

## ZRANITEĽNOSŤ, EKOSTABILIZUJÚCE FAKTORY A NARUŠENIE JASKYNNÉHO PROSTREDIA

Pavel Bella\*

\* Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš,  
bella@ssj.sk

Katolícka univerzita v Ružomberku, Pedagogická fakulta, Katedra geografie, Hrabovská cesta 1,  
034 01 Ružomberok; pavel.bella@ku.sk

### **Vulnerability, ecostabilizing factors and disturbance of cave environments**

Caves as valuable or rare natural sites present specific geoecological systems with several peculiar features of an underground environment. Mainly in karst areas cave geosystems have stronger connections with surface landscape systems. Many caves are influenced and disturbed by multiple negative anthropogenic impacts. The karst landscape is a very unstable natural system, its regeneration capacity is low and in some cases non-existent. Negative anthropogenic impact interrupts or changes the spatial structure, behaviour, seasonal etocycles or successional dynamics of cave geosystems. From the viewpoint of rational use and conservation of caves the paper deals with the vulnerability and ecostabilizing factors of cave geosystems in relation to the self-regulation processes and reversible changes of cave environment. The karst disturbance index is specified for measuring the degree of anthropogenic disturbance in caves.

**Key words:** geoecology, environmental speleology, karst landscape, cave environment, vulnerability, geoecological stability, self-regulation, ecostabilizing factors, disturbance, negative anthropogenic impacts

### ÚVOD

Riešene environmentálnych problémov ochrany jaskýň, najmä v dostatočne skrasovatených územiach, si vyžaduje komplexný prístup založený na detailnej analýze vlastností a fungovania jaskynných geosystémov a ich priestorových vzťahov v krajine. Ochrana krasových jaskýň, ktoré sú jedny z najzraniteľnejších a najlabilnejších krajinných systémov, patrí medzi dôležité úlohy ochrany prírody.

Predložený príspevok sa zaoberá problematikou zraniteľnosti, ekostabilizujúcich faktorov a narušenia jaskynného prostredia antropogénnou činnosťou. Jeho hlavným cieľom je detailnejšie rozpracovať túto problematiku z geosystémového hľadiska, najmä vo vzťahu k fungovaniu a priestorovej štruktúre jaskynných geosystémov.

### JASKYNE AKO ŠPECIFICKÉ PRÍRODNÉ GEOSYSTÉMY

V porovnaní s povrchovými krajinnými systémami sa jaskyne vyznačujú viacerými odlišnými vlastnosťami a zložením prírodných zložiek, ako aj charakterom niektorých prírodných procesov (pozri Gergedava 1983, Jakál 1986, Bella 2008 a iní). Ich podzemné priestory majú osobitnú morfológiu (speleo-relief), vytvára sa v nich sintrová výplň. Pre jaskyne je typický vyrovnaný ročný chod teploty a vlhkosti vzduchu, okrem priesakov zrážkových vôd sa miestami vyskytujú občasné či trvalé podzemné vodné toky a jazerá. V jaskyniach

absentujú pedogenetické procesy, v afotickej zóne i fotosyntéza. Pravé jaskynné živočíchy (troglobionty) sú charakteristické redukciami až zánikom zrkovných orgánov, depigmentáciou, veľkosťou a tvarom tela, ako aj životnými funkciami prispôbenými podmienkam v podzemných dutinách (tma, stála nižšia teplota a vysoká vlhkosť vzduchu). V afotickej zóne niektorých jaskýň sa zistili chemo- tropné mikroorganizmy (Vlasceanu et al. 2000 a iní).

Jaskynné geosystémy sa vyznačujú priestorovou vertikálnou a horizontálnou štruktúrou, ktorú tvoria speleotopy, speleochory a súbory speleochor. Ich časové, resp. časopriestorové zmeny sa vzťahujú na sezónny režim, sukcesívnu dynamiku podmienenú zmenou geoeologického invariantu až evolučný vývoj v geologických dobách (Bella 1998 a 2008).

Jaskynné geosystémy v krase majú silnejšie väzby s povrchovými krajinnými systémami ako v nekrasových územiach budovaných nerozpustnými horninami. Z vertikálneho hľadiska ide najmä o priesaky zrážkových vôd, z horizontálneho hľadiska o ponorné autochtónne alebo alochtónne vodné toky. Na jaskynné geosystémy prostredníctvom ponorných alochtónnych vodných tokov výrazne vplývajú priľahlé nekrasové územia, ktoré sú odvodňované do krasu (Jakál 1986 a 1995 a iní).

#### ZRANITEĽNOSŤ A EKOSTABILIZUJÚCE FAKTORY JASKYNNÉHO PROSTREDIA

Krasová krajina v pokročilom stupni skrasovatenia s dokonale vyvinutými povrchovými a podzemnými krasovými javmi a intenzívnym podzemným odvodňovaním patrí medzi najlabilnejšie krajinné systémy ohrozované rušivými antropogénnymi vplyvmi. Vysokej krasovej priepustnosti zodpovedá nízka až takmer žiadna filtračná, resp. samočistiaca schopnosť podzemných vôd, ktoré sa pomerne ľahko môžu znečistiť nielen nevhodnou činnosťou v jaskyni, ale aj na území odvodňovanom do jaskyne. Vo vzťahu k špecifickej podzemnej faune a jej biotopom predstavujú jaskyne veľmi krehké ekosystémy (Gamble 1981 a iní). Odolnosť krasovej krajiny voči negatívnym antropogénnym vplyvom je veľmi nízka, jej regeneračná schopnosť vrátane jaskýň je malá, v niektorých prípadoch až nemožná (Jakál 1984, 2000 a 2002, Příbyl 1992, Parise a Pascali 2003 a iní). Medzi najzraniteľnejšie časti krasovej krajiny patria jaskyne. Na rozdiel od intenzívne skrasovatených území, jaskyne vytvorené v málo priepustných až nepriepustných horninách sú spravidla odolnejšie, najmä voči rušivým antropogénnym vplyvom z povrchu.

Integrovaný environmentálny prístup ochrany jaskýň si vyžaduje detailnejšie poznať a rozpracovať problematiku posudzovania geoeologической stability jaskynných geosystémov, posúdiť stupeň ich zraniteľnosti vplyvom neprírodných, resp. nevhodných antropogénnych činností a schopnosti samoregulácie vplyvom ekostabilizujúcich faktorov daných vlastnosťami prírodného prostredia krajinných systémov.

#### Geoeologická stabilita krasových a jaskynných geosystémov

Geoeologická stabilita krasovej krajiny je vzhľadom na jej dosť kontrastnú priestorovú štruktúru pomerne premenlivá, čo závisí od stupňa skrasovatenia,

hustoty a veľkosti puklín, epikrasových dutín a ponorových kanálov na prúde-  
nie vody medzi povrchom a podzemím krasu (B.C. Ministry of Forests 2003).

Nevhodné antropogénne zásahy nielen poškodzujú prírodné komponenty  
jaskynného prostredia, ale aj akcelerujú alebo inak pozmeňujú prírodné procesy  
vedúce k narušeniu fungovania jaskynných geosystémov a ich geoekologickej  
stability. Na jaskyne vplývajú nielen antropogénne činnosti vykonávané priamo  
v jaskyni (priame, resp. interné antropogénne zásahy), ale v mnohých prípadoch  
aj nevhodné činnosti realizované v priľahlých aj vzdialenejších oblastiach  
(nepriame, resp. externé antropogénne zásahy), odkiaľ sa znečisťujúce látky  
dostávajú do krasu a jaskýň najmä prúdením vody alebo vzduchu (Jakál 1984,  
Kiernan 1989, Hardwick a Gunn 1993, James et al. 1998, Vesper et al. 2001,  
Jiménez-Sánchez et al. 2008 a iní). Návštevníci donášajú spóry, vlákny či iné  
cudzorodé látky, zväčša v podobe prachu, ktoré znečisťujúce a narušujú jaskyn-  
né prostredie (Jablonsky et al. 1995, Michie 1997 a Fernández-Cortes et al.  
2011). V mnohých jaskyniach sa priame antropogénne zásahy neprejavujú iba  
v mieste ich vzniku (primárny vplyv), ale v dôsledku priestorových vzťahov,  
najmä prúdenia vody podružne (sekundárne) narušujú aj priľahlé časti jaskýň  
(Bella 1992).

