

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**ONESNAŽENOST ROVOV V POSTOJNSKI JAMI S
PRAŠNIMI DELCI**

DIPLOMSKO DELO

Aleksandra JOVIČIĆ

Mentorja: doc. dr. Andrej Mihevc
doc. dr. Gregor Muri

Nova Gorica, 2011

IZJAVA

Izjavljam, da je diplomsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Rezultati, ki so nastali v okviru skupnega raziskovanja z drugimi raziskovalci, ali so jih prispevali drugi raziskovalci (strokovnjaki), so eksplicitno prikazani oziroma navedeni (citirani) v diplomskem delu.

Aleksandra Jovičić

ZAHVALA

Za vsestransko pomoč in podporo pri raziskovanju in izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem mentorjema doc. dr. Andreju Mihevcu in doc. dr. Gregor Muriju, hvala predvsem za prijetno sodelovanje in spodbudne besede.

Za vso pomoč in podporo se zahvaljujem tudi sodelavkam na Agenciji Republike Slovenije za okolje Juditi Burger, Ireni Kranjc in Slavici Šerjak.

Posebna zahvala gre mami in mojim najbližjim, ki so me v času študija brezpogojno podpirali in dajali pogum, saj nikdar niso dvomili v moj uspeh.

POVZETEK

Jamski sistemi so izolirana, podzemna in zato specifična in ranljiva okolja, občutljiva na zunanje vplive. Njihov nastanek so omogočili posebni mikroklimatski pogoji, določena geološka podlaga in "neizmeren" čas, ki je za seboj pustil lepote v obliki čudovitih kapnikov in mnogih drugih kapniških oblik, od katerih vsak posebej govori posebno zgodbo. V "občutljivih jamah", predvsem v masovno obiskanih, se stopnjujejo in povečujejo posledice (neustreznih) sprememb. V turističnih rovih Postojnskega jamskega sistema se tako od vhoda pa do vznožja Velike gore pojavljajo obloge in usedline različno obarvanih prašnih delcev. V diplomski nalogi sem z opisi mikroklimata, kemično analizo težkih kovin v prašnih delcih in pesku (posipnega ob progi in originalnega) ter z določitvijo količine odloženih usedlin skušala določiti izvor prašnih delcev v Postojnski jami. V prašnih delcih sem določila koncentracije osmih težkih kovin (železo, aluminij, svinec, stroncij, cink, mangan, baker, krom) in sicer z masnim spektrometrom z induktivno sklopljeno plazmo (ICP-MS). Analize so pokazale povišane koncentracije železa (8,5%) in aluminija (nad 3%). Njuna koncentracija je bila bistveno višja kot v pesku, ki se uporablja za posipanje proge, kar kaže, da pesek ni glavni vir prašnih delcev v jami. Po drugi strani je bila koncentracija železa v pesku ob progi 2-krat višja v prašnih delcih kot v originalnem pesku, kar kaže na to, da se železo sprošča iz obrabljenih železniških tirov. Jamska železnica torej prispeva k nastanku prašnih delcev; notranja gibanja in prenašanje prašnih delcev vzdolž jame pa so posledica zimskega kroženja zraka, ko je jama suha. Ne moremo pa izključiti tudi naravnih izvorov prašnih delcev, npr. aluvialni sedimenti, ki jih je v zgornje turistične rove odložila reka Pivka. Glede na razporeditev vertikalnih in horizontalnih koncentracij lahko sklepamo, da se v več segmentih jame prepletajo antropogeni in naravni izvori, ki se odražajo v sestavi in količini nastalih usedlin prašnih delcev.

Ključne besede: Postojnska jama, jamski turizem, prašni delci/usedline, mikroklima, težke kovine.

SUMMARY

Cave systems are isolated, subterranean and therefore specific and vulnerable environments, sensitive to external impacts. Their formation was possible through presence of particular microclimatic conditions, certain geological surface formation/substratum, and "enormous" amount of time which has left behind beauty in the form of astonishing speleothems and many other forms of flowstone, where each and every single one speaks a special story for itself. In "sensitive" caves, especially massively visited ones, there has been a gradual escalation and increase of consequences of inappropriate changes. In tourist passages of Postojna cave system there is an occurrence of visible coverings and deposits of different colours of dust particles throughout the cave-from the entrance to the base of Velika gora. In the thesis, I have tried to determine sources of dust particles in Postojna cave with the description of microclimate, chemical analysis of heavy metals in the dust deposits and sand (fresh/unused and from railroad track), together with the determination of amount of deposited coverings. Chemical analysis of the composition and concentration of heavy metals (iron, aluminum, lead, manganese, copper, zinc, strontium and chromium) in dust particles was performed with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The analysis showed an increase in iron (up to 8,5%) and aluminum (up to 3%) concentration. Their amounts are distinctively higher than the concentration in sand used for sanding the railroad tracks, demonstrating that sand is not the main source of dust particles/deposits in the cave. On the other hand, the iron

concentration in sand taken from railroad tracks was twofold higher in comparison to unused/fresh sand, showing that iron is being released from railroad tracks (corrosion, wear and tear). Cave railway thus facilitates the formation and upward lifting of dust particles, whereas internal moving and transferring of dust particles are consequence of winter circulation of air, when cave is dry. On the same note, we cannot exclude natural sources of dust particles, for example: alluvial sediments which were deposited by Pivka river in upper tourist passages. Upon the distribution of vertical and horizontal concentrations, it is possible to conclude that anthropogenic and natural sources are intertwining in particular segments of cave system, reflecting the composition and quantity of incurred dust particles/deposits.

Keywords: Postojna cave, cave tourism, dust particles/deposits, microclimate, heavy metals.

KAZALO

UVOD	1
1.1 Namen naloge	1
2 TEORETIČNI DEL	2
2.1 Vpliv turizma na jamske ekosisteme	2
2.2 Mikroklima v jamskem ekosistemu.....	5
2.2.1 Pretok zračnih mas	5
2.2.2 Temperatura in vlažnost zraka	6
2.3 Mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu	7
2.3.1 Zimska mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu	8
2.3.2 Poletna mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu.....	10
2.4 Prašni delci v Postojnskem jamskem sistemu	12
2.4.1 Prašni delci in težke kovine	13
3 EKSPERIMENTALNI DEL	17
3.1 Opis lokacije terenskega dela	17
3.1.1 Opis makro-lokacije	17
3.1.2 Opis in lega Postojnskega jamskega sistema	18
3.1.2.1 Splošni podatki o Postojnski jami	18
3.1.3 Geološka sestava	19
3.1.4 Raba zemljišč in pokrovnost tal ob Postojnski jami.....	21
3.2 Vzorčenje.....	22
3.2.1 Odvzem vzorcev za določitev sestave prašnih delcev	22
3.2.2 Opis vzorčevalnih mest v Postojnski jami.....	23
3.2.3 Odvzem vzorcev za določitev količine odloženih prašnih delcev.....	25
3.3 Laboratorijsko delo	26
3.3.1 Priprava vzorcev za določitev sestave prašnih delcev	26
3.3.2 Analiza elementov v sledovih z masnim spektrometrom z induktivno sklopljeno plazmo	28
4 REZULTATI IN RAZPRAVA	29
4.1 Rezultati meritev sestave prašnih delcev	29
4.2 Rezultati meritev količine odloženih prašnih delcev	40
4.3 Povezave med težkimi kovinami in možni izvori.....	42
5 ZAKLJUČKI	46
6 VIRI	48

PRILOGA.....52

SEZNAM SLIK

<i>Slika 1: Obraba železniške proge in korozija</i>	4
<i>Slika 2: Posipani pesek na turistični progi</i>	4
<i>Slika 3: Izrazito barvanje nasipa z rjo iz tirov Slika 4: Koščki rje iz tirov na svežem neobarvanem nasipu</i>	4
<i>Slika 5: Ilovica v Pisanem rovu</i>	5
<i>Slika 6: Absolutna najnižja in najvišja mesečna temperatura zraka v Postojni</i>	8
<i>Slika 7: Dolgoletna povprečna mesečna temperatura in povprečna mesečna višina padavin v Postojni za 30 letno obdobje</i>	8
<i>Slika 8 : Zimsko stanje mikroklimе v Postojnski jami</i>	9
<i>Slika 9: Poletno stanje mikroklimе v Postojnski jami</i>	10
<i>Slika 10: Točke monitoringa temperature podzemeljske Pivke</i>	11
<i>Slika 11: Letna nihanja temperatur in pretoka na točkah T1-T7</i>	11
<i>Slika 12: Prašni delci, ki se usedajo vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	12
<i>Slika 13 : Lega mesta Postojna Slika 14 : Lega Postojnske jame</i>	17
<i>Slika 15: Glavni vhod v jamo Slika 16: Današnji ponor Pivke</i>	18
<i>Slika 17: Karta geološke sestave območja Postojnske jame</i>	19
<i>Slika 18: Pokrovnost tal v bližini Postojnske jame</i>	21
<i>Slika 19: Črn del jame Slika 20: Rjav del jame</i>	22
<i>Slika 21: Velika gora-spodaj Slika 22: Odvzem peska ob progi</i>	22
<i>Slika 23: Lega vzorčevalnih mest za določitev sestave prašnih delcev</i>	23
<i>Slika 24: Lega vzorčevalnih mest za določitev količine odloženih prašnih delcev</i>	26

<i>Slika 25: Prikaz vzorca v posodici s plaščem</i>	<i>27</i>
<i>Slika 26: Masni spektrometer z induktivno sklopljeno plazmo</i>	<i>28</i>
<i>Slika 27 : Povprečna koncentracija železa v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>30</i>
<i>Slika 28: Povprečna koncentracija aluminija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>31</i>
<i>Slika 29: Povprečna koncentracija svınca v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>32</i>
<i>Slika 30: Povprečna koncentracija stroncija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>33</i>
<i>Slika 31: Povprečna koncentracija cinka v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>34</i>
<i>Slika 32: Povprečna koncentracija mangana v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>35</i>
<i>Slika 33: Povprečna koncentracija bakra v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>36</i>
<i>Slika 34 : Povprečna koncentracija kroma v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>37</i>
<i>Slika 35 : Povprečna koncentracija aluminija in železa v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>38</i>
<i>Slika 36: Povprečne koncentracije svınca v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>38</i>
<i>Slika 37: Povprečne koncentracije mangana, cinka in stroncija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>39</i>
<i>Slika 38: Povprečne koncentracije kroma in bakra v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema</i>	<i>39</i>
<i>Slika 39: Količina odloženih prašnih delcev po posameznih merilnih točkah</i>	<i>41</i>
<i>Slika 40: Koncentracija težkih kovin v svežem pesku iz zabojnika.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 41: Koncentracija težkih kovin v posipanem pesku ob progi</i>	<i>43</i>

SEZNAM PREGLEDNIC

<i>Tabela 1: Letne temperature reke Pivke v točkah T1-T7</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2: Pretok reke Pivke v letu 2008</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3: Količina odloženih prašnih delcev na posameznih mestih v Postojnski jami</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4: Korelacija koncentracij težkih kovin po posameznih merilnih mestih.....</i>	<i>43</i>

1 UVOD

Poleg velikega števila parkov in zaščitene območij, najdemo na kraških, vodotopnih kamninah, ki prekrivajo približno 20% zemeljskega površja, tudi znatno število edinstvenih in raznolikih jamskih ekosistemov. Zaradi svojih izjemnih estetskih lastnosti mnoga taka mesta privabljajo množice turistov, ki v mnogih primerih s posrednim in neposrednim stikom povzročajo degradacijo občutljivega jamskega ekosistema. Največ težav izhaja iz tega, da večina upravljavcev naravnih vrednot in načrtovalcev parkov na območju krasa nepremišljeno posega v naravo. Jame in kras so običajno povezane s specifičnimi težavami ravno zaradi edinstvenega okolja, v katerem se nahajajo. Upravljavci nimajo ustreznih vzvodov ali mehanizmov, s katerimi bi lahko določili maksimalno število obiskov v najkrajšem času. Večina upravljavcev jam ni bilo uspešnih pri razreševanju specifičnih problemov, ki so povezani z dejavnostjo turizma v jamah. Gre predvsem za neustrezne posege v jamska tla, spremembe v kroženju zraka zaradi neupoštevanja posebnosti jamske klime in pomanjkanje opredelitve maksimalnega števila obiskov na časovno enoto brez povzročanja nepopravljive škode.

Raziskave na območju krasa in turističnih jam kažejo na nižanje stopnje biodiverzitete skozi čas in splošno degradacijo okolja, s tem pa tudi slabšanje doživetja za večino turistov (Hupper in sod., 1993).

Človeški vplivi naraščajo in postajajo v zadnjih 10000 letih vse bolj opazni. Naravne in antropogene dejavnike, ki vplivajo na spremembe, je včasih med seboj težko ločiti, običajno pa se razlikujejo v hitrosti in značaju sprememb, katere lahko ločimo od naravnega stanja (Williams, 1993).

Množični jamski turizem v Postojni se je pričel pred več kot stoletjem (Kogovšek in Kranjc, 1989). Vplivi turizma na kras in jamske sisteme pa se s časom stopnjujejo. Nekateri vplivi človekovega delovanja so lahko namerni, drugi pa so posledice neposrednih vplivov nenamernih dogodkov. V Postojnski jami, ki jo na leto lahko obiše tudi milijon obiskovalcev, so opazni antropogeni vplivi zaradi sprememb, ki vplivajo na temperaturo, relativno vlažnost zraka in CO₂ (Gams in sod., 1993). Obisk turistov, gradnja infrastrukture v ali ob jami, turistični vlak, odpiranje novih vhodov, običajno vodi v slabšanje kvalitete okolja neobnovljivega jamskega ekosistema. Razvoj turizma in posledice prilagajanja le-temu je v Postojnski jami pustil posledice, ki se med drugim kažejo tudi v pojavljanju usedlin prašnih delcev vzdolž jamskega sistema, ki slabšajo estetsko vrednost in potencialno vplivajo na biološke sisteme in nastanek kapnikov.

1.1 Namen naloge

Glavni namen diplomske naloge je bil ugotoviti izvor onesnaženja s prašnimi delci, ki se pojavljajo na površinah v Postojnskem jamskem sistemu in so lahko naravnega ali antropogenega izvora.

Cilji, ki smo si jih zastavili, so bili:

- določiti vsebnost težkih kovin (aluminij, železo, svinec, stroncij, cink, mangan, baker, krom) v prašnih delcih
- določiti količino odloženih prašnih delcev na znani površini
- ugotoviti ali so prašni delci posledica naravnega ali antropogenega izvora (turizem: obiskovalci, turistični vlak)

Metode in postopki, ki sem jih pri tem uporabila, so bili:

- vzorčenje prašnih delcev v Postojnski jami za določitev kemijske sestave (14 vzorcev)
- tehtanje količine odloženih prašnih delcev na znani površini (6 vzorcev)
- kemijska analiza prašnih delcev (aluminij, železo, svinec, stroncij, cink, mangan, baker, krom)

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Vpliv turizma na jamske ekosisteme

Jame vsako leto obiše na desetine milijonov ljudi (Gillieson, 1996). Postojnsko jamo je od leta 1819, ko so pričeli z beleženjem števila obiskovalcev, do leta 2011, obiskalo 34 milijonov turistov.

Katerakoli turistična raba neke jame zahteva določitev nosilne kapacitete, ki bi morala biti opredeljena na osnovi okoljskih parametrov znotraj ekosistema, ki na jamo vplivajo (Huppert in sod., 1993).

Svojstvena značilnost jamskega ekosistema je visoka občutljivost na spremembe, kar je pripeljalo nekatere znanstvenike (Aley 1976, Gillieson 1996) do opredelitve nosilne kapacitete jam na vrednost nič, kar pa je v primeru turističnih jam nemogoče. Nosilna kapaciteta v osnovi zahteva določitev mejne vrednosti, do katere se lahko neka vrednota izkorišča, kar je v primeru jam izjemno težko, saj se parametri v mikroklimatsko spremenjeni jami prostorsko in časovno zelo spreminjajo (de Freitas, 2010).

Zaradi prekomerne rabe v zadnjih desetletjih je hiter razvoj jamskega turizma "ušel" okvirnim načelom, ki določajo trajnostne načine upravljanja (Gillieson, 1996). Zato je temeljito razumevanje mikroklimatskih procesov še posebej pomembno pri upravljanju z masovno obiskanimi turističnimi jamami, kjer je vpeljava načel trajnostne rabe naravnih virov ali vrednot nujna (de Freitas, 2010).

Trajnostno upravljanje bi moralo vključevati določitev optimalnega nivoja okoljskega stanja v jami in uvedbo ustreznega monitoringa, s katerim bi turizem v jami lahko nadzirali in vzdrževali. Ustrezen in zanesljiv sistem monitoringa omogoča nadzor določenih ključnih okoljskih parametrov, kar zahteva dobro poznavanje mikroklimatskih pogojev, s katerimi lahko dosežemo ciljne standarde (de Freitas, 2010). Spremljanje in nadzor parametrov (monitoring) v turističnih jamah bi moral vključevati merjenje parametrov, neposredno opazovanje jame, zapisovanje podatkov v najširšem smislu, tudi o bioloških, fizikalnih (okoljskih) ter socialnih (obiskovalec) spremenljivkah (de Freitas, 2010). Na osnovi okoljskih podatkov bi bilo potrebno izdelati modele, ki bi določali način upravljanja in možnost rabe v različnih delih jame (Gillieson, 1996).

Pristop k upravljanju jam je tudi ugotavljanje stanja energije v različnih delih jame, kjer so aktivni deli običajno visoko energijski, zaradi visoke količine vode, ki se pretakajo skozi njih, in so zato manj občutljivi od nizko energijskih delov jame, kjer je okolje bolj stabilno. Suhi rovi (reliktni deli) jam so običajno nizko energijski in zato potencialno bolj občutljivi na spremembe, ki jih povzroča človek.

Za razliko od vertikalnih procesov izmenjave med površjem in atmosfero, potekajo v skoraj zaprti jami večinoma advekcijski fizikalni procesi, na katere vpliva predvsem temperatura.

V jamah je manjše dnevno in letno nihanje temperature, večja relativna vlaga, specifično število negativno nabitih delcev, manjše število mehanskih delcev, posebna koncentracija Ca^{2+} ionov, Mg^{2+} in NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , pH, aerosolov, povečana koncentracija radona (Panoš in sod., 1991). Jamska mikroklima pomembno vpliva na jamsko floro in favno, nekatere podzemne kraške procese ter hidrogeologijo kapniških tvorb (de Freitas, 2010).

Prisotnost ljudi v jami in dodajanje vhodov lahko vpliva na spremembo režima temperature in vlage v jami. Običajno so vplivi mnogi in različni, hkrati pa kumulativni in sinergijski (de Freitas, 2010). Osvetljenost jame in prisotnost obiskovalcev lahko spremenijo glavne okoljske parametre v jami (relativna vlaga, temperatura zraka, CO_2), kar med mnogimi drugimi negativnimi vplivi, povzroča degradacijo kapnikov zaradi pospešenih procesov kondenzacije in korozije (Quindos in sod., 1987, Pulido-Bosch in sod., 1997, Sanchez-Moral in sod., 1999). Osvetlitev jame na primer segreva okoliški zrak, kar pa lahko zavira rast kapnikov (de Freitas, 2010). Spremembe toplote, svetlobe, vlage in pretoka zraka ima lahko neposredne in posredne vplive na populacije organizmov (npr. dostop do hrane) (de Freitas, 2010).

Antropogeni vplivi spremembe mikroklima so lahko neposredni ali posredni, notranji ali zunanji.

Neposredni vplivi so: modifikacije vhodnih delov jame (odprtje, širitev, ipd.), izgradnja in raba turističnih pešpoti, prisotnost velikega števila obiskovalcev hkrati, ki lahko v nekaterih primerih višajo temperaturo zraka v jami; akumulacija prašnih delcev v jami, osvetljenost v jami lahko povzroča sušenje zraka idr. (de Freitas, 2010).

Spremembo v kroženju zraka lahko povzroči človek z razširitvijo vhoda v jamo ali odprtjem jame na površje. Žal se pri tem premalo zavedamo posledic. Če omogočimo vdiranje mrzlega zraka, zmrzal razkrajajo sigo. Če pospešimo kroženje zraka, se ob njegovem segrevanju povečuje sušenje vlage iz kapnikov in s tem nastajanje sive marogaste sige. Pri ohlajanju zraka se povečuje kondenzacija vlage, ki korodira in pospešuje rast kapnikov (Gams, 2003). Spreminjanje naravnega stanja jamskih vhodov, kot je širitev ali odkop zaprtega vhoda, lahko spremeni režim izmenjave zunanjega zraka z notranjim, kar lahko vodi v nenaravno, mogoče uničujoče segrevanje, hlajenje ali sušenje jamskih površin.

Akumulacija prašnih delcev v jami je lahko posledica velikega števila obiskovalcev, ki za seboj pustijo: nitke iz oblek, lase, luske suhe kože, ki poleg degradacije videza okolja vplivajo na dodaten vnos hrane oziroma energije za nekatere mikroorganizme, ki proizvajajo ogljikov dioksid (de Freitas, 2010). Prah nastaja tudi na železniških tirih in zapuščenih lesenih objektih, ki rjavijo ali ki predstavljajo vir hrane mikroorganizmom, kar lahko povzroča razpadanje objektov na majhne delce. V Postojnski jami na nastanek rje in razpadanje železniških tirov (slika št. 1) vplivajo: velika uporaba in obraba turistične proge, posipanje peska za povečevanje trenja po tračnicah (slika 2) vlaga v zraku in pronicajoča voda. Rja povzroča opazno obarvanje peska ob progi (slika št. 3), kjer so ponekod vidni tudi odpadli večji in manjši zarjaveli koščki proge (slika št. 4).



Slika 1: Obraba železniške proge in korozija



Slika 2: Posipani pesek na turistični progi



Slika 3: Izrazito barvanje nasipa z rjo iz tirov



Slika 4: Koščki rje iz tirov na svežem neobarvanem nasipu

V Postojnski jami je pred leti, bolj kot povečana količina CO₂ v zraku, motilo povečanje prašnih delcev, ki so jih vlaki dvigovali s tal, sveže posutih s peskom (Gams, 1971b).

Zračni tokovi, ki predvsem pozimi pihajo v notranjosti jame, lahko prenašajo in odlagajo prašne delce na kapniške tvorbe vzdolž jamskega sistema. To je možno takrat, ko so jamska tla in stene suhe in tam, kjer je velika prisotnost različnih delcev in peska na tleh in zraku. Možni izvori delcev so lahko: obraba električnega vlaka, na primer baker, železo, mangan idr., drobno zmleti delci peska, ki se uporabljajo za posip tirnic jamske železnice, sedimenti-illovica (slika 5), vnos alohtonih delcev/sedimentov s pronicajočo vodo, vnos prašnih delcev z zunanjim zrakom, izredni dogodki, na primer eksplozija goriva, gozdni požar idr.



Slika 5: Ilovica v Pisanem rovu

Posredni vplivi so tako imenovani *površinski učinki* odnašanja prašnih delcev iz okolice v podzemeljske dele jame, ki povzročajo neposredne spremembe sedimentacije, prenosa nečistoč in izpiranja v vodne tokove iz obdelovalnih in parkirnih površin, sprehajalnih stez ali turističnih objektov, na primer prodajaln, hotelov, sanitarij idr.

Mnogi omenjeni vplivi so kumulativni in imajo običajno velike posledice, saj je nastajanje jamskih ekosistemov izjemno počasen proces in jih prav zato uvrščamo med neobnovljive naravne vrednote.

2.2 Mikroklima v jamskem ekosistemu

Stanje jamske klime ali mikroklime in njihove vplive lahko določamo z osnovnimi parametri, ki opredeljujejo fizikalno stanje zraka: temperatura, vlažnost, gibanje zraka, zračni pritisk, vsebnost drugih plinov, na primer CO₂ (de Freitas, 2010). Vpliv pretoka zračnih mas na jamsko mikroklimo in razmere v jami sta opisala de Freitas in Littlejohn (1987).

Pretok zračnih mas in intenzivnost mešanja jamskega zraka z zunanjim je odvisna od različnih pogojev, tudi od razmerja med velikostjo vhoda in globino jame ter gibanja zračnega pritiska (Gams, 2003).

2.2.1 Pretok zračnih mas

Zemeljsko površje se ogreva in ohlaja skladno s temperaturnimi spremembami letnih časov. Toplota se počasi prevaja navzdol, spremembe temperature v tleh pa sežejo le do neke globine, ki običajno ni večja kot 20-30 m. V tej globini je temperatura približno izravnana s povprečno letno temperaturo kraja. Navzdol, z naraščajočo globino, temperatura narašča po geotermični stopnji, ki znaša okrog 1°C na 30 m globine.

Na krasu pa je to nekoliko drugače; toplota se prenaša v globino še s prenicajočo vodo in kroženjem zraka. Ta tok snovi in energije je lahko zelo intenziven in hiter.

Prenicajoča voda lahko ohladi kamnino le do ledišča, potem voda zamrzne in prenašanje toplote se ustavi. Pod temperaturo ledišča pa jame lahko ohladi le mrzel zrak. Najbolj pogosto se to dogaja v tistih jamah, v katere zaradi žepaste oblike in

velikega vhoda v hladni polovici leta priteka hladnejši in zato težji zrak. Ta iz jame izriva zrak, ki se je ob stenah že nekoliko segrel, in je zato nekoliko lažji. Kroženje zraka se ustavi tisti trenutek, ko se temperatura zunanjega zraka dvigne in v jami obleži inverzno jezero hladnega zraka. To se v jami vzdržuje tudi v topli polovici leta in preprečuje konvekcijsko dovajanje toplote. Zaradi tega mirujočega zraka imenujejo tak tip jam tudi statične jame.

Večja temperaturna nihanja opazamo v jamah dinamičnega tipa. Take jame imajo več vhodov, pogosto je en vhod velik, ostali pa so manjše, povečini neprehodne špranje. Pozimi priteka v jamo hladen zrak skozi spodnji ali večji vhod. Zrak se v jami segreje in se skozi višji vhod dviguje na površje. Ob večjih temperaturnih razlikah lahko v jamah zato opazamo vetrove, ki dosegajo hitrost več m/s, temperatura pa pade pod ničlo nekaj sto metrov daleč od vhoda v jamo.

