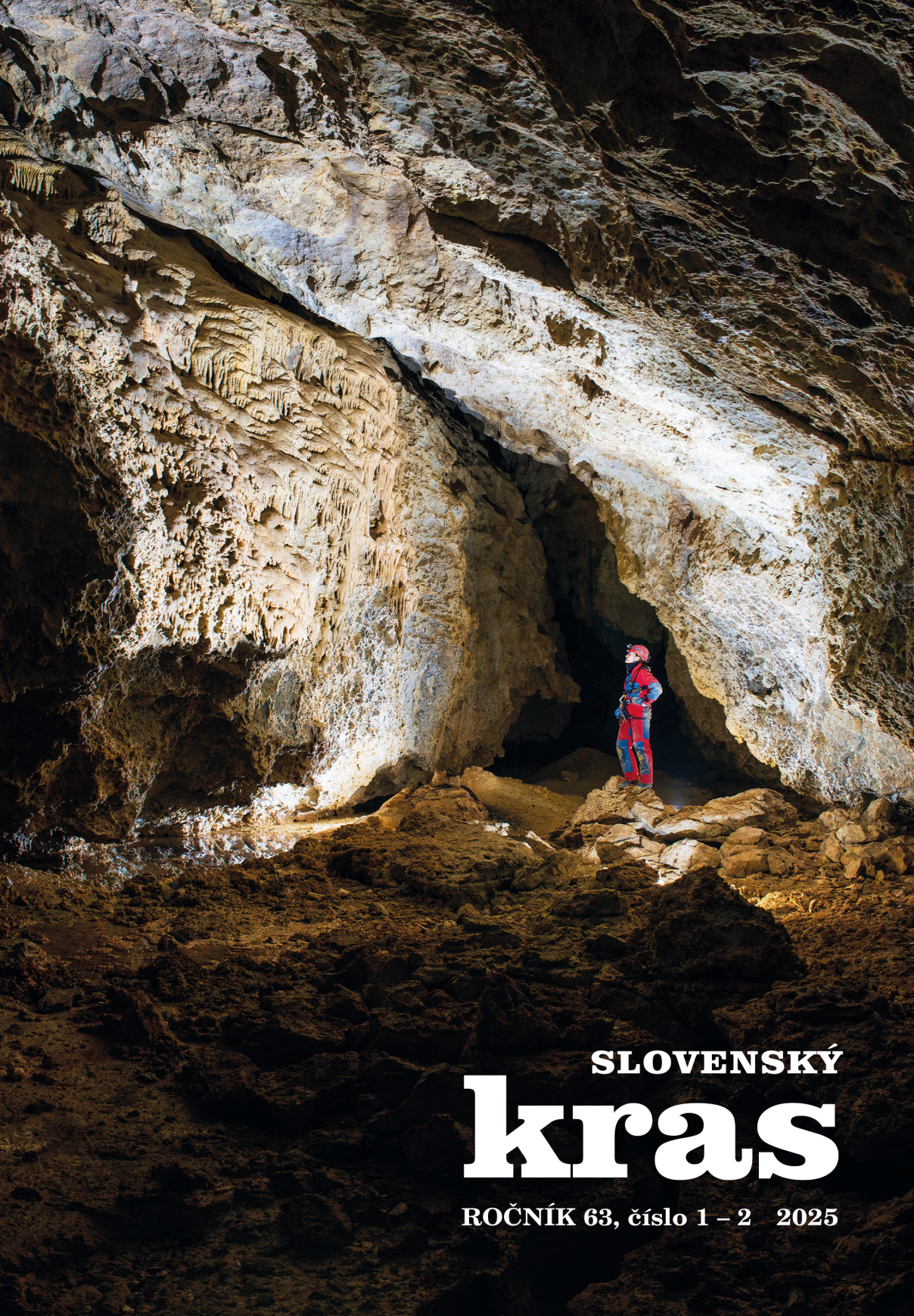




SLOVENSKÝ
kras

ROČNÍK 63, číslo 1 – 2 2025

SLOVENSKÝ KRAS

ACTA CARSOLOGICA SLOVACA

ROČNÍK 63
ČÍSLO 1 – 2



2025

Liptovský Mikuláš

SLOVENSKÝ KRAS

ACTA CARSOLOGICA SLOVACA

Vedecký karsologický a speleologický časopis

Časopis vychádza dvakrát ročne

Evidenčné číslo: EV 3878/09

ISSN 0560-3137

Editor / Editor

doc. RNDr. Pavel Bella, PhD.

Výkonný redaktor / Executive Editor

Ing. Peter Holúbek

Redakčná rada / Editorial Board

Predseda / Chairman

doc. RNDr. Zdenko Hochmuth, CSc.

Členovia / Members

doc. RNDr. Pavel Bella, PhD., prof. RNDr. Pavel Bosák, DrSc., RNDr. Václav Cílek, CSc., doc. PaedDr. Patrik Derfiňák, PhD., RNDr. Ľudovít Gaál, PhD., prof. dr. hab. Michal Gradziński, Ing. Jozef Hlaváč, Ing. Peter Holúbek, doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc.†, prof. RNDr. Ľubomír Kováč, CSc., RNDr. Alexander Lačný, PhD., RNDr. Peter Malík, CSc., prof. Mgr. Martin Sabol, PhD., PhDr. Marián Soják, PhD., prof. Ing. Michal Zacharov, CSc.

Recenzenti / Reviewers

doc. Mgr. Peter Fend'a, PhD., RNDr. Miroslav Fulín, CSc., RNDr. Ľudovít Gaál, PhD., doc. RNDr. Zdenko Hochmuth, CSc., doc. RNDr. Alexander Lačný, PhD., RNDr. Peter Malík, CSc., RNDr. Norbert Polčák, PhD., RNDr. Anna Šestáková, PhD.

OBSAH – CONTENTS

ŠTÚDIE A VEDECKÉ SPRÁVY – SCIENTIFIC PAPERS

Redakčná rada

Doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc. (1936 – 2025) 5

Pavel Bella:

Vklad Jozefa Jakála do krasovej geomorfológie, geoekológie a slovenskej speleológie
The contribution of Jozef Jakál to karst geomorphology, geoecology and Slovak speleology..... 7

Pavel Bella, Pavel Bosák, Petr Mikysek, Juraj Littva, Helena Hercman, Jacek Pawlak, Šimon Kdýr, Peter Pruner, Jozef Minár, Michał Gradziński, Wojciech Wróblewski, Eliška Mikysková, Marek Velšmid:

Hypogénne jaskyne s vývojovými úrovňami vytvorenými účinkom kyseliny sírovej:
Plavecký hradný vrch, Malé Karpaty
Hypogene caves with sulfuric acid evolution levels: Plavecký hradný vrch Hill, Malé Karpaty Mountains, western Slovakia 29

Dagmar Haviarová:

Chemické zloženie vôd vybraných jaskýň Plaveckého hradného vrchu (Plavecké predhorie, Malé Karpaty)
Water chemistry in selected caves of the Plavecký hradný vrch Hill (Plavecké predhorie Foothills, Malé Karpaty Mountains) 59

Lucia Pristašová, Gabriela Ivaňáková:

Klimatický monitoring Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti, Malé Karpaty
Climate monitoring of the Plavecká Cave and Plavecká Shaft, Malé Karpaty Mountains, Slovakia 87

Blanka Lehotská, Roman Lehotský:

Chiropterofauna jaskýň Plaveckého hradného vrchu
Bats (Chiroptera) in the caves of the Plavecký hradný vrch Hill 101

Andrej Mock, Peter Luptáčik, Andrea Rendošová, Michal Rendoš, Vladimír Papáč, Zuzana Višňovská, Natália Raschmanová, Miloš Melega, Vladimír Košelť, Tomáš Jászay, Jozef Oboňa, Zuzana Krumpálová, Lubomír Kováč:

Biospeleologická charakteristika jaskýň Plaveckého hradného vrchu (Malé Karpaty)
Biospeleological characteristics of the caves of Plavecký hradný vrch Hill (Malé Karpaty Mountains, Slovakia) 117



Doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc. (1936 – 2025)

Týmto číslom časopisu Slovenský kras vyslovujeme celoživotné uznanie a vďaku doc. RNDr. Jozefovi Jakálovi, DrSc., ktorý nás navždy opustil v novembri 2025. Ako uznávaný fyzický geograf a geomorfológ od konca 60. rokov minulého storočia výrazne rozvinul a usmernil geomorfologický a geoekologický výskum krasu na Slovensku. Svojím komplexným pohľadom na výskum, prieskum i ochranu krasu vplýval nielen na odbornú verejnosť, ale usmerňoval aj činnosť našich jaskyniarskych organizácií – Správy slovenských jaskýň, Múzea slovenského krasu i Slovenskej speleologickej spoločnosti.

Členom redakčnej rady zborníka Slovenských kras sa stal v roku 1969. Viac ako štvrtstoročie (v rokoch 1969 až 1995) bol jeho zostavovateľom a odborným redaktorom. S cieľom zvýšiť odbornú a vedeckú úroveň zborníka upravil a zaviedol novú obsahovú štruktúru s uverejňovaním vedeckých štúdií a správ, ako aj jeho pravidelné ročné vydávanie (od roku 1970). Dovtedy Slovenský kras vychádzal v dvojročných cykloch (okrem prvých dvoch čísiel z rokov 1958 a 1959), hlavným redaktorom a zostavovateľom bol Vojtech Benický. Od roku 2008 Slovenský kras vychádza ako časopis (dve čísla ročne).

Jozef Jakál bol členom redakčnej rady Slovenského krasu až do konca svojho života (spolu 56 rokov). Zostavil a editoval 26 čísiel, ktoré výrazne obohatili fond slovenskej karsologickej a speleologickej literatúry. V Slovenskom krase publikoval množstvo významných vedeckých štúdií, posudzovaním zadaných príspevkov dbal o udržiavanie a zvyšovanie jeho vedeckej úrovne. Výsledkami svojej práce vzbudzoval záujem o kras a jaskyne u mladších generácií. Jeho meno navždy zostane späté so zborníkom Slovenský kras.

Redakčná rada

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	7 – 28	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	--------	------------------------

ŠTÚDIE A VEDECKÉ SPRÁVY – SCIENTIFIC PAPERS

VKLAD JOZEFA JAKÁLA DO KRASOVEJ GEOMORFOLÓGIE, GEOEKOLÓGIE A SLOVENSKEJ SPELEOLÓGIE

PAVEL BELLA^{1,2}

¹ Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11,
031 01 Liptovský Mikuláš; pavel.bella@ssj.sk

² Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Katolícka univerzita v Ružomberku, Hrabovská cesta 1,
034 01 Ružomberok

P. Bella: The contribution of Jozef Jakál to karst geomorphology, geoecology and Slovak speleology

Abstract: Associate Professor RNDr. Jozef Jakál, DrSc. (1936 – 2025) was a leading authority on Slovak karst geomorphology and geoecology. From the late 1960s, he made significant contributions to advancing geomorphological and geoecological karst research in Slovakia. He primarily focused his scientific work on karst typology in Slovakia and the analysis and evolution of plateau karst in the Western Carpathians, including the comparison of karst plateaus. Through his geomorphological research and mapping of the Silická planina plateau in the Slovak Karst, he accurately studied the development of karst landforms on the largest karst plateau in the Western Carpathians. He then reconstructed the evolution of the Slovak Karst more completely during the neotectonic phase of the development of the Western Carpathians. He also observed and provided a more detailed description of poljes, paleopoljes and karst valleys in this mountain range. He also outlined their local delineation and classification. Furthermore, he studied karst landforms and their development in the Strážovské vrchy, Tríbeč, Malá Fatra and Malé Karpaty mountains, as well as in the Hornolehotský Karst in the Horehronské podolie intermountain basin. He significantly expanded knowledge of karst landforms, particularly plateau karst, within the Western Carpathian geomorphology. He emphasised and clarified the importance of certain karst landforms for understanding the development of the Western Carpathians, such as karst plateaus (planation surfaces), cone hills that rise from karst plateaus, and cave levels. Using approaches from complex physical geography, he clarified and evaluated the geoecological properties, behaviour and dynamics of the karst landscape, as well as its vulnerability and the principles of its rational use and protection. From 1962 to 1969 and again from 1973 to 2013, he worked at the Geographical Institute of the Slovak Academy of Sciences in Bratislava. From 1970 to 1973, he was the first director of the newly established Slovak Caves Administration in Liptovský Mikuláš. Jozef Jakál established and developed the fundamental principles of an integrated approach to cave protection and management in Slovakia, based on scientific research and the implementation of most effective practices.

Key words: karst, typology, landform evolution, limestone landscape, cave, nature protection, Slovakia, Western Carpathians

ÚVOD

Doc. RNDr. Jozef Jakál, DrSc. (1936 – 2025) bol ústrednou osobnosťou slovenskej krasovej geomorfológie a geoeológie. Od konca 60. rokov minulého storočia výrazne rozvinul a usmernil geomorfologický a geoeologický výskum krasu na Slovensku.



Jozef Jakál (1936 – 2025). Foto: Archív ochrany prírody a jaskyniarstva Liptovský Mikuláš, P. Bella, P. Holúbek

Jozef Jakál (1936 – 2025). Photo: Archive of Nature Conservation and Speleology Liptovský Mikuláš, P. Bella, P. Holúbek

Svoju vedeckú činnosť a výskum zamerlal najmä na typológiu krasu Slovenska, geomorfologickú analýzu a mapovanie krasu Silickej planiny v Slovenskom krase s rekonštrukciou vývoja reliéfu, vývoj Slovenského krasu v neotektonickej fáze vývoja Západ-

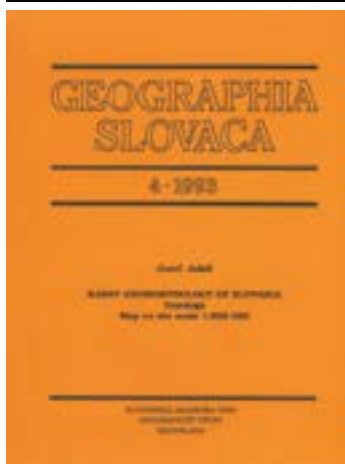
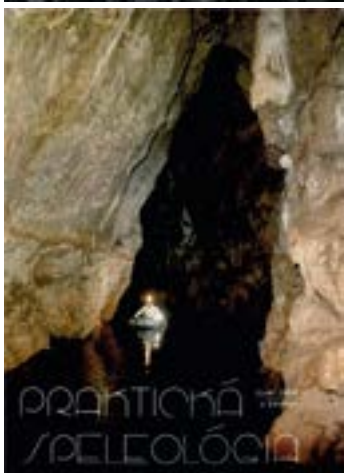
ných Karpát, analýzu a komparáciu planinového krasu v Západných Karpatoch i geomorfologický výskum polí, paleopolí a krasových dolín v našich podmienkach. Vykonal aj geomorfologický výskum viacerých ďalších krasových oblastí (Strážovské vrchy, Tríbeč, Malá Fatra, Horehronské podolie, Malé Karpaty), pričom regionálne poznatky dával do súvislosti s celkovým vývojom Západných Karpát. V rámci západokarpatskej geomorfológie tým výrazne prehĺbil a doplnil poznatky o krasovom reliéfe, najmä v planinovom krase. Zdôraznil a bližšie objasnil význam krasového reliéfu v celkovej geomorfológii Západných Karpát. Z komplexného hľadiska objasnil a zhodnotil geoekologické vlastnosti a fungovanie krasovej krajiny, jej zraniteľnosť, zásady racionálneho využívania a ochrany. Stanovil a rozpracoval základné prístupy k ochrane jaskýň, ktoré vychádzajú z komplexných poznatkov o krasovej krajine a jej horizontálnych vzťahov s okolitými územiami.

V rokoch 1962 – 1969 a 1973 – 2013 J. Jakál pôsobil na Geografickom ústave SAV v Bratislave. V rokoch 1970 – 1973 bol riaditeľom novovytvorenej Správy slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši. Tvorivé výsledky geomorfologického a geoekologického výskumu odovzdal svojim nasledovníkom a budúcim generáciám vo svojich početných publikáciách. Svojou odbornosťou usmernil vývoj slovenského jaskyniarstva po roku 1970.

ZAMERANIE VÝSKUMU, ZHRNUTIE A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Typológia krasu na Slovensku. Táto dôležitá problematika, podávajúca základný obraz o rôznorodosti našich krasových území, bola jednou z prvých hlavných tém geomorfologického výskumu J. Jakála. Začal ju riešiť po boku E. Mazúra, vtedajšieho riaditeľa Geografického ústavu SAV v Bratislave. Základné typy krasu rozlíšili podľa morfoštruktúr nadväzujúcich na geologickú stavbu krasových území, členitosti alebo zarovnania georeliéfu, klimatických podmienok, ako aj stupňa skrasovatenia (Mazúr a Jakál, 1969, 1976; Jakál, 1993). Finalizujúca monografia J. Jakála o typológii krasu na Slovensku vyšla v edícii *Geographia Slovaca* v roku 1993. V nižších horských a stredohorských polohách je u nás zastúpený planinový kras, rozčlenený kras masívnych chrbtov, hrastí a kombinovaných vrásovo-zlomových štruktúr a kras monoklinálnych hrebeňov a chrbtov, v menšej miere aj kras bradlovej štruktúry. Kras travertínových kôp a kaskád sa vyskytuje nielen v horských, ale najmä v kotlinových a pahorkatinových polohách. V medzihorských kotlinách a predhorských častiach nížin je vyvinutý kras izolovaných krýh a tvrdošov, ako aj kras úpätných plošín a riečnych terás. Vo vysokohorských polohách (nad hornou hranicou lesa) je známy kras na vrásovo-zlomových i monoklinálnych štruktúrach. Osobitnými podmienkami vývoja sa vyznačuje kryptokras, ktorý sa viaže najmä na šošovky paleozoických kryštallických vápencov v nerozpustných horninách v masíve Hrádku Revúckej vrchoviny pri Ochtinej (v nadväznosti na anglo-americkú terminológiu je Ochtinský kras vhodnejšie označovať ako uzavretý kras, pozri Aragonit 27/2 z roku 2022). Originálny prístup typológie krasu založenej na morfológii a stupni skrasovatenia podľa vývoja povrchových a podzemných krasových foriem (s mapou v mierke 1 : 500 000) vyzdvihol J. Nicod, jeden z nestorov francúzskej karsológie, v časopise *Karstologia*, č. 25 z roku 1995.

Morfológia a vývoj planinového krasu Západných Karpát. Okrem typológie krasu J. Jakál svoj geomorfologický výskum zamerlal najmä na planinový kras, ktorý sa v rámci Západných Karpát vyznačuje najlepšie rozvinutým krasovým reliéfom. Najdetailnejšie skúmal reliéf Silickej planiny, najrozsiahlejšej planiny v Slovenskom krase s dobre vyvinutými krasovými i fluviokrasovými formami reliéfu. Výsledky podáva monografia J. Jakála z roku 1975. S cieľom vystihnúť odlišnosti morfológie planiny vymapoval jej vybrané časti profilovaním. Päť geomorfologických profilov v mierke 1 : 25 000 (územie



Monografie J. Jakála z rokov 1975, 1982 a 1993.

Monographs by J. Jakál from 1975, 1982 and 1993.

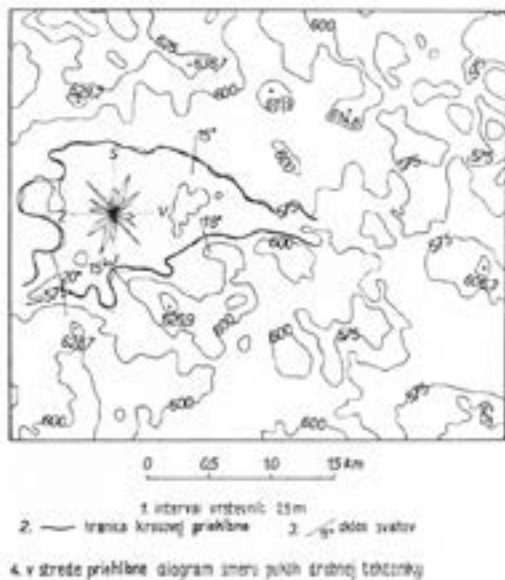
medzi Plešivcom a Dlhou Vsou, v okolí Silice, v oblasti Jovic, v oblasti Hrušova a Lipovníka, v oblasti Hrhova a Bôrky) zahŕňa celú škálu krasových a fluviokrasových foriem, ktoré sa na Silickej planine vyskytujú. Profily prechádzajú do susedných nekrasových území, aby pomohli riešiť vývojové súvislosti. Analyzoval aj litologické vlastnosti karbonatických hornín a zhodnotil vplyv tektoniky na vývoj reliéfu. Spracoval ucelenú systematicku povrchových foriem reliéfu na Silickej planine: krasové formy (škrapy, krasové jamy, úvaly, krasové priehlbne, krasové chrbty), fluviokrasové formy (suché doliny, slepé doliny, poloslepé dliny, vrecovité doliny, kaňony a tiesňavy) a okrajové krasové formy (okrajové krasové jazerá, okrajové polje). Jednotlivé krasové formy preskúmal, opísal a riešil ich genézu. Z paleogeografického hľadiska upriamil pozornosť aj na vplyv klímy na proces krasovatenia.

Na Silickej planine vyčlenil a opísal valcovité, puklinové, studňovité, krčiazkovité a všeobecné škrapy. Krčiazkovitými škrapmi nazval kamenice, ktoré sa od ostatných misovitých vyhlbenín líšia rovnou podlahou, previsnutými stenami a odtokovým kanálkom. Za škrapové pole považoval skrasovatenú plochu, na ktorej je pomer škrapov k zvetralinám a pôdnej pokrývke 4 : 1. V Slovenskom krase sa škrapové polia zväčša vyskytujú na miernejších svahoch planín, ktoré nepresahujú sklon 15° (Mazúr a Jakál, 1971). Škrapy sa miestami vyskytujú aj na strmších svahoch planín. V nadväznosti na predchádzajúce klasifikácie závrtovej J. Jakál rozlíšil na Silickej planine krasové jamy vytvorené prepadnutím povál do podzemných priestorov, krasové jamy vytvorené rozpúšťacou činnosťou vôd (lievikovité, misovité, kotlovité a prstencovité krasové jamy) a náplavové krasové jamy. Ďalej opísal úvalu severne od Silice, ako aj zárodoky vznikajúcich úval (zokupenia 3 až 8 krasových jám, ktoré sú oddelené nižšie vystupujúcimi chrbtami – skalnými závorami). Už v roku 1971 začal skúmať krasové priehlbne, ktoré predstavujú rozsiahle uzavreté depresie s pomerne plochým dnom, miestami rozčleneným krasovými jamami. Krasové priehlbne po obvode lemuje krasové chrbty siahajúce do výšky okolo 60 m nad ich takmer ploché dno. J. Jakál uvádza, že najvýraznejšia je krasová priehľbeň Bučiny v severnej časti Silickej planiny, spolu s priehľbňou západne Sorošky (v rámci Slovenského krasu spomína aj krasovú priehľbeň severne od Ostrých vrškov na Plešivskej planine). Slepé doliny opísal severne a južne od Silickej Brezovej, poloslepú dolinu severne od vrchu Bulan, vrecovité doliny (začínajúce sa vyvieracťou spod skalnej steny) pri Kečove a Ardove.

Rovnako charakterizoval odlišnú morfológiu a rozmery kaňonov (riek Slaná a Štítnik) a tiesňav (Blatnického a Hájkeho potoka). Pozdĺžnu depresiu medzi Dlhou Vsou a Ardovskou jaskyňou, pôvodne opisovanú ako slepá dolina, klasifikoval ako okrajové krasové polje (poukázal na intenzívne podrezávanie vápencových stien, uzavretosť, podzemné odvodňovanie a značnú rozlohu depresie).

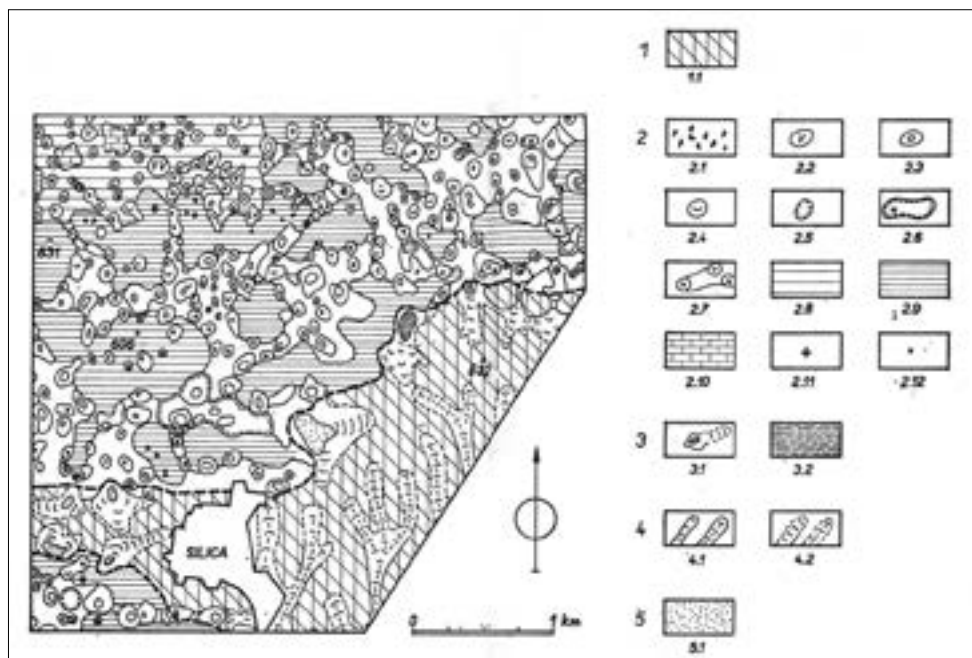
Na základe geomorfologického mapovania a analýzy zrekonštruoval vývoj reliéfu Silickej planiny. V nadväznosti na staršie štúdie a najmä svoju predchádzajúcu štúdiu z roku 1971 (v spolupráci s E. Mazúrom) skonštatoval, že plošina na povrchu planiny zodpovedá stredohorskému zarovnanému povrchu, ktorý sa v Západných Karpatoch vytvoril začiatkom vrchného miocénu (sarmat – panón). Píše, že rozhodujúci vplyv na vytváranie krasovej plošiny malo bočné prekladanie povrchových riečisk. Z tečúcich vôd sa na území Slovenského krasu, v krasových depresiách pri Silickej Brezovej a Soroške, zachovali zvyšky fluviaálnych štrkov. Keďže sa granulometricky i petrograficky odlišujú od štrkov poltárskej formácie, Jakál (1975) ich považoval za panónske. Ďalej uvádza, že počas prvého nevýrazného tektonického výzdvihu zarovnaného povrchu Slovenského krasu sa riečne toky presťahovali do dnešných smerov. Pôvodne jednotná krasová plošina sa rozdelila na jednotlivé plošiny, krasové územie sa začalo odvodňovať aj vertikálne. Pritom vznikli krasové jamy a prvotné plytké doliny, medzi ktorými zostali krasové chrby. Tie podľa Mazúra a Jakála (1971), ako aj Jakála (1975) svojimi vrcholmi predstavujú pôvodnú úroveň stredohorského zarovnaného povrchu. Z krasových plošín boli čiastočne odnosené aj zvetraliny. V podzemí vznikli menšie korózne priepasti a plytké podzemné hydrologické systémy.

Vo vzťahu k vertikálnemu krasovateniu planín uvádza, že rozhodujúci bol nasledujúci intenzívny tektonický výzdvih koncom panónu, resp. začiatkom pontu (pred cca 8 mil. rokov). Pritom sa celý vápencový blok naklonil k juhu, v severnej časti sa vytvorila hrubá vadózna zóna a začal sa proces intenzívneho vertikálneho krasovatenia. Postupným zarezávaním sa dolín medzi krasovými planinami sa pohyb podzemných vôd koncentroval smerom k vyvieraciam a vodným tokom v kaňonoch, ku ktorým sa viazalo hlavné odvodňovanie planín (išlo o hlavnú fázu zahĺbenia kaňonov Štítnika a Slanej). Následne sa rozsiahlou sedimentáciou poltárskeho súvrstvia, ktorá zasiahla najmä depresie v južnej časti Slovenského rudohoria a príľahlé predpolie, do značnej miery vyplnili aj kaňony Slanej a Štítnika (Mazúr a Jakál, 1971; Jakál, 1975). Tým sa po stranách kaňonov vertikálny rozsah vadóznej zóny zmenšil a freatickej zóny naopak zväčšil. V štúdii publikovanej v Slovenskom krase z roku 2001 J. Jakál usudzuje, že najhlbšie priepasti na planinách dosahujú asi úroveň eróznej bázy, resp. piezometrického povrchu podzemnej krasovej vody z obdobia pontskej sedimentácie.



Paleopolje Bučiny v severnej časti Silickej planiny, Slovenský kras (Jakál, 1971).

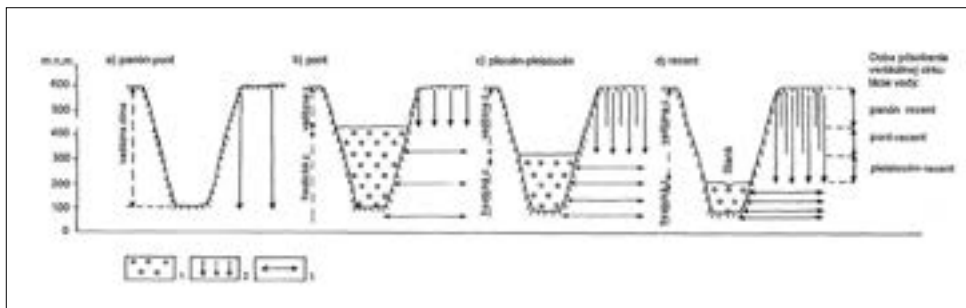
Paleopolje Bučiny in the northern part of the Silická planina Plateau, Slovak Karst (Jakál, 1971).



Geomorfologická mapa strednej časti Silickej planiny z okolia Silice. 1 – Nekrasový typ reliéfu: 1.1 – silne zvlnený až mierne rezaný reliéf na výstupoch werfenského súvrstvia v úrovni krasovej plošiny; 2 – Krasové formy: 2.1 – škrapy, 2.2 – lievikovité krasové jamy, 2.3 – misovité krasové jamy, 2.4 – kotlovité krasové jamy, 2.5 – studňovité krasové jamy, 2.6 – úvala. 2.7 – depresie v krasovej plošine prehĺbené krasovými jamami (predurčené tektonickými líniami), 2.8 – krasová priehľbeň (paleopolje podľa Jakála, 2000), 2.9 – krasové chrbty (pôvodná úroveň stredohorského zarovnaného povrchu), 2.10 – krasové kopy vystupujúce z dna krasových priehľbní, 2.11 – vertikálne jaskyne (priepasti), 2.12 – aktívne ponory; 3 – okrajové krasové formy: 3.1 – Okrajové krasové jamy a slepé úvaliny, 3.2 – okrajové krasové jazero; 4 – Denudačno-erózne formy: 4.1 – periglaciálne doliny suché a polosuché, 4.2 – periglaciálne úvaliny suché a polosuché; 5 – Akumulačné formy: 5.1 – niva na dne okrajových krasových foriem (Jakál, 1975).

Geomorphological map of the central part of the Silická planina Plateau from the vicinity of the village of Silica. 1 – Non-karst relief type: 1.1 – strongly undulating to slightly incised relief on the outcrops of the Werfen Formation at the level of the karst plateau; 2 – Karst landforms: 2.1 – karren, 2.2 – funnel-shaped dolines, 2.3 – bowl-shaped dolines, 2.4 – kettle-shaped dolines, 2.5 – well-shaped dolines, 2.6 – uvala, 2.7 – depressions in the karst plateau deepened by dolines (controlled by tectonic lines), 2.8 – karst depression (paleopolje according to Jakál, 2000), 2.9 – karst ridges (the original level of the mid-mountain planation surface), 2.10 – karst mounds elevated from the bottom of karst depressions, 2.11 – vertical caves (abysses), 2.12 – active ponors; 3. Contact karst landforms: 3.1 – contact karst dolines and blind dells, 3.2 – contact karst lake; 4. Denudation-erosion landforms: 4.1 – periglacial valleys dry and semi-dry, 4.2 – periglacial dells dry and semi-dry; 5 – Accumulative landforms: 5.1 – floodplain at the bottom of contact karst landforms (Jakál, 1975).

Rekonštruujúc ďalší vývoj píše, že po čiastočnom odplavení pontskej sedimentácie sa na rozhraní pliocénu a pleistocénu vytvárala poriečna roveň. Podotýka, že na jej vytváraní vo východnej časti Rimavskej kotliny sa podieľala aj rieka Slaná. Jakál (1975) opísal poriečnu roveň aj v eróznej brázde medzi Kováčovou a Bôrkou (medzi Volovskými vrchmi a Slovenským krasom, planinou Horný vrch) pozdĺž potoka Čremošná, ktorý je ľavostranným prítokom Slanej v Rožňavskej kotline. Keďže v kaňone Slanej sa sediment poriečnej

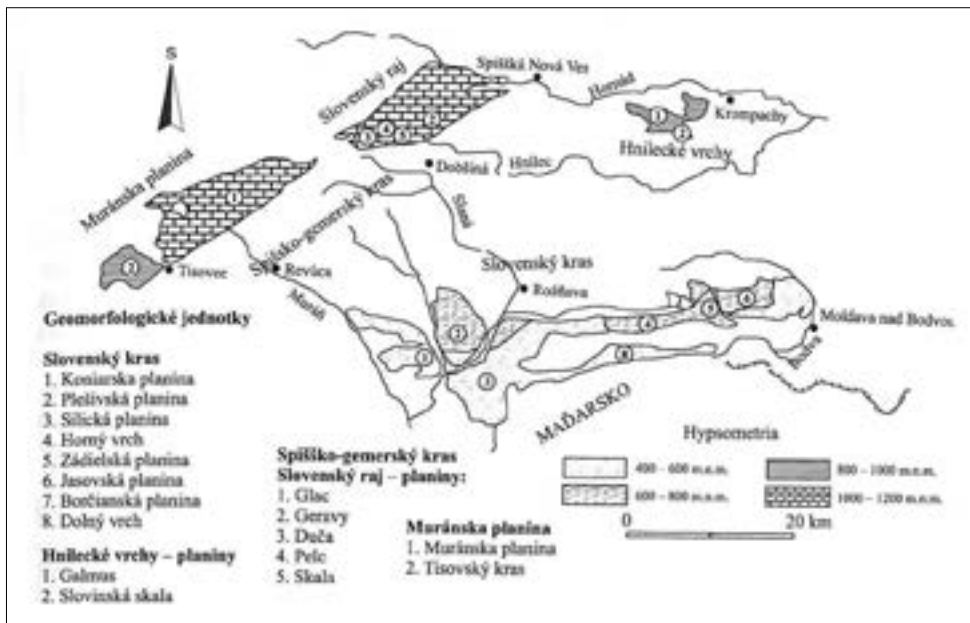


Vývoj zonálnosti krasových vôd v závislosti od vývoja kaňonovitej doliny rieky Slaná: 1 – piesky a štrky poltárskeho súvrstvia; 2 – vertikálne línie, stúpajúca hustota vyjadruje dlhodobéjšie pôsobenie vertikálnej cirkulácie vôd a hĺbkové krasovatenie vo vadóznej zóne; 3 – horizontálne línie, stúpajúca hustota vyjadruje dlhodobéjšie pôsobenie korózie vo freatickej zóne; a) neotektonické vyzdvihnutie územia a zahĺbenie doliny Slanej; b) akumulácia riečno-jazerných štrkov a pieskov poltárskeho súvrstvia; c) odnos štrkov a pieskov počas vytvárania poriečnej rovne, d) súčasný stav vývoja doliny (Jakál, 2001).

Development of zonality of karstic waters in dependence on the development of the canyon-shaped valley of the Slaná River: 1 – sands and gravels of the Poltár Formation; 2 – vertical lines, increasing density express the long-term effect of vertical water circulation and deep karstification in the vadose zone; 3 – horizontal lines, increasing density express the long-term effect of corrosion in the phreatic zone; a) neotectonic uplift of the area and deepening of the Slaná Valley; b) accumulation of river-lake gravels and sands of the Poltár Formation; c) removal of sands and gravels during the formation of the river-side level; d) present state of valley development (Jakál, 2001).

rovne nevytvoril, J. Jakál predpokladal, že v zúžených kaňonovitých dolinách v tom čase pokračovalo ich vyprázdňovanie od zostávajúcich sedimentov poltárskeho súvrstvia. Vyprázdňovaním kaňonov sa miestna erózná báza znižovala, v priliehajúcich častiach planín sa vadózna zóna zväčšovala, naopak freatická zóna sa zmenšovala. Nakoniec sa akumulčná výplň kaňonov postupne znížila až na súčasnú eróznú bázu, na ktorú sa viažu horizontálne Brzotínske jaskyne na východnom okraji Plešivskej planiny. V tejto súvislosti uvádza, že na fázu ustálenej úrovne povrchových riečisk sa viazal aj vývoj spodných častí Gombaseckej a Krásnohorskej jaskyne, ktoré sú niekoľko metrov nad súčasnými vodnými tokmi. Podobne o „inverzii krasového procesu“ v dôsledku vyplňovania kaňonu Slanej poltárskym súvrstvom, ako aj o neskoršom vytváraní drenážnych jaskýň ústiacich do kaňonu v nadväznosti na úroveň akumulácie počas jeho prerušovaného vyprázdňovania písal už František Skřivánek v *Československom krase*, roč. 17 z roku 1966.

V ďalšej štúdii zaradenej do *Geografického časopisu* z roku 2001 J. Jakál vykonal súbornú porovnávaciu analýzu krasových planín v Západných Karpatoch (zatiaľ jedinú), ktoré zaberajú vyše 27 % z rozlohy krasových území na Slovensku. Zhodnotil litologické a štruktúrno-geologické podmienky vývoja planinového krasu, poukázal na rozdielnosť v morfológii povrchového krasu na plošinách planín, ako aj na spoločné črty vývoja planinového krasu. Skonštatoval, že zvyšovanie absolútnej nadmorskej výšky náhorných plošín od juhovýchodu smerom na severozápad, indikuje klenbovité vyzdvihovanie Západných Karpát formou stupňovitého vyzdvihovania čiastkových hrastí, ktorých intenzita výzdvihu stúpa smerom do centrálnej časti Západných Karpát. Preukázal, že hypsometria aj v rámci samotného Slovenského krasu naznačuje stupňovitý neotektonický výzdvih a naklonenie jednotlivých blokov planín. Rozdiely v relatívnej výškovej i horizontálnej členitosti reliéfu na plošinách planín J. Jakál pripisuje väčšej geologickej pestrosti, hlbšie



Rozšírenie planinového typu krasu na Slovensku. Hypsometria ukazuje neotektonické rozčlenenie i diferenciáciu vyzdvihnutia pôvodne jednotného zarovnaného povrchu (Jakál, 2001). Distribution of the plateau-type karst in Slovakia. Hypsometry shows the neotectonic subdivision and differentiation of the originally undivided planation surface (Jakál, 2001).

ležiacej eróznej báze a silnejšiemu uplatneniu fluvialných procesov v Slovenskom raji, na Muránskej planine a Galmuse v porovnaní so Slovenským krasom. Ďalej poukazuje na výrazné rozdiely v stupni skrasovatenia medzi klasicky vyvinutými planinami s ostro ohraničenou plošinou (Muránska planina, planiny Geravy a Glac v Slovenskom raji) a menej výraznými formami planín (Tisovský kras, Galmus). Kým v prvej skupine ide o relatívne širokú škálu foriem, v druhej sa povrchový kras obmedzuje na staré senilné doliny, ktoré sú miestami prehĺbené krasovými jamami do úvalovitých foriem. V Slovenskom krase sú stupňom povrchového skrasovatenia porovnateľné všetky planiny s výnimkou Jasovskej planiny, na ktorej sa len sporadicky vyskytujú povrchové formy a takmer absentujú krasové jamy, najmä v južnej časti, pravdepodobne z dôvodu väčšieho výskytu dolomitov. Vo vzťahu k reliéfu na plošinách J. Jakál píše, že dominantnými formami starších fáz krasovatenia na planinách sú kužeľové vrchy vystupujúce nad úroveň stredohorského povrchu a mladšie krasové priehlbne (paleopolja) vhlbené do tohto zarovnaného povrchu. Senilné doliny, ktoré sú zahĺbené do stredohorského zarovnaného povrchu a rozčleňujú náhorné plošiny, spravidla vyúsťujú na ich okraj. V rámci rekonštrukcie celkového vývoja planinového krasu v Západných Karpatoch vyčlenil a opísal vrchnokriedovú fázu krasovatenia, etapu paleogénnej fosilizácie a miocénnej exhumácie planinového krasu, panónske plošiny, predpontské rozčlenenie reliéfu a neskoršie obnovenie krasovatenia pretrvávajúce aj v kvartéri. Nakoniec poukázal a zdôraznil, že dve fázy kaolinizácie v Západných Karpatoch (pozri monografiu Ivana Krausa vydanú v edícii Západné Karpaty – séria mineralógia, petrológia, geochemia, metalogenéza, č. 13 z roku 1989) dobre korelujú s obdobiami formovania stredohorskej rovne (panón, výraznejšia fáza kaolinizácie) a poriečnej rovne (vrchný pliocén – spodný pleistocén).

V predchádzajúcej štúdii z roku 1997 sa J. Jakál zaoberal aj zvyškami krasových plošín v Strážovských vrchoch (Hrubá Kačka, Rovne, Baske, Ilavské rovne), ktoré sú takisto pozostakami stredohorského zarovnaného povrchu. Kras Strážovských vrchov je vytvorený na kombinovaných vrásovo-zlomových štruktúrach, morfológicky sa prejavuje ako rozčlenený kras masívnych chrbtov a hrastí s lokálnym výskytom silnejšie skrasovatých náhorných a úpätných plošín. Rekonštruujúc vývoj plošín v okolí Mojtiňa poukázal na tri stupne zarovňavania: (1) zvyšky staršieho (bádenského?) povrchu (najvyššie položené okrajové masívne chrbty), (2) stredohorskú roveň zrezávajúcu triasové vápence i eocénne zlepenice a (3) nižšie položenú plošinu vnútri starej kotliny (tvorí dno kotliny), ktorá zrezáva eocénnu výplň i okolité triasové karbonáty. Porovnáva ju s krasovými okrajovými rovinami a dnom krasových priehlbín z iných krasových území Západných Karpát. Vzhľadom na relatívne vysokú polohu (vyše 200 m nad tokmi odvodňujúcimi územie) ju nepovažuje za poriečnu roveň.

Krasové jamy v slovenskej geomorfologickej terminológii. Namiesto termínu „krasový závrť“, ktorý bol do našej literatúry prevzatý (nepôvodné slovenské slovo), J. Jakál (1975, 1982) zaviedol domáci termín „krasová jama“. Zdôvodnil to tým, v stredoslovenskej oblasti sa takéto terénne tvary miestne nazývajú „jamy“. Miesta, kde sa závrty vyskytujú v skupinách, sa u nás zvykli označovať „na jamách“. V podobnom duchu o krasovej jame s jaskyňou pri Brestovskej jaskyni písal už Ján Brodňanský v *Slovenskom krase*, roč. 8 z roku 1970.

Termín „závrť“ pochádza z českého jazyka a priamo súvisí so slovesom „zavítať sa“ alebo „vítať“. Označuje depresiu vznikajúcu v dôsledku „zavrtávania sa“ vody v krase pod zemský povrch. Ján Volko-Starohorský v *Speleologii či jaskyňovede* z roku 1935 uvádza termín „závrť“. Rovnako aj v prípade kameníc (takisto prevzatý termín) J. Jakál uprednostňuje slovenský termín „krčiazkovité škrapy“. Termín „krasová jama“ je širšieho chápania, zahŕňa všetky jamovité depresie krasového pôvodu (vytvorené rozpúšťacou činnosťou vôd priesakujúcich do podzemia zo zrážok i ponárajúcich sa trvalých alebo občasných potôčikov, ako aj prepadnutím jaskynných povál do podzemných priestorov). V slovenskej karsologickej terminológii sú na označenie takýchto morfológicky a geneticky odlišných depresií osobitné termíny – „vrtače“ (lievikovité korózne depresie) a „udornice“ (študňovitá rútená depresie).

Oba termíny „krasová jama“ i „krasový závrť“ sa v našej literatúre používajú bez striktného obmedzenia. Termín „krasová jama“ sa u nás uprednostňoval najmä v druhej polovici 70. rokov minulého storočia.

Polja a paleopolja Západných Karpát. J. Jakál sa zaoberal aj problematikou poljí, ktoré patria medzi základné a typické znaky morfológie klasických krasových území. U nás sa táto problematika neriešila súborne, genéza poljí a ich zaradenie do systému foriem západokarpatského krasového reliéfu neboli jednoznačnejšie doriešené. V doteraz jedinej sumárnej štúdii o poljách v Západných Karpatoch z roku 1984 J. Jakál dopĺňa poznatky o skôr opísaných poljách (Pôľč v severnej časti Bystrickej vrchoviny, Skalické polje na južnom úpätí Koniarskej planiny, Dlhá Lúka na Muránskej planine, okrajové Dlhoveské polje na rozhraní Silickej planiny a Bodvianskej pahorkatiny). Dlhá Lúka bola predtým opísaná ako semipolje. Okrajové Dlhoveské polje J. Jakál považuje za prechodnú formu medzi slepou dolinou a okrajovým poljom. Spomína aj veľkú úvalu na Geravách v Slovenskom ráji, ktorá vykazuje určité znaky prechodných foriem medzi úvalou a poljom. Hoci má stopy po korozívnom podrezávaní, otvorená je spätným ústupom svahovej doliny.

V roku 2000 J. Jakál súbornejšie charakterizoval inaktívne paleopolja na planinách Slovenského krasu, ktoré spočiatku opisoval ako krasové priehlbne (pozri Jakál, 1971, 1975). Pri určovaní a vymedzovaní poljí v západokarpatskom krase Jakál (1995, 2000)

uprednostňuje morfogenetické kritérium pred kritériom ich minimálnej veľkosti (naše polja sú väčšinou na dolnej hranici požadovaných rozmerov). V už zmienenej štúdii z roku 2001 o planinovom krase J. Jakál spomína krasové priehlbne v centrálnej časti Slovenského krasu (Plešivská a Silická planina) a v Slovenskom raji (planiny Geravy a Glac). Pritom konštatuje, že ich uzavretosť a plochosť dna, ako aj rozloha (asi 1 km²) spĺňajú morfológické kritériá poljí. Podľa veku povrchov zarovnania, do ktorých sú naše polja zahĺbené, predpokladá, že sú mladšie ako panónska stredohorská roveň (presnejšie určenie ich veku si vyžaduje analýzu a datovanie sedimentov uložených na dne poljí alebo v jaskyniach hydrograficky nadväzujúcich na dno poljí). Vývoj paleopoljí v Slovenskom krase spája s tektonickým pokojom, ktorý nastal po prvotnom vertikálnom rozčlenení krasových plôšín (stredohorského zarovnaného povrchu) v dôsledku ich tektonického výzdvihu spojeného s hĺbkovým krasovatením. Podobne písali o vzniku krasových depresii (s rozlohou nad 1 km²) na plošinách Mazúr a Jakál (1971).

V západnej časti Slovenského krasu (južne od Jelšavy, ako aj v oblasti Šivetíc a Kamienian) Mazúr a Jakál (1971) vyčlenili semipolja, za ktoré považovali uzatvorené kotliny v krase s mierne zvlneným pahorkatinovým reliéfom. Uvádzajú, že ich pôvodný tvar sa výrazne zmenil v dôsledku zaštrkovania koncom miocénu a neskoršieho odnosu štrkov zahlbujúcimi sa vodnými tokmi (niektoré uzavreté kotliny zanikli a iné sa prepojili s mladšími dolinami). V neskorších prácach o Slovenskom krase J. Jakál však tieto semipolja nespomína.

Jakál (1983) poukázal aj na depresiu so znakmi polja v exhumovanom paleokrase. V Strážovských vrchoch v okolí Mojtína (Zliechovská hornatina) opísal starú uzavretú krasovú depresiu vrchnokriedovo-paleocénneho veku, ktorá mala charakter polja (vtedajší reliéf niesol znaky tropického krasu). V depresii sa zachovali zvyšky brekcií a zlepcov (lutét) a mladších pieskencov a zlepcov s blokmi organogénnych vápencov (priabón), ktoré svedčia o fosilizáciu krasu eocénou výplňou. Terajšia depresia predstavuje exhumovaný paleokras, pričom v krasových jamách a iných vyhlbeninách sa zachovali bauxity (Jakál, 1983, 1997).

Kaňony a tiesňavy v karpatskej geomorfológii. V nadväznosti na monografiu z roku 1975 sa v súvislosti so skúmaním planinového krasu dotkol aj definovania kaňonov a tiesňav v karpatskej geomorfológii, ktoré sa sčasti odlišuje od klasických ponímaní týchto fluviokrasových foriem. Keďže rozpúšťanie hornín nie je pri ich vytváraní dominantné, J. Jakál ich nazval „dolinami v krase“. Pod kaňonom rozumie hlbokú dolinu rozčleňujúcu náhornú plošinu s charakteristickými strmými svahmi a širokou poriečnou nivou bez riečnych terás. Za tiesňavy považuje hlboké doliny so strmými svahmi, len niekoľko metrov širokým dnom a nevyrovnaným pozdĺžnym profilom koryta s kaskádami a krútnavovými hrncami na ich dne (Jakál, 1995, 2001, 2011).

Geomorfologický vývoj Západných Karpát zaznamenaný v povrchovom krase a jaskyniach. J. Jakál vo svojich publikáciách poukázal aj na význam a dôležitosť poznatkov o krasovom reliéfe pri objasňovaní geomorfologického vývoja Západných Karpát. V tejto súvislosti v štúdii z roku 1983 položil dôraz na krasové plošiny (zarovnané povrchy), kužeľové vrchy a jaskynné úrovne, pretože prispievajú k poznaniu širšieho paleogeografického obrazu krajiny.

Zdôraznil, že kras najlepšie zakonzervoval zvyšky panonského stredohorského zarovnaného povrchu (krasové plošiny), ktoré sa zachovali v oblastiach klasického planinového krasu, sčasti aj v polohách, ktoré ležia v rozdielnych nadmorských výškach v dôsledku neotektonického rozčlenenia Západných Karpát. Ďalej poukázal na okrajové krasové plošiny (pediplanačné povrchy), ktoré vznikli počas pokojnej medzifázy po prvotnom tektonickom výzdvihu stredohorského zarovnaného povrchu spojeného s hĺbkovým krasovatením.

V tom čase sa podľa neho v Slovenskom krase vytvárali paleopolja (pôvodne označované ako krasové priehlbne). V nižšej pozícii sa v krase zachovali zvyšky poriečneho systému zarovnávania (poriečna roveň) z vrchného pliocenu (v neskorších prácach zaradovaného do spodného pleistocénu).

Z pohľadu rekonštrukcie hlavných fáz vývoja reliéfu Západných Karpát považoval za potrebné riešiť aj problematiku vzniku ojedinelých kužeľovitých foriem reliéfu na krasových plošinách, ktoré vystupujú nad úroveň stredohorského zarovnaného povrchu. Sprvoti sa kužeľové vrchy na Plešivskej a Koniarskej planine považovali za zvyšky tropického kužeľového krasu. J. Jakál skonštatoval, že kužeľové vrchy v okrajových častiach týchto planín možno tvarom a okrajovou polohou skôr charakterizovať ako premodelované tektonicky vyzdvižené kryhy. V štúdií o planinovom krase z roku 2001 píše, že „*tvarom plochého kužela nepripomínajú kužele tropického krasu*“, čo konzultoval priamo v teréne s prof. H. Lehmannom a prof. J. Rogličom. Niektoré kužeľovité vyvýšeniny sa viažu na litologicky a stratigraficky odlišné karbonáty, iné predstavujú typické štruktúrne tvrdoše. Konštatuje, že väčšinou ide o staršie elevácie dotvorené v čase vytvárania stredohorského povrchu v klíme blížiacej sa tropickej. Ich morfológické znaky (pomerne výrazné úpätie na prechode do stredohorskej rovne, bez ostrého podrezania strmého svahu) však nesvedčia o typickom vývoji kužeľového krasu. Kopovité vrchy vystupujúce z plochého a širokého chrbta so zvyškami stredohorského zarovnaného povrchu Jakál (1997) opísal aj v Strážovských vrchoch v oblasti Hrubej Kačky. Keďže sú ostro ohraničené konvexnými svahmi, považoval ich za zvyšky staršieho kužeľového paleokrasu formovaného v klimatických podmienkach blízkych tropickým

Poukazujúc na paleogeografický význam jaskynných úrovní v krasových územiach Jakál (1983) zdôraznil, že ich skúmaním možno posúdiť intenzitu tektonických pohybov, resp. ich vyzdvihovú alebo poklesovú tendenciu v určitej etape vývoja reliéfu. V nadväznosti na staršie výskumy opätovne upriamil pozornosť na synchronný vývoj jaskynných úrovní a riečnych terás na povrchu, ktorý odráža dôležité fázy vývoja reliéfu vo vrchnom pliocéne a kvartéri. Poznamenal, že riešenie tejto problematiky väčšinou presahuje rámec predmetného krasového územia a vzťahuje sa na väčšiu časť povodia vodných tokov.

Problematikou vývoja jaskynných úrovní sa J. Jakál zaoberal najmä v jaskyni Domica v južnej časti Slovenského krasu, kde okrajové kryhy karbonátov južne od štítnického zlomu poklesli a boli pokryté poltárskym súvrstvom. Predpokladal jej dvojetapový vývoj pred pontom a počas pliocénu a kvartéru s opačným vývojom jaskynných úrovní. Na základe vrtu v Panenskej chodbe písal o najspodnejšej úrovni vyplnenej štrkmi poltárskeho súvrstvia, ktorú považoval za najstaršiu.

