

# Meritve delcev v zraku turističnih jam

Miloš Miler<sup>\*</sup>, Stanka Šebela<sup>\*\*</sup>, Nina Zupančič<sup>\*\*\*</sup>, Simona Jarc<sup>\*\*\*</sup>

## Povzetek

V Postojnski jami (Črna jama in Pisani rov) ter v Škocjanskih jamah (Tiha jama) smo v poletnem in zimskem obdobju zvezno izvajali sedemdnevne meritve količine  $PM_{10}$  v zraku z merilnim intervalom 5 minut. Hkrati smo merili tudi temperaturo zraka in koncentracijo  $CO_2$ . V zimskem obdobju leta 2017 smo v južnem delu Pisanega rova, predvsem v nočnem času, opazili močno povečane koncentracije delcev  $PM_{10}$  do  $60 \mu g/m^3$ , ki so antropogenega izvora. Poletno obdobje 2017 je v Pisanem rovu pokazalo precej manjše koncentracije delcev (največ  $10,9 \mu g/m^3$ ). V Tihi jami v Škocjanskih jamah je bila v zimskem obdobju leta 2018 količina delcev  $PM_{10}$  majhna. Najvišje koncentracije, ki so  $< 4 \mu g/m^3$  povezujemo s turističnim obiskom. V poletnem obdobju 2018 so bili v Tihi jami doseženi viški koncentracije  $PM_{10}$  do  $25 \mu g/m^3$ . Tudi te so posledica dnevnih turističnih obiskov. Na to kažejo tudi viški poletnih koncentracij  $CO_2$  ( $3.300 \text{ ppm}$ ), ki so lahko kar 5x višji od zimskih vrednosti.

**Ključne besede:** delci v zraku, Postojnska jama, Škocjanske jame, Slovenija.

**Keywords:** particulate matter, Postojna Cave, Škocjan Caves, Slovenia.

## Uvod

Trdni delec (PM-particulate matter) je izraz za prah, ki je prisoten v zraku. Najpogosteje se izvajajo meritve delcev premera 10 ( $PM_{10}$ ) in 2,5 ( $PM_{2,5}$ )  $\mu m$ , ki so zdravju najbolj škodljivi (<http://www.okolje.info/index.php/kakovost-zraka/trdni-delci>). Dnevna mejna vrednost za delce  $PM_{10}$  znaša  $50 \mu g/m^3$  in ne sme biti presežena več kot 35-krat v letu. Za delce  $PM_{2,5}$  je predpisana letna mejna vrednost  $25 \mu g/m^3$ . V Sloveniji je glavni vir onesnaženja z delci  $PM_{10}$  cestni promet in izpusti iz kurilnih naprav (Celjska in Zasavska kotlina). Najpomembnejši vir  $PM_{2,5}$  so mala kurišča (74%), sledi cestni promet (9%). Približno 70% mase  $PM_{10}$  in  $PM_{2,5}$  predstavljajo sekundarni delci (aerosoli), elementarni C, dviganje usedlin s tal in morski aerosoli. Preostalih 30% lahko pripišemo vodi.

Meritve delcev v zraku so v obeh turističnih jamah že opravljali. Tako so v Postojnski jami na najnižji točki turistične poti v jutranjih urah izmerili koncentracije ne-radioaktivnih aerosolov med  $600$  in  $2.750 \text{ cm}^{-3}$ , od tega je bilo 90% delcev manjših od  $50 \text{ nm}$  (Iskra in drugi, 2010). Nadaljne raziskave v Postojnski jami ob turistični poti (Bezek in drugi, 2013) so pokazale, da je bila koncentracija aerosolov poleti nižja ( $700 \text{ cm}^{-3}$ ) kot pozimi ( $2.800 \text{ cm}^{-3}$ ). Poleti so prevladovali delci velikosti  $< 50 \text{ nm}$ , pozimi  $> 50 \text{ nm}$ , kar so razložili z zimskim vdorom hladnega zunanega zraka in prinosom zunanjih delcev v jamsko okolje.

Vplivi turizma na Škocjanske jame so bili prikazani tudi s spremljanjem aerosolov v zraku (Grgić in drugi, 2014). Najvišje koncentracije delcev  $PM_{10}$  so določili v obdobju od 8. do 20. avgusta 2012, in sicer  $15,3 \mu g/m^3$ .

