

KONCENTRACIJA CO<sub>2</sub> V JAMAH V ODVISNOSTI  
OD ZRAČNE CIRKULACIJE (NA PRIMERU  
POSTOJNSKE JAME)

(z 2 slikama v besedilu)

CONCENTRATION OF CO<sub>2</sub> IN THE CAVES IN RELATION TO THE AIR  
CIRCULATION (IN THE CASE OF THE POSTOJNA CAVE)

(with 2 Figures in Text)

I V A N G A M S

(Oddelek za geografijo Filozofske fakultete, Ljubljana)

Referat na 6. kongresu speleologov Jugoslavije  
(Sežana—Lipica, 10.—15. oktober 1972)

Paper presented at the 6<sup>th</sup> Yugoslav Speleological Congress  
(Sežana—Lipica, 10.—15, October 1972)



Koncentracija  $\text{CO}_2$  v jamskem zraku je zanimiva z raznih vidikov. Kjer voda odlaga sigo, uhaja iz nje po obstoječih formulah sproščeni  $\text{CO}_2$ . Če pri tem pade celokupna trdota npr. z 200 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  na 160 mg, kar je v naših jamah pri počasnejšem polzenju in kapljanju pogosto, se zmanjša ekvivalentni  $\text{CO}_2$  pri 10° C za okoli 7 mg  $\text{CO}_2$ . V jamah, kjer raste obilica kapnikov in je slabotna zračna cirkulacija, bi zato pričakovali visoke koncentracije  $\text{CO}_2$ . Po isti logiki bi v zaprtih špranjah in votlinah, skozi katere prehaja sigotvorna kapnica, koncentracija  $\text{CO}_2$  tako narasla, da bi preprečila nadaljno tvorbo sige zaradi izenačenega parcialnega pritiska  $\text{CO}_2$  v zraku in v vodi. Toda v praksi naletimo v raznih usekih v apnenca na številne, povsem s sigo zapolnjene votlinice.

V novejšem času je koncentracija  $\text{CO}_2$  zanimiva za speleoterapijo. Trdijo, da je v jamah, v katerih zdravijo paciente, več  $\text{CO}_2$  in manj kisika. Zato mora pacient, ki boleha na dihalih, hitreje dihati, z večjo količino zraka pa gre skozi pljuča tudi več kalcijevih ionov in drugih zdravilnih elementov jamskega zraka (K. H. Spannagel, 1969). V tako obiskovanih jamah, kot je Postojnska, v kateri se letno zadržuje tri četrta milijona turistov, je vprašanje koncentracije ogljikovega dvokisa tudi vprašanje zdravega okolja. Saj jamskih prostorov, v katerih je v Belgiji po več desetkrat več  $\text{CO}_2$  kot v prostem ozračju (Ek et al., 1968 a), ne moremo zračiti kot običajne dvorane.

V krasoslovni literaturi je pojav  $\text{CO}_2$  v kraških jamah vključ obilici posameznih meritev nedognano vprašanje. Premalo je še meritev vzdolž jam, glede na vertikalno stratifikacijo ter letni čas, vse v odvisnosti od ostalih prirodnih pogojev jamskega okolja (več o meritvah J. Gams, 1970, 36). Doslej je bila v Postojnski jami koncentracija merjena samo v časovni dimenziji. Od aprila 1963 do konca marca 1964 je bila vsakih 14 dni merjena koncentracija  $\text{CO}_2$  v Rovu Biospeleološke postaje pred vrati in izza njih pri vodnih bazenih ter v Pralnici. Titrimetrično določevanje  $\text{CO}_2$  je potekalo s pomočjo reagentov baritovice, oksalne kisline in fenolftaleina po metodi in z instrumentarijem, kot ga je posredoval Oddelek za anorgansko kemijo FNT univerze v Ljubljani. Zrak za analizo je bil vzet 1 m nad tlemi. Ugotovljene so bile razmeroma nizke koncentracije, ki so na omenjenih treh mestih nihale dokaj vzporedno in v razponu od 0,03 do 0,15 ‰ prostornine zraka. Nizke vrednosti so bile pozimi in spomladi, višje poleti in jeseni. V nasprotju s pričakovanjem je nihala koncentracija  $\text{CO}_2$  v vse leto zaprti Biospeleološki postaji podobno kot v odprtem Glavnem rovu (I. Gams, 1968).

