oziroma interakcijo s podzemno vodo, ki prihaja iz Cerkniškega jezera.

Opis sistema in predhodne raziskave

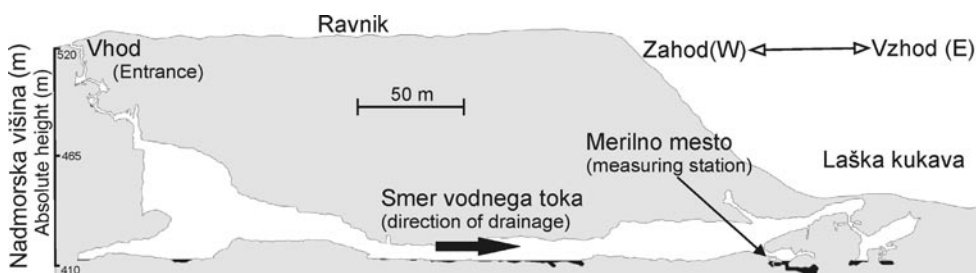
Širše območje Ravnika, na katerega je vezana Vetrovna jama, gradijo dobro zakraseli apnenci in dolomiti kredne starosti, v katerih prevladuje kanalska poroznost (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Ti v

smeri proti Ljubljanskemu barju oziroma izvirom Ljubljanice prehajajo v apnence in dolomite jurske starosti. Celotno območje pripada monoklinali z vpadom plasti 25° do 30° proti zahodu (PLENIČAR et al., 1970).

Območje je bilo velikokrat predmet raziskovalnega dela, katerega glavni namen je bil ugotavljanje podzemnega pretakanja vode oziroma vpliva geoloških struktur na hidrogeologijo. ČAR (1982) je z geološkim kartiranjem ugotovil, da so kamnine med obrobjem Planinskega polja in Ravnikom tektonsko dobro pretrte. Požiralniki na obrobju polja, v katere ponika površinska Unica, so genetsko povezani s prelomnimi conami in plastovitostjo karbonatov. Podzemne vodne poti potekajo bodisi skozi lezike v plastnatem krednem apnencu, bodisi skozi porušene ter razpoklinske cone, ki potekajo večinoma proti SV. Ob teh dobro prevodnih strukturah so nastali požiralniki, ki se nahajajo na vzhodnem območju Planinskega polja, JV od Laz (kot so Ribce, Žrnki, Milavčevi ključi in Dolenje Loke). Vsi ti požiralniki so potencialno pomembni za napajanje Vetrovne jame, saj se voda iz Unice, ki ponika vanje, skozi Ravnik pretaka proti izvirom Ljubljanice na severu. To je dokazal kombiniran sledilni poskus v letih 1972–1975 (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Dokazane so bile zveze z izviri Lubije, Velike Ljubljanice in Bistre, vsi ti potoki se na Ljubljanskem barju združijo v reko Ljubljanico.

S tezo, da je pretakanje podzemne vode skozi Ravnik pogojeno predvsem tektonsko, se strinja tudi ŠUŠTERŠIČ (2002). Določil je dve smeri prelomov (SV–JZ in SZ–JV). Prelomi s 100 m ali več širokimi zdrobljenimi conami naj bi predstavljali hidrogeološke prepreke, ki pomembno vplivajo na pretakanje vode v vodonosniku. Po mnenju ŠUŠTERŠIČA in sodelavcev (2001) je relativno raven niz udornic med Slaven in Voden dolom vezan na takšno zdrobljeno cono, ki so jo poimenovali Slavendolski prelom. Ta zdrobljena cona naj ne bi dovoljevala nastanka večjih prečnih kraških kanalov. Unica, ki ponika vzhodno od nje, naj bi se torej generalno pretakala ob njej, v smeri proti severu. Tej domnevi v prid govori tudi lega vodne jame Logarček, ki se je izoblikovala vzhodno od Slavendolskega preloma. Njeni rovi generalno potekajo vzporedno s prelomno cono (ŠUŠTERŠIČ et al., 2001). Vendar pa ŠUŠTERŠIČ (2002) hkrati meni, da je stičišče dveh zdrobljenih con dobro hidrogeološko prevodno. Vetrovna jama naj bi ležala v neposredni bližini takšnega stičišča, od koder bi po tej hipotezi lahko v jamo pritekala podzemna Unica.

V vodonosnik ob Planinskem polju in posledično v Vetrovno jamo zagotovo priteka tudi voda iz



Slika 2. Prerez Vetrovne jame z označeno lokacijo merilne postaje. Avtor načrta je Miran Nagode.

Figure 2. Longitudinal cross section of Vetrovna jama with measuring station marked. Author of the sketch is Miran Nagode.

drugih virov, vendar predstavlja Unica poglavitni dotok. Skupna prevodna sposobnost požiralnikov JV od Laz je omejena na 20 m³/s (BREZNIK, 1998), sposobna je odvesti le nizke in večino srednjih voda Unice (ŠUŠTERŠIČ, 2002). Ob visokih vodah pa pomemben del Unice nadaljuje svojo pot proti končnim požiralnikom na severu polja (sl. 1).

Ostala znana vodna vira, ki pritekata v vodonosnik, sta avtogeni dotok preko dobro prepustnega površja Ravnika in podzemni tok, ki se napaja iz Cerkniškega jezera. Vendar o razporeditvi podzemnega toka iz Cerkniškega jezera, katerega maksimalni pretoki so bili ocenjeni na 6 m³/s glede na prevodno sposobnost požiralnikov (GAMS & HABIČ, 1987), do sedaj ni bilo resnejše znanstvene razprave. Sklepajo, da se ta tok pretaka skozi jurske apnenice in dolomite (v katere tudi ponika) in da doseže boljše zakrasele kredne kamnine Ravnika šele nizvodno od Vetrovne jame (KRIVIC et al., 1976). Sledilni poizkus je pokazal, da ta tok napaja predvsem izvire Bistre in deloma Velike Ljubljaničnice ter Lubije (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976).

