

Večletno merjenje tektonskih mikro premikov v kraških jamah

Stanka Šebela *

Povzetek

V petih kraških jamah v Sloveniji merimo mikro premike s šestimi ekstenziometri TM 71. V Postojnski jami se meritve opravljajo že deset let. Inštrumenti so nameščeni v razpoke, na prelomne ploskve in v lezike. Merilna mesta v kraških jamah so bila izbrana glede na bližino prelomnih con in glede na ugodno dostopnost terena. V Postojnski jami sta ekstenziometra oddaljena okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. V Pološki jami je merilno mesto okrog 300 m južno od Ravenskega preloma. V Jami Svetih treh kraljev je inštrument okrog 800 m južno od Ravenskega preloma. Inštrument v Kostanjeviški jami leži v širši prelomni coni Zagreb-Zemplin in se nahaja okrog 1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice. V Županovi jami se meritve opravljajo 500 m severno od Dobropoljskega preloma. Vse lokacije kažejo tektonsko pogojenost mikro premikov, v Pološki jami pa beležimo tudi premike zaradi nestabilnosti terena.

Ključne besede: mikro premiki, kraške jame, ekstenziometer TM 71, Slovenija.

Keywords: micro displacements, karst caves, TM 71 ekstensometer, Slovenia

Uvod

V okviru projekta COST 625, ki je potekal od 2000 do 2006 smo v letu 2004 v Postojnski jami namestili prva dva ekstenziometra TM 71 za merjenje mikro premikov. Danes imamo v kraških jamah postavljenih 6 ekstenziometrov s katerimi redno spremljamo velikosti, smeri in rotacije mikro premikov. Inštrumenti so nameščeni v razpoke ali na prelome. V Pološki jami pa merimo premike med plastmi. Kraške jame in umetni tuneli so zaradi stabilne temperature zelo primerni za tovrstne meritve (Gosar et al., 2011; Šebela et al., 2009; Šebela et al., 2010).

Merilna mesta v kraških jamah so bila izbrana glede na bližino aktivnih prelomov in glede na ugodno dostopnost terena. V Postojnski jami sta ekstenziometra oddaljena okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. V Pološki jami je merilno mesto okrog 300 m južno, v Jami Svetih treh kraljev pa okrog 800 m južno od Ravenskega preloma (Poljak, 2000). Inštrument v Kostanjeviški jami leži v širši prelomni coni Zagreb-Zemplin in se nahaja okrog 1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice. V Županovi jami se meritve opravljajo 500 m severno od Dobropoljskega preloma in 4 km severno od Želimeljskega preloma.

Metoda

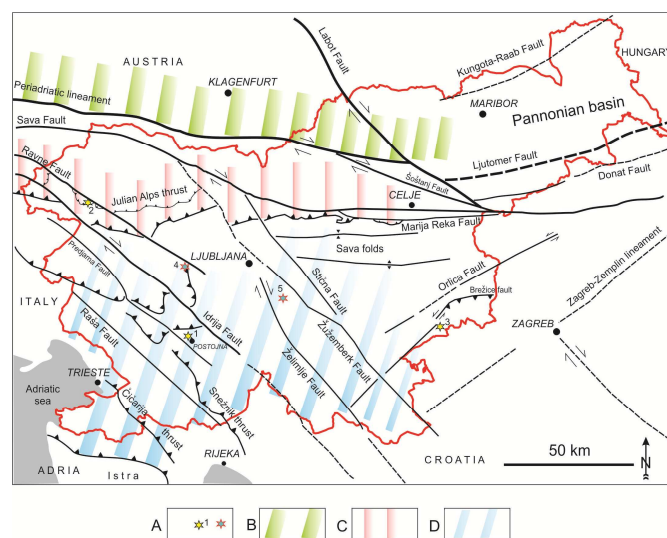
Za merjenje mikro-premikov uporabljamo 3D ekstenziometre TM 71 z natančnostjo $\pm 0,007$ mm v smereh x , y in z . Hkrati merimo tudi rotacijo v dveh ravninah (xy in xz) z natančnostjo $\pm 0,00016$ radianov (Košťák et al., 2007; Stemberk et al., 2011; Briestenský et al., 2011 in 2014). Meritve se večinoma izvajajo enkrat na mesec. V Postojnski jami na Veliki gori (Postojna 1) imamo nameščeno avtomatsko merjenje vsako uro. Ekstenziometer TM 71 je v sedemdesetih letih razvil Čeh dr. Blahoslav Košťák (Košťák et al. 2007).

* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

V zadnjih dvajsetih letih so okrog 300 ekstenziometrov namestili v kraških jamah na Češkem, Slovaškem, v Bolgariji, na Poljskem, v Avstriji, Belgiji in v Sloveniji. Za namestitev pa so primerni tudi tuneli (Nemčija, Slovaška, Kirgistan) ali opuščeni rudniki (Slovenija) ter površinski izdanki (Grčija, Italija, Peru, Svalbard, Kanarski otoki, ZDA, Slovenija).

Rezultati

V Postojnski jami (Slika 1, Preglednica 1) že 10 let (2004 – 2014) merimo mikro premike na dinarsko usmerjeni prelomni coni, ki se nahaja okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. Na Veliki gori je inštrument nameščen med jamsko steno, ki predstavlja prelomno ploskev $30^{\circ}/80-90^{\circ}$ in med podorni blok apnenca. V desetih letih beležimo manjše premike ($+z=0,03$ mm, $-y=0,05$ mm, $-x=0,04$ mm), in sicer normalni vertikalni premik ob prelomu (spust SV krila za 0,03 mm), desni horizontalni zmik za 0,05 mm in ekstenzijo za 0,04 mm. Izraziti sta dve obdobji, ko je prišlo do opaznejših premikov. Konec leta 2004 je prišlo do desnega horizontalnega zmika za 0,05 mm. Od 28.8. do 9.12.2009 smo zabeležili spust SV bloka $+z=0,07$ mm (normalni vertikalni premik), od 18.6. do 22.7.2010 pa smo zabeležili dvig SV bloka $-z=0,05$ mm (reverzni vertikalni premik). Na Veliki gori smo vzpostavili tudi avtomatske meritve, ki potekajo vsako uro, vendar merjenje še ni ustaljeno in bo potrebno sistem izboljšati.



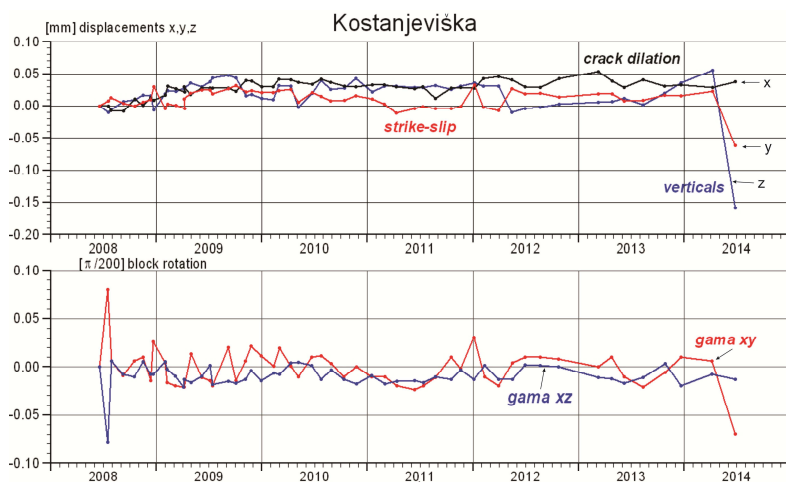
Slika 1 – Tektonska zgradba Slovenije (Placer, 2008 in Poljak, 2000) s pomembnimi prelomi in položajem ekstenziometrov TM 71. A – kraške jame (1-Postojnska jama, 2-Pološka jama, 3-Kostanjeviška jama, 4-Jama Svetih treh kraljev, 5-Županova jama), B – tektonska enota Vzhodnih Alp (severno od Periadriatskega lineamenta), C – tektonska enota Julijskih Alp, D – Dinaridi.

Na drugi lokaciji v Postojnski jami v Lepih jamah je inštrument nameščen med dve prelomni ploskvi v umetno povečanem rovu. Na JZ prelomni ploskvi $30^{\circ}/80-90^{\circ}$ imamo vertikalne drse, ob SV prelomni ploskvi $30^{\circ}/60^{\circ}$ pa imamo horizontalne drse. Po desetih letih inštrument kaže desni horizontalni zmik $-y=0,02$ mm in ekstenzijo $-x=0,03$ mm. Od 26.6.-24.7.2008 smo zaznali vertikalni premik $+z=0,08$ mm (spust SV bloka, normalni vertikalni premik), od 24.7.-5.8.2008 pa se je premik povrnil v stanje dne 26.6.2008 (–

$z=0,08$ mm, reverzni vertikalni premik). Prav v tem obdobju smo imeli tudi desni horizontalni zmik $-y=0,06$ mm.