Vtekajoči hladen zrak v podzemlju skali odvzema toploto, kar povzroča nižanje relativne vlage jamskega in segrevanje "zimskega" zraka. Zaradi tega odvzema vlago skali in tak del jame se pozimi izsuši. Pri tem pride na območju kjer je tok zimskega (mrzlega) zraka do izsuševanja vlage na skalnih površinah in nižanja vlage v zraku. Velike količine mrzlega zraka, v dinamičnih jamah lahko ohladi veliko večji del podzemlja, kot je to primer pri statičnih jamah. Zlasti ugodna lega za nastanek močnih zračnih tokov je pri jamah, katerih vhodi se nahajajo v različnih višinah.

V dinamičnih jamah se gibanja zračnih tokov ohranijo tudi v topli polovici leta. Običajno pride do preobrata. Zrak prične iztekati skozi spodnje vhode, skozi zgornje pa v podzemlje vteka površinski, topli zrak. Ko topli zrak pride v jamo, se ohlaja in relativna vlažnost zraka se poveča. S postopnim povečevanjem relativne vlage v zraku pride do kondenzacije na hladnejših jamskih stenah in tleh.

Gibanje zraka v jami je odvisno predvsem od oblikovanosti jame, števila vhodov in višinske razlike med vhodi oziroma deli jame. Hitrost in smer zračnih mas določa razlika v gostoti zraka (de Freitas in sod., 1982). Gostota zraka pa je pretežno funkcija temperature zraka. Izmenjava zračnih mas lahko poteka vse leto. Na zračenje jam vpliva tudi spreminjanje zračnega pritiska Gressel (1968). Ko tlak narašča, piha zrak v jamo; ko se bliža depresija (nizek tlak), pa piha zrak iz nje ven. Iz Postojnske jame pa zrak včasih ne piha, čeprav je temperatura na ploščadi pred njo do 21°C (Gams, 1971b).

Na gibanje vetra iz jame ali vanjo vplivajo še splošni vetrovi (na Primorskem burja), v vodnih jamah tudi dvig in upad vodne gladine (Gams, 1974, 2003). Do kroženja zraka, značilno za zimo ali poletje, prihaja včasih, zlasti po prehodu iz enega v drugi režim, tudi med toplim popoldnevom in hladno nočjo. Spomladi in jeseni jamam »vzame sapo«, ker je med temperaturo zraka zunaj in v jami manj razlik.

Ko se spomladi ozračje popoldne segreje, začne veter pihati iz vodoravne jame, saj mora zrak iz notranjih delov teči skozi vhodne dele, ki so se pozimi ohladili. Pri ohlajanju se iz zraka kondenzira na hladnejše stene in kapnike vlaga, ki pospešuje nastajanje črvičastih tvorb (Gams, 2003). Kondenzacija s sproščanjem toplote jame nekoliko segreva, izhlapevanje pa ohlaja (Eraso, 1965) in drobno razčlenjuje skalno površje (Slabe, 1988). Na izmenjavo zračnih tokov, ki določa stanje vlage in toplote v jami lahko vpliva zunanji zrak ali temperatura kamnine.

2.2.2 Temperatura in vlažnost zraka

Temperatura in stanje vlažnosti zraka sta osnovna parametra jamske klime. Ključnega pomena pri tem je, da je jamska klima rezultat vpliva advekcije toplote in vlage zunanjega zraka, katero spreminjajo notranji procesi prenosa toplote in vlage v

jami (de Freitas, 2010). Če ni horizontalnega gibanja ali transporta toplote hladnejših zračnih mas proti toplejšim (advekcija), prevzame jamska atmosfera značilnosti vlage in temperature kamnine, ki jo obkroža (naravno stanje jame). V nasprotnem primeru se v jamo stekajoči hladnejši zrak le postopoma "razkrajaja", vse dokler ne preide na koncu v ravnotežje z vlago in toploto kamnine, ki ga obdaja (Fernandez-Cortes, 2006, de Freitas, 2010).

Proces prenosa mase in toplote, ki določa prostorske in časovne "vzorke" stanja vlage in temperature jamske mikroklimе so:

- zunanja temperatura, relativna in specifična vlaga zraka
 - zaznavni in latentni prenos toplote na ali iz zraka, ki piha skozi jamo ter obdajajoče kamnine
 - prehajanje vodne pare med jamskim zrakom in kamnino
- (de Freitas, 2010)

Zrak med vdori zimskega hlada v jame kmalu doseže 100% relativno vlažnost. Če se še naprej segreva ob tej relativni vlažnosti, lahko izračunamo koliko vlage je osušil (Gams, 2003).

Ko v jami ni horizontalnih premikov zraka, preide ta sčasoma v ravnotežje z vlažnim zrakom in temperaturo kamnine, ki ga obkroža. Hladnejši zrak, ki se steka v jamo, se postopoma spreminja (in delno razkrajaja), vse dokler ne preide v ravnotežje s temperaturo zraka in kamnine, kjer prevladujejo bolj stabilnejši pogoji v jami. Vlažen jamski zrak se pri stekanju hladnega-zimskega zraka postopoma suši. Pri tem lahko izračunamo koliko vlage je osušil zimski zrak ob pritekanju v jamo in ogrevanju (Gams, 2003). Meritve vzdolž jame so pokazale, da je vsak dm^3 zraka med segrevanjem osušil v Postojnski jami do 4,87 mg vlage (Gams, 2002).

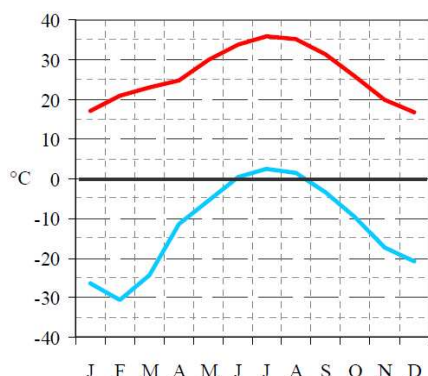
Poseben klimatski tip je jama s ponornico, ki je poleti, zlasti pa ponoči, toplejša kot zunanji zrak. Zato se iz take jame, kjer toplejša voda segreva podzemne prostore, vali vlažen zrak, tako kot vso zimo. Dinamična Postojnska jama je primer, kjer poleti suhi rovi svoj hladnejši zrak izlivajo v vodne jame tople Pivke. Tedaj piha skozi dihalnike v suhe rove zunanji toplejši zrak, v vodni jami pa se dviguje skozi pihalnike topel zrak na površje (Gams, 1974).

Na površini hladnejših sten v jamskem rovu pride do kondenzacije vodne pare, pri tem nastane voda, v katero lahko vstopa CO_2 iz zraka. Raztapljanje CO_2 v kondenzirani vodi povečuje kislost, ki povzroči raztapljanje CaCO_3 . Procesu pravimo tudi kondenzacijska korozija, kot jo je leta 2004 poimenoval James (de Freitas, 2010). Z večanjem vnosa toplejšega CO_2 se viša tudi korozija kapnikov zaradi kondenzacije na hladnejših kapnikih. Proces prehitrega izhlapevanja kondenzirane vode na površju kapnikov povzroča nasičenje kalcijevih in karbonatnih ionov, kar povzroča izločanje kalcija. Kalcij se obori oziroma izloča v obliki mehkega mikrokristaličnega, puhastega/krhkega kalcita. Pospešeno izhlapevanje vode in kondenzacija dodatno pospešuje kondenzacijsko-korozijski pojav (Tarhule-Lips in Ford, 1998).

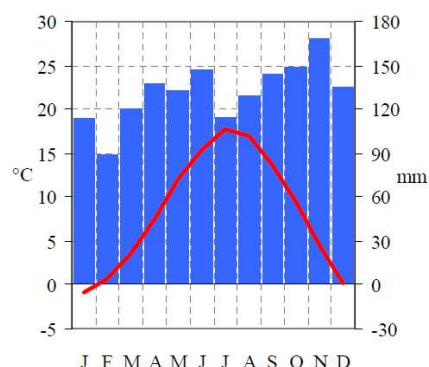
2.3 Mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu

Jamska temperatura je običajno blizu povprečne temperature območja, v katerem se nahaja. Povprečna letna temperatura v Postojni je $8,4^\circ\text{C}$, z minimalno-januarsko povprečno temperaturo $-0,9^\circ\text{C}$. Dolgoletna povprečna julijska temperatura v obdobju 1950-2007 je bila $16,7^\circ\text{C}$ (slika 6).

Povprečna letna višina padavin med letom 1951 in 1990 v Postojni je bila 1578 mm (slika 7) od tega jih 1000 mm ponikne v tla (Gams, 2003). Snežna odeja pa je prisotna v povprečju 100 dni na leto.



Slika 6: Absolutna najnižja (modra črta) najvišja (rdeča črta) mesečna temperatura zraka v Postojni za obdobje:1950-2006 (vir: Mesečni bilten, ARSO, 2007)



Slika 7: Dolgoletna povprečna mesečna temperatura (rdeča črta) in povprečna mesečna višina padavin v Postojni za 30 letno obdobje (vir: Mesečni bilten, ARSO, 2007)

2.3.1 Zimska mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu

Velik poseg v naravno stanje jamske klime je bil storjen, ko so leta 1864 odkopali z gruščem in podornim skalovjem zatrpan vhodni rov. S tem so omogočili izmenjavo velike količine zraka, ki poleti teče iz jame, pozimi pa v jamo.

Crestani in Anelli (1939) sta na osnovi opazovanj natančno opisala klimo v jami. Od takrat je bilo kar nekaj kratkotrajnih preučevanj mikroklimе, vključno z monitoringom parametrov, ki danes potekajo v jami.

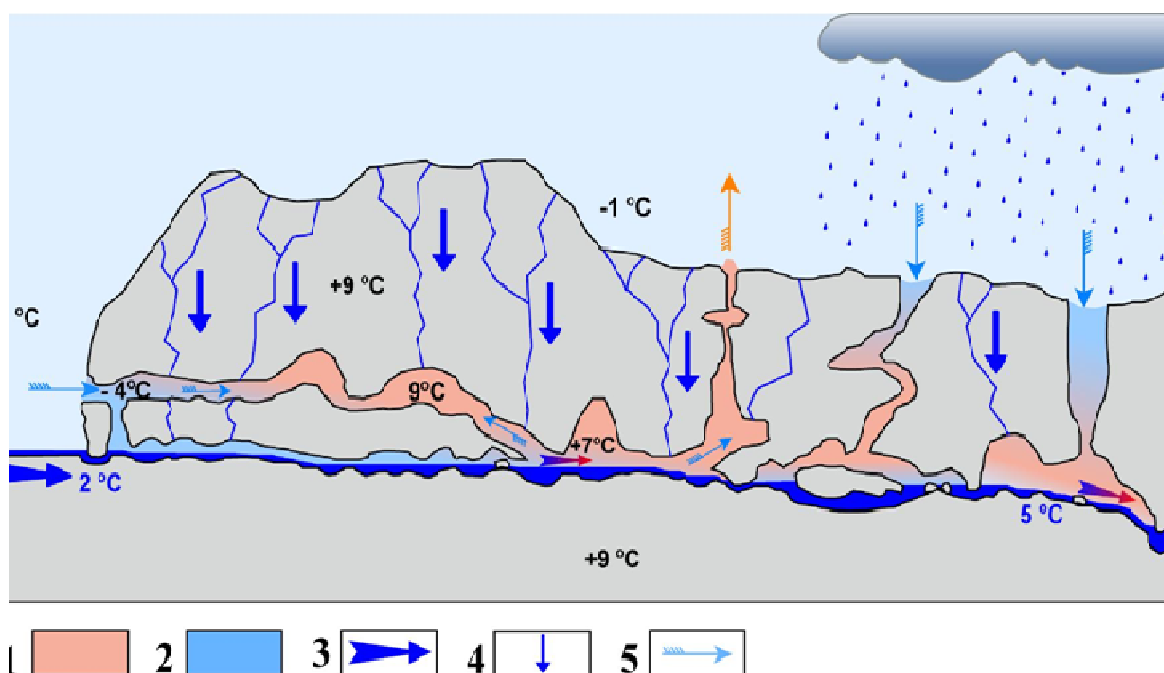
Zrak, ki vstopa pozimi skozi vhodni rov, se pretaka od Velike dvorane po rovu mimo Kongresne dvorane vse do Starih jam, kjer se tok pri Razpotju delno razcepi. Tok se razcepi v Male jame in Glavni rov, ki sega do vznožja Velike gore. Drugi tok teče po podzemeljski Pivki, ki zrak dodatno ohlaja do Magdalene jame in skozi spodnji Tartar v Velikem rovu. V Pivki jami segreva jamski zrak pozimi reka Pivka, ki v Črni jami običajno ne teče. Poleti piha iz notranjosti jame hladnejši zrak skozi Spodnji Tartar proti toplejši reki Pivki, skozi vhodne rove pa na prosto proti ploščadi. Zračni tlak izravnava toplejši zunanji zrak, ki priteka skozi dihalnike, teh je več kot deset (Crestani in Anelli, 1939). Zimski hladni zrak, ki doteka skozi vhod, se segreva, relativna vlaga se pri tem zniža, zato suši vlago na stenah in sigovih tvorbah v notranjosti jame proti Veliki gori. Sušenje seveda povzroči izločanje CaCO_3 , kar najverjetneje povzroča nastanek belega kalcitnega prahu, ki se odlaga vzdolž sistema, predvsem v začetnem območju Starih jam, kjer je dotok mrzlega zraka največji.

Tudi na območju, ki namenjen za turistično rabo, so kapniki v vhodnih delih temnejši in sivkasti. Zrak, ki piha v hladnem delu leta v jamo, odlaga, zlasti na ravnih zasiganih policah in kapniških stebrih, prah (Habe, 1976).

V zimskem obdobju se zrak iz jame dviguje skozi višje jamske vhode in/ali neprehodne razpoke na površje (Mihevc in Šebela, 2009). Tedaj se prične zrak stekati v jamo skozi spodnji vhod. Največji pretok zraka piha skozi glavni vhod, ko v toplejšo notranjost

jame vteka hladnejši zrak (slika 8), ki jamo hladi. Zrak se v jami ogreje, zato se zniža relativna vlaga. Zaradi tega ta zrak suši tudi jamske stene in tla. Hlajenje kamnitih površin in sušenje jamskega zraka povzroča tudi snežna voda s površja in tok reke Pivke.

Precej dolg jamski sistem, široki vhodi na različnih višinah, vtok reke Pivke, velika nihanja zunanjih temperatur in velika višina padavin so elementi, ki tvorijo kompleksen klimatski sistem. Na območju vhodnih delov jame in rogov so večja temperaturna in zračna nihanja ter spremembe v vlažnosti zraka, kot v notranjih delih (Mihevc in Šebela, 2009).



Slika 8 : Zimsko stanje mikroklimе v Postojnski jami

Številka 1 označuje toplejši zrak, 2 je hladnejši zrak, številka 3 predstavlja hladno Pivko, 4 so hladnejše padavine in staljena voda iz snežnih padavin, številka 5 označuje smer in gibanje zračnih tokov (Mihevc in Šebela, 2009).

Temperatura ob vhodu v jamo je enaka zunanji temperaturi zraka. Pozimi je to pogosto 0°C ali še manj. Po daljšem času hladnega vremena so jamski vhodi polni dolgih ledenih sveč, kar dokazuje, da hladni zrak močno ohladi vhodni del jame. Že pri Veliki dvorani se zrak segreje do 6°C; v razdalji okrog pol kilometra od vhoda v Kongresni dvorani pa nekaj čez 8°C (Habe, 1976). Do prvega kilometra v notranjost se razlike med zimo in poletjem zmanjšajo na eno stopinjo Celzija (0,1°C/100 m). Globlje v jami ima Glavni rov, kakor tudi večina jamskih rogov, manjše nihanje temperature le med 8,2 in 9,2°C (Gams 1970a, 2003). Karbonatna trdota pronicajoče vode ima v povprečju le od 180 do 210 mg/L raztopljenega CaCO₃. Le pri počasnem in razpršenem pretoku po visokem stalagmitu se njena trdota zniža na 95 mg/L. (Gams, 2003).

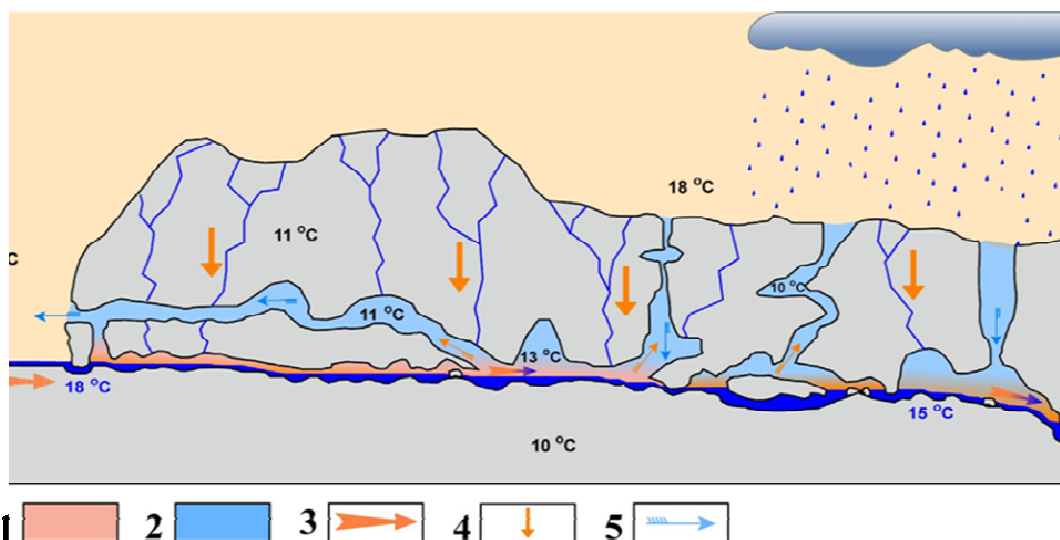
Temperatura pozimi včasih pade tudi do -20°C, kar povzroči zmrzovanje tal. Hladnejši zrak, ki potuje v notranjost jame skozi rov Starih jam, se hitro segreva in ima potem

temperaturo od 4 do 7°C, za razliko od stranskih rogov zraka pod stropom jame in na Veliki gori, kjer so temperature višje (8-10 °C). Hladnejši zrak, ki priteka od zunaj, vteka v rov pri tleh, toplejši zrak, ki ima temperaturo 5-6 °C pa se nad njim premika pod stropom v nasprotni smeri, proti izhodu.

Zimski mikroklimatski pogoji imajo dva pomembna vpliva na stanje v jami: krioturbacija in razpad ter luščenje kamnine zaradi nenehnega zmrzovanja in taljenja podlage. Nastanek ledu poveča pritisk na kamnini, kar povzroča večanje razpok in por ter drobljenje ob sprostitvi pritiskov ob taljenju. Krioturbacija je proces neenakomernega zmrzovanja, katerega posledica je lahko prekinitev in mešanje različnih horizontov, vključno z matično kamnino, sprememba orientacije skeletnih delcev itd. (Repe, 2006). Hladnejši zrak vpliva tudi na nižanje vlažnosti, kar suši in sčasoma segreva zrak v jami. V jami se zaradi sušenja pozimi parcialni parni tlak deloma zniža, kar lahko vpliva na rast kapnikov in nastanek kapniških tvorb ter nastanek prašnih delcev, katerih izvor je lahko razdrobljena kamnina, nastala s kondenzacijsko korozijo jamskih sten in kamninske podlage ter sedimentov, predvsem ilovice (Mihevc in Šebela, 2009).

2.3.2 Poletna mikroklima v Postojnskem jamskem sistemu

V poletnem času jamo segreva pronicajoča padavinska voda, reka Pivka ter zračni tokovi (slika 9). Poleti piha zrak skozi znane višje vhode in neznane razpoke v jamo, hladnejši jamski zrak v spodnjem vhodu (ob ponoru Pivke) pa odteka iz jame, kjer je temperatura višja. Toplejši zrak, ki vstopa v jamo, se ohlaja, kar povzroči kondenzacijo vodne pare v zraku. Kondenzirana vlaga se pojavi tudi na površini kapniških tvorb, zato se pozimi odloženi prašni delci zlepijo na podlago v toplejšem delu leta, ko je obiskov v jami največ.



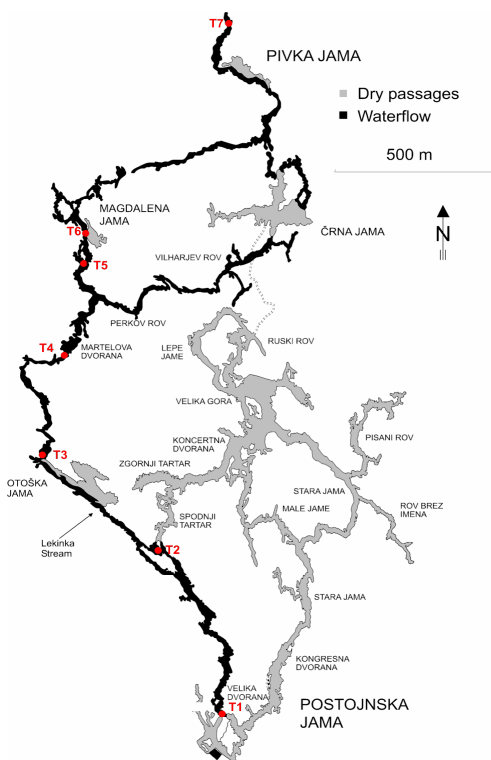
Slika 9 : Poletno stanje mikroklimе v Postojnski jami

Na sliki številka 1 označuje toplejši zračni tok, 2 je hladnejši zrak, 3 predstavlja toplejši tok Pivke, 4 so toplejše padavinske vode in 5 označuje gibanje in smer pretoka zračnih tokov (Mihevc in Šebela, 2009).

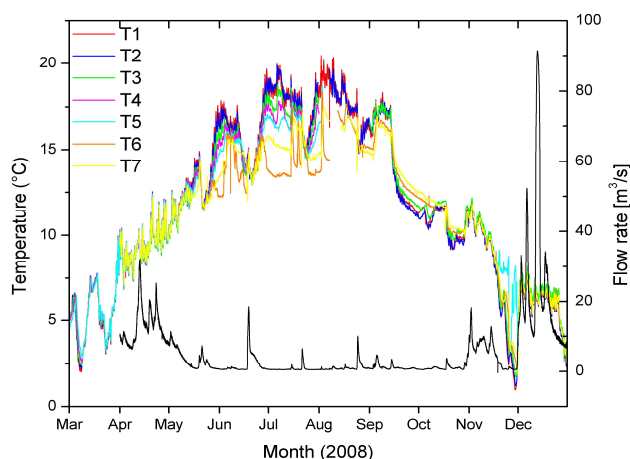
Reka Pivka je pomemben dejavnik izmenjave toplotne energije, ki pomembno vpliva na mikroklimo v jami. Reka je v preteklosti s fliša odnašala kamnine, predvsem kremen in

različne glinene minerale, ki jih je nato odlagala v zgornje in spodnje dele rovovskega sistema. Procesi odnašanja in odlaganja potekajo še *danes*. V zgornjih suhih delih rovoev so bili zaradi umestitve pešpoti in železniške proge (naravni) sedimenti večinoma prekriti z nasipi iz apnenca. Alohtoni vnos prašnih delcev od zunaj, železniška proga turističnega vlaka in nasipi danes potencialno ogrožajo jamo, predvsem zaradi izsuševanja in dvigovanja prašnih delcev iz tal.

Pivka kaže značilno sezonsko in dnevno nihanje temperatur površinskih voda (slika 10, tabela 1), ki se kažejo tudi globlje v podzemeljski Pivki. Nihanja so manj izrazita, ko sta gladina vode in pretok nižji (slika 11, tabela 2). V reki Pivki so temperature v ravnotežju z lokalnimi, oziroma se prilagajajo spremembam letnih temperatur. Z izračuni so ugotovili, da se med reko Pivko in kraškim masivom na leto izmenja približno 150 TJ energije (Mihevc in Šebela, 2009).



Slika 10: Točke monitoringa temperature podzemeljske Pivke (vir: Mihevc Šebela, 2009)



Slika 11 : Letna nihanja temperature in pretoka na točkah T1-T7 (vir: Mihevc Šebela, 2009)

Tabela 1: Letne temperature reke Pivke v točkah T1-T7 (slika 10) (Mihevc in Šebela, 2009)

	T _{povprečna} (°C)	T _{maksimalna} (°C)	T _{minimalna} (°C)	σ (°C)
Postojnska jama	10,4	19,2	0,2	5
Pivka jama	9,8	15,6	2	3,5

V letu 1997 je bila povprečna temperatura Pivke 10,4 °C (Mihevc in Šebela, 2009), s standardnim odklikom 5,5 °C.

Tabela 2: Pretok reke Pivke v letu 2008 (slika 11) (Mihevc in Šebela, 2009)

Q _{min} (m ³ /s)	Q _{povprečni} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
< 0,1	4	>50

2.4 Prašni delci v Postojnskem jamskem sistemu

Na stenah in kapniških tvorbah se vzdolž turističnega dela rova, predvsem ob vhodnem delu in območju Starih jam, pojavljajo različne (predvsem rjave in črne) usedline prašnih delcev (slika 12). Makroskopska opazovanja so pokazala odsotnost usedlin v bližnji Planinski ali Križni jami (Mihevc, osebna komunikacija). Izvor prašnih delcev je zaradi sprememb mikroklimе v jami lahko naraven in/ali antropogen. Naravni izvor delcev so lahko v začetnem delu aluvialni (rečni) sedimenti, ki jih je v zgornje (turistične) dele rova odložila reka Pivka. Antropogeni izvor prašnih delcev so lahko: železniška proga (korozija), vzdrževanje tračnic (brušenje, varjenje), posipanje peska na progo, obraba elektromotorja turističnega vlaka, obraba proge zaradi vožnje; zunanji-zimski vtok zračnih mas, ki v jamo vnaša prašne delce.



Slika 12: Prašni delci, ki se usedajo vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Največ prašnih delcev in oblog se nahaja v začetnih delih jame, medtem ko jih v stranskih rovih skoraj ni. Prisotnost usedlin in prašnih delcev so v preteklosti večkrat pripisali uporabi bakel in eksploziji bencina v drugi svetovni vojni. V začetku 19. stoletja so uporabo "sajastih" svetil prepovedali in zamenjali z električno razsvetljavo. Požar, ki se je zgodil zaradi eksplozije pred 67 leti, je bil izreden dogodek, ki je za seboj pustil črne obloge in osmojene površine le v ožjem delu območja nesreče. Črn del jame je od mesta eksplozije oddaljen približno 500 m, črn dim pa se je po pričevanjih meseca aprila delno stekal tudi v notranjost glavnega rova (proti Črni jami). Usedline in prašni delci so prisotni na površinah vzdolž turističnega dela rova oz. železniške proge turističnega vlaka in ne le na določenih območjih, zato gre najbrž za druge izvore prašnih delcev, predvsem v t.i. rjavem območju, ki se prične več sto metrov za ožganim

delu jame, konča pa pred vznožjem Velike gore. Največ rjavih usedlin je opaziti po t.i. Razpotju, nekaj sto metrov v smeri Velike gore, kjer je profil rova ožji in zato hitrost zračnega pretoka večji. Tu poteka usedanje večjih delcev. Ko se profil rova proti vznožju Velike gore razširi tudi do 4-krat, se debelina oblog zniža. Ob vznožju Velike gore prašnih delcev skoraj ni, ker se zračni tokovi tu dodatno razcepijo proti Veliki gori (Lepe jame in Ruski rov), Koncertni dvorani in Male jame.