V obravnavanem območju je mikrolokacija Vetrovne jame vezana na območje udornic, ki so razmeroma pogost pojav na Ravniku. Jama je z udornicami obkrožena kar s treh strani. Na odtočni strani se pojavlja ena večjih udornic na Notranjskem krasu, Laška kukava. Njena globina znaša blizu 100 m, volumen pa ji je ŠUŠTERŠIČ (2000) ocenil na 4,17 milijonov kubičnih metrov.

Nastanek udornic na območju Ravnika so prvotno razlagali s hidrogeološkimi procesi oziroma s pretakanjem podzemne vode (MICHLER, 1954–1955). Novejša dognanja pa kažejo, da določene udornice (kot tiste med Slaven in Voden dolom) niso vezane zgolj na hidrogeološke procese, pač je na njihov nastanek vsaj posredno pripomogla tudi tektonska dejavnost (ŠUŠTERŠIČ, 2002). Udornice so posledica podiranja nad jamskimi prostori ali postopnega odnašanja kamnine nad aktivnimi jamskimi rovi (PALMER & PALMER, 2006; STEPIŠNIK, 2006). Intenziteta podiranja oz. poglobljanja je večja tam, kjer je debelina stropa manjša, oziroma je dno udornice razmeroma blizu kanalskim prevodnikom. Dno Laške kukave se nahaja le nekaj metrov nad stropom skrajno znanih nizvodnih delov Vetrovne jame, torej verjetnost podora tod obstaja (sl. 2).

V kolikor relativno velik podor zapre vodno pot aktivnemu jamskemu sistemu, ločimo več hidrogeoloških razvojnih faz. Voda si sprva skuša utreti pot skozi porozni, podorni material, sčasoma raztaplja in odnaša material (predvsem ob poplavnih sunkih), v primeru nadaljnjega podiranja pa si utre novo vodno pot, ki se izogne podoru (PALMER & PALMER, 2006; XUWEN & WEIHAI, 2006; ŠEBELA, 1998). Kateri razvojni fazi pripada pretakanje vode iz Vetrovne jame pod Laško kukavo (če sploh kateri) je zaenkrat še neznano, saj freatična zanka pod Laško kukavo še ni bila raziskana.

Metodologija

Naša raziskava temelji na zveznem merjenju vodnih nivojev in temperature podzemne vode. Za

potrebe hidrogeoloških raziskav na slovenskem krasu uporabljamo avtomatične merilce imenovane »Diver-ji«, ki v izbranem časovnem intervalu merijo in beležijo tlak in temperaturo vode (GABROVŠEK & PERIC, 2006; TURK, 2008). Časovni interval meritve smo nastavili na pol ure. Merilec smo v Vetrovni jami namestili v odtočno jezero pod Laško kukavo, na absolutni nadmorski višini 410 m (sl. 2).

Zvezno smo merili vodni nivo ter temperaturo podzemne in površinske vode. Meritve v Vetrovni jami so potekale v dveh fazah, in sicer v obdobju junij 2006 – januar 2007, ter med aprilom in decembrom 2007. V prvem obdobju smo hkrati merili tudi pretoke in temperaturo Unice pri Starem gradu, ki se nahaja pred prvim pomembnim požiralnikom. V drugem obdobju smo poleg parametrov Unice merili še nihanje vodnega nivoja in temperaturo Cerkniškega jezera (v požiralniku »Rešeta«). Skoraj ves čas smo merili hidrogeološke parametre tudi v Gradišnici, Gašpinovi jami in Najdeni jami (sl. 1). Vse izmerjene parametre smo primerjali med seboj.

Rezultati

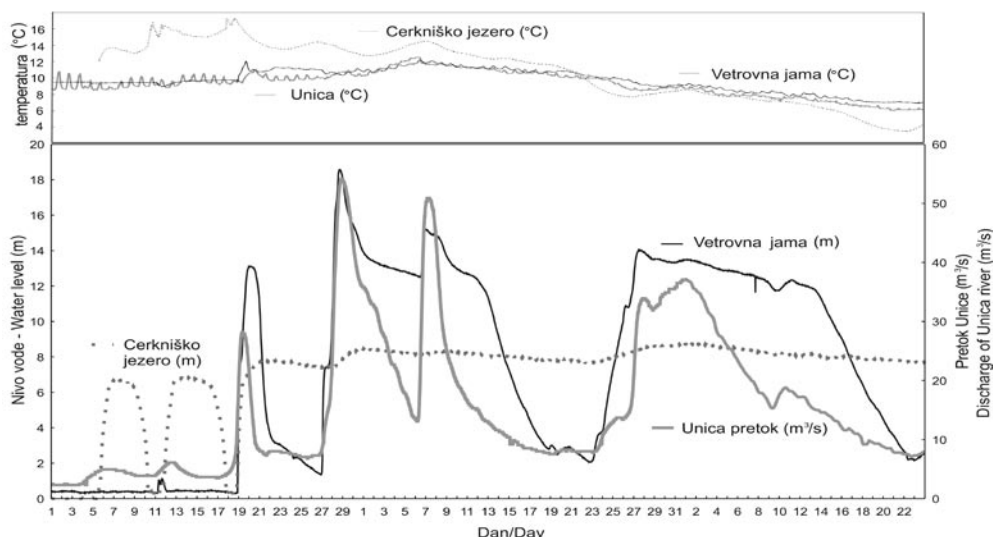
Površinski izvor vode, ki doteka v Vetrovno jamo smo preverjali na dveh območjih: Unici na Planinskem polju in na Cerkniškem jezeru. Prva vodna zveza bi bila logična navezava na predhodna dognanja (GOSPODARIČ & HABIČ 1976; KRIVIC et al., 1976), medtem ko je bila druga vodna zveza velika neznanka.