Oba ekstenziometra sta v Postojnski jami nameščena na isto prelomno cono, vendar na različne prelome znotraj te cone. Na obeh lokacijah beležimo manjše tektonske mikro premike, ki v desetih letih niso presegle $0,05$ mm. V krajših časovnih obdobjih pa smo odčitali tudi nekoliko večje premike ($0,08$ mm), ki pa se navadno povrnejo v prvotno stanje. Ob visokih poplavalah v Postojnski jami jeseni 2010 na inštrumentih nismo zasledili sprememb premikov, kar dokazuje, da ne beležimo npr. premikov zaradi sprememb v hidrologiji kraškega sistema ampak tektonsko pogojene mikro premike. Premiki, ki jih TM 71 zazna so največkrat povezani s spremembami napetosti v Zemeljski skorji.

V Kostanjeviški jami je TM 71 nameščen znotraj razširjene razpoke s smerjo vpada 140° in vpadnim kotom 80° . Gre za razpoko, ki je vzporedna prelomu Kostanjevica-Brežice. V celotnem obdobju meritev 2008 – 2014 je najbolj izrazit premik $+x=0,04$ mm, ki predstavlja stiskanje razpoke v horizontalni ravnini. V horizontalni smeri opazujemo tudi desne in leve zmičke, ki so $< 0,04$ mm. Od 2008 do 25.5.2014 je vertikalno premikanje kazalo dvig SZ bloka za $0,05$ mm, kar predstavlja normalni premik ob razpoki $140^\circ/80^\circ$. V obdobju od 25.5.2014 do 26.6.2014 pa smo zabeležili močnejše premike, in sicer $-z=0,2$ mm in $-y=0,1$ mm, kar predstavlja desni horizontalni zmik in relativni spust SZ bloka (reverzni premik ob razpoki $140^\circ/80^\circ$). Hkrati opazujemo tudi stiskanje v horizontalni ravnini. Gre za zelo velik premik v kratkem obdobju enega meseca, ki ga verjetno lahko povezujemo s spremembami napetosti v Zemeljski skorji na področju JV Slovenije.



Slika 2 – Merjenje tektonskih mikro premikov v Kostanjeviški jami s TM 71 ekstenziometrom ($+x$ =kompresija, $-x$ =ekstenzija, $+y$ =levi horizontalni premik, $-y$ =desni horizontalni premik, $+z$ =dvig SZ bloka, $-z$ =spust SZ bloka). Zgornji graf – premiki, spodnji graf – rotacije.

Od 19. junija 2008 je v Pološki jami nameščen en ekstenziometer. Jama (10.800 m dolga in 704 m globoka) je bila izbrana, ker njeni rovi ležijo 250-800 m južno od Ravenskega preloma, ob katerem je nastal potres 12. aprila 1998 ($M=5,6$). Po ustnem pričevanju jamarjev so po potresu opazili nekaj odpadlih blokov v spodnjih-vhodnih delih jame. Tudi nadžarišče potresa leta 2004 ($M=5,2$) je bilo v bližini Pološke jame. Prav zato smo se, sicer po zelo zahtevni namestitvi, odločili, da inštrument TM 71 postavimo v kraško jamo, ki je zelo blizu nadžarišč potresov iz let 1998 in 2004 ter v bližino Ravenskega preloma. Zaradi zahtevnosti dostopa, premike odčitamo na približno vsaka

dva meseca. Naš namen je razumevanje tektonskih aktivnosti na Krnskem pobočju ter na območju širše prelomne cone Ravenskega preloma.