Hoci poznanie geoekologickej stability jaskýň je dôležité z hľadiska ich  
ochrany a racionálneho využívania, táto problematika nie je dostatočne rozpra-  
covaná, aby sa mohla vo väčšej miere využívať v environmentálnej praxi. Na  
základe stupňa skrasovatenia (súvisiaceho so stupňom priepustnosti hornín) a  
stupňa zraniteľnosti, resp. odolnosti jaskynných geosystémov voči negatívnym  
antropogénnym vplyvom sa rozlišujú: (1) veľmi nestabilné speleotopy s nepa-  
trnou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami (speleotopy s množstvom  
krehkej sintrovej výplne, fluviokrasové speleotopy s ponorným vodným tokom  
vo veľmi priepustných horninách v značne pokročilom až starobnom štádiu  
krasovatenia a pod.); (2) nestabilné speleotopy s nízkou zaťažiteľnosťou  
antropogénnymi aktivitami (napr. fluviokrasové speleotopy s ponorným vod-  
ným tokom v značne priepustných horninách v rozvinutom štádiu krasovatenia,  
speleotopy s intenzívnym priesakom atmosférických vôd a výraznou sintrovou  
výplňou); (3) mierne stabilné speleotopy s mierne zvýšenou zaťažiteľnosťou  
antropogénnymi aktivitami (napr. fluviokrasové speleotopy v menej priepust-  
ných horninách v počiatočnom až mierne rozvinutom štádiu krasovatenia,  
speleotopy s menej intenzívnym priesakom atmosférických vôd a menej počet-  
nou sintrovou výplňou); (4) stredne stabilné speleotopy so zvýšenou zaťažiteľ-  
nosťou antropogénnymi aktivitami (inaktívne fluviokrasové speleotopy a iné  
speleotopy bez priesaku alebo s obmedzeným priesakom atmosférických vôd,  
so sporadickou menej vzácnou sintrovou výplňou alebo bez sintrovej výplne);  
(5) relatívne stabilné speleotopy s vyššou zaťažiteľnosťou antropogénnymi  
aktivitami (speleotopy v málo rozpustných až nerozpustných horninách s nízkou  
priepustnosťou, bez vzácnejších výplní). Geoekologická stabilita speleochor sa  
analogicky posudzuje na základe geoekologickej stability speleotopov a ich  
zastúpenia v speleochore, geoekologická stabilita súborov speleochor na zákla-  
de geoekologickej stability speleochor (Bella 1999 a 2008). Kvantitatívnym  
spôsobom hodnotenia geoekologickej stability jaskyne pomocou faktorovej  
analýzy sa zaoberá Ratkovský (2009). Pravdepodobnosť narušenia jaskýň sa  
zvyšuje so stupňom narušenia, resp. ohrozenia krasových území neprimeranou

antropogénnou činnosťou, ako aj priľahlých území, z ktorých znečistené alochtónne vodné toky pritekajú do krasu.

#### Ekostabilizujúce faktory a samoregulácia jaskynných geosystémov

Na rozdiel od ireverzibilných zmien antropogénne spôsobené reverzibilné zmeny jaskynného geosystému za určitý čas pominú, samoreguláciou sa vracia do pôvodného stavu, napr. vyrovnávanie speleoklimatických zmien (zvýšenie teploty a obsahu CO<sub>2</sub>, zníženie relatívnej vlhkosti vzduchu) v dôsledku pohybu návštevníkov v sprístupnených jaskyniach. Na základe monitorovania týchto zmien sa reguluje a limituje návštevnosť sprístupnených jaskýň s cieľom dosiahnuť samoregulačné vyrovnávanie mikroklimatických zmien jaskynného ovzdušia spôsobených dýchaním návštevníkov a vyžarovaním tepla z elektrických reflektorov (pozri Cigna 1993, Mangin a D'Hulst 1995, Klaučo et al. 1998, Cigna a Burri 2000, Carrasco et al. 2002, Calaforra et al. 2003, Lobo 2008, de Freitas 2010 a iní). Limitovanie a určenie únosnej kapacity návštevnosti jaskýň je jedným z hlavných problémov týkajúcich sa geoeologickej únosnosti jaskynného prostredia.

Fyzikálne a chemické parametre jaskynného prostredia, ktoré sa viac či menej menia prevádzkovaním jaskyne (teplota a relatívna vlhkosť vzduchu, obsah CO<sub>2</sub> v jaskynnom ovzduší), v mnohých prípadoch vplývajú na tvorbu a stav sintrovej výplne. Zo speleoklimatologického hľadiska sa ekostabilizujúce faktory jaskynných geosystémov vzťahujú na veľkosť podzemných priestorov a mieru ich otvorenosti na povrch, na objem prúdiacej alebo stagnujúcej vody, ako aj na kvantitu a mieru vlhkosti jemných sedimentov stabilizujúcich mikroklimu (menšie speleoklimatické zmeny sa v jaskynnom prostredí, ktoré je „uzavreté“ voči povrchovým klimatickým vplyvom, v pomerne krátkom čase prirodzene kompenzujú a vyrovnávajú).

Vzhľadom na polohu jaskýň pod zemským povrchom viaceré ekostabilizujúce faktory sa prejavujú bariérovým efektom proti priamemu i sprostredkovanému pôsobeniu negatívnych antropogénnych zásahov z povrchu (v závislosti od rozmerov vchodov a vstupných častí jaskýň, stupňa priepustnosti horninového nadložia). Z hydrologického hľadiska sa ekostabilizujúce faktory jaskynných geosystémov vzťahujú na stupeň priepustnosti krasových hornín (v závislosti od miery ich rozpukania a vrstevnatosti, ako aj stupňa skrasovatenia), mieru pokrytosti krasu, charakter a režim hydrologických procesov (ponorné alebo priesakové vody, prúdiace alebo viac-menej stagnujúce vody) a na intenzitu filtrácie vody (ponory vyplnené priepustnými fluviálnymi sedimentmi).

Keďže jaskynné geosystémy majú silné vzťahy s povrchovou časťou krasovej krajiny, rozlišujú sa vnútorné (vnútrojaskynné) a vonkajšie (mimojaskynné) ekostabilizujúce faktory, ktoré eliminujú alebo redukovujú negatívne antropogénne vplyvy na jaskynné prostredie (tab. 1). Regeneráciu narušeného jaskynného prostredia podporujú, resp. urýchľujú najmä vnútorné ekostabilizujúce faktory, napr. krátkodobé znečistenie ponorných vôd sa upravuje zvýšeným prietokom a rýchlejšim prúdením nekontaminovanej vody po intenzívnych zrážkach a v čase topenia snehu. Na samoregulácii a udržiavaní prírodnej rovnováhy jaskynného prostredia, resp. eliminácii rušivých antropogénnych vplyvov sa podieľajú statické a dynamické ekostabilizujúce faktory. Dimenzia podzemného

priestoru, množstvo vodou nasiaknutých sedimentov i prechladené steny podzemných priestorov, ktoré patria medzi statické ekostabilizujúce faktory, eliminujú zvýšenie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v sprístupnenej jaskyni vplyvom návštevníkov. Z dynamických ekostabilizujúcich faktorov proti zvýšeniu teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu vplyvom návštevníkov pôsobí intenzívne prúdenie vzduchu, krátkodobé znečistenie ponorných vôd sa znižuje zvýšeným prietokom podzemného vodného toku.

