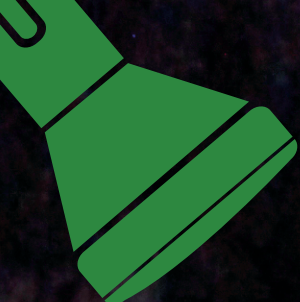




Plinovi, temperatura i relativna vlažnost zraka kao indikatori opasnosti u speleološkim objektima s otpadom

Najla Baković | DVOKUT-ECRO d.o.o., Laboratorij za floru, faunu i staništa

Damir Basara | Udruga Osmica

Robert Baković | Velteh d.o.o.

Gordan Golja | DVOKUT-ECRO d.o.o., Laboratorij za praćenje kvalitete zraka i emisija u zrak

Igor Anić | DVOKUT-ECRO d.o.o., Odjel za klimu i održivost

*Gaćina jama (~85 m), Gaće, Zagvozd
Autor: Damir Basara*

Uvod

Tijekom svoje evolucije i diversifikacije suvremeno industrijsko gospodarstvo jedva se pomaknulo od temelja ustanovljenog još u ranim danima industrijalizacije: linearni model potrošnje resursa koji slijedi uzorak *uzeti-napraviti-odložiti*. Tvrtke ekstrahiraju sirovine, koristeći ih dalje za proizvodnju različitih proizvoda te prodaju potrošačima, koji ih zatim odbacuju kada više ne služe svojoj svrsi (*Towards the Circular Economy*, 2014). Tehnološki napredak donio je bolje razumijevanje eksploatacije prirodnih materijala te se sintetiziraju i izoliraju nove kemikalije, derivati nafte, smjese i sl. Nažalost, stvaranje novih materijala i kemikalija nije pratio razvoj njihove uporabe, recikliranja i zbrinjavanja, kao ni uvažavanje njihove štetnosti. Iako su ljudi odbacivali i spaljivali otpad od prapovijesti, rast stanovništva i otpada, uz sve veću složenost materijala, znači da su danas nekontrolirane prakse odlaganja otpada sve problematičnije (*Global Waste Management Outlook*, 2024). Čak i danas, kad su svijest i znanje o štetnostima značajno porasli, ne postoje primjerene i dugoročno održive metode zbrinjavanja svih vrsta otpada i otpadnih tvari. Na tragu neznanja i nepostojanja alternativa speleološki objekti postali su uobičajena mjesta odlaganja svih vrsta otpada. Izvan speleološke zajednice, speleološki objekti uglavnom se percipiraju kao opasna mjesta u koja nitko ne bi poželio ulaziti. Stoga ne čudi odabir speleoloških objekata kao lokaliteta u kojima se trebalo nešto sakriti i prepustiti zaboravu – savršeno ako želite da nešto »proguta mrak«. O tome svjedoče i brojni toponimi koji označavaju »jamu bez dna« (npr. Bezdan, Bezdanka, Bezdanuša, Bezdanica) (*Čisto podzemlje*, n. d.).

Sastav otpada u speleološkim objektima

Nerazgradivi ili sporo razgradivi materijali pružaju nam uvid u vremenski slijed ubacivanja otpada u speleološki objekt te njegov sastav. Većina otpada u speleološkim objektima dolazi iz kućanstava, no njegov sastav varira ovisno o lokalitetu. Uglavnom se radi o sitnom i krupnom komunalnom otpadu, strvinama domaćih životinja i građevinskom otpadu, no uz njih se nalaze i brojne druge komponente otpada (npr. stari automobili). Komunalni

otpad najčešće se smatra neškodljivim, no ne smijemo zaboraviti da se u njegovom sastavu vrlo često nalaze i manje količine opasnog otpada koji bi se trebao odvojeno skupljati (npr. baterije, korozivna sredstva za čišćenje). Zbog višegodišnjeg stajanja mnoge opasne komponente komunalnog otpada (npr. organska otapala iz boja i lakova, kiseline iz baterija) ishlapile su ili iscurile i isprale se u podzemne vode. Zato je preostali otpad relativno inertan i njegova se štetnost očituje kroz dugoročno i postupno raspadanje/otapanje (npr. teški metali iz baterija, čestice mikroplastike). Starost nije garancija smanjene opasnosti jer neke vrste otpada s protokom vremena postaju opasnije (npr. azbest iz građevinskog otpada) ili se njihova emisija u okoliš dogodi tek nakon višegodišnjeg trošenja ambalaže u kojoj su se nalazili (npr. pucanje spremnika i istjecanje štetnih tekućina). Građevinski otpad također se najčešće smatra inertnim, no u njegovom sastavu mogu se naći brojni štetni materijali (npr. olovne cijevi, azbest, sredstva za održavanje strojeva, cement, vapno). Otrovnost i druge opasnosti iz otpada ovise o prisutnosti opasnog otpada (npr. korozivne kemikalije) te njegova starost nije garancija manje opasnosti.