Napajanja z jezersko vodo nismo neposredno zaznali, saj primerjava nivojskih hidrogramov iz Cerkniškega jezera in iz Vetrovne jame ni pokazala jasne medsebojne povezave (sl. 3, $r = 0,60$). Podobno velja tudi za temperaturno primerjavo, ki kaže določene podobnosti, vendar so te bolj posledica regionalnih klimatskih razmer. Povezava s Cerkniškim jezerom torej ostaja nepojasnjena.

Zveza med pretočno krivuljo Unice in nivojskim hidrogramom v Vetrovni jami je pričakovano statistično značilna (sl. 3, $r = 0,85$). Da pripada podzemna voda, ki se pretaka skozi jamo, resnično Unici, dokazujejo tudi dnevna temperaturna nihanja značilna za površinske vodotoke. Nihanja so popolnoma enaka kot pri Unici (sl. 3).

Primerjava nivojskih hidrogramov iz Vetrovne jame in Gradišnice kaže, da se poplavna voda pri vseh izrazitejših poplavnih sunkih dalj časa zadržuje v Vetrovni jami (sl. 4). Vodna gladina v Gradišnici, kot tudi v Gašpinovi in Najdeni jami upada razmeroma hitreje. Upadanje je dobro usklajeno z upadanjem pretoka površinske Unice, medtem ko upadanje vodnih nivojev v Vetrovni jami na določenih odsekih ne kaže neposredne povezave s površinskim pretokom Unice in je izrazito upočasnjeno. Posledično primerjava hidrogramov med Vetrovno in ostalimi jamami ne kaže nikakršne medsebojne povezanosti, vsaj v fazi upadanja ne. V članku so prikazane le primerjave z Gradišnico.

Znano je, da Unica vstopa v Vetrovno jamo prek požiralnikov na vzhodnem obrobju polja, JV od Laz, (sl. 1). Hidrogeološki odziv jame na poplavne sunke Unice smo v grobem razdelili na dva dela.



Slika 3. Hidrogrami Cerkniskega jezera, reke Unice in Vetrovne jame v obdobju med 1.9. in 24. 12. 2007.

Figure 3. Hydrographs of the Cerknika lake, the Unica river and the Vetrovna jama in period between September 1st and December 24th, 2007.

Delitev temelji na velikostnem redu (maksimalnem pretoku) poplavnih sunkov površinske Unice, ki v celoti ali deloma vstopajo v vzhodno skupino požiralnikov.

1. Veliki poplavni sunki ustrezajo tistim površinskim pretokom Unice, ki so večji od 30 m³/s. Prehajanje vseh takšnih relativno velikih poplavnih sunkov skozi Vetrovno jamo je ovirano, zaradi česar pride do daljšega zadrževanja poplavne vode v jami. V vseh primerih na hidrogramu opazujemo značilen vzorec: relativno počasno upadanje nivoja podzemne vode med točno določenima relativnima višinama, zaradi česar je Vetrovna jama zalita s poplavno vodo dalj časa v primerjavi s tremi obravnavanimi jamami zahodno od nje. Takšen vzorec smo v Vetrovni jami opazovali pri vseh štirih velikih poplavnih sunkih (oziroma šestih če zanemarimo delno prekrivanje nekaterih sunkov). Povečano prikazan je primer iz konca septembra oziroma oktobra 2007 (sl. 5).
2. Relativno majhni poplavni sunki ustrezajo pretokom površinske Unice, ki ne presegajo 25 m³/s oziroma 30 m³/s. Majhni poplavni sunki bodisi hitro in razmeroma neovirano preidejo skozi Vetrovno jamo (6 od skupno 10 analiziranih sunkov), bodisi je odtekanje poplavne vode moteno in razmeroma dolgotrajno (4 od 10).

Tipičen primer malega poplavnega sunka, ki neovirano preide skozi Vetrovno jamo, je sunek iz novembra 2006 (sl. 6). Korelacija med pretokom površinske Unice in nivojskim hidrogramom v Vetrovni jami je statistično značilna ($r = 0,81$).

Dva primerljivo velika poplavna sunka, ki ju uvrščamo med male, lahko povzročita različen odziv Vetrovne jame. Praznjenje je upočasnjeno, v kolikor v vodonosniku pred prihodom sunka ni prevladoval bazni tok (primerjaj sunek med 1. – 16. 1. 2008 slika 4a s sunkom med 19. – 22. 9. 2007 slika 4b).