**Tab. 1. Ekostabilizujúce faktory eliminujúce alebo redukujúce negatívne antropogénne vplyvy na jaskynné prostredie**

Ekostabilizujúce faktory		Eliminované / redukované negatívne antropogénne vplyvy
vnútorné ekostabilizujúce faktory	väčšia dimenzia podzemného priestoru s väčším objemom vzduchu	zvýšenie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu vplyvom návštevníkov
	intenzívnejšie prúdenie vzduchu v jaskyni	
	zvýšený objem vody v podzemnom priestore v podobe vodného toku, jazera, priesaku zrážkových vôd alebo zvlhčených sedimentov	
	intenzívnejšie prúdenie vzduchu v jaskyni	zvýšenie obsahu CO <sub>2</sub> vplyvom návštevníkov
	nižšia priepustnosť ponorových kanálov (nižší stupeň skrasovatenia)	znečistenie ponorných vôd, zväčša so splavovaním kontaminovaných pôdnych sedimentov
	vyplnenie ponorových kanálov fluviaálnymi sedimentmi s filtračnou schopnosťou	
	stekanie vodného filmu po stenách a sintrovej výplni	povlaky prachových častíc donášaných návštevníkmi do jaskyne
vonkajšie ekostabilizujúce faktory	zalesnenie povrchu nad jaskyňou	zrýchlený režim priesaku zrážkových vôd
	filtrácia zrážkových vôd presakujúcich cez pôdu a pokryvné sedimenty	znečistenie priesakových vôd
	nižšia priepustnosť hornín nad jaskynným stropom (nižší stupeň skrasovatenia), v kryptokrase hrúbka nadložných hornín nepodliehajúcich krasovateniu	
	zatravnenie a zalesnenie povrchu nad jaskyňou a oblastí odvodňovaných do jaskyne, iné manažmentové opatrenia na zníženie pôdnej erózie a spomalenie odtoku vody	splavovanie pôdnych sedimentov do jaskynných priestorov

## Hodnotenie zraniteľnosti krasu a jaskýň

Metodológie hodnotenia zraniteľnosti krasu (jaskyne sú súčasťou podzemnej drenážnej siete) sa rozpracovali najmä vo vzťahu k hodnoteniu spojitosti krasových hydrologických systémov na povrchu a v podzemí, miery priepustnosti a náchylnosti znečistenia krasových kolektorov podzemných vôd (Dörfliger et al. 1999, Daly et al. 2002, Vias et al. 2006 a iní).

V kanadskej Britskej Kolumbii (Stokes a Griffiths 2000, Stokes et al. 2001, B.C. Ministry of Forests 2003) nízku, strednú, vysokú a veľmi vysokú zraniteľnosť krasu kategorizujú na základe troch základných kritérií: (1) citlivosť, resp. náchylnosť poškodenia epikrasu s pôdnou pokrývkou; (2) citlivosť povrchových krasových javov; (3) prírodné a iné hodnoty podpovrchového krasu. Pritom sa zohľadňujú aj niektoré ďalšie faktory – textúra pôdy, celková morfológická členitosť krasu, pokrytosť územia vegetáciou a iné. Nízka zraniteľnosť sa vzťahuje na krasové územia s miernym sklonom povrchu terénu, hrubšou pôdnou pokrývkou, málo alebo mierne vyvinutým epikrasom a žiadnymi alebo izolovanými povrchovými krasovými javmi. Veľmi vysoká zraniteľnosť sa prisdzuje krasovým územia s dobre vyvinutým epikrasom, veľmi vysokou hustotou povrchových krasových javov, výskytom jaskýň a vysokou mierou prepojenia medzi povrchovou a podzemnou časťou krasovej krajiny. Ostatné kategórie majú prechodný charakter, navzájom sa odlišujú stupňom vývinu epikrasu, hrúbkou pôdnej pokrývky, hustotou povrchových krasových javov a mierou pravdepodobnosti výskytu jaskýň.

Prístupy hodnotenia zraniteľnosti samotných jaskýň sú ojedinelejšie, vzťahujú sa najmä na sprístupnené jaskyne. Z dôvodu značnej až takmer úplnej uzavretosti jaskýň voči povrchu krajiny energia dodatočne dodaná do jaskynného prostredia môže pomerne ľahko narušiť alebo zmeniť jeho prírodnú rovnováhu. Preto Cigna a Forti (1989), resp. Cigna a Burri (2000) posudzujú zraniteľnosť jaskýň v nadväznosti na základné triedenie jaskýň podľa množstva energie ich prírodného prostredia (pozri Heaton 1986). Sprístupnené jaskyne s vysokou energiou ich prostredia (jaskyne s veľkými vodnými tokmi, periodicky zaplavované jaskyne) majú veľmi nízku zraniteľnosť mikroklimatickými vplyvmi spôsobenými dýchaním návštevníkov a elektrickým osvetlením, avšak bývajú ohrozené vtekaním znečistených vôd z povrchu. Zraniteľnosť jaskýň s miernou energiou prírodného prostredia (jaskyne s tečúcou vodou, trvalým prievanom a pod.) je nízka za podmienky, že sa sprístupnia a prevádzkujú podľa určeného režimu a kapacity ich návštevnosti (antropogénne vplyvy nespôsobujú permanentnú zmenu relevantných environmentálnych parametrov a nepresahujú rámec samoregulácie prírodnej rovnováhy jaskynných geosystémov). V jaskyniach s nízkou energiou prírodného prostredia, ktoré majú veľmi vysokú zraniteľnosť, speleoklimatické zmeny narušujúce prírodnú rovnováhu jaskynných geosystémov môžu nastať aj pri malom počte návštevníkov. Na udržanie prírodnej rovnováhy jaskynných geosystémov majú významný vplyv najmä podzemné vodné toky a jazerá, pretože môžu absorbovať akúkoľvek vstupujúcu energiu oveľa ľahšie ako okolité horniny (Cigna 2004).

Pri hodnotení miery zraniteľnosti, resp. odolnosti jaskynných geosystémov sa posudzujú prírodné hodnoty jaskýň a miera ich ohrozenia, vnútorné ekostabilizujúce faktory jaskynného prostredia, miera prepojenia jaskýň a povrchu

vých krasových javov, ako aj citlivosť, resp. náchylnosť poškodenia a znečistenia epikrasu, pôdnej pokrývky i vôd presakujúcich a ponárajúcich sa do jaskýň.

#### Indikátory zraniteľnosti jaskynného prostredia

*Indikátory vzťahujúce sa na interiér jaskyne a materské horniny:* stupeň skrasovatenia a priepustnosti hornín (v juvenilnom, zrelom, starobnom až senilnom štádiu vývoja krasu); pôvod, režim a rýchlosť prúdenia podzemného vodného toku; režim a intenzita priesaku zrážkových vôd; miera filtrácie vôd prenikajúcich do jaskyne; rozsah vodných plôch a zmeny ich hladiny; miera výskytu a typy sintrovej výplne, jej krehkosť; rozsah a druh podlahových klastických sedimentov; množstvo a miera vlhkosti, resp. zvodnenia fluviaálnych a iných sedimentov; klimatický režim jaskyne vo vzťahu k vyrovnávaní mikroklimatických zmien vplyvom návštevnosti; miera otvorenosti jaskyne na povrch z hľadiska stabilizácie jej mikroklímy; rozsah zaľadnenia a množstvo ľadovej výplne; počet druhov a početnosť jaskynnej fauny, najmä vzácnych druhov; rozsah biotopov jaskynnej fauny; rozsah výskytu a vzácnosť paleontologických a archeologických nálezov; potenciálne možnosti a rozsah akumulácie kontaminovaných látok; predpokladaná miera absorpcie a odnosu kontaminovaných látok.

*Indikátory vzťahujúce sa na vonkajšie okolie jaskyne:* miera zalesnenia územia nad jaskyňou, resp. územia odvodňovaného do jaskyne; miera erózie pôdy v území odvodňovanom do jaskyne; rýchlosť priesaku a odtoku povrchových vôd do podzemia; miera pokrytia krasu menej priepustnými až nepriepustnými horninami.