TM 71 je v Pološki jami (Slika 3) nameščen med dvema tektonsko premaknjenima plastema ($120^{\circ}/40^{\circ}$) zg. triasnega apnenca, in sicer okrog 50 m stran od spodnjega JV vhoda v jamo. V obdobju od 2008 – 2014 smo izmerili premik v navpični smeri +z za 0,11 mm (relativni dvig SZ bloka), kar pomeni, da se ob plasteh, ki vpadajo proti JV vrši normalni premik. Ta premik se verjetno nakazuje tudi zaradi nestabilnosti terena. Opažamo tudi manjše ($< 0,04$ mm) leve ali desne horizontalne zmike med dvema plastema. Največji kratkotrajni premik pa beležimo v horizontalni smeri. Med 27.11.2011 do 4.3.2012 smo izmerili $-x=0,23$ mm, kar predstavlja ekstenzijo. V obdobju 28.11.2012 do 30.9.2013 pa smo izmerili kompresijo $+x=0,16$ mm. Horizontalni zmiki ter stiskanje in razpiranje med plastema so verjetno tektonsko pogojeni. Normalni premik ob plasteh, ki vpadajo vzporedno s pobočjem pa verjetno kaže na premike zaradi nestabilnosti terena. Tudi v jamskih rovi ponekod lahko opazimo nekaj cm velike premike rogov ob lezikah, kjer je zgornja plast spuščena glede na spodnjo (Slika 3).



Slika 3 - TM 71 ekstenziometer v Pološki jami (levo) in zamaknjen rov ob leziki v Pološki jami (desno) (foto: S. Šebela).

Sedanjo tektonsko aktivnost ob Ravenskem prelomu so pokazale tudi študije s katerimi so ugotovili aktivne tektonske deformacije ob izvirih Tolminke in v prelomni coni Ravenskega preloma (Kastelic et al., 2008). TM 71 se nahaja tudi okrog 200 m nad narivnico Julijskih Alp (Slika 1). Mikro premiki v Pološki jami so zato lahko vezani tudi na to strukturo.

Jama pri Svetih treh kraljih je bila odkrita v tridesetih letih prejšnjega stoletja, ko je bil za potrebe Rupnikove obrambne linije na meji med Jugoslavijo in Italijo izdelan umetno izkopani rov, ki je naletel na kraške rove. Jama je dolga 962 m in globoka 77 m (Mihevc, 1991). Nahaja se tik pod vrhom hriba Vrh nad Rovtami ali Vrh Sv. Treh kraljev (884 m); vhod v jamo je v nadmorski višini 812 m. Jama je nastala v spodnje triasnem zrnatem dolomitu. Plasti vpadajo proti JZ. Za nastanek, obliko in razporeditev rogov so pomembni prelomi in razpoke. Dominantna smer prelomov je S-J. Druga najbolj pogosta smer prelomov je 16/65 (Mihevc, 1991).

TM 71 je nameščen na sečišču dveh izrazitih razpok. Razpoka smeri 0/80 seka razpoko smeri 280/70. Merjenje mikro-premikov od 2012 do 2014 kaže na reverzni premik ob razpoki 0/80 (dvig južnega krila za 0,09 mm). Hkrati se ob isti razpoki vrši levi zmik (0,09

mm) in kompresija za 0,14 mm v smeri S-J. Največji premik pa smo opazovali od 26.9.2012 do 23.10.2012 $+z=0,17$ mm in od 23.10.2012 do 4.2.2013 $-z=0,19$ mm. V prvem obdobju je ob razpoki 0/80 nastal normalni vertikalni premik (dvig južnega krila), v drugem obdobju pa je šlo za reverzen vertikalni premik (spust južnega krila). V obdobju med 26.9.2012 do 4.2.2013 pa smo opazovali ekstenzijo v horizontalni ravnini $-x=0,13$ mm.

Severno od Rovt poteka čez širšo okolico Zavrata in dolino Sovre zavraški snop triasnih prelomov, ki leži v celoti v Tičenski notranji narivni grudi. Najmočnejši prelom je Mlakar (1969) poimenoval Lomsko-Zavraški prelom, mlajšega, ki se odceplja od njega pa Logarjev prelom. Ti triasni prelomi, ki danes potekajo v smeri vzhod-zahod, so nastali v nateznih razmerah in so zato normalnega značaja. Ob Zavraškem snopu triasnih prelomov so bili relativni premiki manjši od nekaj deset do 200 m (Čar, 2010). Tudi današnji mikro premiki ob razpoki smeri V-Z kažejo na možne aktivne premike v širši coni Zavraških prelomov, hkrati pa zaradi bližine Ravenskega preloma verjetno nakazujejo njegovo recentno aktivnost tudi severno od Vrha Sv. Treh kraljev nad Rovtami.