Delce v zraku v kraških jamah so raziskovali tudi drugod po svetu. Tako so v turistični jami Ingleborough v Veliki Britaniji za avtogeni izvor aerosolov ob aktivnem vodnem toku

<sup>\*</sup> Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>\*\*</sup> ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

<sup>\*\*\*</sup> Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geologijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

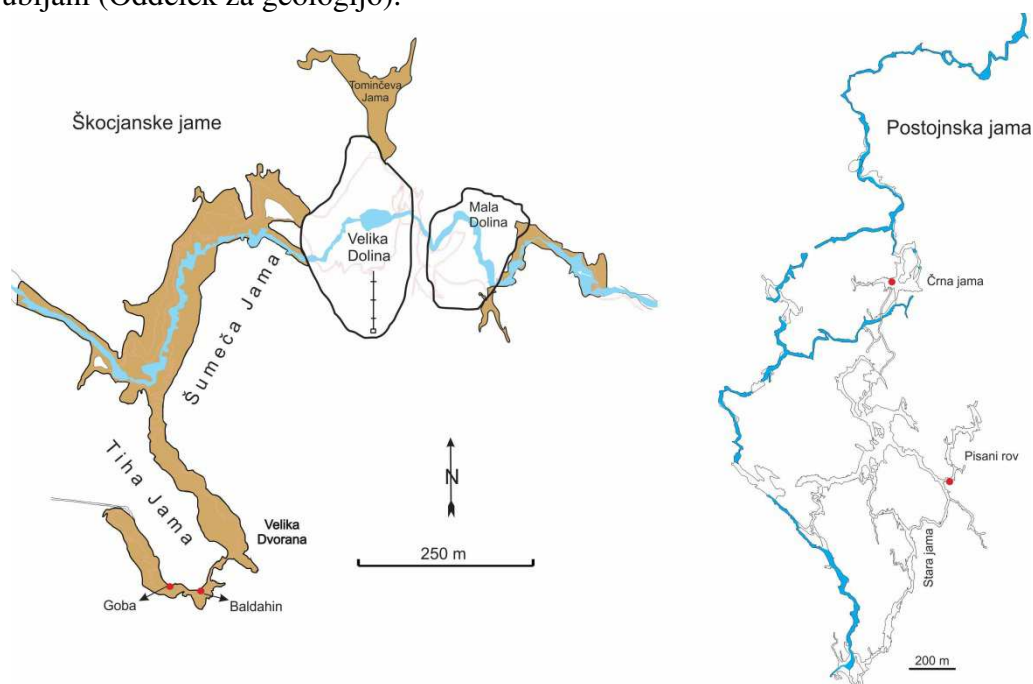
izmerili povišanje  $PM_{10}$  za  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prisotnost turistov je koncentracije aerosolov tudi povišala, in sicer za  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Smith in drugi, 2013).

Meritve delcev so izvajali tudi v povezavi z jamami, ki jih uporabljajo za speloterapijo. V jami Szemplőhegy pod Budimpešto so ugotovili, da se koncentracija aerosolov zmanjšuje z oddaljenostjo od vhoda v jamo in da onesnažena voda in atmosferski zrak predstavljata nevarnost za jame, ki so v UNESCOvi dediščini (Kertész in drugi, 1999).

Namen naše raziskave je bil primerjava meritev delcev v zraku s klimatskimi parametri (temperatura zraka,  $CO_2$  in smer gibanja zraka) v dveh obdobjih (zima in poletje) ob turistično obremenjeni in manj turistično obremenjeni poti v dveh kraških jamah. Izbrali smo najbolj obiskani jami v Sloveniji: Postojnsko jamo in Škocjanske jame. Zanimala nas je koncentracija in velikost delcev v zraku ter izvor delcev (prinos delcev iz zunanosti v jamo ali prenašanje delcev po jami).