Razprava

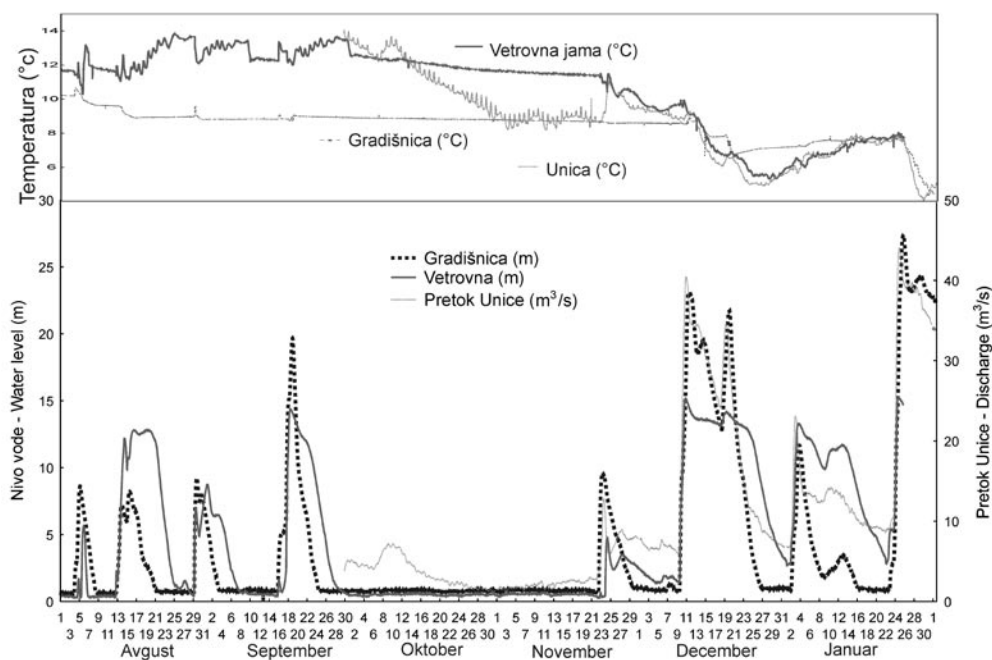
Na podlagi interpretacije meritev lahko sklepamo na lokalni hidrogeološki pomen Vetrovne jame

in na regionalne značilnosti vodonosnika ob Planinskem polju.

Lokalna hidrogeološka študija Vetrovne jame kaže pomembno posebnost, ki se odraža pri prehodu vseh velikih poplavnih sunkov skozi sistem. Relativno neoviran prehod takšnih sunkov skozi Vetrovno jamo, preprečuje domnevna hidrogeološka prepreka nizvodno od nje, zaradi česar prihaja do daljšega zadrževanja poplavne vode v sistemu. Na lokalno hidrogeološko prepreko sklepamo v neposredni bližini jame, kjer dopuščamo možnost, da odtok vode pod udornico Laška kukava pogojuje domnevni skalni podor.

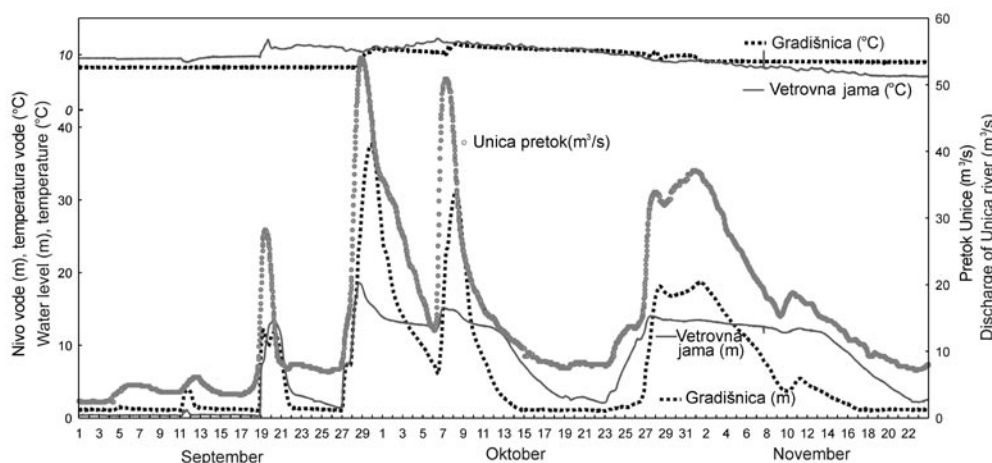
Polnjenje Vetrovne jame s poplavno vodo ne kaže večjih posebnosti, izjema so določeni prevoji na hidrogramih, ki pa ne kažejo korelacije s pretokom površinske Unice. Prevojem sledi upočasnjevanje naraščanja vodnega nivoja na določeni relativni višini. V treh primerih smo upočasnjevanje opazili med relativnima višinama 5 in 6 m, ter v dveh primerih med relativnima višinama 7 in 8 m (sl. 4 in sl. 5 – 26. september). Upočasnjevanje naraščanja vodne gladine v Vetrovni jami na določenih relativnih višinah bi lahko bilo pogojeno s prisotnostjo večjih rezervoarjev na območju obravnavanih nivojev.

Bolj kompleksno je odtekanje poplavne vode iz Vetrovne jame. Praznjenje običajno poteka v dveh ali treh fazah, odvisno od največjega doseženega nivoja podzemne vode. V prvi fazi upada vodna gladina izrazito počasneje kot v znanih vodnih jamah zahodneje, torej sta odtok in dotok v jami približno enaka. Domnevamo, da je dotok v tej fazi upadanja razmeroma stalen in kontroliran z maksimalno prevodno sposobnostjo požiralnikov, ki so aktivni ob določenem vodostaju na Planinskem polju. Velikost dotoka ocenjujemo približno na 20 m³/s, kolikor tudi znaša ocena maksimalne prevodne sposobnosti požiralnikov JV od Laz (BREZNIK, 1998). Da je maksimalna prevodna sposobnost požiralnikov ob večjih poplavnih sunkih presežena, dokazuje tudi dejstvo, da so maksimalni vodni nivoji v Vetrovni jami doseženi vsaj nekaj ur preden doseže površinska Unica svoj maksimalni pretok (sl. 5 prvi vrh, ter še posebno sl. 7).