Da bi poglobili znanje o koncentraciji  $\text{CO}_2$  v globini jame ter v vertikalni stratifikaciji, so bile meritve v Postojnski jami obnovljene v l. 1972. Omogočil jih je Zavod Postojnske jame, ki je nabavil lahko prenosno aparaturo trdke Dräger ter cevke, ki z reagenti hidrazin in redoxin-indikator na mestu meritev

določujejo vsebnost  $\text{CO}_2$ . Ta metoda sicer ni najcenejša, a je od vseh, ki jih v svetu uporabljajo (glej: 1. Ek et al., 1968 a), najhitrejša.

Prve meritve vzdolž jame so bile opravljene 4. aprila 1972, ko se je končala zimska zračna cirkulacija. Tedaj je bilo pričakovati najnižje vrednosti. Zaradi epidemije črnih koz marca in v začetku aprila 1972 je bil turistični obisk jame izredno slab. Nekaj dni prej je bil zmeren dež. Ker je bila ob 9<sup>h</sup> na ploščadi pred jamo zračna temperatura le 6,8° C, je pihal v jamo zjutraj veter, ki je opoldne pojenjaval. Čeprav se je zrak med potjo po Glavnem rovu segreval, je relativna vlaga dosegla 100 %, kot po navadi, že pri Slonovi glavi. Severno od Razpotja so bile v Glavnem rovu temperature nad 9° C, v Brezimnem rovu 9,2°. Tako visoke temperature ob tem času po l. 1963 še niso bile zabeležene (J. G a m s., 1970). Odpira se vprašanje, ali se turistični del jame počasi segreva zaradi turističnega obiska in pogonov ter električne razsvetljave ali zaradi dvojnega vhoda, ali zaradi splošne otoplitve ozračja. Drugi kanal, skozi katerega je ta dan vdiral zunanji zrak v Stare jame, je Jama podzemeljske Pivke, iz katere se hladni zrak preliva skozi Spodnji Tartar proti Koncertni dvorani in Veliki gori.

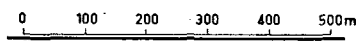
Izmerjene koncentracije en meter nad tlemi za 8. IV. 1972 prikazuje pod. 1. Glavni hodnik od Pivške jame do Velike gore ni imel povečane koncentracije  $\text{CO}_2$  — 0,03 %. Večji delež je  $\text{CO}_2$  zavzemal v nadaljnjih starih jamah in sicer 0,4 %. Po dosedanjih temperaturnih meritvah se je pokazala Črna jama kot samosvoja zračna celica z najhladnejšim zrakom; tako mesto zavzema tudi glede  $\text{CO}_2$ . Ob temperaturi 4,2° C je znašala koncentracija le 0,02 %, kar je manj kot v prosti atmosferi (v gozdu koleba med 0,0305 podnevi in 0,0320 ponoči, pa tudi med letom). To bi lahko tolmačili kot mersko napako, vendar so krasoslovci našli take primere tudi drugod (C. E k et al., 1968 b). Zato je treba računati z neznanimi redukcijskimi procesi  $\text{CO}_2$  v jamskem zraku.

Zaradi ugotovitve iz Topolce, da so tam tik nad vodno gladino zelo povečane koncentracije  $\text{CO}_2$  (do 5 %), ki utegnejo biti smrtne za potapljače (H. K e s s l e r., 1969), smo merili na koncu Spodnjega Tartara 5 in 150 cm nad gladino Pivke. Pokazalo se je nasprotno kakor so pričakovali. Niže je bila koncentracija 0,03, više pa 0,05 %, kar si je mogoče razlagati z gibanjem zraka tik nad vodo vzdolž vodnega toka, više pa v smeri proti Tartaru.