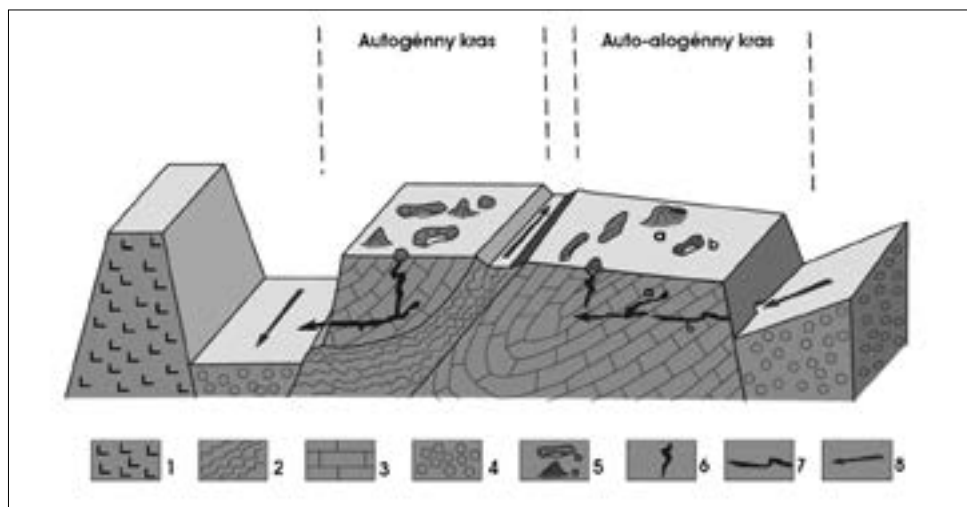
Pri riešení genézy Dobšinskej ľadovej jaskyne Jakál (1971) usúdil, že jej horné úrovňové časti sa vytvárali ponornými vodami Hnilca koncom treťohôr vo vrchnom pliocéne, keď sa na povrchu pozdĺž riek vytvárala poriečna roveň. V čase výskumu jaskyne J. Jakálom hlavné vývojové úrovne príľahlej Stratenskej jaskyne neboli ešte známe. V zhode s predchádzajúcimi štúdiami píše, že zaľadnená dutina jaskyne vznikla preborením skalných podláh medzi horizontálnymi chodbami vytvorenými v niekoľkých vývojových úrovniach. Predpokladá existenciu ďalšej jaskynnej úrovne medzi hornými a spodnými časťami Dobšinskej ľadovej jaskyne (v priestore terajšieho Prízemia).

Krasová krajina ako špecifický prírodný geosystém, jej racionálne využívanie a ochrana. Okrem krasovej geomorfológie sa J. Jakál ako fyzický geograf dôkladne zaoberal aj komplexným geoeologickým výskumom krasu. Zdôraznil, že krasovými procesmi sa vytvára špecifický prírodný geosystém vzájomne zviazaných i ovplyvňujúcich sa geokomponentov – krasovatených hornín, vôd cirkulujúcich na povrchu i v podzemí, georeliéfu, klímy, pôd, rastlínstva a živočíšstva, ako aj človeka (Jakál, 1978, 1984, 1986). Bližšie objasnil,

že vedúcimi a rozhodujúcimi komponentmi v krasovej krajine, ktoré určujú jej základný charakter a priestorovú diferenciáciu, sú georeliéf a vody (Jakál, 1986).

Vo viacerých štúdiách zdôvodnil a zdôraznil, že krasové geosystémy sú veľmi labilné a zraniteľné, pričom regeneračná schopnosť krasovej krajiny vrátane jaskýň je malá, v niektorých prípadoch až nemožná (Jakál, 1979, 1984, 2000, 2002). Odolnosť krasovej krajiny, najmä vo vzťahu k vlastnostiam georeliéfu Jakál (2002) posúdil na základe: (1) odolnosti podložia (geomorfologickej hodnoty hornín), (2) morfologickej odolnosti a konfigurácie terénu (nadmorskej výšky určujúcej klimatické podmienky pre intenzitu krasovatenia, sklonitosti a relatívnej členitosti, resp. energie reliéfu ovplyvňujúcich infiltráciu zrážkových vôd do podzemia), (3) štruktúrnej odolnosti (priestorovej mozaiky foriem reliéfu) a súviacej lokačnej odolnosti spojenej s prenosom látok a energie v krasovej krajine (najmä vzťahov medzi vypuklými a vyhlbenými povrchovými formami reliéfu a medzi vyhlbenými povrchovými formami a podzemnými priestormi), (4) filtračnej odolnosti a (5) odolnosti danej stavom geosystému (stupňa povrchového a podzemného krasovatenia, súčasného autogénneho, alogénneho alebo zmiešaného auto-alogénneho vývoja podmieňujúceho vzťahy medzi krasom a jeho okolím).

V štúdií z roku 2004 prehľadne preukázal, že v závislosti od autochtónnej, auto-alochtónnej alebo alochtónnej pozície nepokrytého krasu, vyskytujúceho sa v súvislých alebo izolovaných polohách, je krasová krajina vystavená diferencovanému vplyvu exogénnych činiteľov na jaskynné geosystémy, ako aj zaťaženiu antropogénnymi činnosťami, ktoré sa realizujú priamo na krasovom území alebo ich negatívny vplyv sa do krasu prenáša vplyvom silných horizontálnych väzieb fungujúcich v krajinných systémoch. V rámci krasových území Západných Karpát ako typický príklad alogénneho krasu uvádza kras monoklinálnych chrbtov Demänovského krasu, autogénneho krasu centrálne časti planín Slovenského krasu



Autogénny a zmiešaný auto-alogénny planinový kras: 1 – paleozoické horniny; 2 – nepriepustné spodnotriasové horniny; 3 – masívne skrasovatené stredno- a vrchnotriasové vápence; 4 – miocénne štrky a piesky; 5 – a) krasové kužele, b) krasové jamy; 6 – jaskyne; 7 – podzemné autochtónne a alochtónne toky; 8 – povrchové alochtónne toky (Jakál, 2004).

Autogenic and mixed auto-allogenic plateau karst: 1 – Paleozoic rocks; 2 – impermeable Lower Triassic rocks; 3 – massive karstified Middle and Upper Triassic limestones; 4 – Miocene gravels and sands; 5 – a) karst cones, b) karst dolines; 6 – caves; 7 – a) underground autochthonous and allochthonous streams; 8 – surface allochthonous streams (Jakál, 2004).

a Slovenského raja, ako aj monoklinálny kras Belianskych Tatier. Ako príklad zmiešaného auto-alogénneho krasu uvádza okrajové časti planín v Slovenskom krase i Slovenskom raji, ktoré sú atakované aj alochtónnymi vodnými tokmi.

Z hľadiska ochrany prírody Jakál (1979) zdôraznil, že podstatou ochrany jaskyne je zachovanie jej prírodného režimu v danom štádiu jej vývoja, spolu so zachovaním všetkých prírodných faktorov krajiny, ktoré na jaskyňu vplývajú priamo alebo v interakcii s inými faktormi krajiny umožňujúcimi udržať prírodnú rovnováhu nielen v jaskynnom prostredí a na povrchu krasu, ale aj v ich vzájomnom prepojení. Poukázal na potrebu ochranných pásiem jaskýň, ktoré sú ohrozené antropogénnou činnosťou nad nimi a v ich okolí. Určil kritériá vymedzenia ochranného pásma jaskyne. Apeloval, že pred vymedzením ochranného pásma treba analyzovať všetky prírodné faktory krajiny (topografické a geomorfologické pomery, geologické štruktúry, tektonické a litologické vlastnosti hornín, hydrologické, hydrografické a pôdne pomery, vegetáciu i klímu), ktoré súvisia s jaskyňou, a vymedziť hranice ich vplyvu.

Ďalej charakterizoval špecifické vlastnosti zaľadených a aragonitových jaskýň a určil základné zásady ich ochrany. Nastolil základné pravidlá a problémy, ktoré treba zväžiť pred sprístupňovaním jaskýň: (1) atraktivnosť, bohatstvo a rozmiestenie sekundárnej výplne (kvapľovej výzdoby) v jaskyni, (2) tektonické pomery a statiku podzemných priestorov, (3) vedeckú hodnotu jaskyne (morfológickú, biologickú, archeologickú atď.) a (4) geografickú polohu jaskyne vzhľadom k iným už sprístupneným jaskyniam (Jakál, 1979). Ním nastolené zásady a postupy pri ochrane krasu a jaskýň sa postupne rozpracovávali a doteraz sa využívajú. Viaceré z nich sa dostali aj do zákona č. 543/2002 Z. z. o ochrane prírody a krajiny v znení neskorších predpisov a Vyhlášky č. 170/2021 Z. z. Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa vykonáva tento zákon. Jakál (1979) určil aj základné úlohy amatérskej speleológie pri ochrane krasu a jaskýň.

Poukazujúc na priestorové interakcie a vzťahy v krasovej krajine analyzoval a opísal problémy znečistenia a ohrozenia jaskýň v Slovenskom krase (Silická planina) a Ponickom krase (Jakál, 1979, 1984). Pritom jasne preukázal, že negatívne antropogénne zásahy v jaskyniach nie sú dôsledkom iba nevhodnej, resp. neprimeranej antropogénnej činnosti priamo v ich podzemí, ale aj v spádových oblastiach jaskýň, odkiaľ sa znečisťujúce látky dostávajú do krasu najmä prúdením vody alebo vzduchu. Preto v nadväznosti na predchádzajúce pozorovania a analýzy Jakál (1982) rozlíšil priame a nepriame antropogénne vplyvy na jaskyne.

Jakál (1991, 2002) zhodnotil potenciál krasovej krajiny z hľadiska jej vhodnosti na využívanie človekom. Antropogénne aktivity zoradil v poradí od vhodnejších po najmenej vhodné: 1. vodné hospodárstvo, 2. lesné hospodárstvo, 3. cestovný ruch, 4. poľnohospodárstvo a 5. priemysel. Pritom podotýka, že jednotlivé aktivity sa navzájom ovplyvňujú. Silné skrasovatenie krasových plošín, prejavujúce sa napr. početnými, husto vyskytujúcimi sa krasovými jamami v planinovom krase, vylučuje výstavbu sídel. Výrazne členitý reliéf horských typov krasu a jeho morfometrické parametre limitujú využitie krajiny človekom. Najviac je ohrozený kotlinový typ krasu, na ktorom sa vybudovali viaceré sídla, komunikácie i technické stavby. Antropogénne zásahy do krasovej krajiny častokrát vedú k nepriaznivej odozve v jej prírodných zložkách, procesoch a fungovaní so zmenou pôvodného rázu povrchu i podzemia krasu. Pritom sa môžu znížiť, obmedziť až vylúčiť niektoré čiastkové potenciály krasovej krajiny na jej využívanie človekom.

V súvislosti s analyzovaním fungovania krasovej krajiny sa J. Jakál (2000, 2006) zaoberal aj geomorfologickými hrozbami a rizikami (geohazardmi), vrátane jaskýň. Uvádza, že extrémne geomorfologické procesy, charakteristické náhlym nástupom, rýchlym priebehom a krátkou dobou trvania, sú v krase prejavom lability krasového geosystému. Extrémne geomorfologické procesy, ktoré prebiehajú v krase, sú vyvolané procesmi roz-



J. Jakál na Správe slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši v roku 2005, počas zostavovania monografie o jaskyniach svetového dedičstva na Slovensku. Zľava: Ľudovít Gaál, Jozef Jakál, Anton Droppa a Pavel Bella. Foto: J. Zelinka

J. Jakál at the Slovak Caves Administration in Liptovský Mikuláš in 2005, during the completion of a monograph on the World Heritage caves in Slovakia. From left to right: Ľudovít Gaál, Jozef Jakál, Anton Droppa and Pavel Bella. Photo: J. Zelinka

púšťania karbonátových hornín (procesom krasovatenia), fyzikálnym zvetrávaním hornín, procesmi gravitačného rútenia, avšak najčastejšie kombináciou všetkých troch procesov. Akcelerácia niektorých procesov je odozvou na nevhodné aktivity človeka.

Nasmerovanie rozvoja slovenského jaskyniarstva. J. Jakál ako fyzický geograf začal integrovaný prístup v riadení nášho jaskyniarstva presadzovať v roku 1970, keď sa stal riaditeľom Správy slovenských jaskýň (pozri Jakál, 1970, 1973; Jakál a Nemec, 1970). Následne Štefan Homza a J. Jakál detailnejšie rozpracovali koncepciu rozvoja slovenského jaskyniarstva v rokoch 1971 – 1985 (Š. Homza sa stal riaditeľom Správy slovenských jaskýň po odchode J. Jakála na Geografický ústav SAV v Bratislave). Koncepcia zahrňovala rozvoj sprístupnených jaskýň, majetkovoprávne otázky a ekonomické využitie jaskýň, opatrenia v prevádzke jaskýň, propagáciu jaskýň, ako aj prieskum, výskum a ochranu jaskýň. Zdôrazňuje potrebu a nevyhnutnosť, aby rozvoj, prevádzka a ochrana jaskýň boli založené na vedeckých a odborných poznatkoch. Načrtáva a rozpraváva integrovaný prístup zabezpečovania týchto dôležitých a spoločensky prospešných činností v rámci jednej špecializovanej odbornej organizácie na Slovensku v úzkej spolupráci so Slovenskou speleologickou spoločnosťou.

Vtedajšie zmeny v slovenskom jaskyniarstve boli dôsledkom nejednotného a nekonceptného riadenia slovenských sprístupnených jaskýň do roku 1970. Preto na základe rozhodnutia Vlády SSR z 23. 5. 1969 od 1. 1. 1970 vznikla Správa slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši. Hoci jaskyne sú neodmysliteľnou časťou prírody, odborné i personálne požiadavky na ich komplexnú ochranu, starostlivosť a prevádzku sa výrazne odlišujú od ochrany povrchových častí prírody. Hlavné zásady koncepcie sa vzhľadom na rozloženie a prírodné špecifiká krasu a jaskýň na Slovensku, ako aj odborné požiadavky, nevyhnutné na zabezpečovanie predmetných činností, v nasledujúcich desaťročiach dostatočne osvedčili.

Vzhľadom na značnú geo- a biodiverzitu jaskýň na Slovensku, jednotný prístup ochrany jaskýň by sa mal zachovať aj napriek snahám o oddelenie ochrany a prevádzky časti jaskýň na územnom princípe pod jednotlivé správy národných parkov. Navyše u nás dlhodobo pretrvávajú naliehavý problém nedostatku odborníkov – špecialistov na výskum a ochranu

jaskýň v rámci celého Slovenska. Zámery reorganizácie súvisia so zmenami v správe územia v rámci reformy národných parkov (správy národných parkov sú od 1. 4. 2023 zriadené ako samostatné odborné organizácie ochrany prírody v rezorte životného prostredia). Správa slovenských jaskýň výsledkami svojej výskumnej a odbornej činnosti spolu so Slovenskou speleologickou spoločnosťou, ktorá na dobrovoľnej báze vykonáva prieskum a ochranu jaskýň, jednotne prezentujú a zastupujú slovenské jaskyniarstvo v zahraničí a medzinárodných speleologických organizáciách. Presadzovaná dezintegrácia správy jaskýň neodráža a nereflektuje doterajšie výsledky a skúsenosti z praxe pri ochrane a prevádzke jaskýň na Slovensku, nedostatočne zohľadňuje dôležitosť a špecifické nároky a potreby na komplexnú ochranu a prevádzku jaskýň v rámci celého územia Slovenska, čo J. Jakál začal presadzovať a uplatňovať v praxi už pred viac ako 55 rokmi. Tento prístup sa u nás osvedčil a napredoval v nasledujúcich desaťročiach.

ZÁVER

Výsledky celoživotnej tvorivej vedeckej práce J. Jakála sú dôležitým zdrojom a východiskom pre ďalší výskum planinového krasu a mnohých ďalších krasových území na Slovensku. V našej literatúre ďalej etabloval a rozpracoval komplexný fyzickogeografický prístup výskumu krasovej krajiny s praktickými environmentálnymi aplikáciami. Základné teoreticko-metodologické postupy geokologického výskumu krasu od J. Jakála sú významné aj z nadnárodného hľadiska, štúdie podobného zamerania sú zriedkavé a menej komplexne koncipované. J. Jakálom zostavená knižná publikácia *Praktická speleológia* výrazne prispela k zvyšovaniu odborného potenciálu členov Slovenskej speleologickej spoločnosti. Na významnosť a dôležitosť vedeckej práce J. Jakála poukazujú početné ohlasy na jeho publikácie, ktoré výrazne obohatili slovenskú geomorfologickú a karsologickú literatúru. Mnohé jeho publikácie sú jedinečné a zaradili sa medzi originálne diela slovenskej krasovej geomorfológie a geokológie. J. Jakál nastolil základné smerovanie integrovaného prístupu ochrany a prevádzky jaskýň na Slovensku na vedeckých a odborných základoch a postupoch, čo sa v našich podmienkach osvedčilo a úspešne rozvíja (tento prístup uznávajú aj mnohí odborníci zo zahraničia).

VÝBER BIBLIOGRAFIE JOZEFA JAKÁLA

Vedecké monografie

Jakál, J., 1975. Kras Silickej planiny. Osveta, Martin, 152 s.

Jakál, J., 1993. Karst Geomorphology of Slovakia. Typology, Map on the scale 1 : 500 000. Geographia Slovaca, 4, 38 s.

Kapitoly v editovaných vedeckých monografiách

Mazúr, E., Jakál, J., 1971. Podklad a reliéf. In Mazúr, E. a kol.: Slovenský kras. Regionálna fyzickogeografická analýza. Geografické práce, 2, 1–2, 6–22.

Bystrický, J., Mazúr, E., Jakál, J., 1972. Karst of Czechoslovakia. In Herak, M., Stringfield, V. T. (Eds.): Karst. Important karst regions of the Northern Hemisphere. Elsevier, Amsterdam, 297–325.

Czudek, T., Jakál, J., 1993. Geomorphology in Czechoslovakia. In Walker, H. Y., Grabau, W. E. (Eds.): The Evolution of Geomorphology. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 121–128.

Gaál, L., Bella, P., Jakál, J., 2022. Slovak Karst: Surface and Subsurface Geodiversity of the Karst Plateau in the Temperate Climate Zone. In Lehotský, M., Boltížiar, M. (Eds.): Landscapes and Landforms of Slovakia. World Geomorphological Landscapes. Springer, Cham, 323–349. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89293-7_17

Editované vedecké, odborné a prezentačné monografie

- Mazúr, E., Jakál, J. (Eds.), 1982: Atlas SSR. Textová časť. Veda, Bratislava, 164 s.
- Jakál, J. (Ed.), Abonyi, A., Bárta, J., Gulička, J., Hipman, P., Mitter, P., Rajman, L., Slančík, J., 1982. Praktická speleológia. Osveta, Martin, 384 s.
- Jakál, J., Kortman, B. a kol., 1987. Jaskyne a jaskyniari. Osveta, Martin, 144 s.
- Jakál, J. (Ed.), 1988. Ochrana reliéfu. Slovenský zväz ochrancov prírody a krajiny, Bratislava, 120 s.
- Jakál, J. (Ed.), Bella, P., Gaál, L., Hlaváč, J., Kováč, L., Lalkovič, M., Soják, M., Zelinka, J., 2005. Jaskyne svetového dedičstva na Slovensku. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 159 s.
- Jakál, J., Bella, P. (Eds.), Gaál, L., Haviarová, D., Hlaváč, J., Kováč, L., Lalkovič, M., Soják, M., Zelinka, J., 2008. Caves of the World Heritage in Slovakia. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 159 s.

Kapitoly v editovaných odborných monografiách

- Jakál, J., Urbánek, J., 1979. Vrchovinná krajina. In Urbánek, J. a kol.: Chránime prírodu a krajinu. Príroda, Bratislava, 123–138.
- Jakál, J., Urbánek, J., 1979. Hornatinná krajina. In Urbánek, J. a kol.: Chránime prírodu a krajinu. Príroda, Bratislava, 138–151.
- Jakál, J., 1982. Z histórie speleologického výskumu na Slovensku. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 7–11.
- Jakál, J., 1982. Krasový reliéf. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 13–30.
- Jakál, J., 1982. Formy krasového reliéfu. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 31–54.
- Jakál, J., 1982. Typy krasového reliéfu. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 101–112.
- Jakál, J., 1982. Kras ako špecifické životné prostredie a možnosti jeho využitia. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 243–255.
- Jakál, J., 1982. Ochrana krasu a jaskýň. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 327–338.
- Jakál, J., 1982. Kras v Československu. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 339–359.
- Jakál, J., 1982. Rozšírenie krasu a jaskýň vo svete. In Jakál, J. a kol.: Praktická speleológia. Osveta, Martin, 361–378.
- Jakál, J., Urbánek, J., 1988. Reliéf a jeho miesto v krajine. In Jakál, J. (Ed.): Ochrana reliéfu. Slovenský zväz ochrancov prírody a krajiny, Bratislava, 7–11.
- Jakál, J., 1988. Ľadovcový reliéf. In Jakál, J. (Ed.): Ochrana reliéfu. Slovenský zväz ochrancov prírody a krajiny, Bratislava, 29–35.
- Jakál, J., 1988. Periglaciálne formy reliéfu. In Jakál, J. (Ed.): Ochrana reliéfu. Slovenský zväz ochrancov prírody a krajiny, Bratislava, 36–40.
- Jakál, J., 1988. Krasový reliéf. In Jakál, J. (Ed.): Ochrana reliéfu. Slovenský zväz ochrancov prírody a krajiny, Bratislava, 41–45.
- Jakál, J., 1994. Ochrana krasového reliéfu. In Rozložník, M., Karasová, E. (Eds.): Chránená krajinná oblasť – Biosférická rezervácia Slovenský kras. Osveta, Martin, 410–418.
- Jakál, J., 2005. Slovensko – krajina krasu a jaskýň. In Jakál, J. (Ed.): Jaskyne svetového dedičstva na Slovensku. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 11–14.
- Jakál, J., 2005. Krajina Národného parku Slovenský kras. In Jakál, J. (Ed.): Jaskyne svetového dedičstva na Slovensku. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 15–26.
- Jakál, J., 2005. Voda v krase. In Jakál, J. (Ed.): Jaskyne svetového dedičstva na Slovensku. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 27–34.
- Jakál, J., Gaál, L., 2005. Ochrana krasu a jaskýň. In Jakál, J. (Ed.): Jaskyne svetového dedičstva na Slovensku. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 147–157.

- Bella, P., Jakál, J., 2008. Slovak Karst National Park – remarkable landscape on the surface and underground. In Jakál, J., Bella, P. (Eds.): Caves of the World Heritage in Slovakia. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 11–16.
- Jakál, J., Bella, P., 2008. Water – creative agent of karst and caves. In Jakál, J., Bella, P. (Eds.): Caves of the World Heritage in Slovakia. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 25–36.
- Jakál, J., 2008. The surface morphology of karst landscape. In Jakál, J., Bella, P. (Eds.): Caves of the World Heritage in Slovakia. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 37–46.
- Jakál, J., Gaál, Ľ., Haviarová, D., 2008. Protection of karst and caves. In Jakál, J., Bella, P. (Eds.): Caves of the World Heritage in Slovakia. SSJ, Liptovský Mikuláš – Knižné centrum, Žilina, 155–166.

Vedecké články v časopisoch

- Jakál, J., 1968. Prehľad názorov na vývoj krasových území a ich odraz vo výskume krasu Slovenska. Geografický časopis, 20, 2, 163–177.
- Mazúr, E., Jakál, J., 1969. Typologické členenie krasových oblastí na Slovensku. Slovenský kras, 7, 5–40.
- Jakál, J., 1971. Morfológia a genéza Dobšinskej ľadovej jaskyne. Slovenský kras, 9, 27–33.
- Jakál, J., 1971. Príspevok k poznaniu vzniku krasových priehlbni v Slovenskom krase. Geografický časopis, 23, 4, 305–315.
- Jakál, J., 1973. Genetické typy pešcer Slovakii i ich svjaz s reľefom, litologiej i tektonikoj. Slovenský kras, 11, 3–13.
- Jakál, J., 1975. Az emberi tevékenység negatív hatásai és annak megjelenésformái a karsztvidéken. Földrajzi Közlemenyek, 23, 1, 19–26.
- Jakál, J., 1978. Morfoštruktúrna analýza a jej využitie pri typológii krasu. Slovenský kras, 26, 17–37.
- Jakál, J., 1978. Kras ako špecifické životné prostredie. Speleologický vestník, 10, 7–10.
- Jakál, J., 1979. Príspevok k problematike ochrany krasovej krajiny a jaskýň. Slovenský kras, 17, 3–22.
- Jakál, J., 1981. Geografický obraz východnej Kuby a jej krajinné typy. Geografický časopis, 33, 2, 167–179.
- Jakál, J., 1983. Krasový reliéf a jeho význam v geomorfologickom obraze Západných Karpát. Geografický časopis, 35, 2, 160–183.
- Jakál, J., 1984. Príspevok k poznaniu polji v Západných Karpatoch. Geografický časopis, 36, 2, 108–119.
- Jakál, J., 1986. Krasová krajina ako špecifický prírodný geosystém. Slovenský kras, 24, 3–26.
- Jakál, J., 1990. Hornolehotský kras Horehronského podolia. Slovenský kras, 28, 59–70.
- Jakál, J., Lacika, J., Stankoviansky, M., Urbánek, J., 1990. Morfoštruktúrnyj analiz gornego massiva Malých Karpat. Geomorfologija, 21, 4, 97–109.
- Jakál, J., 1991. Natural Resources of a Karst Landscape and Possibilities of their Utilization. Slovenský kras, 29, 3–29.
- Jakál, J., 1991. Poznámky k výskytu paleokrasu kriedovo-paleocénneho veku v Malých Karpatoch. Slovenský kras, 29, 79–81.
- Jakál, J., Bella, P., 1991. Karst of the Demänovské vrchy Mts; Morphology, Contemporaneous Processes and Human Impact. Studia carsologica, 4, 15–28.
- Jakál, J., 1992. Bewertung der Naturressourcen und Landnutzung in der Karstlandschaft. Materialien zur Didaktik der Geographie, 15, Trier, 374–383.
- Jakál, J., Feranec, J., Harčár, J., Lacika, J., Urbánek, J., 1992. Využitie radarových záznamov v geomorfológii. Mineralia slovac, 24, 257–269.
- Drdoš, J., Jakál, J., 1992. Das Becken der Oberen Neutra. Modellfall der Umweltzerstörung in der slowakischen Region. Österreichische Osthefte, 34, 3, 430–451.
- Jakál, J., 1993. Geomorfológia krasu Slovenska. Mapa 1 : 500 000. Slovenský kras, 31, 13–28.

- Jakál, J., 1993. Vplyv odkalísk popola na krajinu v oblasti Chalmovej na Hornej Nitre. *Geografický časopis*, 45, 1, 67–79.
- Urbánek, J., Jakál, J., Feranec, J., 1993. A new look at the Slovak Carpathians in the light of radar data. *ITC Journal*, 4, 355–359.
- Drdoš, J., Ira, V., Jakál, J., Kollár, D., Krajčír, A., Székely, V., Szöllös, J., 1994. The Upper Nitra region: man and his environment. *Geografický časopis*, 46, 2, 131–148.
- Jakál, J., 1995. Aktivita človeka v krase a ich odozva v krasovej krajine. In Bezák, A., Kollár, D. (Eds.): XI. zjazd Slovenskej geografickej spoločnosti. Vybrané referáty z vedeckej konferencie, Bratislava, 1995. *Geographia Slovaca*, 10, 85–90.
- Jakál, J., 1995. Geological-structural and paleoclimatic conditions of the development of underground karst of the Western Carpathians. *Studia Carsologica*, 6, 117–130.
- Jakál, J., 1995. Einfluss der Neotektonik auf die Reliefigenese des Slowakischen Karstes. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, Wien, 137, 125–132.
- Jakál, J., 1996. Änderungen der Landschaft hervorgerufen durch die wirtschaftlichen Aktivitäten des Menschen in der oberen Neutra. In Horst, F., Pfeffer, K.-H. (Eds.): Interaktion von Ökologie und Umwelt mit Ökonomie und Raumplanung. *Tübinger geografische Studien*, 116, 153–164.
- Jakál, J., 1997. Reliéf Strážovských vrchov, analýzy typov krasu a ich genéza. *Geografický časopis*, 49, 1, 3–18.
- Jakál, J., 1998. Antropická transformácia reliéfu a jej odraz v krajine Hornej Nitry. *Geografický časopis*, 50, 1, 3–20.
- Jakál, J., 1998. Extrémne geomorfologické procesy ako prírodné živly. *Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Prešovensis, Prírodné vedy*, 30, 2, *Folia geographica*, 2, 297–304.
- Jakál, J., 2000. Extrémne geomorfologické procesy v krase. *Geografický časopis*, 52, 3, 211–219.
- Jakál, J., 2000. Environmental Changes of Karst Landcape of Slovakia. *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, München, 46, 1–2, 42–46.
- Jakál, J., 2001. Porovnávací analýza krasových planín Západných Karpát. *Geografický časopis*, 53, 1, 3–20.
- Jakál, J., 2001. Krasové okrajové roviny a podstredohorská roveň. *Geomorphologia Slovaca*, 1, 1, 40–45.
- Jakál, J., 2001. Vývoj reliéfu Slovenského krasu v etape neotektonického vyzdvihnutia územia. *Slovenský kras*, 39, 7–14.
- Jakál, J., 2002. Krasová krajina, jej vlastnosti a odolnosť voči antropickým vplyvom. *Geografický časopis*, 54, 4, 381–392.
- Jakál, J., 2002. Kontaktný kras – formy a procesy. *Geomorphologia Slovaca*, 2, 1, 13–18.
- Jakál, J., 2002. Geomorfológia krasu Tribča. In Bezák, A. (Ed.): *Luknišov zborník*, 3. *Geographia Slovaca*, 18, 85–90.
- Jakál, J., 2004. Podmienky autochtónneho a alochtónneho vývoja krasového reliéfu Západných Karpát. *Geografický časopis*, 56, 2, 141–152.
- Urbánek, J., Jakál, J., 2004. Changes in the Slovak geomorphology. *Geomorphologia Slovaca*, 4, 1, 82–88.
- Jakál, J., 2005. Hlavné názorové smery na genézu a vek krasových plošín Západných Karpát. *Slovenský kras*, 43, 5–15.
- Jakál, J., 2005. Vlastnosti geologickej štruktúry a ich odraz v usmernení procesov krasovatenia. *Geomorphologia Slovaca*, 5, 2, 16–22.
- Jakál, J., 2006. Geomorfologické hrozby a riziká v krase Slovenska. *Slovenský kras*, 44, 5–22.
- Minár, J., Barka, I., Jakál, J., Stankovišský, M., Trizna, M., Urbánek, J., 2006. Geomorphological hazards in Slovakia. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 11, 61–78.
- Jakál, J., 2007. Postavenie krasových regiónov v systéme geomorfologických jednotiek Slovenska. *Slovenský kras*, 45, 5–13.

- Jakál, J., 2007. Úloha krasového reliéfu pri vyčleňovaní geomorfologických jednotiek Slovenska. *Geografický časopis*, 59, 3, 293–302.
- Jakál, J., 2008. Geomorfologická regionalizácia krasu. *Aragonit*, 13, 1, 3–7.
- Jakál, J., 2009. Dynamika riečnych geosystémov v jaskynnom prostredí. *Geografický časopis*, 61, 3, 243–254.
- Minár, J., Barka, I., Hofierka, J., Hreško, J., Jakál, J., Stankoviánsky, M., Trizna, M., Urbánek, J., 2009. Natural geomorphological hazards in Slovakia. In Ira, V., Lacika, F. (Eds.): *Slovak Geohraphy at the Beginning of the 21st Century*. *Geographia Slovaca*, 26, 201–220.
- Jakál, J., 2011. Morfológia dolín v krase a jej vplyv na vývoj riečneho geosystému. *Slovenský kras*, 49, 2, 101–110.

Publikácie z vedeckých konferencií a odborných seminárov

- Mazúr, E., Jakál, J., 1969. Grundsätze der typologischen Gliederung des Karstes der Slowakischen Karpaten. 5. Internationaler Kongress für Speläologie (Stuttgart 1969), 1, Abhandlungen. Verband der deutschem Höhlen- und Karstforschen e.V., München, M21/1–7.
- Mazúr, E., Jakál, J., 1973. Basic types of the karst areas in Slovakia. Field trip guide (Exkurzia B–I), 6th international Congress of Speleology, Olomouc 1973, 35 p.
- Mazúr E., Jakál J., 1976. Basic principles of the typological division of karst in the Western Carpathians. In Panoš, V. (Ed.): *Proceedings of the 6th International Congress of Speleology, Olomouc 1973*. Academia, Praha, 237–248.
- Jakál, J., 1978. Niektoré problémy priestorového usporiadania krajiny na Hornej Nitre. Problémy ochrany prírody a krajiny. Zborník referátov. Prievidza, 61–77.
- Jakál, J., 1982. Hydrologické pomery a kras Nízkyh Tatier. In *Koncepcia ochrany Národného parku Nízke Tatry*. Zborník referátov. Bratislava, 82–89.
- Jakál, J., 1982. Štruktúra krajiny Slovenského krasu. In *Problematika využívania a ochrany Slovenského krasu*. Zborník referátov z VIII. celoslovenského seminára SZOPK, Rožňava, 9–19.
- Jakál, J., 1984. Anorganická príroda a jej funkcia v prírodnom prostredí CHKO Slovenský raj. Súčasný stav a perspektívy Chránenej krajinnnej oblasti Slovenský raj. Zborník referátov. Správa CHKO Slovenský raj, Spišská Nová Ves, 26–33.
- Jakál, J., 1987. Problémy ochrany krasových oblastí Slovenska. In Demek, J. (Ed.): *Ochrana krasových oblastí a životního prostředí*. Stalagmit, Zvláštní příloha ze semináře, Lipovec 28. – 30. 10. 1983. ČSS, Praha, 4–10.
- Jakál, J., 1989. Entwicklungsetappen des Karstreliefs der Westkarpaten. In Pinczes, Z. (Ed.): *Proceedings, Carpatho-Balkan Geomorphological Commission, Debrecen*, 33–42.
- Jakál, J., 1993. Vplyv banskej činnosti na krajinu Hornej Nitry. In Novodomec, R. (Ed.): *Geografia a aktivity človeka v krajine*. Zborník zo seminára, Prešov 20. – 21. 10. 1993. Pedagogická fakulta UPJŠ v Prešove, Prešov, 20–24.
- Jakál, J., 1994. Aktivity človeka a ich odozva v krasovej krajine. In Mariot, P. (Ed.): *Zborník abstraktov, referátov na 11. zjazde SGS, Častá 10. – 12. 11. 1994*. Slovenská geografická spoločnosť, 6.
- Jakál, J., 1992. Influence of neotectonics on development of river network changes in the Low Tatra Mts. and the Popradská kotlina Basin. In Stankoviánsky, M. (Ed.): *Excursion guide-book. International symposium: time, frequency and dating in geomorphology, Tatranská Lomnica – Stará Lesná, June 1992*. Institute of Geography, SAS, Bratislava, 42–45.
- Jakál, J., 1994. Tektonisch bedingte Reliefformen Slowakischen Karst. Fischer, H. (Ed.): *Geomorphologie der Gebirge und ihrer Vorländer, 1. Mitteleuropäische geomorphologentagung, Wien 1994*. Institut für Geographie, Universität Wien, 77–78.
- 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*. SMOPaJ, Liptovský Mikuláš, 78–80.

- Jakál, J., 1995. Ľadové jaskyne stredohorí a vysokých pohorí, geomorfologické a mikroklimatické porovnanie. In P. Bella (Ed.): Ochrana ľadových jaskýň. Zborník referátov z odborného seminára, Dobšinská ľadová jaskyňa 21. – 22. 9. 1995. SSJ, Liptovský Mikuláš, 57–60.
- Jakál, J., 1995. Usmernené procesy krasovej denudácie. In Trizna, M. (Ed.): Vybrané problémy súčasnej geografie a príbuzných disciplín. Zborník referátov z medzinárodnej konferencie pri príležitosti 75. narodenín prof. RNDr. Pavla Plesníka, DrSc., Bratislava 14. – 15. 3. 1995. Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, 89–95.
- Jakál, J., 1996. Krasový fenomén Krivánskej Malej Fatry. In Bezák, A., Paulov, J., Zaťko, M. (Eds.): Luknišov zborník, 2. Slovenská geografická spoločnosť pri SAV, Geografický ústav SAV, Geografická sekcia Prírodovedeckej fakulty UK, Bratislava, 83–88.
- Jakál, J., 1996. Vplyv reliéfu na mikroklimu a miestnu klímu krasovej krajiny. In Lalkovič, M. (Ed.): Kras a jaskyne – výskum, využívanie a ochrana. Zborník referátov z vedeckej konferencie, Liptovský Mikuláš 10. – 11. 10. 1995. SMOPaJ, Liptovský Mikuláš, 71–75.
- Jakál, J., 1996. Geovedný výskum a jeho aplikácia pri ochrane sprístupnených jaskýň. In Bella, P. (Ed.): Sprístupnené jaskyne – výskum, ochrana a využívanie. Zborník referátov z odborného seminára, Medzev 18. – 20. 9. 1996. SSJ, Liptovský Mikuláš, 125–129.
- Jakál, J., 1997. The Slovak caves and possibilities of their exploitation. In Dluholucký, S., Bozalková, I. (Eds.): Protection and Medical Utilisation of Karst Environment. Proceedings of International Conference, Banská Bystrica 3–5 June 1997. Slovak Environmental Agency, Banská Bystrica, 24–26.
- Jakál, J., 2000. Zaťaženie 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. SSJ, Liptovský Mikuláš, 140–145.
- Jakál, J., 2000. Polja a paleopolja v krasovom reliéfe Slovenska. In Lacika, J. (Ed.): Zborník referátov z 1. konferencie Asociácie slovenských geomorfológov pri SAV, Liptovský Ján 21. – 23. 9. 2000. ASG pri SAV, Bratislava, 61–64.
- Jakál, J., 2000. Vývojové fázy planinového krasu Západných Karpát. In Prášek, J. (Ed.): Současný stav geomorfologických výskumu. Zborník referátov z medzinárodného seminára, Nýdek 13. – 14. 4. 2000. Ostravská univerzita v Ostravě, Ostrava, 33–35.
- Jakál, J., 2000. Proces obnovy a aktivácie Slovenskej speleologickej spoločnosti v r. 1968–73. In Z. Hochmuth (Ed.): 50 rokov Slovenskej speleologickej spoločnosti. Zborník referátov z historicko-odborného seminára, Liptovský Ján 1999. SSS, Prešov, 50–54.
- Jakál, J., 2001. Krasové formy a ich väzba na vlastnosti reliéfu a klímy. In Prášek, J. (Ed.): Současný stav geomorfologických výzkumů. Sborník referátů z mezinárodního semináře, Kružberk 5. – 7. 4. 2001. Ostravská univerzita v Ostravě, Ostrava, 64–68.
- Jakál, J., 2002. Vlastnosti prírodného prostredia a ich vplyv na priestorové rozloženie krasových foriem. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň. Zborník referátov z 3. vedeckej konferencie, Stará Lesná 14. – 16. 11. 2001. SSJ, Liptovský Mikuláš, 9–14.
- Jakál, J., 2003. Upper Nitra: Antropic relief transformation. Geomorphologia Slovaca, 3, 1 (Excursion articles), 123–125.
- Jakál, J., 2005. Činnosť profesora Jána Volka Starohorského v Múzeu slovenského krasu a v slovenskej speleológii. In Šubová, D. (Ed.): Úloha múzeí v oblasti ochrany prírody a životného prostredia. Zborník referátov z medzinárodnej konferencie pri príležitosti 75. výročia vzniku múzea, Liptovský Mikuláš 21. – 22. 6. 2005. SMOPaJ, Liptovský Mikuláš, 33–36.
- Jakál, J., 2007. Geomorphological regionalisation of karst. Aragonit, 12, 133.
- Jakál, J., 2010. Morfológia dolín v krase a jej vplyv na vývoj riečného geosystému. In Hochmuth, Z., Kulla, M., Csachová, S. (Eds.): Zborník abstraktov z 15. kongresu Slovenskej geografickej spoločnosti a 6. konferencie Asociácie slovenských geomorfológov, Košice 8. – 11. 9. 2010, 86.

Odborné a prehľadové články v časopisoch a zborníkoch

- Jakál, J., 1963. Komplexný fyzickogeografický výskum Slovenského krasu. Geografický časopis, 15, 2, 153.
- Jakál, J., 1970. Exkurzia do krasových území Juhoslávie. Slovenský kras, 8, 111–114.

- Jakál, J., Chovan, A., 1970. Jaskyniarsky týždeň v Bystrej. Slovenský kras, 8, 134–139.
- Jakál, J., 1970. Nová organizácia slovenského jaskyniarstva. Geografický časopis, 22, 2, 184–187.
- Jakál, J., 1970. Vznik a geomorfológia Dobšinskej ľadovej jaskyne. Krásky Slovenska, 47, 5, 198–200.
- Jakál, J., 1970. Slovenské jaskyniarstvo na novej ceste. Krásky Slovenska, 47, 5, 228–229.
- Jakál, J., Nemec, V., 1970. Základné tézy rozvoja slovenského jaskyniarstva v r. 1971 – 1985. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 1, 3–4, 3–6.
- Jakál, J., 1971. Demänovská jaskyňa slobody jubiluje. Krásky Slovenska, 48, 6, 242–243.
- Jakál, J., Nemec, V., 1972. Päťdesiat rokov jaskyne Slobody. Slovenský kras, 10, 3–5.
- Homza, Š., Jakál, J., 1972. Perspektívy rozvoja speleológie na Slovensku. Slovenský kras, 10, 145–154.
- Jakál, J., 1972. Správa z návštevy oblastnej skupiny č. 19 v Dolných Orešanoch. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 3, 1, 20–21.
- Jakál, J., 1973. Organisation de l'exploration spéléologique en Slovaquie. Slovenský kras, 11, 159–162.
- Jakál, J., 1975. VI. medzinárodný speleologický kongres. Slovenský kras, 13, 213–229.
- Jakál, J., 1976. Out of the activities of the Geographical Institute of SAV in Bratislava. Geografický časopis, 28, 2, 162–164.
- Jakál, J., 1977. Speleologický výskum na Slovensku. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 8, 2, 5–7 (Speleological Investigations in Slovakia, 21–24).
- Jakál, J., 1978. Atlas SSR už vychádza. Geografický časopis, 30, 3, 227–235.
- Jakál, J., 1979. VII. medzinárodný speleologický kongres – Sheffield 1977. Slovenský kras, 17, 185–189.
- Jakál, J., 1981. Význam a úlohy Múzea slovenského krasu v procese vedeckého, kultúrneho a hospodárskeho rozvoja Slovenska. Slovenský kras, 19, 155–165.
- Jakál, J., 1981. Slovenské jaskyne. Studia Academica Slovaca, 10, prednášky XVII. letného seminára slovenského jazyka a kultúry. Alfa, Bratislava, 155–166.
- Jakál, J., 1983. Geomorfologická rajonizácia a jej využitie v speleologickej dokumentácii. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 14, 2, 13–15.
- Jakál, J., 1983. Tiesňavy – charakteristická črta reliéfu Slovenska. Poznaj a chráň, 6, 2, 14–16.
- Jakál, J., 1984. Problémy ochrany krasových oblastí Slovenska. Životné prostredie, 18, 1, 10–13.
- Jakál, J., 1986. Reliéf a vody v krasovom geosystéme. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 17, 1–2, 17–23.
- Jakál, J., 1986. Relief and waters in a karst geosystem. Bulletin of the Slovak Speleological Society, 17, 1–2 (Dedicated to the 9th International Speleological Congress in Spain), 16–22.
- Jakál, J., Czudek, T., 1989. Geomorphology in Czechoslovakia. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 10-B, 61–64.
- Jakál, J., Stankovičský, M., 1989. Die Slowakische Geographische Gesellschaft. Geographische Berichte (Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft der Deutschen Demokratischen Republik), 4, Gotha, 281–284.
- Jakál, J., 1991. Poznámky k niektorým terminologickým problémom v speleológii. Jaskyniar, 21–22.
- Jakál, J., 1992. Prínos práce prof. M. Lukniša pre poznanie geomorfológie krasu Slovenska. Geographia Slovaca, 1, 61–64.
- Jakál, J., 1996. Správa slovenských jaskýň – integrujúci prvok slovenského jaskyniarstva, 25 rokov od jej vzniku. Aragonit, 1, 24–26.
- Jakál, J., 1998. Jubileum popredného slovenského geografa a geomorfológa doc. RNDr. Jozefa Kvitkoviča, DrSc. Geografický časopis, 50, 3–4, 182–194.
- Jakál, J., 2004. Krasová krajina a človek. Geografia, 12, 1, 17–21.
- Jakál, J., Hlaváč, J., 2004. Správa slovenských jaskýň a aktuálne problémy slovenskej speleológie. In Bella, P. (Ed.): Výskum, využívanie a ochrana jaskýň. Zborník referátov zo 4. vedeckej konferencie, Tále 5. – 8. 9. 2003. SSJ, Liptovský Mikuláš, 9–14.

- Jakál, J., 2006. Prínos Emila Mazúra pre poznanie reliéfu a geoekológie krasovej krajiny. *Geografický časopis*, 58, 2, 99–104.
- Jakál, J., 2005. Slovenský kras. *Krásy Slovenska*, 82, 5–6, 24–26.
- Jakál, J., 2006. Vedecký prínos Antona Droppu pre poznanie krasu a jaskýň. In Bella, P. (Ed.): *Výskum, využívanie a ochrana jaskýň. Zborník referátov z 5. vedeckej konferencie, Demänovská Dolina 26. – 29. 9. 2005. SSJ, Liptovský Mikuláš*, 9–13.
- Jakál, J., 2010. Pohľad na 40 rokov slovenskej speleológie. *Slovenský kras*, 48, 1, 5–18.
- Jakál, J., Urbánek, J., 2012. Vývoj geomorfologického výskumu v podmienkach Geografického ústavu SAV. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 12, 1, 31–37.

Iné publikované výstupy

- Jakál, J., 1980. Súčasné reliéfovotvorné procesy 1 : 1000 000. In Mazúr, E. (Ed.): *Atlas Slovenskej socialistickej republiky. IV. Povrch. Slovenská akadémia vied, Slovenský úrad geodézie a kartografie, Bratislava*, s. 45.
- Mazúr, E., Jakál, J., Krippel, E., Tarábek, K., 1980. Geoekologické typy stredohorskej krajiny – Slovenský kras 1 : 500 000. In Mazúr, E. (Ed.): *Atlas Slovenskej socialistickej republiky. VIII. Fyzickogeografické-geoekologické krajinné jednotky. Slovenská akadémia vied, Slovenský úrad geodézie a kartografie, Bratislava*, s. 100.
- Mazúr, E., Jakál, J., Krippel, E., Tarábek, K., 1980. Geoekologické profily Slovenského krasu. In Mazúr, E. (Ed.): *Atlas Slovenskej socialistickej republiky. VIII. Fyzickogeografické-geoekologické krajinné jednotky. Slovenská akadémia vied, Slovenský úrad geodézie a kartografie, Bratislava*, s. 100.
- Činčura, J. (Ed.) 1983, spoluautor. *Encyklopédia Zeme. Obzor, Bratislava*, 720 s. (2. vydanie, 1985).
- Jakál, J., Kátlovská, A., Szöllös, J. (Eds.), 1993. *Bibliografia Geografického ústavu SAV za roky 1943 – 1993. Geografický časopis*, 45, 4, 385–445.

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	29 – 57	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	---------	------------------------

HYPOGÉNNE JASKYNE S VÝVOJOVÝMI ÚROVŇAMI VYTVORENÝMI ÚČINKOM KYSELINY SÍROVEJ: PLAVECKÝ HRADNÝ VRCH, MALÉ KARPATY

PAVEL BELLA^{1,2} – PAVEL BOSÁK³ – PETR MIKYSEK³ – JURAJ LITTVÁ¹
– HELENA HERCMAN⁴ – JACEK PAWLAK⁴ – ŠIMON KDÝR³ – PETR PRUNER³
– JOZEF MINÁR⁵ – MICHAŁ GRADZIŃSKI⁶ – WOJCIECH WRÓBLEWSKI⁶
– ELIŠKA MIKYSKOVÁ⁷ – MAREK VELŠMID⁸

¹ Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš, Slovenská republika; pavel.bella@ssj.sk

² Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Katolícka univerzita v Ružomberku, Hrabovská cesta 1, 031 04 Ružomberok, Slovenská republika

³ Geologický ústav Akadémie vied Českej republiky, v. v. i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6-Lysolaje, Česká republika; Bosak@gli.cas.cz

⁴ Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, ul. Twarda 51/55, 00 818 Warszawa, Polska

⁵ Katedra fyzickej geografie a geoinformatiky, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4, Slovenská republika

⁶ Instytut Nauk Geologicznych, Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Gronostajowa 3A, 30-387 Kraków, Polska

⁷ Centrum pro inovace v odboru nanomateriálů a nanotechnologií, Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd České republiky, v. v. i., Dolejškova 3, 182 23 Praha, Česká republika

⁸ Jaskyniari Plavecké Podhradie, o. z., Plavecké Podhradie 284, 906 36 Plavecké Podhradie, Slovenská republika

P. Bella, P. Bosák, P. Mikysek, J. Littva, H. Hercman, J. Pawlak, Š. Kdýr, P. Pruner, J. Minár, M. Gradziński, W. Wróblewski, E. Mikysková, M. Velšmid: Hypogene caves with sulfuric acid evolution levels: Plavecký hradný vrch Hill, Malé Karpaty Mountains, western Slovakia

Abstract: The Plavecký hradný vrch Hill, composed of Mesozoic carbonates, is located in the western part of the Plavecký Karst near the fault contact of a marginal horst structure of the Malé Karpaty Mountains and the half-graben depression of the Podmalokarpatská zníženina (a part of the Vienna Basin). Its caves represent the first known hypogene caves with the sulfuric acid speleogenesis (SAS) imprints in Slovakia. The hypogene origin of the caves in the Plavecký hradný vrch was initially considered based on the presence of rising wall channels and chains of upward-leading cupola-like cavities, as well as cupolas and blind chimneys. These morphological features indicate a former ascending water flow along steep faults. The hypogene origin was further proven by the isotopic alteration of the uppermost layer of the limestone bedrock in the Plavecká jaskyňa Cave. The alteration was caused by interaction of limestone and ascending fluids under phreatic conditions. Several solution morphologies formed at the former standing water table and above it (flat corrosion bedrock floors, discharge fissure feeders, water table notches, wall convection niches, upward channels, replacement pockets, and cupolas preserved mainly in the Plavecká jaskyňa and Pec caves), as well as the presence of alunite and jarosite in the Plavecká jaskyňa and Plavecká priepasť Shaft indicate the SAS in the Plavecký hradný vrch. Sulfuric acid was formed by the oxidation of deep-sourced H₂S close to the water table. H₂S emerges from the depth and mixes with deeper-circulating meteoric waters ascending along the active Leitha Fault System at the contact of the Malé Karpaty Mountains and the adjacent part of the Vienna Basin. According to sulfur isotopic data, the H₂S most probably originated from Upper Triassic anhydrites in the basement of the Vienna Basin.

The caves in Plavecký hradný vrch are arranged in horizontal passages at different elevations connected by several vertical segments (steep fissures and conduits, chimneys, shafts) spanning over 70 m. They can be classified as multi-phased hypogene caves with sulfuric acid evolution levels developed in the epiphreatic zone during the stabilization of the erosion base. When the Pec Cave was formed in the late Early Pleistocene, the upper part of the Plavecká priepaš' served as an outflow vertical conduit of the larger underground karst drainage at the northwestern foot. Three late Early Pleistocene cave levels occur at 295 m, 287 m, and 283 m a.s.l. in the Pec Cave, two early Middle Pleistocene levels at 225 m and 223 m a.s.l. in the Plavecká jaskyňa, and four mid- and late Middle Pleistocene levels at 220 m, 216 m, 214 m, and 210 m a.s.l. in the Plavecká jaskyňa and Plavecká priepaš'. The horizontal passages were formed by the expansion of cavities around discharge fissure feeders. In wide passages and chambers, the flat corrosion bedrock floor truncated two or more fissure feeders. When the water table sank, the fissure discharge feeders functioned as vadose vents supplying the rising moist air. The decrease in the water table during the evolution of the lowermost cave levels was most probably caused by tectonic reactivation in an adjacent part of the Vienna Basin, resulting in subsidence of the Podmalokarpatská zníženina. The evolution of surface landforms in the area along the fault contact of the Malé Karpaty Mountains and the Vienna Basin from the late Early Pleistocene was reconstructed using sulfuric acid cave levels.

Key words: hypogene speleogenesis, ascending water, sulfuric acid cave level, landform evolution, Western Carpathians

ÚVOD

Jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu, ktorý je súčasťou Plaveckého krasu Malých Karpát, sú z hľadiska svojho vzniku významné a jedinečné z celoslovenského hľadiska. Systematickou výskumnou činnosťou stredoeurópskeho integrovaného tímu geovedného výskumu jaskýň, zloženého zo špecialistov Správy slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši, Geologického ústavu Akadémie vied Českej republiky v Prahe, Geologického ústavu Poľskej akadémie vied vo Varšave a Ústavu geologických vied Jagelovskej univerzity v Krakove sa podarilo objasniť osobitosti ich hypogénneho pôvodu za pôsobenia kyseliny sírovej. Výskumy sme vykonávali v súčinnosti a s podporou miestnych jaskyniarov z Plaveckého Podhradia, začlenených do Slovenskej speleologickej spoločnosti.

Jaskyne vytvorené pôsobením kyseliny sírovej (*sulfuric acid caves*) sú osobitou skupinou jaskýň, ktoré vznikajú rozpúšťaním karbonátových hornín v dôsledku oxidácie sulfidov pod zemským povrchom. Hypogénne jaskyne, ktorých speleogenéza je spätá s kyselinou sírovou, vznikajú pozdĺž hladiny podzemnej vody, keď sulfán (H_2S , zastarane *sírovodík*), produkovaný v hĺbke stúpa, pozdĺž tektonických porúch a dostáva sa do oksyloženého podpovrchového prostredia (Hill, 1990; Palmer a Hill, 2005; Palmer, 2007, 2013; Audra et al., 2009a; De Waele et al., 2016, 2024 a ďalší). Tým sa odlišujú od osobitej skupiny supergénnych jaskýň, ktorých vznik súvisí s kyselinou sírovou, produkovanou oxidáciou minerálov, obsahujúcich síru (sulfidov), najmä pyritu, sfaleritu, galenitu a podobných rudných minerálov (Webb, 2021). Voda, ktorá v podzemí oxiduje sulfidy, pochádza najmä zo zrážok. Na rozdiel od supergénnych jaskýň, „pravé“ hypogénne jaskyne vytvárajú fluidá obsahujúce oxid uhličitý (CO_2) a/alebo sulfán z hlbinných zdrojov. Rozpúšťaciu schopnosť fluid vytvárajúcich hypogénne jaskyne určujú prírodné zdroje a procesy, ktoré nemajú vzťah k zemskému povrchu (Palmer, 2007). Okrem objasnenia vzniku jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu sa navyše na základe tamjších jaskynných úrovní a ich datovania sčasti zrekonštruoval vývoj okolitého územia na zlomovom rozhraní Malých Karpát a Záhorskej nížiny, severovýchodnej časti Viedenskej panvy.