## Metode

Na podlagi dovoljenja Agencije RS za okolje št. 35602-6/2018-2 z dne 14. marec 2018, smo v Postojnski jami in Škocjanskih jamah izvajali 2x7 dni zimskih in 2x7 dni poletnih meritev. Uporabljali smo inštrument za merjenje in vzorčenje delcev v zraku velikosti med  $0,25$  in  $32 \mu\text{m}$  in določanje masnih koncentracij  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  in  $PM_1$  Portable Laser Aerosolspectrometer Grimm 1.109 s konstantnim pretokom zraka  $1,2 \text{ l}/\text{min}$ . Raziskava se opravlja v sodelovanju med ZRC SAZU, Geološkim zavodom Slovenije in Univerzo v Ljubljani (Oddelek za geologijo).



Slika 1 – Mesta meritev delcev v zraku v Postojnski jami (Črna jama in Pisani rov) in v Škocjanskih jamah (Baldahin in Goba v Tihni jami).

Meritve delcev v zraku Postojnske jame (Slika 1) so se v Črni jami opravliale od 16.1.2017 do 23.1.2017 in od 28.8.2017 do 4.9.2017, v Pisanem rovu pa od 23.1.2017 do 31.1.2017 in od 4.9.2017 do 11.9.2017. V Škocjanskih jamah smo meritve izvajali na lokaciji Baldahin od 29.1.2018 do 5.2.2018 in od 30.8.2018 do 6.9.2018, na lokaciji Goba

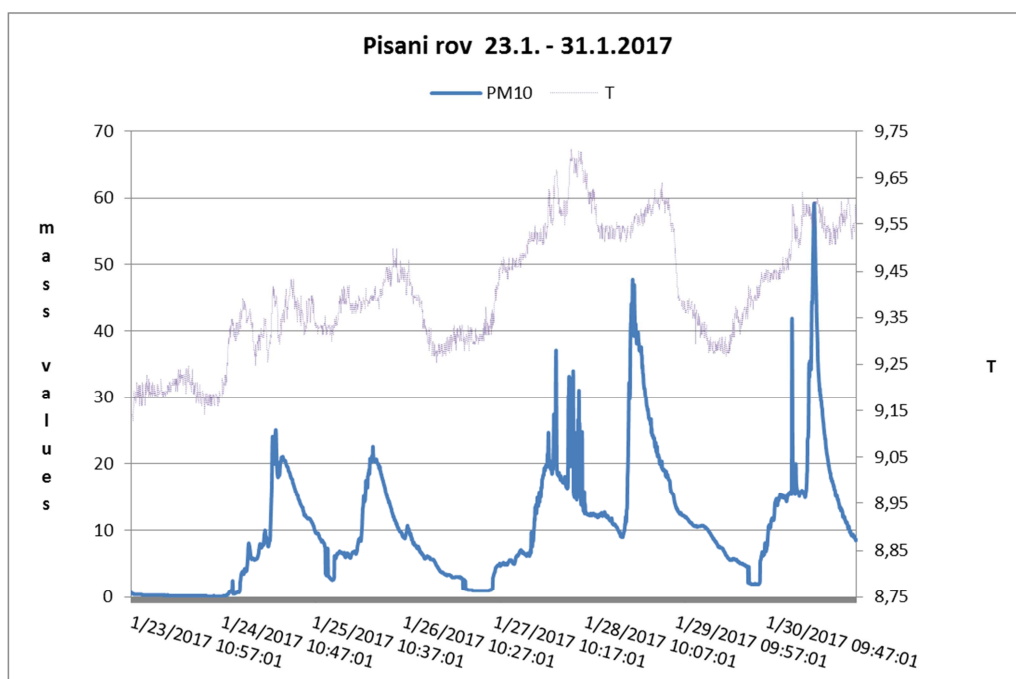
pa od 5.2.2018 do 12.2.2018 in od 6.9.2018 do 13.9.2018. Sočasno z meritvami delcev (merilni interval 5 minut) smo opravljali meritve temperature zraka (merilni interval 5 minut) in koncentracije CO<sub>2</sub> (merilni interval 30 minut).

## Rezultati

Čeprav smo meritve zvezno izvajali na štirih mestih (Slika 1) v tem prispevku podajamo prve rezultate le za dve merilni mesti, in sicer za Pisani rov v Postojnski jami in Baldahin v Škocjanskih jamah ter le za meritve delcev PM<sub>10</sub>.