Ponovno je bila Postojnska jama premerjena ob višku turistične sezone 16. VII. 1972. Tedaj je bilo razmeroma hladno in rahlo deževno vreme. Vkljub temu je prihajal zunanji zrak skozi dihalnik na koncu Brezimnega rova in tekkel po Glavnem hodniku prek Razpotja proti Pivški dvorani. V tem letnem času se običajno zrak na tej poti ohlaja, ta dan pa se je ogreval in imel sredi Brezimnega rova 9,4°, pri Slonovi glavi pa 9,9° C (pod. 2). Relativna vlažnost je bila 98—100 %. Koncentracije  $\text{CO}_2$  so bile to pot znatno višje kot aprila, kar je bilo pričakovati. V že omenjenem vetrovnem kanalu je znašala od 0,07 v Brezimnem rovu do 0,26 % pri Slonovi glavi. V ostalem delu Starih jam je prevladovala koncentracija 0,08 %, v Črni jami in v Kapelici v Pivki jami pa rahlo nižja (0,07 oziroma 0,06 %). Nižja je bila tudi v Lepih jamah, v Ruskem rovu, na Veliki gori in v Koncertni dvorani. Ker se tu najbolj zadržujejo in pešajo turisti, bi pričakovali večje koncentracije kot tam, kjer se vozijo z vlakom. Meritve pa so pokazale narobe, kar ne govori za domnevo, da bi turistične množice bistveno povečale vsebnost  $\text{CO}_2$  v jami. Visoka koncentracija je bila ugotovljena v naj-