V príspevku podávame súborný prehľad doterajších výsledkov výskumu, ktorý sme tu vykonávali od roku 2018. Keďže sú publikované zväčša v zahraničných vedeckých časopisoch, opakovane sme boli požiadaní o ich sumarizáciu v slovenskom jazyku. Prvé inovatívne pohľady na genézu Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti pochádzajú z rokov 2010 a 2012 (pozri Bella, 2010a, b; Bella a Bosák, 2012). Dotvoriť celkový obraz o morfológii, vzniku a vývoji jaskýň umožnil výskum novoobjavených častí v Plaveckej jaskyni a jaskyni Pec (pozri Hubek a Magdolen, 2008; Velšmid, 2013; Herz a Velšmid, 2018).

POLOHA A ZÁKLADNÉ ÚDAJE

Plavecká jaskyňa, Plavecká priepasť a jaskyňa Pec sa nachádzajú na severozápadnom a západnom svahu Plaveckého hradného vrchu (431 m n. m.), severne od Plaveckého Podhradia, na západnom okraji Malých Karpát (obr. 1A a 2). Patria do Plaveckého krasu, ktorý je súčasťou Pezinských Karpát. Jeho najzápadnejšia časť zasahuje do Plaveckého podhoria.

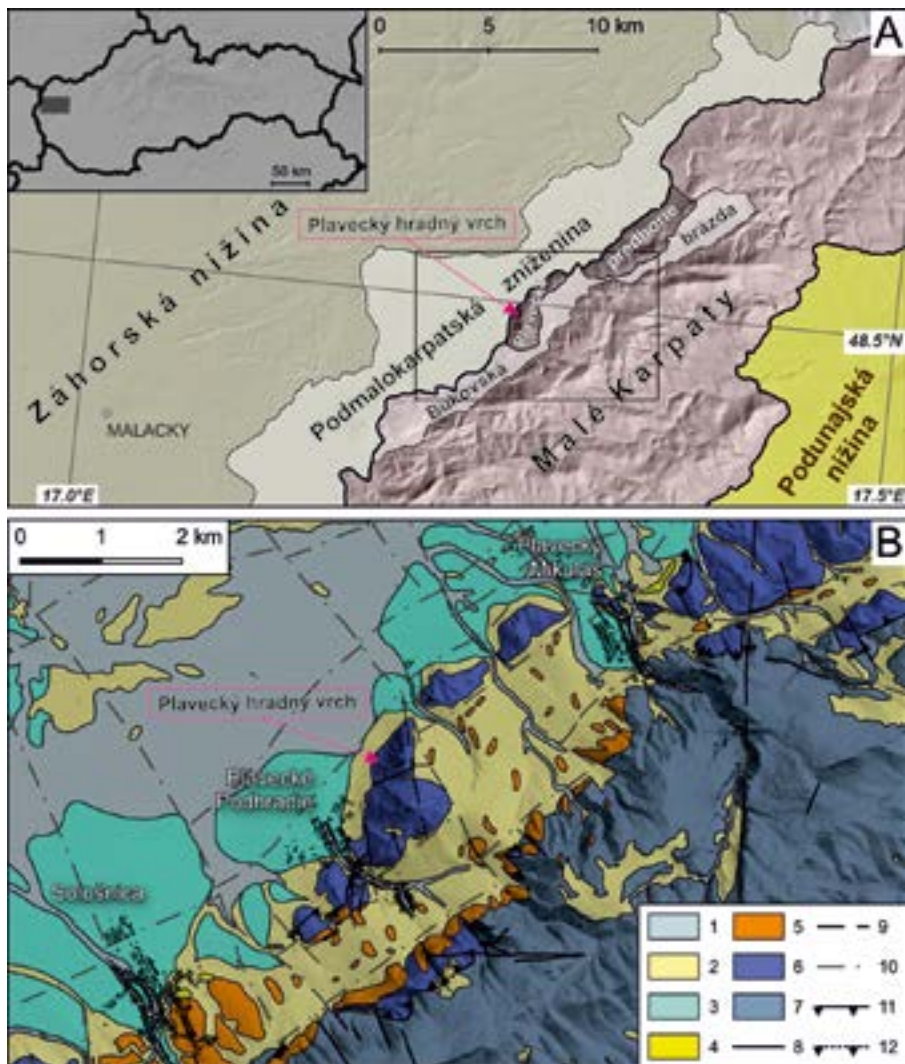
Pôvodný vchod do Plaveckej jaskyne leží vo výške 236 m n. m. Do jaskyne vedie vstupná štôlna, ktorej vstupný otvor z povrchu je vo výške 221 m n. m. (Tencer, 1991; Hubek a Magdolen, 2008). Plavecká jaskyňa je 1 253 m dlhá (Tencer, 2021) s vertikálnym prevýšením 37 m, v rozsahu 214 – 251 m n. m. (Šmída, 2010; mapová dokumentácia od M. Velšmida z rokov 2019 – 2021). Plavecká jaskyňa sa vytvorila v strmom, tektonicky podmienenom svahu (Liška, 1976), ktorý vymedzuje Malé Karpaty a priľahlú časť Záhorskej nížiny.

Južne od Plaveckej jaskyne sa nachádza vchod do Plaveckej priepasti (270 m n. m.). Priepasť dosahuje hĺbku 70 m, v rozsahu 270 – 200 m n. m. Hlavný sieňovitý až dómovitý priestor priepasti s dolnými priľahlými chodbami je dlhý okolo 120 m a 15 – 20 m široký, tiahne sa rovnobežne so svahom hradného vrchu (Butaš, 2003; Šmída, 2010). Teplota vody v jazere v najnižšej časti Plaveckej priepasti bola približne 13 °C (Košel, 2005). Z mikroklimatického hľadiska Plavecká priepasť i priľahlá Plavecká jaskyňa (s teplotou vzduchu 11 až 12,8 °C) patria medzi najteplejšie jaskyne na Slovensku (Košel, 2005; Briestenský a Stemberk, 2008; Velšmid, 2011).

Jaskyňa Pec sa nachádza v severnej časti Plaveckého hradného vrchu pri okrajovom ostrom skalnom hrebeni stúpajúcom k Plaveckému hradu. Jej vchod leží v nadmorskej výške asi 295 m, v strmom svahu nad Plaveckou jaskyňou. Jaskyňa Pec je dlhá 208 m a hlboká 15 m, v rozsahu 295 – 280 m n. m. (Velšmid, 2013). Jaskyňa Pec patrí k vyššie položeným jaskyniam Plaveckého hradného vrchu. V rovnakej nadmorskej výške sa nachádza aj vchod do Stenlyho jaskyne, vo svahu južne od Plaveckej priepasti a juhozápadne od jaskyne Pec. Stenlyho jaskyňa je dlhá 22 m a hlboká 5 m, v rozsahu 295 – 290 m n. m. (Šmída, 2010).

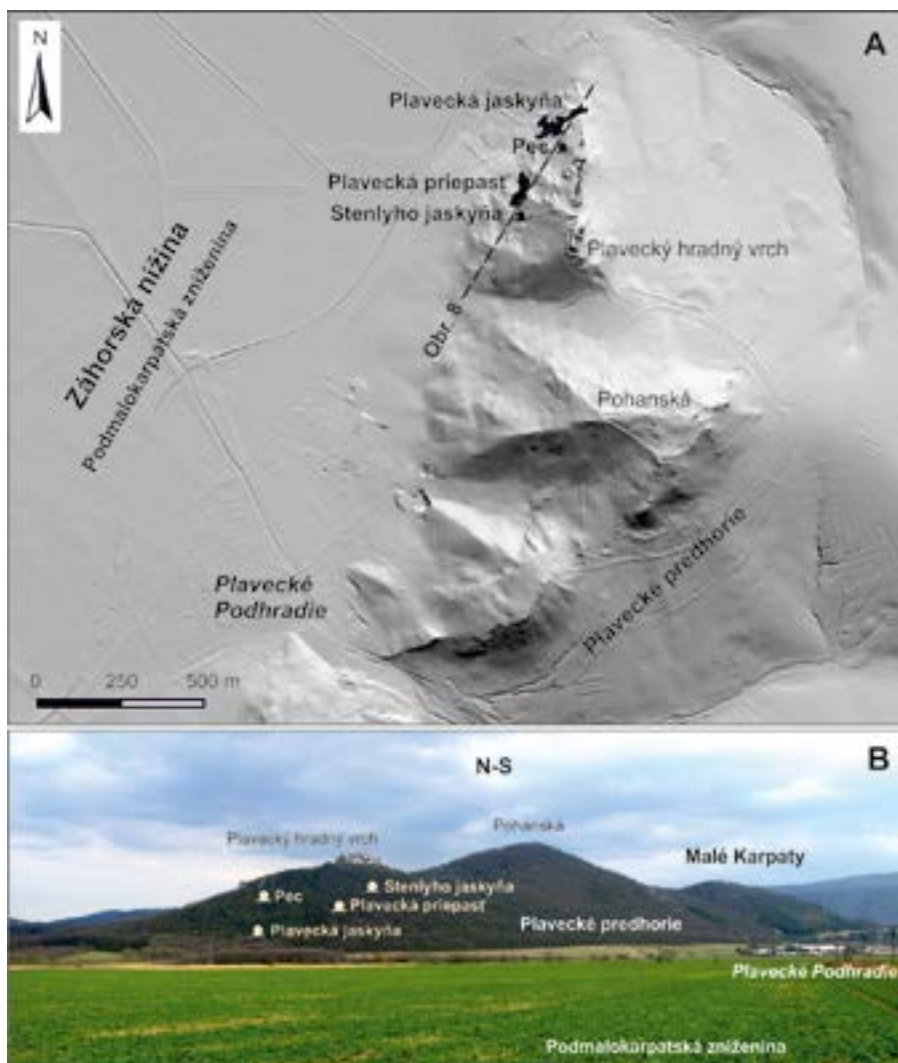
PREHLAD VÝSKUMU A NÁZOROV NA GENÉZU JASKÝŇ

V čase, keď neboli známe nové časti Plaveckej priepasti (PP-2), jaskyne Pec (PP-3) a Plaveckej jaskyne (PP-1), prevládali názory, že dovtedy známe časti Plaveckej jaskyne predstavujú puklinovo-rútivú jaskyňu vytvorenú pôsobením atmosférickej vody pozdĺž tektonických porúch i medzivrstvových plôch (Droppa, 1958, 1973; Tencer, 1991). Mitter (1983) ju spomína ako vrstevnato-rútivú jaskyňu. Možno dedukovať, že v tom čase sa skôr predpokladalo, že sa jaskyňa vytvárala vodou presakujúcou z povrchu cez vadóznu zónu. Neskôr Hochmuth (2008) uvádza, že Plavecká jaskyňa asi zahrňuje paleokrasové dutiny, ktoré údajne vznikli v prostredí stagnujúcej vody dosiaľ neznámeho recipientu. Keďže v tejto súvislosti spomína „paleo-Moravu“, asi uvažoval, že hladina podzemnej vody v krase sa viazala na neďaleký povrchový vodný tok. V takýchto podmienkach sa jaskyňa mohla vytvárať najmä pozdĺž hladiny podzemnej vody alebo pod ňou, t. j. v plytkej freatickej, resp. epifreatickej zóne.



Obr. 1. A – poloha Plaveckého hradného vrchu; B – geologická stavba Plaveckého hradného vrchu a jeho okolia (podľa Maheľa a Cambela, 1972; Baňackého a Sabola, 1973; Poláka et al., 2011; Fordinála et al., 2012a a ďalších; zjednodušené a upravené na základe LIDAR podkladu z Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky). Kvartér: 1 – sedimenty poriečnych nív, 2 – svahové sedimenty, 3 – sedimenty riečnych terás a vejárov; neogén: 4 – sedimenty, nečlenené; paleogén: 5 – sedimentárne horniny, nečlenené; mezozoikum hronika: 6 – považský príkrov, 7 – veterlínsky príkrov; zlomy: 8 – zistené, 9 – predpokladané, 10 – zakryté; násuny: 11 – zistené, 12 – zakryté.

Fig. 1. A – location of the Plavecký hradný vrch Hill; B – geological setting of the Plavecký hradný vrch Hill and its surroundings (after Maheľ and Cambel, 1972; Baňacký and Sabol, 1973; Polák et al., 2011; Fordinál et al., 2012a and others; simplified and adjusted on the LIDAR background from the Geodesy, Cartography and Cadastre Authority of the Slovak Republic). Quaternary: 1 – flood plain sediments, 2 – slope sediments, 3 – alluvial terrace and fan sediments; Neogene: 4 – sediments, non-divided; Paleogene: 5 – sedimentary rocks, non-divided; Mesozoic of Hronic Unit: 6 – Považie Nappe, 7 – Veterlín Nappe; Faults: 8 – known, 9 – expected, 10 – covered; Thrusts: 11 – known, 12 – covered.



Obr. 2. Plavecký hradný vrch a poloha jaskýň: A – tieňovaná mapa juhozápadnej časti Plaveckého predhoria, vrátane Plaveckého hradného vrchu, generovaná z údajov DEM LIDAR poskytnutých Úradom geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky; B – Plavecký hradný vrch, pohľad od západu. Foto: P. Bella

Fig. 2. Plavecký hradný vrch Hill and the location of the caves: A – hillshade map of the south-west part of the Plavecké predhorie Foothills, including Plavecký hradný vrch, generated from the DEM LIDAR data provided by the Geodesy, Cartography and Cadastre Authority of the Slovak Republic; B – Plavecký hradný vrch, viewed from the west. Photo: P. Bella

Šmída (2010) usudzuje, že Plavecká jaskyňa predstavuje freatickú jaskyňu v rámci zložitej výverovej zóny so staršími subhorizontálnymi chodbami a mladšími komínmi. Ich vznik dáva do súvisu s opakovaným dvíhaním sa hladiny podzemnej vody. Rovnako predpokladá, že aj Plavecká priepasť je freatického pôvodu, pretože tvary koróznej freatickej modelácie sa vyskytujú aj na horných častiach stien jej centrálného zvonovitého priestoru. Píše, že Plavecká priepasť pravdepodobne predstavuje mohutný sifón, z ktorého vody prúdili

severným, resp. severozápadným smerom k Plaveckej jaskyni. Ďalej podotýka, že v Plaveckej jaskyni ani v Plaveckej priepasti sa doteraz nezistili žiadne alochtónne sedimenty. Na základe toho predpokladá, že Plavecká jaskyňa i Plavecká priepasť boli súčasťami nielen plytkej, ale aj hlbšej freatickej drenáže podzemných vôd.

Keďže jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu vznikli na výraznom zlomovom rozhraní Malých Karpát a Záhorskej nížiny, Bella (2010a, b), následne aj Bella a Bosák (2012) vyslovili predpoklad, že na ich vytváraní sa podieľali najmä vody hlbšej cirkulácie, ktoré vystupovali pozdĺž okrajových zlomov. Na hladine podzemnej vody sa miešali s vodami presakujúcimi zo zrážok a spolu odtekali na povrch prameňmi nadväzujúcimi na miestnu eróziu bázu. Opísané morfológické tvary v Plaveckej jaskyni, najmä kupolovité vyhlbeniny, nezodpovedali tvarom, ktoré vznikajú presakujúcou zrážkovou vodou vo vadóznej zóne. Na potvrdenie predpokladu, že ide o hypogénne jaskyne (Bella a Gaál, 2012, 2017), ktoré sa vytvárajú vodami obohatenými o oxid uhličitý z hlbinných zdrojov, neboli vtedy relevantné dôkazy. Podobne sa neuvažovalo ani o úlohe sulfátu v speleogenéze týchto jaskýň, hoci v bližšom i vzdialenejšom okolí je známych niekoľko prameňov sírnatéj vody.

Zmeny izotopového zloženia karbonátov, potvrdzujúce hypogénnu speleogenézu, ako aj morfológické a mineralogické indikátory pôsobenia kyseliny sírovej pri vytváraní tamojších jaskynných úrovní, zistili a preukázali Bella a Bosák (2018), Bella et al. (2018, 2019a, b, 2022, 2024a, b), ako aj Bosák a Bella (2024). Prvé odbery vzoriek na mineralogické analýzy v roku 2018 spájal P. Bella s cestami P. Bosáka na zasadnutia redakčnej rady časopisu *Geologica Carpathica* do neďalekej Bratislavy. Nad rámec prvotného zámeru výskumu sa pridruženými súvislosťami a geochronológiou vývoja jaskýň a okolitého územia zaoberali Bella et al. (2022). Pôvod sulfátu, ktorý sa podieľal na vzniku a vývoji tamojších jaskýň, detailnejšie objasnili Mikysek et al. (2026). Tým sa dotvoril celkový obraz o speleogenéze v Plaveckom hradnom vrchu. Výsledky našich posledných výskumov (od roku 2018) súborne objasňujú a potvrdzujú zatiaľ jediný známy výskyt hypogénnych jaskýň s úrovňami vytvorenými účinkom kyseliny sírovej na Slovensku.

Hypogénne jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu sa zaradili medzi 84 lokalít na svete (v Európe, Severnej, Strednej i Južnej Amerike, Ázii, Afrike i Océánii), v ktorých sa preskúmala a potvrdila speleogenéza účinkom kyseliny sírovej (pozri De Waele et al., 2024). Najbližšie od Plaveckého hradného vrchu sa takáto lokalita nachádza v rakúskych Hainburských vrchoch (Hainburger Berge), najjužnejšej časti Malých Karpát, v Bad Deutsch-Altenburgu na juhovýchodnom okraji Viedenskej panvy (Plan et al., 2006, 2009; Pavuza a Plan, 2008; De Waele et al., 2016; Spötl et al., 2017).

HYPOGÉNNA SPELEOGENÉZA V PLAVECKOM HRADNOM VRCHU – PODMIENKY A PREJAVY

Geologické a hydrogeologické pomery okolitého územia

Plavecký kras je súčasťou Malých Karpát, ktoré sa tiahnu sv.–jz. smerom medzi Dunajskou panvou na juhovýchode a Viedenskou panvou na severozápade. Sú najzápadnejším jadrovým pohorím Západných Karpát. V Malých Karpatoch sa vyskytuje niekoľko krasových oblastí, ktoré budujú prevažne triasové karbonátové horniny (Droppa, 1973; Stankoviansky, 1982; Mitter, 1983; Lačný et al., 2022 a ďalší). Medzi najvýznamnejšie z nich patrí Plavecký kras s pomerne dobre vyvinutými povrchovými i podzemnými formami krasového reliéfu. Zaberá severozápadnú časť Pezinských Karpát (Liška, 1976; Šmída, 2010).

Západnú okrajovú časť Plaveckého krasu tvorí kras Plaveckého predhoria (Mitter, 1983). Viazá sa na triasové karbonáty v úzkom zlomovom hrebeni (hrasti), ktorý od hlavnej časti

pohoria oddeľuje úzka depresia Bukovskej brázdy vyplnená paleogénnymi sedimentmi. Jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu sú vytvorené v karbonátoch wettersteinského súvrstvia (lokálne so šošovkami brekcií) patriacich do jednotky hronika (pozri Polák et al., 2011, 2012; Fordinál et al., 2012a, b; obr. 1B). Tieto karbonáty sú masívne, vrstevnatosť i medzivrstvové plochy sú v nich zriedkavé.

Viedenská panva, susediaca s Plaveckým predhorím, sa považuje za panvu typu „*pull-apart*“, ktorá vznikala počas viacerých tektonických fáz (Royden, 1985; Fodor, 1995; Decker, 1996; Arzmüller et al., 2006). Po hlavnej fáze formovania bola panva vnútorne rozčlenená na sústavu menších pliocénnych a kvartérnych elevácií a depresii, čo pravdepodobne súviselo s reaktiváciou litavského zlomového pásma prebiehajúceho blízko rozhrania Viedenskej panvy a Malých Karpát (Kullman a Gazda, 1966; Kullman, 1978; Decker et al., 2005; Arzmüller et al., 2006; Beidinger a Decker, 2011; Fordinál et al., 2012b; Lee a Wagreich, 2017). Niektoré zlomy tohto pásma vykazujú značné posuny, s najväčšou pravdepodobnosťou zasahujú až do podložia panvy (Arzmüller et al., 2006; Šamajová et al., 2019; Tari et al., 2021; Hók et al., 2022).

Prevažne neogénne sedimenty Viedenskej panvy prekrývajú tektonický styk Českého masívu, Východných Álp a Západných Karpát. Na základe údajov z vrtov a geofyzikálnych meraní Šamajová et al. (2019), Tari et al. (2021) a Hók et al. (2022) potvrdili v podloží slovenskej časti Viedenskej panvy výskyt austroalpínskych i západokarpatských príkrovov. Austroalpínske jednotky obsahujú hrubé vrstvy anhydritu, ktorý môže byť zdrojom síry v podzemných vodách. Šamajová et al. (2019) identifikovali austroalpínske príkrovy v podloží Viedenskej panvy práve na základe prítomnosti hrubých evaporitových vrstiev. Vo vzdialenosti do 20 km od Plaveckého krasu sa vo vrtoch zistili tri austroalpínske súvrstvia obsahujúce vrstvy s anhydritmi („Haselgebirge“ – perm až spodný trias, reichenhalské – stredný trias, oponické – vrchný trias). Povrchové výskyty anhydritu v Malých Karpatoch nie sú známe (Polák et al., 2012).

Zlomy vo východnej okrajovej časti Viedenskej panvy podmienili vznik tektonickej Podmalokarpatskej zníženej, jednej z jej mladých vnútorných depresii, ktorú vyplňa kvartérne súvrstvie zložené prevažne z prolúviálnych sedimentov hrubých 40 až 45 m, miestami viac ako 100 m (Kullman, 1966, 1980; Vaškovská, 1971; Fordinál et al., 2012a, b a ďalší). Okrajové zlomy na rozhraní Malých Karpát a priľahlej časti Viedenskej panvy ďalej vytvárajú vhodné podmienky na hlbokú cirkuláciu meteorických vôd. V súčasnosti mierne ohriate vody vystupujú na úpätí Malých Karpát viacerými prameňmi a boli zachytené i v studniach (Hanzel et al., 1999, 2001 a ďalší), vrátane úpätia Plaveckého hradného vrchu. Približne 120 až 150 m západne od Plaveckej jaskyne sú pramene vo výške 205 až 208 m n. m. V hydrologických ročenkách (podzemné vody) Slovenského hydrometeorologického ústavu za roky 2007 a 2008 sa teplota vody vo vyvieračke pod Plaveckým hradom uvádza 11,6 až 13,6 °C (priemerná teplota 12,8 °C). Vzhľadom na priemernú ročnú teplotu vzduchu v tejto oblasti bola o 3 °C teplejšia.

Pozdĺž zlomov na okraji Viedenskej panvy miestami z hĺbky vystupujú na povrch vody obsahujúce sulfán a miešajú sa s hlbšie cirkulujúcimi meteorickými vodami. Niekoľko prameňov s vodami obohatenými o sulfán sa nachádza v Plaveckom Mikuláši, pri Plaveckom Petre a Prievaloch – 3,7 až 8,2 km severovýchodne od jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu. Sulfán je prítomný aj v minerálnej vode vo vrte v Lakšárskej Novej Vsi vo vnútornej elevácii Viedenskej panvy, západne od okrajového zlomu Malých Karpát. Známy prameň obsahujúci sulfán sa nachádza v kúpeľoch Smrdáky na severnom okrajovom zlome Viedenskej panvy, asi 30 km severovýchodne od Plaveckého hradného vrchu. Mineralizované vody obohatené o sulfán boli zaznamenané aj v ďalších vrtoch v širšom okolí (Květ, 1971; Gazda, 1980; Kullman, 1980; Franko a Melioris, 2000).

Štruktúrno-tektonická predispozícia vzniku hypogénnych jaskýň

Juhozápadná časť Plaveckej jaskyne má charakter sieťového labyrintu, ktorý je predisponovaný najmä paralelnými strmými poruchami (rovnobežnými so zlomovým svahom nad jaskyňou), pozdĺž ktorých vystupovali vody hlbšej cirkulácie. Najpočetnejšie sú diskontinuity s. – j. až ssv. – jjz. smeru. Menej časté sú diskontinuity ssz. – jjv. smeru a v. – z. smeru (Briestenský a Stemberk, 2008; Bella et al., 2019b, 2022). Vznik Herzovho dómu v severovýchodnej časti jaskyne predurčil zlom sv. – jz. smeru, mierne zvažujúci sa na severozápad. Na stenách dómu vidieť niekoľko ďalších strmších zlomov so sklonom 65° – 90°. Tieto zlomy predurčili aj výrazné podlahové štrbiny na podlahe tohto dómu, cez ktoré odspodu pod tlakom vytekala voda hlbšej cirkulácie (*discharge slots*). Podružné podlahové štrbiny sledujú poruchy v. – z. smeru (Bella et al., 2022).

Hornú vertikálnu časť Plaveckej priepasti predurčili poruchy v. – z. smeru. Centrálny dóm pod priepasťou a vstupná šachta vznikli na priesečníku diskontinuit sv. – jz. a v. – z. smeru. Poruchy v. – z. smeru tvoria aj približne 30 m širokú zónu naprieč centrálnym dómom. Na jeho okrajoch predisponovali niektoré stenové výklenky a Kaplnku tvorenú úzkymi rozvetvenými a križujúcimi sa chodbami v. – z. smeru s podlahovými výtokovými štrbinami. Poruchy s.–j. smeru predurčili celkový smer spodnej subhorizontálnej časti Plaveckej priepasti. Sú takmer rovnobežné s okrajovým zlomom oddeľujúcim Plavecký hradný vrch od priľahlej časti Viedenskej panvy. Zlomy sv. – jz. smeru sa prejavujú v Plaveckej sieni severne od centrálného dómu (Bella et al., 2024b; Mikysek et al., 2026).

Jaskyňu Pec predisponovali najmä poruchy sv. – jz. až vsv. – zjz. smeru. Podružne sa vyskytujú aj diskontinuity s. – j. smeru, ktoré však na vytváranie jaskyne mali menší vplyv (Bella et al., 2019a, 2022).

Morfologické indikátory hypogénnej speleogenézy

Pozdĺž strmých tektonických porúch sa v Plaveckej jaskyni vytvorili výrazné vertikálne komíny (zväčša slepé) a kupolovité vyhlbeniny, ktoré vznikli vodou prúdiacou odspodu nahor (Bella, 2010a, b; Bella a Bosák, 2012; Bella a Gaál, 2012, 2017; Bella et al., 2019b). Bývalý vzostupný pohyb vody indikujú aj strmé stenové kanály, reťazce kupulovitých dutín i menšie asymetrické vyhlbeniny na strmých stenách jaskýň, vrátane hornej časti Plaveckej priepasti (Bella et al., 2019b, 2024b; Mikysek et al., 2026). Tieto tvary vznikli vo freatických podmienkach, čo jednoznačne vyvracia úvahy, že skúmané jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu mohli vzniknúť vodou presakujúcou zo zrážok vo vadóznej zóne nad hladinou podzemnej vody.

V Plaveckej jaskyni i v jaskyni Pec sa vyskytujú horizontálne chodby a siene s plochými, mierne sklonenými až vodorovnými koróznymi skalnými podlahami (Bella a Bosák, 2018; Bella et al., 2019a, b), ktoré sú predelené pozdĺžnymi výtokovými, resp. prívodnými štrbinami (*discharge slots, feeder slots, fissure feeders*; obr. 3 a 4A). Tie odspodu privádzali do jaskyne vodu hlbšej cirkulácie. V staršej americkej literatúre ich Lange (1954) označil „phreatic floor slots“. Takéto podlahy a štrbiny patria medzi hlavné morfologické indikátory jaskýň vytvorených pôsobením kyseliny sírovej (Egemeier, 1981; Audra, 2008; Audra et al., 2009b; De Waele et al., 2016 a ďalší; obr. 5). Ploché podlahové povrchy v Plaveckej jaskyni sú mierne sklonené k hornému okraju výtokových štrbín (1,9 až 6,8 %). Plochá skalná podlaha v Dóme netopierov, ktorá prezeráva dve výtokové štrbiny, je široká 3,6 m. V severozápadnej časti jaskyne, v úrovňovej chodbe vo výške 216 m n. m., sú dve ploché skalné podlahy vytvorené terasovito nad sebou, pričom výškový rozdiel medzi nimi je 1,15 m (Bella et al., 2019b).

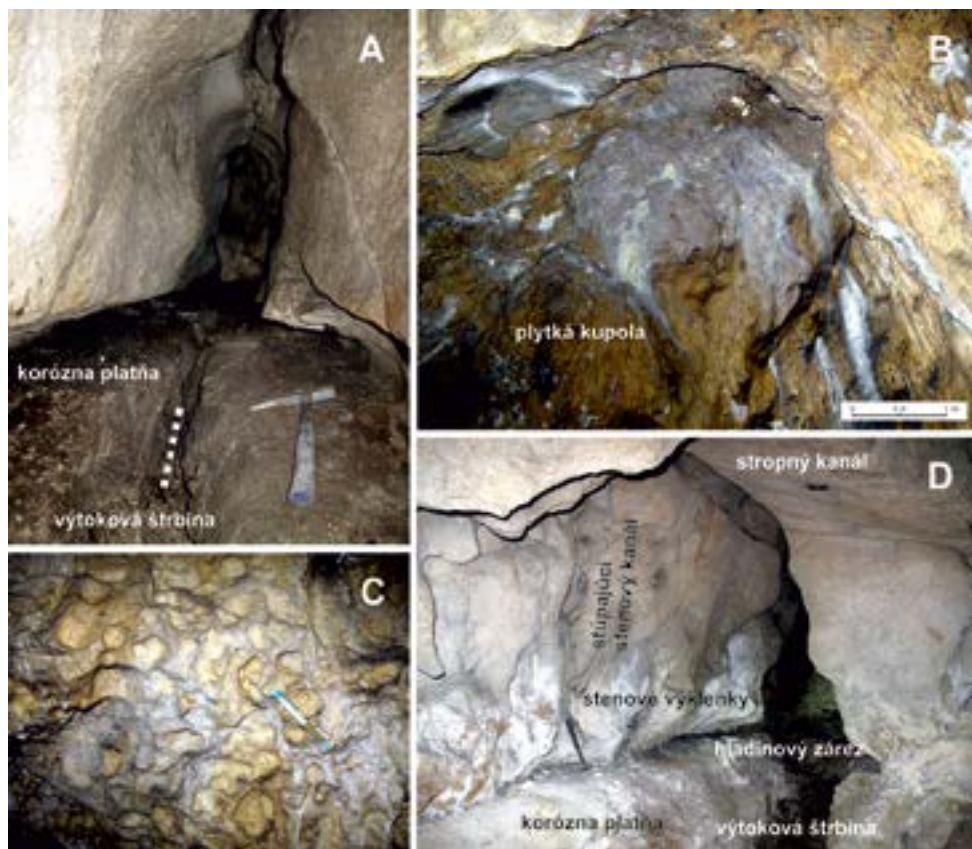
Inaktívne výtokové štrbiny v Plaveckej jaskyni rozpoznal Bella (2010b). Sú zvyčajne 0,1 až 0,2 m široké, miestami pozorovateľné do hĺbky asi 3 až 4 m (napr. v Dóme netopierov). Ojedinele sú širšie (do 0,35 až 0,4 m) a miestami dostupné pre človeka do hĺbky niekoľko metrov (napr. na severovýchodnom okraji Kvaľovej siene), v Herzovom dóme až do hĺbky okolo 10 m. Najširšie výtokové štrbiny (do 0,6 až 0,9 m) sú zväčša vyplnené sedimentmi, a tým sa stali nedostupnými. Na niektorých miestach sú strmé výtokové štrbiny rozšírené do podoby oválnych kanálov, resp. prieduchov (obr. 3C). Strmý kanál v severovýchodnom okraji



Obr. 3. Plavecká jaskyňa: A, B – výtoková (prívodná) štrbina a plochá korózna podlaha (A – Herzov dóm, B – Dóm netopierov); C – výtoková štrbina a prieduchy (Herzov dóm).

Foto: P. Staník (A, C), P. Bella (B)

Fig. 3. Plavecká jaskyňa Cave: A, B – fissure feeder and flat corrosion floor (A – Herzov dóm Chamber, B – Dóm netopierov Chamber); C – fissure discharge feeder and vents (Herzov dóm Chamber). Photo: P. Staník (A, C), P. Bella (B)

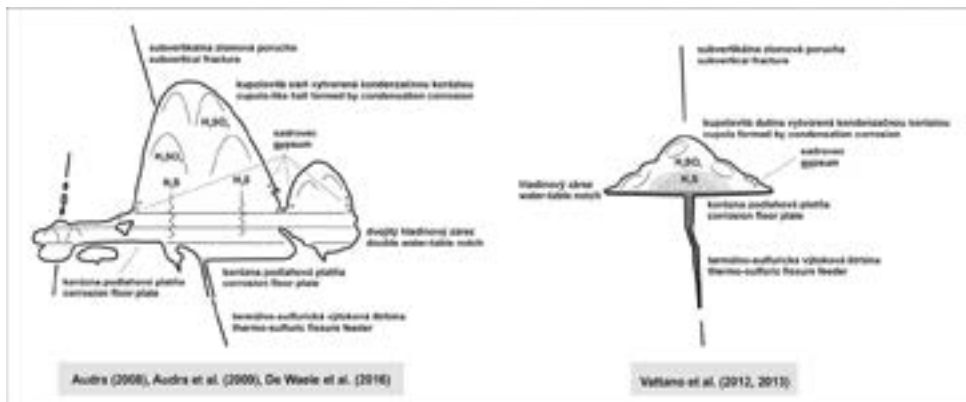


Obr. 4. Plavecká jaskyňa: A – výtoková (prívodná) štrbina a plochá korózna podlaha / korózna platňa (severozápadný okraj Dómu netopierov); B – plytká kupola (Kvapľová sieň); C – náhradové kapsy; D – stúpajúce kanály, hladinový zárez, plochá korózna podlaha / korózna platňa a výtoková štrbina (severozápadná chodba spodnej vývojovej úrovne). Foto: P. Bella

Fig. 4. Plavecká jaskyňa: A – fissure feeder and flat corrosion floor / corrosion table (the north-western edge of the Dóm netopierov Chamber); B – shallow cupola (Kvapľová sieň Hall); C – replacement pockets; D – upward wall channel, water-table notch, flat corrosion floor / corrosion plate and fissure feeder (the north-western passage of lower evolution level). Photo: P. Bella

Dómu netopierov, vytvorený v mieste križovania dvoch výtokových štrbín, je široký 0,5 až 1 m a hlboký viac ako 6 m. V sieňach a širokých chodbách plochá skalná podlaha prerezáva dve až štyri výtokové štrbiny – v Dóme netopierov, Kvapľovej sieni, ako aj v spomenutej úrovňovej chodbe vo výške 216 m n. m. (Bella et al., 2019b). Siene a chodby s podlahou, ktorá prerezáva viac výtokových štrbín, vznikli postupným obojstranným rozširovaním chodieb vytvorených pozdĺž výtokových štrbín (pozri Audra et al., 2009b; De Waele et al., 2016).

Ploché, mierne sklonené až vodorovné skalné podlahy, predelené jednou alebo viacerými výtokovými štrbinami, sú hlavnými morfológickými indikátormi jaskýň vytvorených rozpúšťaním karbonátov kyselinou sírovou (Egemeier, 1981; Hill, 1990; Audra, 2008; Audra et al., 2009b; De Waele et al., 2016, 2024). Keďže množstvo rozpusteného kyslíka pod vodnou hladinou klesá s hĺbkou, plytké jazierka po stranách výtokových štrbín umožňujú tvorbu kyseliny sírovej oxidáciou sulfátu rozpusteného vo vystupujúcich fluidách (obr. 5). Tá rozpúšťa karbonáty podstatne rýchlejšie ako kyselina uhličitá, pričom vznikajú nielen osobité morfológické tvary, ale aj minerálne asociácie (Hill, 1990; Polyak a Provencio, 2001;



Obr. 5. Vytváranie jaskyne účinkom kyseliny sírovej (podľa Audru, 2008; Audru et al., 2009a; Vattana et al., 2012, 2013; De Waeleho et al., 2016).

Fig. 5. Formation of sulfuric acid cave by the action of sulfuric acid (after Audra, 2008; Audra et al., 2009a; Vattano et al., 2012, 2013; De Waele et al., 2016).

Galdenzi a Maruoka, 2003 a ďalší). Podľa Egemeiera (1981) sú veľmi mierne sklony skalnej podlahy pravdepodobne spôsobené skôr oxidáciou sulfánu ako hladinou podzemnej vody. Karbonáty sa rozpúšťajú najmä na šikmých podlahových povrchoch stenových zárezov, keď vodný film steká po opakujúcom sa poklesnutí hladiny podzemnej vody. V dôsledku väčšieho pohybu vody je oxidácia sulfánu rýchlejšia v miestach, kde je sklon podlahy strmší. Naopak, pomalšia oxidácia sulfánu je na menej sklonených (plochejších) častiach vápencovej podlahy. Na menej sklonených až rovných podlahách sa navyše usadzujú jemnozrnné nerozpustné zvyšky karbonátov, ktoré chránia podložné vápence pred rozpúšťaním (pozri Hill, 1990). Podlaha sa laterálne zväčšuje na obe strany výtokovej štrbiny, kde povrch karbonátov nie je chránený týmito usadeninami. Audra (2008), Audra et al. (2009b), ako aj De Waele et al. (2016) vysvetľujú vytváranie mierne sklonených korózných tabuľovitých podláh (*corrosion tables*) kyslými kondenzačnými vodami, ktoré plošne stekajú (v podobe plošného splachu) späť do výtokovej štrbiny alebo jazera vytvoreného pozdĺž výtokovej štrbiny (*discharge fissure feeder*) alebo okolo výtokovej, resp. prívodnej trubice (*feeder*).

V niektorých častiach Plaveckej jaskyne výtokové štrbiny dokonca prepájajú nad sebou ležiace horizontálne chodby s rovnými podlahami (napr. medzi Kvapľovou sieňou a vyššie položenou horizontálnou chodbou). Miestami sú prepojené strmými oválnymi prívodnými trubicami (*feeders*), cez ktoré bývalé vody, vytvárajúce jaskyňu, prúdili odspodu nahor. V jaskyni Pec takáto strmá prívodná trubica ústi do Jacuzzi, zasypaný *feeder* možno predpokladať v juhozápadnej časti Druhého domu (Bella et al., 2019a, 2022).

Po okrajoch rovných podláh sú do skalných stien vyhlbené hladinové zárezy (*water-table notches*, obr. 3B a 4D). Preto sa vznik plochých korózných podláh po oboch stranách výtokových štrbín spája s hladinou podzemnej vody, keď bola chodba čiastočne zaplavená sulfidickou vodou a dochádzalo k opakovanému miernemu kolísaniu vodnej hladiny (pozri Galdenzi, 2012). Menšie hladinové zárezy vytvorené nad sebou (napr. na vývojovej úrovni vo výške 216 m n. m. v severozápadnej časti Plaveckej jaskyne) poukazujú na bývalé výšky postupne poklesávajúcej, resp. oscilujúcej hladiny podzemnej vody (Bella et al., 2019b).

Kupolovité časti siení, výklenky a strmé kanály, vyhlbené do skalných stien previsnutých nad rovnými podlahami, vznikli kondenzačnou koróziou, keď vodná para uvoľňujúca sa z hladiny bývalých jazier vyplnených vystupujúcou, mierne ohriatou vodou sa na skalnom strope ochladzovala a kondenzovala (pozri Audra et al., 2009b; Plan et al., 2012; De Waele,

2016 a ďalší; obr. 5). Kondenzačnou koróziou sa miestami zväčšili až úplne pretvorili pôvodné tvary freatickej modelácie podzemných priestorov. Plytšie a širšie kupoly sa pozorujú v nižších stropných polohách nad plochými skalnými podlahami, vrátane Kvapľovej siene v Plaveckej jaskyni, a nie sú pridružené k vysokým komínom predisponovaným strmými tektonickými poruchami (Bella et al., 2019b). Plytšie kupoly v nižších stropných polohách stien, prevísajúcich nad plochú skalnú podlahu, vznikli kondenzačnou koróziou vo vadóznych (subaerických) podmienkach nad hladinou bývalého plytkého jazera s teplejšou vodou (obr. 4B).

V miestach koncentrovanejších výstupov stúpajúceho teplejšieho vzduchu sa kondenzačnou koróziou vytvárajú strmé až zvislé stúpajúce kanály. Strmé kanály sú zahĺbené aj do spodných previsnutých častí stien nad okrajmi výtokových štrbín, najmä v Dóme netopierov a Kvapľovej sieni. V úrovňovej chodbe Plaveckej jaskyne vo výške 216 m n. m. sú steny nad hladinovým zárezom rozčlenené stenovými výklenkami a vertikálnymi kanálikmi, ktoré vedú nahor do stropného kanála (obr. 4D). Aj takéto nahor vedúce kanály boli vytvorené kondenzačnou koróziou v miestach koncentrovaného vzostupného prúdenia teplého vzduchu. V dôsledku nerovnomernej intenzívnej výstupov teplého vzduchu sú vzostupné kanály nad hladinovými zárezmi plytšie ako tie, ktoré vznikli nad okrajmi výtokových štrbín (Bella et al. 2019b).

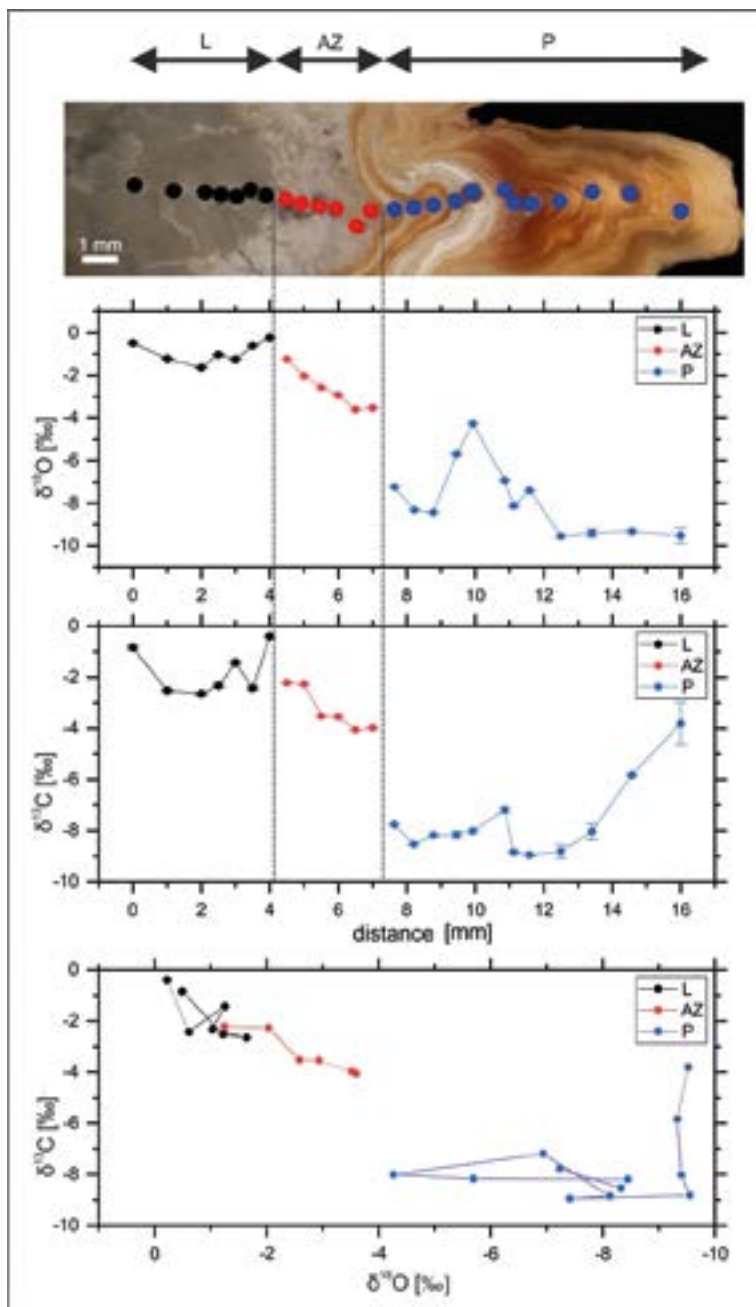
Drobné polsférické náhradové kapsy (*replacement pockets*) poukazujú na koncentrovanú koróziu kyselinou sírovou na vápencových stenách, vystavených parám obsahujúcich sulfán (obr. 4C). Pri rozpúšťaní vápenca kyselinou sírovou sa kalcit nahrádza mikrokryštalickým sadrovcom. Vo viacerých jaskyniach, resp. častiach jaskýň tohto pôvodu, vrátane jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu, sú náhradové kapsy jediným dôkazom bývalej existencie sadrovcovej kôry, ktorá bola neskôr rozpustená presakujúcou vodou (Galdenzi a Maruoka, 2003). Nerozpustené zvyšky sadrovca sa v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu zatiaľ identifikovali iba v Herzovom dóme Plaveckej jaskyne (Bella et al., 2022).

Po poklese hladiny podzemnej vody sa podlahové výtokové štrbiny dostali do vadóznej zóny a fungovali, najmä ich širšie časti, ako prieduchy teplého a vlhkého vzduchu (*thermal vents*) stúpajúceho od rezervoárov teplejšej vody (obr. 3C). Preto sa pôvodné výtokové štrbiny sčasti dotvorili kondenzačnou koróziou. K evaporácii dochádzalo iba na ich horných okrajoch, kde sa vyzrážal hráškovitý sinter vytvárajúci lemovité pásy (De Waele et al., 2016). Stúpajúca vodná para spôsobovala kondenzačno-korózne procesy aj na chladnejších previsnutých častiach stien a stropu jaskyne.

Morfológiu spodnej časti Plaveckej priepasti výrazne zmenili mladšie procesy rútenia. Iba niekoľko pozostatkov pôvodných morfológických tvarov umožňuje sčasti zrekonštruovať jej vznik a vývoj. V jej spodnej subhorizontálnej časti, najmä v bočnej dutine zvanej Kaplnka, sa zachovali hladinové zárezy vyhlbené do stien i zodpovedajúce malé zvyšky plochej skalnej podlahy. Takisto sa tam vyskytujú menšie náhradové kapsy, stropné výklenky a kupoly vytvorené kondenzačnou koróziou nad hladinou teplejšej vody.

Zmeny izotopového zloženia vápencov spôsobené hypogénnymi vodami

Analýza stabilných izotopov C a O preukázala izotopové zmeny vápenca na stene Plaveckej jaskyne (vzorka odobratá zo steny najspodnejšej vývojovej úrovne; obr. 6). Triasové wettersteinské súvrstvie (morský uhličitan vápenatý) má hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ od -0,3 do -2,7 ‰ a $\delta^{18}\text{O}$ od -0,1 do -1,6 ‰ VPDB. V najvrchnejšej zóne vápenca na stene jaskyne, hrubej 3 mm, sa obe izotopové hodnoty postupne stávajú zápornejšími smerom k stene jaskyne. Minimálne hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ a $\delta^{18}\text{O}$ sú -4,1 a -3,8 ‰ VPDB. Tieto izotopové zmeny sú dôsledkom rozpúšťania karbonátov hypogénnou vodou (Bella et al., 2019b). Analýzu stabilných izotopov vykonal Ústav geologických vied Poľskej akadémie vied vo Varšave.



Obr. 6. Zloženie stabilných izotopov vápence a kalcitového hráškovitého sintra na stene jaskyne spodnej vývojovej úrovne Plaveckej jaskyne: L – neporušený (nezmenený) vápenc, AZ – alterovaná zóna zmeny v najvrchnejšej časti vápence, P – kalcitový hráškovitý sinter (Bella et al., 2019b).

Fig. 6. Stable isotopic composition of limestone bedrock and calcite popcorn precipitated on the cave wall of lower evolution level in the Plavecká jaskyňa Cave: L – intact (unaltered) limestone bedrock, AZ – alteration zone in the uppermost part of limestone bedrock, P – calcite popcorn (Bella et al., 2019b).

Výsledky analýzy stabilných izotopov z Plaveckej jaskyne boli zahrnuté do širšej komparácie zmien izotopového zloženia a trendu ich amplitúd v materských karbonátových horninách hypogénnych jaskýň z rôznych častí sveta (pozri Temovski et al., 2022).

Mineralogické indikátory pôsobenia kyseliny sírovej

Prítomnosť alunitu, jarositu a sadrovca v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti poukazuje na speleogenézu v Plaveckom hradnom vrchu s pôsobením kyseliny sírovej (Bella et al., 2019b, 2024b; Mikysek et al., 2026). Tieto minerály patria medzi jej diagnostické mineralogické dôkazy (Hill, 1990; Polyak a Provencio, 2001; Galdenzi a Maruoka, 2003; D'Angeli et al., 2018 a ďalší).

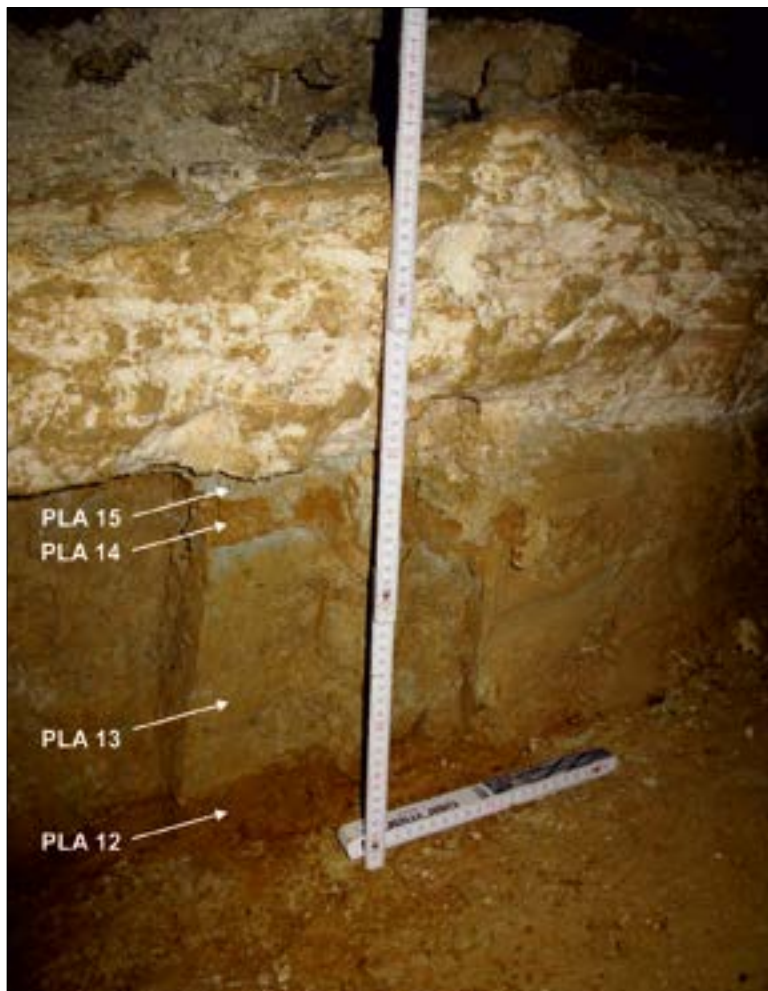
V jemnozrnných sedimentoch spodnej časti Plaveckej jaskyne sa zistili výskyty alunitu (<1 wt%, XRD analýza) a sadrovca (~2 wt% vs. 0,15 – 0,20 % z vylúhovanej vzorky). Sadrovec, alunit a jarosit boli identifikované aj v sedimentoch odkrytých v prístupovej nízkej chodbe k Herzovmu domu (obr. 7). Tieto, hoci aj nepatrné výskyty poukazujú na prítomnosť bývalých vôd s nízkym obsahom síranov, ktoré spôsobili rozpúšťanie vápencov a vyzrážanie sadrovca, alunitu a jarositu vo výrazne kyslom prostredí (Bella et al., 2019b, 2022). Takisto v Plaveckej priepasti sa v jemnozrnných sedimentoch Kaplnky potvrdil výskyt akcesorických minerálov skupiny alunitu, ako aj anhydrit a hydratované železnaté sírany (Bella et al., 2024b; Mikysek et al., 2026). Stopové množstvo hydratovaných síranov železa (melantherit a/alebo szomolnokit) naznačuje oxidačné zvetrávanie sulfidov železa v materskej hornine. Revízia fázovej a modálnej mineralógie (XRD analýzy) z Plaveckej jaskyne odhalila stopové množstvá anatasu, alunitu, goethitu a diaspóru vo väčšine skúmaných vzoriek (Mikysek et al., 2026). Mineralogické analýzy vykonal Geologický ústav Akadémie vied Českej republiky v Prahe.

Výskyt jarositu a alunitu potvrdzuje bývalú speleogenézu pôsobením kyseliny sírovej, hydratované sírany Fe odrážajú rozklad sulfidov Fe v materskej hornine. Mineralogický záznam v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti poukazuje na tri hlavné procesy: (i) rozpúšťanie karbonátových materských hornín, (ii) vstup a transformáciu detritických kremičitanov a ílových minerálov a (iii) precipitáciu sulfátových a Fe-obsahujúcich fáz v podmienkach speleogenézy pôsobením kyseliny sírovej (Mikysek et al., 2026). Nízky výskyt minerálov diagnostických pre speleogenézu pôsobením kyseliny sírovej v jaskynných sedimentoch neumožňuje ich separáciu pre izotopovú analýzu síry.

Na bývalú hypogénnu speleogenézu pôsobením kyseliny sírovej poukazujú aj morfológické tvary v jaskyniach (rovné korózne skalné podlahy a pridružené hladinové zárezy na stenách, podlahové výtokové štrbiny), zmeny zloženia stabilných izotopov vo vápenci na stene Plaveckej jaskyne, ako aj spomenuté lemovité pásy hráškovitých sintrov vyzrážaných na previsnutých stenách nad plochými skalnými podlahami a pozdĺž horných častí podlahových štrbín. V súčasnosti tomu nasvedčujú zvýšené teploty a obsah sulfánu v priľahlých prameňoch.

