

PLINI V KRAŠKIH JAMAH KOT VIR NEVARNOSTI ZA ČLOVEKA

GASES IN KARST CAVES AS A SOURCE OF HAZARD TO HUMAN

Jure Tičar

dr., Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Novi trg 2, Ljubljana, jure.ticar@zrc-sazu.si

Klemen Mihalič

Jamarska zveza Slovenije, Lepi pot 6, Ljubljana, izobrazevalna@jamarska-zveza.si

Povzetek

Podzemno okolje kraških jam ima posebne klimatske lastnosti, ki so med drugim odvisne od položaja jame v prostoru in razporeditve podzemnih rogov. Ti dejavniki močno vplivajo na specifično temperaturo, vlago in premikanje zraka v jami. Zaradi naravnih vzrokov ali dejavnosti človeka lahko jamski zrak vsebuje višje koncentracije plinov, ki so obenem nevarni za ljudi. V prispevku predstavljamo posebnosti klime jamskega okolja na podlagi ankete, izvedene med jamarji. V članku smo strnili podatke o preteklih nesrečah, predstavili lastnosti nevarnih plinov v jami in povzeli nekaj temeljnih ukrepov v izogib nevarnim situacijam med obiski jam.

Abstract

The subterranean environment of karst caves has special climatic characteristics that depend, among other things, on the spatial location of the cave and the arrangement of the underground passages. These factors strongly influence the specific temperature, humidity and air movement in the caves. Due to natural causes or human activities, cave air may contain higher concentrations of gases that pose a hazard to humans. The purpose of this paper is to briefly present the specifics of the cave climate; to present the results of a survey conducted among cavers; to give detailed information on previous accidents; to present the characteristics of dangerous gases in caves; and to summarize some basic measures to avoid dangerous situations when visiting caves.

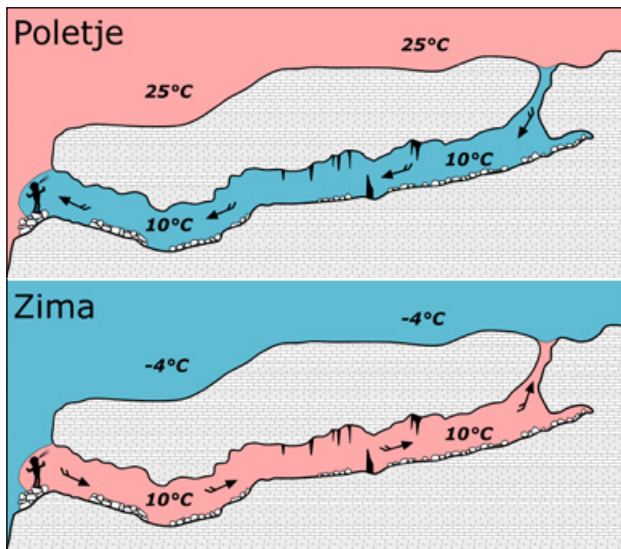
Značilnosti podzemne klime

Kraške jame so zaprto okolje, ki ima zaradi majhne izmenjave energije z okolico razmeroma stabilno klimo. Na spremenljivost klime, predvsem v bližini površja, najbolj vplivata spreminjanje letnih časov in izmenjava toplote med notranjimi deli jame. Najbolj značilni elementi jamske klime so temperatura, relativna vlažnost, pretok ter kakovost zraka, povezana s prisotnostjo plinov (Cigna, 2004). Stabilno jamsko okolje predstavlja tudi svojstven ekosistem, na katerega so se prilagodile številne živalske vrste, prostor, v katerega so se ljudje zatekali že od prazgodovine, ter nenazadnje tudi prostor oddiha in speleoterapije (Palmer, 2007).

Povprečna temperatura zraka v jamah je praviloma enaka srednji letni temperaturi zraka v okolici vhoda v jamo (Cigna, 2004; Palmer, 2007). Na temperaturo najbolj vplivajo nadmorska višina jame, geografska širina, toplotni tokovi iz notranjosti Zemlje ter lokalne kemične reakcije (Palmer, 2007). Na podlagi teoretičnih izračunov se sicer temperatura zraka zvišuje z globino podobno kot temperatura vode, in sicer okoli 0,234 °C

na 100 metrov globine. V bližini vhodov je vpliv zunanjih temperatur največji in je odvisen od konvekcije, tj. mehanskega transporta zračnih gmot, kar se lahko zgodi le ob toplotnem ravnovesju, ko gostota zraka z globino narašča (Cigna, 2004). Na slovenskem visokogorskem krasu (na primer Kaninski podi) se temperature gibljejo med 1 in 2 °C, medtem ko so temperature v jamah na nižjih nadmorskih višinah med 8 in 12°C. Zaradi nizkih temperatur lahko v jami nastaja led, ki je prisoten predvsem na vhodnih delih jam (Gams, 2004; Mihevc, 2018). V izjemnih geotermalnih razmerah, kot jih poznamo v jami Cueva de los Cristales (Naica, Mehika), lahko temperature narastejo tudi do 58 °C (Garogalo in sod., 2010). Posebnost jamske klime je tudi visoka relativna vlažnost zraka, ki se v oddaljenih rovih pogosto približa 100 odstotkom (Cigna, 2004).