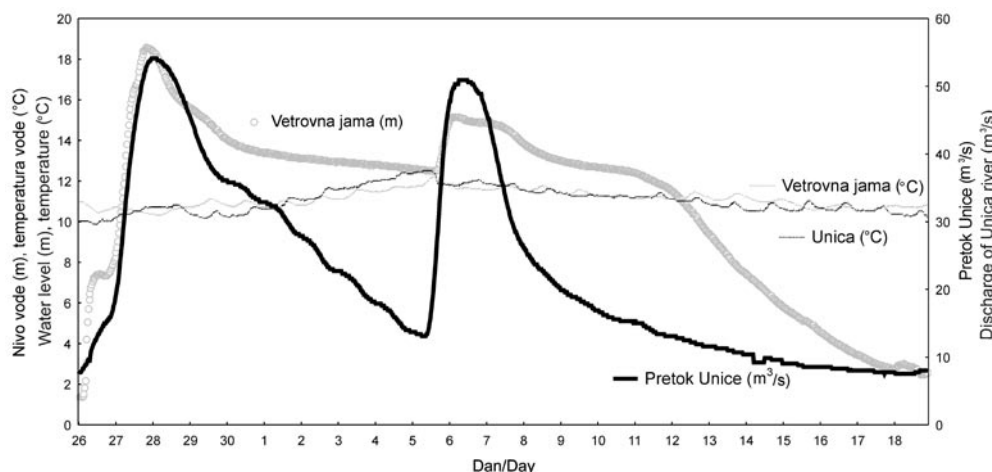
Slika 4a. Primerjava hidrogramov (nivojev podzemne vode in njene temperature) v Vetrovni jami in Gradišnici med 1. 8. 2006 in 1. 2. 2007. Pretok in temperatura površinske Unice sta bila merjena od konca septembra naprej.

Figure 4a. Comparison of hydrographs (parameters of water level and water temperature) in Vetrovna jama and Gradišnica caves, between August 1st 2006 and February 1st 2007. Discharge and temperature of the Unica river was measured on from the end of the September.



Slika 4b. Primerjava hidrogramov (nivojev in temperature podzemne vode) v Vetrovni jami in Gradišnici, v obdobju med 1. 9. in 24. 11. 2007. Prikazan je tudi pretok Unice.

Figure 4b. Comparison of hydrographs (water levels and water temperatures) in Vetrovna jama and Gradišnica caves for period between September 1st and November 24th, 2007. Discharge of the Unica river is also plotted.



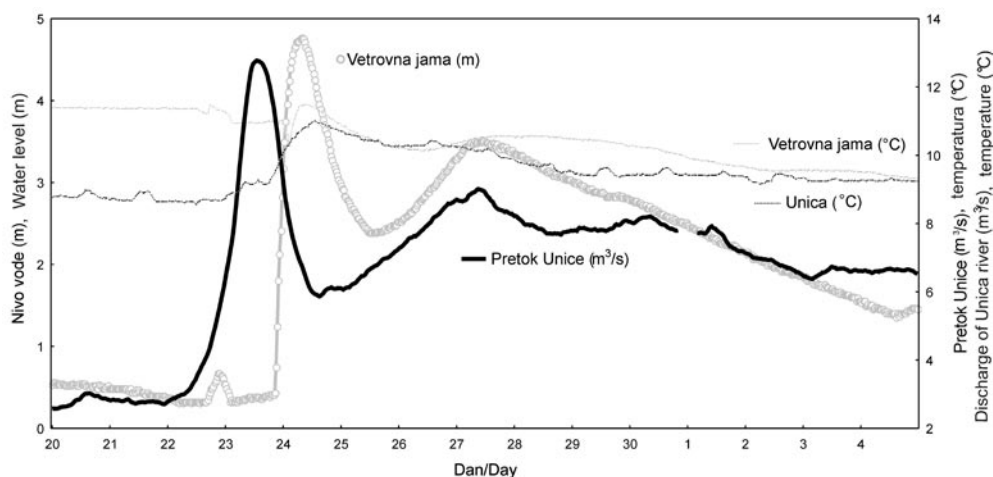
Slika 5. Dva zaporedna poplavna sunka med 26. 9. in 18. 10. 2007.

Figure 5. Two successive flood pulses between September 26th and October 18th, 2007.

Ob izjemno velikih poplavnih sunkih se voda v strugah požiralnikov dviga in verjetno aktivira še dodatne požiralnike, nanizane na višji višini.

V naslednji fazi upadanja gladine vode v Vetrovni jami se nivo vode približa relativni višini 12 m (sl. 5, 12. okt. in sl. 7, 7. do 14. nov.), istočasno pa se hitrost praznjenja Vetrovne jame poveča za več velikostnih redov. Prevojna točka na hidrogramu v vseh primerih sovpada s pretokom površinske Unice pri 15 m³/

s. Hitro praznjenje je posledica zmanjšane dotoka v jamo, ki sovpada z upadanjem pretoka Unice. Vzrok gre morebiti iskati v strukturi (razvejanega) kanalskega sistema. Ne izključujemo tudi možnosti, da se neposreden dotok v jamo izrazito zmanjša zaradi presahnitve pomembnega požiralnika. Vendar dotok vsekakor ne presahne popolnoma, saj se temperaturne značilnosti Unice v jami ohranjajo tudi v času hitrega upadanja vodnega nivoja.



Slika 6. »Mali« poplavni sunek med 20. 11. in 5. 12. 2006.

Figure 6. "Small" flood pulse between November 20th and December 5th, 2006.

Regionalna umestitev Vetrovne jame znotraj vodonosnika temelji na primerjavi hidrogramov med Vetrovno jamo in drugimi jamami ter na geološki zgradbi območja.

Odziv vodnih nivojev v Vetrovni jami na poplavne sunke je precej drugačen od odziva vodnih nivojev v jamah zahodno in SZ od nje (npr. Najdena jama, Gradišnica in Gašpinova jama).