Pôvod sulfánu v hypogénnej speleogenéze v Plaveckom hradnom vrchu

Počiatočné diskusie o hypogénnom pôvode jaskýň v Plaveckom krasi (Bella et al., 2019b) naznačovali, že termálne fluidá s obsahom sulfánu pochádzajú: (1) z uhľovodíkových rezervoárov vo Viedenskej panve v podložných karbonátových a anhydritových súvrstviach i nadložných siliciklastikách (Ladwein, 1982; Arzmüller et al., 2006; Rupprecht et al., 2019) alebo (2) zo síranových soľaniek prítomných v anhydritových uloženinách od ich sedimentácie, ktoré počas kompresných tektonických fáz migrovali pozdĺž hlbokých zlomov do nadložných neogénnych formácií (Květ, 1971; Bílek, 1972; Franko et al., 1980; Remšík et al., 1985). Pôvod sulfánu v síranových soľankách sa spája s aktivitou anaeróbných odsírovacích baktérií (Květ, 1971 a ďalší).



Obr. 7. Sedimentárny profil v nízkej prístupovej chodbe do Herzovho dómu: vzorka PL 12 obsahuje alunit a jarosit, vzorky PL 13 až PL 15 obsahujú alunit, jarosit i sadrovec. Foto: P. Bella
 Fig. 7. Sampled sedimentary profile in the low access passage to the Herzov dom Chamber: sample PL 12 contains alunite and jarosite, samples PL 13 to PL 15 contain alunite, jarosite and gypsum. Photo: P. Bella

Mineralogické pozorovania v kombinácii s izotopovými údajmi z minerálnych prameňov s obsahom sulfánu v blízkosti Plaveckého krasu (Šmejkal et al., 1971, 1981; Kantor et al., 1982, 1985) viedli k novému koncepčnému geochemickému modelu speleogenézy v tejto oblasti, ktorý vychádza z oboch predchádzajúcich predpokladov o pôvode termálnych fluidů s obsahom sulfánu. Na základe teoretických hodnôt $\delta^{34}\text{S}$ ($\sim -17 - 19 \text{ ‰}$) model predpokladá, že sulfán pravdepodobne pochádza z vrchnotriasových anhydritov v podloží Viedenskej panvy. Tvorba sulfánu zahŕňala počiatočnú termochemickú redukciu síranov, po ktorej nasledovala mikrobiálna redukcia síranov. Každý z týchto procesov viedol k vyzrážaniu pyritu a neskôr k tvorbe sekundárnych síranových minerálov (kineticky riadenou frakcionáciou). Síranové minerály (sdrovec/anhydrit, minerály skupiny alunitu), ktoré sa považujú za sekundárne jaskynné výplne, pravdepodobne vznikli zo zvyškových vodných síranových iónov (Mikysek et al., 2026).

Výskyt hypogénnych jaskýň vytvorených pôsobením kyseliny sírovej v Plaveckom hradnom vrchu podporuje hypotézu hlbokej cirkulácie vôd obsahujúcich sulfán, ktoré vystupovali pozdĺž zóny litavských zlomov na kontakte Viedenskej panvy a Malých Karpát (Mikysek et al., 2026). To možno úzko súvisí s pôvodom subekonomickkej Pb-Zn-Fe mineralizácie v karbonátoch v oblasti Dobrej Vody (severovýchodne od skúmaných jaskýň), pri ktorej hlavnú úlohu zohrali soľanky bohaté na kovy spojené s ložiskami uhľovodíkov (pozri Michalík et al., 1987, 1992).

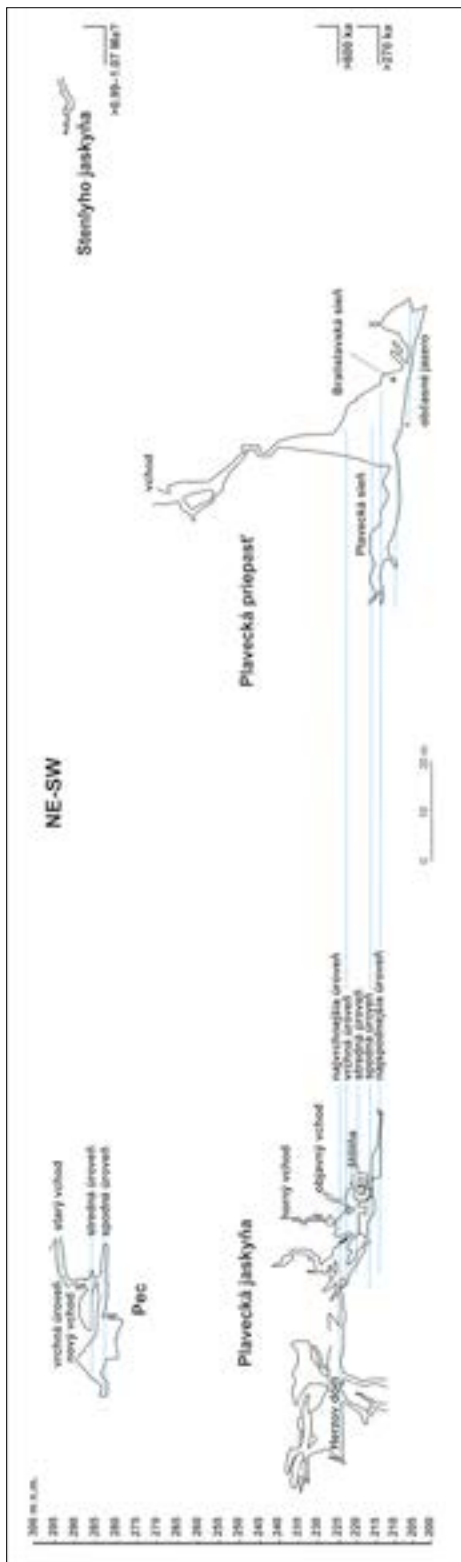
REKONŠTRUKCIA VÝVOJA JASKÝŇ A ICH ÚROVNÍ V PLAVECKOM HRADNOM VRCHU

Úroňové chodby v hypogénnych jaskyniach vytvorené pôsobením kyseliny sírovej

Horizontálne úroňové chodby s rovnými skalnými podlahami (predelené podlahovými výtokovými, resp. prírodnými štrbinami) a okrajovými hladinovými zárezmi sa v Plaveckom hradnom vrchu opakovane vytvárali v epifreatickej zóne počas stabilizácie eróznej bázy (Bella et al., 2019a, b, 2022, 2024b; Mikysek et al., 2026). Tri úrovne sa nachádzajú v jaskyni Pec (v nadmorskej výške 295 m, 287 m a 283 m) a šesť úrovní v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti (v nadmorskej výške 225 m, 223 m, 220 m, 216 m, 214 m a 210 m; obr. 8). Najvýraznejšie jaskynné úrovne v Plaveckej jaskyni sú v nadmorskej výške 225 m (Herzov dóm), 220 m (Dóm netopierov a chodba vedúca od vstupnej štôlne) a 216 m (Kvapľová sieň a prilahlé chodby). Najspodnejšia vývojová úroveň v Plaveckej jaskyni zodpovedá v Plaveckej priepasti výraznému bočnému zárezu vo výške 214 m n. m. Za najspodnejšiu jaskynnú úroveň v Plaveckom hradnom vrchu možno považovať skalné podložie dolnej chodby v Plaveckej priepasti v nadmorskej výške 210 m. Pôvodná korózna morfológia dolnej časti Plaveckej priepasti bola do značnej miery pretvorená opadávaním stropu a zrútením podláh medzi horizontálnymi chodbami vyvinutými na niekoľkých vývojových úrovniach. Chodba najspodnejšej jaskynnej úrovne sa nachádza približne v rovnakej nadmorskej výške ako blízke krasové pramene na úpätí Plaveckého hradného vrchu. V posledných rokoch hladina podzemnej vody v podzemnom jazere klesla pod najnižší bod Plaveckej priepasti.

Veľkosť jaskynných úrovní závisí od množstva kyslých fluíd a trvania ich korozívneho pôsobenia. Rozpúšťacia schopnosť vystupujúcich fluíd je v hlbších freatických prostrediach veľmi nízka a stúpa v blízkosti hladiny podzemnej vody, kde sa CO_2 a O_2 zo vzduchu môže dostať do vody a oxidovať sulfán na kyselinu sírovú (De Waele et al., 2024). Preto sú hlavné fázy krasovatenia úzko spojené so stabilnou voľnou hladinou podzemnej vody a tvorbou horizontálnych jaskynných chodieb, ktoré sú pre speleogenézu pôsobením kyseliny sírovej typické (Palmer a Hill, 2005; Audra et al., 2009a; Palmer, 2013; De Waele et al., 2016, 2024 a ďalší). Ak je hladina podzemnej vody stabilná počas dostatočne dlhého obdobia na vytvorenie väčších chodieb, zmeny hladiny podzemnej vody vedú k vytvoreniu viacerých jaskynných úrovní.

Jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu s horizontálnymi chodbami vo viacerých nadmorských výškach možno klasifikovať ako viacfázové hypogénne jaskyne s vývojovými úrovňami vytvorenými pôsobením kyseliny sírovej. Niektoré časti jaskýň vytvorené pozdĺž jednej hlavnej podlahovej výtokovej štrbiny majú jednoduchý pozdĺžny pôdorys (napr. jaskyňa Pec, horná časť Plaveckej jaskyne a dolná časť Plaveckej priepasti). Časti jaskýň s hustejšou sieťou paralelných a miestami križujúcich sa podlahových výtokových štrbín majú charakter labyrintu (napr. dolná časť Plaveckej jaskyne).



Obr. 8. Zjednodušený prierez jaskýňami v Plaveckom hradnom vrchu. Topografia: Plavecká jaskyňa – podľa meraní P. Magdoleny a kol. (2002 – 2007; vytlačené v Hubek a Magdolen, 2008) a M. Velšmida, 2019 – 2021 (doplnené); jaskyňa Pec – podľa Velšmida (2013); Plavecká priepasť – podľa meraní T. Ďurku a kol. (2002, vytlačené v Butaš, 2003), s korekciou Šmída (2010); upravitel M. Velšmid. Skompletizované v nadväznosti na Bellu et al. (2022).

Fig. 8. Simplified cross-section of the caves in the Plavecký hradný vrch Hill. Topography: Plavecká jaskyňa Cave – after the surveys of P. Magdolen et al. (2002–2007; printed in Hubek and Magdolen, 2008) and M. Velšmid, 2019 – 2021 (complemented); Pec Cave – after Velšmid (2013); Plavecká priepasť Shaft – after the surveys of T. Ďurka et al. (2002, printed in Butaš, 2003), with the correction by Šmída (2010); modified by M. Velšmid. Completed following Bella et al. (2022).

Geochronológia vývoja jaskýň

Bazálne sintrové kôry na rovných korózných podlahách jaskynných úrovní sa vytvorili po poklesnutí hladiny podzemnej vody, zväčša až po určitom čase. Na základe datovania a magnetostratigrafie týchto kôr možno poukázať na starší epifreatický vývoj jaskynných úrovní. Rádioizotopové datovanie chemogénnych sedimentov (sintrov) vykonal Ústav geologických vied Poľskej akadémie vied vo Varšave, paleomagnetický výskum jaskynných klastických i chemogénnych sedimentov Geologický ústav Akadémie vied Českej republiky v Prahe. Jaskynné úrovně v Plaveckom hradnom vrchu sa vytvárali v skorom a strednom pleistocéne (tabuľka 1).

Vývojové úrovně v jaskyni Pec sa vytvorili počas neskoršej časti skorého pleistocénu. Ich staršie ploché skalné podlažie v nadmorskej výške 283 m je priamo pokryté sintrovými kôrami staršími ako 600-tisíc rokov a mladšími ako 1,2 mil. rokov, podľa normálnej polarit patria do epochy Brunhes (<773-tisíc rokov; v zmysle Gradsteina et al., 2020). Stenlyho jaskyňa a predpokladané bývalé horné časti Plaveckej priepasti, indikované zrútenými depresiami, sa nachádzajú takmer v rovnakej nadmorskej výške. Pravdepodobne zodpovedajú bývalým výverom vystupujúcich vôd a patria do jednej z najstarších fáz hypogénnej speleogenézy v Plaveckom hradnom vrchu. Predpokladajúc určitú denudáciu hornej časti zlomového svahu, Stenlyho jaskyňa a zrútené horné časti Plaveckej priepasti predstavujú pozostatky pôvodne rozsiahlejších jaskýň v horizontálnom aj vertikálnom smere. Viac ako 50 m nižšie položené jaskynné úrovně v Plaveckej jaskyni, vytvorené počas stredného pleistocénu, sú lepšie zachované. Fázy výraznejšieho pôsobenia kyseliny sírovej v dvoch najvyšších úrovniach Plaveckej jaskyne (225 a 223 m n. m.) sú datované do skorej časti stredného pleistocénu (>600- až <773-tisíc rokov). Jemnozrnné sedimenty s jarositom v chodbe v nadmorskej výške 225 m majú normálnu magnetickú polaritu, sintrové kôry na plochých skalných podlahách v chodbe v nadmorskej výške 223 m sú staršie ako 600-tisíc rokov – vytvorili sa počas epochy Brunhes (<773-tisíc rokov).

V najspodnejšej úrovni Plaveckej jaskyne (214 m n. m.) kyselina sírová intenzívnejšie pôsobila v období pred 270-tisíc rokmi. Poukazuje na to datovaný vek spodku spodnej tenko zvrstvenej časti hráškovitého sintra, ktorá sa následne vyžrážala v subaerických (vadóznych) podmienkach (hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ oscilujú od -7,2 do -9,0 ‰ a $\delta^{18}\text{O}$ od -4,2 do -8,6 ‰ VPDB) na okraji plochej koróznej skalnej podlahy, predelenej výtokovou štrbinou (Bella et al., 2019b, 2022). Finálna epifreatická fáza vývoja najspodnejšej úrovne Plaveckej jaskyne s najväčšou pravdepodobnosťou zodpovedá vzniku jaskynných raftov na hladine jaskynného jazera, ktorých datovaný vek je 228-tisíc rokov (Bella et al., 2022). Existenciu krátkodobého plytkého jazera dokazuje vrchnejšia biela časť tenko zvrstvenej časti hráškovitého sintra (vcelku hrubej 3 mm). Jej hodnoty $\delta^{13}\text{C}$ od -7,2 do -7,5 ‰ a hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ od -4,0 do -5,2 ‰ VPDB zodpovedajú zloženiu stabilných izotopov subakvatických koraloidov vytvorených pod vodnou hladinou (pozri Caddeo et al., 2015; Fairchild a Baker, 2012). V hornej hrubšie zvrstvenej časti hráškovitého sintra (hrubej 7 mm) sa $\delta^{13}\text{C}$ stáva pozitívnejším (z -9,0 na -4,0 ‰ VPDB) a $\delta^{18}\text{O}$ negatívnejším (z -7,0 na -9,7 ‰ VPDB). Tieto uhlíkovo-kyslíkové hodnoty poukazujú, že táto časť hráškovitého sintra sa vyžrážala v subaerických podmienkach nad vodnou hladinou v dôsledku odplynenia kondenzačnej vody. Spodok spodnej tenko zvrstvenej časti hráškovitého sintra, ako aj spodok jeho hornej hrubšie zvrstvenej časti sa vyžrážali z roztokov obsahujúcich prevažne atmosférický uhlík ($\delta^{13}\text{C}$ v atmosfére je približne -8 ‰). Hodnoty $\delta^{18}\text{O}$ vo vrchnejších častiach hrubšie zvrstvenej časti hráškovitého sintra do značnej miery zodpovedajú priemernej ročnej hodnote $\delta^{18}\text{O}$ v zrážkach v oblasti Plaveckej jaskyne (približne -9,5 ‰; pozri Holko et al., 2012).

Hladina podzemnej vody vtedy pravdepodobne klesala v súvislosti s poklesávaním Podmalokarpatskej zníženi (v predpolí zlomového okraja Malých Karpát), ktorá sa podľa Salchera et al. (2012) začala vytvárať pred 250- až 300-tisíc rokmi. Fáza pôsobenia kyseliny sírovej v jaskynnej úrovni vo výške 214 m n. m. bola aktívna pravdepodobne v neskorom strednom pleistocéne, v období pred viac ako 228-tisíc rokmi a menej ako 250- až 300-tisíc rokmi (Bella et al., 2022).

Časť vôd hlbšej cirkulácie, vystupujúcich pozdĺž zlomového okraja hranice karbonátov, pravdepodobne prenikala do priepustnejšej sedimentárnej výplne Podmalokarpatskej zníženi, ktorej hrúbka narastala v závislosti od postupného poklesávania tejto čiastkovej tektonickej depresie. Táto výplň pozostáva prevažne z prolúviálnych a deluviálnych sedimentov, v predpolí Plaveckého hradného vrchu hrubých 40 až 45 m (Kullman, 1966, 1980; Vaškovská, 1971; Fordinál et al., 2012a). Preto sa mohol znížiť objem vody vystupujúcej až do dolných častí Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti. Nasvedčujú tomu hydrologické pozorovania v okolí. Vo východnej časti Podmalokarpatskej zníženi pri obciach Plavecké Podhradie a Plavecký Mikuláš vody z ľavých prítokov Rudavy vsakujú do sedimentov prolúviálnych kužeľov (až do 50 l/s), čo umožňuje nižšie položená hladina podzemnej vody. V susednej časti Podmalokarpatskej zníženi pri obci Sološnica (Sološnická depresia) je hladina podzemnej vody v hĺbke okolo 10 až 12,5 m pod povrchom terénu (Kullman, 1980). Mapa hladín podzemnej vody naznačuje smer jej prúdenia smerom k rieke Rudava (Šubová et al., 1973).

Tabuľka 1. Hlavné fázy vývoja jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu.

Table 1. Main phases of cave development in Plavecký hradný vrch Hill.

Geologické obdobie	Jaskyne, časti jaskýň
neskorá časť skorého pleistocénu	vrchná vývojová úroveň jaskyne Pec (Stará Pec), Stenlyho jaskyňa
	stredná vývojová úroveň jaskyne Pec (Nová Pec a Prvý dóm s prepojovacou chodbou)
	spodná vývojová úroveň jaskyne Pec (sieň s Jacuzzou, chodba západne od Jacuzzy a Druhý dóm)
stredný pleistocén	najvrchnejšia vývojová úroveň Plaveckej jaskyne
	vrchná vývojová úroveň Plaveckej jaskyne (Herzov dóm)
	stredná vývojová úroveň Plaveckej jaskyne (Sieň netopierov a príľahlá chodba)
	spodná vývojová úroveň Plaveckej jaskyne (Kvapľová sieň a príľahlá chodba)
neskorý stredný pleistocén	najspodnejšia vývojová úroveň Plaveckej jaskyne, horné časti Plaveckej siene v Plaveckej priepasti
	najspodnejšia vývojová úroveň v Plaveckej priepasti (spodné časti Plaveckej siene, Bratislavská sieň)
neskorý pleistocén	najspodnejšia časť Plaveckej priepasti s jazerom

SÚVISLOSTI VÝVOJA JASKÝŇ A RELIÉFU OKOLITÉHO ÚZEMIA

Hladina podzemnej vody v jaskyniach sa dáva do súvisu so stabilizáciou eróznej bázy na povrchu pri jaskyni v čase spomalenia, prípadne až prerušenia vertikálnych tektonických pohybov alebo počas klimatických zmien, keď sa vytvárali riečne terasy. Preto aj jaskynné úrovně, vytvorené pôsobením kyseliny sírovej, umožňujú rekonštruovať nielen vývoj rozsiahlejších jaskýň, ale aj vývoj povrchového reliéfu v okolitých územiach (pozri Piccini et al., 2015; De Waele et al., 2024 a odkazy v nich uvedené). Na základe doterajších výskumov možno naznačiť niektoré súvislosti medzi vývojom jaskýň a povrchového reliéfu v oblasti Plaveckého hradného vrchu a priľahlej časti Záhorskej nížiny (tabuľka 2).

Jaskyňa Pec, Stenlyho jaskyňa a zrútené depresie, naznačujúce bývalé horné časti Plaveckej priepasti, sa nachádzajú len niekoľko desiatok metrov pod planačným povrchom zvaným poriečna roveň, ktorej zvyšky sa zachovali takmer na celom území Západných Karpát. Pôvodne sa zaraďovala do neskorého pliocénu (napr. Lukniš, 1962; Mazúr, 1965, Škvarček, 1975), po stanovení novej bázy kvartéru na 2,58 mil. rokov prislúcha skorému pleistocénu (napr. Minár et al., 2004; Zuchiewicz, 2011). Pozdĺž západného okraja Malých Karpát sa zvyšky poriečnej rovne zachovali vo výške 300 až 350 m n. m., 115 až 135 m nad ich predhorím (Škvarček, 1966); pozdĺž južnej časti Malých Karpát vo výške 260 až 300 m n. m., 130 až 140 m nad Dunajskou bránou a priľahlými časťami okolitých nížin (Mazúrová, 1973; Urbánek, 1992). Všetky jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu ležia hlboko pod zvyškami staršieho stredohorského zarovnaného povrchu (neskorý miocén), ktorý sa zachoval v Plaveckom krase vo výške 450 až 540 m n. m.; vrátane plochého vrcholu Pohanskej (495 m) asi 800 m juhovýchodne od skúmaných jaskýň (Stankoviansky, 1974; Liška, 1976; Mitter, 1983 a ďalší).

V Plaveckom hradnom vrchu sa fosílna a inaktívna jaskynná úroveň zachovali vo vyššie položenej jaskyni Pec a nižšie položenej Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti. Jaskynné úrovně, na ktorých vek poukazujú výsledky rádioizotopového datovania bazálnych sintrových kôr a magnetostratigrafia sedimentárnych výplní, odrážajú dve hlavné fázy stabilizácie lokálnej eróznej bázy v neskoršej časti skorého pleistocénu (jaskyňa Pec) a v strednom pleistocéne (Plavecká jaskyňa). Spomenuté iba niekoľko metrové vertikálne rozdiely medzi jaskynnými úrovňami v jaskyni Pec, ako aj v Plaveckej jaskyni a priľahlej Plaveckej priepasti môžu zodpovedať zmenám miestnej eróznej bázy počas pleistocénnych klimatických cyklov (Bella et al., 2022). V širšom okolí Plaveckého hradného vrchu je podobný vertikálny rozsah medzi klimaticky podmienenými riečnymi terasami zo skorého pleistocénu (Škvarček, 1971; Fordinál et al., 2012a, b), ako aj vertikálny rozsah terasovaných aluviálnych kužeľov zo stredného pleistocénu (Fordinál et al., 2012a).

Hoci výškový rozdiel medzi jaskynnými úrovňami v jaskyni Pec je 12 m a v Plaveckej jaskyni vrátane priľahlej Plaveckej priepasti 15 m, jaskynné úrovně vcelku zaznamenávajú zníženie miestnej eróznej bázy o 85 m. Vo výškovom rozpätí 58 m (medzi najspodnejšou rovňou v jaskyni Pec vo výške 283 m n. m. a najvrchnejšou úrovňou v Plaveckej jaskyni vo výške 225 m n. m.) nie sú známe žiadne jaskynné úrovně. To naznačuje rýchly a neprerušovaný pokles priľahlej časti Viedenskej panvy začiatkom stredného pleistocénu (pravdepodobne s rýchlosťou približne 150 m/mil. rokov, tektonická diferenciácia poriečnej rovne), ktorému predchádzali a za ktorým nasledovali stabilnejšie tektonické obdobia (Bella et al., 2019b, 2022).

Horizontálne úrovňové časti Plaveckej jaskyne vo výške 220 m a 216 m n. m. majú približne rovnakú výškovú polohu ako vrcholové časti Lakšárskej pahorkatiny v centrálnej časti Záhorskej nížiny, západne od Plaveckého hradného vrchu. Tieto jaskynné úrovně

Tabuľka 2. Základné súvislosti vývoja jaskýň a povrchového reliéfu (Plavecký hradný vrch a príľahlá časť Záhorskej nížiny), upravené podľa Bellu et al. (2022).

Table 2. Basic context of the evolution of caves and surface landforms (Plavecký hradný vrch Hill and the adjacent part of the Záhorská nížina Hilly Land), modified after Bella et al. (2022).

Geologické obdobie	Povrchové formy, fázy vývoja reliéfu	Jaskyne
neskorý pliocén / skorý pleistocén	poriečna roveň	
neskorá časť skorého pleistocénu > 0,99 až 1,07 mil. rokov	poklesávanie poriečnej rovne prerušované fázami stabilizácie	vrchná vývojová úroveň jaskyne Pec, Stenlyho jaskyňa
	eróznej bázy	stredná vývojová úroveň jaskyne Pec
		spodná vývojová úroveň jaskyne Pec
skorý stredný pleistocén > 600-tisíc rokov	poklesnutá a sčasti zdenudovaná poriečna roveň (vrcholové časti Lakšárskej pahorkatiny), okrajové časti zrezané spodnopleistocénnymi riečnymi terasami	vrchné úrovne Plaveckej jaskyne
stredný pleistocén	okrajové časti Lakšárskej pahorkatiny zrezané riečnou terasou zo začiatku stredného pleistocénu	stredná úroveň Plaveckej jaskyne
neskorý stredný pleistocén > 270-tisíc rokov	okrajové časti Lakšárskej pahorkatiny zrezané riečnou terasou z neskorého stredného pleistocénu	spodné úrovne v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti
neskorý stredný pleistocén < 270-tisíc rokov	poklesávanie Podmalokarpatskej zníženej s fázou stabilizácie eróznej bázy / vyššia terasa Rudavy	najspodnejšia vývojová úroveň Plaveckej priepasti
neskorý pleistocén	pokračujúce poklesávanie Podmalokarpatskej zníženej s fázou stabilizácie eróznej bázy / nižšia terasa Rudavy	najspodnejšia časť Plaveckej priepasti

pravdepodobne vznikli (alebo začali vznikať) pred poklesom Podmalokarpatskej zníženej (čiastkovej priekopovej prepadliny) medzi západným okrajom Malých Karpát a Lakšárskou eleváciou. Na mladšie fázy vývoja tamojšieho reliéfu poukazujú riečne terasy Rudavy, ktorá západne od Plaveckého Podhradia prerezáva Lakšársku eleváciu. V doline končiacej sa pri Veľkých Levároch vytvorila dve terasy v relatívnych výškach 10 až 12 m (Saale/Riss) a 3 až 5 m (Weichsel/Würm). V poklesávajúcej Sološnickej depresii rieka Rudava a jej prítoky nanášali fluvialné sedimenty a agradáciou udržiavali svoje pozdĺžne profily (Škvarček, 1975). Rieka Rudava zmenila smer svojho toku k západnému úpätiu Malých Karpát v dôsledku vyzdvihovania Lakšárskej elevácie (pozri Fordinál et al., 2012a a ďalší).

Päť strednopleistocénnych úrovní v Plaveckej jaskyni sa začalo vytvárať v období pred viac ako 600-tisíc rokmi a menej ako 773-tisíc rokmi a skončilo pred viac ako 270-tisíc rok-

mi. Relatívny pokles priľahlej oblasti Viedenskej panvy bol vtedy približne iba 20 až 30 m/mil. rokov (vrátane spomalenia a/alebo prerušenia poklesu počas formovania troch úrovní medzi najvyššie a najnižšie položenou úrovňou Plaveckej jaskyne). Nami získané výsledky poukazujú, že tektonické pohyby v prechodnej alpsko-karpatskej oblasti sa zintenzívnili najneskôr od konca stredného pleistocénu (pozri aj Salcher et al., 2012 a Neuhuber et al., 2020).

Podmalokarpatská zníženina vznikla prevažne počas neskorého stredného pleistocénu až neskorého pleistocénu v dôsledku reaktivovaných tektonických pohybov vo Viedenskej panve (pozri Salcher et al., 2012), pravdepodobne po vytvorení najspodnejších úrovní v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti. Priemerná rýchlosť relatívneho poklesu priľahlej časti Podmalokarpatskej zníženej (západne od Plaveckého hradného vrchu), kde kvartérna sedimentárna výplň je hrubá 40 až 45 m (citované vyššie), bola približne 240 až 260 m/mil. rokov (Bella et al., 2022). Rýchlosť poklesu v strede Sološnickej čiastkovej panvy (juhozápadne od Plaveckého hradného vrchu) bola výrazne intenzívnejšia, pravdepodobne viac ako dvojnásobná, pretože hrúbka sedimentov z konca stredného až neskorého pleistocénu presahuje 100 m. Počas tejto tektonickej fázy sa opakovali seizmické udalosti zaznamenané kolapsovými klinmi v neďalekých periglaciálnych eolických pieskoch (Šujan et al., 2022 a ďalší). Keďže palicovité stalagmity v Plaveckej priepasti (vysoké do 3 až 4,3 m, s priemerom okolo 10 cm), ktoré sa vytvárali pred 11,4- až 5-tisíc rokmi, nie sú otrasmi porušené, oblasť Plaveckého hradného vrchu nebola v holocéne zemetrasením postihnutá (Gribovskij et al., 2017).

ZÁVER

Plavecký hradný vrch na západnom zlomovom okraji Malých Karpát na rozhraní s Viedenskou panvou (Záhorskou nížinou) je jedinou preskúmanou lokalitou na Slovensku s výkytom hypogénnych jaskýň s vývojovými úrovňami vytvorenými pôsobením kyseliny sírovej. Hypogénnu speleogenézu potvrdzuje izotopová alterácia najvrchnejšej časti vápenca na jaskynnej stene ako dôsledok pôsobenia vody obohatenej o CO_2 hlbinného pôvodu vo freatickej fáze speleogenézy. Stúpajúce stenové kanály a reťazce nahor vystupujúcich asymetrických vyhlbenín, ako aj kupoly a slepé komíny indikujú bývalé výstupné prúdenie vody pozdĺž strmých zlomov a ďalších tektonických porúch. Ploché korózne skalné podlahy rozdelené výtokovými štrbinami (*fissure feeders*), hladinové zárezy po okrajoch plochých podláh, korózne výklenky, kanály, drobné náhradové kapsy a plytké kupoly vytvorené kondenzačnou koróziou na previsnutých stenách nad plochými podlahami, ako aj výskyt alunitu a jarositu naznačujú speleogenézu pôsobením kyseliny sírovej, ktorá vznikla oxidáciou sulfánu v blízkosti vodnej hladiny. Vody hlbokjej cirkulácie obsahujúce sulfán vystupovali pozdĺž zóny litavských zlomov na kontakte Viedenskej panvy a Malých Karpát. Sulfán pravdepodobne pochádza z vrchnotriasových anhydritov v podloží Viedenskej panvy.

Jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu dosahujú vertikálne rozpätie viac ako 70 m. Pozostávajú zo strmých puklinových štrbín, kanálov a komínov, vertikálnej šachty, avšak aj z horizontálnych chodieb v rôznych nadmorských výškach. Horizontálne úrovňové chodby vznikli rozpúšťaním vápencov účinkom kyseliny sírovej (postranným rozširovaním dutín okolo výtokových štrbín) v epifreatickej zóne počas stabilnej eróznej bázy. Najstaršie jaskynné úrovne v jaskyni Pec v nadmorskej výške 295 m, 287 m a 283 m n. m. sa vytvorili koncom skorého pleistocénu. Vtedy horná časť Plaveckej priepasti slúžila ako odtokový vertikálny kanál rozsiahlej podzemnej krasovej drenáže na vtedajšom severozápadnom úpätí Plaveckého hradného vrchu. V Plaveckej jaskyni sú dve vývojové úrovne v nadmorskej výške 225 m a 223 m n. m. vytvorené v skoršej časti stredného pleistocénu, v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti štyri vývojové úrovne v nadmorskej výške 220 m, 216 m,

214 m a 210 m n. m. zo strednej a neskoršej časti stredného pleistocénu. Hladina podzemnej vody z najspodnejších úrovní pravdepodobne klesla po tektonickej reaktivácii Podmalo-karpatskej zníženi.

Nami získané poznatky preukazujú, že okrem hypogénnych jaskýň vytvorených účinkom CO_2 z hlbinných zdrojov, sú na Slovensku zastúpené aj hypogénne jaskyne, resp. ich časti, na ktorých vytváraní sa podieľala kyselina sírová vznikajúca oxidáciou sulfátu v jaskynnom prostredí. Je evidentné, že pestrá geologická stavba a komplikovaný vývoj Západných Karpát sa prejavuje aj v rôznorodosti našich jaskýň. Výsledky posledných výskumov ukazujú, že práve hypogénne jaskyne by mali byť jednou z hlavných výziev ďalšieho geomorfologického výskumu jaskýň na Slovensku. Treba ich naďalej skúmať a bližšie objasňovať zákonitosti ich vývoja, aj v kontexte s vývojom okolitých území.

Prezentované výsledky sú výsledkom dlhodobého pretrvávajúcej interdisciplinárnej spolupráce slovenských, českých a poľských speleológov, geológov a geomorfológov. Zahraničným kolegom treba vysloviť vďaku za to, že sa naše spoločné výskumy, najmä z oblasti Nízkych Tatier a Slovenského krasu, rozšírili a úspešne preniesli aj do menej vedecky prebádaných jaskýň Malých Karpát.

Geologický a geomorfologický výskum jaskýň pri Plaveckom Podhradí sa realizoval v rámci vedeckých grantových projektov VEGA č. 1/0146/19 a 1/0323/24, Národného vedeckého centra Poľska č. 2019/35/B/ST10/04397, inštitucionálneho financovania Štátnej ochrany prírody Slovenskej republiky, Správy slovenských jaskýň, Geologického ústavu Akadémie vied Českej republiky, v. v. i., č. RVO67985831 a Geologického ústavu Poľskej akadémie vied. Merania ICP-MS (datovanie U-series) vykonala Šárka Matoušková. Prípravu a meranie paleomagnetických vzoriek vykonali Jiří Petráček, Lada Kouklíková a Kateřina Bachová. Za poskytnutie fotografií ďakujeme Pavlovi Staníkovi. Za pomoc pri terénnych prácach ďakujeme miestnym jaskyniarom – Milanovi Herzovi a Mariánovi Grúzovi, ako aj zamestnancom Štátnej ochrany prírody Slovenskej republiky, Správy slovenských jaskýň – Pavlovi Staníkovi, Dagmar Haviarovej, Miroslavovi Kudlovi a Milošovi Melegovi. Za podporu výskumu ďakujeme Správe Chránenej krajiny Malé Karpaty. Za cenné rady a pripomienky ďakujeme recenzentovi doc. RNDr. Alexandrovi Lačnému, PhD.

LITERATÚRA

- Arzmüller, G., Buchta, Š., Ralbovský, E., Weselly, G., 2006. The Vienna Basin. In Golonka, J., Picha, F. J. (Eds.): *The Carpathians and Their Foreland: Geology and Hydrocarbon Resources*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 84, Tulsa, 191–204. <https://doi.org/10.1306/985608M843068>
- Audra, P., 2008. Hypogenic sulphidic speleogenesis. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 26, 15–32.
- Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J.-Y., Nobécourt, J.-C., 2009a. Hypogene cave patterns. In Klimchouk, A. B., Ford, D. C. (Eds.): *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper, 1, Simferopol, 17–22.
- Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J.-Y., Nobécourt, J.-C., 2009b. Morphological indicators of speleogenesis: hypogenic speleogens. In Klimchouk, A. B., Ford, D. C. (Eds.): *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper, 1, Simferopol, 23–32.
- Bañacký, V., Sabol, A., 1973. Geologická mapa Záhorskej nížiny 1 : 50 000. GÚDŠ, Bratislava.
- Beidinger, A., Decker, K., 2011. 3D geometry and kinematics of the Lassee flower structure: implications for segmentation and seismotectonics of the Vienna Basin strike-slip fault, Austria. *Tectonophysics*, 499, 1–4, 22–40. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.006>

- Bella, P., 2010a. Plavecká jaskyňa a priepasť: speleogenéza spôsobená vodami vystupujúcimi pozdĺž okrajovej zlomovej zóny Malých Karpát. In Hochmuth, Z., Kulla, M., Csachová, S. (Eds.): Zborník abstraktov z 15. kongresu Slovenskej geografickej spoločnosti a 6. konferencie Asociácie slovenských geomorfológov. Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta UPJŠ, Košice 8. – 11. 9. 2010, 77–79.
- Bella, P., 2010b. Vytváranie jaskýň vodami vystupujúcimi pozdĺž okrajového zlomu Malých Karpát pri Plaveckom Podhradí – hydrogeologické podmienky a morfológické znaky. *Aragonit*, 15, 2, 65–70.
- Bella, P., Bosák, P., 2012. Speleogenesis along deep regional faults by ascending waters: case studies from Slovakia and Czech Republic. *Acta carsologica*, 41, 2–3, 169–192.
- Bella, P., Bosák, P., 2018. Zarovnané skalné podlahy v jaskyniach. *Aragonit*, 23, 1–2, 25–29.
- Bella, P., Bosák, P., Mikysek, P., 2018. Multi-phased and multi-process hypogenic speleogenesis along deep fault system: Plavecká jaskyňa Cave, Malé Karpaty Mountains, Slovakia. In Šujan, M., Csibri, T., Kiss, P., Rybár, S. (Eds.): *Environmental, Structural and Stratigraphical Evolution of Western Carpathians. Abstract Book*, 11th ESSEWECA Conference (November 29 – 30, 2018, Bratislava, Slovakia). Comenius University, Bratislava, 12.
- Bella, P., Bosák, P., Littva, J., 2019a. Hypogénny pôvod jaskyne Pec (Plavecký kras, Malé Karpaty): tektonická predispozícia a morfológické znaky. *Slovenský kras*, 57, 2, 133–146.
- Bella, P., Bosák, P., Mikysek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., 2019b. Multi-phased hypogene speleogenesis in a marginal horst structure of the Malé Karpaty Mountains, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 48, 2, 203–220. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.48.2.2265>
- Bella, P., Bosák, P., Mikysek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., Kdýr, Š., Pruner, P., Gradziński, M., Wróblewski, W., 2024a. Sulfuric acid caves in the Plavecké predhorie Foothills, Malé Karpaty Mountains, Slovakia. In Wróblewski, W., Gradziński, M., Sala, P. (Eds.): *Materiały 58. Sympozjum Speleologicznego (Piwniczna – Zdrój, 10. – 13. 10. 2024)*, Sekcja Speleologiczna Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika, Kraków, 41–42.
- Bella, P., Gaál, L., 2012. Hypogénne jaskyne na Slovensku: súčasné poznatky a zameranie výskumu. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 12, 1, 38–50.
- Bella, P., Gaál, L., 2017. Hypogene caves in Slovakia. In Klimchouk, A., Palmer, A., De Waele, J., Aurel, A., Audra, P. (Eds.): *Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Cave and Karst Systems of the World*. Springer, Cham, 299–311. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_19
- Bella, P., Hercman, H., Kdýr, Š., Mikysek, P., Pruner, P., Littva, J., Minár, J., Gradziński, M., Wróblewski, W., Velšmid, M., Bosák, P., 2022. Sulfuric acid speleogenesis and surface landform evolution along the Vienna Basin Transfer Fault: Plavecký Karst, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 51, 2, 105–122. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.2.2420>
- Bella, P., Mikysek, P., Littva, J., Bosák, P., 2024b. Sulfuric acid speleogenesis in the Plavecké predhorie Foothills of the Malé Karpaty Mountains: Plavecká priepasť Shaft. *Aragonit*, 29, 1, 31.
- Bílek, K., 1972. Struktúrní a hydrogeologický průzkum u Smrdák. *Mineralia Slovaca*, 4, 16, 291–299.
- Bosák, P., Bella, P., 2024. Sulfuric acid speleogenesis in the Plavecký Karst, Slovakia (model developed during data acquisition). In Kogovšek, B., Švara, A., Gabrovšek, F., Zupan Hajna, N. (Eds.): *31st International Karstological School “Classical Karst” – Data Acquisition and Analysis in Karst Systems. Abstracts & Guide Book*, Postojna, 60–61.
- Briestenský, M., Stemberk, J., 2008. Monitoring mikropohybov v jaskyniach Západného Slovenska. *Slovenský kras*, 46, 2, 333–339.
- Butaš, J., 2003. Plavecká priepasť PP-2. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 34, 1, 35–38.
- Caddeo, G. A., Railsback, R. A. L., De Waele, J., Frau, F., 2015. Stable isotope data as constraints on models for the origin of coralloid and massive speleothems: the interplay of substrate, water supply, degassing, and evaporation. *Sedimentary Geology*, 318, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.12.008>

- D'Angeli, I. M., Carbone, C., Nagostinis, M., Parise, M., Vattano, M., Madonia, G., De Waele, J., 2018. New insights on secondary minerals from Italian sulfuric acid caves. *International Journal of Speleology*, 47, 3, 271–291. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.47.3.2175>
- Decker, K., 1996. Miocene tectonics at the Alpine-Carpathian junction and the evolution of the Vienna basin. *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich*, 41, 33–44.
- Decker, K., Peresson, H., Hinsch, R., 2005. Active tectonics and Quaternary basin formation along the Vienna Basin Transform fault. *Quaternary Science Reviews*, 24, 3–4, 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.04.012>
- De Waele, J., D'Angeli, I. M., Audra, P., Plan, L., Palmer, A. N., 2024. Sulfuric acid caves of the world: A review. *Earth-Science Reviews*, 250, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2024.104693>
- De Waele, J., Audra, P., Madonia, G., Vattano, M., Plan, L., D'Angeli, I.M., Bigot, J.-Y., Nobécourt, J.-V., 2016. Sulfuric acid speleogenesis (SAS) close to the water table: Examples from southern France, Austria, and Sicily. *Geomorphology*, 253, 452–467. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.019>
- Droppa, A., 1958. Plavecká jaskyňa. *Československý kras*, 8–9, 120–123.
- Droppa, A., 1973. Prehľad preskúmaných jaskýň na Slovensku. *Slovenský kras*, 11, 111–157.
- Fairchild, I. J., Baker, A., 2012. *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. Wiley-Blackwell, 450 s.
- Egemeier, S. J., 1981. Cavern development by thermal waters. *Bulletin of the National Speleological Society*, 43, 2, 31–51.
- Fodor, L., 1995. From transpression to transtension: Oligocene-Miocene structural evolution of Vienna basin and the East Alpine-Western Carpathian junction. *Tectonophysics*, 242, 1–2, 151–182. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00158-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00158-6)
- Fordinál, K. (Ed.), Maglay, J., Elečko, M., Nagy, A., Moravcová, M., Vlačíky, M., Kučera, M., Polák, M., Plašienka, D., Filo, I., Olšovský, M., Buček, S., Havrila, M., Kohút, M., Bezák, V., Németh, Z., 2012a. *Geologická mapa Záhorskej nížiny v mierke 1 : 50 000*. MŽP SR, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Fordinál, K. (Ed.), Maglay, J., Elečko, M., Nagy, A., Moravcová, M., Vlačíky, M., Kohút, M., Németh, Z., Bezák, V., Polák, M., Plašienka, D., Olšovský, M., Buček, S., Havrila, M., Hók, J., Pešková, I., Kucharič, L., Kubeš, P., Malík, P., Baláž, P., Liščák, P., Madarás, J., Šefčík, P., Baráth, I., Boorová, D., Uher, P., Zlinská, A., Žecová, K., 2012b. *Vysvetlivky ku geologickej mape Záhorskej nížiny 1 : 50 000*. ŠGÚDŠ, Bratislava, 232 s.
- Franko, O., Kullman, E., Takáčová, J., Rebbo, A., Bím, M., Mojžiš, J., 1980. Exkurzný sprievodca po obyčajných, minerálnych a termálnych vodách Západného Slovenska. In *Materiály XXIII. celoštátnej geologickej konferencie Slovenskej geologickej spoločnosti, GÚDŠ, Bratislava*, 217–235.
- Franko, O., Melioris, L., 2000. Minerálne a termálne vody Slovenska – vznik a rozšírenie. *Podzemná voda*, 6, 1, 5–28.
- Galdenzi, S., 2012. Corrosion of limestone tablets in sulfidic ground-water: measurements and speleogenetic implications. *International Journal of Speleology*, 41, 2, 149–159. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.41.2.3>
- Galdenzi, S., Maruoka, T., 2003. Gypsum deposits in the Frasassi Caves, central Italy. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65, 2, 111–125.
- Gazda, S., 1980. Hydrogeochemické pomery Záhorskej nížiny. *Západné Karpaty, séria hydrogeológia a inžinierska geológia*, 2, 27–192.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., Ogg, G. M., 2020. Geological Time Scale 2020. *Elsevier Science*, 1357 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-1-02369-3>
- Gribovszki, K., Kovács, K., Mónus, P., Bokelmann, G., Konecny, P., Lednická, M., Mosley, G., Spötl, C., Edwards, R. L., Bednárík, M., Brimich, L., Tóth, L., 2017. Estimating the upper limit of prehistoric peak ground acceleration using an in situ, intact and vulnerable stalag-

- mite from Plavecká priepast cave (Detrekői-zsomboly), Little Carpathians, Slovakia – first results. *Journal of Seismology*, 21, 5, 1111–1130. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9655-3>
- Hanzel, V., Vrana, K., Kúšiková, S., 2001. Hydrogeologická mapa Pezinských Karpát v mierke 1 : 50 000. In Malík P. (Ed.): Hydrogeologické a hydrogeochemické mapy v mierke 1 : 50 000, regióny: južná časť Záhorskej (Borskej) nížiny, Pezinské Karpaty, SV časť Podunajskej nížiny, východná časť Veľkej Fatry, severná časť Spišsko-gemerského rudohoria, Ľubovianska vrchovina a Pieniny, Čierna hora. MŽP SR Bratislava, ŠGÚDŠ Bratislava, CD-ROM.
- Hanzel, V., Vrana, K., Švasta, J., Kohút, M., Nagy, A., Maglay, J., Bujnovský, A., Malík, P., 1999. Hydrogeologická a hydrogeochemická mapa Pezinských Karpát v mierke 1 : 50 000. Manuscript, GS SR Bratislava, 179 s.
- Herz, M., Velšmid, M., 2018. Postup v Plaveckej jaskyni – „Pjetka“. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 49, 4, 35–37.
- Hill, C. A., 1990. Sulfuric acid speleogenesis of Carlsbad Cavern and its relationship to hydrocarbons, Delaware Basin, New Mexico and Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 11, 1685–1694. <https://doi.org/10.1306/0C9B2565-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Hochmuth, Z., 2008. Krasové územia a jaskyne Slovenska. *Geographia Cassoviensis*, 2, 2, Košice, 210 s.
- Holko, L., Dóša, M., Michalko, J., Kostka, Z., Šanda, M., 2012. Isotopes of oxygen-18 and deuterium in precipitation in Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60, 4, 265–276. <http://dx.doi.org/10.2478/V10098-012-0023-2>
- Hók, J., Schuster, R., Pelech, O., Vojtko, R., Šamajová, L., 2022. Geological significance of Upper Cretaceous sediments in deciphering of the Alpine tectonic evolution at the contact of the Western Carpathians, Eastern Alps and Bohemian Massif. *International Journal of Earth Sciences*, 111, 1805–1822. <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02201-5>
- Hubek, M., Magdolen, P., 2008. Plavecká jaskyňa – nové objavy a nová mapa. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 39, 1, 58–61.
- Hydrologická ročenka – podzemné vody, 2007. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava 2008, 166 s.
- Hydrologická ročenka – podzemné vody, 2008. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava 2009, 166 s.
- Kantor, J., Rybár, M., Garaj, M., Rúčka, I., Richtářík, J., 1985. Izotopová charakteristika vôd rôznych genetických typov. Čiastková záverečná správa, Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 245 s. Geofond, archívne číslo: AP7619
- Kantor, J., Ďurkovičová, J., Eliáš, K., Rybár, M., Garaj, M., Ferenčíková, E., Hašková, A., 1982. Genetická charakteristika evaporitov Západných Karpát podľa izotopov síry. Čiastková záverečná správa, Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 345 s. Geofond, archívne číslo: 55064
- Košel, V., 2005. Ktorá je najteplejšia? *Spravodaj SSS*, 36, 4, 29–30.
- Kullman, E., 1966. Základný hydrogeologický výskum kvartéru Záhorskej nížiny – záverečná správa. Manuscript, Geofond, GÚDŠ, Bratislava, 169 s.
- Kullman, E., 1978. The role of neotectonic movements in the development of ground water reservoirs in the North-Eastern part of the Vienna Basin. *IAHS Proceedings and Reports (Red Books)*, 120 (Hydrogeology of Great Sedimentary Basins: Symposium IAH-IAHS, Budapest 1976), 392–400.
- Kullman, E., 1980. Hydrogeológia kvartéru a najvyšších častí neogénu Záhorskej nížiny. Západné Karpaty, séria hydrogeológia a inžinierska geológia, 2, 7–125.
- Kullman, E., Gazda, S., 1966. Základný hydrogeologický výskum kvartéru Záhorskej nížiny – záverečná správa. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 169 s. Geofond, archívne číslo: 17399
- Květ, R., 1971. Zur Genese der Schwefelwasserstoffwässer von Bad Smrdáky. *Časopis pro mineralogii a geologii*, 16, 2, 133–145.

- Lačný, A., Dušeková, L., Galová, M., 2022. Krasové územia Malých Karpát. Ochrana prírody, 40, 54–73.
- Ladwein, H. W., 1982. Bericht über H₂S-Verbreitung und Herkunft in Lagerstätten der ÖMV-AG und mögliches H₂S-Auftreten bei künftigen Explorationszielen. Interná správa ÖMV.
- Lange, A., 1954. Phreatic Floor Slot in Model Cave, Nevada. Science, 120, 3131, 1099–1100. <https://doi.org/10.1126/science.120.3131.1099>
- Lee, E. Y., Wagreich, M., 2017. Polyphase tectonic subsidence evolution of the Vienna Basin inferred from quantitative subsidence analysis of the northern and central parts. International Journal of Earth Sciences, 106, 2, 687–705. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1329-9>
- Liška, M., 1976. Geomorfologické pomery Plaveckého krasu. Slovenský kras, 14, 31–59.
- Lukniš, M., 1962. Die Reliefentwicklung der Westkarpaten. Wissenschaftliche Zeitschrift der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Mathematik-Naturwissenschaften, 11, 1235–1244.
- Mahel', M., Cambel, B., 1972. Geologická mapa Malých Karpát, 1 : 50 000. GÚDŠ, Bratislava.
- Mazúr, E., 1965. Major features of the West Carpathians in Slovakia as a result of young tectonic movements. In Mazúr, E., Stehlik, O. (Eds.): Geomorphological problems of Carpathians 1. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 9–53.
- Mazúrová, V., 1973. Príspevok k poznaniu dunajských terás v oblasti Devínskej brány. Geografický časopis, 25, 2, 112–121.
- Michalík, J., Broska, I., Franců, J., Jendrejáková, O., Kochanová, M., Lintnerová, O., Masaryk, P., Papšová, J., Planderová, E., Šucha, V., Zatkáliková, V., 1987. Správa o vyhodnotení výsledkov štruktúrneho vrtu DV-1 /Dobrá Voda – Konča Skaliek/. Geologický ústav SAV Bratislava, 339 s. Geofond archívne číslo 67376.
- Michalík, J., Broska, I., Franců, J., Jendrejáková, O., Kochanová, M., Lintnerová, O., Masaryk, P., Papšová, J., Planderová, E., Šucha, V., Zatkáliková, V., 1992. Štruktúrny vrt Dobrá Voda DV-1 (1 140,8 m) – Dobrá Voda, Konča Skaliek v Brezovských Karpatoch. Regionálna geológia Západných Karpát, 27, Bratislava, 139 s.
- Mikysek, P., Bella, P., Littva, J., Mikysková, E., Bosák, P., 2026. Speleogenetic implications of sulfuric acid processes in the Plavecký Karst, Slovakia: geomorphological and mineralogical insights. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 104256.
- Minár, J., Bizubová, M., Galloway, M., 2004. General aspects of denudation chronology of the West Carpathians. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 38, 5–22.
- Mitter, P., 1983. Geomorfologická rajonizácia krasu Malých Karpát. Slovenský kras, 21, 3–34.
- Neuhuber, S., Plan, L., Gier, S., Hintersberger, E., Lachner, J., Scholz, D., Lüthgens, C., Braumann, S., Bodenlenz, F., Voit, K., Fiebig, M., 2020. Numerical age dating of cave sediments to quantify vertical movement at the Alpine-Carpathian transition in the Plio- and Pleistocene. Geologica Carpathica, 71, 6, 539–557. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.71.6.5>
- Palmer, A. N., 2007. Cave Geology. Cave Books, Dayton, Ohio, 454 s.
- Palmer, A. N., 2013. Sulfuric acid caves: Morphology and evolution. In Shroder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.): Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, Karst Geomorphology, 241–257.
- Palmer, A. N., Hill, C. A., 2005. Sulfuric Acid Caves. In Culvier, D. C., White, W. B. (Eds.): Encyclopedia of Caves. Elsevier Academic Press, Burlington – San Diego – London, 573–581.
- Pavůza, R., Plan, L., 2008. Hydrothermalkarst im Bereich des Südlichen Wiener Beckens. In Schaudy, R., Withalm, G. (Eds.): Höhle und Mensch – Beiträge zur Karst- und Höhlenkunde mit Schwerpunkt Baden bei Wien. Speldok, 18, Wien, 1–17.
- Piccini, L., De Waele, J., Galli, E., Polyak, V. J., Bernasconi, S. M., Asmerom, Y., 2015. Sulphuric acid speleogenesis and landscape evolution: Montecchio cave, Albegna river valley (Southern Tuscany, Italy). Geomorphology 229, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.006>.
- Plan, L., Pavůza, R., Seemann, R. 2006. Der Nasse Achacht bei Mannersdorf am Leithagebirge, NÖ (2911/21) – eine thermal beeinflusste Höhle am Ostrand des Wiener Beckens. Die Höhle, 57, 1–4, 30–46.