Na oblogah in površinah je opaziti, da so bili prašni delci odloženi »nedavno«, zato so bile opravljene meritve temperature, vključno z določitvijo smeri in gibanja zračnih tokov ob vhodu jame in železniški progi turističnega vlaka (Mihevc in Šebela, 2009). Hladnejši zrak, ki prične pihati v jamo novembra, povzroča postopno sušenje tal od vhodnega dela do vznožja Velike gore. Na glavnem vhodu/izhodu se skozi profil s površino 30 m² steka zrak v notranjost, z največjo maksimalno hitrostjo 1,5 m/s (Mihevc in Šebela, 2009). 200 m od vhoda je temperatura približno 4°C, pod stropom pa 6°C. Stene, ki obdajajo rove, in kapniki so v hladnejšem obdobju suhe, prav tako ni pronicajoče vode skozi strop jame. Spomladi, ko zunanja temperatura preseže temperaturo jame, se zračni tok obrne. V jami se pričnejo kondenzacijski procesi zaradi postopnega segrevanja jame, kar povzroča vlaženje sten in kamnine, skozi strop prične pronicati voda.

Posebne razmere, ki se ustvarjajo pozimi, kažejo na to, da se prašni delci dvigujejo, prenašajo in usedajo le takrat, ko poteka sušenje zraka. Ko poteka vlaženje jamskih površin zaradi kondenzacije v poletnem času, se delci zaradi vodnega filma oz. vlage ne morejo dvigniti. V nasprotnem primeru bi s kroženjem zraka, ko se jamski zrak steka iz jame na vhodnih/izhodnih delih rova in ploščadi, bili vidni rjavi prašni delci oziroma usedline.

Delci se odlagajo povsod, kjer so stene nagnjene. Na popolnoma navpičnih in previsnih stenah prašnih delcev ni. Med predlogi za preprečevanje nastajanja prahu je bila tudi postavitev začasne zavese čez glavni vhod. S pregrado bi lahko preprečili tudi vnos prašnih delcev iz zunanjega zraka, prav tako bi zapora lahko preprečila izsuševanje ter odnašanje prašnih delcev iz podlage (Mihevc in Šebela, 2009).

Prašni delci in spremenjena mikroklima imajo negativen vpliv, saj slabšajo jamski videz. Potencialno lahko vplivajo na rast in izgled kapnikov ter so zaradi vsebnosti težkih kovin v delcih nevarni tudi za živi svet oziroma jamski ekosistem. Ciklično sezonsko ponavljanje izsuševanja in usedanja prašnih delcev pozimi in izpiranje zaradi povečane kondenzacije poleti lahko potencialno ogrozi tudi tla in podtalne vode.

2.4.1 Prašni delci in težke kovine

Aluminij

Aluminij ima oksidacijsko število +3. Aluminij je eden izmed najbolj razširjenih elementov v okolju in tretji najbolj razširjen element v zemeljski skorji (8%), takoj za kisikom in silicijem (Greenwood in Earnshaw, 1997). V naravi se nahaja predvsem v alumosilikatih, kjer je bolj razširjen v vulkanskih kamninah (živec-npr. granit), sljudah in vseh oblikah gline. Pri normalnih pogojih se ne raztaplja v vodi, tvori okside (Al₂O₃), hidride (AlH₃, LiAlH₄), hidratizirane katione ([Al(H₂O)₆]³⁺) in oksosoli (galuni-dvojne soli).

Je zelo reaktiven element, zato ga ne najdemo v prosti obliki kovine. Tvori več kot 270 različnih mineralov. Aluminij je široko uporaben v industriji in trgovini, najpogosteje za: gradbeništvo, transport, embalažo (pakiranje, pločevinke), električne vodnike, potrošniške izdelke, strojništvo in drugo.

Krom

Krom se v spojinah najpogosteje pojavlja s stabilnim oksidacijskim številom Cr^{3+} in Cr^{6+} . Cr^{3+} se nahaja v prsti in je zato naravnega izvora, medtem ko je strupen Cr^{6+} antropogenega izvora (WHO, 1988). Po pogostosti pojavljanja v zemeljski skorji zaseda 21. mesto, povprečna koncentracija pa je $100 \mu\text{g/g}$ (Emsley, 2001). Spojine kroma, ki jih najdemo v okolju, so posledica procesov erozije kamnin. V sedimentu se koncentracija giblje v povprečju med 1 in 3000 mg/kg (Kotaš in Stasicka, 2000). Krom pogosto tvori s svincem mineral kroit (PbCrO_4), najdemo ga tudi v mineralni rudi kromitu (FeCr_2O_4), iz katerega ga tudi pridobivajo. Cr^{3+} tvori številne spojine, najpogosteje oktaedrične molekule s šestimi ligandi. Cr^{3+} se zaradi podobnega atomskega radija (65 pm) lahko nadomesti z Al^{3+} (50 pm) v nekaterih spojinah. Krom se največ uporablja v industriji za proizvodnjo nerjavečega jekla (85%) zaradi nizke korozivnosti, kemični industriji, za galvanizacijo kovinskih predmetov, proizvodnji barvil (pigment), tekstilni industriji in livarnah.

Mangan

V naravi ga lahko najdemo v prosti obliki, največkrat skupaj z železom. V zemeljski skorji je približno $1000 \mu\text{g/g}$ ($0,1\%$) mangana, kar ga uvršča na 12. mesto po pogostosti pojavljanja. Sediment lahko vsebuje od 7 do $9000 \mu\text{g/g}$, kjer je povprečna koncentracija $440 \mu\text{g/g}$ (Emsley, 2001). V atmosferi ga je v povprečju $0,01 \mu\text{g/m}^3$ (Emsley, 2001). Največkrat se pojavlja v obliki piroluzita (MnO_2) in bravnita ($\text{Mn}^{2+/3+/6+}$).

Tvori mnoge spojine in minerale, saj lahko tvori številna oksidacijska stanja s števili +2, +3, +4, +6 in +7. Mn^{2+} je najpogostejša oblika oksidacijskega stanja, ki jo najdemo tudi v bioloških sistemih, kjer velikokrat "tekmuje" s Ca^{2+} ionom. Najpogosteje tvori sulfate (MnSO_4), kloride (MnCl_2), tvori tudi karbonate (mineral rodokrozit: MnCO_3).

Permanganati alkalijskih elementov in alkalijskih zemeljskih kovin so izjemno močni oksidanti.

V industriji ga uporabljajo za proizvodnjo Hadfieldovega jekla izjemne trdote (13% Mn), veliko se uporablja tudi v kemični industriji (manganov-fosfat: protikorozijski premaz za jeklo). Hidratizirani ioni prehodnih elementov so najrazličnejših barv, zato mangan uporabljajo tudi kot vir pigmentov v barvni industriji.

Manganove spojine so manj strupene v primerjavi z bolj razširjenim nikljem in bakrom.

Železo

Železo je glede na maso najpogostejši element, ki je sestavni del tako zunanega zemeljskega plašča kot tudi notranjega jedra. Po vsebnosti v zemeljski skorji pa je na 4. mestu, saj železo predstavlja približno 5% celotne mase, skupaj z nikljem pa tvorita 35% celotne zemeljske mase (Morgan in Anders, 1980). Železo tvori z drugimi elementi spojine, v katerih ima najrazličnejša oksidacijska stanja od -2 do 6+. V zemeljski skorji se skoraj vedno pojavlja skupaj s kisikom, pri čemer nastane mineral hematit (Fe_2O_3) in magnetit (Fe_3O_4). Je pomemben element v bioloških sistemih (encimi, gradnik hem proteinov idr).

Železo izjemno hitro korodira, ker zelo hitro reagira z atmosferskim kisikom in vodo, zato ta element v naravi najdemo v prosti obliki le tam, kjer je manj ali nič kisika. Železovi oksidi zasedajo več volumna kot samo železo, zato se velikokrat od površja odlučijo, kar postopoma povzroča uničenje železovih konstrukcij zaradi izpostavljanja zraku in vodi (McDonald in sod., 2010).

V industriji železo uporabljajo za proizvodnjo nerjavečega jekla, ki je trše in odpornejše proti koroziji (vsebuje 0,2-1,7% C, 18% Cr in 8% Ni), mnogi kemični produkti se uporabljajo za najrazličnejše namene.

Baker

Baker tvori z ostalimi elementi številne spojine, kjer ima najpogosteje oksidacijsko število +1 in +2. Počasi reagira z atmosferskim kisikom, kjer se na površini tvori rjavkast bakrov oksid, ki tvori stabilno plast, medtem ko bolj vlažen zrak lahko povzroča korozijo. Velikokrat se na površini materialov iz bakra tvori bela plast bakrovega karbonata, nastaja tudi bakrov sulfid (Holleman in Wiberg, 2001).

Je element, ki se v okolju pogostokrat pojavlja, širi pa se z naravnimi procesi. Baker največ predelujejo v kovinski industriji, široko pa je uporabljen tudi v kmetijstvu. V zadnjem času uporaba bakra vse bolj narašča, zato so se koncentracije v okolju tudi povečale. Baker vstopa v zrak predvsem prek izgorevanja fosilnih goriv, kjer vztraja v zraku vse dokler se s padavinami ne izpere v tla. Izvori bakra v okolju so antropogeni (električna napeljava, mineralna gnojila, metalurgija, lesna industrija idr.) in naravni (gozdni požar, razpad vegetacije, prašni delci, ki jih prenaša veter, idr.). Če baker pride v stik s sedimentom, se močno (kovalentno) veže na organski del in minerale ali vodo v sedimentu, zato ne potuje daleč in ne onesnaži podtalne vode (Hammond, 2004)

Baker v površinskih vodah lahko potuje na dolge razdalje v obliki suspenzije, blatnih delcev ali kot prosti ioni. Če je v okolju preveč bakra, se le-ta akumulira v vseh živečih organizmih, ker se v naravi ne razgradi (Prasad in sod., 2008).

Cink

Kemične lastnosti Zn^{2+} so podobne magnezijevim (velikost in oksidacijsko stanje). V zemeljski skorji se po pogostosti pojavljanja nahaja na 24. mestu, koncentracija pa je 75 $\mu\text{g/g}$ ali 0,0075%. Izvori so lahko naravni (tla, zrak, voda) in/ali antropogeni (industrija, strupeni odpadki idr.) (Emsley, 2001). Najpogostejši naravni izvori so v rudnini sfaleritu (60–62% Zn), cinkovem sulfidu (ZnS), smithsonitu (cinkov karbonat), hemimorfitu (cinkov silikat), wurzitu in redkem mineralu hidrocinkitu/marionitu (cinkov karbonat). V sedimentu se koncentracije cinka gibljejo med 5 in 770 $\mu\text{g/g}$, kjer je povprečna količina 64 $\mu\text{g/g}$. Povprečna koncentracija v atmosferi je med 0,1 in 4 $\mu\text{g/m}^3$ (Emsley, 2001) Cink se v rudi običajno pojavlja skupaj z bakrom in svincem (Lehto, 1968). Cink je kalkofilni, kar pomeni da ima nizko afiniteto do vezave s kisikom, raje se veže s sulfidi. Kalkofilne spojine so nastale, ko se je zemeljska skorja strjevala pod reducirajočimi pogoji, ki so takrat prevladovali v zemeljski atmosferi (Greenwood in Earnshaw, 1997).

Zaradi povečane rabe cinka v industriji se koncentracije, ki se v okolju pojavljajo, nenehno povečujejo. Zaradi človeške dejavnosti se lahko povečane koncentracije v okolju pojavljajo zaradi zgorevanja/uničevanja odpadkov, rudarstva, obdelave jekla, gnojenja ipd. Povečana količina cinka v vodi povzroči bioakumulacijo v vodnih organizmih, in ker je topen v vodi, lahko onesnaži podtalnico.

Stroncij

Stroncij je zelo reaktivna zemeljska alkalijska kovina. Kemične in fizikalne lastnosti so podobne kalciju in bariju. V spojinah tvori oksidacijska stanja s številom +2. Burno reagira z vodo, zrakom ali kisikom. Pri tem se tvori rumen stroncijev hidroksid in vodik. Zelo hitro korodira. Drobni delci stroncija na zraku spontano zgorijo, pri tem nastane

stroncijev oksid in stroncijev nitrid. Ker je zelo reaktiven, ga v prosti obliki v naravi ne najdemo. Najpogosteje se nahaja v stroncianitu (SrCO_3), celestitu (SrO_4) in dolomitu (Ober, 2008).

Je element, ki se naravno pojavlja v okolju, tvori pa približno 0,034% zemeljske skorje. Stroncij se pogosto pojavlja v sedimentu, zraku in vodi. Zlahka se prenaša na dolge razdalje, ker se dobro raztaplja v vodi. V atmosferi se nahaja tudi v prašnih delcih. Povečane količine v zraku so prisotne zaradi človeške dejavnosti. Vzrok so predvsem zgorevanje različnih olj in premoga. Delci se sčasoma s padavinami in snegom usedajo na različne površine (zemljo, površinska vodna telesa). V vodo lahko prehaja iz sedimenta in naravnih erozijskih procesov kamnine, manj pa iz atmosferskih prašnih delcev. Vzrok za povečano koncentracijo stroncija v vodi je običajno antropogenega izvora (nenadni izpusti iz industrijskih virov ipd). Izpusti prašnih delcev iz antropogenih virov se lahko vežejo na naravne prašne delce, kar poveča koncentracijo stroncija v suhi usedlini. Količina v tleh se lahko poveča zaradi odlaganja pepela iz zgolega premoga ali industrijskih odpadkov, kar lahko potencialno ogroža tudi podtalne vode. Povečana koncentracija povzroča bioakumulacijo v vseh organizmih.

Svinec

Svinec je element, ki je pri določenih koncentracijah zelo strupen (nevrotoksin, bioakumulacija). Izvori naravnega svinca v okolju so redki. V rudnini se običajno pojavlja skupaj s cinkom, srebrom in bakrom v mineralu galenitu (PbS), ceruzitu (PbCO_3) in anglezitu (PbSO_4). Večina svinca v okolju je posledica človekovega delovanja. Vir so največkrat fosilna goriva, h katerim so v preteklosti dodajali svinec zaradi preprečevanja predvžiga (klenkanja). Produkt zgorevanja so svinčeve soli, bromidi in oksidi (Atkins in sod., 1997). V okolje preide prek izpustov iz prometa. Večji delci se dokaj hitro usedajo na površje zemlje (tal) in vode. Manjši delci pa lahko po zraku potujejo na dolge razdalje in se zato dlje zadržujejo v atmosferi. Dodatno prehajajo v tla in vodo s padavinami. Kroženje svinca zaradi človekovega delovanja je mnogo bolj razširjeno, kot bi bil sicer v naravnem okolju, zato je onesnaževanje s svincom globalni problem. Drugi antropogeni viri svinca so: visoko temperaturni procesi, obdelava odpadkov, svinčene cevi, barve idr. Velike količine se nahajajo v bližini transportnih infrastruktur (predvsem avtocest) in kmetijskih površin. Svinec je v naravi obstojen zelo dolgo, ker spojine ne razpadejo, temveč se le preoblikujejo v drugačno spojino/obliko.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Opis lokacije terenskega dela

3.1.1 Opis makro-lokacije



Slika 13 : Lega mesta Postojna
(Atlas okolja, 2007)



Slika 14 : Lega Postojnske jame
(Atlas okolja, 2007)

Kras je geografska pokrajina na jugozahodu Slovenije, ki jo delimo na nizki primorski, nizki dinarski kras in visoki dinarski kras. Kras v Sloveniji predstavlja skrajni severozahodni del dinarskega krasa. Območje visokega dinarskega krasa, znotraj katerega leži tudi Postojnska jama, zavzema gorsko verigo, ki sega od furlanske nižine na severozahodu, vzdolž Jadranske obale do albanskih gora na jugovzhodu. K visokemu krasu prištevamo Banjšice nad dolino Soče, kjer si v smeri proti JV sledijo Trnovski gozd, Hrušica, Nanos, Javorniki in Snežnik do reke Kolpe na Dolenjskem. Postojnska jama se nahaja na severovzhodnem robu Pivške kotline. Pravokotno kotlino iz nepropustnih eocenskih flišnih kamenin obdaja Nanos na zahodu, Hrušica na severu, Javorniki na vzhodu in Snežnik na jugu. To so zakrasele planote visokega Dinarskega krasa. Te planote, vključno s porečjem Pivke, pripadajo porečju Ljubljanice oziroma Save. Razgibano dno pivške kotline se nahaja med 500 in 750 m nadmorske višine, obdajajo pa jo nad 1000 m visoke vzpetine, z najnižjimi obodnimi prevali na jugozahodu, ki so visoki 100-150 m (Gams, 2003).

Neprepustno območje fliša se razteza znotraj območja višjega roba, ki je pri Razdrtem povezan s flišem Vipavske doline. Polje prekinjata dva večja apneniška otoka ali ravnika, kjer se iz prvega, Slavenskega ravnika stekajo vode proti Timavi oziroma Krasu. Drug ravnik, bolj znan pod imenom Orehovški kras, se razprostira na dnu kotline. Vode iz apneniške leče zbira večji izvir Korentan, voda pa odteka v Nanoščico oziroma Pivko. Iz tega izvira je pred napeljavo vodovoda iz Malnov zajemal postojnski vodovod (Gospodarič in sod., 1970).

Skozi apneniški obod na severu in severozahodu vode samo odtekajo, skozi vzhodno gorato obrobje v Javornikih pa obodno odtekajo in pritekajo. Zato pretok Pivke, ki zbira vode na vzhodnem robu kotlinskega dna, najbolj niha med višjim povprečnim stanjem v zimski polovici in nizkem stanju v času vegetacijske rasti, zlasti poleti (Gams, 2003).

Na severozahodu se obodni gorati-apneniški rob nekoliko razširi in zniža na predelu, ki povezuje Hrušico in Javornike. Imenujemo ga Postojnska vrata. Na njem se zbirajo

prometne poti od severa, ki se pri Postojni spet razcepljajo proti jugu, Kvarnerju in zahodu, Tržaškem zalivu. Avtocesta in železnica med Uncem in Postojno se vzpeneta tu na približno 612 m nadmorske višine, t.j. 62 m nad Postojno in 100 m nad ponorom Pivke (Postojnska jama) (Gams, 2003). Ugodna geografska lega prispeva k velikemu številu obiskovalcev jame.

3.1.2 Opis in lega Postojnskega jamskega sistema

3.1.2.1 Splošni podatki o Postojnski jami

Reka Pivka je Postojnsko jamo oblikovala s procesom postopnega poglobljanja (erozija, korozija, akumulacija) v manj odpornem apnencu. Pivka je s postopnim pronicanjem širila razpoke in lezike (stik skladov), dokler niso iz njih nastali predori in rovi, tako da je tekla skozi pod zemljo. S svojim tokom je odnašala sedimente, katere je deloma odlagala ob bregovih pred jamo, deloma pa v jamskem sistemu (Gospodarič, 1976).

Pivka je med Pivško kotlino in Planinskim poljem na površini 20 km² ustvarila 20570 m dolg sistem, h kateremu sodijo suhi rovi ožje Postojnske jame, jama podzemeljske Pivke do Tartarja, Lekinka, Otoška jama, podzemeljska Pivka med Otoško in Magdalena jama, Črna jama in Pivka jama. Sistem, ki ga povezuje Pivka, je razdeljen v skoraj samostojne jamske enote z ločenimi vhodi (Habe, 1976). Postojnska jama obsega 11235 m, Črna jama 3294 m, Pivka jama 794 m, Otoška jama 632 m, Magdalena jama 1395 m in podzemeljska Pivka 3220 m.

Prvotni, to je najvišje ležeči rovi, so sčasoma postali suhi, zato voda teče le po najnižje ležečih rovih (Kranjc, 2007). Prvotni rovi, kjer so danes vhodi v turistične dele jame, ležijo na 529 m nadmorske višine (slika 15: vrata 1819 in nekdanji vhod, danes izhod sta na nadmorski višini 529 m). Kasneje je reka izdelala za približno 18,5 m nižje ležeče rove, tako da se današnji ponor Pivke nahaja na 511 m nadmorske višine, ki v času daljših nalivov voda zastaja pred ponorom in se razlije v jezero pred Postojnsko jamo (slika 16). Včasih voda ne poplavi le bližnjih parkirišč, temveč tudi most, ki pelje proti Velikem Otoku (Kranjc in sod, 2007).



Slika 15: Glavni vhod v jamo
(vir: Mihevc A., 2004)



Slika 16: Današnji ponor Pivke (vir: postojnska-jama.si, 2006)

Reka Pivka teče od ponora do Velike dvorane po rovu, ki je zalit z vodo do stropa. Med obema svetovnjima vojnoma so na višini gladine požiralnika izvrtali predor, da je lahko voda hitreje odtekala. Ta rov pa ni zalit z vodo. V Veliko dvorano vodita tudi dva rova, skozi katere danes poteka glavni vhod/izhod v turistični del jame. To sta manjši suhi

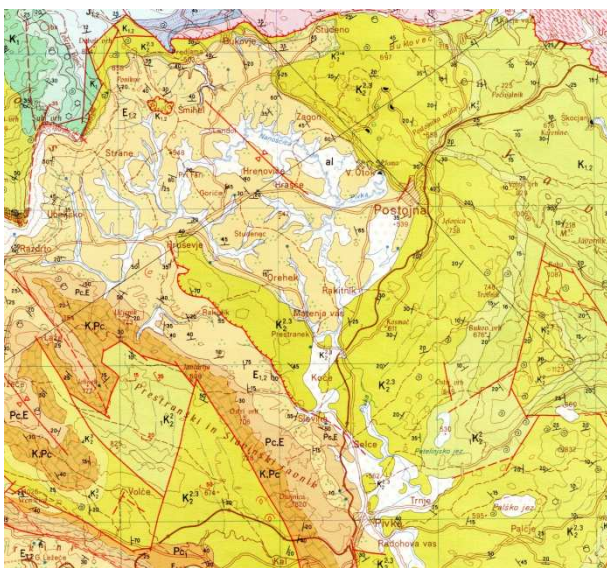
ponor oz. rov, ki je zaprt s polnimi vrati, nad njim pa je na portalu letnica 1819 in 10 m oddaljeni glavni vhod v jamo, v katerega so umeščena velika železna, rešetkasta vrata iz leta 1864.

Glavni vhod vstopa v 8 m visok suhi rov, ki je bil zasut z rečno naplavino in gruščem do leta 1864, ko so ga odkopali in tako odprli sedanji vhod v jamo. Istega leta so v vhod namestili železna rešetkasta vrata, ki stojijo še danes.

Stara jama imenujemo območje rova od vhoda do Velike gore. Strmec nekdanjih rovov od vhoda proti Veliki Gori enakomerno pada (5‰). Današnja turistična pot v Postojnski jami poteka vzdolž Glavnega rova ali tako imenovane *Stare jame*. Ožji Postojnski jamski sistem obsega 11235 m, od tega obsega turistična pot v glavnem rovu 5000 m. Pot delno obsega vožnjo z električnim vlakom, ki vključuje 3200 m dolgo vožnjo mimo Kongresne dvorane, Razpotja vse do vznožja Velike gore, od koder turisti nadaljujejo z ogledom preko Velike gore peš. Vlak pelje po umetnem predoru, do Koncertne dvorane in tam počaka na turiste, da se vrnejo iz ogleda. Vožnja turistov z električnim vlakom po dvotirni-krožni železnici poteka od 1964 leta.

Turistična pešpot je dolga približno 1800 m. Vodi preko Velike gore v dolžini 500 m, v Lepih jamah in Ruskem rovu 900 m, od Ruskega rova do Koncertne dvorane pa 400 m. Tu turisti spet vstopijo na vlak, ki jih zapelje po isti poti proti izhodu jame. Turisti izstopijo v Veliki dvorani ter se napotijo proti izhodnim in velikim kovanim železnim vratom.

3.1.3 Geološka sestava



Slika 17: Karta geološke sestave območja Postojnske jame
(vir: Geološki zavod Slovenije, 2006)

Dno Pivške kotline, ki jo obroblja višji apneniški rob, sestavlja pretežno fliš iz srednjega in spodnjega dela eocena, medtem ko so okoliške planote iz krednega apnenca, ki pri robnem delu kotline na zahodu ob ravnih prehajajo v paleocenski apnenec. Poleg apnenca tu najdemo tudi vložke dolomita, ki pa se bolj poredko pojavljajo. Tanek rob krednega apnenca pri vasi Studeno ločuje eocenski fliš na jugu od manjšega območja triasnega glavnega dolomita na severu, ki preide v jurske apneniške sklade (slika 17).

Po Gospodariču (1976) je Postojnska jama razvita v zgornje-krednih apnencih, nagubanih v postojnsko antiklinalo, ki je nagnjena proti SZ za 20-25°. Večina prelomov je v smeri SV-JZ, veliko vodoravnih zmikov je v smeri S-SV-JZ in SV-JZ. (Gospodarič, 1984; Čar, 1982)

Skladi krednega, na jugozahodnem robu senonskega, ob njem turonskega apnenca, padajo v glavnem proti meji s flišem. Rovi sledijo lezikam ter prelomom v smeri S-J, V-Z in JZ-SV (Gospodarič, 1963). Reka Pivka je včasih ponikala bolj severozahodno, kjer je ustvarila ob ponorih daljše rove (Risnik), ki so povezani z Otoško jamo. Zato sta Otoška jama in prvotno z njo povezani del Stare jame-Tartar med najstarejšimi deli Postojnskega jamskega sistema. Zelo stara rova sta tudi Rov brez imena in Pisani rov (Gams, 1974).