Pretok zraka v jamah je odvisen od razlike med gostoto zraka v jami in na površju, s tem pa posredno od temperature, vlažnosti in sestave zraka ter zračnega tlaka in nadmorske višine. Zrak je pri višji temperaturi redkejši (Freitas in sod., 1982). Tako se v višjih delih od vhoda zadržuje toplejši zrak, v nižjih delih pa hladnejši



Slika 1: Shematičen prikaz pretoka zraka v jamah v poletnih in zimskih mesecih (avtor: J. Tičar)
 Figure 1: Schematic representation of air flow in caves in the summer and winter months (Source: J. Tičar).

smer nadaljevanja jame. Pozimi relativno topel zrak iz jam pogosto tali snežno odejo na površju, kar omogoča terensko lociranje jam.

V jamah z večjim pretokom je sestava zraka podobna kot v zunanjem ozračju (78,1 % dušika, 20,9 % kisika in majhen delež drugih elementov). Vendar se zaradi naravnih procesov ali s človekom povezanih dejavnosti delež drugih elementov v jamah lahko močno poveča.

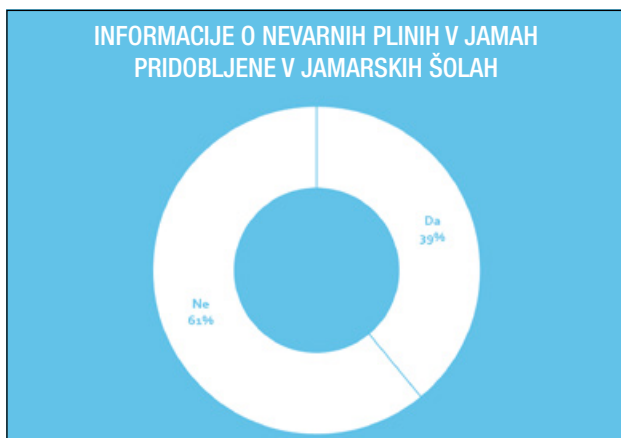
Zavedanje jamarjev o nevarnih plinih v jamah

Da bi pridobili vpogled v znanje jamarjev o nevarnih plinih v jamah in povečali ozaveščenost o problematiki, smo na jamarski dopisni listi objavili vprašalnik o poznavanju nevarnih plinov v jamah. V raziskavi je sodelovalo 41 jamarjev iz 22 različnih jamarskih društev iz vse Slovenije. V anketi so sodelovali pretežno izkušeni jamarji, saj se 33 od 41 jamarjev z jamarstvom ukvarja že več kot pet let.

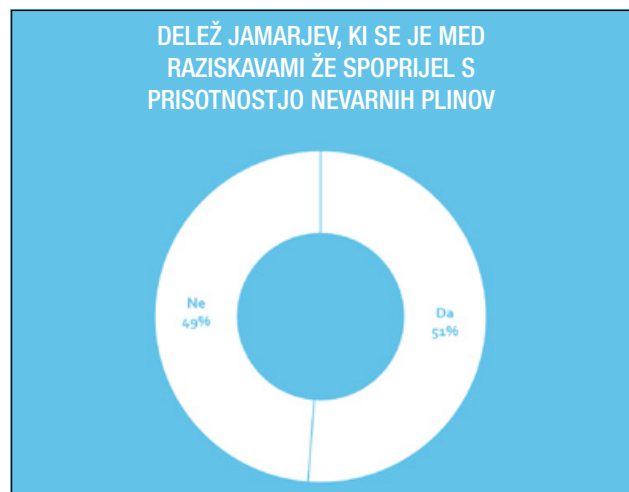
zrak, če ima jama zgolj en vhod in preprosto obliko (Cigna, 2004). Ker so v jamah, z izjemo vhodnih delov, spremembe temperatur majhne oziroma zanemarljive, dinamika pretoka zraka pogosto odseva sezonske razmere oziroma dnevno spreminjanje temperature zraka zunaj jame. Praviloma je poleti pretok zraka usmerjen proti spodaj ležečim vodom, pozimi pa zrak teče proti zgoraj ležečim vodom (Freitas in sod., 1982). Pretok zraka je lahko odvisen tudi od vodnega toka v jami ali sprememb zunanjega zračnega pritiska (Cigna, 2004). Močno se poveča ob naraščanju podzemnih voda, kar je pogosto tudi ob dvigovanju podzemne Reke na Krasu (Gabrovšek in Peric, 2006). Jamarji se v podzemlju pri raziskavah praviloma orientirajo po prepihu, ki nakazuje

Skrb vzbujajoče je, da se več kot polovica jamarjev (25), v jamarskih šolah ni podučila o prisotnosti škodljivih plinov. Med najpogostejšimi škodljivimi plini sicer znajo naštetati do tri pline, pri čemer so najpogosteje izpostavljeni ogljikovemu dioksidu (25), ogljikovemu monoksidu (21), amonijaku (14) in radonu (9). Pri prepoznavanju simptomov zastrupitve s škodljivimi plini je znanje med jamarji boljše, saj med poglavitne simptome uvrščajo omotičnost (19), glavobol (17), zadihanost (16), oteženo dihanje (11) in slabost (10).

Jamarske nesreče, povezane s škodljivimi plini, pozna kar 27 jamarjev, pogosto omenjajo nesrečo v jami Bilpa 3 (13). O nesreči so bili jamarji največkrat obveščeni



Slika 2: Večina dejavnih jamarjev se o nevarnosti plinov v kraških jamah ni podučila v jamarskih šolah
 Figure 2: Most active cavers do not learn about the dangers of gas in karst caves in caving schools.



Slika 3: Z nevarnimi plini v jamah se je spoprijela že več kot polovica dejavnih jamarjev
 Figure 3: More than half of active cavers have encountered hazardous gases in caves.