- Plan, L., Spötl, C., Pavuza, R., Dublyansky, Y., 2009. Hypogene caves in Austria. In Klimchouk, A. B., Ford, D. C. (Eds.): *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, Simferopol, 121–127.
- Plan, L., Tschegg, C., De Waele, J., Spötl, C., 2012. Corrosion morphology and cave wall alteration in an Alpine sulfuric acid cave (Kraushöhle, Austria). *Geomorphology*, 169–170, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.006>
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Filo, I., Olšovský, M., Havrila, M., Buček, S., Maglay, J., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, L., Németh, Z., Ivanička, J., Broska, I., 2011. Geologická mapa regiónu Malých Karpát v mierke 1 : 50 000. MŽP SR, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Polák, M., Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Maglay, J., Olšovský, M., Havrila, M., Buček, S., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, L., Németh, Z., Malík, P., Liščák, P., Madarás, J., Slavkay, M., Kubeš, P., Kucharič, L., Boorová, D., Zlínka, A., Síránová, Z., Žecová, K., 2012. Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Malé Karpaty v mierke 1 : 50 000. MŽP SR, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 309 s.
- Polyak, V. J., Provencio, P., 2001. By-product materials related to H_2S - H_2SO_4 influenced speleogenesis of Carlsbad, Lechuguilla, and other caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Caves and Karst Science*, 63, 1, 23–32.
- Remšík, A., Fendek, M., Bodiš, D., Král, M., Zbořil, L., Kantor, J., Puchnerová, M., 1985. Geotermálna energia Viedenskej panvy – prognózne zásoby. Čiastková záverečná správa, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 121 s. Geofond, archívne číslo: 62595
- Royden, L. H., 1985. The Vienna Basin: A thin skinned pull-apart basin. In Biddle, K. T., Christie-Blick, N. (Eds.): *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37, Tulsa, 319–339. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0303>
- Rupprecht, B. J., Sachsenhofer, R. F., Zach, C., Bechtel, A., Gratzner, R., Kucher, F., 2019. Oil and gas in the Vienna Basin: hydrocarbon generation and alteration in a classical hydrocarbon province. *Petroleum Geoscience*, 25, 1, 3–29. <http://dx.doi.org/10.1144/petgeo2017-056>
- Salcher, B. C., Meurers, B., Smit, J., Decker, K., Hölzel, M., Wagreich, M., 2012. Strike-slip tectonics and Quaternary basin formation along the Vienna Basin fault system inferred from Bouguer gravity derivatives. *Tectonics*, 31, 3, TC3004. <http://dx.doi.org/10.1029/2011TC002979>
- Spötl, C., Plan, L., Dublyansky, Y., 2017. Hypogene karst in Austria. In Klimchouk, A., Palmer, A., De Waele, J., Aurel, A., Audra, P. (Eds.): *Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Cave and Karst Systems of the World*. Springer, Cham, 113–126. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_6
- Stankoviánsky, M., 1974. Príspevok k poznaniu krasu Bielych hôr v Malých Karpatoch. *Geografický časopis*, 26, 3, 241–257.
- Stankoviánsky, M., 1982. Geomorfologické pomery krasových území Malých Karpát. In Prosser, V. (Ed.): *Geomorfologická konference konaná na počest 100. výročí narození profesora J. V. Daneše (Praha 3. – 5. 6. 1980)*. Univerzita Karlova, Praha, 223–241.
- Šamajová, L., Hók, J., Csibri, T., Bielik, M., Teťák, F., Brixová, B., Slíva, E., Šály, B., 2019. Geophysical and geological interpretation of the Vienna Basin pre-Neogene basement (Slovak part of the Vienna Basin). *Geologica Carpathica*, 70, 5, 418–431. <https://doi.org/10.2478/geoca-2019-0024>
- Škvarček, A., 1966. Geomorfologické pomery strednej časti Malých Karpát. *Geografický časopis*, 14, 2, 132–145.
- Škvarček, A., 1971. Základné geomorfologické členenie Záhorskej nížiny. *Geografický časopis*, 23, 2, 133–136.
- Škvarček, A., 1975. Príspevok ku kvartérnemu vývinu doliny Rudavy na Záhorskej nížine. *Geografický časopis*, 27, 4, 364–371.
- Šmejkal, V., Hladíková, J., Michalíček, M., Procházková, V., 1981. Schwefelisotopenuntersuchungen an Sulphaten der Mineralwässer im Westkarpaten – System der ČSSR und in Westböhmen. *Freiburg Forschung II C*, 360, 57–74.

- Šmejkal, V., Michalíček, M., Krouse, H. R., 1971. Sulphur isotope fractionation in some springs of the Carpathian mountain system in Czechoslovakia. *Časopis pro mineralogii a geologii*, 16, 3, 275–283.
- Šmída, B., 2010. Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéftvorby. Dizertačná práca, Prírodovedecká fakulta UK, Bratislava, 221 s.
- Šubová, A., Holéczyová, Z., Sabol, A., Banský, V., Némethy, P., Gazda, S., Motlíková, O., Fukna, M., Bittner, D., Tomlain, J., Peterka, V., Žák, B., Machmerová, E., Oláhová, A., 1973. Záhorská nížiny II – Sološnická a Zohorská nádrž podzemných vôd – pitné vody, vyhládavací hydrogeologický prieskum. Manuscript, Geofond, GÚDŠ, Bratislava, 132 s.
- Šujan, M., Rybár, S., Thamó-Bozsó, E., Kľučiar, T., Tibenský, M., Sebe, K., 2022. Collapse wedges in periglacial eolian sands evidence late Pleistocene paleoseismic activity of the Vienna Basin transfer Fault (western Slovakia). *Sedimentary Geology*, 431, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106103>
- Tari, G., Bada, G., Beidinger, A., Csizmeg, J., Danišik, M., Gjerazi, I., Grasemann, B., Kováč, M., Plašienka, D., Šujan, M., Szafián, P., 2021. The connection between the Alps and the Carpathians beneath the Pannonian Basin: Selective reactivation of Alpine nappe contacts during Miocene extension. *Global and Planetary Change*, 197, 103401. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103401>
- Temovski, M., Rinyu, L., Futó, I., Molnár, K., Túri, M., Demény, A., Otoničar, B., Dublyansky, Y., Audra, P., Polyak, V., Asmerom, Y., Palcsu, L., 2022. Combined use of conventional and clumped carbonate stable isotopes to identify hydrothermal isotopic alteration in cave walls. *Scientific Reports*, 12, 9202. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12929-4>
- Tencer, J., 1991. Nové poznatky o Plaveckom krase. *Jaskyniar*, 3–9.
- Tencer, J., 2021. Tabuľka najdlhších jaskýň na Slovensku (stav k 31. 3. 2021). *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 52, 2, 98.
- Urbánek, J., 1992. Vývoj dolín v južnej časti Malých Karpát. *Geografický časopis*, 44, 2, 162–173.
- Vaškovská, E., 1971. Litologicko-faciálna charakteristika genetických typov kvartérnych sedimentov Záhorskej nížiny. *Geologické práce, Správy*, 55, 5–42.
- Vattano, M., Audra, P., Bigot, J.-Y., De Waele, J., Madonia, G., Nobécourt, J.-C., 2012. Acqua Fitusa Cave: an example of inactive water-table sulphuric acid cave in Central Sicily. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 21, 637–639.
- Vattano, M., Audra, P., Benvenuto, F., Bigot, J.-Y., De Waele, J., Galli, E., Madonia, G., Nobécourt, J.-C., 2013. Hypogenic Caves of Sicily (Southern Italy). In Filippi, M., Bosák, P. (Eds.): *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, vol. 3, Brno 19–27 July 2013, 144–149.
- Veľšmid, M., 2011. Nové poznatky o Plaveckom krase II. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 42, 4, 20–28.
- Veľšmid, M., 2013. Nový objav v Plaveckom krase – jaskyňa Pec. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 44, 1, 58–62.
- Webb, J. A., 2021. Supergene sulfuric acid speleogenesis and the origin of hypogene caves: evidence from the Northern Pennines, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 2, 455–464. <https://doi.org/10.1002/esp.5037>
- Zuchiewicz, W., 2011. Planation surfaces in the Polish Carpathians: myth or reality? *Geographia Polonica*, 84, 2, 155–178. <http://dx.doi.org/10.7163/GPol.2011.S2.12>

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	59 – 85	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	---------	------------------------

CHEMICKÉ ZLOŽENIE VÔD VYBRANÝCH JASKÝŇ PLAVECKÉHO HRADNÉHO VRCHU (PLAVECKÉ PREDHORIE, MALÉ KARPATY)

DAGMAR HAVIAROVÁ

Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš, Slovenská republika; dagmar.haviarova@ssj.sk

D. Haviarová: Water chemistry in selected caves of the Plavecký hradný vrch Hill (Plavecké predhorie Foothills, Malé Karpaty Mountains)

Abstract: The Plavecký hradný vrch Hill (Plavecké predhorie Foothills, Malé Karpaty Mountains) represents a part of the Plavecký Karst located near the village of Plavecké Podhradie. The most important caves of the site are Plavecká jaskyňa, Plavecká priepasť Shaft and Pec caves. In these caves monitoring of the chemistry of cave waters was conducted in the period 2019 – 2020, supplemented by the monitoring of the spring under Plavecká jaskyňa Cave. A total of 66 groundwater chemical analyses from 15 sampling sites showed significant differences in water chemistry among some sites. The chemical composition of seepage waters from all three caves is correlated with the mineralogical-petrographic character of the rock environment in which they are formed. The primary mineralisation process is the dissolution of carbonates, which results in the formation of Ca-HCO_3 type waters. In some cases, the chemical composition of the waters is shifted to various intermediate or mixed types of waters, in which nitrate and sulphate components also appear (e.g. $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$, $\text{Ca-HCO}_3\text{-NO}_3$, $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3\text{-NO}_3$). The most significant part of such waters is in the Plavecká priepasť Shaft. Maximum nitrate concentrations here exceed $300.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, and sulphate concentration exceeds $200.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Bat guano is likely the source of nitrates, as the caves of the Plavecký hradný vrch Hill (mainly Plavecká jaskyňa Cave) are important chiropterological sites. Higher concentrations of nitrates and sulphates increase the values of total water mineralisation, which in the case of all seepage waters ranges from $268.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ to $944.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. The waters from the former discharge fissure feeder in the Plavecká jaskyňa Cave and the waters of the larger underground lake of the Plavecká priepasť Shaft have a different chemistry than other cave waters. For these waters, higher concentrations of the Na-Cl component are typical, as in the case of waters of deeper circulation in the Paleogene and Neogene sediments. Nitrate concentrations at these sites are low, and sulphate concentrations are slightly elevated. A common feature of these waters is their higher temperature and lower pH. The waters of the spring under the Plavecká jaskyňa Cave also have a similar chemistry.

Key words: Plavecký hradný vrch Hill, cave, chemical composition, seepage water, groundwater, bat guano

ÚVOD

V období rokov 2018 až 2023 realizovala Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň projekt Ochrana a starostlivosť o jaskyne Slovenska I (kód 310011P445), financovaný z Operačného programu Kvalita životného prostredia. Jeho súčasťou bola realizácia činností zahrnutých do programov záchrany a programov starostlivostí

vybraných jaskýň, vrátane Programu záchrany Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti a Programu záchrany jaskyne Pec. V rámci projektu sa v Plaveckej jaskyni, Plaveckej priepasti a jaskyni Pec realizovali výskumy, resp. monitoriny viacerých zložiek jaskynného prostredia. Ich súčasťou bol aj monitoring jaskynných vôd mapujúci stav ich chemického zloženia a kvality v kontexte ich priestorového a časového rozloženia. S výnimkou Plaveckej priepasti išlo vôbec o prvé chemické analýzy vôd pochádzajúcich z týchto lokalít.

Článok vychádza z výsledkov analýz odobratých vzoriek vôd realizovaných v rámci monitorovacieho obdobia rokov 2019 – 2020. Svojím obsahom sa zameriava na priblíženie a vzájomné porovnanie základného chemického zloženia vôd troch najvýznamnejších jaskýň Plaveckého hradného vrchu (Plaveckej jaskyne, Plaveckej priepasti a jaskyne Pec).

ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA ÚZEMIA

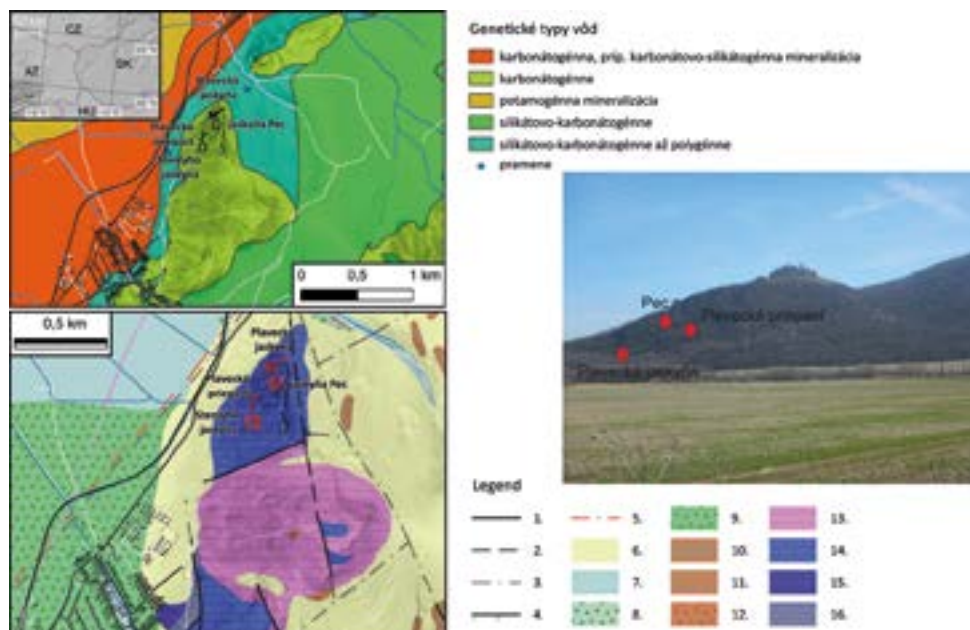
Územie Plaveckého hradného vrchu s rozlohou okolo 0,17 km² (Šmída, 2010) patrí na základe geomorfologického členenia Slovenska do Fatransko-tatranskej oblasti, celku Malé Karpaty, podcelku Pezinské Karpaty, časti Plavecké predhorie. Plavecký hradný vrch ako súčasť Plaveckého predhoria sa nachádza medzi obcami Plavecké Podhradie a Plavecký Mikuláš. Na vrcholovej plošine Plaveckého hradného vrchu sa nachádza zrúcanina Plaveckého hradu. Prevýšenie masívu od jeho západnej päty po hradnú plošinu je 190 m (Šmída, 2010).

Podľa administratívneho členenia Slovenska ide o územie Bratislavského kraja, okresu Malacky, katastra Plavecké Podhradie. Na severe a severozápade hraničí územie s Borskou nížinou (subprovincia Viedenskej panvy, oblasť Záhorskej nížiny). Územie je súčasťou Chránenej krajiny Malé Karpaty, národnej prírodnej rezervácie Pohanská, chráneného vtáčieho územia SKCHVU012 Malé Karpaty a územia európskeho významu SKUEV0267 Biele hory. Plavecký hradný vrch je súčasťou Plaveckého krasu, ktorý patrí medzi významné krasové územia Malých Karpát (Mitter, 1983; Hochmuth, 2008; Šmída, 2010; Lačný et al., 2022). Na jeho území rozprestierajúcom sa na ploche cca 60 km² medzi Rohožníkom, Trstínom a Prievalmi bolo zdokumentovaných 168 jaskýň, čo je najviac v rámci krasových území Malých Karpát (Láčny et al., 2022). Plavecký hradný vrch je intenzívne skrasovatený, Šmída (2010) v ňom opisuje 9 jaskynných lokalít. K najvýznamnejším a zároveň najväčším patrí Plavecká jaskyňa (PP-1), Plavecká priepasť (PP-2) a jaskyňa Pec. Plavecká jaskyňa a jaskyňa Pec sú podľa najnovších štúdií opisované ako hypogénne jaskyne so sulfurickými fázami vývoja (Bella et al. 2018, 2019a, b, 2020, 2021, 2022).

Plavecký hradný vrch spadá do Útvary dominantných, krasovo-puklinových podzemných vôd Pezinských Karpát s krasovo-puklinovou priepustnosťou (SK200060KF), rajónu MN 053 Mezozoikum severnej časti Pezinských Karpát a Brezovských Karpát. Územie Plaveckého hradného vrchu spadá do hydrogeologického komplexu triasových karbonátov chočského príkrovu a vyšších príkrovov s dominantnou krasovo-puklinovou priepustnosťou obklopeného kvartérnym komplexom deluviálnych sedimentov. Hydrogeologické a hydrogeochemické pomery územia sú zachytené na hydrogeologickej a hydrogeochemickej mape Pezinských Karpát v mierke 1 : 50 000 (mapový portál ŠGÚDŠ: <https://app.geology.sk/hydrogeol/>; Hanzel et al., 1999, 2001).

Z litologickej stránky je hydrogeologický komplex zaberajúci územie Plaveckého hradného vrchu naviazaný na wettersteinské vápence, tmavé vápence, organogénne vápence, wettersteinské dolomity, ramsauské a gutensteinské dolomity. Samotný Plavecký hradný vrch a jaskyne v ňom sa podľa geologickej mapy a jej vysvetliviek (Polák et al., 2011; Polák et al., 2012) nachádzajú v prostredí triasových wettersteinských vápencov hronika (považský príkrov, jablonická a havranická kryha). Ide o svetlé, bielosivé a sivohnedé organodetritické

vápence hlavne lagunárnej fácie, ktoré sú miestami dolomitizované. V nadloží sa nachádzajú svetlosivé a sivohnedé wettersteinské dolomity (obr. 1).



Obr. 1. Lokalizácia študovaného územia a jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu, genetické typy vôd podľa hydrogeochemickej mapy (Hanzel et al., 2001) a geologické pomery širšieho okolia (podľa Polák et al., 2011). Legend: 1. zlomy zistené; 2. zlomy predpokladané; 3. zlomy zakryté; 4. prešmyky zistené; 5. kvartérne aktívne zlomy zakryté; 6. deluviálne sedimenty, nečlenené; 7. fluviálne, litofaciálne nečlenené hliny, piesčité hliny, hlinité piesky až štrky dolinných nív riek a potokov; 8. proluviálne hliny, piesčité hliny až hlinité piesky vo vyšších nívnych náplavových kužeľoch; 9. proluviálne piesčité štrky, piesky a piesčité hliny s úlomkami hornín v nízkych náplavových kužeľoch; 10. ílovce v prevahe nad pieskovecami a drobnozrnnými zlepenkami; 11. drobnozrnné zlepenky, piesčité vápence, organogénne a organodetritické vápence; 12. brekcie, zlepenka a pieskovce; 13. svetlosivé a sivohnedé masívne a vrstvodité dolomity; 14. svetlé, bielosivé a sivohnedé organodetritické vápence, najmä lagunárnej fácie; 15. čierne a tmavosivé vrstvodité vápence, vápencové brekcie; 16. svetločervené arkózy, subarkózy, svetlé kremence, pestré jemnozrnné droby. Zostavil: J. Littva, Foto: D. Haviarová.

Fig. 1. Location of the study area and caves in the Plavecký hradný vrch Hill, genetic types of waters according to the hydrogeochemical map (Hanzel et al., 2001) and geological setting of the surroundings (from Polák et al., 2011). Legend: 1. faults, proven; 2. faults, inferred; 3. faults, concealed; 4. thrusts, proven; 5. Quaternary active faults, concealed; 6. colluvial sediments, undifferentiated; 7. fluvial, lithofacially undifferentiated clays, sandy loams, loamy sands to gravels of river and stream valley floodplains; 8. alluvial clays, sandy loams to loamy sands in fans of higher floodplain; 9. alluvial sandy gravels, sands, and sandy loams with rock fragments in fans of lower floodplain; 10. claystones predominant over sandstones and fine-grained conglomerates; 11. fine-grained conglomerates, sandy limestones, organogenic and organodetrital limestones; 12. breccias, conglomerates, and sandstones; 13. light grey and grey-brown massive and bedded dolomites; 14. light, whitish-grey and grey-brown organodetrital limestones, mainly of lagoonal facies; 15. black and dark grey bedded limestones, limestone breccias; 16. light red arkoses, subarkoses, light quartzites, variegated fine-grained greywackes. Compiled by J. Littva. Photo: D. Haviarová.

CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH JASKÝŇ A ODBERNÝCH MIEST

V rámci Plaveckého hradného vrchu boli na účely sledovania vybrané tri jaskyne: Plavecká priepať, jaskyňa Pec a Plavecká jaskyňa, ktoré sú považované za najvýznamnejšie jaskyne tohto územia.

Plavecká priepať (PP-2)

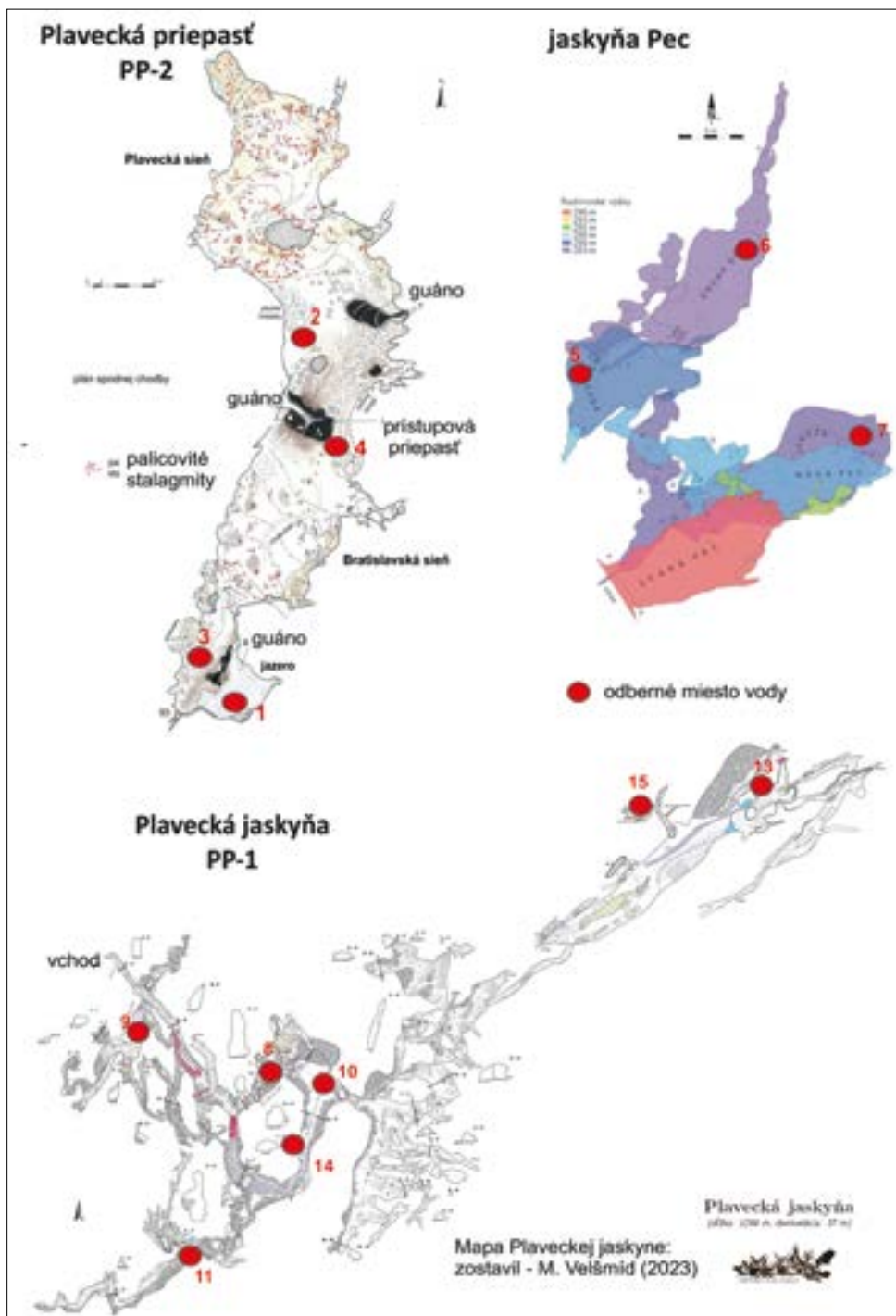
Plavecká priepať (PP-2) je dlhá 335 m a hlboká 70 m. Vchod do jaskyne leží v nadmorskej výške 270 m. Tvorí ho prepadisko s priemerom do 8 m. Hlavný sieňovitý až dómovitý priestor priepasti s dolnými príľahlými chodbami je dlhý okolo 130 m, pretiahnutý pozdĺž svahu hradného vrchu (Butaš, 2003). Jaskyňa bola objavená v roku 2002. Je významná hlavne svojou unikátnou výzdobou, ktorej dominujú palicovité stalagmity. Charakteristickým znakom priepasti je vyššia teplota vzduchu v porovnaní s ostatnými jaskyňami Plaveckého krasu. Priepať je z hydrologického hľadiska výnimočná prítomnosťou podzemného jazera nachádzajúceho sa v hĺbke cca 70 m od vchodu priepasti, v Bratislavskej sieni, na ploche približne 80 m² (Šmída, 2010). Celé dno jazera tvorí akumulácia starého guánu. Jazero nemá zjavný odtok ani prítok. Šmída (2010) opisuje dno jazera na základe orientačného potápania z roku 2002 s miernym úklonom k JV, s max. hĺbkou 4 m, priemernou hĺbkou 1 až 1,5 m. Pod hladinou JV cípu jazera sú popri stene 2 ploché úzke diery spadajúce kolmo dolu, ktoré sú však bez vytiahnutia guánovej hmoty speleopotápačky neprekonateľné. Výšková poloha dna jazera je podľa aktuálneho zamerania (zamerané P. Herichom 5. 9. 2025) len približne 2 m vyššie ako výška prameňa ležiaceho pod Plaveckou jaskyňou. Hladina vody v jazere za posledné roky výrazne klesala. V čase monitoringu (2019 – 2020) bol jeho stav nízky, voda sa nachádzala zhruba na polovici jeho pôvodnej plochy. O maximálnych stavoch jazera vypovedajú výraznejšie línie na stenách siene nad jazerom. Podľa nich sa hladina jazera v minulosti pohybovala v rozpätí aj viac ako 3 m.

Okrem jazera v Bratislavskej sieni sa drobné sintrové jazierka vyskytujú v Plaveckej sieni. Jazierka sú občasné, dotujú ich priesakové vody pochádzajúce zo zrážok prestupujúcich do podzemnej kaverny.

V Plaveckej priepasti a jej bezprostrednom okolí sa v období rokov 2019 až 2022 v rámci chiropterologického monitoringu zaznamenalo 12 druhov netopierov, v rámci zimných sčítaní sa ich počet pohyboval len v jednotkách (1 až 5 kusov) (Lehotská, 2022). Predpokladá sa, že v priepasti sa v minulosti vyskytovali letné kolónie pravdepodobne netopiera veľkého (*Myotis myotis*) (Lehotská, 2022). O prítomnosti väčšieho počtu netopierov v priepasti svedčia guánové plochy, ktoré sa tu nachádzajú na viacerých miestach.

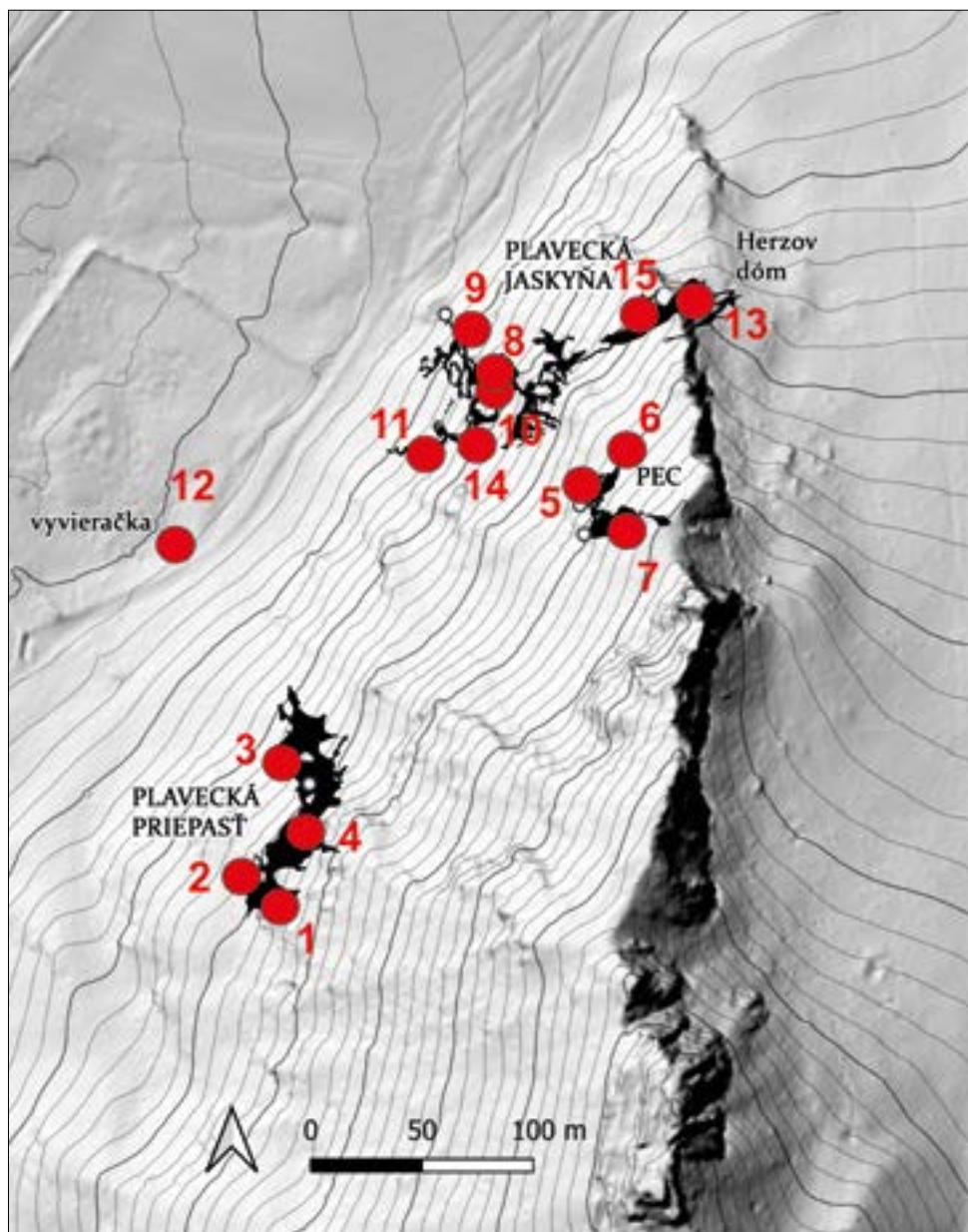
Z Plaveckej priepasti ako jedinej jaskyne Plaveckého hradného vrchu sú známe 2 staršie účelové chemické analýzy vôd, ktoré boli z jaskyne odobraté v septembri 2014 v rámci geochemického výskumu zameraného na speleogenetické procesy vo vybraných jaskyniach Malých Karpát, spojeného s opisom a modelovaním procesov rozpúšťania vápenca pri meniacej sa teplote vzduchu a obsahu CO₂ v ovzduší (Lánczos a Filipčíková, 2017). Jedna vzorka bola odobratá z presakujúcich zrážkových vôd (pH – 7,88, teplota vody – 12,2 °C, EC – 1139 µS·cm⁻¹, hydrogenuhličitaný – 277,641 mg·l⁻¹, voľný CO₂ – 5,72 mg·l⁻¹, dusičnaný – 296,7 mg·l⁻¹, sírany – 93 mg·l⁻¹), druhá z jej freatickej zóny (pH – 7,3, teplota vody – 13,5 °C, EC – 1006 µS·cm⁻¹, hydrogenuhličitaný – 326,457 mg·l⁻¹, voľný CO₂ – 26,4 mg·l⁻¹, dusičnaný – 7,97 mg·l⁻¹, sírany – 45 mg·l⁻¹) (presné miesta odberov z priepasti nie sú uvedené). Výsledky analýz vôd poukázali na rozdiel v ich chemickom zložení, s nárastom koncentrácií dusičnanov a síranov pri priesakovej vode, ktoré autori spájajú s biogénnym pôvodom.

V Plaveckej priepasti sa na hydrochemický monitoring vytypovali štyri odberné miesta vôd (obr. 2, 3). Hlavným odberným miestom bolo podzemné jazero v Bratislavskej sieni



Obr. 2. Mapa Plaveckej jaskyne, Plaveckej priepasti a jaskyne Pec s odbernými miestami vzoriek vôd (upravené podľa Veľšmida, 2013; Šmída, 2010).

Fig. 2. Map of the Plavecká jaskyňa Cave, the Plavecká priepasť Shaft and the Pec Cave with sampling sites of waters (modified after Veľšmid, 2013; Šmída, 2010).



Obr. 3. Poloha jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu s odbernými miestami vzoriek vôd. Spracoval: P. Herich, D. Haviarová

Fig. 3. Location of caves in the Plavecký hradný vrch Hill with sampling sites of waters. Compiled by P. Herich, D. Haviarová

(odberné miesto č. 1, obr. 4). Priesakové vody sa odoberali z obidvoch hlavných priestorov priepasti, t. j. z Plaveckej siene (odberné miesto č. 3) aj z Bratislavskej siene (odberné miesto č. 2), spolu s priesakom na dne priepasti tratiacim sa v sutine a lokalizovaným priamo pod rebríkom prístupovej šachty, ktorým sa schádza na jej dno (odberné miesto č. 4).



Obr. 4. Podzemné jazero v Plaveckej priepasti v čase vyššieho vodného stavu (2013).

Foto: P. Staník

Fig. 4. The underground lake in the Plavecká priepaš' Shaft at the time of a higher water level (2013). Photo: P. Staník

Jaskyňa Pec

Jaskyňa Pec so svojím vchodom v nadmorskej výške 296 m bola najvyššie položenou monitorovanou jaskyňou v Plaveckom hradnom vrchu. V roku 2013 sa v jaskyni vykonali významné speleologické objavy, ktoré dovtedy známu dĺžku jaskyne (len okolo 13 m) zväčšili na 208 m. V súčasnosti je dĺžka jaskyne 221 m s prevýšením 15 m. Základný opis jaskyne spolu s mapkou podáva Velšmid (2013). V jaskyni sa našli archeologické aj paleontologické nálezy. Jej súčasťou sú rozmanité speleotémy vrátane pizolitovej výzdoby, tzv. koreňových stalagmitov aj bieleho mäkkého sintra (Velšmid, 2013). Morfológické znaky jaskyne spolu s tektonikou a genézou poukazujúcou na jej hypogénny pôvod opisuje Bella et. al. (2019a).

V jaskyni Pec a jej bezprostrednom okolí bolo v období rokov 2019 až 2022 zistených 13 druhov netopierov (Lehotská, 2022). V rámci zimných sčítavaní sa identifikovalo 5 druhov netopierov, najpočetnejší bol podkovár malý (*Rhinolophus hipposideros*). Viaceré menšie kolónie podkovára malého s početnosťou do 210 kusov sa vytvárali hlavne vo Vstupnom dome jaskyne a v bočnom okruhu. Jaskyňa Pec sa tak radí k významným zimoviskám tohto druhu v Malých Karpatoch (Lehotská, 2022).

Jaskyňa Pec v súčasnosti nepatrí medzi hydrologicky zaujímavé lokality. Nenachádza sa tu žiadne väčšie jazero, v známych priestoroch jaskyne nebola dokumentovaná hladina podzemnej vody. Jaskyňa nie je bohatá ani na priesakové vody. Objemovo najväčšie občasné priesaky sú spojené s priestorom Druhého domu, kde sa z presakujúcej vody vytvárajú na podlahe drobné sintrové jazierka. Odborné miesto priesakových vôd z tohto domu bolo označené ako odborné miesto č. 6. Druhým odborným miestom priesakových vôd bol priestor Prvého domu za vstupom do jaskyne po jeho ľavej strane (odborné miesto č. 5). Posledné odborné miesto v jaskyni bolo situované v priestore tzv. Jacuzzi (odborné miesto



Obr. 5. Jaskyňa Pec, odberné miesto č. 7 (Jacuzza). Foto: D. Haviarová
 Fig. 5. Pec Cave, sampling site No. 7 (Jacuzza). Photo: D. Haviarová



Obr. 6. Vchod do Plaveckej jaskyne.
 Foto: D. Haviarová
 Fig. 6. Entrance to Plavecká jaskyňa Cave.
 Photo: D. Haviarová

č. 7, obr. 5), ktorá predstavuje vaňovitú vyhlbeninu s rozmermi cca $1,3 \times 7,0$ m. Z tohto miesta sa odoberali priesakové vody s najnižšou intenzitou priesaku v rámci všetkých troch odberných miest (obr. 2, 3).

Plavecká jaskyňa (PP-1)

Plavecká jaskyňa je najväčšou jaskyňou Plaveckého hradného vrchu. Jej súčasná zameraná dĺžka je 1253 m, denivelácia 20 m. Do jaskyne vedie vstupná štôľňa, ktorej vchod leží v nadmorskej výške 222 m. Súčasný vchod do jaskyne (obr. 6) sa nachádza na umelej halde, ktorá vznikla akumuláciou materiálu zo sondovacích prác v jaskyni. Pôvodný objavný vchod je v blízkosti súčasnej vstupnej chodby, po pravej strane, v stúpajúcej chodbičke orientovanej do svahu. V staršej literatúre sa Plavecká jaskyňa považovala za puklino-rútivú jaskyňu vytvorenú pôsobením atmosférickej vody pozdĺž tektonických porúch i medzivrstvových plôch (Droppa, 1958, 1973; Tencer, 1991), resp. za vrstevnato-rútivú jaskyňu (Mitter, 1983). Šmída (2010) opisuje Plaveckú jaskyňu ako freatickú jaskyňu v rámci zložitej výverovej zóny so staršími subhorizontálnymi chodbami a mladšími komínmi, ktorých vznik dáva do súvisu s opakovaným dvíhaním hladiny podzemnej vody. Novšie výskumy poukazujú na hypogénny pôvod jaskyne (napr. Bella, 2010; Bella a Bosák, 2012; Bella a Gaál, 2017; Bella et al., 2018, 2019a, b, 2020, 2021, 2022).

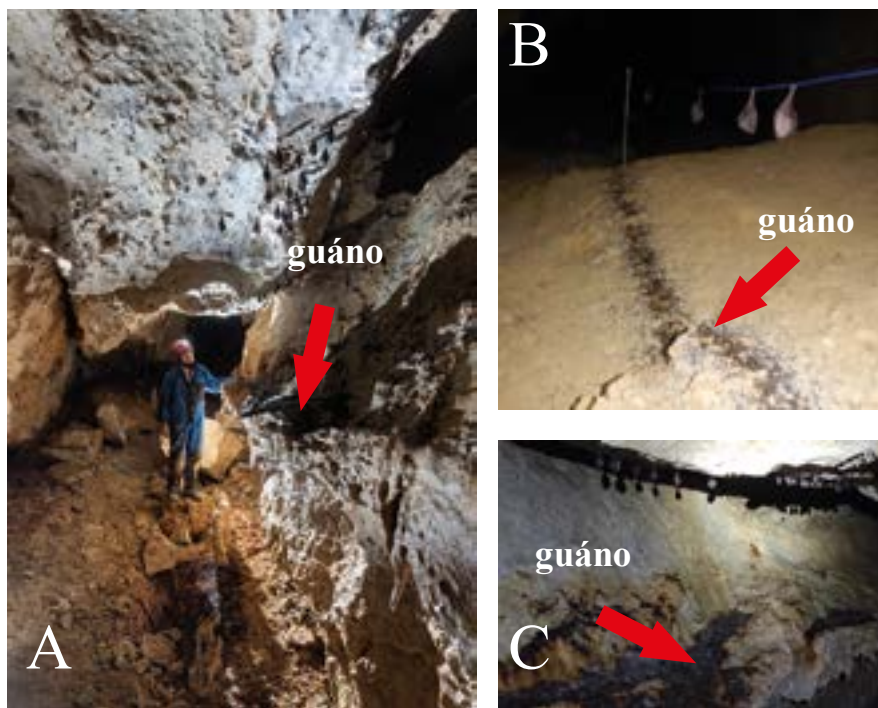
Plavecká jaskyňa bola už okolo roku 1800 sprístupnená grófom Jozefom Františkom Pálffym (Lalkovič, 2010). Išlo o prvú sprístupnenú jaskyňu na území dnešného Slovenska. Jaskyňa je významná aj z hľadiska svojej vyššej teploty, patrí k najteplejším jaskyniam na Slovensku

(Košel, 2005; Lačný et al., 2022). Jaskyňa má tri jaskynné úrovne.

Plavecká jaskyňa patrí medzi významné chiropterologické lokality. V jaskyni bol v období rokov 1994 až 2010 zaznamenaný výskyt 13 druhov netopierov s početnosťou do 200 jedincov s najvyšším zastúpením jedincov podkovára malého (*Rhinolophus hipposideros*) a to hlavne v priestoroch spodnej jaskynnej úrovne (Lehotská a Lehotský, 2010). Okrem toho sa až do roku 2015 nachádzala v jaskyni v priestore Dómu netopierov (neskôr v hornej etáži jaskyne) aj letná reprodukčná kolónia druhu netopiera veľkého (*Myotis myotis*) s maxi-

málnou početnosťou cca 950 jedincov (Lehotská a Lehotský, 2016). Medzi významné časti jaskyne s výskytom netopierov patrí aj Herzov dóm (obr. 7). V jaskyni je pomerne pestré a bohaté spoločenstvo bezstavovcov, čo popri vhodnej mikroklimé súvisí s dostatkom organickej hmoty vo forme netopierieho guána a drevnej hmoty, ktoré sú dôležitým potravným zdrojom pre mnohé druhy bezstavovcov (Kováč et al., 2005). Pod Plaveckou jaskyňou je situovaný výver mierne ohriatych vôd a výskyt penovcov na ploche asi 2 ha. Ich prítomnosť spolu so zvýšenou celoročnou teplotou vzduchu v jaskynných priestoroch spája Briestenský a Stemberk (2008) s prítomnosťou aktívnych zlomových porúch na tejto lokalite.

Odborné miesta vôd sa v Plaveckej jaskyni vybrali tak, aby pokryli všetky tri jaskynné úrovne (obr. 2). V rámci spodnej úrovne boli vytypované dve odborné miesta priesakových vôd; odborné miesto č. 9 (priesak v prednej časti jaskyne, v priestore pod vstupným mostíkom) a odborné miesto č. 11 (priesak v najspodnejších častiach jaskyne, objavených v roku 2007 spolu s jazerom predstavujúcim lokálnu hladinu podzemnej vody). Lokálna hladina podzemnej vody zdokumentovaná na spodnej úrovni jaskyne v roku 2007 mala podľa Veľšmida (2011) pravdepodobne súvis s vodou na dne Plaveckej priepasti. M. Briestenský umiestnil v tomto mieste v roku 2011 hladinomer s cieľom merať stav hladiny podzemnej vody; tá však v priebehu niekoľkých mesiacov po inštalácii klesla a viac nenastúpala. Bez vody bola táto časť jaskyne aj počas nášho monitoringu. Podobne nastal pokles hladiny aj v jazere Bratislavskej siene Plaveckej priepasti. Strednú úroveň v jaskyni reprezentovali odborné miesta č. 8 (priesak v Dóme netopierov, ktorý tvorí pretiahnutá sieň cca 13×4 až 5 m s výškou 10 až 11 m, v priestore ktorej sa na podlahe aj stenách vytvára pomerne veľká akumulácia guána), odborné miesto č. 10 (priesak v Kvapľovej sieni, ktorá sa svojimi



Obr. 7. Netopiere s čerstvým guánom; Plavecká jaskyňa, Herzov dóm. Foto: P. Staník (A), D. Haviarová (B, C)

Fig. 7. Bats with fresh guano; Plavecká jaskyňa Cave, Herzov dóm Chamber. Photo: P. Staník (A), D. Haviarová (B, C)



Obr. 8. Odberné miesto č. 14 (Plavecká jaskyňa, jazierko pred Kvapľovou sieňou).

Foto: D. Haviarová

Fig. 8. Sampling site No. 14 (Plavecká jaskyňa Cave, small lake in front of Kvapľová sieň Hall).

Photo: D. Haviarová



Obr. 9. Herzov dóm s pohľadom na jednu z vertikálnych štrbín vyúsťujúcich na podlahu dómu, ktorá je v spodnej časti vyplnená vodou.

Foto: P. Staník

Fig. 9. Herzov dóm Chamber with a view of one of the fissure discharge feeders, which is filled with water in the lower part. Photo: P. Staník

rozmermi 10×5 m radí k významným priestorom jaskyne; zo siene je možné prejsť do vyššieho poschodia jaskyne) a odborné miesto č. 14 (jazierko pred Kvapľovou sieňou, obr. 8). V rámci najvyššej úrovne sa odbery sústredili na priestor Herzovho dómu s dvomi odbornými miestami. Prvým boli plytké sintrové jazierka rozprestierajúce sa pozdĺž pravého okraja dómu (odborné miesto č. 13), druhým jedna z vertikálnych štrbín vyúsťujúcich na podlahu dómu (odborné miesto č. 15, obr. 9), ktorá v minulosti privádzala vodu z hlbších polôh skrasovateného zvodnenca do vyšších priestorov jaskyne pozdĺž strmých tektonických porúch (*fissure discharge feeder* = rozšírená štrbina v podlahe dómu, predstavujúca jeden z indikačných morfológických znakov hypogénnych epifreatických jaskýň). V spodnej časti štrbiny, v hĺbke okolo 10 až 13 m, sa nachádza vodná hladina.

Prameň Pod hradom

Prameň Pod hradom (prameň pod Plaveckou jaskyňou) vyviera v blízkosti vchodu Plaveckej jaskyne, pod lesnou cestou smerom k Plaveckému Podhradiu (obr. 10). Výver sa nachádza v nadmorskej výške 201,16 m. Celé územie pod prameňom je silnejšie podmäčkané, nesúce skôr znaky väčšieho prameniska s minimálne jedným ďalším menším výverom. Prameň je stály. Jeho výdatnosť je nízka, relatívne vyrovnaná. V štátnej hydrologickej sieti kvantify podzemných vôd Slovenska v správe Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) je prameň vedený pod číslom 86. Podľa Hanzela et al. (1999) ide o prameň bariérového typu s výdatnosťou podľa meraní v období rokov 1971 až 1995 $1,59 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ až $3,41 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a teplotou v rozpätí $11,8^\circ\text{C}$ až $13,4^\circ\text{C}$. Podľa údajov zverejnených v rámci hydrologických ročníkov za roky 2016 až 2020, 2022 a 2023 (<https://www.shmu.sk/sk/?page=2649>) sa monitorované teploty vody na prameni s týždenným krokom merania pohybovali v rozpätí $9,1^\circ\text{C}$ až $13,6^\circ\text{C}$ (priemerná ročná teplota $12,8^\circ\text{C}$ – rok 2018, 2019, 2020, 2023; $12,9^\circ\text{C}$ – rok 2017, 2022;

13,0 °C – rok 2016). Nedávno vybudoval SHMÚ na lokalite nový vodomerný objekt, na ktorom sa v súčasnosti už kontinuálne merajú teploty aj výdatnosti prameňa.

METODIKA

V prvotnej fáze prípravy úlohy sa vykonala rekognoskácia terénu s vytypovaním odberných miest v jednotlivých jaskyniach. Pri výbere odberných miest sa kládol dôraz na ich rôznorodosť a záber čo najväčšej časti dostupných jaskynných priestorov. Počet vzoriek a rozsah analýz bol podmienený výškou pridelených finančných prostriedkov. Rozbory vôd sa zamerali na základné anorganické ukazovatele (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe , Mn , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , CHSK_{Mn} , SiO_2 , voľného a agresívneho CO_2), doplnené v dvoch odberných cykloch o vybrané stopové prvky (Ag , Cu , Hg , Ni , Pb , Sb , Zn). Súčasne s odbermi na anorganické ukazovatele sa realizovali aj odbery na mikrobiologické analýzy. Sulfán bol analyzovaný jednorazovo zo vzoriek vôd vybraných odberných miest. Pôvodne plánovaná frekvencia pravidelných dvojmesačných odberov bola vzhľadom na prieťahy s verejným obstarávaním upravená a prispôbená ďalším podmienkam projektu tak, aby sa zabezpečila reprezentatívnosť odberov a ich výsledkov. Odbery sa realizovali v roku 2019 (10. 7., 25. 9., 28. 11.) a 2020 (3. 6., 23. 9.). V roku 2024 boli doplnené o odbery určené na stanovenie sulfánu vo vodách. Odberné miesta v jaskyniach sú opísané v predchádzajúcom texte, stručne zhrnuté v tabuľke 1 a vyznačené v obr. 2. a 3. Analýzy vzoriek vôd boli spracované subdodávateľsky v akreditovanom skúšobnom laboratóriu spoločnosti LL, s. r. o., Liptovské laboratóriá, Liptovský Mikuláš. Pri stanovení jednotlivých ukazovateľov sa použili štandardné operačné postupy a skúšobné metódy. Všetky odbery vzoriek vôd boli realizované v súlade s pokynmi a požiadavkami laboratória do poskytnutých vzorkovníc. Priamo v teréne sa vykonali terénne merania vybraných fyzikálno-chemických parametrov pomocou prístroja WTW Multi 3430 SET C: teplota a elektrolytická vodivosť vody (EC) použitím elektródy TetraCon®925, pH vody použitím elektródy SenTix®940, oxido-redukčný potenciál pomocou elektródy SenTix®ORP 900. Namerané hodnoty Eh boli prepočítané na štandardnú vodíkovú elektródu (Pitter, 2009). Laboratorne výsledky sa podrobne spracovali využitím štandardných štatistických a grafických nástrojov programu Excel. Hodnoty hmotnostných koncentrácií v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ boli prepočítané na látkové ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$) a ekvivalentové (c·z, c·z %) koncentrácie. V rámci geochemickej charakteristiky jaskynných vôd sa stanovili genetické aj chemické typy vôd. Pri chemických typoch sa urobila klasifikácia chemického zloženia vôd na princípe prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek nad 20 aj 25 c·z %. Pre jednotlivé vzorky boli vypočítané najvýznamnejšie charakterizačné koeficienty. Pri hydrogeochemickom hodnotení sa v rámci špeciálneho modelovania použil počítačový program PHREEQC-2 (Parkhurst a Appelo, 1999) s využitím výpočtov indexov



Obr. 10. Prameň pod Plaveckou jaskyňou (odberné miesto č. 12). Foto: D. Haviarová

Fig. 10. The spring bellow Plavecká jaskyňa Cave (sampling place No. 12).

Photo: D. Haviarová

Tabuľka 1. Odberné miesta vôd v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu.
Table 1. Sampling sites of water from the caves in the Plavecký hradný vrch Hill.

JASKYŇA	OZNAČENIE MIESTA ODBERU	LOKALIZÁCIA	POPIS
Plavecká priepasť (PP-2)	1	Bratislavská sieň	podzemné jazero
	2	Bratislavská sieň	priesak cca 5 m od jazera
	3	Plavecká sieň	priesakové vody dotujúce drobné sintrové jazierka na podlahe siene
	4	Priesak pod rebrikom	priesak na dne priepasti pod rebrikom prístupovej šachty, ktorým sa schádza na jej dno
jaskyňa Pec	5	Prvý dóm	občasný priesak po ľavej strane dómu za vstupom
	6	Druhý dóm	občasný priesak v zadnej časti dómu
	7	Jacuzza	jemný občasný priesak
Plavecká jaskyňa (PP-1)	8	Dóm netopierov	priesak v strednej časti dómu
	9	Pod mostíkom	priesak v prednej časti jaskyne (za vstupnou stôlnou), pod mostíkom
	10	Kvapľová sieň	priesak vedľa rebrika do vyššieho poschodia
	11	Pri hĺbkovej sonde	jemný priesak v najspodnejších častiach jaskyne z excentrickej sintrovej výzdoby spolu s výskytom mäkkého sintra
	13	Herzov dóm	plytké sintrové jazierka po pravej strane dómu v dĺžke viac ako 10 metrov
	14	jazierko pred Kvapľovou sieňou	malé občasnú jazierko pred Kvapľovou sieňou po ľavej strane v smere od vchodu jaskyne
	15	Herzov dóm	podzemná voda vo vertikálnej štrbine vyúsťujúcej na podlahu dómu v hĺbke okolo 13 až 15 metrov
prameň pod Plaveckou jaskyňou (prameň Pod hradom)	12	prameň cca 150 m JZ od Plaveckej jaskyne, pod lesnou cestou	stály prameň

nasýtenia *SI* vodného roztoku voči vybraným relevantným minerálom. Hodnoty *SI* blízke nule indikujú rovnovážny stav, záporné hodnoty nedosýtenie a kladné hodnoty indikujú presýtenie roztoku voči príslušnému minerálu. Pri vyhodnocovaní sme pre rovnovážny stav prijali interval hodnôt *SI* od -0,5 do +0,5. Na dátach sa vykonala aj hierarchická zhľuková analýza za použitia programu Statgraphics Certurion XV. V rámci zhľukovej analýzy bola

aplikovaná Wardova metóda, ktorá má v porovnaní s ostatnými metódami najlepšie rozlišovacie schopnosti a je použiteľná univerzálne pre rôzne typy dát (Machek, 1998).

VÝSLEDKY

Chemické zloženie vôd Plaveckej priepasti (PP-2)

Chemické zloženie vôd Plaveckej priepasti môžeme opísať na základe výsledkov analýz 20 vzoriek indikujúcich vzájomné rozdiely v závislosti od miesta a zdroja (tabuľky 2, 3). Najmenej mineralizované ($390,90 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $461,15 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) boli priesakové vody pod vstupnou šachtou priepasti. Dôvodom je pravdepodobne menšia hrúbka nadložia v tejto časti priepasti. Priesakové vody z tohto miesta sú slabo alkalické až alkalické, základného nevýrazného Ca-HCO_3 typu, podľa prevládajúcich iónov nad 25 c-z % Ca-HCO_3 typu (obr. 11). Najvyšší obsah vo vode majú hydrogénuhličitany ($151,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $206,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), z aniónov nasledujú dusičnany ($66,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $83,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a sírany ($49,4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $51,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), ktorých koncentrácie sú pomerne vyrovnané. Fosforečnany sú zvýšené na hodnoty $0,49 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $0,61 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. V kationovom zložení dominuje vápnik ($98,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $102,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), ktorého koncentrácie sú násobne vyššie ako koncentrácie horčíka ($4,3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $7,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), sodíka ($1,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $2,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), draslíka ($1,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $2,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), prípadne ďalších kationov. Priesakové vody zo vstupnej šachty vykazujú voči kalcitu rovnovážny stav. Voči dolomitu je nasýtenie podstatne nižšie (obr. 12). Vzorky vody boli v rovnováhe s dolomitom alebo boli voči tomuto minerálu nedosýtené, s priemernou hodnotou *SI* na hodnote $-0,59$.