# POSTOJNSKA JAMA

POD. 1

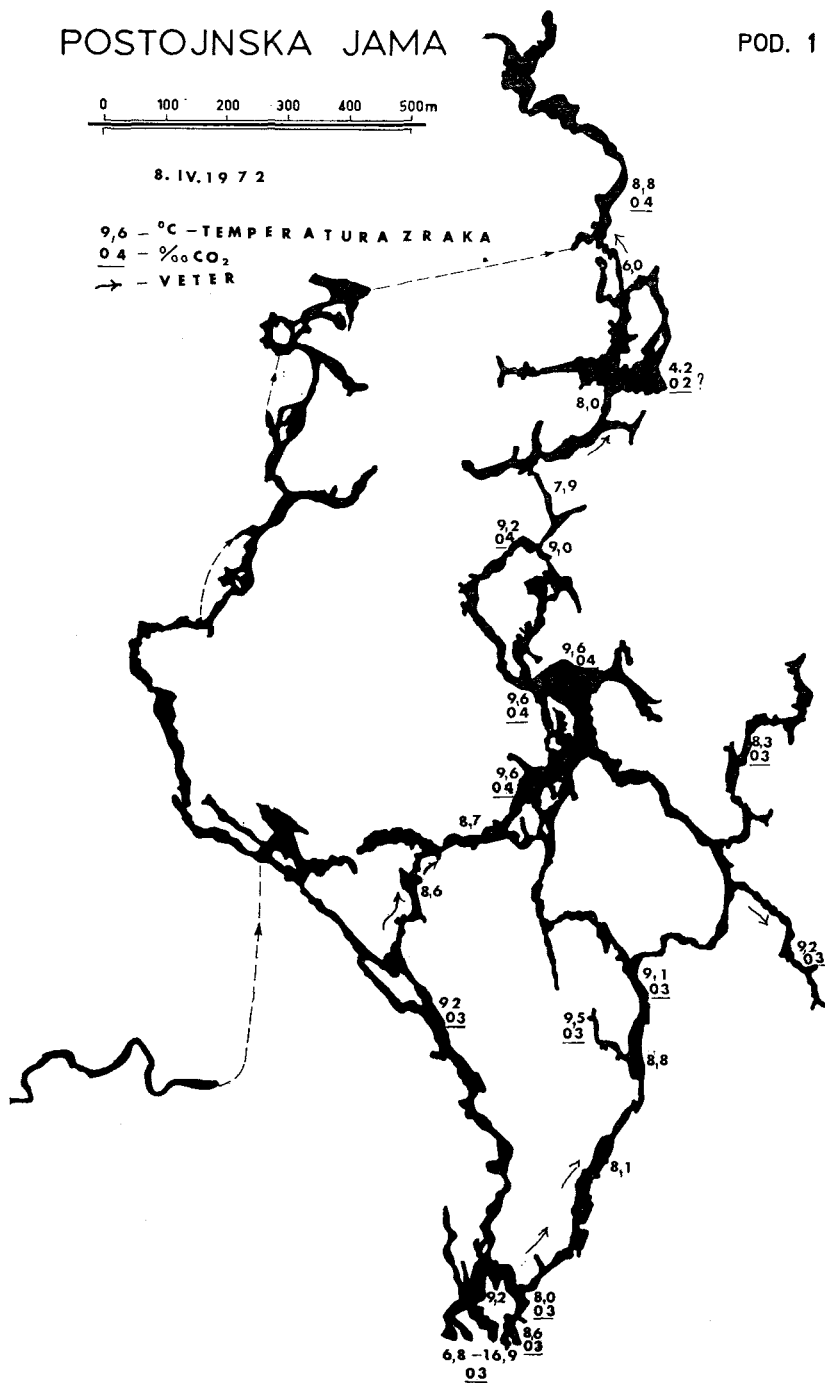


8. IV. 1972

9,6 - °C - TEMPERATURA ZRAKA

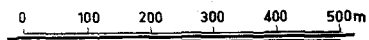
0,4 - ‰ CO<sub>2</sub>

→ - VETER



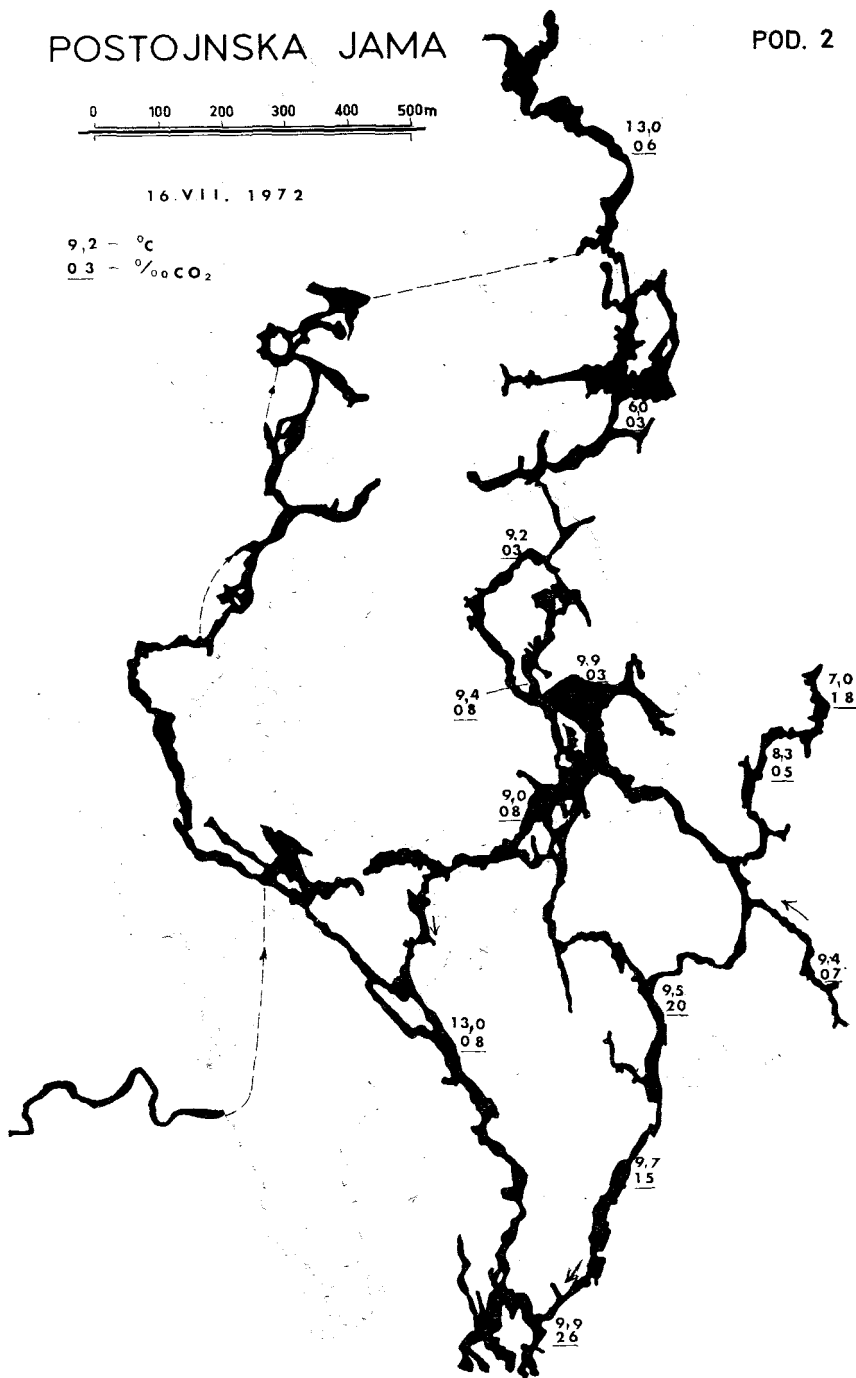
# POSTOJNSKA JAMA

POD. 2



16.VII. 1972

9,2 - °C  
0,3 - ‰ CO<sub>2</sub>



severnejšem delu Pisanega rova, v končni dvorani izza železnih lestev. Slab meter nad tlemi v kotanji smo namerili koncentracijo 0,18 ‰, pri temp. 7,0 ‰ C.