Gospodarič (1976) je ugotovil, da so najstarejše naplavine belega roženca in preperelega flišnega proda. Sledijo naplavina s flišnim peskom in ilovico do Ruskega rova (tudi prod), na vrhu so ponekod še rdečkaste ilovice, prenesene iz površja, in mlajša siga. V najmlajši seriji so flišne ilovice med sigo. Ker v najvišjih rovih ni pisanega roženca, ki je povsod vrodu in pesku na flišu kotline, zastopan pa je beli roženec, se sklepa, da je prvotno skozi jamo tekla proti vzhodu samo reka z apnencev na vzhodnem robu Pivške kotline (Gams, 2003).

Jame večinoma vsebujejo obsežne in litološko raznovrstne jamske zapolnitve, od sige od alogenih fluvialnih jamskih sedimentov. Alogeni klastični sedimenti izvirajo iz enega vira (eocenski siliciklasti iz Pivške kotline). Majhne razlike v mineralni/petrološki sestavi med sedimenti lahko pripisujemo različni stopnji preperevanja v povodju in homogenizaciji izvornega sedimenta. Najpogostejši so drobnozrnati sedimenti, pogosti v debelih sekvencah. Sedimentirani so bili iz suspenzije. Sedimentacijsko okolje je bilo večinoma mirno, vendar ne popolnoma stoječe. Taka sedimentacijska okolja lahko opišemo kot jamsko jezersko ali kot usedanje iz pulznih tokov. Jamski sistem kaže na dolgotrajen razvoj, pogojen z razvojem Planinskega polja. Splošna stabilizacija hidrološkega sistema z majhnim gradientom je v zelo dolgem časovnem obdobju vodila do razvoja jam v epifreatičnih conah in paragenetskih pogojih (Zupan-Hajna in sod., 2008).

Siga (sigova skorja) in kapniške tvorbe v zgornjih rovih so nastale z izločanjem sekundarnega minerala-kalcita iz vode, ki pronica skozi strop jame. Rahlo kislja deževnica (ogljikova kislina), ki prehaja skozi zrak in kamnino se dodatno obogati s CO₂ in ostalimi ioni, ki izvirajo iz raztopljene kamnine, delno tudi iz razpadle organske mase v zgornjih plasteh. Ogljikova kislina ob pronicanju skozi karbonatne kamnine (apnenec), le-te topi. Pri tem se tvorijo kalcijevi in hidrogenkarbonatni ioni. Oblika kalcita je lahko zelo različna. Odvisna pa je od lastnosti raztopine, katera odraža kemijsko in s tem mineralno sestavo raztopljene kamnine. Ob poružitvi fizikalnega in kemijskega ravnotežja lahko pride do izločanja mineralov iz kapljajoče, tekoče, mezeče, ujete in kondenzne vode oz. raztopine prenasičene s kalcijevim karbonatom, v obliki sige. Do poružitve pride ob prehodu v jamski prostor, zaradi spremembe parcialnega tlaka CO₂ in temperature, pri čemer se prične izločati kalcijev karbonat.

Siga se izloča različno hitro. Lahko zraste nekaj milimetrov v nekaj desetletjih ali pa tisočletjih, odvisno od količine padavin, sestave kamnine in deleža CO₂ v prsti nad jamo, kar vpliva na trdoto pronicajoče vode. Izločanje samo pa je odvisno od pogojev v jami, predvsem hitrosti izhajanja CO₂ iz nasičene raztopine, pa tudi od izhlapevanja vode.

Najstarejši deli sistema (Pisani rov), so stari od 280000 do 530000 let. V analiziranem kapniku iz tega rova naj bi bilo središčno rdečkasto jedro staro 350000 let, rjava siga

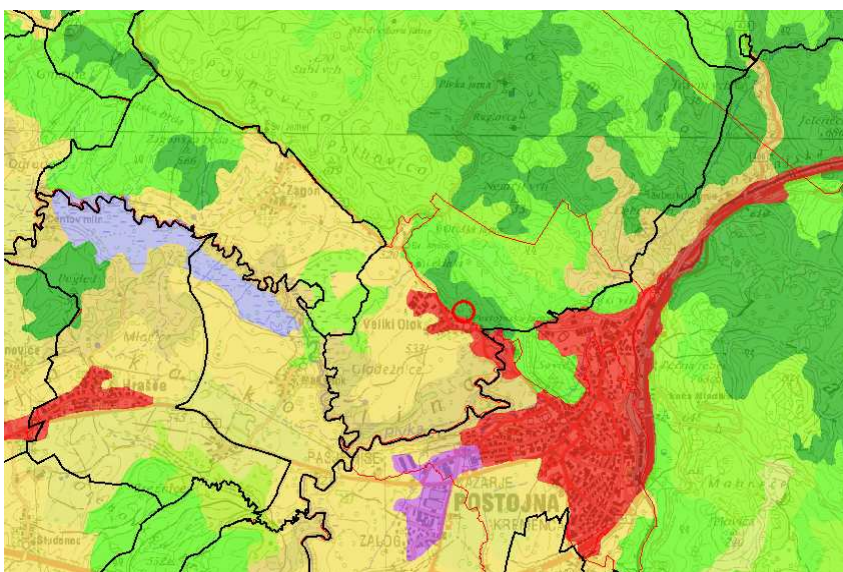
268400 let in 130000 let, zunanja rjavo bela siga pa 76000 let (Zupan 1991, Zupan, Hajna, 1993).

Mineralna sestava sige je odvisna od prisotnosti ostalih ionov v raztopini, kar se odraža tudi v barvi. Karbonati, katerih nastanek in obstoj je vezan na nizke do srednje temperature, se lahko povezujejo v romboedrične karbonate, kjer je karbonatni anion (CO_3^{2-}) lahko povezan s kationi: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} ali v rombične s Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} in Pb^{2+} .

V slovenskih jamah so v kapnikih v zelo majhnih količinah drugi minerali, med njimi na primer železo, magnezij, mangan, natrij,svinec, nikelj, krom idr.) (Kogovšek, 1992).

Barva sige je lahko različna, od popolnoma bele, drap, rumene, rdeče, rjave, sive do črne. Na barvo kalcitne sige vplivajo prisotni kationi železa v raztopini (rumeno, rjavo, rdeče), mangana (sivo, črno), bakra (zeleno), žvepla (rumeno). Sigo obarvajo tudi nanese mulj, glina, prah in organsko gradivo (rjavo, črno). Najbolj bela je ponavadi čista, drobnokristalna siga, medtem ko je debelokristalna večkrat rahlo rumeno ali rjavo obarvana. Alohtoni klastični minerali v jamah odražajo njihovo izvorno nekarbonatno kamnino, ki je lahko v neposrednem kontaktu s krasom, v katerem je jama, ali pa je precej oddaljena. Taki minerali so kremen, mikroklin, plagioklazi, klorit, rutil, goethit in drugi (Zupan in Knez, 1992; Kogovšek in Zupan, 1992).

3.1.4 Raba zemljišč in pokrovnost tal ob Postojnski jami



Slika 18: Pokrovnost tal v bližini Postojnske jame (vir: Atlas okolja, CRC 2006)

Površine označene z rdečo (slika 18), so neskljenjene urbane površine (Postojna). Odmaknjen otoček v smeri proti SZ predstavljajo v južnem delu površine namenjene za turistično rabo Postojnske jame: parkirišča, trgovine, hotel Jama in Jamski dvorec, sanitarije in naselja Veliki Otok. Z rožnato je označena industrijska cona in trgovinski kompleksi. Z rumeno so ob robu mesta označene kmetijske površine z drobno posestniško strukturo, ki od roba mesta in gozda prehajajo v kmetijske površine z večjimi območji vegetacije, vključno s pašniki. Temno zelena označuje iglasti gozd, svetlejša mešani gozd, najsvetlejša zelena pa listnati gozd, kjer so deloma ohranjene tudi naravne površine. Modra označuje celinsko barje oz. z vodo namočene površine.

3.2 Vzorčenje

3.2.1 Odvzem vzorcev za določitev sestave prašnih delcev

Območja in način odvzema vzorcev so bila določena z namenom pridobitve podatkov o sestavi vzorca in količini odloženega depozita oz. prašnih delcev na določeni površini, s čimer smo želeli dognati vire in razširjenost odlaganja delcev vzdolž turistične poti na območju Postojnskega jamskega sistema.

Z raziskavami smo pričeli oktobra 2010, ko smo se v jamo napotili, da bi si lahko "usedline" prašnih delcev pobliže ogledali ter določili razširjenost vzdolž Glavnega rova v Postojnskem jamskem sistemu, ki je pretežno obsegal območje proge turističnega vlaka in pešpoti za turiste.

Na osnovi ogleda smo decembra 2010 izvedli predhodno analizo sestave prašnih delcev na petih točkah vzdolž Glavnega rova. Določili smo sestavo in okvirne koncentracije za 18 elementov v sledovih ter se na podlagi meritev odločili za spremljanje tistih elementov, katerih koncentracije so bile nad mejo detekcije (merljive) oziroma povišane.

V prvem delu smo določili tri točke za odvzem prašnih delcev, pri odvzemu peska za posipanje pa dve. Vzorčenje smo izvedli v črnem delu jame (slika 19), rjavem delu jame (slika 20), ter na Veliki Gori (slika 21). Odvzeli smo dva vzorca peska za posipanje, enega ob progi 2200 m od vhoda v jamo (slika 22), drugega pa iz zabojnika za posip, ki se nahaja ob vhodu v jamo.



Slika 19: Črn del jame



Slika 20: Rjav del jame



Slika 21: Velika gora-spodaj



Slika 22: Odvzem peska ob progi

Za prvi odvzem vzorcev smo uporabili plastične (polistiren, polietilen) vrečke, ščetko, deionizirano vodo in rokavice. Rezultati sestave obeh peskov in prašnih delcev na treh točkah so zajeti v Prilogi D.

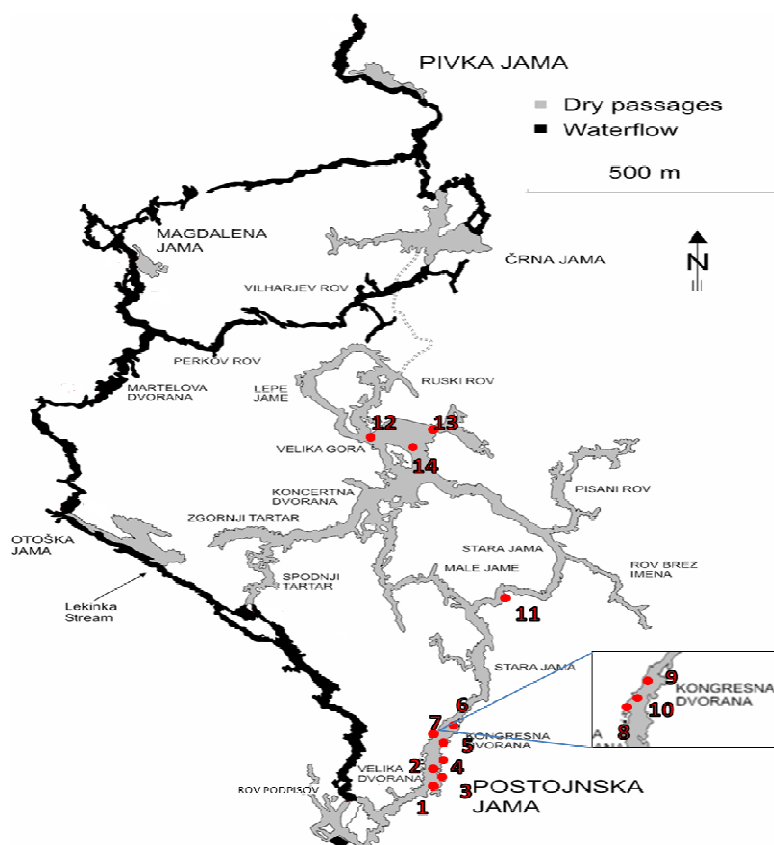
Po končani predhodni analizi sem opredelila točke vzorčenja za določitev sestave in količine prašnih delcev na površinah vzdolž jamskega sistema.

Drugi del vzorčenja sem izvedla februarja 2011. Vzorčenje je potekalo vzdolž 2,5 km trase turističnega vlaka, vključno z območjem turistične pešpoti.

Odvzela sem 14 vzorcev prašnih delcev vzdolž rovov (slika 23), z začetkom v črnem delu jame (1), ki se nahaja v neposredni bližini vhoda v jamo, po katerem si sledijo še območje pred Kongresno dvorano (2, 3, 4), Kongresna dvorana (5, 6, 7, 8, 9, 10), »rjavi« del jame (11), in Velika Gora (12, 13, 14). V črnem in rjavem delu jame sem vzela posamezne vzorce usedlin, medtem ko sem pred Kongresno dvorano in na območju Velike gore vzela tri vzorce na treh različnih višinah za določitev vertikalnega profila usedanja prašnih delcev na različnih višinah v jami. V Kongresni dvorani sem odvzela tri vzorce na dveh različnih višinah (skupaj 6 vzorcev), s katerimi sem na posamezni višini želela določiti horizontalni profil usedanja delcev in na ta način ugotoviti homogenost vzorcev.

Točke odvzema vzorcev se med seboj izrazito razlikujejo po barvi depozita, značilnosti prašnih delcev (tekstura), oddaljenosti od vhoda, nadmorski višini, stopnji izpostavljenosti sistema posrednim in neposrednim antropološkim vplivom. Za obširnejši odzem vzorcev sem uporabila: destilirano vodo, rokavice, plastične petrijevke, ščetke in čistilno raztopino (HNO_3 :destilirana H_2O =1:2). Prašne delce sem s ščetko previdno postrgala v plastično petrijevko, pokrila s pokrovom in ustrezno označila, nato zatesnila s samolepilnim trakom ter do začetka analize v laboratoriju hranila v hladilniku pri 4°C na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO).

3.2.2 Opis vzorčevalnih mest v Postojnski jami



Slika 23: Lega vzorčevalnih mest za določitev sestave prašnih delcev

V jami so na stenah prašni delci, ki so obarvali naravne jamske stene in tla v različne barve. V začetnem delu so stene obarvane črno, v notranjosti jame pa so površine

prekrite z rdeče rjavo obarvanimi oblogami. Te makroskopsko dobro opazne prevleke so nam bile v vodilo pri izbiri lokacij za vzorčevanje.

Črni del jame

Območje Črnega dela jame obsega približno 20 m širok, 10 m visok in približno 500 m v notranjost segajoč rov, ki je predvsem v začetnem delu prekrit z do nekaj mm debelo plastjo črnih, grudastih, mastnih in vlažnih prašnih delcev (slika 23-točka 1).

Črn del jame ima črno sajasto barvo, verjetno zaradi požiga fosilnih goriv leta 1944. Zaradi eksplozije ter vročine so na tem območju in bližnji Veliki dvorani ponekod odpadli kapniki, s stropa pa so se odkrušili veliki skalni bloki. Delni vzrok za črno obarvanost in sajaste površine je lahko tudi uporaba bakel od leta 1818 dalje za razsvetljavo jamskega rova do Velike gore. Bakle so prepovedali že leta 1830, ko so jamo pričeli osvetljevati z oljnimi svetilkami in svečami, pritrjenimi na stene jame. Črno obarvanje površin lahko "povzročajo" tudi železovi in manganovi oksidi. Vzorec sem odvzela v začetnem delu rova, približno 10 m vzhodno od železniške proge, na višini 1 m od tal oziroma železniške proge.

Pred Kongresno dvorano

Pred Kongresno dvorano se rov razširi tudi do 40 m, strop se zviša za 5 do 10 m. Tu sem vzorce vzela na treh višinah (slika 23-točke 2, 3, 4), z namenom določitve vertikalne porazdelitve prašnih delcev. Vzorec na najnižjem-spodnjem delu sem vzela tik ob progi iz kapnika/kope na V strani proge, približno 1 m nad tlemi (točka 2). Vzorec iz sredine sem odvzela na približni višini 10 m od tal, na predelu do koder se vzpenja nekdanja pešpot, ki danes služi za prihod do električne omarice za razsvetljavo na vzhodni strani proge (točka 3). Vzorec na najvišjem nivoju sem odvzela približno 10 m višje od sredinskega nivoja, iz zasiganih polic na steni, torej 20 m nad železniško progo (točka 4). Med srednjo in višjo točko so odloženi stari sedimenti reke Pivke. Prah ima drobno teksturo, vendar vključuje tudi grobe delce s kamenčki.

Kongresna dvorana

Pred vhodom v Kongresno dvorano nenadno pride do zožitve predora. Kongresna dvorana je od vhoda oddaljena 500 m, nahaja se 80 m pod površjem. Dvorana je 12 m visoka, široka je približno 40, dolga pa 50 m. Na zahodni strani dvorane se nahajajo betonske stopnice, ki vodijo do zasiganega otočka na višini 2,5 - 3,0 m.

V Kongresni dvorani sem odvzela po tri vzorce na dveh različnih višinah. Tri vzorce, na treh različnih točkah, sem odvzela na približno enaki višini (slika 23-točke 5, 6, 7). Prvi vzorec sem odvzela na vzhodni strani proge iz slabo zasigane stene, na višini 1,5 - 2,0 m (točka 5). Točka odvzema se nahaja na območju, kjer turistični vlak vstopi v dvorano. Drugi vzorec sem odvzela čisto na koncu, na vzhodni strani dvorane ob tunelu, kjer vlak zapusti dvorano (točka 6), tretjega pa na zahodni strani dvorane kjer vlak vstopa v dvorano, približno 10 m stran od proge turističnega vlaka (točka 7). Ostale tri vzorce sem odvzela na zasiganem otočku, na približni višini 3 m od tal in 15 m stran od proge (slika 23-točke 8-10). Prvi vzorec na višjem nivoju sem vzela iz površine večje kope, približno 2 m levo od betoniranih stopnic (točka 8). Drugega 2 - 3 m v desni smeri od stopnic na isti višini (točka 9). Tretji vzorec sem odvzela severno od stopnic, v nekoliko bolj oddaljenem hodniku, izza večjih bolj črno obarvanih kopastih kapnikov, ki vodi do nekdanje pešpoti do Velike Gore (točka 10). Oddaljenost od stopnic je bila približno 5 m, od proge pa 20 m.

Po Kongresni dvorani pride do zožitve rova na širino 10 m, katerega zožitev meri približno 80-100 m po dolžini v notranjost jame. Zaradi zožitve rova je tu hitrost zračnega pretoka povečana.

Rjav del jame

Rjav del jame se prične približno 500 m od vhoda v jamo in obsega območje rova vse od vhoda Kongresne dvorane mimo Razpotja do vzhodnega Velike gore (končna postaja jamske železnice). Površina sige je v tem območju rdečkasto – rjavo obarvana, zaradi večje količine drobnega rjavega prahu. Odložena plast prahu je debela največ 2 mm, depozit je zelo suh, delci niso sprijeti v grudice. Vzorec sem vzela ob vzhodni strani tračnic, iz vodoravne, police, ki je bila 1,5 m visoko od tal (slika 23 - točka 11). Celoten rjavi del jame zajema območje rova dolžine 1000 m.

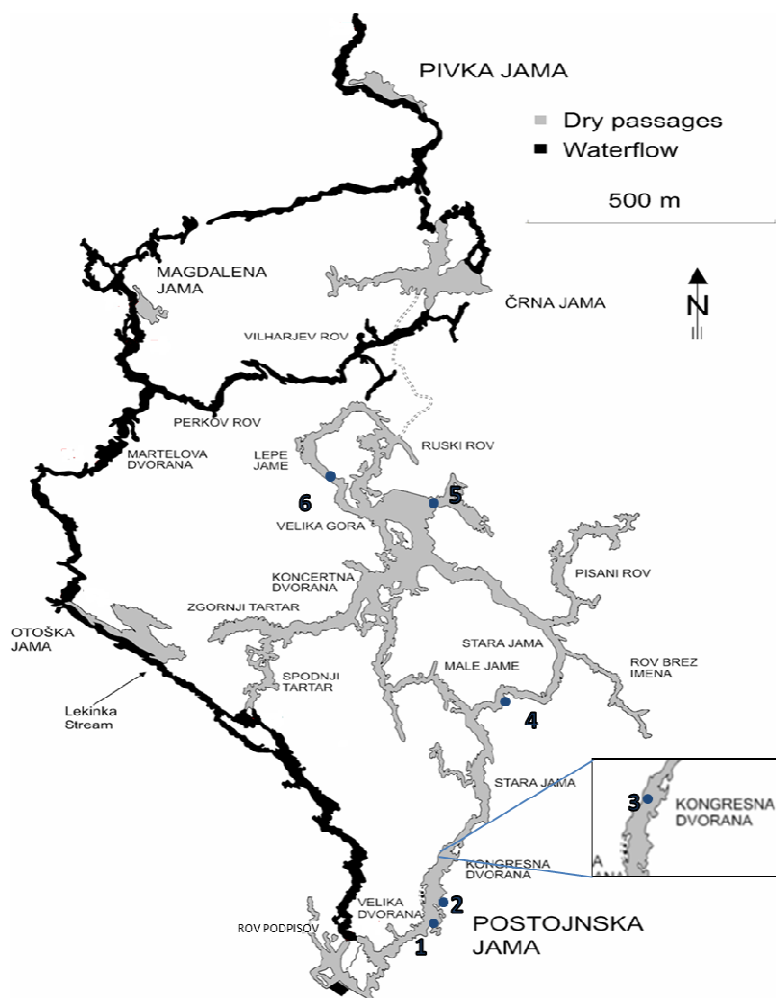
Velika gora

Najnižja točka rova – vzhodna Velike gore je končna postaja turističnega vlaka in področje, kjer se turisti skupaj z vodniki peš vzpenjo na 45 m visoko in 110 m dolgo Veliko goro (nadmorska višina 560 m). Podzemeljski prostor, kjer je Velika gora, je dolg 120 m, do 80 m širok in preko 50 m visok. Popolnoma zasigana Velika gora se nahaja na podornem kamenju, ki so se utrgali iz stropa. Pešpot vodi preko vrha, od koder je lep razgled na zasigan podor in na vhode v druge rove (Ruski rov, Lepe jame in Čarobni vrt). Prostornina te dvorane je 240000 m³. Od dna dvorane do vrha podornega griča je 37 m, od vrha griča do stropa pa 16 m. Vrh Velike gore je 40 m nad nivojem jamskega vhoda. Debelina stropa te dvorane je 30 m (Kranjc, 2007).

Tu sem vzorce vzela na treh različnih višinah, zato da smo dobili podatek o vertikalni razporeditvi koncentracij na tem delu jame (slika 23-točke 12-14) . Prvi vzorec sem odvzela ob poti (točka 12), v začetnem delu Lepih jam. Za razliko od ostalih dveh mest je tu bil tu sivkasto–črn prah, ki se nabira v manjših vdolbinah, na bolj ravnih predelih kop in kapnikov. Drugi vzorec sem vzela v osrednjem delu gore, na višini približno 20 m od tal in približno 50 stran od proge na vzhodni strani (točka 13), kjer področje kapnikov obkroža turistična pešpot. Na tem področju je bilo zelo težko pridobiti vzorec iz kapnikov, ker je bilo izredno malo prahu. Na spodnjem delu kapnikov sem opazila temnejšo prevleko med seboj prepletenih tekstilnih vlaken. Izvor vlaken je najbrž posledica množičnih obiskov turistov, ki lahko na tem območju pridejo v neposreden stik s kapniki. Tretji vzorec sem vzela na vrhu Velike gore (točka 14), kjer predvsem območje na vzhodni strani (čez ograjo) prekriva črn, sajast prah. Prah je bil črn in bolj grudast, vseboval je tudi kosme tkanine.

3.2.3 Odvzem vzorcev za določitev količine odloženih prašnih delcev

Za določitev količine prašnih delcev na enoto površine sem uporabila plastične petrijevke, ravnilo, kredo, ščetke, čistilno raztopino (HNO₃:destilirana H₂O=1:2) ter rokavice. Oceno količine depozita na enoto površine sem dobila tako, da sem v bližini točk, kjer sem odvzela vzorce za določitev njihove sestave (slika 24), na čim bolj vodoravnih površinah s pomočjo krede in ravnila izrisala kvadrat 20 × 20 cm ter s ščetko previdno postrgala odložene prašne delce v plastično petrijevko. Petrijevko sem zatesnila z lepilnim trakom, označila ter do tehtanja v laboratoriju hranila v hladilniku pri temperaturi 4°C.



Slika 24: Lega vzorčevalnih mest za določitev količine odloženih prašnih delcev

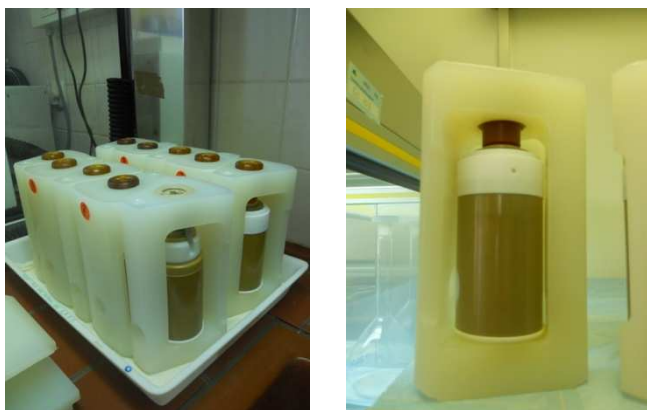
3.3 Laboratorijsko delo

Pripravo in analizo vzorcev sem izvedla na ARSO, v Kemijsko analitskem laboratoriju.