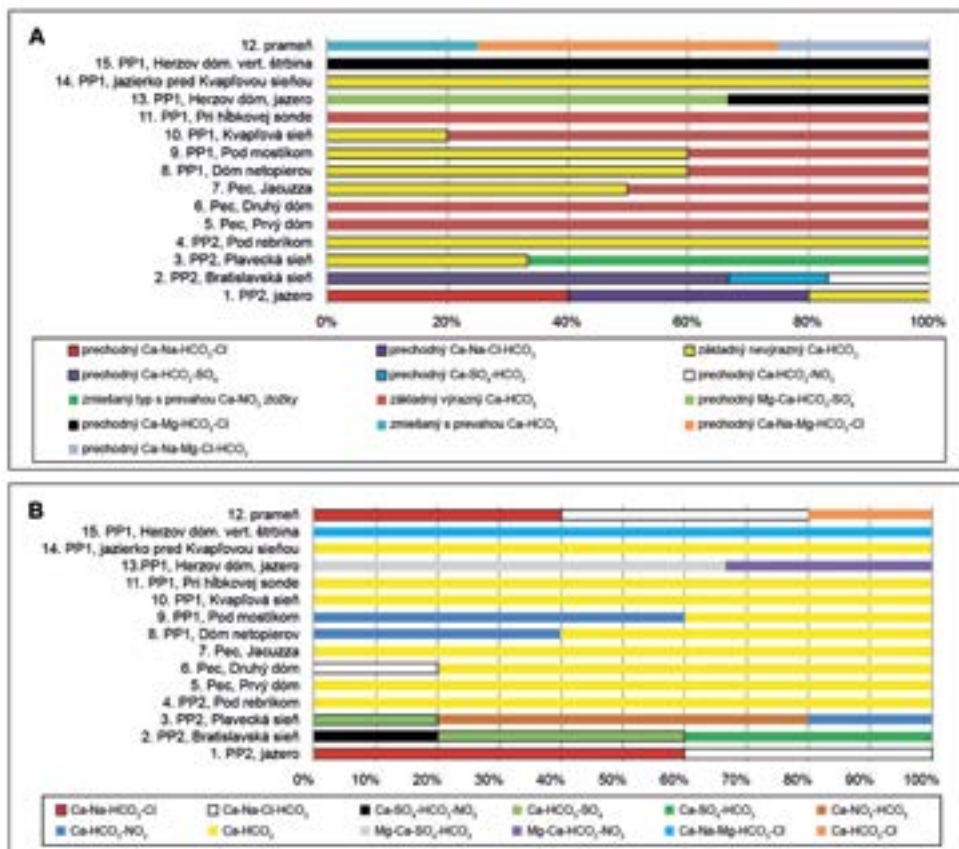
Vody zvyšných dvoch priesakov z opačných častí priepasti majú porovnateľnú hodnotu celkovej mineralizácie (priemerná hodnota mineralizácie vôd Bratislavskej siene $839,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a $844,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ Plaveckej siene). Vyššie hodnoty mineralizácie spôsobujú okrem hydrogénuhličitánov hlavne vyššie koncentrácie síranov a dusičnanov. Kým v Plaveckej sieni sa dusičnany pohybujú až do koncentrácie $325,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, čím sa dostávajú do pozície vedúceho aniónu, pri síranoch sú koncentrácie vyrovnané, s priemernou hodnotou na úrovni $106,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Pri priesakoch v Bratislavskej sieni sú naopak vyššie koncentrácie posunuté v prospech síranov (priemerná hodnota $209,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), kým koncentrácie dusičnanov sú nižšie, s menšou variabilitou hodnôt ($92,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $190,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Koncentrácie chloridov ($5,43 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $8,61 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) sú na oboch odberných miestach nízke. V kationovom zložení vôd dominuje vápnik, ktorého koncentrácie na týchto dvoch odberných miestach priesakových vôd sú najvyššie zo všetkých lokalít Plaveckého hradného vrchu ($164,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $223,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Koncentrácie horčíka sú oproti priesaku pod vstupnou šachtou mierne vyššie ($14,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $27,1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), v prípade sodíka a draslíka ide o porovnateľné koncentrácie. Variabilita koncentrácií hlavných iónov vo vode sa odráža aj na ich Gazdovej klasifikácii, prejavujúcej sa väčšou pestrosťou jednotlivých typov vôd. Najčastejšie sa pri priesakových vodách Bratislavskej siene vyskytuje prechodný $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ typ, pri vodách Plaveckej siene dominuje prechodný $\text{Ca-HCO}_3\text{-NO}_3$ typ a zmiešaný typ s prevahou kalcium-dusičnanovej zložky (obr. 11). Teplota vôd prekračuje hodnotu $12,0^\circ\text{C}$, vyššie hodnoty dosahuje v Bratislavskej sieni, kde sa nachádza podzemné jazero s nameranými teplotami $13,2^\circ\text{C}$ až $13,7^\circ\text{C}$. Nasýtenie priesakových vôd oboch siení voči kalcitu je porovnateľné, prevláda stav presýtenia voči tomuto minerálu. Voči dolomitu sa nasýtenie v čase výraznejšie mení s postupným striedaním stavu presýtenia, nedosýtenia aj rovnováhy (obr. 12). V prípade sadrovca a anhydritu aj napriek vyšším koncentráciám síranov vo vzorkách priesakových vôd z týchto siení platí stav nedosýtenia.

Samostatnou skupinou vôd v Plaveckej priepasti sú vody podzemného jazera Bratislavskej siene. Slabo alkalické vody so zvýšenou mineralizáciou v rozpätí $634,40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $762,70 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ charakterizujú vyššie koncentrácie hydrogénuhličitánov ($205,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

Tabuľka 2. Chemické zloženie jaskynných vôd a prameňa za obdobie 2019 – 2020, základné štatistické parametre.

Table 2. Chemical composition of cave waters and spring for the period 2019 – 2020, basic statistical parameters.

Lokalita		t _{med} (°C)	pH	EC (mS.m ⁻¹)	CHSK _{Na}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻	voľný CO ₂
					(mg.l ⁻¹)											
1 PP-2, Bratislavská sieň, jazero	min./max.	13,2/13,8	7,1/7,4	107,8/109,8	0,5/1,1	82/100	20,0/26,5	0,05/0,05	59,0/92,0	3,7/5,9	145,0/153,0	6,24/10,5	47,9/52,6	0,10/0,15	205/341	6,7/29,3
	median/ priemer	13,6/13,5	7,1/7,2	108,8/108,8	0,5/0,7	88/89	25,6/24,6	0,05/0,05	84,0/82,0	4,1/4,6	153,0/150,0	8,9/8,6	48,8/49,4	0,14/0,13	324/290	22,5/20,9
2 PP-2, Bratislavská sieň, priesak	min./max.	12,6/13,2	7,1/7,8	105,6/111,5	0,5/1,0	164/200	20,0/30,0	0,05/0,05	4,0/4,8	0,4/1,9	5,4/7,4	92,8/190,0	204,1/213,0	0,03/0,14	218/299	2,6/20,6
	median/ priemer	13,0/12,9	7,7/7,5	111,2/109,5	0,5/0,7	188/184	28,5/27,1	0,05/0,05	4,2/4,3	0,8/0,9	5,9/6,2	148/140	210,0/209,6	0,10/0,09	254/258	5,2/9,7
3 PP-2, Plavecká sieň	min./max.	12,1/12,6	6,7/8,3	111,6/128,7	1,0/2,3	178/223	14,0/19,1	0,05/0,05	2,0/2,5	12,4/14,0	7,3/8,6	48,4/325,8	94,7/117,0	1,06/1,33	0,79	3,1/50,8
	median/ priemer	12,4/12,4	7,9/7,6	121,4/120,1	1,6/1,7	200/200	19,1/18,2	0,05/0,05	2,4/2,3	13,1/13,0	7,6/7,9	279,0/247,8	107,0/106,9	1,30/1,25	0,94	5,6/17,2
4 PP-2, Priesak pod rebríkom	min./max.	12,1/13,1	7,2/7,9	53,5/57,4	0,5/1,8	98/103	4,3/7,0	0,05/0,05	1,2/2,8	1,9/2,9	2,9/4,6	66,8/83,0	48,3/51,0	0,49/0,61	151/206	2,6/7,4
	median/ priemer	12,4/12,5	7,8/7,7	54,6/54,8	0,5/0,9	101/101	4,8/5,1	0,05/0,05	2,4/2,2	2,2/2,3	3,4/3,7	71,7/73,5	49,7/49,7	0,53/0,54	168/174	3,8/4,4
5 Pec, Prvý dóm	min./max.	9,3/12,2	6,9/8,4	58,6/61,4	8,6/11,1	111/122	5,2/7,0	0,05/0,05	1,1/1,4	0,3/0,6	3,4/6,8	50,3/73,9	21,7/25,9	0,59/0,68	222/279	3,5/21,0
	median/ priemer	10,6/10,7	8,2/7,9	60,1/60,0	10,4/10,1	116/116	5,4/5,7	0,05/0,05	1,1/1,2	0,5/0,5	5,1/5,1	56,9/59,5	23,7/23,8	0,60/0,61	250/250	4,7/8,5
6 Pec, Druhý dóm	min./max.	9,0/10,5	7,9/8,4	51,6/71,4	4,2/11,1	98/155	2,4/9,0	0,05/0,05	1,4/1,8	0,1/1,5	2,0/8,5	10,2/34,2	22,4/36,8	0,48/0,53	199/447	2,6/4,1
	median/ priemer	10,0/9,9	8,3/8,2	52,3/56,9	6,1/6,9	106/116	3,8/4,7	0,05/0,05	1,5/1,5	0,2/0,5	6,9/6,1	23,3/22,8	36,2/32,9	0,50/0,50	231/277	3,4/3,4
7 Pec, Jacuza	min./max.	9,4/12,0	7,6/8,3	37,4/47,0	0,5/6,2	72/100	1,6/5,0	0,05/0,05	0,9/1,2	0,5/1,1	2,4/5,9	5,7/46,0	22,9/31,6	0,16/0,44	118/257	2,2/3,5
	median/ priemer	10,4/10,6	8,2/8,1	39,1/40,7	1,1/2,2	74/79	1,8/2,6	0,05/0,05	0,9/1,0	0,8/0,8	3,1/3,7	34,5/30,2	30,4/28,8	0,38/0,34	156/172	2,6/2,7
8 PP-1, Dóm netopierov	min./max.	10,9/11,6	7,8/8,3	33,6/49,4	1,6/4,3	57/89	3,0/7,7	0,05/0,05	0,7/1,1	0,70/1,30	2,1/3,2	45,2/77,1	15,2/24,0	1,02/1,23	112/181	1,7/3,9
	median/ priemer	11,3/11,3	8,1/8,1	43,5/41,7	3,4/3,4	72/73	6,8/6,0	0,05/0,05	0,9/0,9	1,00/1,01	2,4/2,5	46,2/53,9	20,7/19,6	1,07/1,09	162/150	3,4/3,1
9 PP-1, Pod mostíkom	min./max.	9,8/11,0	8,2/8,4	59,4/67,4	5,60/9,30	100/118	7,0/11,6	0,05/0,05	0,9/1,1	3,6/4,6	4,1/7,1	52,1/121,0	18,2/22,7	1,78/2,00	212/254	2,2/6,5
	median/ priemer	10,6/10,5	8,3/8,3	62,0/62,4	9,0/8,3	105/107	10,7/10,1	0,05/0,05	1,0/1,0	3,9/4,0	6,0/5,6	110,6/94,7	19,5/20,0	1,94/1,91	246/238	3,5/4,0
10 PP-1, Kvapľová sieň	min./max.	10,8/11,3	8,0/8,2	66,0/72,3	1,1/2,8	119/140	10,5/14,0	0,05/0,05	1,3/1,7	0,3/0,78	3,2/4,9	27,9/48,0	61,1/64,0	0,14/0,46	331/344	2,2/11,7
	median/ priemer	11,3/11,1	8,1/8,1	68,8/69,2	2,4/2,0	132/132	10,8/11,4	0,05/0,05	1,4/1,4	0,43/0,49	3,5/3,7	40,4/40,4	63,3/62,7	0,23/0,26	330/303	6,9/6,8
11 PP-1, Pri hĺbkovej sonde	min./max.	11,4/11,7	8,0/8,2	57,8/63,2	0,91/4,50	100/116	11,4/13,0	0,05/0,05	1,1/1,4	0,3/1,2	2,1/3,6	29,4/51,0	26,0/27,8	0,05/0,21	243/339	2,6/12,6
	median/ priemer	11,6/11,5	8,1/8,1	61,7/61,3	2,70/2,76	105/108	11,7/11,9	0,05/0,05	1,1/1,2	0,4/0,6	2,5/2,7	68,6/40,0	26,5/26,7	0,15/0,14	302/297	6,9/7,3
13 PP-1, Herzov dóm, jazierko	min./max.	11,4/11,6	7,4/7,8	122,8/129,2	2,1/3,5	125/140	81,0/97,0	0,05/0,05	5,8/7,4	2,8/3,5	16,3/17,3	130,3/143,0	67,3/343,0	0,15/0,52	260/306	7,8/11,8
	median/ priemer	11,5/11,5	7,5/7,6	126,0/126,0	2,7/2,8	128/131	85,0/87,7	0,05/0,05	6,1/6,4	3,4/3,2	17,0/16,9	137,2/136,8	285,0/230,6	0,46/0,37	299/288	10,5/10,0
14 PP-1, jazierko pred Kvapľovou sieňou	min./max.	10,8/11,3	8,0/8,2	50,1/54,2	2,2/4,1	92/104	6/6,7	0,05/0,05	1,4/1,5	0,4/0,9	3,9/5,3	55,0/65,2	45,7/54,4	0,04/0,12	154/237	1,7/6,7
	median/ priemer	11,3/11,1	8,2/8,1	52,5/52,3	3,2/3,2	93/96	6,3/6,3	0,05/0,05	1,5/1,5	0,6/0,6	4,1/4,5	62,0/60,7	47,3/49,1	0,11/0,09	199/197	3,9/4,1
15 PP-1, Herzov dóm vert. štrbina	min./max.	14,0/14,1	6,9/7,5	93,0/97,9	0,5/0,8	68/80	27,0/32,0	0,05/0,05	60,9/68,0	3,5/5,1	90,1/105,0	5,0/9,9	54,9/56,8	0,08/0,18	315/362	11,3/63,2
	median/ priemer	14,0/14,0	7,0/7,2	96,9/95,9	0,5/0,6	79/76	29,5/29,5	0,05/0,05	61,5/63,5	3,5/4,0	93,7/96,3	5,0/6,6	56,8/56,2	0,11/0,11	361/346	23,7/32,7
12 prameň	min./max.	12,8/12,9	7,5/7,5	117,5/120,5	0,5/1,2	82/91	25,9/27,6	0,05/0,05	74,0/104,0	3,7/8,1	163,0/183,0	5,6/8,2	49,5/55,0	0,03/0,19	224/341	8,8/18,2
	median/ priemer	12,8/12,8	7,5/7,5	118,6/118,6	0,5/0,7	88/88	26,9/26,7	0,05/0,05	94,0/90,4	3,9/5,1	176,0/174,0	7,9/7,5	50,3/51,5	0,17/0,14	315/291	11,1/13,2



Obr. 11. Klasifikácia chemického zloženia vôd jaskýň Plaveckého hradného vrchu; Gazdova klasifikácia (A), Klasifikácia podľa prevládajúcich iónov (nad 25 c-z %) (B).

Fig.11. Classification of the water chemical composition of the Plavecký hradný vrch Hill caves; Gazdova classification (A), the classification based on the principle of predominant ions (above 25 meq·L⁻¹ %) (B).

– 324,0 mg·l⁻¹) a chloridov (145,0 mg·l⁻¹ – 153,0 mg·l⁻¹). Naopak, koncentrácie dusičnanov sú v týchto vodách nízke (6,24 mg·l⁻¹ – 10,5 mg·l⁻¹), napriek tomu, že dno jazera vyplňajú mohutné sedimenty guána. Pri kationovom zložení vôd sú neštandardne vysoké koncentrácie sodíka (59,0 mg·l⁻¹ – 92,0 mg·l⁻¹), ktoré v niektorých prípadoch dokonca prevyšujú koncentrácie vápnika (82,0 mg·l⁻¹ – 100,0 mg·l⁻¹). Pri horčiku sú ich obsahy porovnateľné s priesakovými vodami Bratislavskej a Plaveckej siene (tabuľka 2). Nasýtenie vôd voči kalcitu aj dolomitu je relatívne vyrovnané, v prípade kalcitu posunuté k rovnovážnemu stavu, v prípade dolomitu k stavu nedosýtenia.

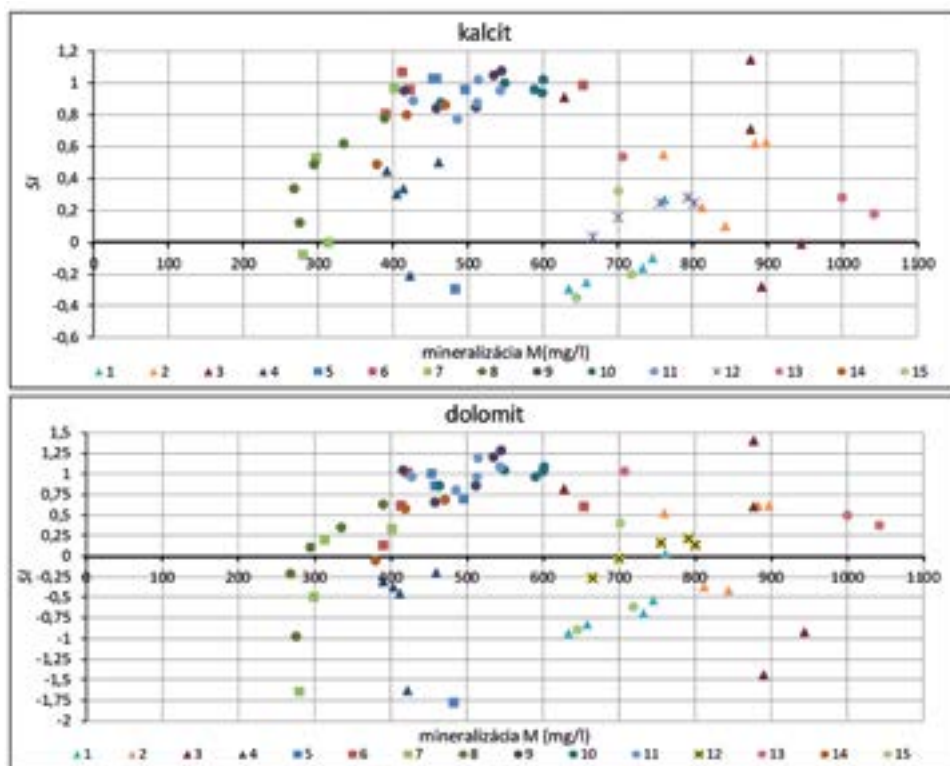
Chemické zloženie vôd jaskyne Pec

Z jaskyne Pec sa odobralo 12 vzoriek priesakových vôd, ktoré boli základného výrazného Ca-HCO₃ typu (všetky vzorky z Prvého a Druhého domu + dve vzorky z priestoru Jacuzzi), prípadne základného nevýrazného Ca-HCO₃ typu (zvyšné dve vzorky priesakových vôd Jacuzzi). Podľa prevládajúcich iónov nad 25 c-z % platila zhoda pri všetkých vzorkách, vody predstavovali Ca-HCO₃ typ (obr. 11). Najstabilnejšie chemické zloženie mali vody Prvého domu s mineralizáciou od 453,96 mg·l⁻¹ do 495,89 mg·l⁻¹ (tabuľky 2, 3). Mineralizácia vôd

Druhého dómu mala podstatne väčšiu variabilitu, od 389,95 do 652,97 mg·l⁻¹. Najnižšia mineralizácia (279,81 mg·l⁻¹ až 401,49 mg·l⁻¹) sa zistila pri vodách v sieni Jacuzzi, napriek tomu, že intenzita priesaku na tomto odbernom mieste bola v porovnaní s ostatnými odbernými miestami najnižšia. Hodnoty pH priesakových vôd jaskyne sa pohybovali v rozpätí 6,9 až 8,4 (medián 8,2 a 8,3), pri teplote kolísali hodnoty v rozpätí 9,0 °C až 12,2 °C.

Najvyššie koncentrácie v aniónovom zložení priesakových vôd mali hydrogénuhličitan. Druhým v poradí boli dusičnany, respektíve sírany. Kým v priestore Prvého dómu boli vyššie koncentrácie posunuté v prospech dusičnanov, s maximom 73,9 mg·l⁻¹ pri maxime síranov na úrovni 25,9 mg·l⁻¹, v Druhom dóme boli vyššie koncentrácie síranov v porovnaní s dusičnanmi (maximum síranov 36,8 mg·l⁻¹, maximum dusičnanov 34,2 mg·l⁻¹). V priestoroch Jacuzzi boli koncentrácie obidvoch týchto iónov vo vzorkách vôd pomerne vyrovnané (s priemerom 28,8 mg·l⁻¹ pri síranoch a 30,2 mg·l⁻¹ pri dusičnanoch). Chloridy na všetkých troch odberných miestach neprekročili 8,0 mg·l⁻¹. V kationovom zložení vôd dominoval vápnik s koncentraciami od 72,0 mg·l⁻¹ do 155,0 mg·l⁻¹, kým horčík neprekročil koncentráciu 10,0 mg·l⁻¹. Veľmi nízke (do 2,0 mg·l⁻¹) boli aj koncentrácie sodíka a draslíka. Koncentrácie fosforečnanov boli naopak zvýšené na všetkých odberných miestach s hodnotami na úrovni 0,16 mg·l⁻¹ až 0,68 mg·l⁻¹.

Najvyššie a zároveň najstabilnejšie nasýtenie vôd voči kalcitu a dolomitu bolo v Druhom dóme (obr. 12), kde vidieť aj bohatšiu jaskynnú výzdobu.



Obr. 12. Nasýtenie jaskynných vôd voči kalcitu a dolomitu v závislosti od ich celkovej mineralizácie.

Fig. 12. Degree of cave water saturation with respect to calcite and dolomite depending on their total mineralisation.

Tabuľka 3. Vybrané Palmer-Gazdove charakteristiky a hlavné charakterizačné koeficienty monitorovaných vôd, štatistické vyhodnotenie.

Table 3. Selected Palmer-Gazda characteristics and main characteristic coefficients of monitored waters, statistical evaluation.

Lokalita		M	Charakterizačné koeficienty				Palmer-Gazdove charakteristiky						
		(mg/l ¹)	rMg/rCa	rNa/rK	rSO ₄ /M	r(Na+K)/ r(Ca+Mg)	S ₁ (NO ₃)	S ₁ (Cl)	S ₂ (SO ₄)	S ₂ (NO ₃)	S ₂ (Cl)	S ₂ (SO ₄)	A ₁
		(e z %)											
1 PP-2, Bratislavská sieň, jazero	min./max.	634/763	0,33/0,51	17,01/42,29	0,05/0,06	0,416/0,624	1,1/1,8	27,8/37,1	0,0/0,0	0,0/0,0	1,1/12,1	9,2/11,6	37,9/51,5
	median/priemer	733/707	0,48/0,46	34,84/32,48	0,05/0,05	0,606/0,57	1,3/1,4	36,6/34,7	0,0/0,0	0,0/0,0	8,7/7,3	9,4/10,2	49,2/46,4
2 PP-2, Bratislavská sieň, priesak	min./max.	761/898	0,16/0,29	3,76/17,01	0,18/0,21	0,016/0,022	1,6/2,2	0,0/0,0	0,0/0,0	11,8/23,9	1,4/2,1	36,8/43,5	34,5/44,8
	median/priemer	844/840	0,26/0,25	9,83/10,2	0,19/0,19	0,02/0,02	1,9/1,9	0,0/0,0	0,0/0,0	18,9/18,5	1,4/1,6	40,1/39,7	35,6/38,3
3 PP-2, Plavecká sieň	min./max.	629/944	0,11/0,17	0,26/0,34	0,09/0,12	0,035/0,043	3,4/4,1	0,0/0,0	0,0/0,0	8,1/41,7	1,9/3,6	17,9/32,9	31,6/51,9
	median/priemer	877/844	0,14/0,14	0,29/0,30	0,10/0,10	0,037/0,04	3,6/3,7	0,0/0,0	0,0/0,0	37,1/32,8	1,9/2,3	20,6/22,4	39,3/38,9
4 PP-2, priesak pod rebríkom	min./max.	399/461	0,07/0,12	0,93/2,15	0,09/0,1	0,02/0,037	2,0/3,6	0,0/0,0	0,0/0,0	18,2/21,2	1,5/2,6	17,7/21,8	52,3/57,9
	median/priemer	413/420	0,08/0,08	1,79/1,67	0,1/0,1	0,028/0,03	2,8/2,8	0,0/0,0	0,0/0,0	20,2/20,1	1,8/2,0	20,4/20,0	53,9/55,0
5 Pec, Prvý dóm	min./max.	458/496	0,07/0,08	12,36/20,28	0,04/0,05	0,01/0,01	0,8/1,3	0,0/0,0	0,0/0,0	12,4/20,3	1,6/3,2	8,1/9,6	66,4/76,3
	median/priemer	483/479	0,08/0,08	12,66/15,1	0,04/0,04	0,01/0,01	1,0/1,1	0,0/0,0	0,0/0,0	12,7/15,1	2,7/2,5	8,3/8,7	75,0/72,6
6 Pec, Druhý dóm	min./max.	390/653	0,04/0,15	2,04/23,81	0,01/0,20	0,01/0,03	0,9/9,3	0,0/4,34	0/15,79	1,2/9,3	0,7/4,5	5,8/15,8	68,3/91,4
	median/priemer	417/469	0,05/0,07	14,22/13,57	0,04/0,08	0,01/0,01	1,2/3,1	0,0/1,09	0/3,95	6,2/5,7	4,0/3,3	14,8/12,8	74,6/77,7
7 Pec, Jacuza	min./max.	280/401	0,03/0,11	1,39/3,51	0,05/0,09	0,01/0,02	1,3/2,1	0,0/0,0	0,0/0,0	0,5/19,5	1,8/3,4	9,6/19,2	56,6/85,1
	median/priemer	305/323	0,04/0,06	2,46/2,46	0,08/0,08	0,01/0,02	1,4/1,6	0,0/0,0	0,0/0,0	13,2/11,6	2,4/2,5	16,5/15,5	67,8/69,8
8 PP-1, Dóm netopierov	min./max.	268/389	0,07/0,16	0,95/1,94	0,04/0,06	0,004/0,019	1,4/2,0	0,0/0,0	0,0/0,0	16,3/25,4	1,4/2,7	8,4/13,2	59,9/70,7
	median/priemer	294/312	0,15/0,14	1,7/1,58	0,05/0,05	0,014/0,013	1,5/1,6	0,0/0,0	0,0/0,0	22,2/21,1	1,7/1,9	10,5/10,6	62,1/64,5
9 PP-1, Pod mostíkom	min./max.	415/544	0,12/0,17	0,37/0,52	0,03/0,04	0,022/0,028	2,2/2,5	0,0/0,0	0,0/0,0	14,9/26,8	1,8/3,4	6,3/7,8	61,3/72,5
	median/priemer	511/493	0,16/0,16	0,44/0,44	0,03/0,03	0,03/0,02	2,3/2,4	0,0/0,0	0,0/0,0	25,4/22,6	2,5/2,6	7,1/6,9	64,9/65,6
10 PP-1, Kvapľová sieň	min./max.	464/601	0,13/0,16	3,71/7,37	0,09/0,1	0,008/0,012	0,8/1,2	0,0/0,0	0,0/0,0	5,1/10,3	1,2/1,7	16,9/22,7	64,4/75,2
	median/priemer	589/560	0,14/0,14	5,14/5,55	0,09/0,09	0,01/0,01	0,9/1,0	0,0/0,0	0,0/0,0	8,6/8,4	1,4/1,4	17,6/18,8	71,4/70,3
11 PP-1, Pri hĺbkovej sonde	min./max.	427/543	0,17/0,21	1,98/6,24	0,04/0,05	0,008/0,014	0,9/1,4	0,0/0,0	0,0/0,0	7,1/12,6	0,9/1,7	8,2/10,9	75,2/82,1
	median/priemer	513/496	0,18/0,18	4,56/4,26	0,04/0,04	0,009/0,01	0,9/1,1	0,0/0,0	0,0/0,0	8,6/9,4	1,3/1,3	8,7/9,1	78,4/79,1
13 PP-1, Herzov dóm, jazierko	min./max.	707/1042	1,00/1,25	3,05/3,60	0,06/0,24	0,02/0,03	2,3/2,8	0,0/0,0	0,0/0,0	11,9/24,0	3,3/5,8	16,0/48,8	33,5/51,5
	median/priemer	1000/917	1,07/1,11	3,52/3,39	0,21/0,17	0,03/0,03	2,7/2,6	0,0/0,0	0,0/0,0	14,5/16,7	3,4/4,2	43,2/36,0	36,6/40,5
14 PP-1, jazierko pred Kvapľovou sieňou	min./max.	379/470	0,11/0,11	2,83/6,10	0,08/0,11	0,01/0,02	1,4/1,8	0,0/0,0	0,0/0,0	15,9/17,3	1,9/3,2	16,3/24,1	53,75/64,4
	median/priemer	419/423	0,11/0,11	4,11/4,35	0,09/0,09	0,01/0,02	1,4/1,5	0,0/0,0	0,0/0,0	17,1/16,8	2,2/2,4	17,9/19,4	61,2/59,8
15 PP-1, Herzov dóm vertštrbina	min./max.	645/719	0,61/0,67	22,68/29,88	0,06/0,07	0,43/0,49	0,8/1,8	26,9/29,3	1,87/3,16	0,0/0,0	0,0/0,0	9,5/9,9	57,1/60,2
	median/priemer	701/688	0,65/0,64	29,59/27,38	0,06/0,06	0,47/0,46	0,8/1,1	28,1/28,1	2,20/2,41	0,0/0,0	0,0/0,0	9,8/9,7	58,6/58,6
12 prameň	min./max.	666/802	0,47/0,52	20,97/46,42	0,05/0,05	0,51/0,69	1,1/1,3	32,2/39,8	0,0/0,0	0,0/0,0	2,9/11,9	9,2/11,6	38,0/46,8
	median/priemer	700/725	0,51/0,50	45,35/40,47	0,05/0,05	0,68/0,65	1,3/1,2	39,1/37,8	0,0/0,0	0,0/0,0	7,4/8,2	10,7/10,5	40,5/42,3

Chemické zloženie vôd Plaveckej jaskyne (PP-1)

Výsledky analýz vôd z Plaveckej jaskyne v celkovom počte 29 kusov zo siedmich odberných miest (tabuľky 2 a 3) poukázali na priestorovú diferenciáciu ich základného chemického zloženia.

V prípade priesakových vôd, ktoré tvorili 4 odberné miesta v jaskyni, sa mineralizácia pohybovala od 268,0 mg·l⁻¹ do 601,0 mg·l⁻¹. Najnižšie priemerné hodnoty dosahovala pri priesakových vodách v Dóme netopierov, najvyššie v Kvapľovej sieni. Hodnoty pH priesakových vôd kolísali v intervale 7,8 až 8,4, s priemernou hodnotou 8,1. Pri teplote sa interval hodnôt pohyboval od 9,8 °C do 11,7 °C. Vody boli základného výrazného Ca-HCO₃ alebo základného nevýrazného Ca-HCO₃ typu. Podľa klasifikácie prevládajúcich iónov (> 25 c·z %) dominoval Ca-HCO₃ typ (obr. 11). Hlavným kationom vo vodách bol vápnik (57,0 mg·l⁻¹ až 140,0 mg·l⁻¹). Koncentrácie horčíka sa pohybovali pod úrovňou 14,0 mg·l⁻¹. V aniónovom zložení prevažovali hydrogénuhličitan, po ktorých nasledovali dusičnany a sírany. Priemerná koncentrácia dusičnanov na všetkých odberných miestach bola vyššia ako 40,0 mg·l⁻¹, s najvyššími hodnotami na odbernom mieste 9 (pri vstupe do jaskyne „Pod mostíkom“). Vyššie koncentrácie síranov (61,1 mg·l⁻¹ až 64,0 mg·l⁻¹) boli v priesakových vodách Dómu netopierov. Na ostatných miestach sa tieto hodnoty pohybovali do 28,0 mg·l⁻¹. Spoločným znakom všetkých odberov priesakových vôd boli nízke koncentrácie sodíka (do 1,7 mg·l⁻¹), draslíka (do 4,6 mg·l⁻¹) a chloridov (do 7,1 mg·l⁻¹). Nasýtenie vôd voči kalcitu aj dolomitu bolo pomerne vysoké. Vody boli presýtené voči týmto minerálom. Najnižšie nasýtenie vôd mali vody Dómu netopierov, kde sa pri kalcite aj dolomite vyskytoval častejšie rovnovážny stav, pri dolomite bol identifikovaný výskyt stavu nedosýtenia (obr. 12). Voči sadrovcu a anhydritu boli všetky vody jaskyne nedosýtené.

Plavecká jaskyňa nie je bohatá na sintrové jazierka. Ich chemické zloženie sme sledovali na dvoch z nich, v jazierku pred Kvapľovou sieňou (odberné miesto č. 14) a v jazierku Herzovho dómu (odberné miesto č. 13). Prvé jazierko je menšie, nepravidelného tvaru, s dĺžkou do 1,2 metra, priemernou hĺbkou do 30 cm. Dotuje ho skvapová voda, ktorá nemá celoročný charakter, a preto býva aj občasne suché. Druhým odberným miestom je systém viacerých vzájomne prepojených plytkých sintrových jazierok, ktoré vyplňajú pravú časť podlahy Herzovho dómu v dĺžke takmer 15 m. Chemické analýzy vôd z oboch miest preukázali výrazné rozdiely v ich chemickom zložení. Jazierko pred Kvapľovou sieňou je svojim chemickým zložením vôd podobné zloženiu priesakových vôd. Vody sú stredne mineralizované (379,0 mg·l⁻¹ – 470,0 mg·l⁻¹), základného nevýrazného Ca-HCO₃ typu s hodnotami pH 8,02 až 8,23. Koncentrácie hydrogénuhličitanov ako hlavného aniónu v týchto vodách sa pohybovali od 154,0 mg·l⁻¹ do 237,0 mg·l⁻¹, koncentrácie vápnika kolísali v rozmedzí 92,0 mg·l⁻¹ až 104,0 mg·l⁻¹. Koncentrácie ďalších kationov (horčíka, sodíka, draslíka) boli nízke (do 7,0 mg·l⁻¹). Pri aniónoch boli zvýšené koncentrácie dusičnanov (55,0 mg·l⁻¹ až 65,2 mg·l⁻¹) a síranov (45,7 mg·l⁻¹ až 54,4 mg·l⁻¹), kým koncentrácie chloridov neprekročili hranicu 5,5 mg·l⁻¹. Vody boli presýtené voči kalcitu, nasýtenie voči dolomitu bolo nižšie.

Vody jazierok v Herzovom dóme boli z chemickej stránky odlišné. Takmer dvojnásobne vyššia mineralizácia (707,0 mg·l⁻¹ až 1042,2 mg·l⁻¹) ich radí do skupiny vôd so zvýšenou mineralizáciou. Vody boli podľa prevládajúcich iónov nad 25 c·z % Mg-Ca-SO₄-HCO₃, respektíve Mg-Ca-HCO₃-NO₃ typu (obr. 11). V prípade kationov bol v týchto vzorkách okrem vápnika aj vyšší podiel horčíka (81,0 mg·l⁻¹ až 97,0 mg·l⁻¹), čo sa prejavilo aj na vyšších hodnotách charakterizačného koeficienta rMg/rCa (najvyššie zo všetkých odberných miest). Pri aniónoch sa okrem hydrogénuhličitanov zistili zvýšené koncentrácie síranov (63,7 mg·l⁻¹ až 343,0 mg·l⁻¹) a dusičnanov (130,0 mg·l⁻¹ až 143,0 mg·l⁻¹). Oproti priesakovým vodám boli aj o niečo vyššie hodnoty chloridov (16,3 mg·l⁻¹ až 17,3 mg·l⁻¹). Nasýtenie vôd voči dolomitu

bolo vyššie ako pri kalcite. V prípade obidvoch minerálov sa vyskytoval rovnovážny stav a stav presýtenia, ktorý je podmienkou pre tvorbu sintrovej výzdoby (obr. 12). Aj napriek vyšším koncentráciám síranov voči sadrovcu a anhydritu pretrvával stav nedosýtenia.

Posledným odberným miestom v jaskyni boli podzemné vody v jednej z rozšírených vertikálnych štrbín vyúsťujúcich na podlahu Herzovho dómu. Napriek zlej dostupnosti sa z tohto miesta odobrali 3 vzorky vody, ktorých mineralizácia dosahovala hodnoty $645,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $718,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Vody mali najnižšie hodnoty pH zo všetkých jaskynných vzoriek (7,0 až 7,5). Boli základného nevýrazného Ca-Mg-HCO₃ typu, podľa prevládajúcich iónov nad 25 c·z % Ca-Na-Mg-HCO₃-Cl typu. V ich aniónovom zložení dominovali hydrogénuhlíčitany. Vysoké však boli aj koncentrácie chloridov ($90,1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $105,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Naopak, dusičnany, ktoré vo vodách jazierka v Herzovom dóme prekračovali koncentrácie $100,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, v týchto vodách dosiahli maximálnu koncentráciu len na úrovni $9,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Pri katiónoch vo vzorkách vôd síce dominoval vápnik ($68,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $80,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), ale len o niečo nižšie boli koncentrácie sodíka ($60,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $68,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Nasýtenie vôd voči kalcitu a dolomitu bolo najnižšie zo všetkých vzoriek v jaskyni, v prípade obidvoch minerálov bolo posunuté do stavu nedosýtenia (obr. 12).

Chemické zloženie vôd prameňa Pod hradom

Vody z prameňa Pod hradom predstavovali vody so zvýšenou mineralizáciou pohybujúcou sa v rozpätí $666,35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ až $801,82 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Hodnoty pH boli stabilné pri všetkých odberoch, s konštantnou hodnotou 7,5. Rovnako stabilná bola aj teplota prameňa, ktorá bola v čase odberov na úrovni $12,8^\circ\text{C}$, respektíve $12,9^\circ\text{C}$. V rámci Gazdovej klasifikácie mali vody prameňa premenlivé zloženie. Išlo o prechodné a zmiešané typy vôd (obr. 11). Podľa prevládajúcich iónov nad 25 c·z % boli vody Ca-HCO₃-Cl, Ca-Na-Cl-HCO₃ alebo Ca-Na-HCO₃-Cl typu. Z aniónov mali v odoberaných vzorkách najvyššie zastúpenie hydrogénuhlíčitany ($224,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $341,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Vysoké koncentrácie boli aj pri chloridoch ($163,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $183,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), mierne zvýšené boli koncentrácie síranov ($49,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $55,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Koncentrácie dusičnanov boli naopak nízke ($5,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $8,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). V prípade katiónov dominoval sodík ($74,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $104,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) a vápnik ($82,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $91,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Mierne zvýšené boli aj koncentrácie horčíka ($25,9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $27,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), čo sa prejavilo na vyšších hodnotách rMg/rCa (medián 0,51). Vysoké hodnoty boli aj v prípade charakterizačného koeficientu rNa/rK, s hodnotami v intervale 20,97 až 46,42. Z hľadiska nasýtenia vôd voči kalcitu boli vody prameňa v rovnovážnom stave s hodnotami SI v intervale 0,03 až 0,28. Rovnako rovnovážny stav bol aj voči dolomitu s hodnotami SI v intervale 0,27 až 0,21. Voči sadrovcu boli vody výrazne nedosýtené.

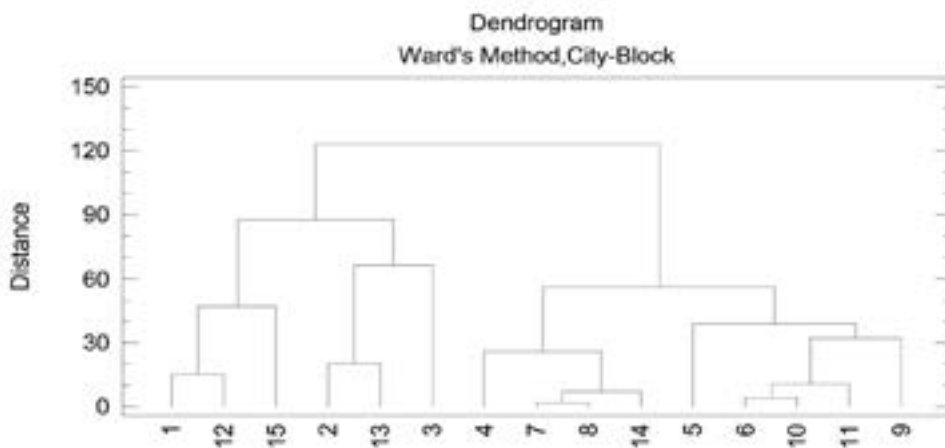
DISKUSIA

Obdobie rokov 2019 a 2020, keď sa v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu uskutočnil monitoring chemického zloženia vôd, môžeme z hľadiska zrážkových úhrnov považovať za dostatočne reprezentatívne. Región západného Slovenska bol v roku 2019 hodnotený ako zrážkovo normálny (100 % dlhodobého normálu, ročný zrážkový úhrn 618 mm), rok 2020 bol pre tento región zrážkovo nadnormálny (121 % dlhodobého normálu, ročný zrážkový úhrn 803 mm) (Kullman et al., 2020, 2021). V jaskyniach sa tak objavovalo dostatočné množstvo vôd, ktoré mohli byť odoberané a následne analyzované z hľadiska ich chemického zloženia. Rovnako rozsah piatich samostatných odberov nerovnomerne rozložených počas dvoch rokov, reflektujúcich rozdielne klimatické pomery na povrchu územia, môžeme považovať za dostatočne reprezentatívny vo vzťahu k získaným výsledkom a prezentovaným záverom.

Z hľadiska teplotných pomerov vôd sa identifikoval rozdiel medzi jednotlivými odbernými miestami a jaskyňami. Najnižšie teploty vody boli dokumentované v jaskyni Pec (9,0 °C – 12,2 °C), vyššie v Plaveckej jaskyni (9,8 °C – 11,7 °C) a najvyššie v Plaveckej priepasti (12,1 °C – 13,8 °C). Plavecká jaskyňa a Plavecká priepasť sa vyznačujú aj vyššími teplotami vzduchu, ktoré sú vyššie ako priemerné teploty vzduchu v tejto klimatickej oblasti, zodpovedajúce teplote okolo 9 až 10 °C (Šťastný et al., 2002). Priemerná ročná teplota, vzduchu napr. v Herzovom dome Plaveckej jaskyne, bola na základe kontinuálnych meraní počas rokov 2021 – 2022 11,3 °C, v Bratislavskej sieni Plaveckej priepasti pri jazere zodpovedala táto hodnota 11,4 °C. V Plaveckej priepasti sa dokumentovala najteplejšia voda v jazere Bratislavskej siene (13,2 °C až 13,8 °C). Podobne už Košel (2005), ktorý popri zbere živočíchov v priepasti meral aj teplotné pomery vody a vzduchu, uvádzal teplotu jazera na úrovni 13,1 °C (s nižšou teplotou vzduchu pri jazere) a Plaveckú priepasť označil ako najteplejšiu jaskyňu Slovenska. Ide o pomerne vysokú teplotu vody na pomery slovenských jaskýň. Stále však z hľadiska teploty ide len o obyčajné vody. Podobne Velšmid (2011) Plaveckú priepasť zaraďuje medzi najteplejšie jaskyne Slovenska s priemernou ročnou teplotou vzduchu okolo 13 °C. Zvýšenú teplotu vzduchu podľa autora spôsobuje voda, teplotu vody z priepasti uvádza na hodnote 13,5 °C. Príčinu vyššej teploty vody v jazere Plaveckej priepasti spájal Košel (2005) s autochtónnym vodným zdrojom. Šmída (2010) spája lokálne zvýšenú teplotu vody v jazere aj teplotu vzduchu v Plaveckej priepasti s masívnou chemickou reakciou vody s guánom, sprevádzanou biologickými procesmi. Z nášho pohľadu príčina vyššej teploty vody v jazere Plaveckej priepasti môže byť spôsobená čiastočne obidvoma zdrojmi. Spojenie vyššej teploty vody v jazere len s autochtónnym vodným zdrojom priamo dotujúcim jazero môže byť diskutabilné, keďže za posledné roky hladina vody v jazere klesá, ale teplota vody napriek tomu ostáva zachovaná. Nie je vylúčené, že podzemná voda s vyššou teplotou, pochádzajúca z hlbšieho obehu, môže v skrasovatenom masíve čiastočne ovplyvňovať teplotu najspodnejších jaskynných priestorov aj bez toho, aby priamo (a kontinuálne) dotovala jazero. Zvlášť pokiaľ sa tu nachádzajú zatiaľ neznáme fragmenty prívodných ciest podzemných vôd, ktoré by, podobne ako pri Plaveckej jaskyni, indikovali hypogénny pôvod priepasti. Ohrievanie vzduchu v obidvoch jaskyniach od teplejších vôd vystupujúcich pozdĺž zlomov spomína napr. aj Bella (2010) v súvislosti s ich genézou, t. j. v spojení vzniku Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti mierne ohriatymi vodami, vystupujúcimi pozdĺž okrajového zlomu Malých Karpát na rozhraní so Záhorskou nížinou, resp. severovýchodnou časťou Viedenskej panvy. Vyššie teploty vody sú dokumentované aj v prameni pod Plaveckou jaskyňou. Počas našich meraní boli teploty na prameni takmer stabilné, s rozptylom 0,1 °C (12,8 °C – 12,9 °C). Tieto merania korešpondujú s výsledkami monitoringu Slovenského hydrometeorologického ústavu. V roku 2019 sa teploty vody monitorované na prameni Pod hradom s týždenným krokom meraní podľa Hydrologickej ročenky Podzemná voda 2019 (Kullman et al., 2020) pohybovali v rozpätí 12,4 °C až 13,2 °C, s priemernou ročnou teplotou 12,8 °C. V roku 2020 (Kullman et al., 2021) to bolo v rozpätí 9,1 °C až 13,2 °C, rovnako s priemernou ročnou teplotou 12,8 °C. Hoci teplota vody na prameni je o málo nižšia ako teplota vody jazera, predpokladáme ich vzájomnú genetickú súvislosť v spojení so zdrojom, ktorý indikuje ich hlbší obeh. Napovedá tomu aj chemické zloženie vôd obidvoch odberných miest, ktoré vykazuje vysokú mieru korelácie (korelačný koeficient 0,999). Vody podzemného jazera v Plaveckej priepasti nemajú žiadne extrémne chemické zloženie, ako sa domnieval Košel (2005). Hodnoty pH sú síce jedny z najnižších v rámci odberných miest všetkých troch jaskýň, stále však neklesajú pod hodnotu 7,0, t. j. do kyslejšieho pásma (tabuľka 2). Spoločným znakom vôd z jazera a prameňa je vyššia mineralizácia spôsobená okrem vyšších koncentrácií hydrogénuhličitanov aj vyššími koncentraciami chloridov a sodíka a nízkymi koncentraciami dusičnanov.

Ešte vyššie teploty vody ako v jazere Plaveckej priepasti boli dokumentované pri vode vyplňujúcej časť rozšírenej vertikálnej štrbiny vyúsťujúcej na podlahu Herzovho domu Plaveckej jaskyne. Predpokladáme, že tieto vody predstavujú súčasť lokálnej úrovne hladiny podzemnej vody Plaveckého hradného vrchu. Ich teplota bola na úrovni 14,0 a 14,1 °C. Vody okrem vyššej teploty mali aj najnižšie hodnoty pH zo všetkých odberných miest. Preukázaná bola podobnosť chemického zloženia vôd s vodami jazera Plaveckej priepasti a prameňa pod Plaveckou jaskyňou (tabuľka 2). Rovnako aj tu sa zistili nízke hodnoty dusičnanov a vyššie koncentrácie chloridov a sodíka. Spoločným znakom vôd z týchto troch odberných miest boli rovnako nižšie hodnoty pH, vyššie obsahy voľného CO_2 a nižšie nasýtenie voči kalcitu. Síro-
vodík sa v týchto vodách nezistil. Kým pri väčšine odberných miest bol vo vodách hlavným kationom vápnik, pri niektorých vzorkách vôd z jazera v Plaveckej priepasti a z prameňa pod Plaveckou jaskyňou boli v porovnaní s vápnikom vyššie koncentrácie sodíka. Hodnoty korelačných koeficientov z priemerných hodnôt chemických analýz týchto dvoch odberných miest boli vysoké; 0,988 v prípade vôd zo štrbiny v Herzovom dome Plaveckej jaskyne a vôd jazera v Plaveckej priepasti, 0,992 v prípade vôd zo štrbiny v Herzovom dome Plaveckej jaskyne a vôd prameňa pod Plaveckou jaskyňou. Spoločným znakom vôd z týchto troch odberných miest boli aj vyššie hodnoty charakterizačných koeficientov $r_{\text{Mg/rCa}}$, $r_{\text{Na/rK}}$ a $r_{(\text{Na+K})/(\text{Ca+Mg})}$ (tabuľka 3). Hodnoty $r_{\text{Mg/rCa}}$ sa pohybovali v rozpätí 0,33 až 0,61, čo indikuje pohyb vôd v dolomitických vápencoch alebo zmiešaný obeh v dolomitoch aj vápencoch. Podľa Flákovéj et al. (2020) sa za vody z čistých vápencov pokladajú len vody s hodnotami tohto koeficienta pod 0,1. Hodnoty $r_{(\text{Na+K})/(\text{Ca+Mg})}$ boli vypočítané v intervale 0,42 až 0,69. Podobnosť chemického zloženia vôd všetkých troch odberných miest potvrdili aj výsledky zhlukovej analýzy (obr. 13).

Na základe výsledkov zhlukovej analýzy sa identifikovala aj podobnosť chemického zloženia vôd z ďalších troch odberných miest: z jazierka v Herzovom dome Plaveckej jaskyne a priesakových vodách z Bratislavskej a Plaveckej siene Plaveckej priepasti.



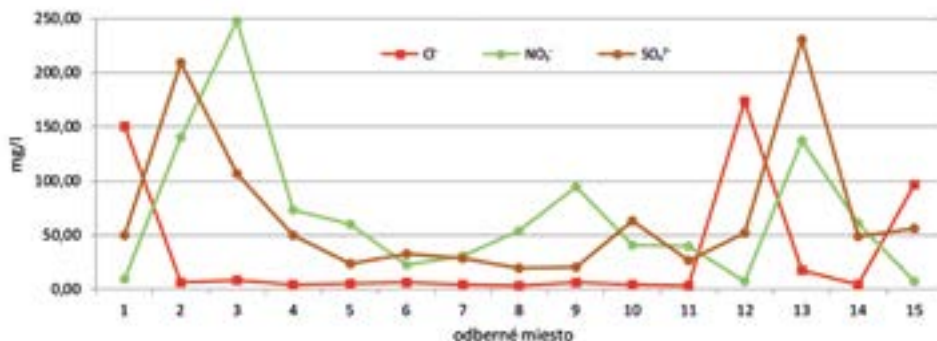
Obr. 13. Dendrogram hierarchickej zhlukovej analýzy jaskynných vôd.

Obr. 13. Dendrogram of the hierarchical cluster analysis of cave waters.

Charakteristickým znakom týchto vôd je pomerne vysoká mineralizácia, vyššie obsahy horčíka, vysoké koncentrácie síranov a dusičnanov, na druhej strane nízke koncentrácie sodíka a chloridov (obr. 14). Táto skupina vôd má zároveň najvyššie hodnoty charakterizačného koeficienta $r_{\text{SO}_4/\text{M}}$. Hlavne v prípade jazierka v Herzovom dome Plaveckej jaskyne prekračujú jeho hodnoty hranicu 0,2, čo môže súvisieť aj s prítomnosťou sadrovca a jeho

rozpúšťaním. Vyššie koncentrácie síranov vo vode môžu pochádzať aj z oxidácie pyritu, ktorý sa zvykne vyskytovať v organogénnych vápencoch. Vysoké koncentrácie síranov na všetkých troch miestach vzhľadom k súčasne extrémne vysokým koncentráciám dusičnanov môžu poukazovať aj na ich biogénny pôvod. Zdrojom vysokých koncentrácií dusičnanov vo vodách tejto trojice odberných miest je pravdepodobne guáno. Poľnohospodárstvo, respektíve odpadové vody ako zdroj dusičnanov v tomto prostredí môžeme vylúčiť. Roztoky presakujúce čerstvým guánom získavajú niektoré zo základných zložiek (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} a pod.), ktoré reagujú s rozličnými kationmi (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) obsiahnutými v podložných horninách, karbonátových speleotémach. Tým dochádza k vyrazávaniu rôznych minerálnych asociácií, napr. fosfátov, síranov (Audra et al., 2021 a ďalší). Počas našich odberov boli väčšie počty netopierov (lietajúce počas celého roka aj hibernujúce v zimných mesiacoch) dokumentované v rámci týchto troch odberných miest hlavne v Herzovom dome Plaveckej jaskyne. Čerstvé guáno sa vyskytuje na viacerých miestach dómu. Vidíme ho voľne roztrúsené na podlahe, menšie aj väčšie kumulácie guána sa tvoria pod hibernujúcimi netopiermi a stopy po guáne sú zjavné aj v samotných jazierkach (obr. 7). V Bratislavskej a Plaveckej sieni Plaveckej priepasti sme zvýšené počty netopierov nepozorovali. Guáno a netopiere sa pravdepodobne nachádzajú nielen v dostupných častiach jaskýň, ale aj tam, kde sa jaskyniari bežne nedostanú (vrátane nadložia odberných miest). Zvlášť v nadloží Plaveckej a Bratislavskej siene nemôžeme vylúčiť prítomnosť netopierov a recentného guána vzhľadom na také vysoké koncentrácie dusičnanov v ich priesakových vodách. V prípade staršieho (fosilného) guána, aké je napríklad v jazere Plaveckej siene, je vylúhovanie dusičnanov do vody na základe výsledkov chemických analýz v súčasnosti už minimálne. Podobne je to aj pri amónnych iónoch. Ich koncentrácie sa pohybujú pod hranicou $0,05 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Takéto nízke koncentrácie amónnych iónov boli na všetkých odberných miestach a počas všetkých odberov. Plavecká jaskyňa podľa dlhodobého chiropterologického monitoringu patrí medzi jaskyne s vysokým počtom netopierov. Napriek tomu koncentrácie dusičnanov v monitorovaných priesakových vodách v tejto jaskyni neboli zďaleka také vysoké ako na vyššie uvedených troch miestach. Rovnako to platí aj pri jaskyni Pec, ktorá je podobne ako Plavecká jaskyňa významnou chiropterologickou lokalitou. Aj tu sme v priesakových vodách dokumentovali zvýšené koncentrácie dusičnanov len do maximálnej hodnoty $74,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

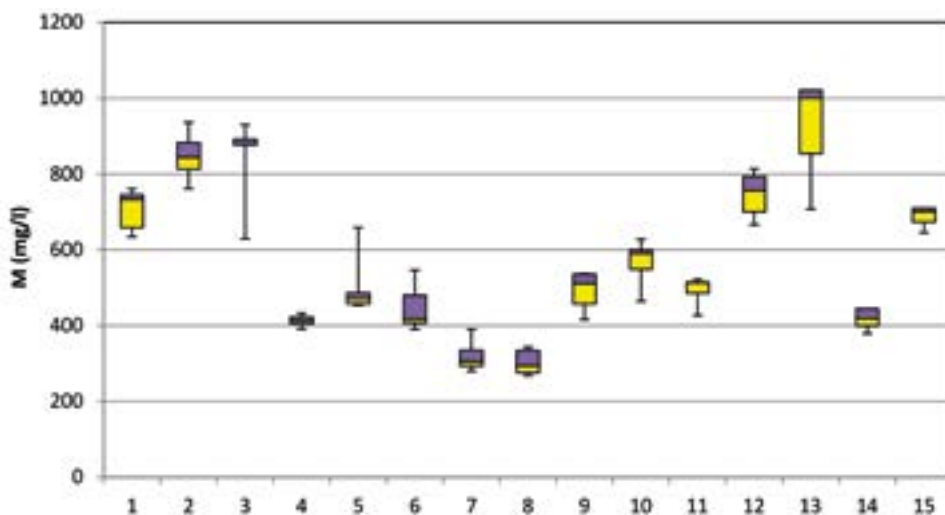
Zvyšné odberné miesta v jaskyni Pec, Plaveckej priepasti a Plaveckej jaskyni vytvárali v dendrograme zhlukovej analýzy samostatný klaster, ktorý charakterizujú vody základného



Obr. 14. Porovnanie priemerných koncentrácií chloridov, síranov a dusičnanov na monitorovaných miestach.