Da bi osvetlili izvor CO<sub>2</sub> v dokaj osamljenih delih jame in njegovo vertikalno slojevitost, je bilo opravljenih 3. X. 1972 več meritev. Zunanja temperatura se je ta dan spreminjala od 5,2° do 11,4° C. Opoldne je rahlo pihal veter po Glavnem hodniku proti Razpotju in Brezimmnemu rovu. Koncentracija CO<sub>2</sub> je bila enaka v Biospeleološki postaji, ki je stalno zaprta z lesenimi vrati (0,06 ‰ pri temp. 8,7° C) kot v vetrovnem Brezimmnem rovu (t. 9,7° C). Pred vhodom v Pisani rov je bila temperatura v Glavnem hodniku 9,5°, na začetku Pisanega rova pa le 8,5° C. Čeprav leži ta rov višje, je pihala iz njega le zelo rahla sapa in še to neredno, kar govori za to, da se zračne gmote v posameznih oddvojenih delih jame, če niso odprti navzven z dihalniki in zato vetrovni, samo zaradi temperaturne razlike le zelo slabo mešajo. Globlje v Pisani rov je do Dvorane pagod zračna temperatura padla na 8,2°. V končni dvorani severno od železnih lestev, je bila merjena koncentracija 10 cm nad tlemi v dnu treh kotanj. V najsevernejši je znašala 0,9, v srednji 0,42 in ob južnem koncu dvorane 0,21 ‰, kar je največ v vsej jami. Pod stropom dobrih 10 m višje, sta bili dve meritvi, ki sta ugotovili koncentracijo 0,17 in 0,15 ‰. Imamo torej opravka s stratifikacijo CO<sub>2</sub>, kar bi pričakovali glede na večjo specifično težo tega plina. Temperaturna stratifikacija je bila manj izrazita; zrak je imel pri tleh 8,1°, pod stropom pa 8,2° C. Da zgornji sloj ni miroval, je pričala rahla sapa skozi votlino nad železnimi lestvami proti Dvorani podrtih kapnikov.

K vprašanju, zakaj je v tem delu Postojnske jame povečana koncentracija CO<sub>2</sub>, je mogoče navesti naslednja opažanja. Da sama izoliranost končne dvorane in povezava s sosednjo dvorano z ožino pod stropom ne more biti glavni razlog, priča primerjava z Ozkim rovom. 8. IV. 1972 je bila v njegovem nižjem koncu nizka koncentracija (0,03 ‰). Ker je končna dvorana Pisanega rova mestoma blatna in ker vemo, da v vlažni ilovici delujejo mikroorganizmi, bi mogli njim pripisati večjo koncentracijo. Ilovica se nadaljuje še globoko pod sigovo prevleko dna in bloki apnenca, kar je ugotovil že Gospodarič (1962) in o čemer govorijo tudi številni podrti kapniki. Padli so na posedajočem se dnu večinoma proti sredi globoko udratih kotanj. Na obrobju zasiganega dna so razpoke široke do 30 cm. Pod stezo, ki se vzpenja proti izhodu iz dvorane, je videti v svežem ugrezu mestoma fluvialno sortiran flišni pesek. Toda domneve, da je blatna ilovica vzrok povečane koncentracije, ne potrjuje meritev v kratkem rovu, ki so ga pretežno v ilovico skopali l. 1964, da bi izsilili nadaljevanje jame. V njem je bila za dvorano običajna koncentracija 0,23 ‰. Domneve, da CO<sub>2</sub> uhaja iz sigotvorne kapnice, meritve niso potrdile. Tik nad vodno gladino trajne banjice je bila 3. X. 1972 izmerjena koncentracija 0,21, na drugem, suhem kraju pa, prav tako v dnu kotanje, 0,4 ‰. Tu pa kapnica ni sigotvorna, temveč celo razžira stare kapnike in apnenec. Ker pa je kapnica na višjih robovih dvorane, kjer je koncentracija CO<sub>2</sub> manjša, povsod sigotvorna, se ponuja razlaga, da prav ta koncentracija določuje sigotvornost odnosno agresivnost kapnice. Vendar je kapnica agresivna le na omejenem prostoru, medtem ko ima povečane koncentracije CO<sub>2</sub> vse nižje dno dvorane.