### Postojnska jama

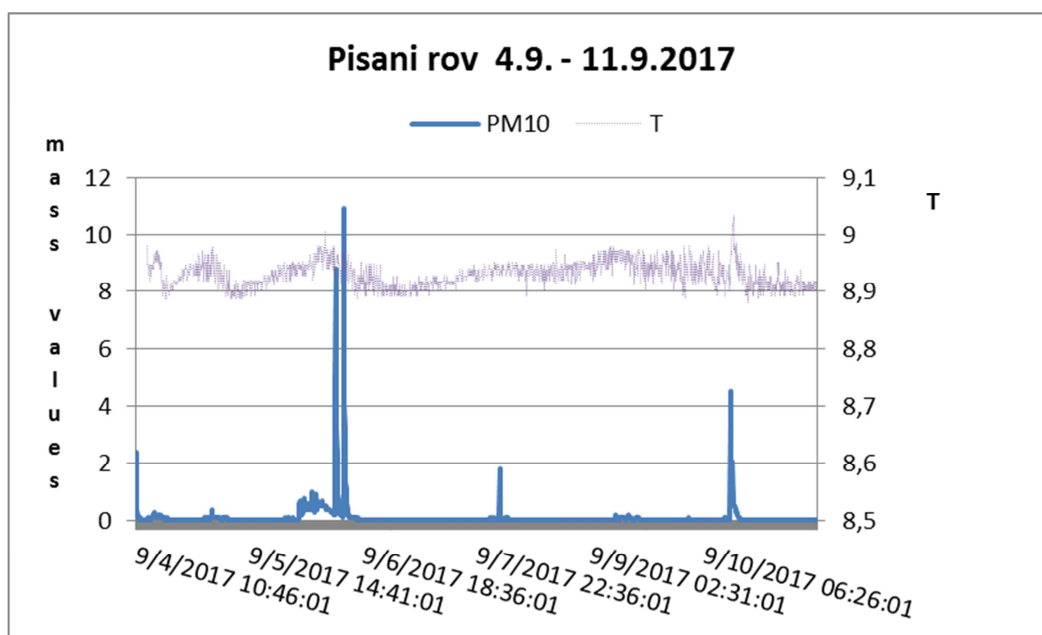
Na južnem vhodu v Pisani rov smo v zimskem obdobju zaznali povišanje koncentracij delcev v zraku v nočnem času (Slika 2). Glede na meteorološke razmere v jami je to obdobje, ko lahko zrak prihaja iz Pisanega rova v glavni rov (Stara jama) ali obratno. Ko piha iz Pisanega rova v Staro jama zaznamo povišane koncentracije CO<sub>2</sub> (24.1.2017 je bila koncentracija 1.320 ppm, 26.1.2017 pa 890 ppm). V tem obdobju nismo zaznali največjega povišanja količine delcev v zraku. Ko je smer vetra obrnjena, hladen zimski zrak prihaja skozi glavni vhod v Postojnsko jama, teče po Stari jami in vdira tudi v Pisani rov. V tem obdobju smo v Pisanem rovu predvsem v nočnem času opazili izredno povišane koncentracije delcev PM<sub>10</sub> do 60 µg/m<sup>3</sup>. Ker so v tem obdobju potekala obnovitvena dela na vhodnem železniškem peronu, so višje koncentracije delcev verjetno povezane prav s tem.



Slika 2 – Masne koncentracije [µg/m<sup>3</sup>] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [°C], Pisani rov pozimi, Postojnska jama.

Poletno obdobje (Slika 3) je pokazalo precej nižje koncentracije delcev (največ 10,9 µg/m<sup>3</sup> za PM<sub>10</sub> dne 6.9.2017 ob 13:50) ter bistveno bolj stalno temperaturo z majhnim

nihanjem. Ker je bila med meritvami koncentracija CO<sub>2</sub> v zraku precej visoka (povprečno 2.500 ppm), gre za verjetni doprinos delcev iz Pisanega rova v Staro jamo. Viški PM<sub>10</sub> bi bili lahko povezani tudi z vplivom turizma, zaradi posipanja tirnic s peskom za boljši oprijem pogonskih koles turističnega vlaka.