Fig. 14. Comparison of average concentrations of chlorides, sulphates and nitrates at the monitored sites.

výrazného alebo nevýrazného Ca-HCO_3 typu s rôznym podielom síranov a dusičnanov. Jednu podskupinu v ňom tvoria priesakové vody s nižšou mineralizáciou ($268,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – $470,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), ktoré sú zastúpené odbernými miestami Jacuzza (jaskyňa Pec), Pod rebríkom (Plavecká priepasť), Dóm netopierov a jazierko pred Kvapľovou sieňou (Plavecká jaskyňa). Druhú podskupinu zastupujú vyššie mineralizované priesakové vody s mineralizáciou od $389,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ do $652,0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ spojené s odbernými miestami Prvý a Druhý dóm (jaskyňa Pec), Kvapľová sieň, Pri hĺbkovej sonde a Pod mostíkom (Plavecká jaskyňa) (obr. 15). Rozdiely v chemickom zložení vôd z tejto skupiny môžeme hľadať hlavne v hrúbke nadložia a v dĺžke interakcie vody s horninovým prostredím. V prípade dusičnanov sa na všetkých vzorkách z týchto odberných miest v rámci celého sledovaného obdobia evidovali vyššie koncentrácie, ktoré súvisia s prítomnosťou už vyššie opisovaných a dokumentovaných netopierov a guána. Nejde tak o náhodné, ani časovo obmedzené zvýšenie počas roka. Koncentrácie dusičnanov z týchto odberných miest sú v porovnaní s vodami jazierka Herzovho domu Plaveckej jaskyne a priesakov v Plaveckej a Bratislavskej sieni Plaveckej priepasti výrazne nižšie, súčasne podstatne vyššie ako pri vodách z rozšírenej štrbiny pod podlahou Herzovho domu Plaveckej jaskyne a jazera v Plaveckej priepasti (najčastejšie s hodnotami v intervale od $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ do $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) (tabuľka 2, obr. 13). Jaskynné vody z tohto klastra sú svojím chemickým zložením najbližšie k chemickému zloženiu vôd karbonátogénneho komplexu mezozoika a prolúviálnych sedimentov Malých Karpát opisovaných Hanzelom et al. (2000).



Obr. 15. Krabicový graf celkovej mineralizácie jaskynných vôd. Graf zhora nadol znázorňuje 90-, 75-, 50-, 25- a 10-percentné percentily.

Fig. 15. Box plot of TDS of cave waters The plot from top to bottom represents the 90th, 75th, 50th, 25th, and 10th percentiles.

ZÁVER

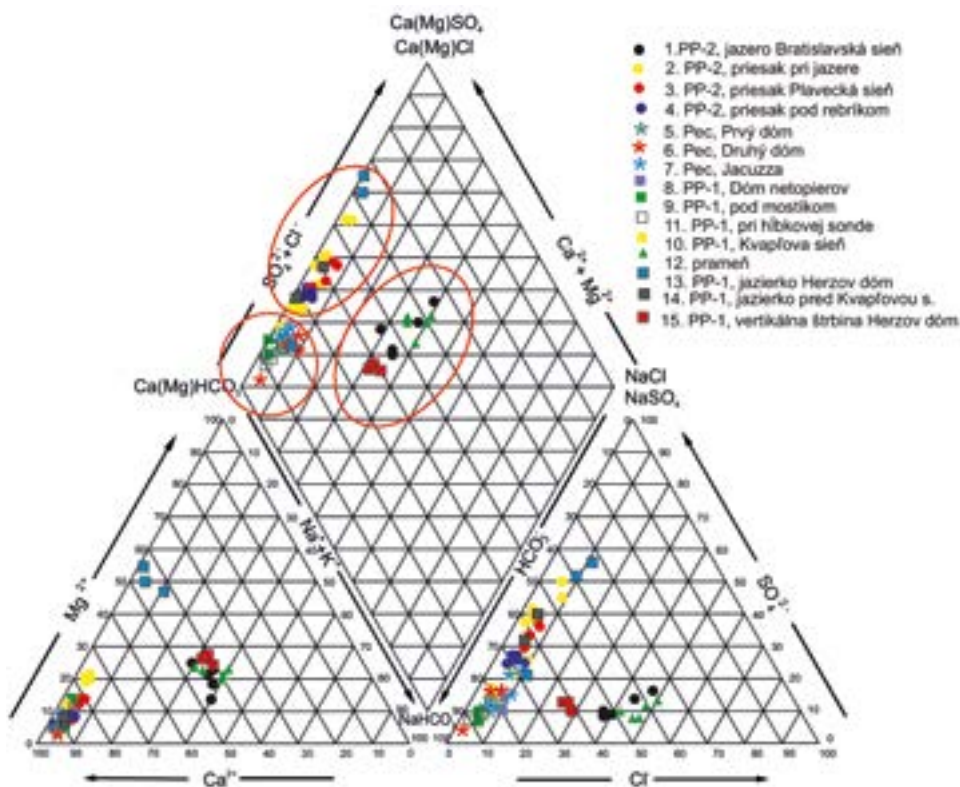
Na základe vykonaných monitorovacích prác v Plaveckej jaskyni, Plaveckej priepasti a jaskyni Pec, vyhodnotenia a interpretácie výsledkov zo 66 chemických analýz odobratých vzoriek vôd môžeme sformulovať niekoľko záverov vo vzťahu k základnému chemickému zloženiu vôd v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu.

Chemické zloženie jaskynných vôd Plaveckého hradného vrchu nie je uniformné, čo prezentuje aj Piperov graf ich chemického zloženia (obr. 16). Chemické zloženie vôd je premenlivé predovšetkým v priestore. Uplatňovaním sa rôzneho stupňa vplyvu primárnych

a sekundárnych faktorov na tvorbu chemického zloženia jaskynných vôd sa v jaskynných podmienkach stretávame s vodami s rôznym stupňom mineralizácie a chemického zloženia. Celková mineralizácia sledovaných vôd na jednotlivých lokalitách sa pohybovala v pomerne širokom rozpätí (od 268,0 mg·l⁻¹ do 1042,2 mg·l⁻¹). K hlavným faktorom ovplyvňujúcich charakter chemického zloženia vôd tohto územia patrí mineralogicko-petrografický charakter horninového prostredia, tektonické porušenie, dĺžka interakcie vody s horninovým prostredím, hĺbka obehu a jeho termodynamické podmienky. Na chemické zloženie vôd má výrazný vplyv aj prítomnosť netopierov a guána, s ktorým sa dostáva podzemná voda do kontaktu.

V zmysle genetickej klasifikácie podzemných vôd Západných Karpát (Gazda, 1974) sa v Plaveckom hradnom vrchu formujú petrogénne podzemné vody (resp. vody s petrogénnou mineralizáciou), ktoré môžu byť v rôznom stupni biogénne metamorfované.

Chemické zloženie priesakových vôd všetkých troch jaskýň a vôd menších sintrových jazierok je v korelácii s mineralogicko-petrografickým charakterom horninového prostredia, v ktorom sa formujú. Hlavným mineralizačným procesom je rozpúšťanie karbonátov. K ďalším procesom menšieho rozsahu patrí pravdepodobne proces rozpúšťania sadrovca, oxidačné procesy (oxidácia pyritu), v menšej miere hydrolytický rozklad silikátov, resp. akcesorických minerálov, iónovýmenné procesy. Chemické zloženie vôd je metamorfované v prípade ich prestupu cez akumulácie guána, kde sa obohacuje predovšetkým o dusičnanovú zložku. Keďže väčšie akumulácie guána sa v nadloží vyskytujú len lokálne, jeho vplyv na chemické zloženie jaskynných vôd nie je plošne rovnaký. Na rozdiel od čistých



Obr. 16. Piperov graf chemického zloženia jaskynných vôd.

Fig. 16. Piper's diagram of the chemical composition of cave waters.

karbonátogénnych vôd, kde sa hodnoty A_2 pohybujú na úrovni 90 c·z % a viac, v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu sú tieto hodnoty podstatne nižšie, v niektorých prípadoch len na úrovni 32 c·z % (tabuľka 3). Pri rozpúšťaní karbonátov sa uvoľňujú do vody najmä ióny Ca^{2+} a HCO_3^- , ktoré podmieňujú vznik vôd Ca-HCO_3 typu. V niektorých prípadoch je chemické zloženie vôd posunuté do prechodných, respektíve zmiešaných typov vôd, v ktorých vystupuje aj dusičnanová a síranová zložka. Zvýšené koncentrácie síranov a dusičnanov sú lokálne. Najväčší podiel takýchto vôd je v Bratislavskej a Plaveckej sieni Plaveckej priepasti. Vyššie koncentrácie dusičnanov a síranov zvyšujú hodnoty celkovej mineralizácie vôd, ktorá sa v prípade všetkých priesakových vôd pohybuje v rozpätí od 268,0 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ do 944,0 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Ešte vyššia mineralizácia je pri vodách sintrových jazierok v Herzovom dome Plaveckej jaskyne (max. hodnota 1042,2 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), kde je rovnako vyšší podiel síranov a dusičnanov. Priemerné zastúpenie hlavných kationov v tejto skupine vôd (priesakové vody, sintrové jazierka) je v poradí $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ prípadne $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+$. Pri aniónoch platí poradie $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ alebo $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$.

Odlišné chemické zloženie v rámci jaskynných vôd majú vody horizontálnej cirkulácie vrátane vôd podzemného jazera v Bratislavskej sieni Plaveckej priepasti. Vody z rozšírenej štrbiny pod podlahou Herzovho domu Plaveckej jaskyne a vody v jazere Plaveckej priepasti pochádzajú pravdepodobne z hlbšieho obehu. Pre tieto vody sú typické vyššie koncentrácie Na-Cl zložky, podobne ako je to pri vodách hlbšieho obehu v profile paleogénnych a neogénnych sedimentov. Vody s analogickým chemickým zložením sa objavujú aj v prameni pod Plaveckou jaskyňou, čo indikuje ich rovnaký genetický pôvod. Hodnoty celkovej mineralizácie sa pri týchto vodách pohybujú v rozmedzí 645 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ – 802 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Zastúpenie hlavných kationov tejto skupiny vôd je v poradí $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$, prípadne $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$. Pri aniónoch platí poradie $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. Spoločným znakom týchto vôd je aj ich vyššia teplota a nižšia hodnota pH. Chemické zloženie tejto skupiny vôd nie je typické pre jaskynné vody Slovenska naviazané na mezozoické karbonátové komplexy. Z hľadiska spresnenia ich pôvodu by bolo potrebné v rámci ďalšieho monitoringu doplniť analýzy vôd aj o ich izotopové zloženie. Rovnako v prípade zvýšenia hladiny jazera v Plaveckej priepasti, prípadne opätovného objavenia sa hladiny podzemnej vody v najspodnejších častiach Plaveckej jaskyne, by bolo vhodné vykonať na týchto lokalitách ďalšie chemické analýzy. Spoločným znakom všetkých jaskynných vôd Plaveckého hradného vrchu je aj ich vyššia teplota, ktorá sa pri vodách z Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti pohybuje nad hodnotou 11,0 °C.

Nasýtenie vôd voči kalcitu a dolomitu v rámci jednotlivých jaskýň a odberných miest sa mení v priestore aj v čase. V prípade kalcitu sa najčastejšie vyskytuje rovnovážny stav a stav presýtenia. Najnižšie nasýtenie voči kalcitu majú vody v jazere Bratislavskej siene Plaveckej priepasti a vody z rozšírenej štrbiny pod podlahou Herzovho domu Plaveckej jaskyne. Voči dolomitu sa vyskytujú všetky tri stavy; rovnovážny stav, stav nedosýtenia aj presýtenia. V porovnaní s kalcitom sa častejšie vyskytuje stav nedosýtenia. Najnižšie nasýtenie voči dolomitu majú vody Plaveckej priepasti.

PodĎakovanie: Za pomoc pri terénnych prácach ďakujem M. Herzovi a P. Staníkovi. Moje poďakovanie patrí aj J. Littvovi a P. Herichovi za pomoc pri tvorbe máp a P. Staníkovi za fotodokumentáciu a poskytnutie fotografií.

LITERATÚRA

- Audra, P., Heresanu, V., Barriquand, L., Kadiri Boutchich, M., Jaillet, S., Pons-Branchu, E., Bosák, P., Cheng, H., Edwards, R. L., Renda, M., 2021. Bat guano minerals and mineralization processes in Chameau Cave, Eastern Morocco. *International Journal of Speleology*, 50, 1, 91–109.

- Bella, P., 2010. Vytváranie jaskýň vodami vystupujúcimi pozdĺž okrajového zlomu Malých Karpát pri Plaveckom Podhradí – hydrogeologické podmienky a morfológické znaky. *Aragónit*, 15, 2, 65–70.
- Bella, P., Bosák, P., 2012. Speleogenesis along deep regional faults by ascending waters: case studies from Slovakia and Czech Republic. *Acta Carsologica*, 41, 2–3, 169–192.
- Bella, P., Gaál, L., 2017. Hypogene caves in Slovakia. In Klimchouk, A., Palmer, A., De Waele, J., Aurel, A., Audra, P. (Eds.), *Hypogene karst regions and caves of the world*. Springer, Cham, 299–311.
- Bella, P., Bosák, P., Littva, J., 2019a. Hypogénny pôvod jaskyne Pec (Plavecký kras, Malé Karpaty): tektonická predispozícia a morfológické znaky. *Slovenský kras*, 57, 2, 133–146.
- Bella, P., Bosák, P., Mikýsek, P., 2018. Multi-phased and multi-process hypogenic speleogenesis along deep fault system: Plavecká jaskyňa Cave, Malé Karpaty Mountains, Slovakia. In Šujan, M., Csibri, T., Kiss, P., Rybár, S. (Eds.): *Environmental, Structural and Stratigraphical Evolution of Western Carpathians. Abstract Book, 11th ESSEWECA Conference* (November 29 – 30, 2018, Bratislava, Slovakia). Univerzita Komenského, Bratislava, 12.
- Bella, P., Bosák, P., Mikýsek, P., Hercman, H., Littva, J., Pawlak, J., Pruner, P., Kdýr, Š., Gradziński, M., Wróblewski, W., 2021. Speleogénza účinkom kyseliny sírovej – prvé indície, dôkazy a datovanie zo Slovenska: Plavecké predhorie Malých Karpát. *Abstrakty, 13. vedecká konferencia „Výskum, využívanie a ochrana jaskýň“*, Liptovský Mikuláš, 7. – 9. 9. 2021. *Aragónit*, 26, 1, 33–34.
- Bella, P., Bosák, P., Mikýsek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., 2019b. Multi-phased hypogene speleogenesis in a marginal horst structure of the Malé Karpaty Mountains, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 48, 2, 203–220.
- Bella, P., Bosák, P., Mikýsek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., 2020. Sulfuric acid speleogenesis in the Plavecké predhorie Foothill of the Malé Karpaty Mountains, Western Slovakia. *Abstracts, 12th Scientific Conference „Research, Use and Protection of Caves“*, Liptovský Mikuláš, September 8–9, 2020. *Aragónit*, 25, 1, 57.
- Bella, P., Hercman, H., Kdýr, Š., Mikýsek, P., Pruner, P., Littva, J., Minár, J., Gradziński, M., Wróblewski, W., Velšmid, M., Bosák, P., 2022. Sulfuric acid speleogenesis and surface landform evolution along the Vienna Basin Transfer Fault: Plavecký Karst, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 51, 2, 105–122.
- Briestenský, M., Semberk, J., 2008. Monitoring mikropohybov v jaskyniach Západného Slovenska. *Slovenský kras*, 46, 2, 333–339.
- Butaš, J., 2003. Plavecká priepasť PP-2. *Spravodaj SSS*, 34, 1, 35–38.
- Dropa, A., 1958. Plavecká jaskyňa. *Československý kras*, 8–9, 120–123.
- Dropa, A., 1973. Prehľad preskúmaných jaskýň na Slovensku. *Slovenský kras*, 11, 111–157.
- Fláková, R., Ženišová, Z., Seman, M., 2020. Chemická analýza vody v hydrogeológii. 2. vydanie. Bratislava, Slovenská asociácia hydroológov, 167 s.
- Gazda, S., 1974. Chemizmus podzemných vôd Západných Karpát a jeho genetická klasifikácia. In B. Leško (Ed.): *Materiály z III. celoslovenskej geologickej konferencie, II. časť*. Bratislava, Slovenský geologický úrad, 43–50.
- Hanzel, V., Vrana, K., Kúšiková, S., 2001. Hydrogeologická mapa Pezinských Karpát v mierke 1:50 000. In Malík P. (Ed.), *Hydrogeologické a hydrogeochemické mapy v mierke 1 : 50 000, regióny: južná časť Záhorskej (Borskej) nížiny, Pezinské Karpaty, SV časť Podunajskej nížiny, východná časť Veľkej Fatry, severná časť Spišsko-gemerského rudohoria, Ľubovnianska vrchovina a Pieniny, Čierna hora*. MŽP SR Bratislava, ŠGÚDŠ Bratislava, CD-ROM.
- Hanzel, V., Vrana, K., Švasta, J., Kohút, M., Nagy, A., Maglay, J., Bujnovský, A., Malík, P., 1999. Vysvetlivky k základnej hydrogeologickej a hydrogeochemickej mape Pezinských Karpát v mierke 1 : 50 000. *Manuskript – Archív odboru Geofondu ŠGÚDŠ Bratislava*, 179 s. + prílohy
- Hochmuth, Z., 2008. Krasové územia a jaskyne Slovenska. *Geographia Cassoviensis*, ročník II., 2/2008, 11–18.
- Košel, V., 2005. Ktorá je najteplejšia? *Spravodaj SSS*, 36, 4, 29–30.

- Kováč, E., Mock, A., Luptáčík, P., Hudec, I., 2005. Prieskum spoločenstiev bezstavovcov jaskyne Driny, Plaveckej jaskyne a priepasti Michňová. Záverečná správa z prieskumu v roku 2005, Archív Správy slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš, 18 s.
- Kullman, E., Gavurník, J., Molnár, L., Paľušová, Z., Slivová, V., Lehotová, D., Belan, M., Juhássová, E., Palková, M., 2020. Hydrologická ročenka, Podzemné vody. 2019, SHMÚ Bratislava, 262 s.
- Kullman, E., Gavurník, J., Molnár, L., Paľušová, Z., Slivová, V., Lehotová, D., Belan, M., Juhássová, E., Palková, M., 2021. Hydrologická ročenka, Podzemné vody. 2020, SHMÚ Bratislava, 274 s.
- Lačný, A., Dušeková, L., Galová, M., 2022. Krasové územia Malých Karpát. Štátna ochrana prírody SR a Speleoklub Trnava, 58 s.
- Lalkovič, M., 2010. Plavecká jaskyňa – prvá sprístupnená jaskyňa na Slovensku. Aragonit, 15, 1, 19–28.
- Lánczos, T., Filipčíková, N., 2017. Speleogenetický význam CO₂ pre vývoj vybraných jaskýň Plaveckého krasu v Malých Karpatoch, Slovenský kras, 55, 1, 5–22.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2010. Zhrnutie poznatkov o zimovaní netopierov v Plaveckej jaskyni. Ochrana prírody, 26, 71–74.
- Lehotská, B., Lehotský, R. 2016. Zhrnutie poznatkov o reprodukčnej kolónii druhu *Myotis myotis* v Plaveckej jaskyni (Malé Karpaty). Naturae tutela, 20, 2, 139–148.
- Lehotská, B., 2022. Komplexný chiropterologický výskum a monitoring vo vybraných jaskyniach Malých Karpát. Záverečná odborná správa z výskumu a monitoringu za celé obdobie výskumu (2019 – 2022). Manuskript. 45 s.
- Machek, P., 1998. Metody vícerozměrné analýzy a jejich aplikace v geochemii a petrologii. Ostrava. Ediční středisko VŠB, 117 s.
- Mitter, P., 1983. Geomorfologická rajonizácia krasu Malých Karpát. Slovenský kras, Martin, 21, 3–34.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., 1999. PHREEQC-2, A Hydrogeochemical Computer Program. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 99-4259, 312 s.
- Pitter, P., 2009. Hydrogeochemie. Praha, Vydavatelství VŠCHT, 579 s.
- Polák, M. (Ed.), Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Filo, I.–Olšavský, M., Havrila, M., Buček, S., Maglay, J., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, L., Németh, Z., Ivanička, J., Broska, I., 2011. Geologická mapa Malých Karpát 1 : 50 000 MŽP SR – ŠGÚDŠ, Bratislava
- Polák, M. (Ed.), Plašienka, D., Kohút, M., Putiš, M., Bezák, V., Maglay, J., Olšavský, M., Filo, I., Havrila, M., Buček, S., Elečko, M., Fordinál, K., Nagy, A., Hraško, L., Németh, Z., Malík, P., Liščák, P., Madarás, J., Slavkay, M., Kubeš, P., Kucharič, E., Boorová, D., Zlinská, A., ĽSiráňová, Z., Žecová, K., 2012. Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Malé Karpaty 1 : 50 000 ŠGÚDŠ, Bratislava, 287 s.
- Šmída, B., 2010. Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéftvorby. Dizertačná práca, PriF UK Bratislava, 221 s.
- Šťastný, P., Nieplová, E., Melo, M., 2002. Priemerná ročná teplota vzduchu. In Atlas krajiny Slovenskej republiky. Bratislava – Ministerstvo životného prostredia SR, Banská Bystrica – Slovenská agentúra životného prostredia (mapa č. 49, s. 98).
- Tencer, J., 1991. Nové poznatky o Plaveckom krase. Jaskyniar, 3–9.
- Veľšmid, M., 2011. Nové poznatky o Plaveckom krase II. Spravodaj SSS, 42, 4, 20–28.
- Veľšmid, M., 2013. Nový objav v Plaveckom krase – jaskyňa Pec. Spravodaj SSS, 44, 1, 58–62.

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	87 – 100	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	----------	------------------------

KLIMATICKÝ MONITORING PLAVECKEJ JASKYNE A PLAVECKEJ PRIEPASTI, MALÉ KARPATY

LUCIA PRISTAŠOVÁ¹ – GABRIELA IVANÁKOVÁ

¹ Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; lucia.pristasova@ssj.sk

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava; gabriela.ivanakova@shmu.sk

L. Pristašová, G. Ivanáková: Climate monitoring of the Plavecká Cave and Plavecká Shaft, Malé Karpaty Mountains, Slovakia

Abstract: The Plavecká Cave and Plavecká Shaft are located in the Plavecké predhorie Foothills of the Malé Karpaty Mountains. Climate monitoring in the Plavecká Shaft took place between 2021 and 2023. Measurements were taken at three locations using Solinst barometers, with a measurement period of 1 hour. The highest average annual air temperature was recorded in the *Bratislavská Hall* at 12.4 °C, the lowest at the station *Za uzáverom* at 10.0 °C, and the air temperature in the *Plavecká Hall* reached 11.9 °C. CO₂ concentration values ranged from 934 to 3,262 ppm. Six monitoring stations were installed in Plavecká Cave between 2021 and 2024. The coldest location was the *Spodné poschodie* with an average annual air temperature of 9.6 °C, followed by the *Entrance* at 10.2 °C and the *Upper opening* at 10.5 °C. The *Bat Chamber* station reached values in the range of 10.2 – 11.9 °C. The two most distant and stable locations reached the highest values: *Above the lake* – 11.4 °C and *Herzov Chamber* – 11.6 °C.

Key words: Plavecká Cave, cave climate, monitoring, air temperature

ÚVOD

Plavecká jaskyňa a Plavecká priepasť patria medzi významné krasové jaskyne Malých Karpát na západnom Slovensku. Tieto podzemné priestory nie sú len dôležitými geologickými a speleologickými objektmi, ale aj citlivými prírodnými systémami, ktorých vnútorné mikroklimatické podmienky ovplyvňujú stabilitu jaskynného prostredia, biotu a priebeh krasových procesov. Klimatický monitoring v týchto lokalitách je preto dôležitým nástrojom na ich dlhodobú ochranu a výskum.

Tento článok prináša súborné výsledky týkajúce sa klímy Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti. Cieľom článku je poskytnúť základný prehľad klimatického monitoringu oboch jaskýň, ktorý spočíva v hodnotení kontinuálnych dát a zistení ročného chodu teploty vzduchu a koncentrácie CO₂ na jednotlivých stanovištiach v jaskyniach.

POLOHA A ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA JASKÝŇ

V rámci geomorfologických jednotiek zaradujeme obe jaskyne do Fatransko-tatranskej oblasti, do celku Malé Karpaty, podcelku Pezinské Karpaty a časti Plavecké predhorie. Plavecká jaskyňa a Plavecká priepasť sa nachádzajú pri obci Plavecké Podhradie. Sú súčasťou chránenej krajinej oblasti Malé Karpaty, v Národnej prírodnej rezervácii Pohanská. Obe jaskyne sa nachádzajú na západnom svahu masívu Pod zámkom (obr. 1).



Obr. 1. Poloha Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti (zdroj: Free map).
Fig. 1. Locations of the Plavecká Cave and Plavecká Shaft (source: Free map).



Obr. 2. Vstupný portál Plaveckej jaskyne.
Foto: L. Pristašová
Fig. 2. Entrance portal of the Plavecká Cave.
Photo: L. Pristašová

Podľa Klimatického atlasu Slovenska (2015) sa priemerná ročná teplota vzduchu danej oblasti pohybuje v rozmedzí 8 až 9 °C. Ročný úhrn zrážok sa pohybuje v rozmedzí 700 až 800 mm. Najbližšia klimatologická stanica je 15 km na JZ od Plaveckého Podhradia, a to Kuchyňa-Nový Dvor. Zrážkomerná stanica je v Sološnici (cca 3 km od Plaveckého Podhradia).

V blízkosti oboch jaskýň (ako aj v samej Plaveckej priepasti) sa vyskytuje mierne ohriata voda, ktorá vystupovala pozdĺž výrazného zlomového pásma na rozhraní Malých Karpát a Záhorskej nížiny. Morfológické a mineralogické znaky oboch jaskýň zodpovedajú hypogénnym jaskyniam so sulfúrickými fázami vývoja (Bella, 2010; Bella et al., 2019, 2022). Obidve jaskyne geomorfologicky a hydrologicky úzko súvisia (Veľšmid, 2011; Šmída, 2010).

Plavecká priepašť

Plavecká priepašť, označovaná aj ako PP-2, bola objavená v júli 2002 (Butaš, 2003). Vchod do jaskyne sa nachádza v nadmorskej výške 270 m, približne 100 m východne od vchodu do Plaveckej jaskyne. Plavecká priepašť je dlhá 335 m s výškovým rozpätím 70 m (Bella et al., 2018). Násypným kuželom pod tesnou vstupnou šachtou je rozdelená na dve časti: Plaveckú sieň (s vysokými, až cca 2-metrovými paličovými stalagmitmi) a Bratislavskú sieň (s jazerom v tvare trojuholníka). Klimatickým meraniam v Plaveckej priepasti sa venoval Košel (2005) vo svojej práci *Ktorá je najteplejšia?*.

Plavecká jaskyňa

Plavecká jaskyňa bola prvou sprístupnenou jaskyňou na území Slovenska. Lalkovič (2010) predpokladá, že ku krokom vedúcim k jej sprístupneniu muselo dôjsť niekedy okolo roku 1800. Vchod do jaskyne leží v nadmorskej výške 216 m (na základe výsledkov 3D laserového skenovania, 2025) a tvoria ho ruiny vstupného areálu vybudovaného ešte nájomcami Pálffyho panstva (obr. 2). Okrem tohto vchodu má jaskyňa ešte jeden otvor vo výške 236 m n. m., rov-

nako umelo rozšírený. V súčasnosti je však zabetónovaný a slúži len ako vletový otvor fauny do jaskyne (Tencer, 1991). Dĺžka jaskyne je 1253 m (Tencer, 2021) s vertikálnym rozpätím 37 m (Bella et al., 2018). Klimatickým meraniam sa okrajovo venoval aj Veľšmid (2011).

METODIKA VÝSKUMU A LOKALIZÁCIA MERACÍCH STANOVÍŠŤ

Klimatický monitoring Plaveckej priepasti sme začali v júni 2020 a ukončili v januári 2024. V tomto článku budeme vyhodnocovať namerané dáta zaznamenané v kompletných rokoch 2021 až 2023. Meralo sa na 3 stanovištiach (obr. 3), pomocou barologrov Solinst na meranie teploty a tlaku vzduchu pri jedn hodinovom intervale merania. Presnosť meracej techniky je 0,05 °C. Odpočet dát prebiehal priebežne jedenkrát až dvakrát za rok. Namerané veličiny boli spracované prostredníctvom databázy od firmy Microstep-MIS. Následne sme pre lepšiu názornosť získané údaje spracovali v grafickej a tabuľkovej



Obr. 3. Bočný rez Plaveckej priepasti, lokalizácia meracích stanovišť.

Fig. 3. Side view of the Plavecká Shaft, location of measurement sites.

podobe.

Prvé stanovište sme umiestnili *Za uzáverom*, aby zachytávalo hodnoty hornej časti priepasti a zároveň bolo chránené pred vandalmi.

Druhé stanovište zachytávalo teplotu vzduchu v *Bratislavskej sieni*. Stanovište sme umiestnili oproti jazeru, cca 1,5 m nad zemou.

Tretie stanovište sme umiestnili na začiatok chodby *Plaveckej siene*, cca 1,5 m nad zemou (obr. 4).

V septembri 2021 sme k jazeru umiestnili aj dataloger na meranie koncentrácie CO₂. Po prvotných problémoch s meracou technikou sme zaznamenali kontinuálnejší rad



Obr. 4. Stanovište Plavecká sieň, v pozadí palicovité stalagmity. Foto: L. Pristašová

Fig. 4. Site Plavecká Hall, stick stalagmites in the background. Photo: L. Pristašová

pozorovania od mája 2022 do októbra 2023.

Na porovnanie teploty vzduchu v jaskynných priestoroch s vonkajším prostredím boli použité údaje z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu z klimatologickej stanice Kuchyňa-Nový Dvor.

Tou istou technikou sme zaznamenávali dáta aj v Plaveckej jaskyni, kde sme umiestnili 6 monitorovacích stanovišť tak, aby rovnomerne pokrývali celý priestor jaskyne (obr. 5). Merania sme zaznamenávali od júna 2020 do apríla 2025. V tomto článku budeme vyhodnocovať namerané dáta zazna-



Obr. 5. Bočný rez Plaveckej jaskyne, lokalizácia meracích stanovišť.

Fig. 5. Side view of the Plavecká Cave, location of measurement sites.

menané v kompletných rokoch 2021 až 2024.

Prvé stanovište sme umiestnili v blízkosti *Vstupu*, za plnými plechovými dverami, približne 1,5 m nad zemou.

Druhé stanovište sa nachádzalo na *Spodnom poschodí*, cca 1,5 m nad zemou.

Tretie stanovište sa nachádzalo v priestore *Horného otvoru*. Bolo umiestnené na rebríku pod objavným vchodom, cca 5 m nad zemou.

Štvrté stanovište sme umiestnili v *Dóme netopierov*, cca 1,5 m nad zemou.

Piate stanovište sme umiestnili do otvoru *Nad jazerom*.

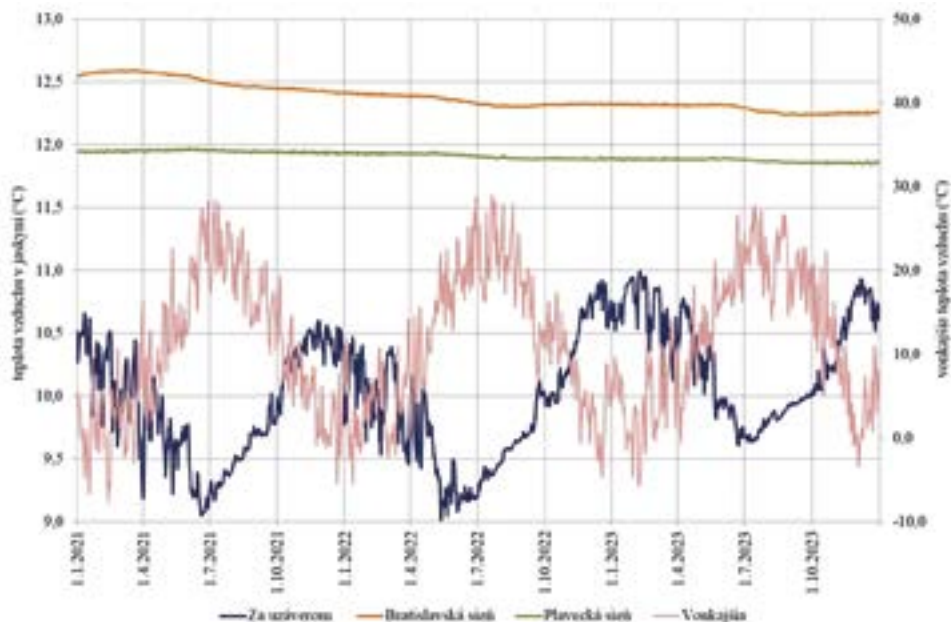
Šieste stanovište je umiestnené v *Herzovom dóme*. Ide o najvzdialenejšiu časť jaskyne, do ktorej je prístup prostredníctvom dlhej a úzkej plazivky.

V septembri 2021 sme do Dómu netopierov umiestnili aj dataloger na meranie koncentrácie CO₂. Po prvotných problémoch s meracou technikou sme zaznamenali kontinuálnejšie dáta od mája do decembra 2022.

VÝSLEDKY SPELEOKLIMATICKÉHO MONITORINGU

Plavecká priepasť

Nameraná teplota vzduchu v Plaveckej priepasti je veľmi stabilná. Najväčšie teplotné rozdiely počas roka zaznamenávame na stanovišti v blízkosti vchodu, teda *Za uzáverom*, a to iba 2,0 °C. Ostatné dve stanovištia dosahujú amplitúdu 0,4 °C (*Bratislavská sieň*) a 0,1 °C (*Plavecká sieň*). Ročný chod teploty vzduchu je badateľný iba na stanovišti *Za*



Obr. 6. Priemerné denné teploty vzduchu (január 2021 – december 2023) v Plaveckej priepasti.
Fig. 6. Average daily air temperatures (January 2021 – December 2023) in the Plavecká Shaft.

uzáverom, keď od júla začína teplota pozvoľne stúpať (obr. 6). Maximá dosahuje v decembri, resp. v januári. Takýto obrátený teplotný režim oproti vonkajšej teplote vzduchu (maximá júl, august a minimá december, január) je spôsobený jednak morfológiou jaskyne, jednak vzdialenosťou od povrchu (uzáver je cca 15 m pod povrchom v úzkej komínovitej priepasti) a tým, že meracie stanovište je umiestnené za plným plechovým uzáverom, ktorý tlmi prúdenie vzduchu v jaskyni. Priemerná denná teplota vzduchu sa pohybuje v intervale 9,0 až 11,0 °C. Priemerná ročná teplota vzduchu je 10,0 °C (tabuľka 1).

Tabuľka 1. Denné maximá, minimá a priemery teploty vzduchu (°C) v Plaveckej priepasti.
Table 1. Daily maximum, minimum, and average air temperatures (°C) in the Plavecká Shaft.

	Za uzáverom	Bratislavská sieň	Plavecká sieň
min.	9,0	12,2	11,8
max.	11,0	12,6	12,0
amplitúda	2,0	0,4	0,1
priemer	10,0	12,4	11,9

Dve monitorovacie stanovištia vykazujú veľmi stabilnú teplotu vzduchu. Ročné výkyvy teploty vzduchu sa z grafu nedajú ani odčítať, keďže ide takmer o priamku. Teplota vzduchu v *Bratislavskej sieni* dosahovala v rámci sledovaného obdobia 12,2 – 12,6 °C. Stanovište *Plavecká sieň* je o cca 0,5 °C chladnejšie, s teplotami 11,8 až 12,0 °C. Tieto dva siene od seba oddeľuje násypný kužeľ, ktorý zapríčiňuje teplotné rozhranie v jaskyni (Košel, 2005). Na týchto stanovištiach sa prejavujú denné neperiodické variácie (pozri



Obr. 7. Hodinové teploty vzduchu na stanovištiach *Plavecká sieň* a *Bratislavská sieň*.

Fig. 7. Hourly air temperatures at the *Plavecká Hall* and *Bratislavská Hall* sites.

obr. 7). Najteplejším miestom Plaveckej priepasti je teda *Bratislavská sieň* s priemernou teplotou vzduchu 12,4 °C.

Pri porovnaní dát z článkom z roku 2005 (tabuľka 2) zaznamenávame len nepatrné rozdiely. Košel uvádza rozdiel teploty vzduchu medzi Bratislavskou a Plaveckou sieňou 0,7 až 0,8 °C. Podľa dát nameraných v sledovanom období bol tento rozdiel 0,5 °C. Amplitúda v *Bratislavskej sieni* bola podľa našich meraní 0,4 °C, podľa Košela 0,1 °C. Z mikroklimatického hľadiska patrí Plavecká priepasť medzi najteplejšie jaskyne na Slovensku (s priemernou teplotou vzduchu 12,8 °C). Na dne Plaveckej priepasti je jazero s teplotou vody približne 13 °C. Teplota vzduchu nikdy nedosiahla teplotu vody v jazere (Košel, 2005; Bella, 2010). V súčasnosti sa teplota vody v jazere pohybuje v rozmedzí 13,2 až 13,8 °C.

Zaujímavosťou je, že napriek 20-ročnému rozdielu v meraniach si Plavecká priepasť udržiava stabilnú mikroklimu v celom svojom priestore. Ani prebiehajúca zmena klímy zatiaľ neovplyvnila teplotu vzduchu vnútorného prostredia jaskyne.

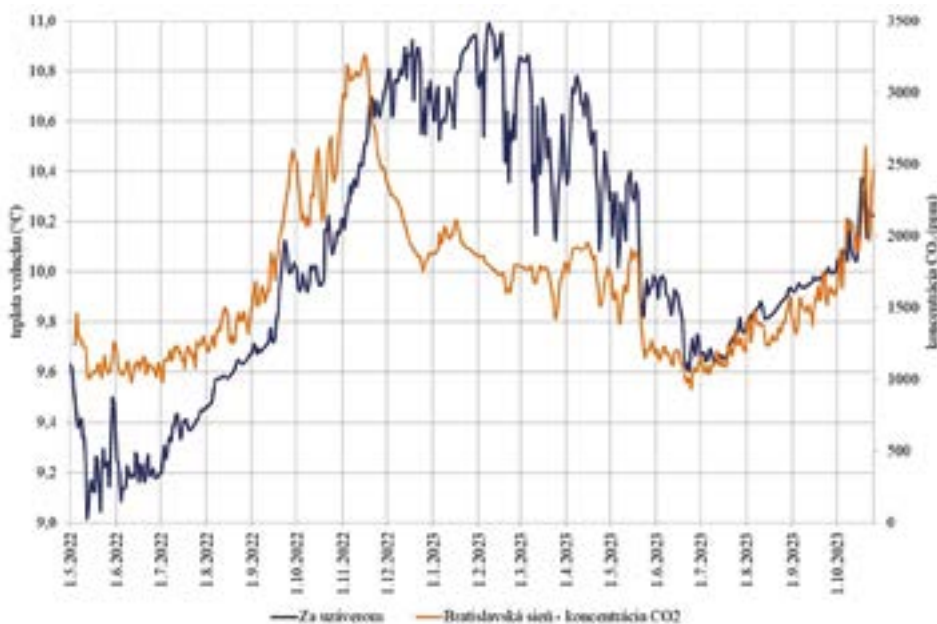
Tabuľka 2. Namerané dáta teploty vzduchu (°C) a teploty jazera podľa Košela (2005).

Table 2. Measured data air temperatures (°C) and lake temperatures according to Košel (2005).

Dátum merania	Bratislavská sieň	Plavecká sieň	Jazero
27. 7. 2002	12,7	12,0	13,0
29. 8. 2002	12,8	11,9	13,1
8. 2. 2003	12,8	12,0	13,0
8. 11. 2003	12,8	12,1	13,1
11. 12. 2004	12,7	11,9	13,0
amplitúda	0,1	0,2	0,1

priemer	12,8	12,0	13,0
----------------	------	------	------

Dáta o hodnote koncentrácie CO_2 v Plaveckej priepasti sme zaznamenávali od 5. 5. 2022 do 25. 10. 2023. Logger bol umiestnený v Bratislavskej sieni pri jazere, ktorého hladina postupne z roka na rok klesá (približne od roku 2011). Krivka má veľmi nepravidelný priebeh s maximálnymi hodnotami 3262 ppm, ktoré dosahuje v novembri, a minimálnymi hodnotami 934 ppm, ktoré dosahuje v júni. Celkový denný priemer za sledované obdobie je 1664 ppm. Vo všeobecnosti by však mali byť hodnoty koncentrácie CO_2 v chladnejších obdobiach nižšie a v teplejších vyššie (Baldini et al., 2008). Tento nesúlad môže mať súvis



Obr. 8. Priemerné denné hodnoty koncentrácie CO_2 v Bratislavskej sieni v porovnaní s teplotou vzduchu Za uzáverom.

Fig. 8. Average daily CO_2 concentrations in the Bratislavská Hall compared to air temperatures Za uzáverom site.

s obráteným teplotným režimom (pozri stať vyššie), čo naznačuje aj porovnanie teploty vzduchu Za uzáverom a koncentrácie CO_2 v Bratislavskej sieni (obr. 8).

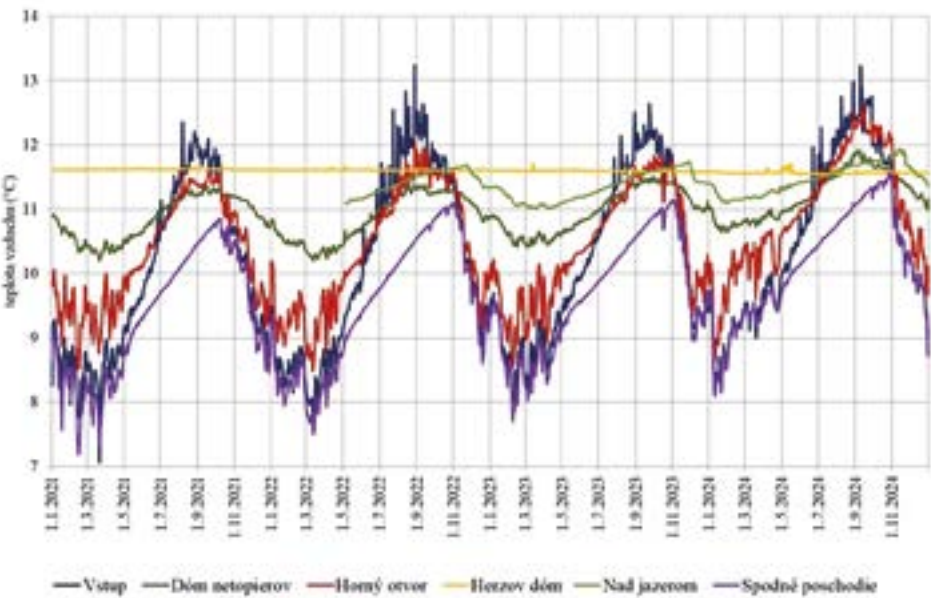
Plavecká jaskyňa

Prvé meracie stanovište *Vstup* vykazuje najväčšie teplotné rozdiely s amplitúdou 6,1 °C počas roka, maximá dosahuje v septembri a minimá vo februári, resp. marci. Priemerná denná teplota vzduchu sa pohybuje v intervale 7,1 až 13,2 °C (tabuľka 3).

Stanovište *Spodné poschodie* (obr. 9) vykazuje periodické ročné variácie a zároveň aj neperiodické denné variácie, ktoré sú výrazné najmä od októbra do apríla. V ostatných mesiacoch má teplota pravidelne stúpajúci charakter. Údaje v grafe naznačujú prúdenie vzduchu medzi vonkajším prostredím a vnútorným prostredím jaskyne, ktoré sa prejavuje najmä počas zimného obdobia nasávaním chladného vzduchu. Priemerná denná teplota vzduchu sa celoročne pohybuje v intervale 7,2 až 11,6 °C. Najvyššie hodnoty dosahuje v októbri, novembri a najnižšie vo februári.

Tabuľka 3. Denné maximá, minimá a priemery teploty vzduchu (°C) v Plaveckej jaskyni.
 Table 3. Daily maximum, minimum, and average air temperatures (°C) in the Plavecká Cave.

	Vstup	Dóm netopierov	Horný otvor	Herzov dóm	Nad jazerom	Spodné poschodie	Vonkajšia stanica
min.	7,1	10,2	8,5	11,6	11,0	7,2	-9,3
max.	13,2	11,9	12,6	11,7	11,9	11,6	29,6
amplitúda	6,1	1,7	4,1	0,1	0,9	4,4	38,9
priemer	10,2	11,0	10,5	11,6	11,4	9,6	11,6



Obr. 9. Priemerné denné teploty vzduchu (január 2021 – december 2024) v Plaveckej jaskyni.
 Fig. 9. Average daily air temperatures (January 2021 – December 2024) in the Plavecká Cave.

Na meracom stanovišti 3 *Horný otvor* sa priemerná denná teplota vzduchu celoročne pohybuje v rozmedzí 8,5 až 12,6 °C. Priemerná ročná teplota dosiahla hodnotu 10,5 °C. Najvyššia nameraná priemerná mesačná teplota (tabuľka 4) bola v septembri (11,7 °C) a najnižšia v januári až marci (9,5 °C). Ročná amplitúda je 4,1 °C.

Stanovište *Dóm netopierov* vykazuje sezónne výkyvy teplôt. Od marca teplota pozvoľne stúpa až do septembra, keď dosahuje najvyššie hodnoty. Priemerná denná teplota vzduchu sa počas sledovaného obdobia pohybuje v rozmedzí 10,2 až 11,9 °C. Priemerná ročná teplota dosiahla hodnotu 11,0 °C. Najvyššia nameraná priemerná mesačná teplota bola v septembri, a to 11,5 °C.

Na piatom meracom stanovišti *Nad jazerom* sú namerané hodnoty teploty vzduchu veľmi stabilné, od 11,0 do 11,9 °C. Amplitúda nameraných hodnôt je len 0,9 °C počas

celého sledovaného obdobia. Teplota vzduchu začína klesať od decembra do februára a potom opäť veľmi pozvoľne stúpa s maximom v decembri. Tento posun teplotného maxima môže byť spôsobený vzdialenosťou stanovišta od vchodu jaskyne, prípadne môže byť ovplyvnený teplotou vody.

Stanovište *Herzov dóm* vykazuje veľmi stálu a zároveň najvyššiu teplotu vzduchu v rámci celej jaskyne, a to 11,6 °C. Pri amplitúde 0,1 °C sa neprejavuje ani ročný chod teploty vzduchu. Ide o najvzdialenejšiu časť jaskyne.

V článku od Velšmida (2011) sa píše, že priemerná ročná teplota vzduchu meraná v *Dóme netopierov* sa pohybovala okolo 10,5 °C. Teplota vzduchu v nových častiach (nové objavy v JV časti jaskyne – priestory v okolí stanovišta *Nad jazerom*) dosahovala 11,6 °C a v starých častiach (priestory v okolí *Vstupu*, *Spodného poschodia*, *Dómu netopierov* a *Horného poschodia*) 9,8 °C. Teplota vody bola 12,3 °C.

To, že táto jaskyňa je ovplyvnená vonkajšími teplotnými pomermi, dokazujú aj namerané hodnoty a ich nárast v posledných rokoch.

Z tabuľky 4, zobrazujúcej priemerné mesačné teploty vzduchu, možno konštatovať, že najteplejším a zároveň najstabilnejším stanovišťom je *Herzov dóm* s priemernou ročnou teplotou vzduchu 11,6 °C a naopak najchladnejším je stanovište *Spodné poschodie* s priemernou ročnou teplotou 9,6 °C.

Tabuľka 4. Priemerné mesačné teploty vzduchu (°C) (január 2021 – december 2024) v Plaveckej jaskyni.

Table 4. Average monthly air temperatures (°C) (January 2021 – December 2024) in the Plavecká Cave.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	priemer/ rok
Vstup	8,8	8,7	8,7	9,1	9,7	10,5	11,3	12,0	12,1	11,6	10,6	9,4	10,2
Spodné poschodie	8,7	8,5	8,4	8,8	9,4	9,8	10,1	10,5	10,8	11,0	10,4	9,3	9,6
Horný otvor	9,5	9,5	9,5	9,8	10,3	10,6	11,1	11,5	11,7	11,6	10,8	9,9	10,5
Dóm netopierov	10,7	10,6	10,5	10,6	10,7	10,9	11,2	11,4	11,5	11,4	11,3	11,0	11,0
Nad jazerom	11,3	11,1	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,7	11,5	11,4
Herzov dóm	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
priemer/ mesiac	10,1	10,0	10,0	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,6	11,5	11,1	10,4	10,7

Na základe údajov z SHMÚ z klimatologickej stanice Kuchyňa-Nový Dvor bola priemerná ročná teplota vzduchu v sledovanom území 11,6 °C (za obdobie rokov 2021 – 2024, pozri tabuľku 5) a priemerný ročný úhrn zrážok (zo zrážkomernej stanice v Sološnici) 658 mm (tabuľka 6). Pri porovnaní nameraných hodnôt v jaskyni s vonkajšou teplotou vzduchu vidíme najvyššiu koreláciu v období od decembra do apríla (obr. 10). Na prelome augusta a septembra sa na vonkajšej stanici Kuchyňa-Nový Dvor začína postupne ochladzovať, avšak teploty v jaskyni ešte stále pozvoľne stúpajú až do septembra, resp. októbra.

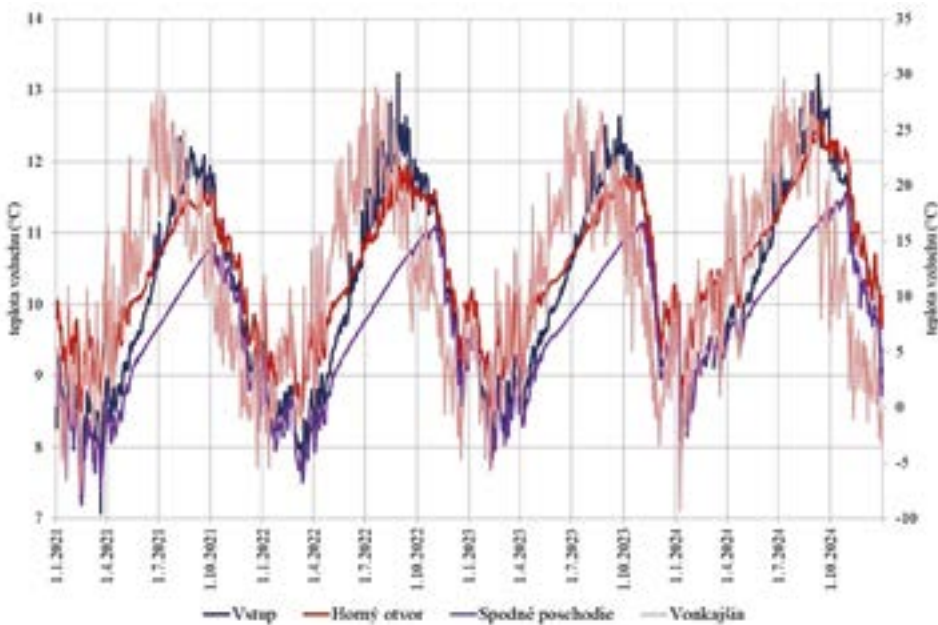
Tabuľka 5. Priemerná ročná teplota vzduchu (°C) na Vonkajšej stanici za jednotlivé roky.
Table 5. Annual average air temperatures (°C) at the outdoor station for individual years.

2021	2022	2023	2024	priemer
10,3	11,4	11,8	12,8	11,6

Tabuľka 6. Ročná suma zrážok (mm) a jej priemer za roky 2021 – 2024.
Table 6. Annual precipitation (mm) and its average for the years 2021 – 2024.

2021	2022	2023	2024	priemer
605	490	744	795	658

Maximá dosahujú v júli a v auguste a minimá v januári. *Horný otvor* a *Vstup* dosahujú maximá v septembri a minimá vo februári, resp. v marci, *Spodné poschodie* maximá v októbri, minimá v marci. Z toho vyplýva, že posun medzi vonkajšou a jaskynnou teplotou je cca 2 až 3 mesiace. Z tabuľky 5. vidieť aj každoročný nárast teploty vzduchu počas sledovaného obdobia až o 2,5 °C. Toto otepľovanie sa prejavilo aj v jaskyni. Na stanovištiach, ktoré sú ovplyvňované vonkajším prostredím (*Vstup*, *Spodné poschodie*, *Horný otvor*) vzrástla za sledované obdobie priemerná ročná teplota vzduchu o cca 0,7 °C.