Preglednica 1 – Značilnosti tektonskih mikro premikov v kraških jamah.

št. TM 71	začetek meritev	geološki elementi – smer vpada in vpad	geološka struktura	položaj TM 71 glede na bližnji prelom	premik do 2014	največji premik	kamnina	
Postojnska jama	2	2004	30/80-90 (Post 1); 30/80-90 in 30/60 (Post 2)	prelomna cona	1 km severno od Predjamskega preloma	Post 1 (konec 2004-sredina 2005) – $y=0,05$ mm; (28.8.-9.12.2009) $+z=0,07$ mm; (18.6.-22.7.2010) $-z=0,05$ mm; Post 2 (26.6.-24.7.2008) $+z=0,08$ mm; (24.7.-5.8.2008) $-z=0,08$ mm; (24.7.-29.7.2008) $-y=0,06$ mm; (2.10.2009 – 9.12.2009) $+y=0,05$ mm; (18.6.2010-12.8.2010) $-y=0,05$ mm	zg. kredni apnenec	
Kostanjeviška jama	1	2008	140/80	razpoka	1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice	(2008-2014) $+x=0,04$ mm	(25.5.-26.6.2014) $-z=0,2$ mm; $-y=0,1$ mm	sp. kredni apnenec
Pološka jama	1	2008	120/40	plasti	300 m južno od Ravenskega preloma in 200 m nad narivom Julijskih Alp	(2008-2014) $+z=0,11$ mm	(27.11.2011-4.3.2012) $-x=0,23$ mm; (28.12.2012-30.9.2013) $+x=0,16$ mm	zg. triasni apnenec
Županova jama	1	2011	110/90 in 115/90	vzporedni razpoki	500 m severno od Dobrepoljskega preloma	(konec 2011-8.10.2012) $-x=0,05$ mm; (5.8.2012-2014) $+x=0,02$ mm; (27.5.2012-19.6.2013) $-y=0,03$ mm; $+y=0,03$ mm	(5.6.2014-8.10.2014) $-z=0,04$ mm, $+y=0,04$ mm; (18.6.-8.10.2014) $-x=0,04$ mm	sp. jurski apnenec
Jama Svetih treh kraljev (Rupnikov rov)	1	2012	280/70 in 0/80	sekanje dveh razpok	800 m južno od Ravenskega preloma	(2012-2014) $+z=0,09$ mm; $+y=0,09$ mm; $+x=0,14$ mm	(26.9.2012-23.10.2012) $+z=0,17$ mm; (23.10.2012-4.2.2013) $-z=0,19$ mm	sp. triasni dolomit

$+x$ =kompresija, $-x$ =ekstenzija, $+y$ =levi horizontalni premik, $-y$ =desni horizontalni premik, z =vertikalni premik

Županova jama se nahaja 4 km južno od Grosuplja in nekoliko južno od hriba Tabor (492 m). Jama je razvita v plastovitih jurskih apnencih, ki so na širšem površju nad jamo nagubani v sinklinalo z osjo v dinarski smeri (SZ-JV). Jama se nahaja okrog 500 m severno od Dobropoljskega preloma. JZ blok Dobropoljskega preloma, zgrajen iz triasnih kamnin, je dvignjen, SV blok, ki ga gradijo jurske kamnine, pa je spuščen (Buser, 1968). Ob dinarsko usmerjenem prelomu, pa naj bi nastali desni horizontalni premiki. Prelom poteka vzhodno od Ljubljane, mimo Škofljice, na severnem robu Ribniške Male gore. TM 71 smo namestili med dve skoraj vzporedni subvertikalni razpoki $110^{\circ}/90^{\circ}$ in $115^{\circ}/90^{\circ}$, ki sta med seboj oddaljeni okrog 1 m. V jami so najbolj zastopane prav te smeri daljših razpok in prelomov. V obdobju od 5.6.2014 naprej beležimo nekoliko večje premike. Tako imamo ekstenzijo ($-x$) za 0,05 mm, levi horizontalni premik ($-y$) za 0,03 mm in relativni vertikalni spust ($-z$) zahodnega bloka za 0,05 mm.