Strvine domaćih životinja predstavljaju dugotrajnu opasnost jer patogeni organizmi (npr. virusi, bakterije, paraziti) mogu preživjeti u latentnim stadijima i nakon što su se tkiva životinja raspala. Ozbiljnu opasnost predstavlja i ostali opasni otpad



Instrumenti za praćenje okolišnih čimbenika u špiljama s otpadom
Autor: Damir Basara



Kрупni otpad u speleološkom objektu
Autor: Damir Basara



Lešine u otpadu
Autor: Damir Basara

ubačen u speleološke objekte (npr. kemijski otpad, zapaljive tvari). Suvremeno gospodarenje opasnim otpadom podliježe vrlo strogoj zakonskoj regulativi, stoga danas ne bi trebalo biti moguće stvarati, prevoziti ni zbrinjavati opasni otpad bez popratnih radnji koje osiguravaju transparentnost i sljedivost svih postupaka (npr. pratećih listova). Zakonska legislativa garantira i propisuje primjereno rukovanje, transport, uporabu i zbrinjavanje opasnog otpada kroz primjenu načela reda prvenstva gospodarenja otpadom. Nažalost, još uvijek postoje pojedinci koji uspijevaju izbjeći sustav primjerenog gospodarenja otpadom. Također, vrlo je bitno imati na umu da su u Hrvatskoj djelovale mnoge industrije koje su producirale opasni otpad u vrijeme kad nije postojala svijest o potrebi njegove uporabe i/ili zbrinjavanja, kao ni opasnostima koje predstavlja za ljude i okoliš. Sustav gospodarenja otpadom nije postojao ili je bio neadekvatan, što je ostavilo otvoren prostor za prakse neovlaštenog odlaganja nauštrb okoliša. Utemeljeno je, stoga, razmatrati mogućnost da je dio opasnog otpada iz industrije i različitih obrta koji koriste opasne tvari (npr. u obradi kože) (Petrak i Pavlović, 2015) nelegalno odložen u pojedinim speleološkim objektima.

Zahvaljujući intenzivnom i uspješnom zalaganju speleologa za zaštitu speleoloških objekata kao vrijedne geomorfološke, paleontološke, kulturne, arheološke, antropološke i biološke baštine Republike Hrvatske, napravljen je velik pozitivni iskorak. Do sada su dokumentirana čišćenja brojnih speleoloških objekata u sklopu inicijative Čisto

podzemlje i samoinicijativna čišćenja speleoloških klubova. Stvarni razmjer problema otpada u speleološkim objektima pokazuje i podatak da u bazi Čistog podzemlja postoji registrirano više od tisuću onečišćenih objekata, kao i činjenica da se u neke očišćene objekte opet ubacuje otpad (*Čisto podzemlje*, n. d.). Većina speleoloških objekata očišćena je u volonterskim akcijama često potpomognutima različitim donatorima i lokalnom zajednicom. Tek se od 2023. godine u projekte čišćenja uključuje i Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, koji financira ili sufinancira izradu projektne dokumentacije (sanacijskih elaborata) i realizaciju čišćenja.

Uklanjanje otpada iz speleoloških objekata

Fizičko uklanjanje otpada iz speleoloških objekata predstavlja izazov zbog same naravi objekata (uski prostori, urušavanja itd.), ali i zbog opasnosti koje proistječu iz samog otpada, stoga bi uklanjanju otpada iz speleoloških objekata obavezno trebala prethoditi izrada sanacijskog elaborata. Elaborat izrađuje ovlaštenik za poslove zaštite okoliša, odnosno stručni interdisciplinarni tim. Cilj je sanacijskih elaborata procjena vrste i količine otpada te potencijalnih opasnosti koje mogu proistjecati iz radova na uklanjanju otpada. Također, sanacijski elaborat mora obavezno uključivati protokole o gospodarenju otpadom sukladno njegovoj vrsti, protokole u slučaju nailaska na posmrtnu ljudske ostatke i minsko-eksplozivna sredstva te definirati

mjere sprječavanja ponovnog odbacivanja otpada u speleološke objekte. Ograničenje izrade sanacijskih elaborata je nemogućnost procjene vrste i količine otpada u dubokim slojevima (npr. u nekim objektima nalazi se više od 100 m³ otpada odloženog u višemeterskim slojevima), stoga je procjena ograničena na zatečeni površinski otpad, stare speleološke zapisnike i podatke prikupljene intervjuiranjem lokalnog stanovništva. Bitan dio ovih elaborata temelji se na mjerama predostrožnosti definiranim na osnovi opasnosti koje mogu proistjecati iz pronalaska opasnog otpada te na okolišnim parametrima zabilježenima tijekom terenskog istraživanja.

Za razliku od istraživanja za potrebe izrade sanacijskog elaborata, čišćenje mijenja uvjete u speleološkom objektu. Hodanje speleologa po otpadu, urušavanje kamenja i blokova (npr. pri čišćenju vertikala) može imati za posljedicu zbijanje, slijeganje i urušavanje otpada, urušavanje lažnog dna u objektu i slično. Manipulacija otpadom mijenja prethodne uvjete u naslagama otpada te se povećava vjerojatnost fizičkog usitnjavanja otpada. Pritom može doći do oštećenja ambalaže/spremnika iz kojih potom mogu istjecati tekućine i plinovi

pod tlakom ili može doći do rasipanja krutog otpada (praškasti i zrnati materijali). Postoji velika vjerojatnost da su bar neke od ovih tvari otrovne, korozivne, nadražujuće, zapaljive i/ili eksplozivne. Trenje u otpadu može producirati iskrenje. Spomenute tekućine, plinovi i kruti materijali ispuštali bi se u otpad koji sadrži izobilje različitih spojeva (metali, nemetali, metaloidi, organske tvari), a pritom postoji velika vjerojatnost pokretanja novih kemijskih reakcija, uz mogućnost produkcije štetnih plinova ili drugih štetnih tvari. Slaba ventilacija i mali prostor uvjetuju nakupljanje plinova u speleološkim objektima, a skučen i osobito vertikalni prostor otežava evakuaciju sudionika čišćenja. Već i površno nabranje lančanih reakcija koje se javljaju prilikom čišćenja ukazuje na kompleksnu problematiku otpada u speleološkim objektima, pa bi joj se trebalo pristupiti s velikom ozbiljnošću. Iako sanacijski elaborati propisuju mjere čiji je cilj uvažavanje i procjena opasnosti te zaštita od štetnog djelovanja tvari iz otpada, nužno je i ulaganje u bolje razumijevanje metoda prepoznavanja opasnosti tijekom akcija čišćenja. U nastavku rada bit će pojašnjene mogućnosti korištenja temperature,