Na podlagi tega bi lahko sklepali da se Unica, ki napaja vzhodne požiralnike in posledično Vetrovno jamo, pretaka skoraj izključno v smeri proti severu in da torej ne vpliva na vodostaj v treh obravnavanih jamah na zahodu. Dobro prevodnih struktur (kanalov), ki bi potekale v smeri proti zahodu naj ne bi bilo. To bi pomenilo, da zaradi zmanjšane odtočne sposobnosti pod Laško kukavo, poplavna voda ne zastaja le v Vetrovni jami, temveč v neznanem obsegu tudi v gorvodnem delu vodonosnika, v smeri proti požiralnikom na jugu. Tu vmes se nahaja tudi jama Logarček, v kateri meritev sicer nismo izvajali (sl. 1). Hidravlični gradient od Logarčka proti Vetrovni jami je znaten, vendar pa občasna opažanja kažejo, da so nihanja podzemne vode v Logarčku podobnega velikostnega reda kot v Vetrovni jami (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976).

Določene povezave med vzhodnimi požiralniki in Gradišnico na SZ so vendarle zanesljive (TURK, 2008). Neznane, vendar nedvomne vodne zveze med vzhodno skupino požiralnikov in Gradišnico skušamo razložiti z detajlno študijo hidrogramov. Ta je pokazala jasno odvisnost med pojavom sekundarnih poplavnih sunkov v Gradišnici (ter tudi Gašpinovi jami) in pretokom površinske Unice, ter tudi vodostajem v Vetrovni jami. Drugače povedano, vpliv podzemne Unice, ki vstopa v vzhodne požiralnike, lahko v Gradišnici opazujemo le ob določenih pogojih:

- Pretok Unice mora biti pravšen (nad 15 in pod 30 m³/s). V tem razponu pretokov se prevodna sposobnost vzhodnih požiralnikov približuje maksimalni vrednosti, oziroma je ta dosežena.
- Pojav vseh tistih sekundarnih vrhov na hidrogramih zabeleženih v Gradišnici, ki jih nikakor ne moremo korelirati s padavinami v širšem območju (Planinsko polje, Ravnik, Rovte), sovpada s počasno fazo upadanja vodnega nivoja v Vetrovni jami, ki poteka med relativnima viši-

nama 12–15 m (absolutno 422–425 m) (sl. 7, glej uokvirjen del slike med 9. in 14. novembrom). Čeprav razpolagamo le s petimi primeri, menimo da je povezava statistično značilna.

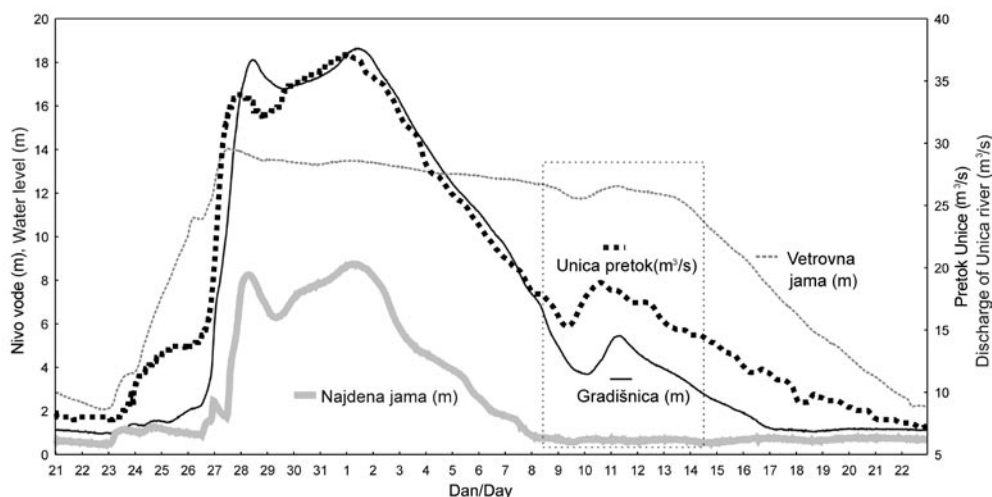
Ob upoštevanju teh dejstev, podajamo dve, razmeroma logični razlagi o vodnih zvezah. Razpravo puščamo odprto, saj dopuščamo možnost dodatnih razlag.

Najverjetnejši razlagi sta sledeči:

1. Ponor Laška žaga (zadnji, skrajno »zahoden« ponor v skupini vzhodnih požiralnikov) v neposredni bližini Laz (sl. 1) bi domnevno lahko odvajal vodo v nekoliko drugačni smeri kot ostali ponori JV od Laz. Obstajajo močni sumi, da je odvajanje vode, ki ponika v Laško žago, pod vplivom določenih geoloških struktur, zaradi česar bi se podzemna voda generalno pretakala v smeri JV–SZ, v nasprotju z ostalimi vzhodnimi ponori, ki naj bi odvajali vodo v generalni smeri J–S. Prevodniki, ki potekajo iz ponora Laška žaga, bi se potemtakem lahko izognili Vetrovni jami, skoraj zagotovo se podzemna voda iz Laške žage pretaka proti Gradišnici. Ob določenih hidroloških pogojih bi ta ponor lahko imel pomemben vpliv na hidrogram v Gradišnici. O pomenu tega ponora in njegovi kapaciteti nismo zasledili dovolj podatkov za detajlnejšo študijo, vsekakor bi ga bilo v prihodnosti koristno preučiti.
2. Domnevamo, da se del podzemne vode, ki naj bi se generalno pretakala od vzhodnih požiralnikov proti severu oziroma Vetrovni jami, na odseku med požiralniki in jama pretoči bočno na zahod (sl. 1). Ta del vode naj bi vplival na nivo vode v Gradišnici in Gašpinovi jami.