Keďže podzemné vody patria medzi vedúce a najdynamickejšie komponenty krasovej krajiny a jaskýň (Jakál 1986), na hodnotenie zraniteľnosti jaskynného prostredia možno metodicky aplikovať index zraniteľnosti vodných zdrojov (Alessa et al. 2008). Jednotlivým indikátorom, vybraným vo vzťahu k jaskynnému prostrediu, sa priradujú stupne zraniteľnosti a odolnosti – vysoko zraniteľný, stredne zraniteľný, prechodný, stredne odolný a vysoko odolný (tab. 2). Tie prislúchajú kategóriám, ktoré kvantitatívne vymedzujú hraničné hodnoty posudzovaných indikátorov: stupeň priepustnosti hornín (0 – zvoďeň s početnými drenážnymi trubicami a rýchlym prúdením vody vo vadóznej a epifreatickej zóne; 0,25 – zvoďeň s drenážnymi trubicami s pomalým prúdením vody vo freatickej zóne; 0,50 – zvoďeň s vysokou hustotou korózne rozšírených puklín; 0,75 – zvoďeň so strednou hustotou korózne rozšírených puklín; 1 – zvoďeň s nízkou hustotou až absenciou puklín a intergranulárnych dutín), pôvod a režim vodného toku (0 – alochtónny trvalý vodný tok; 0,25 – alochtónny občasný vodný tok; 0,50 – autochtónny trvalý vodný tok; 0,75 – autochtónny občasný vodný tok; 1 – veľmi sporadický autochtónny vodný tok až absencia vodného toku), režim a intenzita priesaku zrážkových vôd (0 – trvalý sústredený priesak; 0,25 – trvalý rozptýlený priesak; 0,50 – občasný sústredený priesak; 0,75 – občasný rozptýlený priesak; 1 – veľmi sporadický rozptýlený priesak až absencia priesaku), miera výskytu sintrovej výplne (0 – 100 až 51 %; 0,25 – 50 až 26 %; 0,50 – 25 až 11 %; 0,75 – 10 až 1 %; 1 – bez výskytu), klimatický režim jaskyne vo vzťahu k vyrovnávaní mikroklimatických zmien vplyvom návštevnosti (0 – úplne statický; 0,25 – čiastočne statický; 0,50 – staticko-

dynamický; 0,75 – dynamický; 1 – veľmi dynamický), miera zalesnenia územia odvodňovaného do jaskyne (0 – 0 až 10 %; 0,25 – 11 až 30 %; 0,50 – 31 až 60 %; 0,75 – 61 až 90 %; 1 – 91 až 100 %), miera pokrytia krasu menej priepustnými až nepriepustnými horninami (0 – holý kras; 0,25 – kras čiastočne pokrytý priepustnými sedimentmi; 0,50 – kras pokrytý menej priepustnými sedimentmi; 0,75 – neúplne izolovaný kryptokras; 1 – izolovaný kryptokras) a pod.

**Tab. 2. Stupne zraniteľnosti/odolnosti jaskynného prostredia (podľa hodnotiacej stupnice indexu zraniteľnosti vodných zdrojov, Alessa et al. 2008)**

Hodnota indexu	Stupeň zraniteľnosti / odolnosti jaskynného prostredia
0,00	vysoko zraniteľný
0,25	stredne zraniteľný
0,50	prah / prechodný
0,75	stredne odolný
1,00	vysoko odolný

Vzhľadom na dosť nerovnorodý charakter prírodných pomerov podzemných priestorov, ktoré predstavujú geoeologicky odlišné časti jaskýň, treba uvedené indikátory zraniteľnosti/odolnosti posudzovať vo vzťahu k priestorovej štruktúre jaskynných geosystémov (Bella 1998 a 2008). Jaskyňu  $J_k$  tvoria speleotopy  $j_i$  – základné kvázihomogénne geoeologické jednotky jaskynného prostredia s prakticky rovnakými geologickými, geomorfologickými, speleoklimatickými, hydrologickými a biospeleologickými pomermi:

$$J_k = [j_i]_{i=1}^n.$$

Index zraniteľnosti/odolnosti príslušného speleotopu sa vypočíta podľa vzorca:

$$IVR_i = \frac{\sum_{u=1}^p S_u + \sum_{v=1}^q S_v}{2},$$

kde  $IVR_i$  je index zraniteľnosti/odolnosti speleotopu  $i$ ;  $S_u$ ,  $p$  sú indikátory vzťahujúce sa na podzemné dutiny a materské horniny:  $S_u$  je hodnota indikátora  $u$  pre speleotop  $i$ ,  $p$  je počet hodnotených indikátorov  $u$  v speleotope  $i$ ;  $S_v$ ,  $q$  indikátory vzťahujúce sa na vonkajšie okolie jaskyne:  $S_v$  je hodnota indikátora  $v$  pre speleotop  $i$  a  $q$  je počet hodnotených indikátorov  $v$  v speleotope  $i$ .

Na základe vypočítanej hodnoty indexu sa speleotopu priradí stupeň jeho zraniteľnosti/odolnosti (tab. 2). Index zraniteľnosti/odolnosti pre celú jaskyňu sa na základe indexov jednotlivých speleotopov a miery ich zastúpenia v rámci jaskyne vypočíta podľa vzorca:



$$IVR_k = \frac{\sum_{i=1}^n IVR_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} = \frac{\sum_{i=1}^n IVR_i \cdot L_i}{L_k},$$

kde  $IVR_k$  je index zraniteľnosti/odolnosti jaskyne,  $IVR_i$  je hodnota indexu zraniteľnosti/odolnosti speleotopu  $i$ ,  $L_i$  je dĺžka speleotopu  $i$  a  $L_k$  je celková dĺžka jaskyne.

V rámci jaskyne možno podľa prislúchajúcich speleotopov vypočítať index zraniteľnosti/odolnosti jednotlivých speleochor i súborov speleochor. Speleochory tvoria príbuzné susediace speleotopy, ktoré sú prepojené súčasnými alebo bývalými horizontálnymi vzťahmi (najmä prúdením vody, transportom sedimentov či prúdením vzduchu). Rozsiahlejšie jaskyne sa skladajú zo súboru viacerých speleochor.

#### Vzťah geoeologickej stability a zraniteľnosti jaskynných geosystémov

Kategórie geoeologickej stability jaskynných geosystémov (Bella 1999 a 2008) úzko súvisia so stupňom ich zraniteľnosti, resp. odolnosti hodnotenou na základe aplikácie metodického prístupu Alessa et al. (2008). Veľmi nestabilným speleotopom s nepatrnou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami prislúcha vysoký stupeň zraniteľnosti. Nestabilné speleotopy s nízkou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami sú stredne zraniteľné. Mierne stabilné speleotopy s mierne zvýšenou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami tvoria „prechodnú“ triedu medzi stredne zraniteľnými a stredne odolnými jednotkami jaskynného prostredia. Stredne stabilné speleotopy so zvýšenou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami sú stredne odolné. Relatívne stabilným speleotopom s vyššou zaťažiteľnosťou antropogénnymi aktivitami prislúcha vysoký stupeň odolnosti. Analogicky možno stupne zraniteľnosti, resp. odolnosti priradiť veľmi nestabilným, nestabilným, mierne stabilným, stredne stabilným a relatívne stabilným speleochorám i súborom speleochor.

Keďže jaskyne sú integrálnou súčasťou krajinných systémov, evidentné sú aj súvislosti medzi kategóriami geoeologickej stability jaskynných geosystémov a kategóriami zraniteľnosti krasových území (napr. Stokes et al. 2001, B.C. Ministry of Forests 2003), v ktorých sa jaskyne nachádzajú. Veľmi nestabilné speleotopy a speleochory sa vyskytujú najmä v krase s veľmi vysokou zraniteľnosťou, nestabilné speleotopy a speleochory v krase s vysokou zraniteľnosťou, mierne stabilné speleotopy a speleochory v krase so strednou zraniteľnosťou, stredne stabilné speleotopy a speleochory v krase s nízkou zraniteľnosťou, relatívne stabilné speleotopy a speleochory najmä v krase s veľmi nízkou zraniteľnosťou a územiach budovaných horninami nepodliehajúcimi krasovateniu.