*Lutka iz Jame u Pupnatu
(otok Korčula)
Autor: Damir Basara*



*Opasni otpad u jami
Autor: Damir Basara*



*Otpad u
speleološkom objektu
Autor: Najla Baković*



*Razvrstavanje i pohrana otpada
u nepropusnu ambalažu
Autor: Damir Basara*

relativne vlažnosti zraka i plinova kao indikatora potencijalnih opasnosti za speleologe. Vrlo je važno naglasiti da ovo nisu jedine opasnosti koje se javljaju tijekom čišćenja speleoloških objekata, no druge opasnosti neće biti obrađene u ovom članku (minsko-eksplozivna sredstva, urušavanja itd.). Podaci izneseni u ovom radu predstavljaju najbolju moguću procjenu s obzirom na trenutno dostupne literaturne podatke, terenske podatke prikupljene za potrebe izrade sanacijskih elaborata te podatke s akcija čišćenja.

Promjene temperature i relativne vlažnosti zraka

Speleološki objekti najčešće imaju specifične mikroklimatske uvjete koje odlikuje relativno stabilna temperatura u dubljim dijelovima objekata s malim dnevnim i unutargodišnjim varijacijama. Nešto veća varijabilnost prisutna je u ulaznim dijelovima objekata zbog intenzivnije veze s površinom. Odstupanja od ovih pravila mogu se javiti u objektima u kojima postoji intenzivno strujanje zraka ili protok vode, koji snažnije utječu na izmjene temperature. Temperatura vode i supstrata u prirodnim objektima najčešće pokazuje vrijednosti bliske temperaturi zraka, a izuzetak mogu biti vrijednosti temperature vode u slučaju brzih dotoka površinskih voda. Ovisno o podneblju u kojem se nalazi,



*Sakupljeni otpad u
speleološkom objektu
Autor: Damir Basara*



*Spremnici s nepoznatim sadržajem
Autor: Damir Basara*

svaki objekt ima karakteristične vrijednosti temperature zraka, tla i vode (Palmer, 2007). Mjerenje temperature u objektu prije početka akcije čišćenja instrumentalnim metodama (ubodnim termometrom i termometrom za zrak) spada u temeljno stanje. Temperatura se može izmjeriti i u otpadu. Ako se tijekom akcije čišćenja zabilježi promjena temperature zraka ili otpada, to može biti indikator kemijskih reakcija u otpadu tijekom kojih se ispušta toplina u okoliš (egzotermne reakcije). Sniženje temperature također može biti posljedica kemijskih reakcija u otpadu (endotermne reakcije) tijekom kojih se uzima toplina iz okoliša. Dobar alat za prepoznavanje ovih reakcija mogu dati i termovizijske kamere, uz uvjet da su baždarene na prepoznavanje malih razlika u temperaturi, kao i infracrveni termometri. Povećanje temperature, osobito u manjim objektima, može nastati i zbog boravka većeg broja ljudi u objektu (emisija topline ljudskog tijela), što također treba uzeti u obzir.

Relativna vlažnost zraka u speleološkim objektima u pravilu je visoka, no, slično kao temperatura, ovisi o lokaciji mjerenja. U blizini ulaza u speleološke objekte prisutne su veće varijacije relativne vlažnosti zraka, dok su u dubljim dijelovima varijacije vrlo male i relativna vlažnost zraka iznosi skoro 100 %. Naravno, postoje izuzeci u objektima u kojima je procjeđivanje vode s površine vrlo slabo te je u njima i prirodno niža relativna vlažnost zraka (Palmer, 2007). Kako bi se dobila referentna vrijednost relativne vlažnosti zraka, potrebno ju je izmjeriti prije čišćenja na više lokacija u speleološkom objektu. Treba imati na umu da je relativna vlažnost zraka ovisna o temperaturi – do njenog sniženja može doći i zbog povećanja temperature (zrak može primiti veću količinu vode u plinovitom stanju). U slučaju da tijekom čišćenja speleološkog objekta dođe do značajnijeg sniženja relativne vlažnosti zraka, to može biti indikator da je došlo do ispuštanja higroskopskih materijala (koji upijaju vlagu iz zraka). Mjerenja temperature i relativne vlažnosti zraka, sa svrhom prepoznavanja opasnosti, trebala bi se provoditi kontinuirano tijekom akcije čišćenja ili bar u kratkim razmacima ponavljati mjerenja na više lokacija u objektu. Većina uređaja za mjerenje temperature zraka i relativne vlažnosti zraka ima spor odaziv te je potreban strpljiv rad

na prikupljanju podataka. Nešto je brži odaziv u ubodnih termometara.

Promjena mirisa, pojava izmaglice i dima

Speleološki objekti siromašni su hranjivim tvarima jer u njima nema primarne produkcije organske tvari putem fotosinteze (Culver i Pipan, 2009), pa tako ni njenog raspada, koji je zaslužan za velik broj mirisa. Izostaju i brojni mirisi koje stvaraju biljke. S druge strane, komunikacija s površinom (tlom) snažno oblikuje špiljske zajednice mikroorganizama koji speleološkim objektima daju jedva zamjetan, neutralan miris. Izmjena prirodnog mirisa speleoloških objekata moguća je u slučaju objekata u kojima izviru podzemne vode bogate mineralnim tvarima (npr. špilje sumporače) (Barton, 2006). Snažan miris speleoloških objekata može biti posljedica povremenog ili trajnog boravka sisavaca (izmet, urin, tjelesni miris).