3.3.1 Priprava vzorcev za določitev sestave prašnih delcev

Vzorci (1-14) sem najprej iz plastičnih petrijevk prenesla v steklene posodice ter jih osušila v peči pri 105°C. Sledila je faza razklopa vzorca s kislino, s čimer elemente v vzorcu pretvorimo v topno obliko. Za razklop sem natehtala 100 - 120 mg vzorca, in sicer z digitalno tehtnico Mettler AT261 Delta Range z natančnostjo $\pm 0,15$ mg. Za vsak vzorec sem izvedla pet ponovitev meritev, zato sem izvedla pet razklopov vsakega vzorca. Set posodic za mikrovalovno pečico sestavlja 10 posodic, zato sem naenkrat lahko opravila razklop sedmih vzorcev (1-7) ter enega slepega vzorca. Nato sem cikel ponovila z ostalimi vzorci (8-14). V vsako posodo z vzorcem sem dodala 2 mL vodikovega peroksida (Suprapur, 30% w/w), 8 mL dušikove (V) kisline (Suprapur, 65 % w/w) ter 250 μ L internega standarda. Močni oksidativni reagenti omogočijo raztapljanje elementov iz trdne osnove. Dušikova (V) kislina raztaplja elemente iz anorganskega dela osnove, medtem ko vodikov peroksid razgradi organske komponente. Postopku pravimo tudi mokro upepeljevanje (ang. "wet ashing"). Interni standard s koncentracijo

10 mg/L je vseboval skandij (Sc), rodij (Rh), germanij (Ge) in gadolinij (Gd). Dodali smo ga zaradi kompenzacije trenutnih nihanj signala na detektorju masnega spektrometra. Z dodajanjem internega standarda omogočimo normalizacijo odziva elementov v vzorcu glede na odziv internih standardov, zaradi česar je analiza kvalitetnejša. Elementi v internem standardu morajo biti mono-izotopni in ne smejo interferirati z elementi, ki jih analiziramo, morajo pa biti v območju mas elementov, ki jih analiziramo, vključno z učinkovitostjo ionizacije (podobne fizikalne lastnosti). Adsorpcija prašnih delcev na stene posode lahko povzroči izgubo vzorca in morebitno onesnaženje posode pri nadaljnjih analizah, zato sem pri dodajanju reagentov s pipeto pazila, da sem temeljito sprala celoten vzorec iz stene posodice, ki se je nabral zaradi elektrostatike. Posode sem pokrila s pokrovčki ter jih umestila v varnostni plašč. Varnostni plašč obdaja posodico zato, da prepreči morebitne posledice sproščanja previsokega tlaka v vzorcu (> 100 bar), ki lahko nastane zaradi premočne absorpcije mikrovalov, ki v končni fazi privede do pokanja posodic (slika 25). Vseh osem segmentov sem vstavila v krožni nosilec mikrovalovne pečice (Milestone, Ethos 1). Razklop vzorcev v mikrovalovni pečici poteka s pomočjo mikrovalov pri temperaturi 220°C . Ta temperatura se doseže s postopnim dodajanjem energije v času 45 min, nato pečica še nadaljnjih 45 min drži temperaturo 220°C , da je razklop popoln. Maksimalna moč mikrovalov, ki nastajajo v megatronu, je 1250 W. Mikrovalove absorbirajo le polarne molekule v vzorcu (raztopina dušikove kisline in vodikovega peroksida), pri čemer prihaja do pretvorb kinetične energije v toplotno energijo. Zato se vzorci enakomerno segrejejo v vseh točkah enako, kar privede do homogenega razklopa vzorcev, ki je zaradi povišane temperature tudi precej hitrejši kot običajni razklop. Pri tem se segreje le raztopina, posodice morajo ostati hladne. Mikrovalovna pečica je ves čas razklopa programsko vodena preko mikro-računalnika, kjer lahko na monitorju spremljamo celoten proces segrevanja v posodicah.



Slika 25: Prikaz vzorca v posodici s plaščem

Po končanem razklopu sem ohlajene vzorce s pomočjo steklenega lijaka prelila v merilne steklene bučke (50 mL, Duran) ter dolila ultra čisto laboratorijsko vodo (Milli Q – MQ) do 50 mL. Vzorce v bučkah sem dobro premešala ter odlila v plastične epruvete (50 mL, Sarstedt) s konusnim dnom ter jih shranila v hladilnik do analize. V vzorcih je običajno prišlo do sedimentacije večjih trdnih delcev, zato sem pred analizo bistro tekočino previdno prelila v epruvete z ravnim dnom do 40 mL (50 mL, Sarstedt). Rezultati analize so zajeti v poglavju 4-Rezultati.

3.3.2 Analiza elementov v sledovih z masnim spektrometrom z induktivno sklopljeno plazmo

Koncentracije elementov v sledovih smo določili z masnim spektrometrom z induktivno sklopljeno plazmo (ICP-MS) (slika 26). ICP-MS je selektivna, multielementna tehnika, s katero lahko določimo več kot 70 elementov v sledovih, katerih koncentracije običajno ne presegajo mg/L. Meja detekcije pri tej tehniki je običajno v območju od 0,1 do 1 µg/L.

Pred analizo vzorcev z ICP-MS sem morala razklopljene vzorce ustrezno redčiti. Predhodna analiza je pokazala izjemno visoke koncentracije nekaterih elementov, zato sem vzorce trikrat redčila, in sicer 5-krat, 10-krat in 100-krat. 5-krat redčene vzorce sem pripravila tako, da sem z avtomatsko pipeto v plastično epruveto dodala 2 mL vzorca in 8 mL raztopine z internim standardom. Raztopino sem pripravila tako, da sem v merilno bučko (1 L) prelila 5 mL internega standarda s koncentracijo 10 g/mL, 160 mL dušikove (V) kisline ter dolila MQ vodo do 1 L. Kisline sem dodala za stabilizacijo elementov v sledovih v vzorcu. Za 10-krat redčene vzorce sem potrebovala 1 mL vzorca in 9 mL raztopine z internim standardom, za 100-krat redčene pa 100 µL vzorca na 10 mL raztopine. Skupaj sem imela 210 epruвет redčenih vzorcev, 70 za vsako redčitev (14x5 paralelnih vzorcev).

V vzorcih smo analizirali aluminij (Al), krom (Cr), mangan (Mn), železo (Fe), baker (Cu), cink (Zn), stroncij (Sr) in svinec (Pb), in sicer z inštrumentom SCIEX ELAN 6100, Perkin Elmer (slika 26). V masni spektrometriji elemente lahko določimo le, če so v ionski obliki. Ionizacijo vzorcev dosežemo s kontinuirnim postopkom razprševanja, atomizacije in končne ionizacije vzorcev, in sicer z uporabo plazme. Vzorec se najprej razprši skupaj z nosilnim plinom argonom, da dobimo drobne kapljice oziroma aerosol. Nato sledi proces atomizacije in ionizacije v šobi plazemskega izvora. Induktivno sklopljena plazma je sestavljena iz treh koncentričnih kvarčnih cevi, s premerom zunanje cevi 250 mm. Na vrhu se nahaja indukcijski navoj, ki ga poganja radiofrekvenčni generator. Ionizacijo argona povzročimo z iskro iz teslinega navoja. Pri tem se tvori plin ali plazma, ki je sestavljen iz nabitih delcev – prostih elektronov in ionov. Kontinuirani vnos vzorca v obliki aerosola v plazmo omogoča nastanek "steady state" ionov, ki skupaj z argonom potujejo s pretokom 1 L/min po notranji cevi. Notranjo cev obdaja dodaten dotok argona, ki radialno vstopa v cev ogrođja induktivno sklopljene plazme. Argon, s pretokom od 10 do 17 L/min, ima funkcijo vzdrževanja stalne temperature plazme (okrog 10000 K), s čimer se ohranja stabilnost plazme. Zaradi visoke temperature vzorec v hipu ionizira. Nastale pozitivno nabite ione (Al⁺, Cr⁺, Mn⁺, idr.) vodimo na (kvadrupolni) masni analizator, kjer se ločijo po masah. Ioni se ločijo na osnovi različnih razmerij mas glede na naboj m/z; ioni so lahko enkrat ali pa tudi večkrat nabiti. Odziv ionov pri posameznih masah na koncu merimo z detektorjem (Skoog in sod., 2004).



Slika 26: Masni spektrometer z induktivno sklopljeno plazmo (Kemijski analitski laboratorij, ARSO)

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 Rezultati meritev sestave prašnih delcev

Rezultati meritev vzdolž turistične proge in pešpoti v Postojnski jami, kjer sem izvedla odvzem vzorcev za določitev koncentracij odloženih prašnih delcev, so zbrani v tabelah v Prilogi D. Ker je bila izmerjena koncentracija težkih kovin dokaj visoka, sem morala vzorce redčiti. Za posamezni element sem izbrala takšno redčitev, da je bila izmerjena koncentracija v območju umeritvene krivulje. Za vsak vzorec sem izvedla pet ponovitev. Rezultate meritev sem preverila z Grubbsovim testom, s čimer sem izločila ubežnike (enačbi 1 in 2).

$$T_{\max} = \frac{x_n - x_{povp}}{s} \quad (1)$$

$$T_{\min} = \frac{x_{povp} - x_i}{s} \quad (2)$$

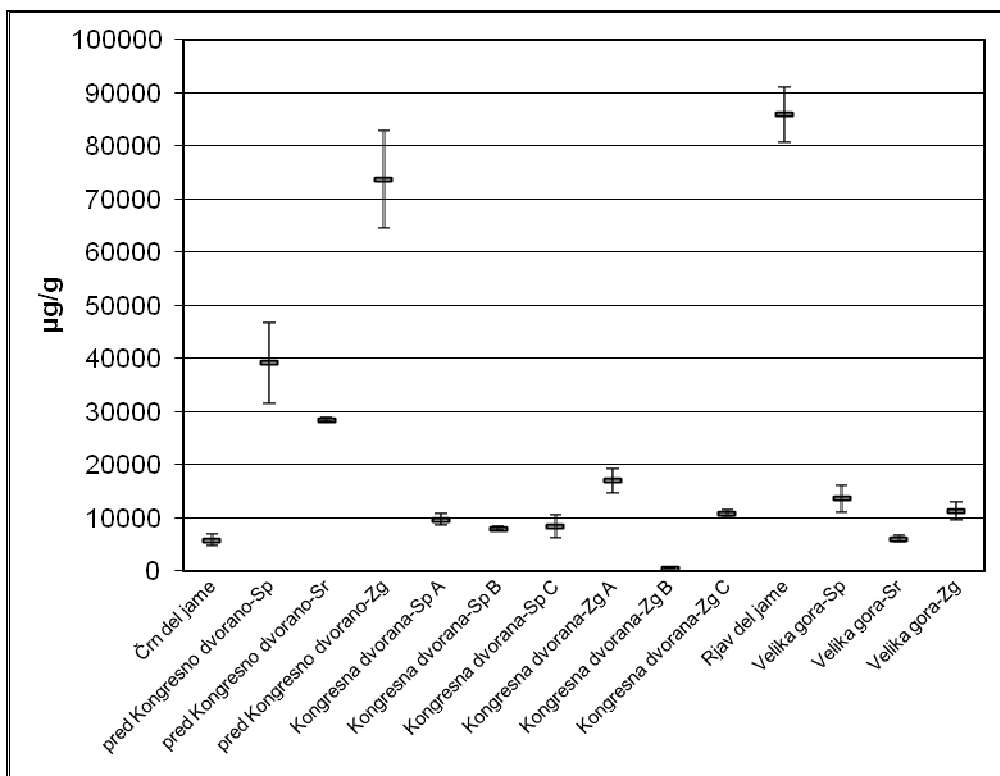
x_n ali x_i - izstopajoča vrednost meritve

$x_{povprečni}$ - povprečje meritev

s - standardni odmik

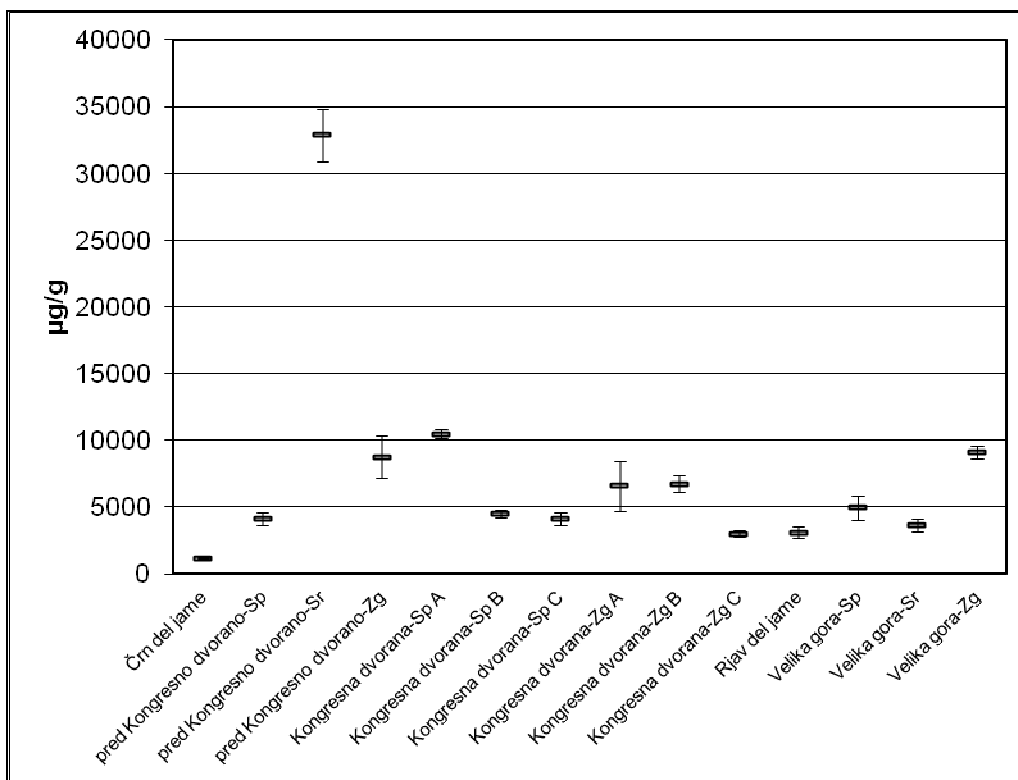
Izračunane T vrednosti sem primerjala s kritičnimi T vrednostmi. Kritično T vrednost sem odčitala iz statističnih tabel. Za pet ponovitev meritev in stopnjo verjetnosti $p = 0,05$ znaša T vrednost 1,67. Meritev sem izločila, če je bila T vrednost večja od kritične T vrednosti. V tabelah (Priloga D) so izločene meritve označene oranžno.

Rezultate meritev koncentracije parametrov težkih kovin sem predstavila s črtnim grafom posamično (slike 27-34). Na grafu so predstavljene povprečne vrednosti koncentracij težkih kovin in enojni standardni odmik meritev prašnih delcev na posameznih vzorčevalnih mestih vzdolž turističnega rova Postojnskega jamskega sistema.



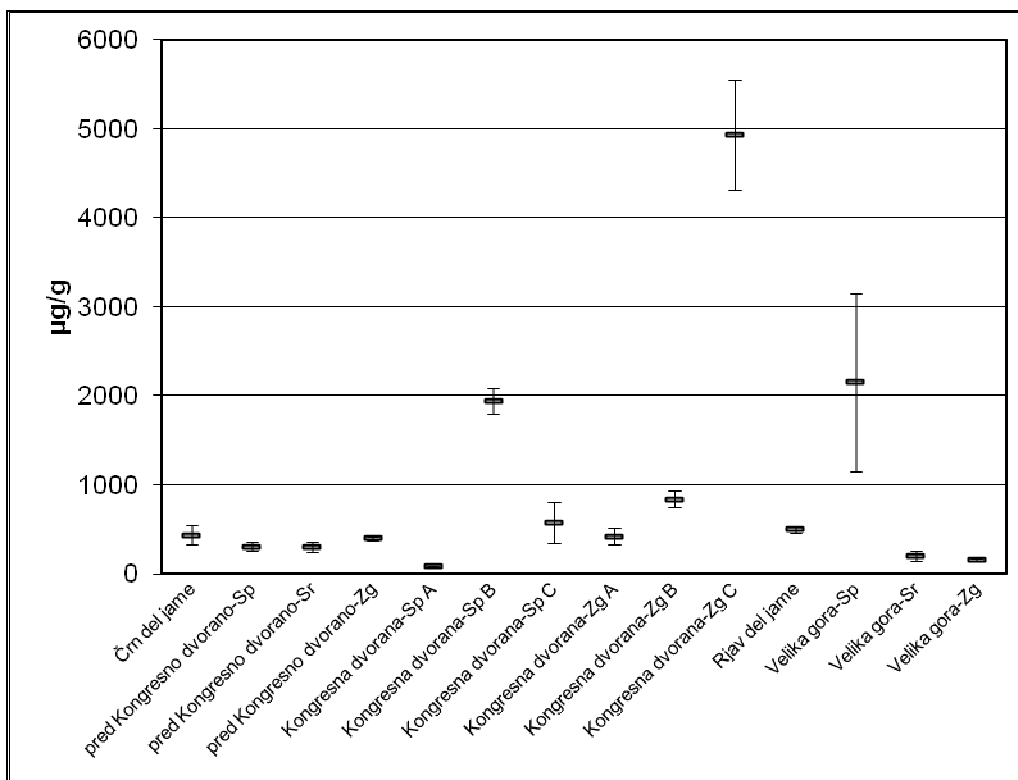
Slika 27 : Povprečna koncentracija železa v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Koncentracije železa (slika 27) močno nihajo med najnižjo vrednostjo 545 µg/g v Kongresni dvorani in najvišjo 85900 µg/g v rjavem delu jame. V vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano se koncentracije spreminjajo. V spodnjem delu pade skoraj za polovico glede na najvišjo v rjavem delu. V srednjem delu se vrednost spet zniža, nato pa se v zgornjem delu močno poveča. V horizontalnem profilu spodnjega dela v Kongresni dvorani so koncentracije podobne vsebnosti pri vhodnem delu jame, le da so te nekoliko povišane in med seboj zelo podobne, kar kaže na večjo homogenost. V zgornjem horizontalnem profilu v Kongresni dvorani se koncentracije povečajo, vendar ni opaziti takšne podobnosti kot v spodnjem delu, saj v točki B vsebnost železa močno pade, in predstavlja najnižjo izmerjeno koncentracijo. V točki A je koncentracija višja kot v točki B. Vertikalni profil na Veliki gori kaže, da je v spodnjem delu jame koncentracija najvišja, v srednjem delu pa najnižja. V zgornjem delu je koncentracija podobna koncentraciji v točki C horizontalnega profila v Kongresni dvorani.



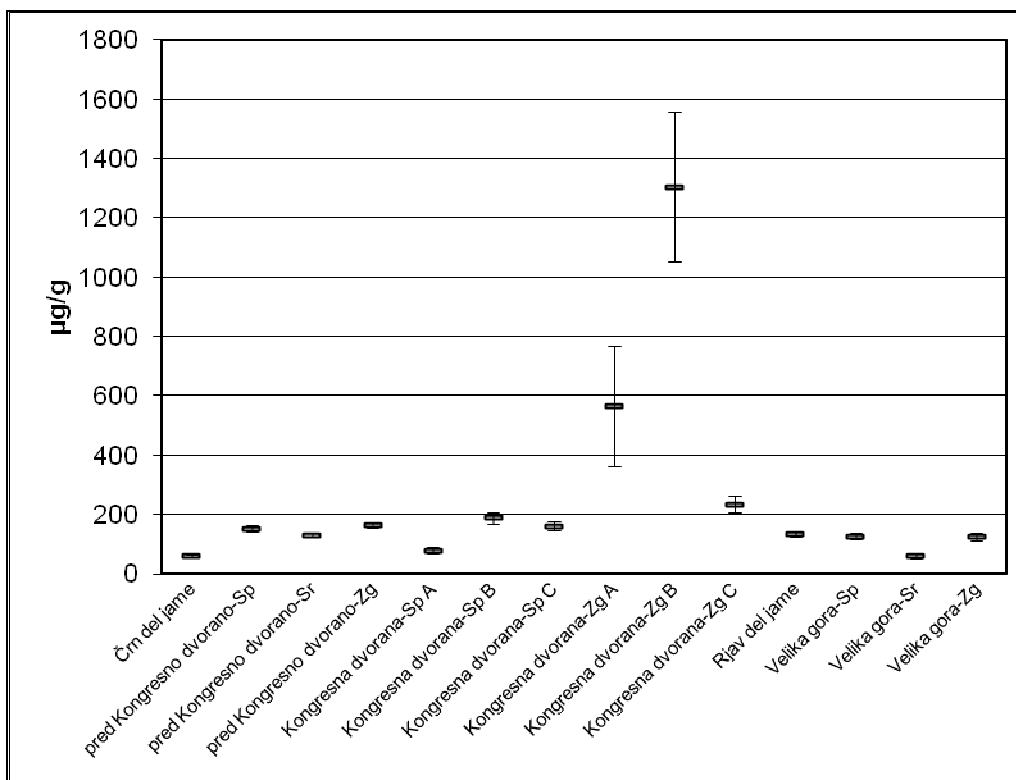
Slika 28: Povprečna koncentracija aluminija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Na vhodnem-črnem delu jame je koncentracija aluminija (slika 28) najnižja in znaša 1200 µg/g. V vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano je na spodnjem delu skoraj enaka kot v rjavem delu, medtem ko v srednjem delu koncentracija skokovito naraste in je najvišja v jami (32900 µg/g). V zgornjem delu se nato zniža na tretjino najvišje koncentracije. V spodnjem delu horizontalnega profila v Kongresni dvorani sta bolj homogeni točki B in C, ki imata podobno vsebnost aluminija kot v spodnjem delu pred Kongresno dvorano. V točki A je koncentracija dvakrat večja od ostalih dveh na istem nivoju. Na zgornjem nivoju v Kongresni dvorani sta si točki A in B bolj podobni, medtem ko je v točki C vsebnost za polovico manjša. Razen točke C na višjem nivoju, ter B in C na nižjem ni večje podobnosti med obema horizontalnima profiloma. V rjavem delu je koncentracija 2-krat višja glede na koncentracijo v črnem delu jame. V vertikalnem profilu na Veliki gori je koncentracija najvišja zgoraj, najnižja v sredini, v spodnjem delu pa je skoraj za polovico manjša v primerjavi z zgornjimi deli Velike gore. Relativno visoke koncentracije aluminija verjetno kažejo na naravni izvor delcev, ki se na globalnem nivoju v zemeljski skorji pojavljajo glede na maso v območju 82000 µg/g (Greenwood in Earnshaw, 1997)



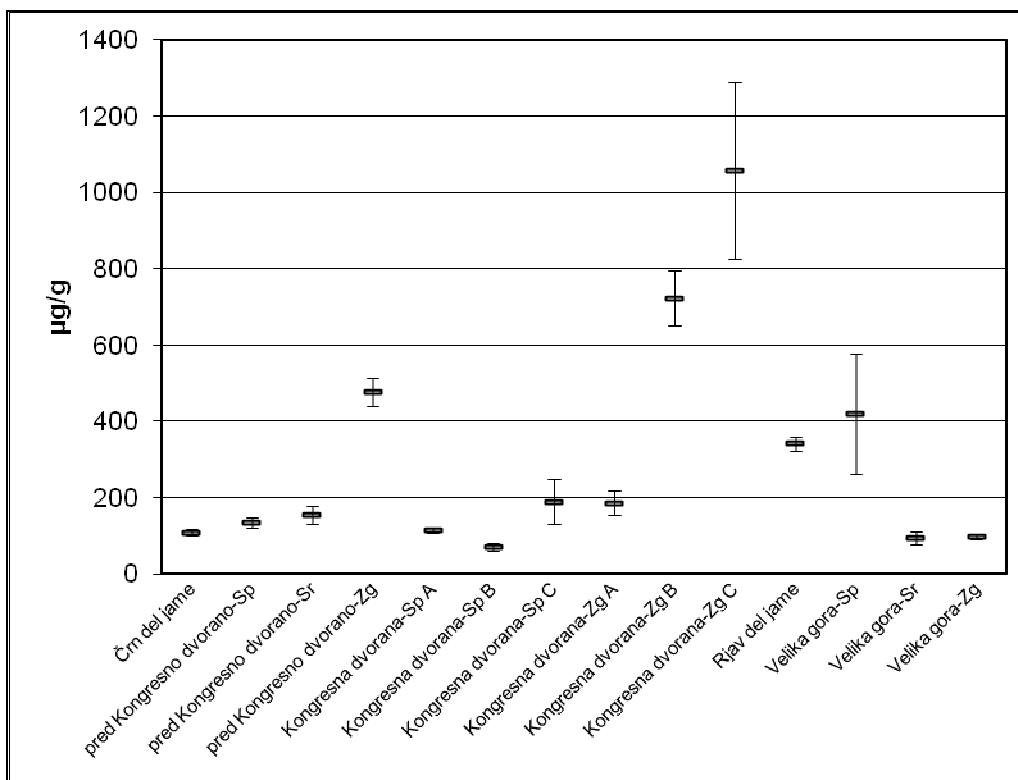
Slika 29: Povprečna koncentracija svınca v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Koncentracija svınca v črnem delu jame je 435 µg/g (slika 29). Koncentracije pred Kongresno dvorano in rjavem delu so zelo podobne. Horizontalni profil spodnjega dela v Kongresni dvorani se zelo spreminja. V točki A koncentracija doseže najnižjo vrednost v primerjavi z ostalimi merilnimi mesti v jami, v točki B se količina svınca skokovito poveča, medtem ko se v točki C spet zniža na koncentracijo podobnim tistima v črnem in rjavem delu jame. Homogenost močno niha tudi med vzorci horizontalnega profila na višjem nivoju v Kongresni dvorani. V točki B se koncentracija poveča skoraj 2-krat v primerjavi z točko A. V točki C se koncentracija svınca močno poviša in v tej točki predstavlja najvišjo izmerjeno koncentracijo svınca (4940 µg/g). V rjavem delu jame je vsebnost svınca zelo podobna koncentraciji v začetnem, črnem delu jame. Vertikalni profil na Veliki gori kaže visoko koncentracijo v spodnjem delu, medtem ko sta vsebnosti svınca v srednjem in višjem delu bistveno nižji in med seboj zelo podobni.