Ker torej naše meritve niso potrdile omenjene domneve iz tuje literature, tudi ne zveze med temperaturo zraka in koncentracijo CO<sub>2</sub> (C. E k et al., 1969 b),

imam za najverjetnejšo razlago, da k imenovanim povečanim koncentracijam CO<sub>2</sub> v Postojnski jami bistveno pripomore prehajanje CO<sub>2</sub> iz globokih, z zemljo napolnjenih kotanj na površju skozi tanki strop v votlino, kjer njen strop ni zasigan. Takšen, poln odprtih špranj, je tudi strop v končni dvorani Pisanega rova, kjer tudi razpršeno, a trajno kapljanje govori za debelo zemljo nad tankim stropovjem. Pri drobnozrnatem sedimentu namreč talna vlaga pri prodiranju v globino iztiskuje biogeni CO<sub>2</sub> v razpoke v skalni podlagi. S to razlago si moremo pojasniti tudi razmere, ugotovljene v Rovu za Veliko goro dne 3. X. 1972. Ta dan je na vrhu Velike gore nad vodno gladino ponvice ter 3 m višje, bila enaka koncentracija CO<sub>2</sub> — 0,1 % pri razmeroma visoki temperaturi 10,3°. Ker se vzpenjajo na Goro turistične množice in ker je ta plin težji, bi pričakovali v njenem podnožju povečane koncentracije. Toda v več metrov globokem ilovnatem lijaku pod Goro v Ruskem rovu, kjer se izjemoma še pojavi podzemeljska Pivka, je znašala 16. VII. 1972 10 cm nad tlemi koncentracija le 0,09 % CO<sub>2</sub>. Tik pod pobočjem Velike gore je 3. X. 1972 znašala ta koncentracija na začetku Rova za Veliko goro 10 cm nad tlemi 0,13 % (pri temp. 8,6°), v končnem delu pa le malo več, 0,16 %, pri nižji temperaturi (8,1° C). Povečana koncentracija v končnem delu, nižja temperatura in najdba paleolitskih sledov (Brodar, 1966) so verjetno posledica istega vzroka, bližine površja, oziroma zdaj z zemljo zapolnjenega rova, skozi katerega je prihajal pračlovek v jamo. Tudi v tem rovu strop ni zasigan, temveč so v njem odprte špranje.

Kot preliminarne zaključke meritev CO<sub>2</sub> v Postojnski jami moremo navesti naslednje. V primeri z drugimi jamami, kjer so merili koncentracijo CO<sub>2</sub>, ima Postojnska jama nizek delež CO<sub>2</sub>, to domnevno zaradi znatne zračne cirkulacije v glavnih rovih. Kadar piha zrak v Stare jame skozi Glavni vhod, kar je v času zimske cirkulacije, je koncentracija CO<sub>2</sub> znatno manjša kot tedaj, kadar med poletno cirkulacijo zrak prihaja skozi dihalnike. Kot poprej temperaturne meritve (Gams, 1970), so to pot tudi meritve CO<sub>2</sub> pokazale predvsem na dva kanala zračnega kroženja. Prvi povezuje Glavni vhod in Glavni hodnik z Brezimnim rovom, na koncu katerega so večji dihalniki. Drugi kanal veže Jamo podzemeljske Pivke, Spodnji Tartar, Koncertno dvorano, Veliko Goro, Lepe jame in Ruski rov. Poglavitni dihalniki v tem kanalu so ob boku Lepih jam in pri trafopostaji ter v Koncertni dvorani.

Z ozirom na še vedno odprto vprašanje o poreklu CO<sub>2</sub> v jamah, kot ga nakazuje novejša literatura, kažejo meritve v Postojnski jami na to, da prispeva močan delež organogeni CO<sub>2</sub> v zemlji, ki vdira v votlino skozi razpokani strop in se zadržuje v kotanjah predvsem tam, kjer je oslABLJENA zračna cirkulacija. Iz tega razloga namerijo večje koncentracije CO<sub>2</sub> v jamah, ki so plitvo pod pokritim krasom, v njih pa posebno v špranjah (C. Ek et al., 1969 b). Čeprav je deležna Postojnska jama največjega turističnega prometa na svetu, v jami z živahno zračno cirkulacijo večjega vpliva človeka na vsebnost CO<sub>2</sub> v jamskem zraku ni mogoče potrditi.