Vjerojatno najprepoznatljiviji miris u onečišćenim speleološkim objektima je neugodan miris uginulih životinja ili njihovih tkiva. Strvine životinja ili njihovi ostaci prisutni su u gotovo svim speleološkim objektima s otpadom. Zbog niskih i ustaljenih temperatura raspad strvina je usporen, a time i preživljavanje patogena koji su uzrokovali smrt životinje ili čiji je životinja prenositelj (Plavša i dr., 2017). U speleološke objekte u pravilu se ubacuju životinje koje su uginule od bolesti te je miris uginulih životinja, pronalazak ostataka životinja (kože, vuna i sl.) ili kostiju (čak i ako na njima nema vidljivih tkiva) indikator da je potrebno tijekom cijelog čišćenja koristiti adekvatnu zaštitnu opremu i pojačati oprez.

U speleološkim objektima u koje se odbacuje svježi komunalni otpad s izobiljem organskog otpada ili poljoprivredni ostaci (npr. stari krumpir, trulo voće) razvija se smjesa lako hlapljivih organskih spojeva, među kojima su najprepoznatljiviji merkaptani (novijeg naziva tioli) i sumporovodik (ima miris po trulim jajima), koji se i inače najčešće povezuju s površinskim odlagalištima otpada (Vađić, 2006). Razvoju ovih plinova pogoduje manjak kisika, pri čemu dolazi do anaerobne razgradnje organskih tvari. Ovaj miris najintenzivnije će se osjetiti pri otvaranju/pucanju najlonskih vreća u kojima se nalaze organski ostaci, u debljim

slojevima organskog otpada ili na lokacijama gdje se organski otpad nalazi između slojeva ostalog otpada. Iako je neugodan, u manjim koncentracijama miris ove smjese nije osobito štetan. Međutim, njegova prisutnost nalaže oprez jer merkaptani i ostali lako hlapljivi organski spojevi mogu biti indikatori prisutnosti drugih opasnih plinova (detaljnije opisano u poglavlju o plinovima bez mirisa).

Vrlo neugodan i oštar miris imaju i brojni spojevi klora i sumpora, zatim amonijak, jake kiseline i sl. Specifičan miris mogu imati i lako hlapljiva otapala (aceton, alkoholi, eteri itd.) i naftni derivati. Neki kemijski spojevi, kao što su esteri, često imaju ugodan aromatičan miris. Cijanovodik, koji je vrlo otrovan plin, ima miris po gorkim bademima. Nabrojeni spojevi samo su neki primjeri otrovnih, nadražujućih, korozivnih i lakozapaljivih i/ili eksplozivnih spojeva koji predstavljaju ozbiljnu opasnost za speleologe. Iako neki od ovih spojeva

mogu nastati raspadom organskih tvari (npr. sumporovodik), vjerojatniji izvor je prisutnost opasnog otpada.

Pojava dima i mirisa dima osobito je opasna u speleološkim objektima. Dim ne mora biti vidljiv zbog tinjajućeg gorenja, koje se može odvijati duboko u otpadu (Kulišić, 2006). Tinjajuće gorenje moguće je prvenstveno u ulaznim dijelovima speleoloških objekata (špilje), kao dio procesa samozapaljenja zbog kombiniranog utjecaja mikroorganizama, temperature i vlažnosti, dok je u dubljim dijelovima manje moguće. Sam sadržaj dimnih plinova ovisi o vrsti organske tvari koja gori i o temperaturi gorenja, ali sa sigurnošću se može reći da su svi produkti gorenja organskih tvari fiziološki štetni za ljudski organizam.

Općenito, u speleološkim objektima s otpadom postoji mogućnost nastanka požara i/ili eksplozije prvenstveno zbog razvoja zapaljivih plinova i mogućeg prisustva lakozapaljivih tekućina. Iako postoji veća količina akumulirane gorive mase, sam požar vjerojatno bi bio lokaliziran na mjestu prisustva zapaljivog plina i/ili lakozapaljive tekućine te bi se vrlo sporo ili gotovo nikako širio zbog niske temperature i visoke relativne vlažnosti zraka.

Veća opasnost za speleologe bila bi eksplozija zapaljivih plinova i para iako bi i ona vjerojatno bila lokalnog (manjeg) karaktera. Zbog nedostatka podataka o količini i vrsti zapaljivih plinova i para teško je predvidjeti promjer vatrene kugle koja bi se pojavila u slučaju eksplozije, kao i nadtlak koji bi nastao, a s njime i radijus udaljenosti na kojoj bi još moglo doći do ozljeđivanja.

Izmaglica u speleološkim objektima može se javiti pri uzdizanju čestica prašine u uvjetima visoke relativne vlažnosti zraka. Plinovi teži od zraka i/ili smjese plinova mogu se nakupljati i stvarati izmaglicu pri dnu objekata, no razlike u temperaturama i konvekcije mogu podići plinove i duž vertikalnog presjeka speleološkog objekta, što može biti indikator povećane opasnosti.

Neki pojedinci imaju vrlo istančan osjet njuha te je uputno uvažiti njihovo upozorenje čak i kada drugi sudionici čišćenja još uvijek ne mogu registrirati mirise. Neke tvari imaju snažan miris već pri malim koncentracijama, ali postoje i suprotni primjeri. Jedini način na koji se može pouzdano utvrditi prisutnost neke vrste plina u speleološkom



Uređaji za praćenje sastava i koncentracije plinova
Autor: Damir Basara

objektu je instrumentalnim metodama. Vizualno opažanje izmaglica ili dima također je individualno, stoga treba ozbiljno shvatiti upozorenje bilo kojeg od speleologa uključenih u čišćenje.