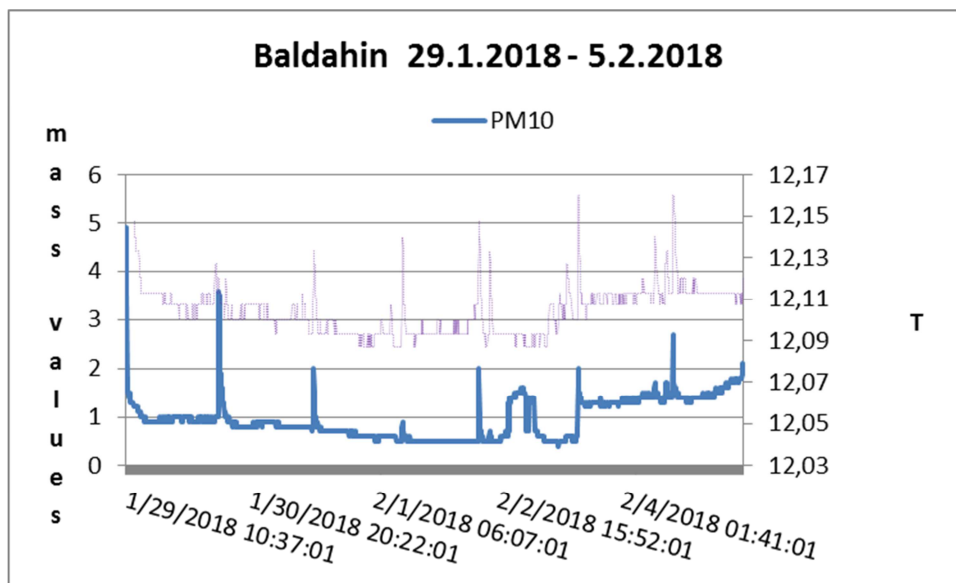


Slika 3 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Pisani rov poleti, Postojnska jama.

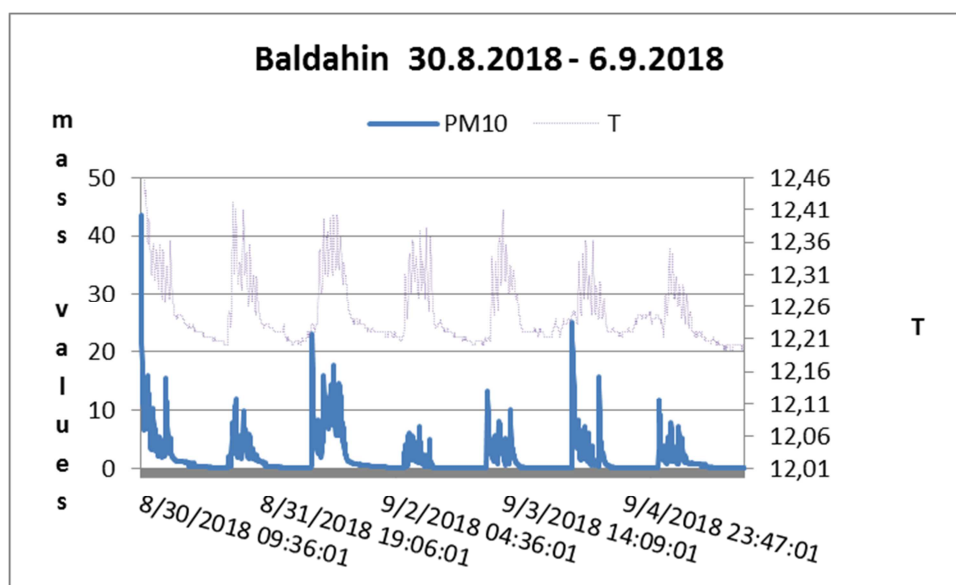
### Škocjanske jame

V Tihi jami v Škocjanskih jamah smo v zimskem obdobju (Slika 4) izmerili majhne vsebnosti delcev v zraku, vendar je ozadje pozimi nekoliko višje kot poleti (pozimi: 0,5 – 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , poleti: 0,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Viški PM<sub>10</sub> < 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se ujema z urnikom turističnih obiskov. Zimske koncentracije CO<sub>2</sub> v zraku so bile 560 – 660 ppm z nekaterimi odstopanji do 860 ppm. Količine CO<sub>2</sub> v zimskem obdobju so nizke, kar kaže na dobro zračenje v jami. Pozimi se zrak premika iz Tihe jame proti površju skozi umetni tunel, ko je zunanja temperatura nižja od jamske.