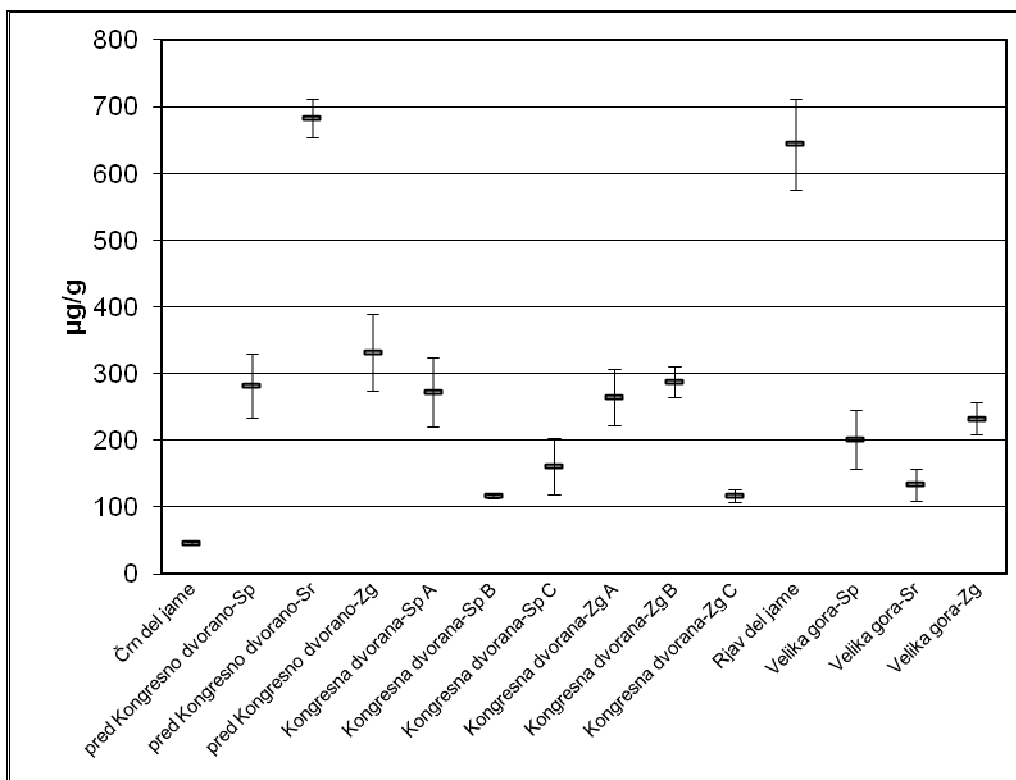
Slika 30: Povprečna koncentracija stroncija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Tudi pri stronciju (slika 30) je koncentracija v začetnem delu nizka, povečana pa v rjavem delu jame. V vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano se koncentracije v vzorcih med seboj ne razlikujejo veliko, podobne so koncentraciji kot v rjavem delu. V horizontalnem profilu spodnjega nivoja v Kongresni dvorani sta vsebnosti stroncija ob desni strani proge, kjer vlak zapusti dvorano (B) in levi strani, kjer vlak vstopi v dvorano (C) bolj podobni v primerjavi z nižjo količino v bolj oddaljeni točki A na desni strani. V zgornjem nivoju horizontalnega profila se koncentracija v primerjavi s črnim delom jame poviša za 12-krat v točki B (maksimalna vsebnost: 1300 µg/g). V točki A vsebnost pade na polovico. V točki C, ki je bolj oddaljena in nekoliko bolj skrita, je koncentracija podobna vsebnosti v spodnjih delih dvorane (B in C). Vzorci na zgornjem nivoju si niso podobni. Na Veliki gori so koncentracije bolj nizke in podobne tistim v rjavem delu jame, z izjemo vsebnosti v sredini, ki je bolj podobna koncentraciji v ožganem delu jame. Med vzorci se kaže podobnost v koncentraciji stroncija predvsem v rjavem delu jame, pred Kongresno dvorano ter v predelih Kongresne dvorane (spodaj B in C, zgoraj C).



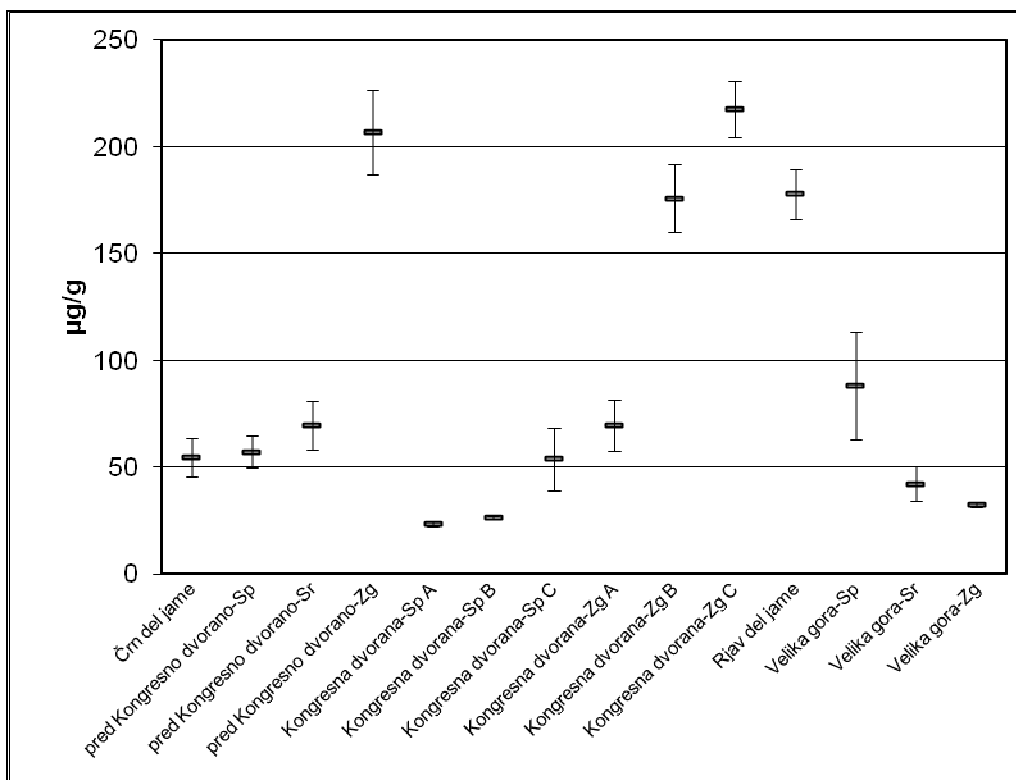
Slika 31: Povprečna koncentracija cinka v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Vsebnost cinka (slika 31) v črnem delu jame je 108 µg/g. Koncentracije pred Kongresno dvorano v vertikalnem profilu naraščajo, s tem da sta vsebnosti cinka v spodnjem in srednjem delu podobni, v zgornjem delu jame pa se zelo poveča. V horizontalnem profilu spodnjega dela v Kongresni dvorani sta si koncentraciji v točkah A in B bolj podobni, v točki C pa se vsebnost skoraj podvoji. Koncentracija v točki C v Kongresni dvorani je podobna vsebnosti cinka v spodnji in sredinski točki vertikalnega profila pred Kongresno dvorano. Na višjem nivoju v Kongresni dvorani je nihanje koncentracij veliko, kar kaže na nehomogenost vzorcev na posameznih točkah. V točki A je koncentracija cinka podobna vsebnosti v točki C spodnjega nivoja, ki je približno 2 m nižje. V točki B in C se koncentraciji zelo povečata. V točki C je vsebnost najvišja (1060 µg/g). Koncentracije med profiloma na dveh različnih višinah so si zelo različne, s tem da se tudi vzorci znotraj nivoja med seboj dokaj razlikujejo. V rjavem delu jame so koncentracije skoraj 4-krat višje v primerjavi s vsebnostjo cinka na začetku jame. V vertikalnem profilu na Veliki gori je koncentracija 420 µg/g v spodnjem delu zelo visoka glede na vrednost v srednjem in zgornjem delu, kjer se med seboj podobni koncentraciji znižata na četrtino te vrednosti.



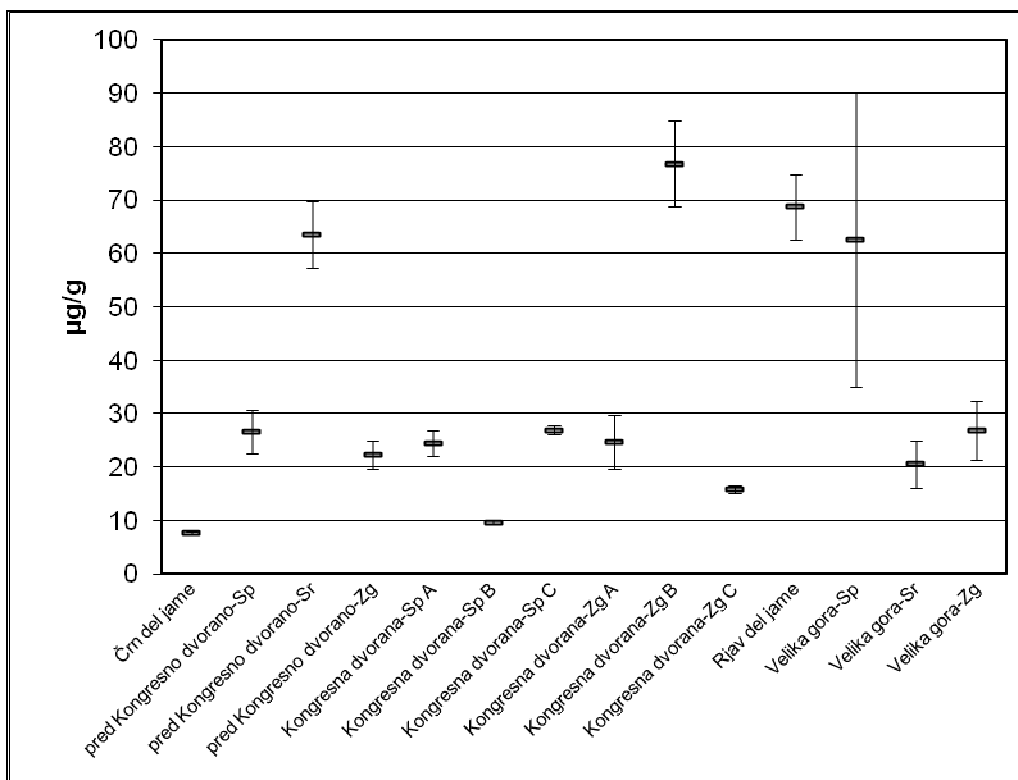
Slika 32: Povprečna koncentracija mangana v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Koncentracija mangana (slika 32) je v črnem delu jame najnižja (46 µg/g). V vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano koncentraciji v spodnjem in zgornjem merilnem mestu znašata polovico koncentracije na srednjem merilnem mestu, kjer je koncentracija mangana najvišja (682 µg/g). V spodnjem delu Kongresne dvorane sta koncentraciji v vzorcu B in C podobni, vsebnost v točki A pa je približno 2-krat večja. V zgornjem delu horizontalnega profila v Kongresni dvorani sta koncentraciji v točki A in B med seboj bolj podobni, vsebnost pa v bolj oddaljeni točki C pade na polovico. V obeh horizontalnih profilih sta dva vzorca zelo podobna, ostali pa se precej razlikujejo. Podobnost med vzorcih se kaže pri koncentracijah spodaj in zgoraj pred Kongresno dvorano, v Kongresni dvorani v točki A-spodaj, ter v točki C na višjem nivoju. V rjavem delu je vsebnost mangana med najvišjimi, podobna pa je najvišji koncentraciji mangana na večji višini (v sredini) pred Kongresno dvorano. V vertikalnem profilu na Veliki gori je koncentracija najnižja v sredinskem delu, spodaj in zgoraj sta vsebnosti podobni, in sicer dvakrat večji kot v sredini.



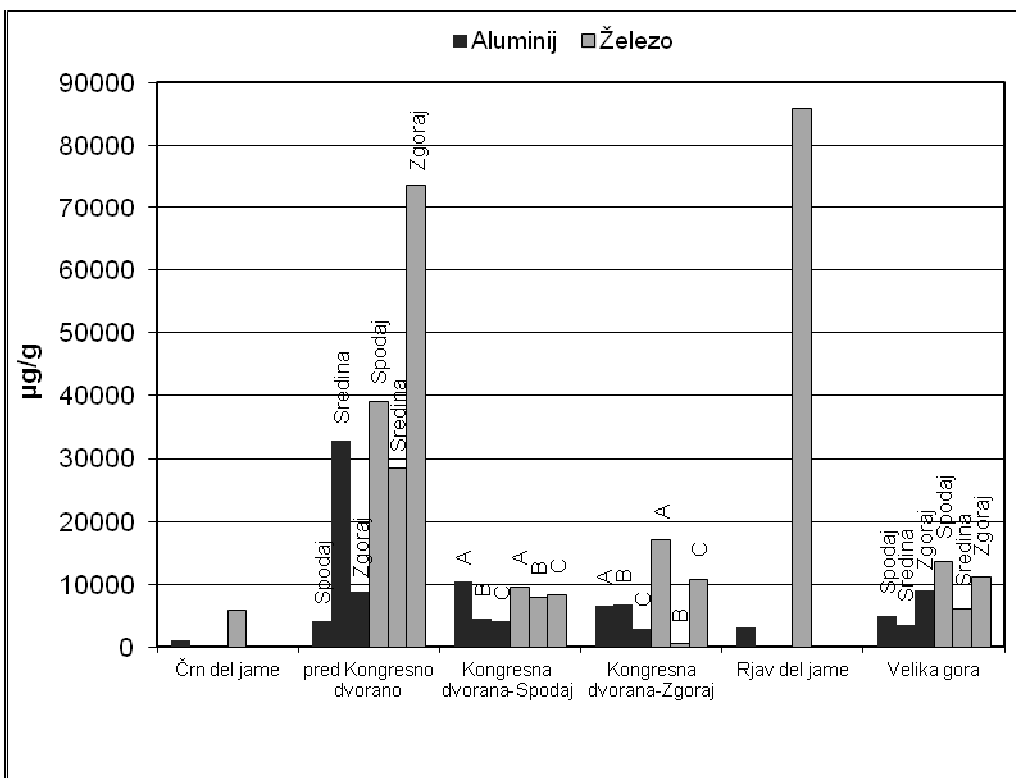
Slika 33: Povprečna koncentracija bakra v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Poleg kroma je baker element, ki se pojavlja v mnogo nižjih koncentracijah v primerjavi z ostalimi težkimi kovinami (slika 33). Na vhodnem, črnem delu jame je koncentracija 54,8 µg/g, v vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano pa se koncentracije, od spodaj proti vrhu, povečujejo. V spodnjem delu je vsebnost zelo podobna koncentraciji bakra v črnem delu jame, v srednjem delu se nekoliko poviša. Zgoraj je koncentracija 3-krat višja glede na koncentracijo v sredini. Horizontalni profil nižjega nivoja v Kongresni dvorani kaže podobnost med točkama A in B, katerih koncentraciji sta najnižji glede na ostala merilna mesta. V točki C se vsebnost podvoji in je podobna tisti v spodnjem delu pred Kongresno dvorano. Na višjem horizontalnem delu v Kongresni dvorani obstaja večja podobnost med točkama B in C. V točki C je koncentracija najvišja v primerjavi z ostalimi mesti v jami (217 µg/g). V rjavem delu je vsebnost bakra povečana in podobna koncentracijam, ki se pojavljajo na večji višini. V vertikalnem profilu na Veliki gori se koncentracije od spodnjega dela proti vrhu postopoma znižujejo. V spodnjem delu je vsebnost bakra skoraj dvakrat večja kot na sredini in vrhu Velike gore.

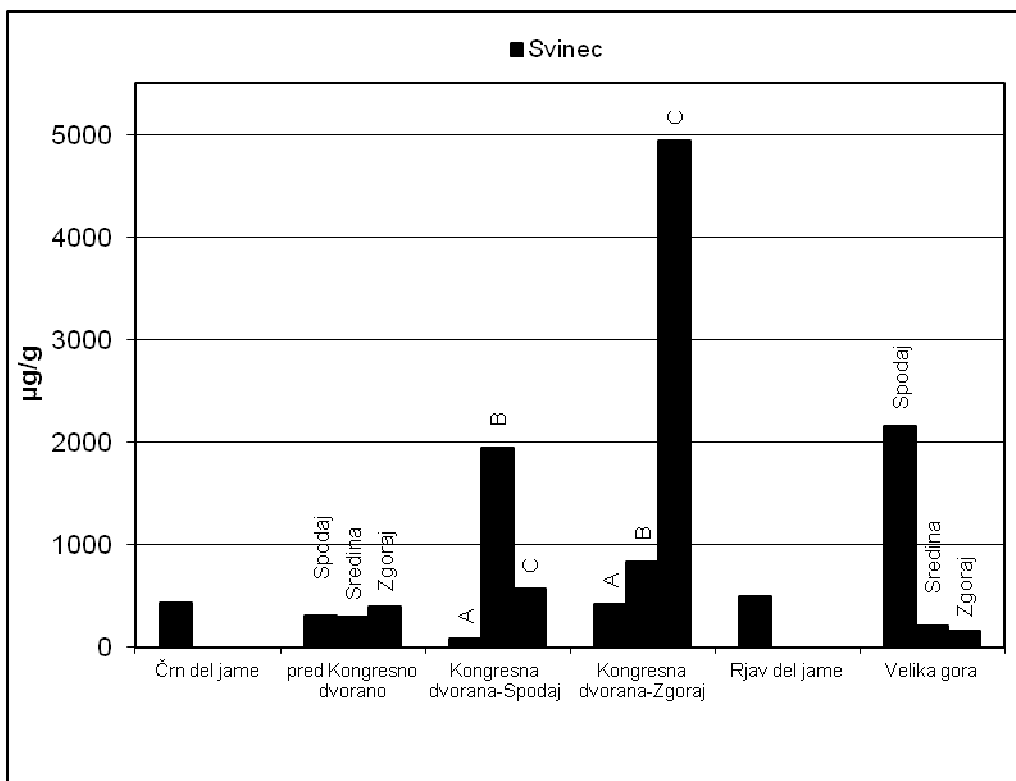


Slika 34 : Povprečna koncentracija kroma v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

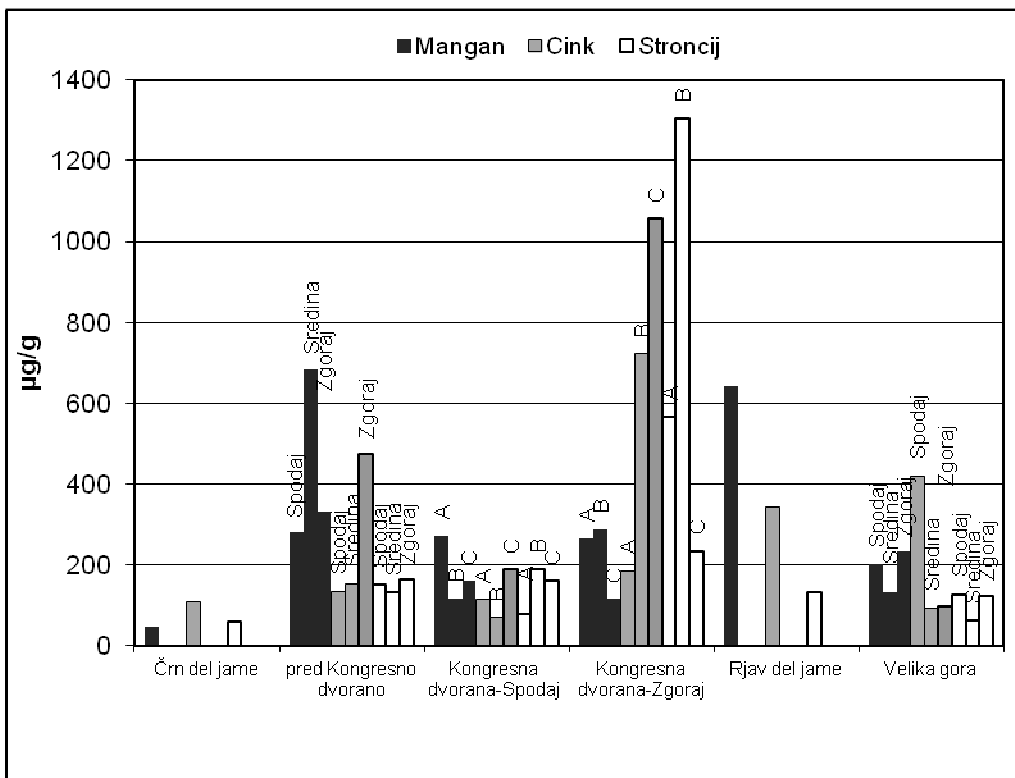
Koncentracije kroma (slika 34) so najnižje v primerjavi z ostalimi elementi, ki smo jih analizirali. Na vhodnem delu (črn del) jame je koncentracija kroma najnižja (7,76 µg/g). V srednjem delu vertikalnega profila pred Kongresno dvorano je koncentracija podobna vsebnosti v rjavem delu, medtem ko sta koncentraciji v spodnjem in zgornjem delu primerljivi in skoraj za polovico manjši. V spodnjem delu horizontalnega profila v Kongresni dvorani sta koncentraciji v točki A in C skoraj enaki, medtem ko v točki B vsebnost kroma pade na tretjino njune vrednosti. Na višjem nivoju v Kongresni dvorani ni homogenosti. V točki A je koncentracija zelo podobna točkama A in C na nižjem delu. V točki B je koncentracija najvišja (76,8 µg/g), v točki C je vsebnost za polovico manjša kot v točki A. Med spodnjim in zgornjim nivojem ni opaziti izrazite homogenosti, večja podobnost se pojavlja le med točkama A na različnih nivojih. V rjavem delu se vsebnost kroma v primerjavi s črnim, začetnim delom jame poveča za več kot 9-krat. Vertikalni profil na Veliki gori kaže, da je koncentracija najvišja na spodnjem delu, in sicer nekoliko nižja od maksimalne, medtem ko se v sredini zniža na tretjino, nato pa nekoliko zviša na zgornjem nivoju.



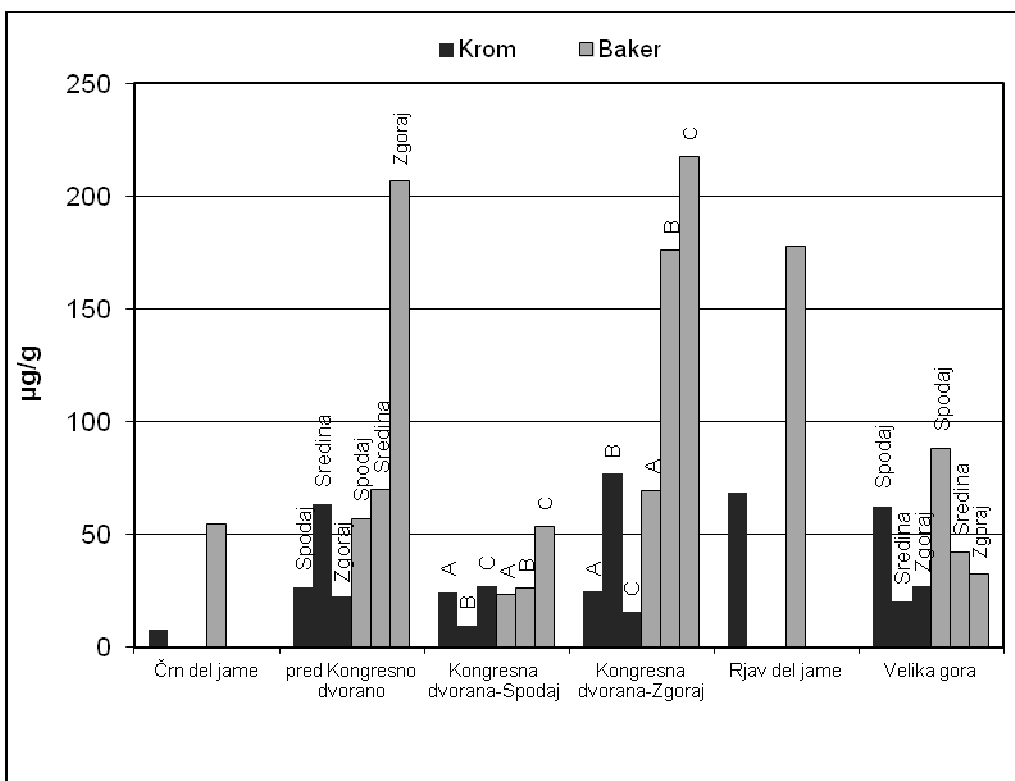
Slika 35: Povprečne koncentracije aluminija in železa v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema



Slika 36: Povprečne koncentracije svinca v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema



Slika 37: Povprečne koncentracije mangana, cinka in stroncija v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema



Slika 38: Povprečne koncentracije kroma in bakra v prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema

Na slikah 35-38 so prikazane koncentracije elementov, razvrščeni glede na koncentracijsko območje. Pri svincu koncentracija zelo niha med višjimi in nizkimi vrednostmi, zato je predstavljen posamično.

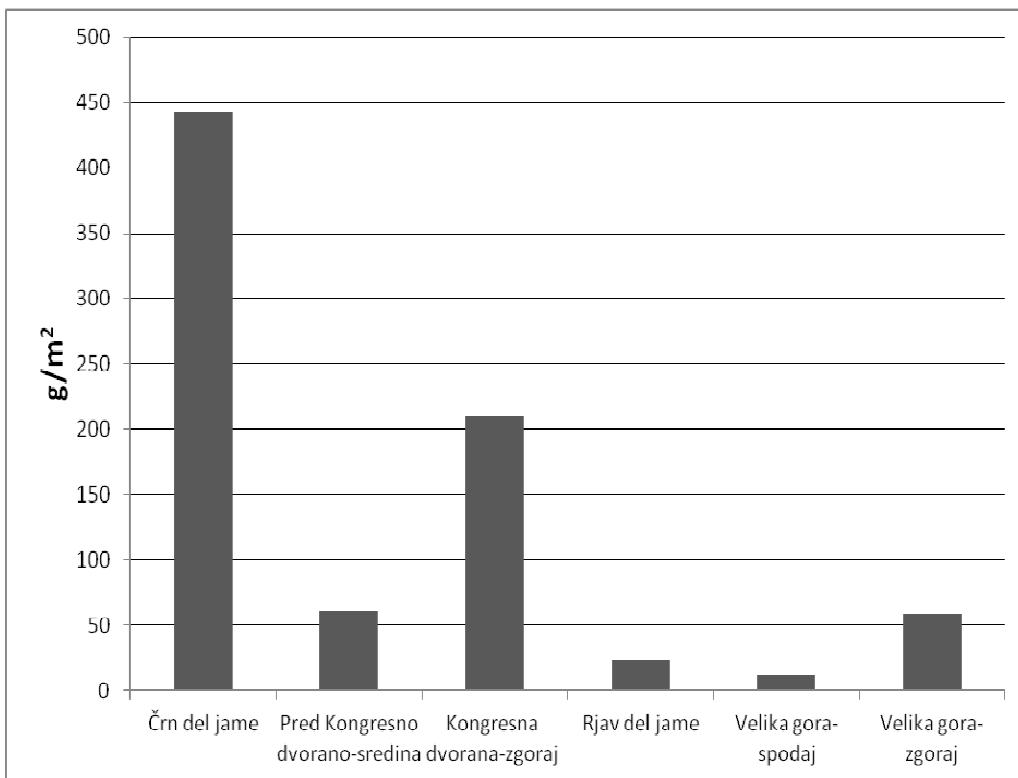
Koncentracije težkih kovin, zlasti železa, aluminija in kroma v rjavem delu, se v primerjavi s črnim delom močno povečajo. Koncentraciji železa in bakra se povečata približno 15-krat, kroma pa 9-krat. Pri ostalih težkih kovinah se koncentracije povečajo 2-3-krat. Koncentracije v spodnjem delu pred Kongresno dvorano se v primerjavi z rjavim delom (na približno enakih višinah) znižajo pri železu, svincu, cinku, manganu, bakru ter kromu, povečajo pa pri aluminiju in stronciju. V vertikalnem profilu pred Kongresno dvorano se kažejo podobnosti v porazdelitvi koncentracij med svincem in stroncijem ter cinkom in bakrom. Podobne porazdelitve koncentracij se kažejo tudi pri aluminiju in manganu, le da je podobnost mangana večja v spodnjem in zgornjem delu Kongresne dvorane, medtem ko se koncentracije pri aluminiju na enakih vzorčevalnih mestih bolj razlikujejo. V spodnjem delu horizontalnega profila v Kongresni dvorani se kažejo večje podobnosti v razporeditvi koncentracij med železom in manganom, svincem in stroncijem ter cinkom in kromom. Na višjem nivoju so večje podobnosti med aluminijem in manganom, kjer obstaja večja homogenost v vzorcih med točkama A in B, ter med stroncijem in kromom. Pri vseh težkih kovinah so koncentracije v povprečju višje na višjem nivoju jame kot na nižjem. Na Veliki gori je podobnost porazdelitve koncentracij v vertikalnem profilu večja med železom in stroncijem, cinkom in kromom ter med svincem in bakrom.