Plinovi bez boje i mirisa

U speleološkim objektima najčešće je prirodno povišena koncentracija ugljikovog dioksida. Svaki objekt ima specifičnu dinamiku ovog plina koja može varirati ovisno o cirkulaciji zraka i dijelu godine (npr. ljeti su koncentracije najčešće više). Koncentracija ugljikovog dioksida nije ravnomjerna u svim dijelovima speleoloških objekata te može pokazivati visoku varijabilnost unutar jednog objekta. U objektima koji imaju višestruko povećane koncentracije ugljikovog dioksida javlja se i smanjenje volumnog udjela kisika u zraku. Ovaj efekt nastaje jer je ugljikov dioksid teži od zraka te istiskuje ostale plinove, pa tako i kisik. Iako se radi o prirodnoj pojavi u sastavu plinova u speleološkim objektima, ona može predstavljati opasnost za speleologe (Rnjak i Bakšić, 2019). U speleološkim objektima s otpadom problemi s ova dva plina mogu se dodatno uvećati.

Zatrpavanjem speleoloških objekata otpadom zapunjavaju se prirodne šupljine i kanali te se na taj način smanjuje cirkulacija zraka kroz objekt, što povećava vjerojatnost akumulacije veće količine plinova. Aerobnom razgradnjom organske tvari u objektu (npr. organski otpad, listinac, drvo, papir) stvara se ugljikov dioksid i istovremeno se troši kisik. Na taj način dolazi do dodatnog porasta koncentracije ugljikovog dioksida i smanjenja volumnog udjela kisika u speleološkom objektu. Kada se radi o većoj količini organskog otpada koji je zatrpan slojevima smeća, raspoloživi se kisik vrlo brzo potroši te počinje anaerobna razgradnja, pri čemu nastaju smjese plinova. Među njima se nalaze već spomenuti merkaptani i drugi lako hlapljivi spojevi snažnog mirisa (sumporovodik, amonijak itd.), ali i plinovi bez mirisa i boje kao što su ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, metan, vodik itd. (*Hazardous Substance Fact Sheet*, 2012; 2016). Stoga merkaptani i lako hlapljivi organski spojevi snažnog mirisa mogu ukazivati i na prisustvo ostalih opasnih plinova bez mirisa. Sastav plinova koji će nastati razgradnjom ovisi i o sastavu organskog otpada, mikroorganizmima uključenima u

razgradnju, raspoloživosti kisika i sl. Ugljikov monoksid izrazito je toksičan plin i pri malim koncentracijama, dok se ugroza od metana očituje u smanjenju volumnog udjela kisika. Ugljikov monoksid, metan i vodik vrlo su eksplozivni u mješavini sa zrakom (*Hazardous Substance Fact Sheet*, 2016).

Manje smanjenje koncentracije kisika ljudsko tijelo kompenzira pojačanom frekvencijom disanja (*Hazards of oxygen-deficient atmospheres*, 2018), no potrebno je imati na umu da se u speleološkim objektima smanjenje kisika javlja uz istovremeno povećanje koncentracije ugljikovog dioksida. Također, zbog otpada mogu biti prisutni i drugi još otrovniji plinovi (npr. ugljikov monoksid). Ubrzano disanje, stoga, može djelovati na način da se ubrza apsorpcija štetnih plinova. Združeni efekt snižene koncentracije kisika i povišene koncentracije otrovnih plinova (Levin, 1987) može u vrlo kratkom vremenu dovesti do trovanja s ozbiljnim posljedicama za zdravlje i život speleologa uključenih u čišćenje.

U kanalima koji su odsječeni zbog zatrpavanja otpadom očekuju se zračne mase s povišenom koncentracijom ugljikovog dioksida, smanjenim volumnim udjelom kisika, ali i potencijalno povišenom koncentracijom drugih štetnih plinova (npr. ugljikovog monoksida, metana). Ulazak u ove kanale, stoga, može biti izrazito opasan. Uklanjanje slojeva otpada također oslobađa i plinove nakupljene u slojevima otpada u kojem se mogu stvarati i veći džepovi s izmijenjenim plinskim sastavom. U postupku čišćenja, kad se spomenuti kanali i džepovi otvore, moguće je pokretanje cirkulacije zraka te će se javiti migracija zračnih masa u druge dijelove objekta.

Promjena koncentracije ugljikovog dioksida, kisika, ali i drugih plinova bez mirisa može nastati i u slučaju pucanja njihovih spremnika pod tlakom, ako se nalaze u sastavu otpada, ili kao posljedica kemijskih reakcija u kojima nastaju ovi plinovi.

Jedini pouzdan način za određivanje prisutnosti spomenutih plinova su instrumentalne metode. S obzirom na to da svi spomenuti plinovi mogu migrirati po špilji zbog javljanja cirkulacije zraka, mogući su poremećaji u raslojavanju plinova zbog njihovog mehaničkog miješanja, stoga se preporučuje mjerenje koncentracije plinova težih od zraka prvo na nižim lokacijama, pa tek onda u



Otpad u speleološkom objektu
Autor: Damir Basara

vertikalnom stupcu speleološkog objekta. Obrnuto pravilo vrijedi za plinove lakše od zraka.

Odluke koje spašavaju živote

U prethodnim poglavljima detaljno je opisano kako prepoznati potencijalne opasnosti u speleološkim objektima s otpadom i utemeljeno je pitanje što napraviti kad se zabilježe određene anomalije.

Izmjene temperature, relativne vlažnosti zraka, pojava izmaglice i/ili dima, izmjena uobičajenog mirisa, odstupanje od očekivane koncentracije ugljikova dioksida i kisika, pojava stranih plinova za špilje (ugljkovog monoksida, amonijaka, metana, merkaptana, hlapljivih organskih spojeva itd.) mogu biti indikatori prisutnosti opasnog otpada i/ili opasnih kemijskih reakcija u otpadu. U slučaju prepoznavanja jednog ili više nabrojanih

indikatora, akciju čišćenja treba odmah zaustaviti i svi sudionici moraju napustiti speleološki objekt.