Tragedija jamarjev v Bilpi

Trije jamarji so v soboto izgubili življenje, ko so iskali nadaljevanje jame Bilpa III ob Kolpi – Rešeni jamar Emil Matko—Zapata izven življenjske nevarnosti

„Štirje kočevski jamarji so izgubili življenje v jami Bilpa III“, se je v nedeljo, 28. maja zjutraj razširila novica po Kočevju. Kasneje se je izkazalo, da so se smrtno ponesrečili trije jamarji, četrtega pa so rešili iz podzemlja še živega.

Umrli so jamarji Ivan Dimec, delavec v Tekstilani iz Roške 26, Kočevje; Ivan Knavs, gozdarski tehnik v tozdu „Rog“ ZKGP Kočevje iz Šalke vasi 83, in Marjan Rus, kovinostrugar pri INKOP, Kočevje, Ljubljanska cesta, n. h. Skoraj 30 ur po nesreči pa so rešili iz jame živega Emila Matka, avtomehanika pri Eurotransu Ribnica, iz Kolodvorske 2 v Kočevju. Vsi štirje so bili rojeni leta 1953. Emil Matko, ki se zdravi v ljubljanski bolnišnici, je izven življenjske nevarnosti.

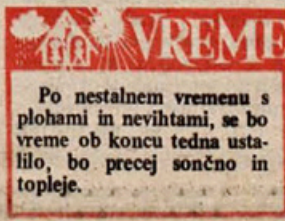
Kočevski jamarji si prizadevajo, da bi našli podzemsko pot od Bilpe ob Kolpi do KOčevja. Reka Rinža, ki ponikne za Kočevjem, pride namreč na dan prav v Bilpi, nekaj 10 m pod jamo Bilpa III. Jamrji sklepajo, da obstaja podzemna zveza oziroma rov, ki ga je izdolbla Rinža pred davnimi časi. Zato so posvetili posebno pozornost prav iskanju te podzemne poti. Ze na okoli 150 m od vhoda v jamo so naleteli na zoženje, ki

jim je preprečevalo nadaljnje napredovanje.

Zato je v soboto, 27. maja zjutraj, krenila skupnica jamarjev z razstrelivom minirat prehod v jami. Kdaj so aktivirali 7 kg razstreliva, se ne ve čisto natančno, kaže pa, da je bilo to še v soboto dopoldne. Popoldne okoli 15. ure pa so imenovani štirje spet krenili v jamo, da bi ugotovili učinek miniranja. Ker jih dolgo ni bilo ven, sta šla pogledat še dva jamarja. Videla sta, da tovariši leže na tleh in da nekaj ni v redu. Jamar Dušan Tošaj je zaradi oddaljenosti in slabih vez šele okoli 21.30 obvestil o nesreči postajo milice Kočevje, nakar se je začela reševalna akcija.

Na pomoč so prihiteli pripadniki poklicne gasilske reševalne enote iz Ljubljane. Reševanje je bilo oteženo, ker je treba do jame Bilpa III plezati okoli 35 m visoko po navpični steni, čeprav so bile tu jamarske lestvice, je bilo reševanje zamudno.

(Nadaljevanje na zadnji strani)



SPET MED SVOJIMI – Jamarji in reševalci prevzemajo v svoje varstvo ponesrečenega Emila Matka, ki so jim ga spustili reševalci iz 35 m višje jame Bilpa III. (Foto: Jože Primc)

Slika 4: Novica o tragični nesreči jamarjev v jami Bilpa 3 na naslovnici Dolenjskega lista 1. junija 1978 (Primc, 1978)

Figure 4: News of a tragic accident of speleologists in the Bilpa 3 Cave on the cover of Dolenjski list newspaper on 1st June 1978 (Primc, 1978).

čez druge jamarje (23). Izpostavljamo, da se je več kot polovica jamarjev (21), ki so sodelovali v raziskavi, že spoprijela s škodljivimi plini v jami. Svojo ogroženost zaradi škodljivih plinov so večinoma prepoznali že v jami, na mestu prisotnosti škodljivega plina (16), nekateri pa po končanem raziskovanju (4) ali med vračanjem iz jame (1). Ob nesreči oziroma zastrupitvi bi jamarji uporabili naslednje ukrepe: umik iz jame (38), poziv na klic v sili (8) in pomoč ponesrečencu (6). Pri svojem delu večina jamarjev (38) kljub temu nikoli ne uporablja merilnikov prisotnosti plinov, nekateri pa občasno (3).

Pretekle jamarske nesreče, povezane s plini, v Sloveniji

V slovenski literaturi je izpostavljenost jamarjev in obiskovalcev jam nevarnim plinom precej slabo opisana ali raziskana. Vendar kolektivna zavest jamarjev in njihova

varnost, ki jo želimo izpopolniti s tem prispevkom, temeljita na preverjenih podatkih iz preteklosti. Te smo pridobili z vprašalnikom in preverjanjem informacij v Katastru jam Jamarske zveze Slovenije (2021).

Tako je med prvimi nesrečami izpostavljena **Jama v Griži** v bližini Trsta, kjer so leta 1866 minirali ožino na globini 264 metrov. Ob tem so zaradi strupenih plinov na globini okoli 150 metrov umrli trije jamarji. Pozneje se je v jamo podal še en jamar, ki je umrl na globini 90 m (Savnik, 1960). Leta 1970 so jamarji ob raziskavah v **Kačni jami** (kat. št. 955) odprli staro posodo s karbidom, ki jo je razneslo, prav tako v **Klomskem breznu** (kat. št. 7401) leta 1972, kjer se je jamar naslonil na transportno vrečo, v kateri je bil shranjen karbid. Podoben dogodek se je v Kačni jami ponovil še leta 1973, ko je jamarju v obraz eksplodirala posoda s karbidom, ter leta 1982 v jami **Dimnice** (kat. št. 736), ko je med potopom v posodi s karbidom nastala luknja, zaradi česar je ob stiku z vodo