Teza o obstoju bočnih prevodnikov je popolnoma hipotetična, utemeljujemo jo s sledečimi dejstvi:

- Le dva od šestih velikih poplavnih sunkov sta povzročila relativni dvig nivoja podzemne vode nad 15 m v Vetrovni jami (natančneje na 18,5 in 19,5 m). V ostalih štirih primerih je nivo narasel za 14 do 15 m, čeprav je bila jakost poplavnih sunkov glede na pretok Unice različna (sl. 4). Dejstvo, da dvig nivoja podzemne vode relativno



Slika 7. Domnevno bočno pretakanje iz glavne smeri odvodnjavanja J-S (med požiralniki pri Lazah in Vetровno jamo) proti zahodu (v smeri Gradišnice), naj bi se vršilo ves čas, ko nivo podzemne vode v Vetровni jami presega relativno višino 12 m. Pretok Unice je bil med 27. 10. in 7. 11. dovolj velik, da je napajala končne severne požiralnike, ter posledično Najdeno jamo in Gradišnico. Ta dotok je na hidrogramu v Gradišnici v omenjenem obdobju prevladujoč, tako da prekrije vse ostale dotoke, vključno s tistim, ki prihaja iz požiralnika Laška žaga, ali tistim ki se domnevno

bočno preteči nekje med požiralniki pri Lazah in Vetровno jamo. Sekundarni poplaveni sunek med 10. in 13. novembrom (primer je na sliki uokvirjen) je bil premajhen, da bi napajal Gradišnico prek Najdene jame. Slednja se na dogodek ni odzvala. Pač pa se je izrazito odzvala Gradišnica, ter nekoliko manj izrazito Vetровna jama. Menimo da se je večina tega poplavnega sunka pretečila preko Laške žage in preko bočnih, stranskih prevodnikov proti Gradišnici in da je le v manjši meri dosegel Vetровno jamo.

Figure 7. Assumable lateral drainage, which would diverge from main underground pathway directed S-N, assumably takes place all the time, when water level in Vetровna jama remains above relative height 12 m. Discharge of the Unica river was high enough between October 27th and November 7th to recharge final northern ponors and Najdena jama, Gradišnica caves consequently. This inflow is prevailing one in Gradišnica. All other inflows are blurred on the hydrograph because of this reason, including the inflow from "Laška žaga ponor" or inflow which assumably penetrates laterally toward west, from region somewhere between ponors at Laze village and Vetровna jama. Secondary flood pulse between November 10th and 13th (it is framed in the figure) was too low to recharge Gradišnica from Najdena jama. Najdena jama did not response at all. However, hydraulic response of Gradišnica was significant and relatively less in Vetровna jama. It is assumed that majority of the discussed underground flood pulse is derived from "Laška žaga" ponor and it may be also penetrated laterally (through Slavendol fault) toward Gradišnica. Some unknown proportion of flood pulse reached Vetровna jama.

redko preseže 15 m nakazuje možnost, da poteka bočno odvajanje neznanega deleža vodnega toka proti zahodu le na določeni relativni višini. Ker naj bi se pretakanje proti zahodu vršilo nekje gorvodno od Vetровne jame, to pomeni, da se del podzemnega vodnega toka izogne Vetровni jami in nima vpliva na nadaljnjo naraščanje vodostaja v njej. Vodni nivo v Vetровni jami naj ne bi narasel prek relativne višine 15 m.

- Ob najvišjih izmerjenih pretokih površinske Unice (nad 50 m³/s) nivo vode v Vetровni jami za več metrov preseže 15 m (sl. 4, 5). Ob dvigu vode v strugi požiralnikov in aktivaciji dodatnih požiralnikov, del tega presežnega toka doseže tudi Vetровno jamo. Torej morebitni »prečni« prevodni horizont ne odvede vsega toka.

Vpliv vodnega toka v Gradišnici, ki prihaja iz ponora Laška žaga ali predstavlja vir domnevnega bočnega pretakanja, je popolnoma zabrisan v primeru, ko je pretok Unice dovolj velik (nad 30 m³/s), da napaja Gradišnico prek severnih požiralnikov in Najdene jame. Ta tok je namreč prevladujoč (sl. 1, 7 – primerjaj odsek med 27. oktobrom in 7. novembrom z odsekom med 9. in 14. novembrom). Količina podzemne Unice, ki naj bi prihajala iz ponora Laška žaga ali z območja bočnega podzemnega pretakanja, naj bi bila relativno majhna.

Tretja razlaga, ki se nam poraja kot dopolnilna možnost, je manj verjetna. Voda, ki odteče iz Vetровne jame, bi lahko vplivala na vodostaj v Gradišnici. Generalne smeri pretakanja podzemne vode tej tezi močno nasprotujejo (primerjaj legi obeh jam na sl. 1).

Sklep

Nivo podzemne vode v Najdeni jami, Gradišnici in Gašpinovi jami niha zelo usklajeno. Izjema je le Vetровna jama, ki pa je najvzhodnejša od vseh štirih jam. Značilnega, hipotetičnega hidravličnega padca med Vetровno jamo in obravnavanimi drugimi jamami ni mogoče določiti. Na podlagi tega dejstva postavljamo domnevo, da lahko vodonosnik severno od Planinskega polja delimo na dva dela, na »zahodni« in »vzhodni« del. Na podlagi naših meritev se nagibamo k mnenju Šušteršiča (2002), da naj bi mejo med njima predstavljala struktura, vezana na raven niz udornic od Slaven dola v smeri proti Malemu Dovcu. To geološko strukturo je Šušteršič (2002) interpretiral kot Slavendolski prelom (sl. 1). Po njegovem prepričanju predstavlja zdrobljena cona Slavendolskega preloma pomembno hidrogeološko prepreko.