Bilo kakvi subjektivni simptomi minimalno jednog speleologa uključenog u čišćenje (gušenje, kašalj, gubitak svijesti, konvulzije, mučnina, povraćanje, drhtanje, ubrzano disanje, ubrzan srčani puls, gubitak koordinacije, smetnje vida, smetenost, manjak pažnje, letargija, pečenje sluznice oka, nosa i usta, pretjerano znojenje, halucinacije, promjene ponašanja, kognitivne smetnje itd.) također su nedvojben znak da akciju čišćenja treba odmah zaustaviti i da svi sudionici moraju napustiti speleološki objekt jer ovi simptomi mogu biti posljedica prisutnosti štetnih plinova i/ili manjka kisika, odnosno mogu biti indikator opasnog otpada u objektu i/ili opasnih kemijskih reakcija u otpadu.

U slučaju sumnje na javljanje opasnosti, radi sigurnosti speleologa akcija čišćenja trebala bi se bez odgađanja prekinuti i bez odgode evakuirati sve sudionike čišćenja iz objekta. Ako su se u speleologa javile zdravstvene tegobe, potrebno je bez odgađanja potražiti medicinsku pomoć. Tek nakon što su svi članovi tima na sigurnom, potrebno je donijeti odluku o daljnjem postupanju. Bitno je da se procjena stanja i odluka o daljnjem postupanju donesu izvan speleološkog objekta (na sigurnom i u nezagađenoj atmosferi).

Utvrđivanje uzroka pojave opasnosti (npr. pojave opasnih plinova i sl.) ne smiju raditi speleolozi, već stručnjaci za zaštitu okoliša. Kako bi se čišćenje moglo nastaviti, potrebno je napraviti novu procjenu stanja. Prije svega, to podrazumijeva procjenu izvora štetnih plinova i/ili čimbenika koji su doveli do izmjene temperature i relativne vlažnosti zraka. Rezultat procjene mora biti identifikacija izvora, očekivane emisije plinova / izmjene temperature / relativne vlažnosti zraka u slučaju nastavka akcije čišćenja. Ovu procjenu treba napraviti ovlaštena osoba za poslove zaštite okoliša (tj. za izradu sanacijskih elaborata) jer nestručna procjena može dovesti do gubitka ljudskih života. Procjenom se propisuje nova metodologija koja uključuje i zaštitna sredstva, ovisno o identificiranim štetnostima plinova. Revizija postojećeg plana uklanjanja otpada ujedno je i prilika da se za čišćenje objekta opravdano zatraže dodatna financijska sredstva ako je to potrebno. Primjeri su opravdanih povećanja troškova npr. nabavka sustava za ventilaciju objekta, uređaja za

zaštitu dišnih organa (izolacijski aparat) u slučaju kad nije moguće dovoljno ventilirati objekt, dodatna užeta radi postavljanja brze evakuacijske linije, povećanja radnog napora zbog nailaska na nove vrste otpada, povećanja duljine trajanja čišćenja zbog ograničenja boravka speleologa u objektu na par sati po osobi itd. Svaki pojedinac ima pravo odlučiti o stupnju rizika koji je spreman prihvatiti prilikom čišćenja speleološkog objekta, a to podrazumijeva i neprihvatanje čišćenja objekata s povišenim opasnostima. Akcija čišćenja može se nastaviti tek kada se koncentracije štetnih plinova prirodnom ili umjetnom ventilacijom spuste na prihvatljive vrijednosti te kad se eliminiraju druge opasnosti. U slučaju kada rizik za ljudsko zdravlje nije moguće nikako izbjeći ili ublažiti na prihvatljivu razinu, potrebno je razmotriti potpuno odustajanje od uobičajenih metoda uklanjanja otpada ljudskim radom.

Određene varijacije u koncentraciji ugljikovog dioksida i promjene temperature zraka (npr. zagrijavanje objekta zbog većeg broja ljudi u objektu) sasvim sigurno će se dogoditi prilikom svakog čišćenja, stoga je nužno znati početno stanje koje će služiti kao referentna vrijednost. Ako se radi o neznatnom povećanju koncentracije ugljikova dioksida i/ili neznatnog smanjenja koncentracije kisika i/ili neznatnog povećanja temperature zraka, moguće je da se radi o izmjenama zbog kojih je potrebno samo povećati oprez. Ako dođe do kontinuiranog rasta/pada spomenutih plinova ili temperature, a osobito ako se ta promjena dogodi naglo, to je indikator da treba bez odgađanja zaustaviti čišćenje i napustiti objekt. Veće smanjenje relativne vlažnosti zraka i značajnija izmjena temperature, detektiranje ostalih plinova (ugljikov monoksid, sumporovodik, metan, amonijak, eksplozivni plinovi itd.) ili pojava sumnje u postojanje nekih plinova (npr. kognitivno-bihevioralni ili fiziološki simptomi u speleologa) indikator su da se akcija čišćenja mora zaustaviti bez odgođe.

Organizacija čišćenja speleoloških objekata

Prilikom pripreme akcije čišćenja speleoloških objekata izrazito je važno provesti detaljnu analizu speleološkog objekta, pristupnog terena te sastava i količine otpada kako bi se mogućnost nepredvidljivih situacija i potencijalnih ozljeda speleologa

eliminirale ili bar svele na minimum. Kvalitetna priprema i dobra organiziranost timova speleologa ključni su za uspjeh i sigurnost akcije. Plan uklanjanja otpada (sanacijski elaborat) temeljni je dokument u kojemu su navedene smjernice za čišćenje pojedinog lokaliteta te ga svi sudionici akcije trebaju dobiti na uvid.