eksplodiralo. Leta 1992 se je jamar v **Jami nad rudnikom Pri Štolnu** (kat. št. 835) poškodoval zaradi eksplozije karbida, potem ko je jamarka s transportno vrečo zajela večjo količino vode. V Kačni jami sta se leta 1998 ob raziskavah rova *Divaška sramota* dva jamarja zastrupila z amonijakom zaradi onesnaženosti vode iz kanalizacije. Med najbolj znane jamarske nesreče uvrščamo zastrupitev s plini v jami **Bilpa 3** (kat. št. 632). Leta 1978 so jamarji širili ozke rove v jami z razstrelivom ter se še istega dne vrnili v jamo, da bi preverili rezultate. Ker se je v rovu ustvarilo jezero nevarnih plinov, so umrli trije jamarji, enemu pa se je uspelo rešiti (Primc, 1978). Leta 1987 so poročali o težavah z dihanjem v **Jami Olerija** (kat. št. 1887), kjer je zaradi velikih količin netopirjevih iztrebkov nastalo jezero ogljikovega dioksida.

O negativnih izkušnjah z nevarnimi plini smo z dopisom na jamarsko listo povprašali tudi izkušene jamarje. Poročali so o težavah, povezanih z uporabo bencinskih vrtalnikov in nastankom ogljikovega monoksida. V jami **Čaganka** (kat. št. 9500) je leta 2012 prišlo do težav zaradi eksplozije karbida, leta 2017 pa do zastrupitve z ogljikovim monoksidom. Prav tako so o težavah z dihanjem oziroma pomanjkanjem kisika poročali v **Lipiški jami** (kat. št. 311), **Štehanovi jami** (kat. št. 5388) ter leta 2016 v **Jami Sežanske Reke** (kat. št. 10.589). Leta 1964 se je zaradi razkroja organskih snovi močno poslabšala kakovost zraka v **Tkalci jami** (kat. št. 857), od koder sta se jamarja le stežka vrnila na površje. Zaradi uporabe eksploziva pri širjenju prehodov so leta 1970 nastale težave v **Zelških jamah** (kat. št. 576). Leta 2015 so se v **Škocjanskih jamah** (kat. št. 735) pojavile težave z metanom, ki je nastajal ob trohnenju organskih naplavin. Zanimivo opažanje je bilo tudi v **Postojnski jami** (kat. št. 747), kjer je v rovih pod Jamskim dvorcem prišlo do težav zaradi

vdihavanja alergene prahu organskih odpadkov. Nesreča s plini se je pripetila tudi konec 50. let 20. stoletja ob **Dobličkem jezeru** (kat. št. 8262) v Beli krajini, kjer so kopali vodno zajetje. Primer zastrupitve je znan tudi iz rudnika premoga pri Lipici na Krasu, kjer je v umetni jami nastalo jezero nevarnega plina.

V vprašalniku so jamarji opozorili še na nekatere jame, v katerih so se zgodile jamarske nesreče, povezane z nevarnimi plini. Med njimi so jama **Tentera** (kat. št. 533), **Osapska jama** (kat. št. 1154), **Podstenska jama** (kat. št. 3882), **Cinkov križ** (kat. št. 3631), **Rusova jama** (kat. št. 6727), **Podložki udor 2** (kat. št. 7301), **Pikčeva jama** (kat. št. 8129), **Kengurujeva jazbina** (kat. št. 8583), jama **Orglice** (kat. št. 9063), brezno **K24-174** (kat. št. 10.257), **Kofelca** (kat. št. 12.182) in **Bojanovo brezno pri Predjami** (kat. št. 12.210).

Nevarni plini v jamah

Pri gibanju v jamskem okolju se je poleg drugega treba zavedati tudi vseh mogočih nevarnosti, ki so povezane z zastrupitvami s plini. Poznati moramo sredstva in razmere, ki ustvarijo nevarne pline, načine za zaznavanje prisotnosti nevarnih plinov ter postopke ukrepanja ob zastrupitvi. Te lahko zaznamo z merilniki koncentracije plinov in drugimi sredstvi za posredno zaznavanje ter z opazovanjem simptomov in znakov zastrupitve pri ljudeh ali živalih. Med nevarnimi plini v kraških jamah izpostavljam **devet najpogostejših**, s katerimi so se že srečali številni jamarji.

Ogljikov dioksid (CO₂) je brezbarven plin, ki nastaja pri zgorevanju organskih snovi, celičnem dihanju ali pri fermentaciji. V ozračju je njegov delež okoli 400 ppm oziroma 0,04 odstotka (European Industrial Gases

Delež CO v zraku (ppm)	2 minuti	5 minut	15 minut	40 minut	120 minut
200					Glavobol
400				Glavobol	Vrtoglavica
800			Glavobol	Vrtoglavica, slabost, krči	Smrt
1600		Glavobol	Vrtoglavica, povišan srčni utrip, slabost	Smrt	
3200	Glavobol	Vrtoglavica, slabost	Smrt		
6400	Vrtoglavica, krči	Smrt			
12800	Izguba zavesti (smrt v 60–120 sekundah)				

Slika 5: Posledice izpostavljenosti različnim deležem CO v zraku glede na čas izpostavljenosti
 Figure 5: Consequences of exposure to different concentrations of CO in the air depending on the time of exposure.