#### ANTROPOGÉNNE NARUŠENIE JASKYNNÉHO PROSTREDIA

Sprístupňovanie, prevádzka a iné využívanie jaskýň, ako aj nevhodná poľnohospodárska, lesohospodárska či iné antropogénne činnosti v územiach odvodňovaných do jaskýň spôsobujú negatívne zásahy a vplyvy na jaskynné pro-

stredie (v našej literatúre pozri Jakál 1979 a 1984, Gaál 1988 a 1997, Hochmuth 1990, Bella 1992 a iní). Podľa charakteru zmeny prírodného prostredia dochádza k termickému, vizuálnemu, chemickému alebo biologickému narušeniu, resp. znečisteniu jaskýň (Cigna a Forti 1989, Marra 2001 a iní).

### Geoekologická klasifikácia negatívnych antropogénnych zásahov

Z geoekologického hľadiska sa podľa rozsahu a charakteru vplyvu antropogénnych zásahov na jaskynné geosystémy rozlišujú (Bella 2005 a 2008):

1. negatívne antropogénne zásahy spôsobujúce narušenie alebo deštrukciu prírodných komponentov, avšak viac-menej neovplyvňujúce fungovanie jaskynných geosystémov (napr. odlomenie alebo iné mechanické poškodenie sintrovej výplne, znečistenie jaskynného prostredia odpadkami bez šírenia kontaminácie),

2. negatívne antropogénne zásahy vplývajúce na fungovanie jaskynných geosystémov, ktoré spôsobujú:

a) zvrtné (reverzibilné) antropogénne zmeny fungovania jaskynných geosystémov kompenzujúce a vyrovnávajúce sa samoregulačnými väzbami, ktoré sú limitované prahovými hodnotami zaťažiteľnosti (napr. mikroklimatické zmeny spôsobené návštevnosťou a ich vyrovnávanie v čase medzi jednotlivými vstupmi návštevníkov),

b) nezvrtné (ireverzibilné) antropogénne zmeny fungovania jaskynných geosystémov s potrebou regulačných opatrení ako dôsledok nadmerných antropogénnych vplyvov, ktoré sa dostatočne nekompenzujú a nevyrovnávajú samoreguláciou geosystému a postupne vedú k trvalej zmene vlastností niektorých abiotických alebo biotických komponentov a jeho fungovania (nadmerná návštevnosť a elektrické osvetlenie sprístupnených jaskýň spôsobujúce kumulované speleoklimatické zmeny narušujúce tvorbu a podporujúce zvetrávanie sintrovej výplne, rast lampovej flóry pri reflektoroch, narušenie a poškodenie biotopov akvatickej fauny, technogénne spôsobená chemická deštrukcia sintrovej výplne, antropogénne zrýchlené splavovanie pôdných a iných sedimentov do jaskýň následkom odlesnenia okolitých území),

c) antropogénne zmeny etocyklov jaskynných geosystémov následkom neprimeraných a nevhodných antropogénnych zásahov do prirodzeného chodu, resp. ročných sezónnych zmien klimatických procesov v jaskyniach alebo hydrologických procesov v jaskyniach a ich povodiach (napr. zmeny sezónneho prúdenia vzduchu medzi povrchom a jaskynnými priestormi otváraním alebo uzatváraním vchodov alebo prepojovacích chodieb, antropogénne zmeny prirodzeného režimu priesaku, prítoku a odtoku vody z jaskynných priestorov spôsobené odlesnením či nevhodným poľnohospodárskym využívaním oblastí odvodňovaných do jaskýň alebo nevhodným sprístupňovaním jaskýň),

3. negatívne antropogénne zásahy spôsobujúce zmenu sukcesívnej dynamiky (formujúcej sa dynamickej rovnováhy, resp. klimaxu) jaskynných geosystémov s ich následnými invariantnými zmenami (napr. zmena cirkulácie vzduchu v zaľadnených jaskyniach po otvorení nových vchodov alebo spojovacích sifónov medzi zaľadnenými a nezaľadnenými časťami jaskýň spôsobujúca ubúdanie až úplné roztopenie ľadovej výplne),

4. negatívne antropogénne zásahy spôsobujúce zmenu priestorovej štruktúry alebo zánik jaskynných geosystémov následkom stavebnej činnosti, ťažby nerastných surovín, vodohospodárskych úprav alebo sprístupňovania jaskýň (dlhodobé až trvalé zaplavenie jaskyne následkom vybudovania vodnej nádrže, trvalé odvodnenie freatickej jaskyne v dôsledku vyrazenia tunelov alebo zahĺbenia povrchových lomov, zasypanie priepastí pri stavbách alebo ťažbe nerastných surovín, planácia podláh a ich pokrytie betónom pri sprístupňovaní jaskýň, vytvorenie vodných nádrží na plavbu pre návštevníkov, zánik jaskýň alebo ich častí pri ťažbe nerastných surovín, budovaní dopravných komunikácií a pod.).

#### Hodnotenie antropogénneho narušenia jaskýň

Miera antropogénneho narušenia jaskýň je rôzna, od nepatrných a väčších zmien vlastností jednotlivých prírodných zložiek a procesov až po úplný zánik podzemných priestorov. Mapovaním a kvantitatívnym hodnotením miery poškodenia jaskynného prostredia činnosťou človeka sa zaoberali Seabrook (1972), Bodenhamer (1996) a najmä Bunting a Balks (2001), ktorí rozpracovali metódu CIARS (Cave Impact Assessment Rating System) založenú na vizualizácii a kvantifikácii fyzikálnych vplyvov na jaskynné prostredie. Jednotlivým sektorom jaskyne priradili podľa miery negatívneho zásahu (vyjadrenej zväčša percentuálnym rozsahom z celkovej plochy posudzovaného sektora) hodnoty 0 až 3 (0 – neviditeľný, 1 – minimálny, 2 – mierny, 3 – závažný až kritický). Celkový ukazovateľ miery poškodenia sektora udáva pomer medzi celkovým súčtom priradených hodnôt a celkovým počtom relevantných kritérií. Na základe hodnôt tohto ukazovateľa sa každému sektoru jaskyne priradí kategória miery negatívneho antropogénneho vplyvu: nijaký viditeľný vplyv (hodnota 0), minimálne narušenie (hodnoty 0,01 až 1,39), mierne narušenie (hodnoty 1,40 až 1,94) alebo závažné až kritické narušenie (hodnoty 1,95 až 3).

Na exaktné posudzovanie a hodnotenie miery narušenia jaskýň, resp. ich častí možno ďalej využiť *Karst Disturbance Index – KDI* (van Beynen a Towshend 2005), na základe ktorého sa hodnotí celková miera narušenia krasových oblastí vrátane jaskýň (Calò a Parise 2006, van Beynen et al. 2007, de Waele 2009 a North et al. 2009). Vo vzťahu k jaskyniam sa ako indikátory narušenia ich prírodného prostredia uvádzajú antropogénne zapríčinené záplavy, poškodenie sintrovej výplne, premiestnenie sedimentov, pozmenenie jaskynných podláh, antropogénne spôsobená kondenzačná korózia, znečistenie podzemných vôd, antropogénne zmeny hladiny podzemných vôd, obmedzenie až zastavenie priesaku zrážkových vôd, úbytok početnosti druhov a populácie jaskynnej fauny, technogénne narušenie jaskyne jej sprístupňovaním (van Beynen a Towshend 2005), ako aj frekventovanosť nekontrolovaných návštev poškodzujúcich jaskyne či mechanické znečisťovanie jaskynného prostredia (de Waele 2009). Pri aplikácii tohto indexu výlučne na jaskyne treba doplniť ďalšie zodpovedajúce indikátory.