Kod odabira tima za voditelja akcije treba odabrati stručne i iskusne speleologe sa završenom edukacijom za zvanje *speleolog* ili *instruktor speleologije*. Ako ulaze u speleološki objekt, ostali sudionici akcije moraju imati završenu speleološku školu, tj. minimalno zvanje *speleološki pripravnik*. Svi sudionici akcije moraju biti iskusni u tehnikama kretanja po speleološkim objektima i tehnikama kretanja po jednostrukim užetima radi savladavanja prirodnih prepreka u speleološkom objektu. Ako se radi o tehnički zahtjevnijim objektima, potrebno je sastaviti tim koji se sastoji od iskusnijih speleologa. Zakonska je obaveza da svi speleolozi uključeni u akcije čišćenja, neovisno o mjestu njihova zaposlenja ili volonterskom angažmanu, budu osposobljeni za rad na siguran način, što im



Zaštitna oprema tijekom uklanjanja otpada
Autor: Damir Basara



*Zaštitna oprema tijekom uklanjanja otpada
Autor: Miran Barjaković*

mora omogućiti ovlaštena pravna ili fizička osoba za zaštitu na radu, i da imaju valjano uvjerenje o zdravstvenoj sposobnosti ako obavljaju poslove s posebnim uvjetima rada.

Preporučuje se da svi sudionici čišćenja odslušaju predavanja o opasnostima u speleološkim objektima u organizaciji udruge organizatora čišćenja i/ili drugih speleoloških udruga posvećenih problematici otpada u speleološkim objektima i/ili stručnjaka za zaštitu okoliša s iskustvom u izradi sanacijskih elaborata za čišćenje speleoloških objekata. Znanje bi se trebalo redovito obnavljati jer će se i sami programi edukacije svakako nadopunjavati i mijenjati sukladno novim saznanjima s akcija čišćenja. Poseban naglasak u edukaciji treba staviti na prepoznavanje opasnosti u speleološkim objektima s otpadom. U sklopu osposobljavanja bilo bi dobro provesti i kratku obuku ispravnog korištenja instrumenata za mikroklimatska mjerenja (temperature, relativne vlažnosti zraka, strujanja zraka), izbor uređaja s obzirom na očekivane plinove (ne postoji univerzalni uređaj za sve plinove), mjerenje sastava i koncentracije plinova (npr. ispravan rad s uređajima, izbor lokacije i frekvencije mjerenja) te njihova tumačenja. Važan dio edukacije svakako mora biti i korištenje osobnih zaštitnih sredstava (zaštitna odijela, zaštitne maske, zaštitne naočale, gumene cizme, rukavice i dr.), pružanje prve pomoći itd.

Financiranjem čišćenja otpada iz speleoloških objekata sredstvima Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost višestruko se povećala mogućnost nabavke raznih alata i kvalitetne opreme, stoga

u pripremi svake akcije čišćenja treba obnavljati i nabavljati novu opremu i alate kojima se radni napori smanjuju na minimum, a sigurnost sudionika povećava na maksimum. Komercijalni projekti ujedno su prilika za nabavljanje novih instrumenata kojima će se omogućiti rano prepoznavanje opasnosti. Radi se o opravdanom trošku, osobito ako je u objektima na razini sanacijskog elaborata prepoznata opasnost od opasnih plinova. Pritom treba voditi računa da se nabave instrumenti odgovarajućeg raspona mjerenja koncentracije plinova (npr. za ugljikov dioksid), da su lako prenosivi, pouzdani u uvjetima povišene vlažnosti zraka i da imaju sustav alarmiranja na štetne/opasne koncentracije plinova. Preporučljivo je i redovito umjeravanje – kod ovlaštenog servisera ili bar usporedba različitih uređaja (umjeravanje na razini speleoloških društava i sl.).

Radi sigurnosti sudionika akcije čišćenja tijekom provedbe potrebno je vršiti kontinuirana ili bar što češća mjerenja koncentracija potencijalno opasnih plinova (minimalno CO_2 , CO , H_2S , O_2 i eksplozivnih plinskih smjesa, a poželjno i hlapljivih organskih spojeva) jer su instrumenti jedini pouzdani pokazatelj izmijenjenih koncentracija plinova koji mogu ugroziti zdravlje sudionika akcije. Ako su sanacijskim elaboratom prepoznate i druge vrste plinova koji se mogu pojaviti u speleološkom objektu, nužno ih je pratiti sukladno propisanoj dinamici.

Svi članovi akcije čišćenja trebali bi znati prepoznati znakove koji ukazuju na moguću prisutnost štetnih plinova ili manjak kisika. Bitno je podići svijest o činjenici da neprepoznavanje opasnosti može dovesti do smrti, osobito u pojedinaca koji imaju zdravstvene tegobe zbog kojih su osjetljiviji (npr. srčani bolesnici). Izloženost štetnim tvarima i česticama (kancerogenim, reprotoksičnim, mutagenim tvarima, endokrinim disruptorima) može dovesti do pojave ozbiljnih kroničnih bolesti i smrti. Izloženost štetnim tvarima ne mora se očitovati odmah pri izlaganju, već može dovesti do oštećenja (npr. pluća) koja će se prepoznati tek naknadno (Stepa, 2022).