Association, 2017). V jamah se CO₂ lahko koncentri- ra zaradi izločanja iz vode (ponorna voda, onesnažena voda, proces izločanja sige ipd.), razpada organskega gradiva (listje, veje, gvano), gorenja (plinski gorilniki, acetilenske svetilke) ali čezmernega obiska jam (tu- ristične jame). Ker je CO₂ težji od drugega zraka, se praviloma zadržuje v nižjih predelih jame, kadar ta ni prevetrena. Pogosto delež CO₂ preseže 1 odstotek, simptomi povišane koncentracije v zraku pa povzročijo globlje in hitreje dihanje. Z višanjem koncentracije se pojavijo simptomi, kot so trzanje mišic, povišan krvni tlak, glavobol, povišan srčni utrip in oteženo dihanje. Če koncentracija preseže 10 odstotkov, nastopi nezavest že v manj kot minuti, ob nadaljnji izpostavljenosti pa smrt (European Industrial Gases Association, 2017). Posredni znak povišane koncentracije ogljikovega dioksida je nezmožnost gorenja, zato je treba biti pozoren na delovanje vžigalnikov, acetilenskih svetilk, plinskih gorilnikov ipd.

Ogljikov monoksid oziroma ogljikov oksid (CO) je gorljiv in zelo strupen brezbarven plin, ki pa je v ozračju prisoten v zelo majhnem deležu, in sicer 0,2 ppm. Večinoma nastaja pri nepopolnem zgorevanju ogljika, kot je na primer zgorevanje fosilnih goriv (naftni derivati, premog) ali lesa (kurišča, požari), lahko pa tudi pri izbruhih ognjenikov. Delež CO v jami se lahko poveča predvsem, kadar jamarji pri delu uporabljajo bencinske vrtalnike, v umetnih jamah pa, ko je tam premog (na primer v rudnikih). Ob vdihavanju večje koncentracije CO nastane zastrupitev, ker se CO veže na hemoglobin 230–270-krat hitreje od kisika (Kocijančič in sod., 2005). To zmanjšuje sposobnost krvi za prenos kisika, na kar so še posebej občutljivi možgani in srce. Človeku je nevarna že izpostavljenost koncentraciji 100 ppm. Zgodnji simptomi zastrupitve s CO pri nenamer- nih izpostavitvah so glavobol, omotičnost in slabost. Drugi simptomi so lahko različni: zadihanost, boleči- ne v prsih, bruhanje, bolečine v trebuhu, zmedenost, razdraženost, otopelost, težave z vidom, krči, koma in na koncu celo smrt (Greiner, 1997; Goldstein, 2008). Pri obiskovanju jam je treba opozoriti predvsem na ne- varnost, povezano z uporabo bencinskih vrtalnikov. Kot primer preizkusa in meritev ogljikovega monoksida je treba omeniti vajo ekipe za širjenje ožin pri Jamarski reševalni službi, kjer so že po nekaj minutah vrtnja z bencinskim vrtalnikom v slabo prezračeni jami izme- rili nevarno koncentracijo ogljikovega monoksida 232 ppm (Merela, 2016).

Acetilen oziroma etin (C₂H₂) je močno vnetljiv in eksploziven brezbarven plin. Nastaja kot stranski pro- dukt reakcije kalcijevega karbida in vode ter ima zna- čilen vonj po česnu. V naravi ni prisoten, saj se kalci-jev karbid proizvaja industrijsko, v preteklosti pa so ga pogosto uporabljali za razsvetljavo. Acetilen ni zelo strupen, vendar lahko vsebuje tudi umazanijo, ki jo opa- zimo kot črne saje, ki dražijo oči, dihala in kožo. Pri go- renju acetilena se iz ozračja porablja in izpodriva kisik,



Slika 6: Sodobni osebni merilniki nevarnih plinov omogočajo meritev več različnih plinov (vir: MSA Safety, 2021)

Figure 6: Modern personal hazardous gas monitors enable the measurement of several different gasses (Source: MSA Safety, 2021).

kar lahko povzroči zadušitev ob daljšem zadrževanju v slabo prezračnem in majhnem prostoru (Pässler in sod., 2008). Acetilen je v jamah nevaren predvsem zaradi vnetljivosti. Znani so primeri, ko se je v jamah sprostila večja količina acetilena, ki je ob stiku s plame- nom ali iskro eksplodirala. Zaradi okvare svetilke lahko nenadzorovano zagori, zaradi česar se lahko vnamejo oblačila jamarjev, ki so navadno iz gorljivih sintetičnih materialov.

Radon (Rn) je radioaktivni plin, ki nastaja kot razpadni produkt torija, urana ali aktinija, in je škodljiv zdravju. Ker je naravni uran skoraj povsod v tleh, je največ ra- dona tam, kjer je največja koncentracija urana v tleh. Jamsko okolje je idealno za zastajanje večjih koncen- tracij radona, saj je popolnoma obdano s kamnino in je prevetrenost manjša (Gunn, 2004). V stavbah se radon nabira, kjer je prezračevanje slabo, na primer v kletih in drugih zaprtih prostorih. Intervencijska raven radona v starejših stavbah v Sloveniji je 400 Bqm⁻³, v novejših pa 200 Bqm⁻³ (ARSO, 2002). Vsebnost radona v človekovem telesu, ki poškoduje tkivo in povzroči raka, je odvisna od naše izpostavljenosti. To je pomembno pri turističnih delavcih v jamah, ki imajo omejitve pri številu obiskov. Že v Postojnski jami koncentracija radona doseže 9000 Bqm⁻³ (Gregorič in sod., 2013). V tujini so znani primeri, ko so koncen- tracije radona še večje, na primer v Veliki Britaniji (35.890 Bqm⁻³), Grčiji (25.179 Bqm⁻³) ali Švici (25.000 Bqm⁻³) (Field, 2007). Vendar je treba izpostaviti pred- vsem območja v Sloveniji, kjer je zaradi naravne radio- aktivnosti povečano tveganje izpostavljenosti radonu, kot so Bloke in Goteniška gora, Javornik na Trnovskem gozdu, zahodni rob Krasa, Škofjeloško hribovje in Pol- hograjsko hribovje, Peca, Suha krajina in Bela krajina (ARSO, 2002).