### Summary

#### CONCENTRATION OF THE CO<sub>2</sub> IN THE CAVES IN RELATION TO THE AIR CIRCULATION (IN THE CASE OF THE POSTOJNA CAVE)

The measurements of CO<sub>2</sub> every 14<sup>th</sup> day in the years 1963/64 on three spots have established the similar course of the CO<sub>2</sub> concentration in the closed channel of the Biospeleological station as well as in the windy main channel of the Postojna cave (Gams, 1968). The measurements at the end of the winter air circulation on the 8<sup>th</sup> of April, 1972 shown on the first sketch (plan of the Postojna cave) have found in the first part of the tourist cave only 0,3‰ and in the last part 0,4‰ of CO<sub>2</sub>. The concentration of CO<sub>2</sub> in the 16<sup>th</sup> of July 1972 was much higher (see the second sketch) in the channels, where the tourist visitors crowded as well as in the non visited side channels. The similar summer and early fall increase of the concentration of CO<sub>2</sub> was measured also in the years 1963 and 1964 and is not influenced significantly by 3/4 of million of visitors in the year. This paper refuses the idea of the emission of CO<sub>2</sub> from the water depositing flowstone and dripstone as the main source of the CO<sub>2</sub> in the cave air. The measurements with the devices Dräger on the 3<sup>rd</sup> of October 1972 have found the highest concentration at the end of the side channel called Pisanj rov. Ten centimetres above the level in the funnel-like depressions was 0,23, 0,2 and 0,4‰ of CO<sub>2</sub>. Similar concentration has been found also at the end of the blind channel behind the Velika gora (Big Great mountain). The analysis of the environment in these channels leads to the conclusions that the higher concentration is due to the closer connection of the cave air with the soil CO<sub>2</sub> on the surface above the thin ceiling. Penetrating downward the moisture forces the lower soil CO<sub>2</sub> to escape through the rock fissures in the cave ceiling. Due to the low air temperatures and hampered air circulation the higher CO<sub>2</sub> circulation is stagnated in the depressions at the bottom of the blind channels.

### Literatura

- Brodar, S., 1966. Pleistocenski sedimenti in paleolitska najdišča v Postojnski jami. Poročila — Acta Carsologica 4, Ljubljana.
- Ek, C. et al., 1969 a. Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats. Annales de Spéléologie, R. 23, f. 1.
- 1969 b. Some analyses of the CO<sub>2</sub> content of the air in five Polish caves. Zeitschrift f. Geomorphologie, Neue Folge, B. 13, 1969, H. 3.
- Gams, I., 1968. Über die Faktoren, die die Intensität der Sintersedimentation bestimmen. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Int. Congress of Speleology in Jugoslavija, T. III, Ljubljana.
- 1970. Zračna cirkulacija kot del jamskega okolja na primeru Postojnske jame. Peti jugoslovanski speleološki kongres, Skopje i Ohrid, Skopje.
- 1971. Konimetrične meritve v Postojnski jami in vprašanje speleoterapevtskega raziskovanja pri nas. Naše jame 12 (1970), Ljubljana.
- Gospodarič, R., 1963. K poznavanju Postojnske jame — Pisani rov. Naše jame 4 (1962), Ljubljana.
- Kessler, H., 1969. Problemy vyskumu speleo-mikroklimu v madjarskih jaskiniach. Zbornik východoslovénského múzea v Košiciach A, Geol. vedy, Košice.
- Spannagel, K. H., 1969. Erfahrungen mit Therapie des Astmas in der Kluterthöhle (BDR). Zbornik východoslovénského múzea v Košiciach A, Geologicke vedy, Košice.

### Diskusija

M. Markulin:

Slobodan sam upitati predavača da-li mu je poznato, da medicinski stručnjaci u nekim zemljama preporučuju liječenje u nekim jamama — astma — speleoterapija. Ima li to veze sa sastavom zraka u jamama — koncentracijom CO<sub>2</sub> i vlažnost zraka i drugim faktorima?

*Odgovor (I. G a m s):*

Speleoterapevtsko iskorišćaju jame v ZR Nemčiji, na Madžarskem, v Italiji (več o tem v Zborniku Vychodoslovénskeho Múzea v Košicah, 1969). Večja koncentracija CO<sub>2</sub> pospeši dihanje in s tem vdihovanje zdravilnih elementov.