V skladu s Šušteršičevimi ugotovitvami se sklada hipoteza, da ponor Laška žaga (v neposredni bližini Laz) lahko pomembno vpliva na hidrogram v Gradišnici, ne pa tudi v Vetровni jami. Laška žaga se namreč nahaja na zahodni strani Slavendolskega preloma, tako kot Gradišnica. V prihodnosti bo potrebno pomen tega ponora vsekakor še natančno preučiti. Obstajajo določeni utemeljeni sumi, da zdrobljena cona Slavendolskega preloma vendarle ni popolnoma neprepustna za pretakanje podzemne vode. Prelomna cona s smerjo J-S, naj bi vzdolžno »puščala«, oziroma dovoljevala pretakanje neznane (manjše?) količine vode iz JV na SZ. Zelo verjetno obstajajo celo določeni bočni kanalski prevodniki, ki presekajo Slavendolski prelom.

Meritve na treh lokacijah »zahodnega« dela vodonosnika lahko smatramo za reprezentativne, tako s hidrogeološkega, kot hidravličnega vidika. Za našo razpravo je nekoliko problematično dejstvo, da je bila Vetrovna jama edina merilna točka znotraj »vzhodnega« območja vodonosnika, za katerega sklepamo, da ima drugačne značilnosti. Postavlja se vprašanje ali lahko na podlagi meritev na zgolj eni točki sklepamo, da sta »vzhodno« in »zahodno« območje vodonosnika v času istovrstnih meritev delovali deloma neodvisno eno od druge. Ta predpostavka temelji na predhodni predpostavki, da je Vetrovna jama reprezentativna za del vodonosnika vzhodno od Slavendolskega preloma. Nekateri predhodni raziskave kažejo da je reprezentativna, saj je nihanje podzemne vode v sosednji jami Logarček zelo podobnega velikostnega reda (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Kljub vsemu bodo morala biti naša dognanja v prihodnosti preverjena z meritvami na dodatnih točkah v vodonosniku (vodnih jamah, ki še čakajo na odkritje).

Zahvala

Avtorja članka se za pomoč pri obiskovanju Vetrovne jame lepo zahvaljujeva g. Bojanu Volku, ki ima velike zasluge za našo raziskavo. Zahvala gre tudi g. Marku Erkerju (oba JD Logatec). Načrt jame je izdelal g. Miran Nagode, ki je skupaj z g. Bojanom Volkom odkril vodne dele Vetrovne jame. Načrt objavljamo z njunim dovoljenjem, za kar jima pripada posebna zahvala.

Literatura

- BREZNIK, M. 1998: Storage Reservoirs and Deep Wells in Karst Regions. A. A. Balkema Publishers (Rotterdam): 1–251.
- ČAR, J. 1982: Geološka zgradba požiralnega obrobja Planinskega polja. *Acta Carsologica* (Ljubljana) X: 75–104, 1981.
- GABROVŠEK, F. & PERIC, B. 2006: Monitoring of the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifers: the case of Reka river system, Karst plateau, SW Slovenia. *Acta Carsologica* (Ljubljana) 31/1: 35–45.
- GAMS, I. & HABIČ, P. (eds.) 1987: Man's impact in Dinaric karst, Guide book. Department of Geography, Faculty Letters, University »E. Kardelj« in Ljubljana and Institute for Karst Research SAZU in Postojna (Ljubljana): 1–205.
- GOSPODARIČ, R. & HABIČ, P. (eds.) 1976: Underground water tracing – Investigations in Slovenia 1972–1975. Institute for Karst Research SAZU (Ljubljana): 1–309.
- KRIVIC, P., VERBOVŠEK, R. & DROBNE, F. 1976: Hidrogeološka karta (območja med Cerknico, Idrijo in Vrhniko) 1:50 000 (*Hydrogeological map of area between Cerknica, Idrija and Vrhnika*), Geološki zavod Ljubljana.
- MICHLER, I. 1954–1955: Planinska dolina. *Proteus* (Ljubljana) 17: 1–10.
- PALMER, A.N. & PALMER, M.V. 2006: Hydraulic considerations in the development of tiankengs. *Speleogenesis* 4/1: 1–8.
- PLENIČAR, M. 1970: Tolmač osnovne geološke karte 1 : 100.000 za list Postojna (Beograd): 1–58.
- STEPIŠNIK, U. 2006: Ilovinate zapolnitve v udornicah v zaledju izvirov Ljubljance. *Razprave Dela* 26 (Ljubljana): 75–89.
- ŠEBELA, S. 1998: Tektonska zgradba sistema Postojnskih jam (Tectonic Structure of Postojnska jama Cave System). ZRC SAZU (Ljubljana): 1–119.
- ŠUŠTERŠIČ, F. 2002: Where does underground Ljubljana flow? RMZ – Materials and geoenvironment (Ljubljana) 49/1: 61–84.
- ŠUŠTERŠIČ, F., ČAR, J. & ŠEBELA, S. 2001: Zbirni kanali in zaporni prelomi. *Naše jame* (Ljubljana) 43: 8–22.
- ŠUŠTERŠIČ, F. 2000: Are collapse dolines formed only by collapse? (Ali so udornice zgolj posledica udara?), *Acta Carsologica* (Ljubljana) 29/2: 213–230.
- TURK, J. 2008: Hidrogeologija Gradišnice in Gašpinove jame v kraškem vodonosniku med Planinskim poljem in izviri Ljubljance (*Hydrogeology of Gradišnica and Gašpinova jama caves in karst aquifer between Planinsko polje and Ljubljana springs*). *Geologija* (Ljubljana) 51/1: 51–58.
- XUWEN., Z. & WEIHAI, C. 2006: Tiankengs in the karst of China. *Speleogenesis* 4/1: 1–18.