Amonijak (NH₄⁺) je brezbarven plin neprijetnega vonja, ki nastaja pri razpadanju iztrebkov, trohnenju rastlinskih in živalskih ostankov ter na vulkanskih območjih. Amonijak se uporablja v proizvodnji umetnih gnojil, barv, eksplozivov, pogosto je tudi sestavina gospodinjstskih čistil. V jamah se pojavlja predvsem v ponorih, kjer je organsko gradivo nanoseno v večjih količinah, pri velikih količinah gvana, razpadanju kadavrov ipd. Posebna previdnost velja tudi v hipogenih jamah. Dovoljena izpostavljenost amonijaku je 25 ppm, smrtna pa že nad 500 ppm. Po vonju ga zaznamo med vrednostmi od 5 do 53 ppm. Pri manjših vrednostih se pojavita draženje oči in nosu ter glavobol, pri večjih pa nastane bolečina v grlu ali v prsih s kašljanjem. Pri največjih koncentracijah se lahko pojavi zapiranje sapnika in posledično celo smrt (National Research Council, 2008). Posebna previdnost torej velja v jamah z veliko organskega materiala, predvsem v ponornih jamah.

Metan (CH₄) je brezbarven plin brez vonja, ki je zelo vnetljiv in ima manjšo gostoto od zraka. V jamsko okolje lahko zaide, kadar se v jamo stekajo fekalije, če je jama v bližini odlagališča odpadkov, če v jami razpada večja količina biomase (na primer listje in veje v ponornih jamah), pri razpadanju odpadkov v onesnaženih jamah, pri uporabi bencinskih vrtalnikov ali ob prometnih nesrečah, ki bi lahko bile povezane s prevozom oziroma uporabo naftnih derivatov. Največja nevarnost je njegova eksplozivnost, pogoste nesreče se zgodijo predvsem v rudnikih premoga. Izpostavljenost metanu povzroči glavobol, pri večji deležih pa začne nadomeščati kisik v krvi, kar oteži dihanje in povzroča bruhanje ter na koncu smrt. Po priporočilih naj bi bili izpostavljeni v osmih urah največ 1000 ppm (Alberta 2004).

Vodikov sulfid (H₂S) je brezbarven plin z neprijetnim vonjem po gnilih jajcih. Plin je težji od zraka, zelo strupen ter močno vnetljiv in eksploziven. V jamsko okolje zahaja predvsem v jamah, ki so hipogenega nastanka, kot so na primer Carlsbed Caverns v ZDA. Neposredno pa je prisoten v jamskem okolju zaradi bližine vulkanizma, močvirij, kanalizacije ipd. Vodikov sulfid človek zazna pri 0,47 ppb, in sicer kot vonj po gnilih jajcih. Pri 10 ppm smo mu lahko izpostavljeni največ osem ur. Pri 50–100 ppm poškoduje oči, pri vrednostih nad 320 ppm že lahko povzroči smrt. Vdihavanje plina praviloma povzroča močan kašelj in težko dihanje oziroma sopenje ter zaradi svoje jedkosti razjede na koži in očeh (Occupational Safety and Health Administration, 2021). Na mestih v jami, kjer zaznamo gnil vonj po jajcih, velja dodatna previdnost, še posebej, kadar se rovi spuščajo.

Dušikov monoksid (NO) je brezbarven plin sladkobnega vonja, ki nastaja pri zgorevanju. Je malo težji od zraka. Najpogostejši vir nastanka NO so elektrarne na fosilna goriva, naprave ali vozila, ki delujejo na motorni pogon z notranjim izgorevanjem. V jamah je najpogostejši vir kontaminacije zraka uporaba bencinskih vrtalnikov. Dušikov monoksid lahko v telo vstopi skozi

oči ali pljuča. V prisotnosti vode in kisika se lahko tvori dušikova kislina, ki povzroči poškodbe na koži, roženici, sluznicah in v pljučih. Glede zastrupitve z dušikovim monoksidom ni veliko dostopnih podatkov. Največja dovoljena koncentracija NO je 25 ppm, pri kratkotrajni izpostavljenosti (30–60 minut) pa je mejna vrednost nevarnosti za zdravje in življenje ljudi pri 100–150 ppm (The National Institute for Occupational Safety and Health, 2021b).

Dušikov dioksid (NO₂) je rdečkastorjav plin z značilnim ostrim jedkim vonjem pri višjih koncentracijah. Je težji od zraka, zato se zadržuje v nižjih plasteh. Najpogostejši vir nastanka NO so elektrarne na fosilna goriva, naprave ali vozila, ki delujejo na motorni pogon z notranjim izgorevanjem. NO₂ lahko nastaja tudi pri anaerobni fermentaciji svežega organskega materiala. V jamah pogosto nastaja z oksidacijo NO, ki ob stiku s kisikom iz zraka nastane pri uporabi bencinskih vrtalnikov. Ker je dušikov dioksid zelo slabo topen v vodi, zlahka obide sluznico zgornjih dihal in se prebije do pljuč, kjer lahko povzroči pljučni edem. Pri vdihavanju višjih koncentracij se lahko NO₂ veže na hemoglobin, kar še poslabša preskrbo celic s kisikom. Smernice za kratkotrajno izpostavljenost NO₂ določajo mejno vrednost koncentracije pri 20 ppm (do 30 minut). Pri koncentracijah, višjih od 150 ppm, lahko pričakujemo smrt zaradi pljučnega edema (The National Institute for Occupational Safety and Health, 2021a).