Zaključak

Čišćenje speleoloških objekata spada u poslove s povišenim rizicima i brojnim opasnostima. Opasnosti tijekom akcija čišćenja mogu proistjecati iz neopasnog i opasnog otpada, ali i same naravi objekta, stoga je nužno da se svi sudionici

Slojevi otpada u vertikali
Autor: Damir Basara





čišćenja educiraju o ranom prepoznavanju opasnosti. Najpouzdaniji način identifikacije promjena u sastavu plinova, temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka je korištenje instrumenata (uređaji za mjerenje plinova, termometri, higrometri). Međutim, uređaji za mjerenje plinova su selektivni te su korisni samo u slučaju kada znamo koji plin možemo očekivati. Korištenje uređaja za mjerenje plinova govori samo o nekom specifičnom plinu te nam ne može reći ništa o sastavu ostalih plinova. Stoga treba koristiti sva raspoloživa sredstva – njih, vizualna opažanja, neuobičajene promjene ponašanja, pojavu različitih simptoma i sl. U slučaju pojave i najmanje sumnje na opasnost koja je posljedica štetnih plinova ili moguće indikacije prisutnosti opasnog otpada u speleološkom objektu, potrebno ga je odmah napustiti bez odgađanja. Negativne posljedice izlaganja štetnim tvarima mogu se manifestirati odmah (npr. kašalj), ali i dugoročno (npr. kancerogenost). Zbog velike količine različitih materijala u sastavu otpada, najčešće dolazi do stvaranja smjesa štetnih plinova. Njihova štetnost za ljudsko zdravlje zbog kumulativnog efekta dodatno se povećava. U slučaju ozbiljnijeg trovanja moguće su trajne posljedice za ljudsko zdravlje, pa čak i smrt. Prilikom provođenja akcija čišćenja speleoloških objekata sigurnost sudionika mora biti na prvom

mjestu. Speleolozi imaju pravo i obavezu prekinuti akciju čišćenja u slučaju pojave ozbiljnih opasnosti i pojave novih vrsta otpada te zahtijevati reviziju sanacijskog elaborata kojim se treba predložiti siguran i primjeren način uklanjanja otpada i smanjenja opasnosti te adekvatno financiranje dodatnih troškova proisteklih iz spomenutih opasnosti.

Literatura

- Barton, A. H., 2006: Introduction to cave microbiology: A review for the non-specialist, *Journal of Cave and Karst Studies* 68 (2), 43–54.
- Culver, D. C., Pipan, T., 2009: *The biology of caves and other subterranean habitats*, Oxford University Press, New York.
- Čisto podzemlje, n. d.
- *Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource*, United Nations Environment Programme (UNEP), 2024.
- *Hazardous Substance Fact Sheet*, New Jersey Department of Health (NJDH), 2012.
- *Hazardous Substance Fact Sheet*, New Jersey Department of Health (NJDH), 2016.
- *Hazards of oxygen-deficient atmospheres*, European Industrial Gases Association (EIGA), 2018.

- Kulišić, D., 2006: Opće značajke pojava samozagrijavanja i samozapaljenja tvari, *Sigurnost* 48 (2), 141–174.
- Levin, B., 1987: Effects of exposure to single or multiple combinations of the predominant toxic gases and low oxygen atmospheres produced in fires, *Fundamental and Applied Toxicology* 9 (2), 236–250, DOI: 10.1016/0272-0590(87)90046-7.
- Palmer, A. N., 2007: *Cave geology*, Cave Books, Dayton.
- Petrak, V., Pavlović, G., 2015: Ekotoksikologija arsena, *International Interdisciplinary Journal of Young Scientists from the Faculty of Textile Technology* 5, 86–98.
- Plavša, N., Jotanović, S., Savić, Đ., 2017: Disposal of Animal Waste as a Risk Factor in the Spread of Zoonotic Pathogens, *Agroznanje* 17, 219, DOI: 10.7251/AGREN1603219P.
- Rnjak, G., Bakšić, D., 2019: Opasnosti u speleološkim objektima, u: *Speleologija, II. izmijenjeno i dopunjeno izdanje* (ur. Rnjak, G.), Hrvatski planinarski savez, Hrvatska gorska služba spašavanja, Speleološko društvo »Velebit«, Zagreb, 174–192.
- Stepá, R. A., 2022: Carcinogenic, mutagenic, reprotoxic (CMR) substances.
- *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*, World Economic Forum (WEF), 2014.
- Vadić, V., 2006: Onečišćenje zraka u području odlagališta otpada Jakuševac i u okolnim naseljima, *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* 57, 317–324.

Gases, Temperature and Relative Air Humidity as Hazard Indicators in Speleological Objects with Waste

Speleological objects are characterized by a relatively stable air temperature close to the average annual temperature of the wider area and high relative humidity of air. These conditions, combined with the scarcity of organic matter and strong communication with the soil, create a specific »neutral« odor. Olfactory characteristics can change drastically in speleological objects containing waste, especially during the removal of waste. The change in odor can be used as an indicator of the type of waste, which is invaluable information since there is no method that can identify waste in deeper layers. In addition to easily recognizable odors (e.g., dead animals), many chemicals can also have a specific odor that is a potential indicator of chemical waste and a danger to speleologists involved in cleaning. Numerous gases have an unpleasant odor (e.g., hydrogen sulfide, ammonia, mercaptans), but some chemicals can also have a pleasant odor (e.g., esters). Unfortunately, many gases that can pose a danger to speleologists (e.g., carbon oxides, methane) have no color or odor. Therefore, the use of instruments is the only way to detect them. Temperature changes are also an important indicator of danger in speleological objects. An increase or decrease in temperature can be a consequence of chemical reactions in waste (e.g. chemical waste, organic fermentation) as well as a significant decrease in relative air humidity (hygroscopic materials) or an unusual occurrence of haze. Any occurrence of changes in gas composition or temperature changes requires caution and urgent consideration of the decision whether to stop the work. The only reliable way to determine changes in environmental factors that may be indicators of danger for speleologists are instrumental methods. The cleaning of speleological objects carries numerous and serious dangers that should not be ignored, and therefore it is necessary to invest in the education and awareness – raising of speleologists, but also in the mandatory preparation of remediation studies by environmental protection experts.