Zaključek

Večletno merjenje mikro premikov v petih kraških jamah v Sloveniji z ekstenziometri TM 71 kaže na manjše tektonske premike v širših conah prelomov: Predjamski (0,05 mm), Ravenski (0,11-0,14 mm; Pološka jama 0,018 mm/leto in Jama Svetih treh kraljev 0,07 mm/leto), Dobropoljski (0,05 mm), Kostanjevica-Brežice (0,05 mm) in nariv Južnih Alp. V krajših časovnih obdobjih beležimo tudi večje premike npr. 0,2 mm v Kostanjeviški jami, ki pa se običajno vrnejo v prvotno stanje. V Pološki jami je del mikro premikov potrebno pripisati tudi nestabilnosti terena. Raziskava je pomembna za razumevanje aktivnih tektonskih premikov v širših conah prelomov, za razumevanje stabilnosti kraških jam in za spremljanje sprememb v napetosti Zemeljske skorje. Raziskava je del projektov: slovensko-češki bilateralni projekti (BI-CZ/06-07-011 in BI-CZ/08-09-015), FP7-INFRA-2010 pripravljalna faza projekta EPOS (*European Plate Observing Systems*) in FP7-PEOPLE-2009-IRSES-246874 (BlackSeaHazNet).

Literatura

- Briestenský, M., Stemberk, J., Michalik, J., Bella, P. in Rowberry, M.D. 2011. The use of karstic cave system in a study of active tectonics: fault movements recorded at Driny Cave, Malé Karpaty Mts (Slovakia). *J. Cave and karst studies*, 73, 114-123.
- Briestenský, M., Thinová, L., Praksová, R., Stemberk, J., Rowberry, M. D. in Knejflová, Z. 2014. Radon, carbon dioxide and fault displacements in central Europe related to the Tōhoku earthquake. *Radiation Protection Dosimetry*, 160/1-3, 78-82, doi: 10.1093/rpd/ncu090
- Buser, S. 1968. Osnovna Geološka karta SFRJ, list Ribnica, Zvezni Geološki zavod Beograd.
- Čar, J. 2010. Geološka zgradba idrijsko – cerkljanskega hribovja. Tolmač h Geološki karti idrijsko – cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1:25 000, Geološki zavod Slovenije, 127 pp, Ljubljana.
- Gosar, A., Šebela, S., Košťák, B. in Stemberk, J. 2011. On the state of the TM 71 extensometer monitoring in Slovenia: seven years of micro-tectonic displacement measurements. *Acta Geodyn. Geomater*, 8/4, 389-402.
- Kastelic, V., Vrabec, M., Cunningham, D. in Gosar, A. 2008. Neo – Alpine structural evolution and present day tectonic activity of the eastern Southern Alps: the case of the Ravne Fault, NW Slovenia. *Journal of Structural Geology*, 30/8, 963-975.
- Košťák, B., Cacoň, S., Dobrev, N.D., Avramova-Tacheva, E., Fecker, E., Kopecký, J., Petro, L., Schweizer, R. in Nikonov, A.A. 2007. Observations of tectonic microdisplacements in Europe in relation to the Iran 1997 and Turkey 1999 earthquakes. *Izvestiya - Physics of the Solid Earth*, 43/ 6, 503-516.

- Mihevc, A. 1991. Jama pri Sv. Treh kraljih. *Naše jame*, 33, 28-37.
- Mlakar, I. 1969. Nappe Structure of the Idrija-Žiri Region. *Geologija*, 12, 5-72.
- Placer, L. 2008. Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51/2, 205-217.
- Poljak, M. 2000. Strukturno-tektonska karta Slovenije 1:250000. Mladinska knjiga, Ljubljana.
- Stemberk, J., Košťák, B. in Cacoń, S. 2011. A tectonic pressure puls and increased geodynamic activity recorded from the long-term monitoring of faults in Europe. *Tectonophysics*, 487, 1-12.
- Šebela, S., Turk, J., Mulec, J., Košťák, B. in Stemberk, J. 2009. Statistical evaluation of the 3D monitoring of displacements of Dinaric Fault Zone in Postojna Cave, Slovenia. *Acta Geodyn. Geomater.*, 6/2, 1-14.
- Šebela, S., Vaupotič, J., Košťák, B. in Stemberk, J. 2010. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna Cave, Slovenia. *J. Cave and karst studies*, 72, 21-34.