Ukrepanje ob zastrupitvi

Prva pomoč pri zastrupitvah s plini ali pri pomanjkanju kisika v zraku je odvisna od stopnje prizadetosti zastrupljenega. Najprej je treba preveriti, ali je pristop do zastrupljenega varen. Človek pri visokih koncentracijah nevarnih plinov v zraku hitro izgubi zavest brez predhodnih znakov in simptomov, zato je nujna čim hitrejša evakuacija zastrupljenega na varno mesto z nekontaminiranim zrakom. Kadar oseba ni pri zavesti, jo na varnem mestu namestimo v stabilen bočni položaj in nadzorujemo dihanje, pri čemer je treba biti pozoren na morebitno bljuvanje. Če oseba ne diha, začnemo s temeljnimi postopki oživljanja.

Ob pomanjkanju kisika v zraku (porabljanje kisika zaradi gorenja ali dihanja ter izpodrivanje kisika z acetilonom ali metanom) obstaja nevarnost zadušitve. Osebo z znaki zadušitve moramo čim hitreje evakuirati na mesto, kjer je koncentracija kisika v zraku višja. Po navadi se takrat stanje obolelega kmalu izboljša.

Ob zastrupitvi s CO se stanje obolelega tudi po evakuaciji na mesto s primerno koncentracijo kisika v zraku kmalu ne izboljša, saj se CO veže na hemoglobin veliko hitreje kot kisik. Ko je hemoglobin zasičen s CO, se iz telesa izloči šele po določenem času – razpolovna doba CO pri dihanju zraka je 6–8 ur. To je mogoče pospešiti

z aplikacijo 100 % kisika, saj je razpolovna doba CO pri dihanju 100 % kisika 30–90 minut. Pri huje zastrupljenih se priporoča uporaba hiperbarične komore, ki še pospeši izločanje CO (razpolovna doba 25 minut). Če teh možnosti ni na voljo, je treba zastrupljenega samo zaščititi pred dejavniki okolja in počakati, da se CO sam izloči iz telesa. Po približno 12 urah bo oseba z blago zastrupitvijo že sama sposobna za odhod iz jame (Albreht in sod., 2018).

Kadar je nekdo osumljen zastrupitve z NO ali NO₂, lahko pričakujemo poškodbe pljučnega tkiva zaradi delovanja dušikove ali dušikaste kisline. Zato tudi v tem primeru ni mogoče pričakovati takojšnjega izboljšanja stanja po evakuaciji na mesto s primerno koncentracijo kisika. Če je oboleli pri zavesti, ga je treba po evakuaciji namestiti v polsededeči položaj. Če je mogoče, se mu aplicira 100 % kisik. Kadar ta ni na voljo, je treba ves čas nadzirati stanje obolelega ter ga spodbujati do prihoda pomoči.

Ob termičnih poškodbah zaradi eksplozije ali gorenja vnetljivih plinov (metan ali acetilen) je treba poškodovanca najprej evakuirati na varno mesto. Oblačil, ki so se zaradi gorenja sprijela s kožo, ne odstranjamo, odstranimo pa nakit ali ure. Opečena mesta hladimo z vodo najmanj deset minut oziroma do ublažitve bolečine. Pri tem moramo paziti, da poškodovanca ne zmočimo preveč, da se ne bi podhladil. Mesto poškodbe pokrijemo s kompresno aluplast (če te ni, lahko uporabimo sterilno gazo, ki jo pokrijemo z izotermično folijo), čez katero povijemo povoj ali trikotno ruto. Če so opečene roke ali noge, jih je treba imobilizirati. Če obstaja sum na opekline dihalne poti (ožganine okoli ust ali nosu, ožganine nosnih ali obraznih dlak, oteženo dihanje itn.) je treba poškodovanca namestiti v polsededeči položaj in hladiti vrat ter obraz s hladnimi obkladki (Ahčan, 2008).

Viri in literatura

1. Ahčan, U., 2008. Celostna obravnava opeklinjskih poškodb. V: Ahčan, U., Slabe, D., Šutanovac, R. (uredniki), Prva pomoč: priručnik za bolničarje. Rdeči križ Slovenije, Ljubljana, 93–104.
2. Alberta: Agriculture, Food and Rural Development. 2004. Methane (CH₄) Safety. [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex9038/\\$file/729-2.pdf?OpenElement&fbclid=IwAR1kqz0lBzj46xk1fyTuQULkl3dsQiYdDl8LlcnVLbVhEPG33Hlycl7v_c](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex9038/$file/729-2.pdf?OpenElement&fbclid=IwAR1kqz0lBzj46xk1fyTuQULkl3dsQiYdDl8LlcnVLbVhEPG33Hlycl7v_c), 8. 6. 2021.
3. Albreht, Š., Jenko, E., Mihalič, K., Pogačar, E., Posavec, A., Zakrajšek, M., 2018. Prva pomoč v jamarstvu. Ljubljana. Jamarska zveza Slovenije.
4. ARSO, 2002. Radioaktivnost v okolju. <https://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/poro%C4%8Dila/poro%C4%8Dila%20o%20stanju%20okolja%20v%20Sloveniji/radioaktivnost.pdf>, 12. 3. 2021.
5. Cigna, A. A., 2004. Climate of caves. V: Gunn, J. (urednik), Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn, New York, 467–475.
6. European Industrial Gases Association, 2017. Carbon Dioxide Physiological Hazards. <https://www.eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=3282&token=fe8e3399018ad935dd2c8600f03a43e1e587dab3>, 2. 4. 2021.
7. Field, M. S., 2007. Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing radiation from ²²²Rn decay in caves. Journal of Cave and Karst Studies, 69(1), 207–228.
8. Freitas, C. R., Littlejohn R. N., Clarkson, T. S., Kristament, I. S., 1982. Cave climate: Assessment of airflow and ventilation. Journal of Climatology, 2(4), 383–397.
9. Gabrovšek, F., Peric, B., 2006. Monitoring the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifers: The case of Reka river system, Karst Plateau, SW Slovenia. Acta carsologica, 35(1), 35–45.