*Indikátory narušenia jaskynného prostredia:* mechanické poškodenie sintrovej výplne odlomením, ryhovaním, znečistením a pod.; narušenie klastických podlahových sedimentov pošliapaním, výkopmi alebo násypmi; záseky do materskej horniny; zasypávanie jaskynných priestorov; znečistenie jaskynného prostredia odpadovým materiálom; narušenie intenzity priesaku a znečistenie

presakujúcich zrážkových vôd; zmena množstva a znečistenie ponorných vôd; zmena hydrologických procesov v jaskynnom riečisku; antropogénna zmena hladiny podzemných vôd; antropogénne spôsobené odvodnenie alebo zaplavenie (zaplavovanie) jaskyne alebo jej časti; zrýchlené splavovanie pôdnych sedimentov do jaskyne; pozmenenie prirodzeného prúdenia vzduchu v jaskyni; antropogénne spôsobený úbytok ľadovej výplne; zrýchlenie mrazového zvetrávania; antropogénne speleoklimatické zmeny spôsobené nadmernou návštevnosťou jaskyne; antropogénne spôsobená alebo zrýchlená chemická deštrukcia sintrovej výplne; intenzita elektrického osvetlenia a rast lampovej flóry; znečistenie jaskynného ovzdušia; narušenie biotopov jaskynnej fauny; úbytok početnosti druhov a populácie jaskynnej fauny; spôsob konštrukcie a údržby prehliadkového chodníka; záber prehliadkového chodníka z podlahovej plochy jaskyne; rozsah ďalších technogénnych objektov a zariadení v jaskyni (napr. upravené vodné nádrže na plavbu).

*Hodnotenie (bodovanie) indikátorov je vyjadrené nasledovne:* 0 – žiadny alebo minimálny negatívny vplyv, 1 – málo narušujúci vplyv, 2 – viac narušujúci a rozšírený vplyv, 3 – kriticky narušujúci vplyv.

Ak mieru narušenia jaskynného prostredia podľa jednotlivých indikátorov možno kvantifikovať, uvedenému bodovému hodnoteniu prislúchajú kategórie vymedzené ich hraničnými hodnotami: rozsah poškodenia sintrovej výplne (0 – 0 až 2 %, 1 – 3 až 10 %, 2 – 11 až 25 %, 3 – viac ako 25 %), rozsah narušenia klastických podlahových sedimentov (0 – 0 až 10 %, 1 – 11 až 25 %, 2 – 26 až 50 %, 3 – viac ako 50 %), miera znečistenia priesakových a ponorných vôd (0 – veľmi čistá a čistá voda, 1 – znečistená voda, 2 – silne znečistená voda, 3 – veľmi silne znečistená voda; pozri SÚTN (1999) aplikujúc aj na vody prúdiace v jaskyniach, resp. vody prenikajúce z povrchu do jaskýň), zmena množstva ponárajúcich sa vôd (0 – nezmenený alebo nepatrne znížený prietok vodného toku vtekajúceho do ponoru, 1 – odvedenie menej ako polovice prietoku mimo ponoru, 2 – odvedenie nadpolovičného prietoku mimo ponoru, 3 – odvedenie celého vodného toku mimo ponoru), zmena hydrologických procesov v jaskynnom riečisku (0 – nenarušené riečisko, 1 – čiastočne upravená podlaha a brehy riečiska so zrýchlením odtoku vody, 2 – čiastočné prehradenie riečiska spomaľujúce odtok vody alebo čiastočné zníženie prirodzenej hrádze jazera s miernym poklesom vody, 3 – úplné prehradenie riečiska hrádzou alebo prekopanie prirodzenej hrádze jazera s jeho takmer úplným až úplným odvodnením), pozmenenie prirodzeného prúdenia vzduchu v jaskyni (0 – nenarušené prúdenie, 1 – krátkodobé prúdenie vzduchu spôsobené pohybujúcimi sa návštevníkmi, 2 – trvalé narušenie prúdenia vzduchu zväčšením jaskynného otvoru na povrch alebo občasná technogénna ventilácia jaskynného ovzdušia, 3 – výrazné narušenie prúdenia vzduchu prekopaním nového otvoru na povrch alebo sedimentmi zaneseného sifónu s následnou zmenou prúdenia vzduchu) a pod.

Index narušenia príslušného speleotopu sa vypočíta podľa vzorca:

$$KDI_i = \frac{\sum_{j=1}^n s_j}{(H_{\max})_i} = \frac{\sum_{j=1}^n s_j}{n \cdot 3},$$

kde  $KDI_i$  je index narušenia speleotopu  $i$ ,  $S_j$  je hodnota indikátora  $j$  pre speleotop  $i$ ,  $(H_{max})_i$  je suma maximálnych hodnôt všetkých indikátorov v speleotope  $i$  a  $n$  je počet hodnotených indikátorov v speleotope  $i$ .

Vypočítanej hodnote indexu narušenia prislúcha stupeň narušenia jaskynného prostredia, ktorý sa analogicky vzťahuje na stupne narušenia krasu odlišné hodnotami *Karst Disturbance Index* (tab. 3). Podľa zastúpenia prislúchajúcich speleotopov možno vypočítať index narušenia speleochoch, resp. súborov speleochoch. Index narušenia pre celú jaskyňu sa na základe indexov narušenia jednotlivých speleotopov a miery ich zastúpenia vypočíta podľa vzorca:

$$KDI_k = \frac{\sum_{i=1}^n KDI_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} = \frac{\sum_{i=1}^n KDI_i \cdot L_i}{L_k}$$

kde  $KDI_k$  je index narušenia jaskyne,  $KDI_i$  je hodnota indexu narušenia speleotopu  $i$ ,  $L_i$  je dĺžka speleotopu  $i$  a  $L_k$  je celková dĺžka jaskyne.

**Tab. 3. Stupne narušenia krasu (van Beynen a Townshend 2005, van Beynen et al. 2007)**

Hodnota indexu KDI	Stupeň narušenia krasu
0,8 – 1,00	kriticky narušený
0,6 – 0,79	vysoko narušený
0,4 – 0,59	stredne narušený
0,2 – 0,39	málo narušený
0,0 – 0,19	nenarušený až minimálne narušený (pôvodný až takmer pôvodný)

## ZÁVER

Geoeologický výskum je dôležitým až nevyhnutným predpokladom integrovaného prístupu aj pri riešení environmentálnych problémov využívania a ochrany jaskýň. Predložené kvantitatívne hodnotenia miery zraniteľnosti a narušenia jaskynného prostredia, ktoré sa vzťahujú na jednotky priestorovej štruktúry jaskýň, umožňujú objektívnejšie geoeologicky posudzovať a klasifikovať jaskyne a ich časti vo vzťahu k plánovaným i realizovaným antropogénnym činnostiam. Na geoeologickú stabilitu jaskýň vplyvajú vnútorné a vonkajšie ekostabilizujúce faktory, ktorých vplyv sa mení v závislosti od polohy a fyzicogeografických pomerov krasového územia, miery jeho pokrytosti a stupňa skrasovatenia, hydrografickej pozície jaskynných priestorov, vlastností prírodných komponentov, ako aj charakteru a režimu prírodných procesov v jaskyniach. S cieľom objektivizácie podkladov na výpočet indexov zraniteľnosti a narušenia jaskynného prostredia treba na základe interdisciplinárnej spolupráce vo väčšej miere rozpracovať kvantitatívne hodnotenie príslušných indikátorov.