V poletnem obdobju (Slika 5) so najvišje koncentracije PM<sub>10</sub> do 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tudi poleti so povečane količine delcev v zraku povezane z dnevnimi turističnimi obiski, kar potrjuje tudi ujemanje nihanja temperature in količine delcev. Poletne koncentracije CO<sub>2</sub> v zraku so glede na zimske precej višje. Pri Baldahinu so poletne koncentracije do 3.300 ppm in sovpadajo s turističnimi obiski, ko se vsebnost CO<sub>2</sub> poveča zaradi prisotnosti ljudi. Brez prisotnosti ljudi bi bile poletne vrednosti CO<sub>2</sub> pri Baldahinu 2.000 – 2.600 ppm, kar je 3x višje kot pozimi. Če upoštevamo viške poleti (3.300 ppm) so poletne vrednosti kar 5x višje od zimskih. Poleti (Tzunaj>Tjama) topel zunanji zrak vdira skozi odprta vrata umetnega tunela do Baldahina.



Slika 4 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Baldahin pozimi, Škocjanske jame.



Slika 5 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Baldahin poleti, Škocjanske jame.

### Zaključek

Meritve delcev v zraku Postojnske jame in Škocjanskih jam so pokazale, da se glede na jamsko ventilacijo prašni delci lahko prenašajo daleč v notranjost jame (tudi 1,5 km ali več, npr. Pisani rov pozimi, Slika 2). Opazen je bil tudi velik vpliv obnovitvenih del na visoke koncentracije delcev, zaradi česar bi morali obnovitvena dela v turističnih jamah prilagoditi tudi razmeram jamske ventilacije.

Analize ob turistično obremenjeni poti v Škocjanskih jamah so pokazale odvisnost tako koncentracije delcev v zraku kot temperature od turističnega obiska (Slika 5).

Koncentracija delcev PM<sub>10</sub> je v zunanjem zraku višja kot v jami. V jamah je le dvajsetina tiste, ki jo zaznamo zunaj. To je najverjetneje zato, ker je v jami vlaga visoka in ne dovoljuje delcem PM<sub>10</sub>, da bi prosto potovali po jamskem prostoru. V splošnem pa povišane koncentracije delcev v zunanjem zraku vplivajo na povišano raven koncentracij v jamskem zraku.

Poleg zveznih meritev jamske meteorologije v turističnih jamah bi bilo priporočljivo tudi redno spremljanje količine delcev v zraku in občasno podrobno preverjanje, za kakšne vrste snovi gre.

Raziskava je del programa *Raziskovanje krasa (P6-0119) in projekta Krasoslovne raziskave za trajnostno rabo Škocjanskih jam kot svetovne dediščine (L7-8268) ter programa Mineralne surovine (P1-0025)*.

## Literatura

- Bezek, M., Gregorič, A. in Vaupotič, J. 2013. Radon decay products and 10-1100 nm aerosol particles in Postojna Cave. *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci.*, 13, 823-831, doi: 10.5194/nhess-13-823-2013.
- Grgić, I., Iskra, I., Podkrajšek, B. in Debevec Gerjevič, V. 2014. Measurements of aerosol particles in the Škocjan Caves, Slovenia. *Environmental science and pollution research international*, 21/3, 1915-1923, doi: [10.1007/s11356-013-2080-4](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2080-4).
- <http://www.okolje.info/index.php/kakovost-zraka/trdni-delci> (15.9.2018).
- Iskra, I., Kávási, N. in Vaupotič, J. 2010. Nano aerosols in the Postojna Cave. *Acta Carsologica*, 39/3, 523-528.
- Kertész, Z., Borbély-Kiss, I. in Hunyadi, I. 1999. Study of aerosols collected in a speleotherapeutic cave situated below Budapest, Hungary. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 150, 384-391.
- Smith, A.C., Wynn, P.M. in Baker, P.A. 2013. Natural and anthropogenic factors which influence aerosol distribution in Ingleborough Show Cave, UK. *International Journal of Speleology*, 42/1, 49-56, doi: 10.5038/1827-806X.42.1.6.