Sklepne misli

Raziskava problematike nevarnih plinov v kraških jamah je pokazala, da se jamarji premalo zavedajo nevarnosti, čeprav je večina izmed njih pri svojih raziskavah že doživela katerega izmed neljubih dogodkov. Motiv osebne izkušnje je bil tudi vzrok za nastanek tega prispevka, ki odpira diskusijo o tematiki, o kateri se premalo govori. Iz tega izhaja nepoznavanje ali celo zanikanje problema, kar posledično ogrozi številne dejavne jamarje, še posebej pa tiste z manj izkušnjami.

Poudarjamo, da je treba pred vsakim vstopom v jame spoznati območje, na katerem je jama nastala, še posebej, kadar obiskujemo jame v tujini. O tveganju spregovorimo tudi z lokalnimi jamarji. Pri obiskih jam smo pozorni predvsem na izmenjavo zraka, saj je prepah v jami ob pojavljanju nevarnih plinov naš glavni zaveznik. Za svojo varnost lahko največ naredimo tako, da opazujemo delovanje svojega organizma in nenavadne simptome, ki jih lahko prepoznamo na podlagi predstavljenih opisov. Kadar v jami uporabljamo odprt ogenj, opazujemo njegovo delovanje, saj težave, povezane z gorenjem, pogosto izhajajo iz pomanjkanja kisika oziroma so posledica prisotnosti nevarnih plinov.

Za poznavanje razmer v podzemlju lahko največ naredimo predvsem z uporabo merilnikov plinov, ki so sicer dragi, vendar ne tako dragoceni kot človeško življenje. To se še posebej izkazuje pri uporabi bencinskih vrtilnikov, ki lahko v neprevetrenih prostorih izjemno hitro ogrozijo naše zdravje. Če jamar zaradi izpostavljenosti plina v jami izgubi zavest, moramo pri reševanju pomisliti tudi na to, da lahko z reševanjem izpostavimo tudi svojo varnost. Lastna in skupna preventiva pa izhajata predvsem iz nenehnega izobraževanja, spoznavanja medsebojnih izkušenj in sistematičnega vnosa poznavanja nevarnih plinov v programe jamarskih šol.

10. Gams, I., 2004. Kras v Sloveniji v prostoru in času. Ljubljana, Založba ZRC.
11. Garogalo, P. S., Friecker, M. B., Günther D., Forti, P., Mercuri A.-M., Loreti M., Capaccioni B., 2010. Climatic control on the growth of gigantic gypsum crystals within hypogenic caves (Naica mine, Mexico)? *Earth and Planetary Science Letters*, 289, 3560–569.
12. Goldstein, M., 2008. Carbon Monoxide Poisoning. *Clinical*, 34(6), 538–542.
13. Gregorič, A., Vaupotič, J., Šebela, S., 2013. The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia). *International Journal of Climatology*, 34, 1488–1500.
14. Greiner, T. H., 1997. Carbon Monoxide Concentrations: Table. <https://www.abe.iastate.edu/extension-and-outreach/carbon-monoxide-concentrations-table-aen-172/>, 6. 4. 2021.
15. Gunn, J., 2004. Radon in caves. V: Gunn, J. (urednik), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn, New York, 1318–1322.
16. Kataster jam Jamarske zveze Slovenije. 2021.
17. Kocijancič, A., Mrevlje, F., Štajer, D., 2005. *Interna medicina*. Ljubljana. Littera picta.
18. Merela, M., 2016. Jamarska reševalna služba Slovenije – ekipa za širjenje ožin ob nesreči v jami. *Ujma*, 30. 291–299.
19. Mihevc, A., 2018. Ice caves in Slovenia. V: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (urednika), *Ice Caves*. Elsevier, Amsterdam, 691–703.
20. National Research Council, 2008. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 6*. Washington, The National Academies Press.
21. Occupational Safety and Health Administration, 2021. Hydrogen Sulfide. <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide>, 5. 4. 2021.
22. Palmer, A. N., 2007. Cave meteorology and internal weathering. V: Palmer, A. N., *Cave Geology*, Cave Books, Dayton, 324–346.
23. Pässler, P., Hefner, W., Buckl, K., Meinass, H., Meiswinkel, A., Wenicke H. J., Ebersberg, G., Müller, R., Bässler, J., Behringer, H., Mayer, D., 2008. Acetylene. V: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH, Weinheim, 1–52.
24. Primc, J., 1978. Tragedija jamarjev v Bilpi. *Dolenjski list*, 22, 1 in 23. <http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:DOC-OQK9JNBF/6d3a588d-a133-4823-9868-05518eab3352/PDF>.
25. Savnik, R., 1960. Prvi raziskovalci našega kraškega podzemlja. *Naše jame*, 2, 16–24.
26. The National Institute for Occupational Safety and Health, 2021a. Nitric dioxide. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html>.
27. The National Institute for Occupational Safety and Health, 2021b. Nitric oxide. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0448.html>.