*Príspevok vznikol v rámci riešenia vedeckého grantového projektu VEGA č. 1/0468/09 „Diverzita, variabilita a geoeologická stabilita jaskynných geosystémov“.*

## LITERATÚRA

- ALESSA, L., KLISKEY, A., LAMMERS, R., ARP, CH., WHITE, D., BUSEY, R., HINZMAN, L., BUSEY, R. (2008). The Arctic water resources vulnerability index: an integrated assessment tool for community resilience and vulnerability with respect to freshwater. *Environmental Management*, 42, 523-541.
- B.C. (2003). *Karst Inventory Standards and Vulnerability Assessment Procedures for British Columbia*. Victoria (Ministry of Forests).
- BELLA, P. (1992). Klasifikácia negatívnych antropogénnych zásahov v krasovej krajine na Slovensku. *Slovenský kras*, 30, 57-73.
- BELLA, P. (1998). Priestorová a chronologická štruktúra jaskynných geosystémov. Základné teoreticko-metodologické aspekty. *Slovenský kras*, 36, 7-34.
- BELLA, P. (1999). Topické a chorické jaskynné geosystémy, ich časovo-priestorové zmeny, stabilita a ochrana. In Minár, J., Trizna, M., eds. *Teoreticko-metodologické problémy geografie, príbuzných disciplín a ich aplikácie: Zborník referátov z medzinárodnej konferencie, Bratislava 2.-3.6.1999*. Bratislava (UK), pp. 75-84.
- BELLA, P. (2005). Antropogénne vplyvy na fungovanie a invariantné zmeny jaskynných geosystémov. In Hochmuth, Z., Tomášiková, V., eds. *Zmeny v štruktúre krajiny ako reflexia súčasných spoločenských zmien v strednej a východnej Európe: Zborník referátov z III. medzinárodného geografického kolokvia, Danišovec 10.-11.11.2005*. Košice (Ústav geografie Prírodovedeckej fakulty UPJŠ), pp. 15-22.
- BELLA, P. (2008). *Jaskyne ako prírodné geosystémy – geoeologický výskum a environmentálna ochrana*. Liptovský Mikuláš (ŠOP SR, SSJ), Žilina (Knižné centrum).
- BODENHAMER, H. G. (1996). Monitoring human caused changes with visitor impact mapping. In Rea, G. T., ed. *Proceedings of the 1995 National Cave Management Symposium, Spring Mill State Park, Mitchell, Indiana, October 25-28, 1995*. Indianapolis (Indiana Karst Conservancy, Inc.), pp. 28-37.
- BUNTING, B. W., BALKS, M. R. (2001). A quantitative method for assessing the impacts of recreational cave use on the physical environment of wild caves. *ACKMA Journal*, 44, 10-18.
- CALAFORRA, J. M., FERNÁNDEZ-CORTÉS, A., SÁNCHEZ-MARTOS, F., GIBERT, J., PULIDO-BOSCH, A. (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30, 160-167.
- CARRASCO, F., VADILLO, I., LINÁN, C., ANDREO, B., DURÁN, J. J. (2002). Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja Cave (Malaga, Spain). *Acta Carsologica*, 31, 105-122.
- CIGNA, A. A. (1993). Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento. *Environmental Geology*, 21, 173-180.
- CIGNA, A. A. (2004). Vulnerability of the cave environment. In Zupan Hajna, N., ed. *Use of modern technologies in the development of caves for tourism: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International ISCA Congress, Postojna, October 21-27, 2002*. Postojna (Postojnska jama), pp. 185-191.
- CIGNA, A. A., BURRI, E. (2000). Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology*, 29, 1-27.
- CIGNA, A. A., FORTI, P. (1989). The environmental impact assessment of a tourist cave. In Kranjc, A., ed., *Cave tourism: Proceedings of International Symposium at the 170<sup>th</sup> anniversary of Postojna Cave, Postojna, November 10-12, 1988*. Postojna (Postojnska jama), pp. 29-38.

- CALÒ, F., PARISE, M. (2006). Evaluating the human disturbance to karst environments in southern Italy. *Acta Carsologica*, 35, 47-56.
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., POPESCU, I. C., ZWHALEN, F. (2002). Main concepts of the European approach to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10, 340-345.
- De FREITAS, C. R. (2010). The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica*, 39, 477-489.
- De WAELE, J. (2009). Evaluating disturbance on mediterranean karst areas: the example of Sardinia (Italy). *Environmental Geology*, 58, 239-255.
- DÖRFLIGER, N., JEANNIN, P.-Y., ZWHALEN, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39, 165-176.
- FERNÁNDEZ-CORTES, A., CUEZVA, S., SERGIO SANCHEZ-MORAL, S., CAÑAVERAS, J. C., PORCA, E., JURADO, V., MARTIN-S ANCHEZ, P. M., SAIZ-JIMENEZ, C. (2011). Detection of human-induced environmental disturbances in a show cave. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 1037-1045.
- GAÁL, L. (1988). Jaskyne – ľahko zraniteľné články krasového geosystému. *Pamiatky – Príroda*, 19(4), 38-40.
- GAÁL, L. (1997). *Ochrana jaskýň. Metodické listy*, 10. Banská Bystrica (SAŽP).
- GAMBLE, F. M. (1981). Disturbance of underground wilderness in karst caves. *International Journal of Environmental Studies*, 18, 33-39.
- GERGEDAVA, B. A. (1983). *Podzemnye landšafy*. Tbilisi (Mecniereba).
- HARDWICK, P., GUNN, J. (1993). The impact of agriculture on limestone caves. In Williams, P. W., ed. *Karst terrains, environmental changes and human impact. Catena Supplement*, 25, 235-249.
- HEATON, T. (1986). Caves. A tremendous range in energy environments on Earth. *The National Speleological Society News*, 44, 301-304.
- HOCHMUTH, Z. (1990). The contribution to the topic of the conservation of the Demänová Valley endokarst forms. *Studia Carsologica*, 3, 43-49.
- JABLONSKY, P., KRAEMER, S., YET, B. (1995). Lint in caves. In Pate, D. L., ed. *Proceedings of the 1993 National Cave Management Symposium, Carlsbad, New Mexico, October 27-30, 1993*. Huntsville (National Cave Management Symposium Steering Committee), pp. 73-81.
- JAKÁL, J. (1979). Príspevok k problematike ochrany krasovej krajiny a jaskýň. *Slovenský kras*, 17, 3-22.
- JAKÁL, J. (1984). Problémy ochrany krasových oblastí Slovenska. *Životné prostredie*, 18, 10-13.
- JAKÁL, J. (1986). Krasová krajina ako špecifický prírodný geosystém. *Slovenský kras*, 24, 3-26.
- JAKÁL, J. (1995). Caves of contact karst and their protection. In Bella, P., ed. *Caves and Man: Proceedings of International Symposium, Demänovská Dolina, 4-8 October 1994*. Liptovský Mikuláš (SMOPaJ), pp. 78-80.
- JAKÁL, J. (2000). Zafaženie krasovej krajiny antropickými aktivitami. In Bella, P., ed. *Výskum, využívanie a ochrana jaskýň: Zborník referátov z 2. vedeckej konferencie, Demänovská Dolina 16.-19. 11. 1999*. Liptovský Mikuláš (Správa slovenských jaskýň), pp. 140-145.
- JAKÁL, J. (2002). Krasová krajina, jej vlastnosti a odolnosť voči antropickým vplyvom. *Geografický časopis*, 54, 381-392.
- JAMES, J., ANTILL, S. J., COOPER, A., STONE, D. J. M. (1998). Effect of automobile emissions on the Jenolan Caves. *Acta Carsologica*, 27, 119-132.

- JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M., STOLL, H., VADILLO, I., LÓPEZ-CHICANO, M., DOMÍNGUEZ-CUESTA, M., MARTÍN-ROSALES, W., MELÉNDEZ-ASENSIO, M. (2008). Groundwater contamination in caves: four case studies in Spain. *International Journal of Speleology*, 37, 53-66.
- KIERNAN, K. (1989). Karst management issues at the Jenolan tourist resort, NSW, Australia. In Gillieson, D., Smith, D. I., eds. *Resource management in Limestone Landscape: International Perspectives. Proceedings of the International Geographical Union Study Group Man's Impact on Karst, Sydney, 15-21 August 1988*. Special Publication, 2. Canberra (ADFA), pp. 111-131.
- KLAUČO, S., FILOVÁ, J., ZELINKA, J. (1998). Vplyv návštevnosti na speleoklímu Ochtinskej aragonitovej jaskyne. In Bella, P., ed. *Výskum, využívanie a ochrana jaskýň: Zborník referátov z vedeckej konferencie, Mlynky 8.-10.10.1997*. Liptovský Mikuláš (Správa slovenských jaskýň), pp. 75-86.
- LOBO, H. A. S. (2008). Real carrying capacity (CCR) of Santana cave, Petar – SP, with indications for his tourist management. *Geosciencias*, 27, 369-385.
- MANGIN, A., D'HULST, D. (1995). Frequentation des grottes touristiques et conservation. Methode d'approche pour en etudier les effects et proposer une regl ementation. In Cigna, A., ed. *Show Caves and Environmental Monitoring: International Symposium, Frabosa Soprana (Cuneo) 24-26/III/1995*, pp. 117-145.
- MARRA, R. J. C. (2001). *Espeleo turismo: Planejamento e Manejo de Cavernas.*, Brasília (GD Ambiental).
- MICHIE, N. (1997). The threat to caves of the human dust sources. In Jeannin, P. Y., ed. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology, La Chaux-de-Fonds (Switzerland), August 10-17, 1997*. Basel (Speleo Projects), pp. 43-46.
- NORTH, L. A., van BEYNEN, P. E., PARISE, M. (2009). Interregional comparison of karst disturbance: West-central Florida and southeast Italy. *Journal of Environmental Management*, 90, 1770-1781.
- PARISE, M., PASCALI, V. (2003). Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). *Environmental Geology*, 44, 247-256.
- PŘIBYL, J. (1992). Krasová krajina. In Přibyl, J., Ložek, V., Kučera, B., et al., eds. *Základy karsologie a speleologie*. Praha (Academia), pp. 203-224.
- RATKOVSKÝ, Š. (2009). Hodnotenie geoekologickej stability Brestovskej jaskyne. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 53, 61-73.
- SEABROOK, J. (1972). A quantitative approach to cave conservation. In Goede, A., Cockerill, R., eds. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Biennial Conference of the Australian Speleological Federation, Hobart, December 27-31, 1970*. Broadway, N.S.W. (Australian Speleological Foundation), pp. 61-62.
- SÚTN (1999). *STN 75 7221. Kvalita vody. Klasifikácia kvality povrchových vôd*. Bratislava (Slovenský ústav technickej normalizácie).
- STOKES, T. R., GRIFFITHS, P. A. (2000). *A preliminary discussion of karst inventory systems and principles (KISP) for British Columbia*. Ministry of Forests Research Program, Working Paper, 51, Victoria, B. C.
- STOKES, T. R., GRIFFITHS, P. A., I' ANSON, B. (2001). Karst inventory standarsts and vulnerability assessment procedures for British Columbia: a Canadian approach to managing forested karst lands. In Henderson, K., ed. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> ACKMA Conference, Wombeyan Caves, NSW, 29 April - 6 May 2001* (The 2006 ACKMA CD).
- van BEYEN, P., TOWNSEND, K. (2005). A disturbance index for karst environments. *Environmental Management*, 36, 101-116.
- van BEYEN, P., FELICIANO, N., NORTH, L., TOWNSEND, K. (2007). Application of a Karst Disturbance Index in Hillsborough county, Florida. *Environmental Management*, 39(2), 261-277.



- VESPER, D. J., LOOP, C. M., WHITE, W. B. (2001). Contaminant transport in karst aquifers. *Theoretical and Applied Karstology*, 13-14, 101-111.
- VÍAS, J. M., ANDREO, B., PERLES, J. M., CARRASCO, F., VADILLO, I. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, 14, 912-925.
- VLASCEANU, L., SÂRBU, S. M., ENGEL, A. S., KINKLE, B. K. (2000). Acidic Cave-Wall Biofilms Located in the Frasassi Gorge, Italy. *Geomicrobiology Journal*, 17, 125-139.

*Pavel Bella*

## **VULNERABILITY, ECOSTABILIZING FACTORS AND DISTURBANCE OF CAVE ENVIRONMENTS**

Many caves in karst areas present very unstable geosystems with a low to non-existent regeneration capacity. They are disturbed and destabilized by multiple negative anthropogenic impacts, resulting from disproportionate human activities realized in caves or on the surface in the vicinity of caves. The assessment of geocological stability and vulnerability of cave geosystems is required for the use and environmental protection of caves. The self-regulation of the cave environment is limited by the threshold values of their resilience. The main ecostabilizing factors are the degree of karst aquifer permeability, karstification and covering of the karst surface, character and regime of hydrological processes, intensity of water filtration through porous fluvial sediments, volume of cave spaces and measurement of their opening to the surface, quantity and humidity of fine sediments in relation to stabilization of climatic conditions in caves, etc. The geocological stability is supported by geodiversity and elements of nature protection.

Regarding elementary geocological units of the spatial structure of cave geosystems, very unstable speleotopes (slight value of carrying capacity), unstable speleotopes (low value of carrying capacity), slightly stable speleotopes (slightly increased value of carrying capacity), medium-stable speleotopes (moderately increased value of carrying capacity) and relatively stable speleotopes (more increased value of carrying capacity) are distinguished on the basis of different hydrographic and hydrological processes, degree of karst aquifer permeability, geodiversity and other natural values of the cave environment. Speleotopes represent the elementary complex quasi-homogenous geocological units of the cave environment with nearly equal lithological, structural-tectonic, morphological, morphometric, speleoclimatic, hydrological and biospeleological settings (Bella 1998 and 2008). Total geocological stability of the cave is assessed on the basis of the partial geocological stability of speleotopes, speleochores (ordered group of several speleotopes interconnected by horizontal relations, such as paradyamic range, catena or cascade) and set of speleochores (larger caves usually consist of several speleochores).

Since underground waters are one of the main and the most dynamic natural components of karst landscape, the vulnerability index (in sense of Alessa et al. 2008) can be adapted and modified into spatial hierarchic geocological units of caves (speleotopes, speleochores, set of speleochores) based on evaluation of their rare and fragile natural components and ecostabilizing factors.

From the geocological point of view, the basic categories of negative anthropogenic impacts on the cave environment include: (1) negative anthropogenic impacts cause the disturbance or destruction of one or several components of cave geosystems without or only with inconsiderable disturbance of their functioning (e.g. destruction of carbonate speleotheims, dirtying of the cave environment); (2) negative anthropogenic

impacts influence the behaviour of cave geosystems – reversible changes given by self-regulation of cave geosystems and limited by the threshold values of their loading (e.g. compensation for speleoclimatic changes induced by visitors' movement in show caves, temperature and photic changes near electric lights), irreversible changes (e.g. redundant visiting and electric lighting in show caves, redundant contamination of ground waters caused by agriculture or industry), changes of etocycles (e.g. annual regime of dripping waters caused by deforestation on the surface above the cave, repeated floods after deforestation or disproportionate agricultural land-use in the catchment area of cave streams); (3) negative anthropogenic impacts cause the successional dynamics of cave geosystems with their invariant changes (e.g. speleoclimatic conditions in ice-filled caves changed as a consequence of new artificial openings to the surface); (4) negative anthropogenic impacts cause the change of spatial structure or destruction of caves or their parts (e.g. artificially conditioned long-lasting to permanent flooding of caves as a consequence of raising of the water table resulting from building an artificial dam, change of cave drainage as a consequence of a lowering of water table resulting from digging of tunnels or quarry lowering, cave floor levelling and its covering by concrete, caves destroyed by mining or road construction).

The karst disturbance index (in the sense of van Beyen and Townsen 2005; van Beyen et al. 2007) is specified for measuring the degree of anthropogenic disturbance in caves. A numbered set of relevant indicators of the disturbance of cave environment are designated and evaluated. In relation to several indicators an assessment of the cave environment quality must be derived from special environmental analyses and monitoring. The karst disturbance index is calculated for the spatial hierarchic geoeological units of caves (speleotopes, speleochores, and set of speleochores).