4.2 Rezultati meritev količine odloženih prašnih delcev

Največja količina odloženega prahu je v črnem delu jame, in sicer 443 g/m² (tabela 3, slika 39). V ostalih delih jame se količine gibljejo od 12-60 g/m², z izjemo Kongresne dvorane, kjer je bila količina odloženega prahu 211 g/m². Večja količina depozita v začetnem-črnem delu jame je najbrž posledica eksplozije večje količine fosilnih goriv iz leta 1944 in bližine vhoda/izhoda, skozi katerega piha mrzel in suh zimski zrak, ki povzroča sušenje jame.

Tabela 3: Količina odloženih prašnih delcev na posameznih mestih v Postojnski jami

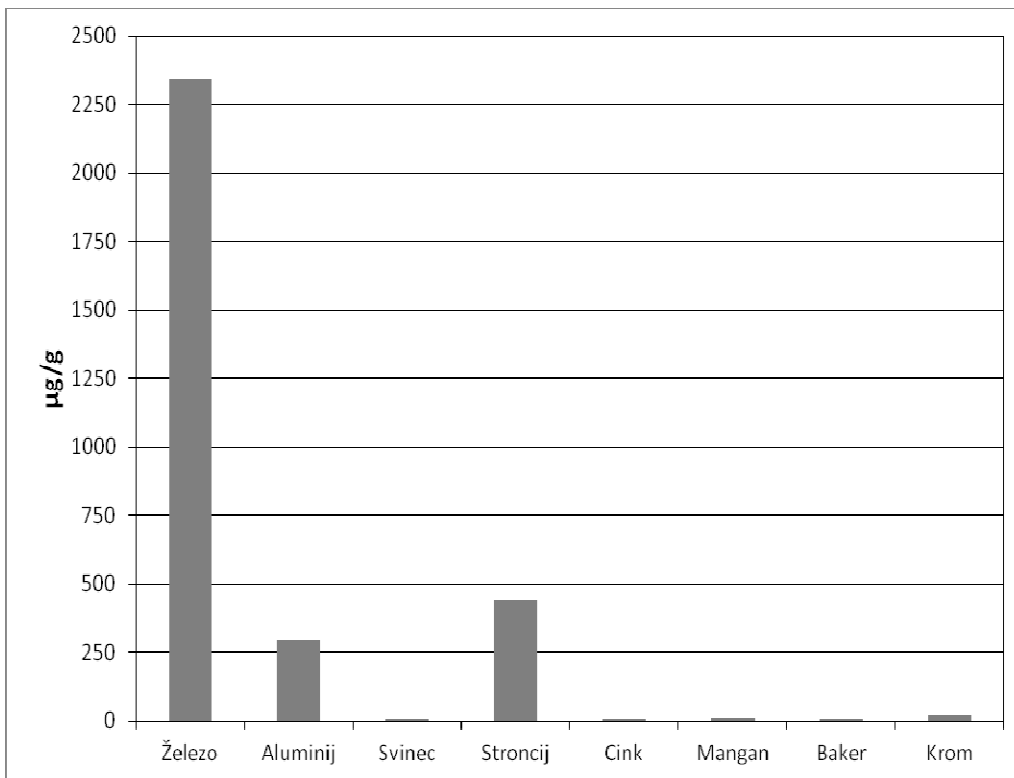
Mesto vzorčenja	Količina odloženih prašnih delcev (g/m²)
Črn del jame	443
Pred Kongresno dvorano-sredina	61,0
Kongresna dvorana-zgoraj	211
Rjav del jame	24,1
Velika gora-spodaj	12,0
Velika gora-zgoraj	59,3



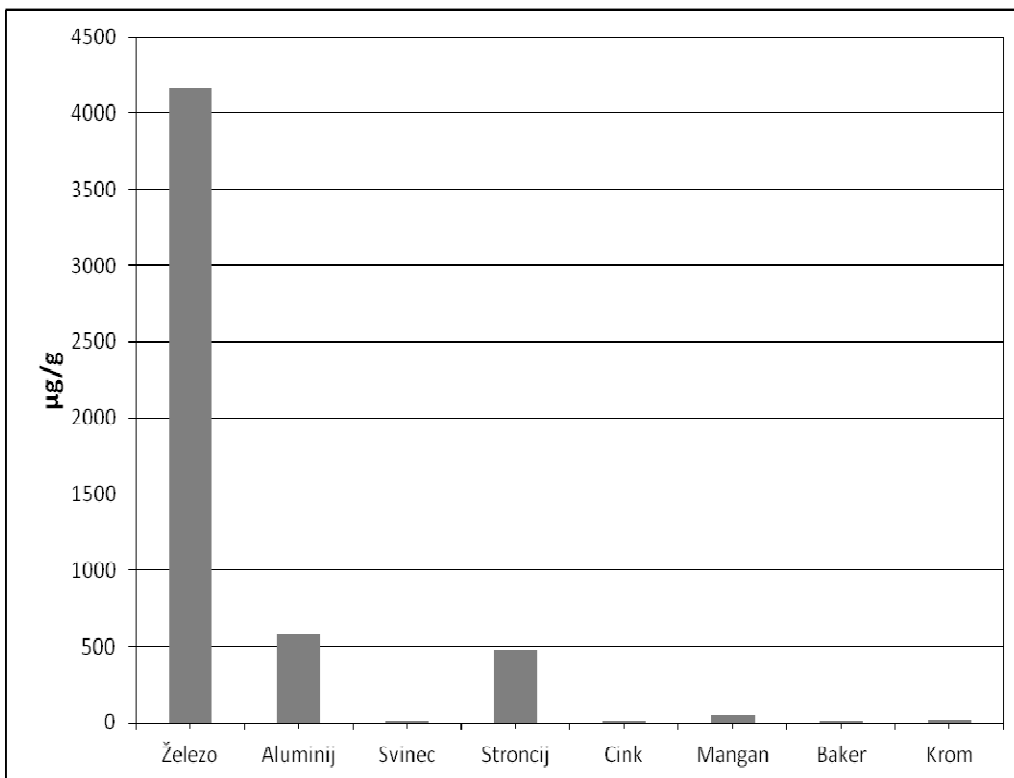
Slika 39: Količina odloženih prašnih delcev na posameznih merilnih mestih v Postojnski jami

4. 3 Povezave med težkimi kovinami in možni izvori

V okviru naše hipoteze smo želeli preveriti ali pesek, s katerim posipajo železniško progo, odločilno vpliva na nastanek prašnih delcev oziroma povečanja količine usedlin na stenah Postojnskega jamskega sistema. Sestavi peska, s katerim posipajo železniško progo, sta prikazani na Slikah 40 in 41. Prva slika prikazuje sestavo peska, odvzetega iz zabojnika, druga pa pesek, ki sem ga odvzela ob železniški progi (rezultati meritev za oba peska so podani v Prilogi D).



Slika 40: Koncentracija težkih kovin v svežem pesku iz zabojnika



Slika 41: Koncentracija težkih kovin v posipnem pesku ob progi

Podobnost porazdelitev koncentracij težkih kovin na merilnih mestih vzdolž Postojnskega jamskega sistema sem določila statistično, in sicer s pomočjo Pearsonovega korelacijskega koeficienta, kjer sem primerjala povprečne koncentracije posameznih težkih kovin med seboj, vzdolž celotne jame (tabela 4).

Tabela 4: Korelacija težkih kovin po posameznih merilnih mestih

	Železo	Aluminij	Svinec	Stroncij	Cink	Mangan	Baker	Krom
Železo	1							
Aluminij	0,002	1						
Svinec	-0,2	-0,23	1					
Stroncij	-0,23	-0,03	0,04	1				
Cink	0,057	-0,17	0,74	0,45	1			
Mangan	0,66	0,59	-0,33	0,03	-0,04	1		
Baker	0,5	-0,15	0,46	0,37	0,87	0,26	1	
Krom	0,26	0,32	-0,12	0,46	0,26	0,69	0,34	1

Svinec, cink, baker in krom imajo podobno razporeditev koncentracije prašnih usedlin v vertikalnem profilu na Veliki gori. Koncentracije težkih kovin so v spodnjem delu povečane, v sredinskem in zgornjem delu pa nizke in med seboj zelo podobne. To lahko kaže na to, da imajo te kovine enak/podoben izvor v tem delu jame. Cink, baker in svinec se v mineralih (naravi) lahko pojavljajo skupaj, vendar je njihov izvor lahko tudi antropogenega izvora. Korelacijski koeficienti kažejo, da je največja podobnost med cinkom in bakrom ter cinkom in svincem. V zgornjem nivoju v Kongresni dvorani so si omenjene težke kovine še dodatno podobne, saj so pri vseh, razen pri kromu, v točki C bile izmerjene najvišje koncentracije glede na ostala merilna mesta. Povečane

koncentracije korelirajo tudi s povečano količino odloženih prašnih delcev v Kongresni dvorani (tabela 3), saj se zaradi stabilnejših razmer in bolj omejenega gibanja zračnih mas v prostoru prašni delci ob zimskem pretoku hladnejšega zraka zaradi sušenja na tem delu bolj usedajo. Koncentracija svinca vzdolž jame je do Kongresne dvorane nizka, nato pa se zelo poviša v območju Kongresne dvorane in Velike gore. Izmerjene koncentracije svinca v pesku so prenizke (slika 40 in slika 41), da bi bil pesek lahko edini vzrok. Po drugi strani pa so bile izmerjene najvišje koncentracije svinca v delih jame, kjer je človek bolj prisoten (koncerti v Kongresni dvorani, vzdrževalna dela na končni postaji električnega vlaka in v njegovi okolici), zato bi lahko bil del svinca tudi antropogenega izvora. Najverjetneje pa se prepletata oba izvora; v začetnih delih jame sta lahko prisotna naraven vpliv ali pa vpliv vnosa onesnaženega zraka, v Kongresni dvorani in Veliki gori pa bi lahko šlo za klimatske in turistične vplive na jamski ekosistem.

Cink in baker imata najbolj podobno porazdelitev koncentracij vzdolž celotne jame (tabela 4), kar kaže visok korelacijski koeficient (0,87). Najverjetneje imata ti kovini enak izvor. Koncentracije težkih kovin v pesku so nizke, zato pesek ni edini vzrok za nastale usedline prašnih delcev. Povečane koncentracije so najverjetneje posledica prenosa in usedanja prašnih delcev naravnega izvora, predvsem sedimentov (glineni minerali, fliš idr.), zaradi mešanja horizontov pri procesu zmrzovanja in taljenja iz podlage in pronicajoče vode ter posledičnega sušenja zaradi vtekanja hladnejšega zraka v jamo.

Precej podobno porazdelitev koncentracij imata tudi cink in svinec, kjer je korelacijski koeficient (0,74) nekoliko nižji, a še vedno lahko kaže na določeno povezavo teh težkih kovin. Nizka koncentracija svinca v prašnih delcih je lahko naravnega izvora, čeprav je v večini primerov prisotnost svinca v okolju v večini rezultat človekove dejavnosti. Večja podobnost v porazdelitvi koncentracij vzdolž jamskega sistema (razen na Veliki gori) se kaže tudi med manganom in cinkom, kjer je korelacijski faktor 0,69, ter med železom in manganom, med katerima je korelacijski faktor 0,66.

Železo je v visokih koncentracijah prisotno tudi v naravnem okolju, predvsem v sedimentu, ki ga je v zgornjem (turističnem) rovu odložila reka Pivka, kar kaže na potencialni izvor. V pesku so koncentracije železa bistveno nižje, zaradi česar bi težko razložili, da je posipni pesek dodaten izvor in s tem vzrok za povečano količino prašnih delcev na stenah. Koncentracija železa v pesku ob progi pa je skoraj 2-krat višja kot v svežem pesku iz zaboja, kar kaže na to, da se zaradi korozije in/ali obrabe železniških tirov poveča delež železa v pesku, ki se kaže tudi na obarvanosti peska.

Koncentracija aluminija v posipnem pesku ob progi je 2-krat višja v primerjavi z originalnim in približno 130-krat nižja glede na najvišjo izmerjeno vrednost v jami, zato pesek najverjetneje ni edini vzrok za nastanek usedlin prašnih delcev. Korelacijski koeficient kaže na večjo podobnost razporeditve koncentracij med aluminijem in manganom skoraj v vseh točkah, predvsem v sredinskem delu pred Kongresno dvorano, kjer se pri obeh elementih pojavi maksimalna vsebnost in v razporeditvi koncentracij v horizontalnem in vertikalnem profilu. Največja odstopanja so opazna v rjavem delu, kjer je vsebnost mangana v primerjavi z aluminijem precej višja. Podobnost med elementoma kaže na to, da sta najverjetneje naravnega izvora; aluminij je eden izmed najpogostejših elementov, ki se pojavljajo v zemeljski skorji, prav tako se v spojinah (mineralih) največkrat pojavlja skupaj z manganom. Naravni izvori železa in aluminija v prašnih delcih, predvsem v rjavem delu, so lahko glineni in detritni minerali iz sedimentov, katerih premer je manjši od 2 μm .

Vzrok za črno barvo oblog v črnem delu ni prisotnih naravnih manganovih in železovih oksidov, ker so dokazali, da manganovih in železovih oksidov v tem delu jame ni. Črna

barva je posledica črnega (elementnega) ogljika, ki se je tvoril pri eksploziji goriva v 2. svetovni vojni (Zupancič et al., 2011).

Koncentraciji stroncija v pesku sta si podobni, vsebnost v prašnih delcih je pa za razliko od večine elementov manjša, razen v Kongresni dvorani v točki A, kjer je vsebnost skoraj enaka tisti v pesku in točki B, kjer je skoraj 3-krat višja. Manjša vsebnost stroncija v prašnih delcih na površini lahko kaže na to, da prašni delci ne izvirajo iz posipnega peska, saj tudi razporeditev koncentracije kaže manjša nihanja razen v omenjenih točkah. Prašni delci so zato najverjetneje lokalnega (jamskega) izvora. Večje podobnosti v razporeditvi koncentracij z ostalimi elementi ni opaziti, razen pri svincu ki ima podobno kot stroncij najvišjo vsebnost izmerjeno na višji višini v Kongresni dvorani v točki C.

Glede na količino odloženih prašnih delcev, ki je bila v črnem delu jame največja, bi tam pričakovali najvišje koncentracije težkih kovin, vendar se maksimalne vrednosti pojavljajo predvsem v rjavem delu jame in zgornjem delu Kongresne dvorane. Lahko sklepamo, da gorenje fosilnih goriv najverjetneje ni imelo velikega vpliva na ostale dele jame. Po drugi strani pa koncentracija prašnih delcev v rjavem delu ni bila visoka, vendar so bile nekaterih težkih kovin v tem delu jame znatno povečane, kar lahko kaže na to, da se na površino usedajo bolj drobni delci z višjo koncentracijo težkih kovin.

5 ZAKLJUČKI

Primerjava rezultatov meritev koncentracij težkih kovin v pesku in prašnih delcih vzdolž Postojnskega jamskega sistema so pokazale, da precej povišana vsebnost težkih kovin, predvsem železa, aluminija, svineca, cinka, bakra, mangana in kroma v prašnih delcih na stenah jamskega sistema ni posledica le posipanja peska po progi, temveč lahko izvirajo tudi iz aluvialnih nanosov reke Pivke v zgornje (turistične) dele sistema ter v primeru železa tudi zaradi obrabe in rjavenja železniških tirov. Posipanje peska na železniške tire in vožnja turističnega vlaka v določeni meri vplivajo na doprinos k prenašanju delcev zaradi spremenjene mikroklimе, vendar posipanje proge s peskom ne more biti edini vzrok za nastale spremembe oziroma usedline. Pri vseh izmerjenih elementih so namreč opazna nihanja v koncentraciji. Kažejo se podobnosti med dvema ali tremi elementi, kar lahko kaže na to, da je izvor delcev delno naraven. Po drugi strani smo določili največje vsebnosti težkih kovin v temperaturno stabilnejših delih jamskega sistema, največkrat pa so se maksimalne vsebnosti pojavile v rjavem delu jame, zgornjem nivoju horizontalnega profila v Kongresni dvorani in spodnjem delu Velike gore.

V vhodnih delih jame, kjer so razlike v temperaturi in vlažnost zraka največje, sem s kvantitativno gravimetrično analizo ugotovila, da je bila količina odloženih delcev v črnem delu jame največja, vendar je bila koncentracija težkih kovin glede na ostala mesta precej nizka. Če bi bil za onesnaženje z delci in težkimi kovinami glavni vzrok zunanji zrak, bi pričakovali največjo vsebnost težkih kovin v prašnih delcih ravno na vhodu, kjer je sušenje največje, hkrati pa bi pričakovali tudi postopno zniževanje koncentracij proti notranjosti jame. Glavni vzrok za prašne delce v ožganem delu jame je tako eksplozija goriva v 2. svetovni jami. Poleg črnega dela jame so se večje količine odloženih delcev pojavile tudi v Kongresni dvorani. To je najverjetneje posledica spremembe mikroklimе, saj se hitrost pretoka vtekajočega zraka v dvorano po vstopu v dvorano zaradi širšega profila zmanjša, kar vpliva na večjo hitrost usedanja delcev na stene jame. V ostalih delih jame je bila količina prašnih delcev manjša, vendar je bila koncentracija težkih kovin lahko večja, kar verjetno kaže na to, da se bolj drobni prašni delci dvigajo, prenašajo ter odlagajo v notranjosti jame, in sicer v obdobju zimskega kroženja zraka. Kljub vsemu pa na izvor prašnih delcev najverjetneje vpliva tudi turistična infrastruktura (proga, vlak), saj v stranskih rovih, kot sta Male in Lepe jame, usedlin oziroma onesnaženosti s prašnimi delci ni. Poleg tega je bilo v posipanem pesku ob progi več železa, katerega izvor so najverjetneje rjaveče, že dotrajane tračnice in njihova dodatna obraba zaradi vožnje z vlakom, kar dokazuje rjavo-rdeča obarvanost peska in površine ob progi – globlje v jami (v območju Starih jam) je namreč jasno razviden nenaden preskok iz osmojene/črne barve iz vhodnega dela jame v rjavo obravano površino.

Na usedanje prašnih delcev najbolj vpliva zimski režim kroženja zraka, kjer stabilna plast hladnega zraka, ki vteka v jamo, izpodriva toplejši zrak proti stropu, pri tem pa se izsušuje tla, zrak in površine v jami. Iz posušenih tal se zaradi povzročanja vrtnčastega zraka in tresenja odnašajo delci tako naravnega izvora (sedimentov) kot tudi antropogenega izvora, ki nastajajo zaradi vožnje s turističnim vlakom. Spremenjena mikroklima, ki vpliva na kroženje zraka, pripomore k prenašanju drobnih delcev, kateri se v odvisnosti od hitrosti gibanja zračnih tokov, velikosti delcev in širine rovov različno odlagajo vzdolž jamskega sistema. Izvori delcev so torej naravni in antropogeni, na njihov nastanek in prenos pa vplivata tako jamska železnica kot tudi zimsko kroženje zraka.

Za nadaljne raziskave bi bilo potrebno opraviti natančno raziskavo sestave delcev na večjem številu merilnih mest, prav tako natančno sestavo aluvialnih sedimentov oziroma naravnega ozadja v jami (recimo Pisani rov) ter določiti sestavo v zunanjem zraku pred Postojnsko jamo (ploščad), ki pozimi piha v notranjost jame, s katerimi bi lahko opredelili oziroma izločili določene vplive (težke kovine, npr. svinec).

V spodnjem in sredinskem delu na Veliki gori sem opazila poleg prašnih delcev, večje količine tekstilnih nitk, ki se oprijemajo kapnikov in sigovih površin. Na tem območju turisti lahko pridejo v neposreden stik z jamskimi površinami. Zato priporočam uvedbo zaščitnih oblek za turiste, ki so narejeni iz neuničljivih (umetnih) in udobnih materialov.

Priporočljivo je tudi, da bi se predvsem pozimi zapirala vhodna, rešetkasta vrata, tako da bi bil dotok hladnega-zimskega zraka onemogočen. S tem bi lahko nekoliko omejili izsuševanje zraka, tal in površin in posledično delno preprečili odnašanje in prenos delcev vzdolž Postojnskega jamskega sistema.

Železnica v jami simbolizira tehnološki razvoj preteklega časa, ki danes za seboj pušča vidne sledove v obliki prašnih delcev. V modernejšem času se bolj zavedamo vrednosti narave in ravnotežja, ki podpirata mikro- in makro- (eko) sisteme zato je nujno, da tudi današnji razvoj gre v smer varovanja ranljivih naravnih vrednot še posebej tistih, ki se rabijo tudi za turistično dejavnost. Smiselno bi zato bilo poiskati alternativo jamski železnici, ki bi tudi obiskovalcu omogočila kvaliteten obisk.

Postojnska jama nam s svojo prisotnostjo nudi mnoga, nova in navdihujoča spoznanja o biologiji, geologiji, naravi in nas samih. Ob njenih lepotah, ki jih je ustvaril čas, običajno obnemimo. Če bi pretekli čas, ki je bil potreben za ustvaritev najstarejšega kapnika v jami, to je približno 530000 let preračunali na en sam dan, bi prišli do ugotovitve, da jama poznamo približno pol minute, kar je z *našim* načinom štetja približno 200 let. Glede na to da Postojnska jama danes ni več takšna, kot je bila pred turizmom, in da zgublja svojo estetskost ravno zaradi nas, obiskovalcev, je mogoče res pravi čas, da si vzamemo za njo vsaj minuto in ji povrnemo spoštovanje, ki si ga zasluži.

6 VIRI

Aley T. 1976. Caves, cows and carrying capacity, V: National Cave Management Symposium Proceedings 1975. Speleobooks: 70-71 str.

Atlas okolja. 2007. Agencija Republike Slovenije za okolje.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (12.10.2011)

Atkins P.W., Clugston M.J., Frazer M.J., Jones R.A.Y. 1997. Kemija: Zakonitosti in uporaba. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije.

Fernandez-Cortes F.A., Calaforra J.M., Sanchez-Martos F. 2006. Spatiotemporal analysis of air conditions as a tool for the environmental management of the show cave. *Atmospheric Environment*, 40: 7378-7394 str.

Crestani G., Anelli F. 1939 Recherche di meteorologia ipogea nella grotte di Postumia. *Ministeri di lavori pubblici, Uff. Idrografico, No.143, VII/162, Roma.*

Čar J. 1982. Geološka zgradba požiralnega obrobja Planinskega polja. *Acta Carsologica*, 10: 75-105 str.

de Freitas Chris R., Littlejohn R.N., Clarkson T.S., Kristament I.S. 1982. Cave climate: Assesment of airflow and ventilation. *Journal of Climatology (International Journal of Climatology)*, 2: 383-397 str.

de Freitas Chris R., Littlejohn R.N. 1987. Cave climate: Assesment of heat and moisture exchange. *Internal Journal of Climatology*, 7: 553-569 str.

de Freitas Chris R. 2010. The role and importance of cave microclimate in sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica*, 39 (3): 477-489 str.

Emsley J. 2001. Chromium: Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements. Oxford, England, UK: Oxford University Press: 495-498 str.

Emsley J. 2001. Zinc: Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements. Oxford, England, UK: Oxford University Press: 503 str.

Emsley J. 2001. Manganese: Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements. Oxford, UK: Oxford University Press: 249-253 str.

Eraso A.1965. Tentative monogram for Cave Climate Calculation. *Problems of the Speleological Research*, I. Prague.

Gams I. 1970a. Zračna cirkulacija kot del jamskega okolja. *Peti jugoslovanski speleološki kongres Skopje i Ohrid, 15.-20.IX., 1968, Skopje 1970: 99-111 str.*

Gams I. 1971b. Konimetrične meritve v Postojnski jami in vprašanje speleoterapevtskega raziskovanja pri nas. *Naše jame*, 12. Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 35-41 str.

Gams I. 1974. Kras: Zgodovinski, naravoslovni in geografski opis. 2. izdaja. Ljubljana, Slovenska Matica: 216 str.

Gams I., Nicod J., Julian M., Anthony E., Sauro E. 1993. Environmental Change and Human Impacts on the Mediterranean Karsts of France, Italy and Dinaric Region. *Catena Supplement*, 25: 59-98 str.

Gams I. 2002. Vpliv vdiranja zimskega mraza na jamsko okolje. Postojnska jama in primorske turistične jame. *Proteus* 3 (65): 102-111 str.

Gams I. 2003. Kras v prostoru in času. 1. izdaja, Ljubljana, ZRC, ZRC SAZU: 132-319 str.

Geološki zavod Slovenije:

<http://kalcedon.geo-zs.si/website/OGK100/images/pixel.gif> (12.10.2011)

Gillieson D. 1996. *Caves: Process, Development and Management*. Blackwell, Oxford, England: 325 str.

Gospodarič R. 1963. Sledovi tektonskih premikov iz ledene dobe v Postojnski jami. Naše jame. Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 5-11 str.

Gospodarič R., Habič P. (ur.). 1976. *Underground water tracing*. Ljubljana. 1-312 str.

Gospodarič R., Habe F. Habič P. 1970. Orehovški kras in izvir Korentana. *Acta Carsologica*, 5: 95-108 str.

Gospodarič R. 1976. Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem. *Acta Carsologica*, 7: 5-135 str.

Gospodarič R. 1984. O speleogenezi Divaške jame in Trhlovce. *Acta Carsologica*, 16: 19-30 str.

Greenwood N.N., Earnshaw A. 1997. *Chemistry of the Elements*. 2. Izdaja. Oxford: Butterworth-Heinemann: 217 str.

Gressel W. 1968. Zur Kenntnis der Höhlenmeteorologie, Actes di IV^e congres international de spéléologie en Yugoslavie-*Proceedings of the 4th international Congress of Speleology in Yugoslavia* (12.-26. IX. 1965). Ljubljana 1965.

Habe F. 1976. Postojnska jama in druge turistične jame Slovenije. 1. izdaja. Postojnska jama: 14-51 str.

Hammond C. R. 2004. *The Elements, Handbook of Chemistry and Physics*. 81. izdaja. CRC Press, Francis And Taylor Group.

Holleman A. F., Wiberg, N. 2001. *Inorganic Chemistry*. 1. Izdaja. San Diego: Academic Press.

Huppert G., Burri E., Forti P., Cigna A. 1993. Effects of Tourist Development on Caves and Karst, *Catena Supplement*, 25: 251-268 str.

James J.M. 2004. Condensation Corrosion. V: Gunn J. (ur.). *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. New York and London, Fritzy Dearborn: 240-241 str.

- Knez M., Zupan N. 1992. Minerali v slovenskih kraških jamah. 1. izdaja. Postojna, IZK ZRC SAZU: 3-13 str.
- Kogovšek J., Kranjc A. 1989. Vpliv kislih padavin na procese v Postojnski jami. *Acta Carsologica*, 18: 157-173 str.
- Kogovšek J. 1992. Flowstone deposition in the Slovenian Caves. *Acta Carsologica*, 21: 167-173 str.
- Kogovšek J., Zupan N. 1992. Prenos trdnih delcev pri vertikalni cirkulaciji v krasu. *Naše Jame*, 34. Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 13-19 str.
- Kotaš J., Stasicka Z. 2000. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental Pollution*, 107: 263–283 str.
- Kranjc A., Kariž S., Paternost S., Berčon M. 2007. Postojnska jama: Vodnik. Postojnska jama Turizem d.d.: 12-65 str.
- Lehto R. S. 1968. Zinc. V: *The Encyclopedia of the Chemical Elements*. Hampel C.A. New York, Reinhold Book Corporation: 822–830 str.
- McDonald, I., Sloan G. C., Zijlstra A. A., Matsunaga N., Matsuura M., Kraemer K. E., Bernard-Salas J., Markwick A. J. 2010. Rusty Old Stars: A Source of the Missing Interstellar Iron? *The Astrophysical Journal Letters* 717 (2): 92-97 str.
- Mihevc A., Šebela S. 2009. 17th International Karstological School "Classical Karst". Postojna, ZRC SAZU: 1-20 str.
- Morgan J. W., Anders E. 1980. Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 77 (12): 6973 – 6977 str.
- Mesečni bilten. 2007. Urad za meteorologijo. Agencija Republike Slovenije za okolje.
- Ober J.A. 2010. Mineral Commodity Summaries 2008: Strontium. United States Geological Survey: 162-163 str.
- Panoš V., Boháč S., Koukal A. 1991. Principles of Speleotherapy. *Studia carsologica* 4, Brno: 41 – 47 str.
- Prasad M.N.V., Sajwan K.S., Naidu R. 2006. Trace elements in the Environment: Biochemistry, Biotechnology and Bioremediation. Boca Raton: CRC/Taylor and Francis: 127 str.
- Pulido-Bosch A., Martin-Rosales W., Lopez-Chicano M., Rodriguez-Navarro C.M., Vallejos A. 1997. Human Impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology* 31 (3-4): 142-149 str.
- Quindos L.S., Bonet A., Diaz-Caneja A., Fernande P.L., Gutierrez I., Solana J.R., Soto J., Villar E. 1987. Study of environmental variables affecting the natural preservation of the Altamira Cave paintings located at Santillana-del-Mar, Spain. *Atmospheric Environment* 21 (3): 551-560 str.
- Repe B. 2006. Svetovna klasifikacija prsti. *Geografski obzornik* 53 (1): 22 str.

Sanchez-Moral S., Soler S., Canaveras J.C., Sanz-Rubio E., Van Grieken K. 1999. Inorganic deterioration affecting the Altamira Cave, N Spain: Quantitative approach to wall corrosion (solutional etching) process induced by visitors. *Science of the Total Environment*, 244: 67-84 str.

Skoog D.A., West D.M., Holler J.F., Crouch S.R. 2004. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. 8th Edition. Brooks/Cole-Thomson Learning: 842-856 in 1039-1046 str.

Slabe T. 1988. Kondenzna korozija na skalnem obodu Komarjevega rova v Dimnicah. *Acta Carsologica* 18: 79-92 str.

Tarhule-Lips R.F.A., Ford D.C. 1998. Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and Isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies*, 60 (2): 84-95 str.

Williams P.W. 1993. Environmental Change and Human Impact on Karst Terrains: An Introduction. *Catena Supplement*, 25: 1-19 str.

WHO (World Health Organisation). 1988. Chromium. *Environmental Health Criteria*. 61. Geneva.

Zupan N. 1991. Flowstone dataion in Slovenia. *Acta Carsologica*, 31 (3): 187-204 str.

Zupan N., Knez M. 1992. Minerali v Slovenskih kraških jamah. Postojna, IZK ZRC SAZU: 3-13 str.

Zupan Hajna N. 1993. Survey of published flowstone dataion from Slovenia. *Naše jame* 35 (1). Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 83-87 str.

Zupan Hajna N., Pruner P., Mihevc A., Schnabl P., Bosak P. 2008. Cave sediments from Postojnska-Planinska cave system (Slovenia): Evidence of multi phase evolution in epiphreatic zone. *Acta Carsologica*, 37 (1): 63-86 str.

Zupančič N., Šebela S., Miler M. 2011. Mineralogical and mechanical characteristics of black coatings in Postojna cave system. *Acta Carsologica*, 40 (2): 307-317 str.

PRILOGA

Priloga A
Fotografije vzorčevalnih mest za določitev sestave in
količine odloženih prašnih delcev



Slika 1: Črn del jame



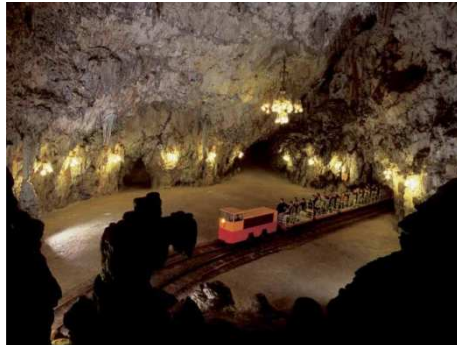
Slika 2: pred Kongresno dvorano



Slika 3: Kongresna dvorana-spodaj



Slika 4: Kongresna dvorana-zgoraj



Slika 5: Vstop v Kongresno dvorano (vir: postojnska-jama.si, 2010)



Slika 6: Rjav del jame





Slika 7: Velika gora- spodaj



Slika 8: Velika gora-sredina



Slika 9: Velika gora- zgoraj (vir: postojnska-jama.si)



Slika 10: Črn del jame



Slika 11: pred Kongresno dvorano (sredina)



Slika 12: Kongresna dvorana (zgoraj)



Slika 13: Rjav del jame

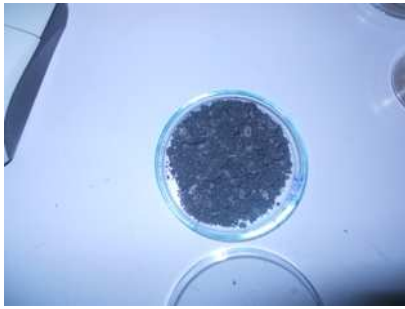


Slika 14: Velika gora (spodaj)



Slika 15: Velika gora (zgoraj)

Priloga B
Fotografije vzorcev prašnih delcev
za določitev sestave v prašnih delcih 1-14



Slika 16: Vzorec iz črnega dela jame



Slika 17: Pred Kongresno dvorano-spodaj



Slika 18: Pred Kongresno dvorano-sredina



Slika 19: Pred Kongresno dvorano-zgoraj



Slika 20: Kongresna dvorana-spodaj (A)



Slika 21: Kongresna dvorana-spodaj (B)



Slika 22: Kongresna dvorana-spodaj (C)



Slika 23: Kongresna dvorana-zgoraj (A)



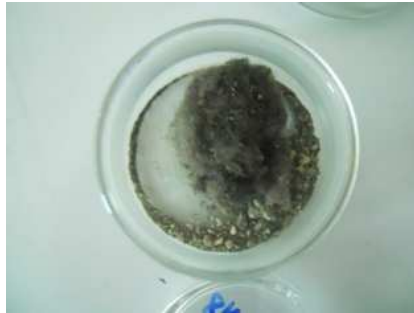
Slika 24: Kongresna dvorana-zgoraj (B)



Slika 25: Kongresna dvorana-zgoraj (C)



Slika 26: Rjavi del jame



Slika 27: Velika gora-spodaj

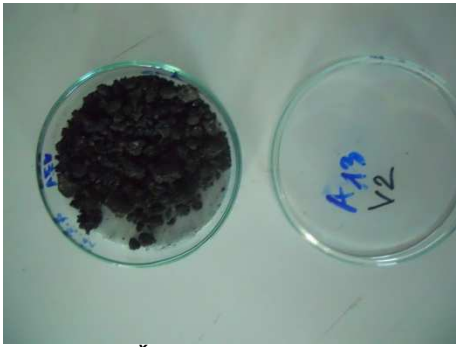


Slika 28: Velika gora-sredina



Slika 29: Velika gora-zgoraj

Priloga C
Fotografije vzorcev prašnih delcev
za določitev količine usedlin prašnih delcev 1-6



Slika 30: Črn del jame



Slika 31: Pred Kongresno dvorano-sredina



Slika 32: Kongresna dvorana-zgoraj



Slika 33: Rjav del jame



Slika 34: Velika gora-spodaj



Slika 35: Velika gora-zgoraj

Priloga D
Rezultati meritev koncentracij težkih kovin
v pesku (original, posipni) in vzorcev prašnih delcev 1-14

Koncentracija težkih kovin v pesku (original, posipni) in predhodne analize prašnih delcev v vzorcih v črnem in rjavem delu jame, ter na vrhu Velike gore:

Tabela 1 : Rezultati sestave in količine težkih kovin predhodne analize v pesku in prašnih delcih v vzorcih (23. Decembra, 2010)

Element	Koncentracija	Mesto vzorčenja/Vzorec				
		Posipni pesek-original	Posipni pesek-ob progi	Črn del jame	Rjav del jame	Velika Gora (vrh)
Aluminij	($\mu\text{g/g}$)	298	578	3710	6650	18988
Krom	($\mu\text{g/g}$)	17,5	17,0	36,1	36,5	41,1
Mangan	($\mu\text{g/g}$)	10,8	46,1	63,5	297	435
Železo	($\mu\text{g/g}$)	2341	4169	3771	26413	14415
Baker	($\mu\text{g/g}$)	0,95	3,64	46,0	71,9	40,6
Cink	($\mu\text{g/g}$)	3,57	4,64	145	85,0	89,5
Stroncij	($\mu\text{g/g}$)	437	478	74,9	85,7	94,6
Svinec	($\mu\text{g/g}$)	0,54	1,31	515	302	239
Vanadij	($\mu\text{g/g}$)	19,6	19,2	7,14	24,9	40,0
Kobalt	($\mu\text{g/g}$)	0,71	1,04	1,51	3,75	7,24
Arzen	($\mu\text{g/g}$)	0,21	1,12	3,30	18,3	8,5
Selen	($\mu\text{g/g}$)	0,50	0,57	1,68	0,66	0,14
Galij	($\mu\text{g/g}$)	0,08	0,16	0,96	2,57	5,13
Molibden	($\mu\text{g/g}$)	0,19	0,61	0,39	2,74	0,7
Kadmij	($\mu\text{g/g}$)	0,83	0,84	1,21	0,92	0,79
Antimon	($\mu\text{g/g}$)	0,18	0,56	3,25	24,5	2,5
Talij	($\mu\text{g/g}$)	0,03	0,03	0,07	0,19	0,26

Koncentracija železa po posameznih merilnih mestih:

Tabela 2: Rezultati meritev železa po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
Črn del jame	1	$\mu\text{g/g}$	5310	4556	7180	6825	5109	5796	1142
Pred Kongresno dvorano-spodaj	2	$\mu\text{g/g}$	30860	42420	39120	49930	33286	39123	7582
Pred Kongresno dvorano-sredina	3	$\mu\text{g/g}$	27888	28586	28892	28586	33630	28488	425
Pred Kongresno dvorano-zgoraj	4	$\mu\text{g/g}$	71322	66991	65110	77250	87577	73650	9077
Kongresna dvorana-spodaj A	5	$\mu\text{g/g}$	8048	10713	10513	9057	9910	9648	1102
Kongresna dvorana-spodaj B	6	$\mu\text{g/g}$	8451	7821	8349	7502	7958	8016	389
Kongresna dvorana-spodaj C	7	$\mu\text{g/g}$	7703	5303	10195	7790	10987	8396	2256
Kongresna dvorana-zgoraj A	8	$\mu\text{g/g}$	17734	15641	13773	18242	19614	17001	2300
Kongresna dvorana-zgoraj B	9	$\mu\text{g/g}$	561	528	556	561	521	545	19
Kongresna dvorana-zgoraj C	10	$\mu\text{g/g}$	10105	11707	10514	11144	10892	10872	609
Rjav del jame	11	$\mu\text{g/g}$	82807	90641	91656	79213	85147	85893	5254
Velika gora-spodaj	12	$\mu\text{g/g}$	10631	17392	13111	13544	13206	13577	2428
Velika gora-sredina	13	$\mu\text{g/g}$	6330	5664	5192	6246	6809	6048	628
Velika gora-zgoraj	14	$\mu\text{g/g}$	10798	9679	13758	12146	9724	11221	1738

Koncentracija aluminija po posameznih merilnih mestih:

Tabela 3: Rezultati meritev aluminija po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
Črn del jame	1	µg/g	1237	1175	1204	1461	1184	1200	27,6
Pred Kongresno dvorano-spodaj	2	µg/g	3611	4379	4290	4665	3623	4114	474
Pred Kongresno dvorano-sredina	3	µg/g	31139	33482	35567	30803	33280	32854	1942
Pred Kongresno dvorano-zgoraj	4	µg/g	7065	7409	9078	9478	10818	8770	1545
Kongresna dvorana-spodaj A	5	µg/g	10112	10840	13131	10296	10674	10481	335
Kongresna dvorana-spodaj B	6	µg/g	4553	4548	4007	4800	4528	4487	290
Kongresna dvorana-spodaj C	7	µg/g	4121	3291	4608	4467	4164	4130	511
Kongresna dvorana-zgoraj A	8	µg/g	4982	6258	4919	9317	7468	6589	1850
Kongresna dvorana-zgoraj B	9	µg/g	7726	6414	7034	6175	6361	6742	638
Kongresna dvorana-zgoraj C	10	µg/g	2669	2923	3208	3173	3111	3017	223
Rjav del jame	11	µg/g	2509	3069	3156	3743	3006	3096	440
Velika gora-spodaj	12	µg/g	3867	5818	4639	5880	4538	4948	874
Velika gora-sredina	13	µg/g	3685	3665	2904	4040	3931	3645	443
Velika gora-zgoraj	14	µg/g	9247	8829	9677	5880	8714	9117	438

Koncentracija svınca po posameznih merilnih mestih:

Tabela 4: Rezultati meritev svınca po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
<i>Črn del jame</i>	1	µg/g	547	545	326	405	354	435	104
<i>Pred Kongresno dvorano-spodaj</i>	2	µg/g	248	323	311	383	281	309	50,3
<i>Pred Kongresno dvorano-sredina</i>	3	µg/g	232	266	316	325	368	301	53,2
<i>Pred Kongresno dvorano-zgoraj</i>	4	µg/g	408	377	382	423	409	399	19,4
<i>Kongresna dvorana-spodaj A</i>	5	µg/g	66,6	83,3	88	78,2	84,5	80	8,44
<i>Kongresna dvorana-spodaj B</i>	6	µg/g	1743	2089	1858	2023	2016	1946	141,6
<i>Kongresna dvorana-spodaj C</i>	7	µg/g	701	230	458	638	827	571	232
<i>Kongresna dvorana-zgoraj A</i>	8	µg/g	457	356	326	425	553	423	89,2
<i>Kongresna dvorana-zgoraj B</i>	9	µg/g	965	764	905	744	813	838	94,3
<i>Kongresna dvorana-zgoraj C</i>	10	µg/g	5317	5684	4047	4736	4909	4938	619
<i>Rjav del jame</i>	11	µg/g	520	529	514	491	442	499	34,9
<i>Velika gora-spodaj</i>	12	µg/g	1433	2255	1180	2163	3732	2153	995
<i>Velika gora-sredina</i>	13	µg/g	212	172	129	275	234	204	56,3
<i>Velika gora-zgoraj</i>	14	µg/g	140	144	164	169	160	155	12,5

Koncentracija stroncija po posameznih merilnih mestih:

Tabela 5: Rezultati meritev stroncija po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
<i>Črn del jame</i>	1	$\mu\text{g/g}$	54,2	58,9	63,2	61,6	60,4	59,6	3,45
<i>Pred Kongresno dvorano-spodaj</i>	2	$\mu\text{g/g}$	141,	150	160	164	141	151	10,7
<i>Pred Kongresno dvorano-sredina</i>	3	$\mu\text{g/g}$	125	126	134	131	140	131	6,19
<i>Pred Kongresno dvorano-zgoraj</i>	4	$\mu\text{g/g}$	163	152	168	176	159	164	9,00
<i>Kongresna dvorana-spodaj A</i>	5	$\mu\text{g/g}$	69,0	82,3	70,9	95,2	78,2	79	10,5
<i>Kongresna dvorana-spodaj B</i>	6	$\mu\text{g/g}$	195	176	216	169	186	188	18,3
<i>Kongresna dvorana-spodaj C</i>	7	$\mu\text{g/g}$	150	154	184	150	168	161	15,0
<i>Kongresna dvorana-zgoraj A</i>	8	$\mu\text{g/g}$	578	436	340	874	607	567	202
<i>Kongresna dvorana-zgoraj B</i>	9	$\mu\text{g/g}$	1383	1169	1207	1057	1703	1304	252
<i>Kongresna dvorana-zgoraj C</i>	10	$\mu\text{g/g}$	241	278	230	218	207	235	27,3
<i>Rjav del jame</i>	11	$\mu\text{g/g}$	144,8	135	139	124	125	133	8,72
<i>Velika gora-spodaj</i>	12	$\mu\text{g/g}$	119	141	118	138	118	127	11,9
<i>Velika gora-sredina</i>	13	$\mu\text{g/g}$	71,5	71,9	51,4	53,5	60,5	61,7	9,66
<i>Velika gora-zgoraj</i>	14	$\mu\text{g/g}$	109	132	110	134	132	123	12,6

Koncentracija cinka po posameznih merilnih mestih:

Tabela 6: Rezultati meritev cinka po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
<i>Črn del jame</i>	1	$\mu\text{g/g}$	107	99,8	105	121	105	108	8,09
<i>Pred Kongresno dvorano-spodaj</i>	2	$\mu\text{g/g}$	124	144	129	152	121	134	13,4
<i>Pred Kongresno dvorano-sredina</i>	3	$\mu\text{g/g}$	132	136	146	170	185	154	22,8
<i>Pred Kongresno dvorano-zgoraj</i>	4	$\mu\text{g/g}$	511	430	443	497	497	475	36,4
<i>Kongresna dvorana-spodaj A</i>	5	$\mu\text{g/g}$	117	102	51,7	116	119	114	7,74
<i>Kongresna dvorana-spodaj B</i>	6	$\mu\text{g/g}$	86,7	65,0	63,8	63,5	74,4	70,7	10,0
<i>Kongresna dvorana-spodaj C</i>	7	$\mu\text{g/g}$	259	105	163	187	231	189	59,9
<i>Kongresna dvorana-zgoraj A</i>	8	$\mu\text{g/g}$	937	177	143	210	211	185	32,0
<i>Kongresna dvorana-zgoraj B</i>	9	$\mu\text{g/g}$	835,2	682	736	640	721	723	72,9
<i>Kongresna dvorana-zgoraj C</i>	10	$\mu\text{g/g}$	889	2463	833	1209	1297	1057	230
<i>Rjav del jame</i>	11	$\mu\text{g/g}$	334	356	362	316	339	341	17,9
<i>Velika gora-spodaj</i>	12	$\mu\text{g/g}$	264	89,9	411	639	366	420	158
<i>Velika gora-sredina</i>	13	$\mu\text{g/g}$	89,9	85,6	70,8	107	112	93,3	16,9
<i>Velika gora-zgoraj</i>	14	$\mu\text{g/g}$	96,9	89,9	98,5	95,2	106	97,5	6,09

Koncentracija mangana po posameznih merilnih mestih:

Tabela 7: Rezultati meritev mangana po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
<i>Črn del jame</i>	1	μg/g	48,6	42,5	47,7	45,9	45,1	45,9	2,37
<i>Pred Kongresno dvorano-spodaj</i>	2	μg/g	234	313	284	343	235	282	48,1
<i>Pred Kongresno dvorano-sredina</i>	3	μg/g	687	686	697	633	706	682	28,5
<i>Pred Kongresno dvorano-zgoraj</i>	4	μg/g	296	279	319	336	426	331	57,2
<i>Kongresna dvorana-spodaj A</i>	5	μg/g	200	321	318	239	278	271	52,0
<i>Kongresna dvorana-spodaj B</i>	6	μg/g	118	112	119	118	113	116	3,19
<i>Kongresna dvorana-spodaj C</i>	7	μg/g	200	103	156	411	185	161	42,6
<i>Kongresna dvorana-zgoraj A</i>	8	μg/g	220	232	253	318	298	264	42,2
<i>Kongresna dvorana-zgoraj B</i>	9	μg/g	316	272	289	258	303	288	23,1
<i>Kongresna dvorana-zgoraj C</i>	10	μg/g	105	113	131	122	114	117	9,88
<i>Rjav del jame</i>	11	μg/g	602	632	639	759	583	643	68,7
<i>Velika gora-spodaj</i>	12	μg/g	251	242	161	197	155	201	44,2
<i>Velika gora-sredina</i>	13	μg/g	167	119	104	135	141	133	23,6
<i>Velika gora-zgoraj</i>	14	μg/g	264	219	237	504	210	232	24,0

Koncentracija bakra po posameznih merilnih mestih:

Tabela 8: Rezultati meritev bakra po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
<i>Črn del jame</i>	1	$\mu\text{g/g}$	65,0	44,1	62,8	53,0	48,8	54,8	65,1
<i>Pred Kongresno dvorano-spodaj</i>	2	$\mu\text{g/g}$	48,8	63,9	53,8	66,5	52,7	57,1	7,66
<i>Pred Kongresno dvorano-sredina</i>	3	$\mu\text{g/g}$	57,8	60,9	71,9	71,4	86,5	69,7	11,3
<i>Pred Kongresno dvorano-zgoraj</i>	4	$\mu\text{g/g}$	233	196,4	185	220	197	206	19,8
<i>Kongresna dvorana-spodaj A</i>	5	$\mu\text{g/g}$	22,6	21,9	266	25,0	24,2	23,4	1,43
<i>Kongresna dvorana-spodaj B</i>	6	$\mu\text{g/g}$	26,2	25,85	25,6	26,6	26,9	26,2	0,54
<i>Kongresna dvorana-spodaj C</i>	7	$\mu\text{g/g}$	64,7	30,6	67,6	48,6	57,0	53,7	14,8
<i>Kongresna dvorana-zgoraj A</i>	8	$\mu\text{g/g}$	66,1	61,5	55,9	81,9	82,4	69,6	12,1
<i>Kongresna dvorana-zgoraj B</i>	9	$\mu\text{g/g}$	196	163	179	156	183	175	16,1
<i>Kongresna dvorana-zgoraj C</i>	10	$\mu\text{g/g}$	224	220	198	210	233	217	13,2
<i>Rjav del jame</i>	11	$\mu\text{g/g}$	172	187	192	164	171	177	172
<i>Velika gora-spodaj</i>	12	$\mu\text{g/g}$	51,7	117	84,7	105	81,8	88,1	25,2
<i>Velika gora-sredina</i>	13	$\mu\text{g/g}$	40,0	35,5	34,0	49,8	51,3	42,1	8,03
<i>Velika gora-zgoraj</i>	14	$\mu\text{g/g}$	31,9	30,9	31,7	34,8	32,6	32,4	1,47

Koncentracija kroma po posameznih merilnih mestih:

Tabela 9: Rezultati meritev kroma po posameznih merilnih mestih

Merilno mesto	Vzorec	Koncentracija	Meritev					Povprečje	Standardni odklon
			1	2	3	4	5		
Črn del jame	1	μg/g	8,00	7,46	7,63	7,94	10,3	7,76	0,26
Pred Kongresno dvorano-spodaj	2	μg/g	22,2	30,3	25,8	31,5	23,8	26,7	4,04
Pred Kongresno dvorano-sredina	3	μg/g	56,0	58,5	65,5	65,8	71,6	63,5	6,23
Pred Kongresno dvorano-zgoraj	4	μg/g	20,8	19,5	22,2	22,7	26,6	22,4	2,69
Kongresna dvorana-spodaj A	5	μg/g	21,6	25,5	22,9	28,0	24,4	24,5	2,47
Kongresna dvorana-spodaj B	6	μg/g	9,86	9,21	12,8	9,50	10,2	9,69	0,43
Kongresna dvorana-spodaj C	7	μg/g	27,9	26,1	33,1	26,4	27,5	26,9	0,85
Kongresna dvorana-zgoraj A	8	μg/g	20,7	22,2	20,5	30,7	29,4	24,7	4,95
Kongresna dvorana-zgoraj B	9	μg/g	100	76,9	88,2	71,0	71,2	76,8	8,06
Kongresna dvorana-zgoraj C	10	μg/g	14,9	16,2	15,3	16,7	15,8	15,8	0,70
Rjav del jame	11	μg/g	69,7	72,5	75,9	60,2	65,5	68,7	6,12
Velika gora-spodaj	12	μg/g	29,3	97,6	55,7	82,9	47,3	62,5	27,5
Velika gora-sredina	13	μg/g	18,5	17,4	16,0	24,4	26,3	20,5	4,53
Velika gora-zgoraj	14	μg/g	23,0	22,8	33,0	33,0	22,9	26,9	5,53