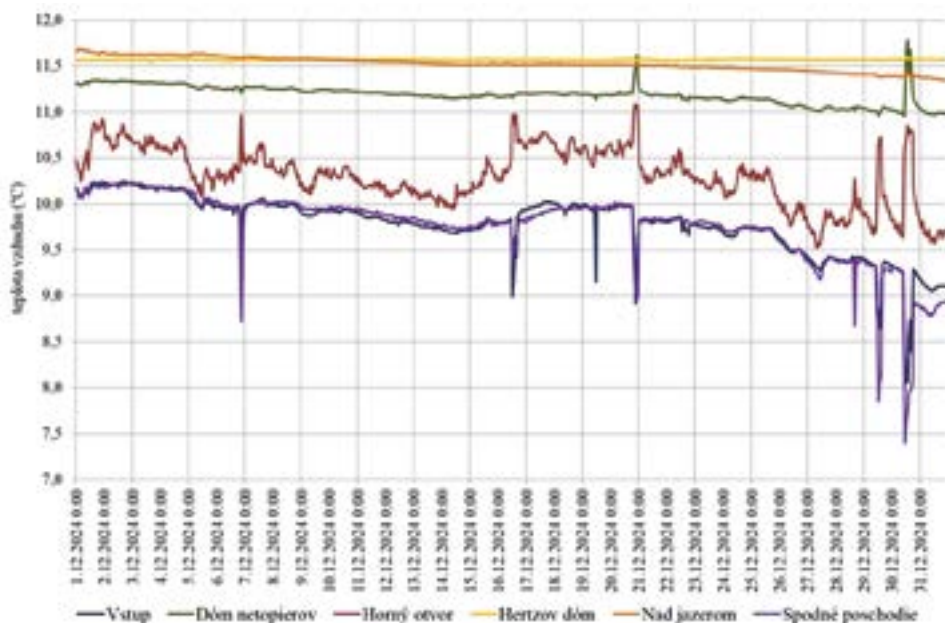


Obr. 10. Priemerné denné teploty vzduchu v dynamickej časti jaskyne a na vonkajšej stanici.
Fig. 10. Average daily air temperatures in the dynamic part of the cave and the outside station.

Dôležité je však aj poznamenať, že počas našich meraní v priebehu rokov 2023 a 2024 boli zaznamenané 4 extrémne teplé ročné obdobia po sebe na Slovensku (Faško et. al., 2024). Tie priniesli rekordné teploty. Na jeseň (september až november 2023) dosiahla priemerná priestorová teplota vzduchu na Slovensku hodnotu 10,8 °C, v zime 2023/2024 (december 2023 až február 2024) hodnotu 2,2 °C, s februárom ako najteplejším zimným

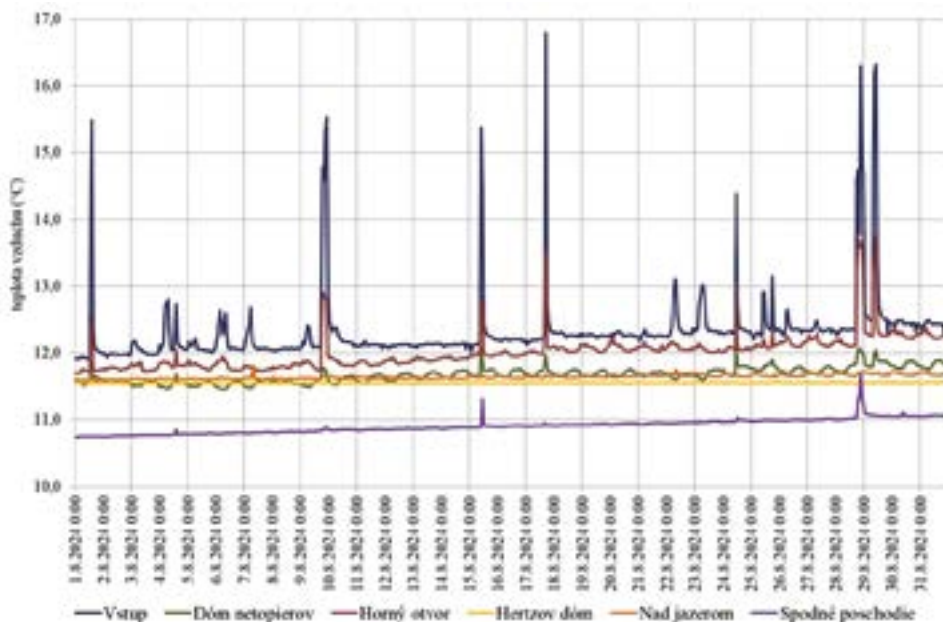
mesiacom aspoň od roku 1931. To spôsobilo nedostatok snehu v nížinách. Rekordné teploty na Slovensku pokračovali aj na jar 2024 (11,2 °C) a v lete 2024 (20,7 °C), ktoré bolo sprevádzané suchom a nepravidelnými, intenzívnymi zrážkami. Tieto ročné obdobia sú jasným dôkazom stupňujúcich sa dosahov zmeny klímy na Slovensku.

Na grafe (obr. 11) sú zaznamenané vstupy do jaskyne počas zimných mesiacov. Každý pík znamená otvorenie vstupných dverí, čím dochádza počas zimných mesiacov k nasávaniu ťažkého studeného vzduchu do jaskyne, a ten následne vytlačí cez horný otvor teplejší vzduch z jaskyne von. Tento jav je badateľný najmä v priestoroch medzi dvoma otvormi (dynamická časť jaskyne). Ťažší studený vzduch sa dostáva aj na spodné poschodie (pozri fialovú čiaru v grafe), kde sú takisto zaznamenané väčšie výkyvy teplôt vzduchu. Naopak, ďalšie priestory jaskyne sú statické (stanovište *Herzov dóm*). Rozdelenie jaskyne na statickú, dynamickú a prechodnú časť môžeme dedukovať aj na základe amplitúdy z tabuľky 3. Priestory v oblasti *Herzovho dómu* a *Nad jazerom* môžeme považovať za statické, keďže amplitúda nameraných hodnôt dosahuje hodnoty 0,1 a 0,9 °C. Priestory v okolí *Dómu netopierov* môžeme považovať za prechodnú zónu (s amplitúdou 1,7 °C) a priestory v okolí *Vstupu*, *Horného otvoru* a *Spodného poschodia* za dynamickú časť jaskyne.



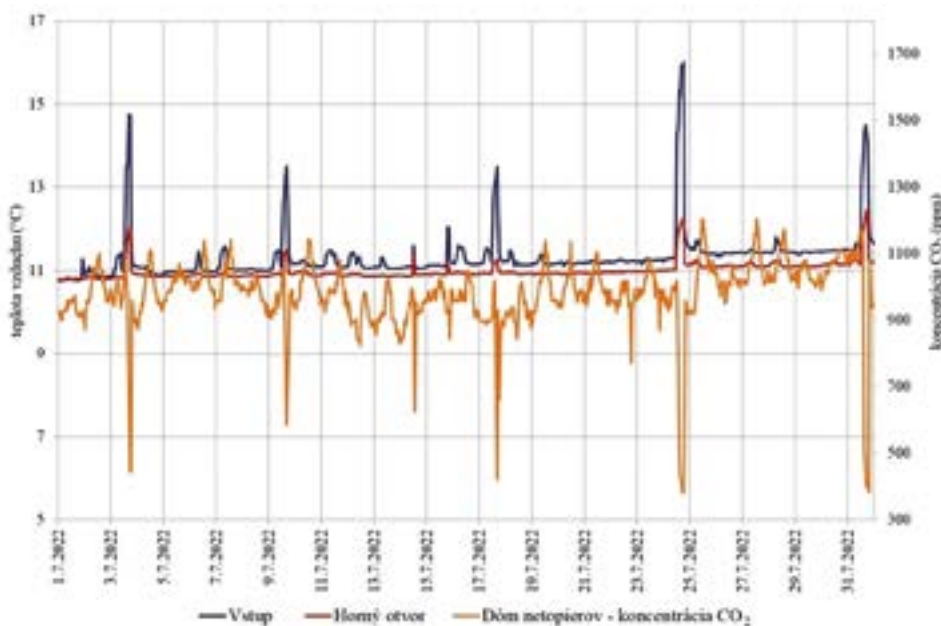
Obr. 11. Hodinové teploty vzduchu na jednotlivých stanovištiach v zimných mesiacoch.
Fig. 11. Hourly air temperatures at individual sites during the winter months.

Na grafe hodinového priebehu teplôt vzduchu na jednotlivých stanovištiach (obr. 12) môžeme vidieť jednotlivé vstupy do jaskyne počas letných mesiacov, keď sa do jaskyne dostáva teplejší vzduch z vonkajšieho prostredia. Zaujímavé sú aj pravidelné denné variácie (s jedným maximom a jedným minimom počas dňa) v *Dóme netopierov*, ktoré sa prejavujú v období celého roka, ale v období od októbra do februára majú miernejší nepravidelný priebeh (s viacerými maximami a minimami počas dňa).



Obr. 12. Hodinové teploty vzduchu na jednotlivých stanovištiach v letných mesiacoch.

Fig. 12. Hourly air temperatures at the individual sites during the summer months.



Obr. 13. Hodinové hodnoty koncentrácie CO_2 v Dóme netopierov v porovnaní s teplotou vzduchu vo Vstupe a Hornom otvore.

Fig. 13. Hourly CO_2 concentrations in the Bat Dome, compared to air temperatures in the Entrance and Upper opening.

Hodnoty koncentrácie CO₂ sme zaznamenali len v období od 5. 5. 2022 do 14. 12. 2022 vinou častej poruchovosti monitorovacej techniky. Priemerná denná koncentrácia CO₂ dosahuje za sledované obdobie hodnotu 913 ppm. Maximá dosahuje v auguste a v septembri a minimá v máji. Namerané dlhodobé priemerné denné hodnoty koncentrácie CO₂ v Dóme netopierov sú relatívne nízke, od 593 do 1434 ppm. Zaznamenali sme nepravidelné denné výkyvy koncentrácie CO₂ od júla do polovice septembra 2022 na hodnotu okolo 400 ppm, pričom priemerná koncentrácia CO₂ v danom období sa v Dóme netopierov pohybuje okolo 1000 – 1200 ppm. Tieto náhle poklesy sú spôsobené jednotlivými vstupmi do jaskyne. Vtedy sa ťažší vzduch nasýtený oxidom uhličitým dostáva z jaskyne von, a následne sa do jaskyne dostane teplejší vzduch z vonkajšieho prostredia (pozri obr. 13). Tento stav trvá len dovtedy, pokým sú dvere otvorené. Len čo sa dvere zatvoria, hodnoty koncentrácie oxidu uhličitého a teploty vzduchu sa stabilizujú na pôvodnú hodnotu. To potvrdzuje aj teóriu, že priestor v okolí Dómu netopierov je súčasťou prechodnej zóny jaskyne, kde ešte v malej miere prebieha komunikácia s povrchom.

Popri dlhodobých meraniach pomocou barologrov prebiehali v Plaveckej jaskyni aj jednorazové orientačné merania. Vlhkosť vzduchu sa pohybovala v rozsahu 90 – 99 % a hodnoty koncentrácie CO₂ v rozsahu 619 – 3462 ppm. Najvyššia koncentrácia CO₂ bola zaznamenaná v *Herzovom dóme*.

ZÁVER

Podľa *Klimatického atlasu* (2015) sa priemerná ročná teplota vzduchu v danej oblasti pohybuje od 8 do 9 °C. Na základe údajov z klimatologickej stanice Kuchyňa-Nový Dvôr priemerná ročná teplota vzduchu za obdobie rokov 2021 – 2024 bola až 11,6 °C.

Priemerná ročná teplota vzduchu nameraná v Plaveckej jaskyni na jednotlivých stanovištiach sa pohybuje od 9,6 do 11,6 °C, čo približne zodpovedá vonkajšej priemernej ročnej teplote vzduchu danej oblasti. Priemerná ročná teplota vzduchu na všetkých sledovaných stanovištiach v Plaveckej jaskyni (216 m n. m.) je 10,7 °C a v Plaveckej priepasti (270 m n. m.) 11,4 °C. Na základe toho ich môžeme považovať za jedny z najteplejších známych jaskýň na Slovensku. Novoobjavená Jaskyňa Dezidera Horváta v Nitre má priemernú ročnú teplotu vzduchu 12,5 °C (Lačný et al., 2022), pričom vchod do jaskyne leží v nadmorskej výške 181 m. Na porovnanie priemerná ročná teplota vzduchu v Gombaseckej jaskyni (250 m n. m.) je 9,4 °C, v Jasovskej jaskyni (257 m n. m.) 9,5 °C a v Domici (339 m n. m.) 9,8 °C (databáza SSJ – integrovaný monitorovací systém).

Teplota vzduchu v Plaveckej priepasti je veľmi stabilná. V Plaveckej jaskyni sa priemerná ročná teplota vzduchu za sledované obdobie zvýšila o približne 0,7 °C, čo spôsobili veľmi teplé roky. Priemerná ročná vonkajšia teplota vzduchu z najbližšej meteorologickej stanice vzrástla o 2,5 °C. K náhlym zmenám teploty vzduchu ($\pm 2 - 5$ °C) dochádza takmer pri každom vstupe do jaskyne. Tieto teplotné zmeny sa však v priebehu niekoľkých hodín (približne 3 – 4 hodiny) stabilizujú na pôvodné hodnoty.

LITERATÚRA

- Bella, P., 2010. Vytváranie jaskýň vystupujúcimi vodami pozdĺž okrajového zlomu Malých Karpát pri Plaveckom Podhradí – hydrogeologické podmienky a morfológické znaky. *Aragonit*, 15, 2, 65–70.
- Bella, P., Hlaváčová, I., Holúbek, P., 2018. Zoznam jaskýň SR (stav k 31. 12. 2017). Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Liptovský Mikuláš, 528 s.
- Bella, P., Bosák, P., Mikysek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., 2019. Multi-phased hypogene speleogenesis in a marginal horst structure of the Malé Karpaty Mountains,

- Slovakia. *International Journal of Speleology*, 48, 2, 203–220. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.48.2.2265>
- Bella, P., Hercman, H., Kdýr, Š., Mikysek, P., Pruner, P., Littva, J., Minár, J., Gradziński, M., Wróblewski, W., Velšmid, M., Bosák, P., 2022. Sulfuric acid speleogenesis and surface landform evolution along the Vienna Basin Transfer Fault: Plavecký Karst, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 51, 2, 105–122. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.2.2420>
- Butaš, J., 2003. Plavecká priepať PP 2. *Spravodaj SSS*, 34, 1, 35–38.
- Faško, P., Pecho, J., Ivaňáková, G., Kajaba, P., Rozkošný, J., 2024. Na Slovensku sme zažili štyri extrémne teplé ročné obdobia po sebe. *Green Magazine Slovakia*, 4, 20–25.
- Klimatický atlas Slovenska, 2015., I. Teplota vzduchu. MI.1. Priemerná ročná teplota vzduchu, s. 21. II. Atmosférické zrážky. MII.1. Priemerný ročný úhrn zrážok, s. 37. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava.
- Košel, V., 2005. Ktorá je najteplejšia? *Spravodaj SSS*, 36, 4, 29–30.
- Lačný, A., Putiška, R., Halama, J., Dostál, I., Csibri, T., Brixová, B., 2022. Využitie georadaru a štruktúrno-geologických metód pri výskume zaniknutého ústia Jaskyne Dezidera Horváta (Nitriansky kras). *Slovenský kras. Acta Carsologica Slovaca*, 60, 1, 51–62.
- Lalkovič, M., 2010. Plavecká jaskyňa – prvá sprístupnená jaskyňa na Slovensku. *Aragonit*, 15, 1, 19–28.
- Šmída, B., 2010. Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéftvorby. Dizertačná práca. Prírodovedecká fakulta, UK Bratislava, 221 s.
- Tencer, J., 1991. Nové poznatky o Plaveckom krase. *Jaskyniar*, 3–9.
- Tencer, J., 2021. Tabuľka najdlhších jaskýň na Slovensku, stav k 31. 3. 2021. *Spravodaj SSS*, 52, 2, 98.
- Velšmid, M., 2011. Nové poznatky o Plaveckom krase II (alebo ako po ďalších dvadsiatich rokoch očami jaskyniara). *Spravodaj SSS*, 42, 4, 20–28.

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	101 – 116	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	-----------	------------------------

CHIROPTEROFAUNA JASKÝŇ PLAVECKÉHO HRADNÉHO VRCHU

BLANKA LEHOTSKÁ¹ – ROMAN LEHOTSKÝ²

¹ Katedra environmentálnej ekológie a manažmentu krajiny, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava; blanka.lehotska@uniba.sk

² ZO SZOPK Miniopiterus, Hlaváčiková 14, 841 05 Bratislava; roman.lehotsky@miniopiterus.sk

B. Lehotská, R. Lehotský: Bats (Chiroptera) in the caves of the Plavecký hradný vrch Hill

Abstract: This paper presents the results of long-term chiropterological research realized in the caves of Plavecký hradný vrch Hill (Malé Karpaty Mountains) between 1994 and 2025. The core of the study consisted of winter censuses of bats, complemented by monitoring of a maternity colony of *Myotis myotis*, automated photographic monitoring (camera traps and photo-monitoring devices), mist-netting, and bat detector surveys in both cave habitats and the surrounding forest environment. A total of 20 bat species were recorded in the Plavecký hradný vrch Hill area, of which 13 species were documented during hibernation directly in caves. The dominant species during the hibernation period is *Rhinolophus hipposideros*, whose population has increased markedly over recent decades and currently exceeds several hundred individuals annually. In contrast, the historically important maternity colony of *Myotis myotis* in Plavecká Cave disappeared after 2014. The study area provides suitable conditions for the occurrence of a wide range of species, although most species were recorded only sporadically and in low abundance during the study period. The results highlight the high importance of the investigated caves – especially Plavecká Cave and Pec Cave – for bat conservation within the Malé Karpaty Mountains.

Key words: bats, hibernation, netting, bat-detecting, Plavecký Karst, Malé Karpaty Mountains.

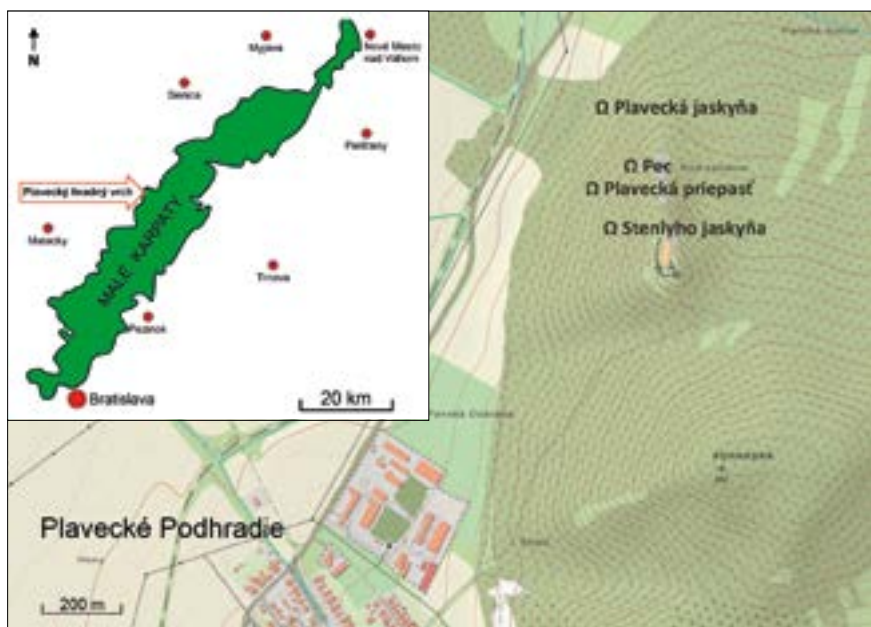
ÚVOD

Jaskyne nachádzajúce sa v hradnom vrchu Plaveckého hradu neďaleko Plaveckého Podhradia sú významné nielen z karsologického či historického hľadiska, ale aj z hľadiska chiropterologického. Prvá písomná zmienka o Plaveckej jaskyni pochádza z viedenských Vlasteneckých listov z roku 1809 (Lalkovič, 1992). Už vtedy sa spomína prítomnosť schodov, či spôsob osvetlenia jaskyne, čo dokazuje, že v tom čase bola už jaskyňa sprístupnená. Pravdepodobne tak ide o najstaršiu sprístupnenú jaskyňu vtedajšieho Uhorska. Následne sa, okrem informácií v ďalších dielach, jaskyňa zaradila do veľkého okruhu jaskýň, ktoré sa od začiatku 19. storočia začali objavovať na mapách uhorských stolíc (konkrétne Bratislavskej stolice). Do pozornosti chiropterológov sa dostáva v polovici 50. rokov 20. storočia (Vachold, 1956). Cílený chiropterologický výskum nielen Plaveckej jaskyne, ale aj ostatných jaskýň Plaveckého hradného vrchu sa realizuje od roku 1994 a práve zhrnutie jeho výsledkov je predmetom tohto článku. Významnosť niektorých jaskýň Plaveckého hradného vrchu z chiropterologického hľadiska podčiarkuje aj skutočnosť, že sú zaradené ako trvalé monitorovacie lokality (TML) do celoslovenského monitoringu netopierov, konkrétne Plavecká jaskyňa (TML_M1_071, TML_M2_096 a TML_M4_017) a Plavecká priepasť (TML_M4_032).

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA ÚZEMIA A SKÚMANÝCH LOKALÍT

Plavecký kras je jednou z ôsmich krasových oblastí Malých Karpát (Hochmuth, 2008), ktorá sa nachádza na severnom až severovýchodnom okraji Pezinských Karpát, približne na území v tvare trojuholníka, ktorého vrcholy sú tvorené obcami Rohožník, Trstín a Prievaly (Mitter, 1983). Šmída (2010) člení Plavecký kras na 18 krasových rajónov. Jedným z nich je Plavecký hradný vrch, ktorý si v rámci Plaveckého krasu zasluhuje osobitú pozornosť. Územie sa nachádza v k. ú. obce Plavecké Podhradie, patrí do CHKO Malé Karpaty a je súčasťou NPR Pohanská. Z hľadiska území sústavy NATURA 2000 leží v území európskeho významu Biele hory (SKUEV0267) a v chránenom vtáčom území Malé Karpaty (SKCHVU014).

V Plaveckom hradnom vrchu bolo doteraz zaevidovaných 9 jaskýň (Šmída, 2010) – Plavecká jaskyňa (PP-1), Plavecká priepať (PP-2), Pec (PP-3), Stenlyho jaskyňa a 5 menších jaskýň (PHV-5 až PHV-9). Z hľadiska výskytu netopierov sa budeme venovať len prvým štyrom menovaným (obr. 1, tabuľka 1), z ktorých čiastkové údaje o netopieroch boli priebežne publikované v súborných dielach týkajúcich sa netopierov Plaveckého krasu, resp. Malých Karpát (Lehotská, 2000, 2002; Lehotská, Lehotský, 2002).



Obr. 1. Lokalizácia skúmaných jaskýň Plaveckého hradného vrchu.

Fig. 1. Location of the investigated caves of Plavecký hradný vrch Hill.

Tabuľka 1. Stručná charakteristika skúmaných jaskýň Plaveckého hradného vrchu (spracované podľa: Bella et al., 2018).

Table 1. Brief description of the investigated caves of Plavecký hradný vrch Hill (adapted from: Bella et al., 2018).

Názov jaskyne	Nadmorská výška	Dĺžka jaskyne	Hĺbka jaskyne
Plavecká jaskyňa	222 m n. m.	936 m	20 m
Plavecká priepať	270 m n. m.	335 m	70 m
Jaskyňa Pec	296 m n. m.	221 m	15 m
Stenlyho jaskyňa	318 m n. m.	17 m	4 m

Chiropterologický výskum jaskýň bol realizovaný v rokoch 1994 – 2025. Nosnou metódou výskumu bolo zimné sčítanie netopierov. Hibernujúce netopiere boli v jednotlivých jaskyniach identifikované a determinované vizuálne za pomoci baterky. Každoročne minimálne 1× za zimné obdobie (v určitých obdobiach aj častejšie) bola kontrolovaná Plavecká jaskyňa. Jaskyňa Pec bola kontrolovaná v zimných obdobiach 1997/1998 až 1999/2000 a od zimného obdobia 2015/2016 je monitorovaná raz ročne. Voľne prístupné časti Plaveckej priepasti boli za účelom zistenia prítomnosti netopierov kontrolované v zimných obdobiach 1997/1998 až 1999/2000 a následne s odstupom času v zimných obdobiach 2015/2016 až 2021/2022. Stenlyho jaskyňa bola kontrolovaná občasne, konkrétne v zimných obdobiach 1997/1998, 1998/1999, 1999/2000 a 2015/2016.

Plavecká jaskyňa bola minimálne raz ročne kontrolovaná aj v období máj až júl za účelom sledovania reprodukčnej kolónie druhu *Myotis myotis*. V rokoch 2019 – 2022 sa v Plaveckej jaskyni realizoval aj detailnejší výskum prostredníctvom troch fotoskriniek – špeciálnych monitorovacích zariadení slúžiacich na automatickú fotodokumentáciu konkrétnych zoskupení netopierov v súčinnosti so zaznamenávaním vybraných premenných prostredia (obr. 2). Miesta inštalácie fotoskriniek boli stanovené na základe výsledkov predchádzajúcich výskumov (Lehotská, Lehotský, 2010, 2016; Mihál, Lehotská, 2014) – jedna bola umiestnená v Dóme netopierov a nasmerovaná na miesto, kde sa v minulosti zdržiavala spomínaná reprodukčná kolónia, dve boli umiestnené na dolnom poschodí a nasmerované na miesta s pravidelným výskytom početnejších zoskupení druhu *Rhinolophus hipposideros* v období hibernácie. Fotoskrinky zaznamenávali v 8-hodinových intervaloch teplotu, vzdušnú vlhkosť, množstvo kyslíka, atmosférický tlak a robili digitálnu snímku za účelom možnosti zistenia zmien v početnosti netopierov na danom mieste. Nakoľko išlo o prototyp monitorovacích zariadení, nevyhli sme sa počas výskumu technickým problémom, ktoré spôsobili nefunkčnosť fotoskriniek v určitých obdobiach výskumu. Zároveň boli v období 29. 7. – 15. 8. 2020 a 12. 9. – 19. 9. 2020 inštalované fotopasce v troch vstupných otvoroch do jaskyne (obr. 3, 4, 5), ktoré automaticky vytvárali fotografie a krátke videá, reagujúc na pohyb. V období 31. 5. – 20. 8. 2022 bola jedna fotopasca inštalovaná vo vnútri jaskyne, v Dóme netopierov.

Doplňkovou metódou chiropterologického výskumu v jesennom období bol odchyt netopierov do nárazových sietí (netting). Na odchyt boli použité tzv. japonské siete s veľkosťou oka 15 – 19 mm, dĺžkou 3 – 6 m a výškou 1,8 m. Siete boli inštalované pred vchodmi do jednotlivých jaskýň. Pred Plaveckou jaskyňou sa netting realizoval v rokoch 1997, 1998, 2022 a 2025, pred Plaveckou priepastou v rokoch 1997, 1998, 2019, 2022, 2025 a pred jaskyňou Pec v rokoch 1997, 2019 a 2022.



Obr. 2. Fotoskrinka inštalovaná v Plaveckej jaskyni. Foto: R. Lehotský, 2019

Fig. 2. Photo-monitoring device in Plavecká Cave. Photo: R. Lehotský, 2019



Obr. 3. Dolný vchod do Plaveckej jaskyne s vletovým otvorom pre netopiere v ľavom hornom rohu.
Foto: B. Lehotská, 2025
Fig. 3. Lower entrance to the Plavecká Cave with an entrance hole for bats in the upper left corner.
Photo: B. Lehotská, 2025



Obr. 4. Horný vstupný otvor do Plaveckej jaskyne.
Foto: B. Lehotská, 2020
Fig. 4. Upper entrance to the Plavecká Cave.
Photo: B. Lehotská, 2020



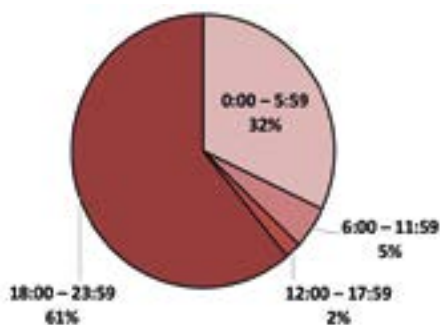
Obr. 5. Stredný vstupný otvor do Plaveckej jaskyne. Foto: B. Lehotská, 2020
Fig. 5. The middle entrance to the Plavecká Cave. Photo: B. Lehotská, 2020

Na zistenie širšieho druhového spektra netopierov viazaných na územie Plaveckého hradného vrchu, a to nielen na cielene sledované jaskynné habitaty, ale aj na okolité lesné prostredie, bola použitá metóda bat-detektoringu. Ultrazvukové signály netopierov boli nahrávané prostredníctvom detektora BATLOGGER M a následne analyzované v programe BatExplorer.

V grafoch a tabuľkách sú pre jednotlivé druhy netopierov použité nasledovné skratky: Rfer – *Rhinolophus ferrumequinum* (podkovár veľký), Rhip – *Rhinolophus hipposideros* (podkovár malý), Mmyo – *Myotis myotis* (netopier veľký), Mbly – *Myotis blythii* (netopier Blythov), Mbech – *Myotis bechsteinii* (netopier Bechsteinov), Mnat – *Myotis nattereri* (netopier riasnatý), Mema – *Myotis emarginatus* (netopier brvitý), Mmys – *Myotis mystacinus* (netopier fúzaty), Mbra – *Myotis brandtii* (netopier Brandtov), Mdau – *Myotis daubentonii* (netopier vodný), Msp. – bližšie neurčený druh rodu *Myotis*, Eser – *Eptesicus serotinus* (večernica pozdná), Ppip – *Pipistrellus pipistrellus* (večernica hvízdavá), Pnat – *Pipistrellus nathusii* (večernica parková), Ppyg – *Pipistrellus pygmaeus* (večernica Leachova), Nnoc – *Nyctalus noctula* (raniak hrdzavý), Nlei – *Nyctalus leisleri* (raniak stromový), Bbar – *Barbastella barbastellus* (uchaňa čierna), Paur – *Plecotus auritus* (ucháč svetlý), Paus – *Plecotus austriacus* (ucháč sivý), Mschr – *Miniopterus schreibersii* (lietavec sťahovavý).

VÝSLEDKY

Plavecká jaskyňa je z chiropterologického hľadiska najpreskúmanejšou a zároveň najvýznamnejšou jaskyňou Plaveckého hradného vrchu (Lehotská, Lehotský, 2010, 2016). Prvé údaje o výskyte netopierov v tejto jaskyni pochádzajú z 50. a 60. rokov 20. storočia (Matoušek, 1960; Gaisler, Hanák, 1972; Vachold, 2003). V minulosti bola jaskyňa významná predovšetkým z hľadiska výskytu reprodukčnej kolónie druhu *Myotis myotis* (Lehotská, Lehotský, 2016), ktorá sa tu nachádzala od 50. rokov 20. storočia (v tom čase zmiešaná s druhmi *Myotis blythii* a *Miniopterus schreibersii*) až do roku 2014. Od roku 2015 napriek každoročnej vizuálnej kontrole a v rokoch 2019 – 2022 aj automatickému snímkovaniu prostredníctvom fotoskrinky nebolo vytvorenie kolónie zaznamenané. Zábery z fotopasce inštalovanej v Dóme netopierov v období máj až august 2022 dokladujú občasnú aktivitu netopierov v tomto priestore – z 82 monitorovaných dní bolo 35 dní s preletom netopierov. Všetky identifikované jedince však patrili druhu *Rhinolophus hipposideros*, ktorý sa sporadicky objavil aj na záberoch z fotoskrinky. Z hľadiska časového rozloženia preletov v rámci dňa bolo najviac preletov zaznamenaných vo večerných a nočných hodinách – spolu 93 % v čase od 18.00 h do 5.59 h (obr. 6). Napriek tomu, že reprodukčná kolónia druhu *Myotis myotis* sa v posledných rokoch v jaskyni nevytvorila, jednotlivé exempláre tohto



Obr. 6. Aktivita (počet preletov) podkovárov malých (*Rhinolophus hipposideros*) zaznamenaná prostredníctvom fotopasce v Dóme netopierov v období 31. 5. – 20. 8. 2022.

Fig. 6. Activity (number of flights) of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) recorded by camera traps in the Dóme netopierov Chamber in the period 31. 5. – 20. 8. 2022.

druhu sme zaznamenali prostredníctvom fotopascí vo vstupných otvoroch do jaskyne, a to v dolnom a strednom. Horný otvor využívali na prelety do/z jaskyne predovšetkým jedince druhu *Rhinolophus hipposideros*. Záznamy z fotopascí dokladujú, že jednotlivé vstupné otvory do jaskyne nevyužívajú len netopiere (obr. 7, 8, 9, 10), ale aj iné druhy stavovcov, ako napr. užovka stromová (*Zamenis longissimus*), ryšavka lesná (*Apodemus flavicollis*), či pľh sivý (*Glis glis*).



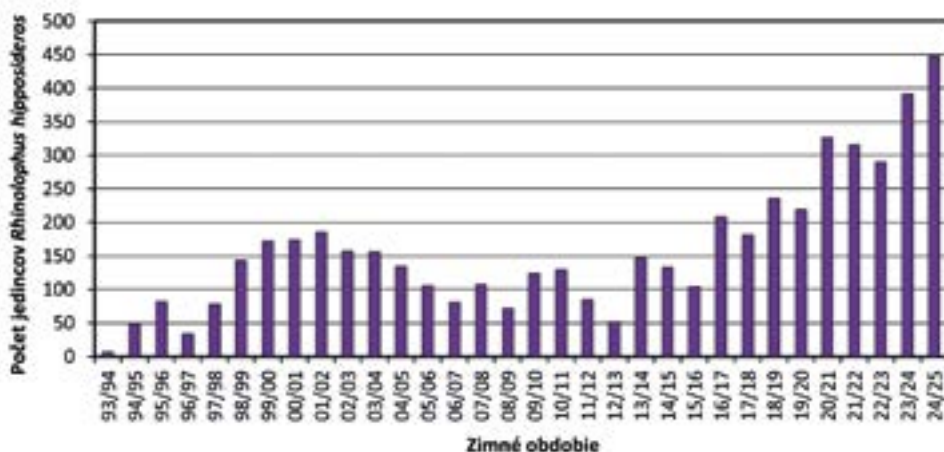
Obr. 7 a 8. Netopier veľký (*Myotis myotis*, vľavo) a ucháč (*Plecotus* sp., vpravo) pri dolnom vletovom otvore do Plaveckej jaskyne.

Fig. 7 and 8. A greater mouse-eared bat (*Myotis myotis*, left) and a long-eared bat (*Plecotus* sp., right) at the lower entrance to the Plavecká Cave.



Obr. 9 a 10. Dva letiace podkováre malé (*Rhinolophus hipposideros*, vľavo) a netopier veľkouchý (*Myotis bechsteinii*) v strednom vletovom otvore do Plaveckej jaskyne.

Fig. 9 and 10. Two flying lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*, left) and a Bechstein's bat (*Myotis bechsteinii*) in the middle entrance to the Plavecká Cave.



Obr. 11. Počty hibernujúcich jedincov druhu *Rhinolophus hipposideros* zaznamenané v Plaveckej jaskyni v zimných obdobiach 1993/1994 až 2024/2025.

Fig. 11. Numbers of hibernating individuals of *Rhinolophus hipposideros* recorded in Plavecká Cave in the winter periods 1993/1994 to 2024/2025.

V súčasnosti jaskyňa poskytuje úkryt netopierom predovšetkým v zimnom období. Počas systematického výskumu v rokoch 1994 – 2025 bol v Plaveckej jaskyni a jej blízkom okolí zaznamenaný výskyt 20 druhov netopierov, z toho 13 druhov v období hibernácie.

V zimnom období je výrazne dominujúcim druhom *Rhinolophus hipposideros*, ktorého početnosť z menej ako 100 zimujúcich jedincov v 90. rokoch 20. storočia vzrástla na 300 – 400 jedincov ročne v rámci zimných období rokov 2021 až 2025 (obr. 11). Na zimovanie využíva predovšetkým dolnú etáž jaskyne, nachádzajúcu sa v blízkosti vchodu, kde na niektorých miestach vytvára početnejšie zoskupenia. Najpočetnejšie zoskupenia zvyknú byť na tzv. Platni (obr. 12) a pod mostíkom (obr. 13). V Malých Karpatoch omnoho vzácnejší druh *Rhinolophus ferrumequinum* (obr. 14) sa nám počas sledovaného obdobia podarilo zaznamenať 11-krát (spravidla 1- až 2-krát za 5 rokov), avšak len v počte 1 exemplár (okrem zimného obdobia 2009/2010, kedy boli zaznamenané 2 ex.). Zo zástupcov rodu *Myotis* v jaskyni v minulosti (v 90. rokoch 20. storočia) pravidelne zimoval *Myotis myotis* v počte 1 – 4 ex. Od roku 2000 je jeho výskyt skôr vzácny, tzn. 1 ex. zaznamenaný 1- až 3-krát za 5 rokov (jedinou výnimkou boli 3 ex. v zimnom období 2010/2011). Z menších druhov rodu *Myotis* bol v priebehu sledovaného obdobia najčastejšie (18-krát) zaznamenaný



Obr. 12. Zoskupenie podkovárov malých (*Rhinolophus hipposideros*) na Platni. Foto: B. Lehotská, 2024

Fig. 12. The cluster of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) on an area called Platňa. Photo: B. Lehotská, 2024



Obr. 13. Zoskupenie podkovárov malých (*Rhinolophus hipposideros*) na mostíku. Foto: B. Lehotská, 2021

Fig. 13. The cluster of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) on an area called Mostík. Photo: B. Lehotská, 2021



Obr. 14. Podkovár veľký (*Rhinolophus ferrumequinum*) zimujúci v Plaveckej jaskyni. Foto: R. Lehotský, 2015

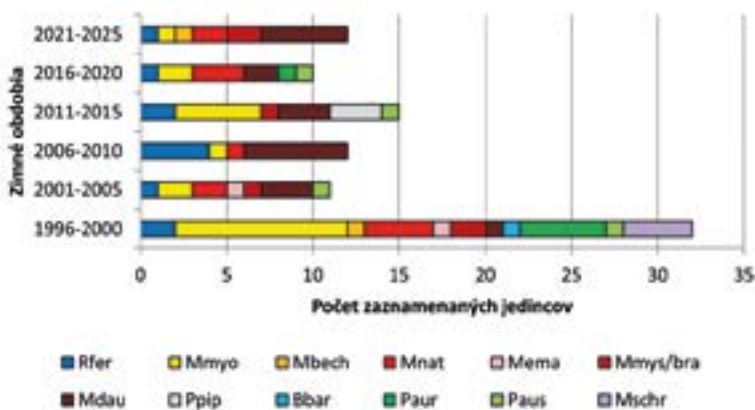
Fig. 14. A greater horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*) hibernating in Plavecká Cave. Photo: R. Lehotský, 2015



Obr. 15. Netopier veľký (*Myotis myotis*) zimujúci v Plaveckej jaskyni. Foto: R. Lehotský, 2011

Fig. 15. A greater mouse-eared bat (*Myotis myotis*) hibernating in the Plavecká Cave. Photo: R. Lehotský, 2011

druh *Myotis daubentonii*, avšak len v počte 1 – 2 ex. Častejšie (12-krát) sme zaznamenali aj výskyt druhu *Myotis nattereri* (max 1 ex.). Výskyt ostatných druhov rodu *Myotis* je skôr sporadický (obr. 16). Najčastejšie sme jedince menších druhov rodu *Myotis*, obdobne ako občasný výskyt druhu *Pipistrellus pipistrellus*, zaznamenávali v štrbinových úkrytoch v priestoroch nachádzajúcich sa na dolnom poschodí v blízkosti vchodu do jaskyne. Nakoľko tieto druhy preferujú štrbinové úkryty, je predpoklad, že ich počty sú v rámci zimných sčítaní výraznejšie podhodnotené. Výskyt chladnomilných druhov, ako sú *Barbastella barbastellus*, či zástupcovia rodu *Plecotus*, bol relatívne bežný v 90. rokoch 20. storočia, avšak od roku 2000 sú nachádzané vzácné (max 1 ex. za 10 rokov). Na západnom Slovensku veľmi vzácny druh *Miniopterus schreibersii* sa v Plaveckej jaskyni objavil len v zimných obdobiach 1995/1996 a 1996/1997, hoci v 50. rokoch 20. storočia tu tvoril početné reprodukčné kolónie (Uhrin et al., 1997).



Obr. 16. Počty jedincov jednotlivých druhov netopierov (okrem druhu *Rhinolophus hipposideros*) zaznamenaných v Plaveckej jaskyni počas zimných období v rámci 5-ročných monitorovacích cyklov (jedince druhov *Myotis mystacinus* a *Myotis brandtii* neboli v niektorých prípadoch počas zimovania navzájom odlišované, a preto sú v grafe uvádzané ako Mmys/bra).

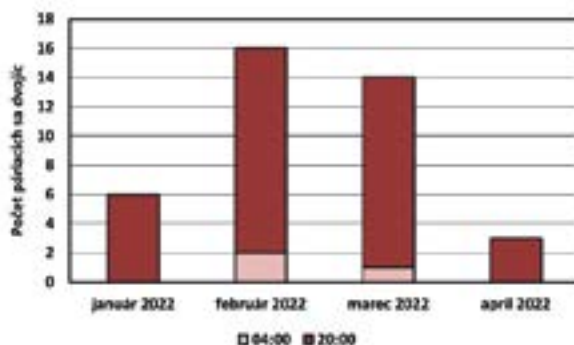
Fig. 16. Numbers of individuals of individual bat species (except *Rhinolophus hipposideros*) recorded in Plavecká Cave during winter periods within 5-year monitoring cycles (individuals of *Myotis mystacinus* and *Myotis brandtii* were in some cases not distinguished from each other during hibernation and are therefore shown in the graph as Mmys/bra).

Z údajov získaných prostredníctvom fotoskriniek snímajúcich dve referenčné plochy vyplynulo, že aj v období hibernácie jedince druhu *Rhinolophus hipposideros* vykazujú určitú aktivitu, samovoľne sa prebúdzajú a premiestňujú v rámci podzemného priestoru a dokonca dochádza aj k ich páreniu (obr. 17). Pomerne vysokú páriacu aktivitu sa podarilo zaznamenať v období od januára do apríla 2022, kedy na záberoch z fotoskrinky bolo možné identifikovať až 38 dvojíc páriacich sa podkovárov (obr. 18). K páreniu vo väčšine (92 %) zaznamenaných prípadov dochádzalo vo večerných hodinách (fotoskrinka snímala referenčnú plochu o 20.00 h), zriedkavejšie o 4.00 h ráno. Zo získaných údajov z fotoskriniek je zrejmé, že netopiere sa na sledovaných referenčných plochách trvalo zdržiavajú spravidla do apríla, kedy tieto priestory jaskyne postupne opúšťajú a opätovne ich začínajú osídľovať až v októbri pred začiatkom hibernácie. V mimohibernačnom období boli sledované referenčné plochy využívané netopiermi nepravidelne, krátkodobo a spravidla len niekoľko málo jedincami.



Obr. 17. Páriace sa podkováre malé (*Rhinolophus hipposideros*) v Plaveckej jaskyni. Foto: R. Lehotský, 2019

Fig. 17. Mating lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) in Plavecká Cave. Photo: R. Lehotský, 2019



Obr. 18. Počty dvojíc páriacich sa podkovárov malých (*Rhinolophus hipposideros*) zaznamenané prostredníctvom fotoskrinky (časy záznamu 4.00 h a 20.00 h) v období január až apríl 2022 na referenčnom bode Platňa.

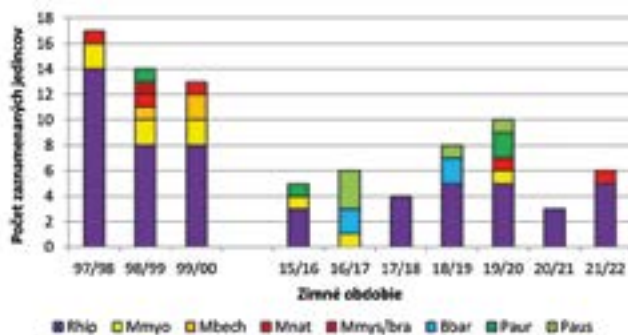
Fig. 18. Numbers of mating pairs of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) recorded using a photo-monitoring device (recording times 4:00 a.m. and 8:00 p.m.) in the period January to April 2022 at the Platňa reference point.

V **Plaveckej priepasti** (obr. 19) a jej blízkom okolí bol doteraz zaznamenaný výskyt 14 druhov netopierov, z toho 8 druhov počas hibernácie (obr. 20). Napriek početnému druhovému zastúpeniu, počet zimujúcich jedincov jednotlivých druhov je nízky (0 – 2 ex. / druh). Jedinou výnimkou je *Rhinolophus hipposideros*, zaznamenaný v počte 3 – 14 ex. Netopiere zimujú vo vstupných častiach jaskyne, pričom využívajú malú kavernu v ľavej vetve alebo štrbinové úkryty. Častejší výskyt sme zaznamenali v prípade zástupcov rodu *Plecotus* (obr. 21) a druhu *Myotis nattereri*. Do rozsiahlych priestorov jaskyne objavených v roku 2002 (Butaš, 2003) nemajú netopiere prístup, nakoľko vo vstupe do týchto priestorov je inštalovaný uzáver. Je vybudovaný nepriechodne pre netopiere z dôvodu, aby nedošlo k znehodnoteniu snehobielej kvapľovej výzdoby ich trusom. V dávnej minulosti boli priestory Plaveckej priepasti netopiermi využívané, o čom svedčí množstvo guána na



Obr. 19. Vstupný otvor do Plaveckej priepasti. Foto: R. Lehotský, 2019

Fig. 19. Entrance to the Plavecká priepasť Shaft. Photo: R. Lehotský, 2019



Obr. 20. Počty jedincov jednotlivých druhov netopierov zaznamenaných vo vstupnej časti Plaveckej priepasti počas sledovaných zimných období.

Fig. 20. Numbers of individuals of individual bat species recorded in the entrance part of the Plavecká priepasť Shaft during the monitored winter periods.



Obr. 21. Ucháč svetlý (*Plecotus auritus*) zimujúci v Plaveckej priepasti. Foto: R. Lehotský, 2020

Fig. 21. A brown long-eared bat (*Plecotus auritus*) hibernating in the Plavecká priepasť Shaft. Photo: R. Lehotský, 2020

viacerých miestach jaskyne. Množstvo guána sa nachádza aj v jaskynnom jazere, ktoré sfarbuje do čiernej. Vek guána je určite veľmi starý, čo je možné konštatovať na základe hlbokých korózných hrncov vytvorených vo vápenci a sintroch. V roku 2022 bol vybudovaný roštový uzáver aj v hornej časti vstupnej pravej vetvy smerujúcej k dolnému uzáveru. V nej sa nachádza dlhý duralový rebrík. V mieste vstupu na rebrík je vytvorený priechod s vyklápajúcim a uzamykateľným roštovým uzáverom. Po obvodě roštu je dostatočné množstvo otvorov, ktorými môžu netopiere vlietať do pravej vetvy a zimovať v jej štrbinách (po dolný uzáver), ako to bolo ešte pred vybudovaním roštového uzáveru.

V jaskyni **Pec** (obr. 22, 23) a jej blízkom okolí bol doteraz zaznamenaný výskyt 15 druhov netopierov, z toho 9 druhov počas hibernácie (obr. 24, 25). Najpočetnejším druhom v období hibernácie je opäť *Rhinolophus hipposideros* (obr. 24), ktorého početnosť výrazne stúpla (z 5 ex. v zimnom období 2015/2016 na 326 ex. v zimnom období 2022/2023) po objave



Obr. 22. Vstupný portál do jaskyne Pec.

Foto: R. Lehotský, 2019

Fig. 22. Entrance portal to the Pec Cave.

Photo: R. Lehotský, 2019

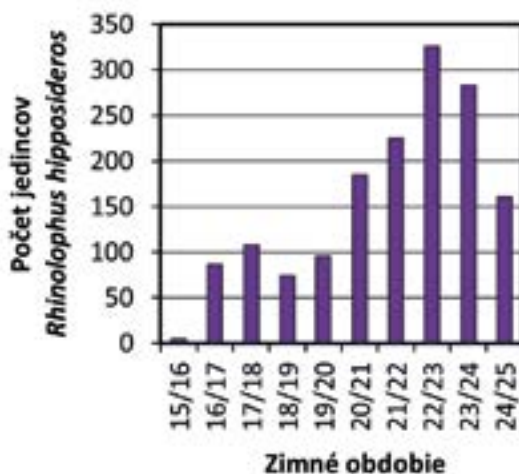


Obr. 23. Vchod do nových priestorov jaskyne Pec objavených v roku 2013.

Foto: R. Lehotský, 2024

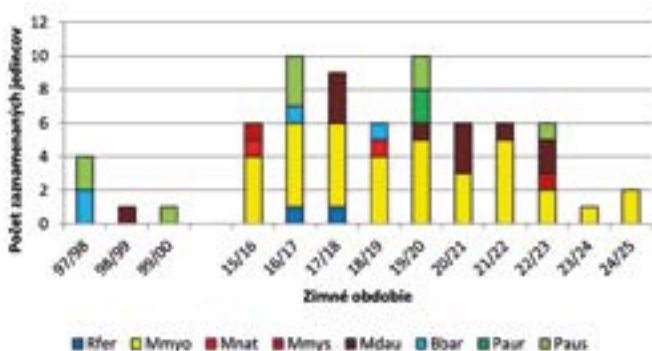
Fig. 23. Entrance to the new spaces of the Pec Cave discovered in 2013.

Photo: R. Lehotský, 2024



Obr. 24. Počty hibernujúcich jedincov druhu *Rhinolophus hipposideros* zaznamenané v jaskyni Pec v zimných obdobiach 2015/2016 až 2024/2025.

Fig. 24. Numbers of hibernating individuals of *Rhinolophus hipposideros* recorded in the Pec Cave in the winter periods 2015/2016 to 2024/2025.



Obr. 25. Počty jedincov jednotlivých druhov netopierov (okrem *Rhinolophus hipposideros*) zaznamenaných v jaskyni Pec počas sledovaných zimných období.

Fig. 25. Numbers of individuals of individual bat species (except *Rhinolophus hipposideros*) recorded in Pec Cave during the monitored winter periods.

nových priestorov jaskyne v roku 2013 (Veľšmid, 2013). Druh pravidelne vytvára dve až tri početnejšie zoskupenia hneď v prvom vstupnom dome (obr. 26). Tieto nové priestory vzhľadom na svoj kavernovitý tvar poskytujú vhodné mikroklimatické podmienky nielen pre zimovanie podkovárov, ale aj ďalších druhov netopierov. Z nich k početnejšie zastúpeným (1 – 6 ex.) s pravidelným výskytom patrí *Myotis myotis* (obr. 27). Častejšie boli zaznamenané aj zimujúce jedince (max. 3 v rámci jednej kontroly) druhov *Myotis daubentonii* a *Plecotus austriacus*.



Obr. 26. Podkováre malé (*Rhinolophus hipposideros*) zimujúce v jaskyni Pec. Foto: B. Lehotská, 2025

Fig. 26. Lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*) hibernating in the Pec Cave.

Photo: B. Lehotská, 2025



Obr. 27. Netopier veľký (*Myotis myotis*) zimujúci v jaskyni Pec.

Foto: B. Lehotská, 2017

Fig. 27. A greater mouse-eared bat (*Myotis myotis*) hibernating in the Pec Cave. Photo: B. Lehotská, 2017

Stenlyho jaskyňa je z hľadiska výskytu netopierov spomedzi jaskýň Plaveckého hradného vrchu najmenej významnou. Doteraz tu bol zistený výskyt len 2 druhov – *Rhinolophus hipposideros* (max 2 ex.) a *Myotis myotis* (max 3 ex.).

V mimohibernačnom období boli pred vchodmi do skúmaných jaskýň, resp. v ich blízkom okolí zaznamenané nielen druhy zistené na jednotlivých lokalitách aj počas

hibernácie, ale aj ďalšie druhy využívajúce okolité lesné prostredie na lov potravy, príp. na presun medzi svojimi úkrytmi a loviskami. Prostredníctvom údajov získaných z nettingu a bat-detektoringu (tabuľka 2) sa tak druhové spektrum netopierov Plaveckého hradného vrchu (13 druhov zaznamenaných počas hibernácie) rozšírilo o ďalších 5 druhov

Tabuľka 2. Prehľad druhov netopierov zaznamenaných v skúmaných jaskyniach a ich bezprostrednom okolí v mimohibernačnom období a metód výskumu, akými boli netopiere v jednotlivých obdobiach zaznamenané (* – druhy zaznamenané aj počas hibernácie, V – vizuálne pozorovanie, N – netting, D – detektoring).

Table 2. Overview of bat species recorded in the investigated caves and their immediate surroundings during the non-hibernation period and research methods used to record bats in individual periods (* – species recorded also during hibernation, V – visual observation, N – netting, D – detecting).

Jaskyňa	Plavecká jaskyňa			Plavecká priepašť		Pec	
	do 1993	1994 – 2010	2011 – 2025	1994 – 2010	2011 – 2025	1994 – 2010	2011 – 2025
Rfer*		ND					
Rhip*	V	VND	VND	N	ND	N	ND
Mmyo*	V	VN	VN				D
Mbly	V						
Mbech*		N			N		N
Mnat*		N		N	N	N	
Mmys*			N				
Mdau*		N	N				N
Eser			D		ND		D
Ppip*		N	D		D		D
Pnat			D		D		D
Ppyg			D		D		D
Nnoc			D		D		
Nlei			D		D		D
Bbar*				N		N	N
Paur*		N	D	N	ND		ND
Paus*		N		N			
Mschr*	V						
Spolu druhov	4	9	11	5	10	3	11

– *Eptesicus serotinus*, *Pipistrellus nathusii*, *Pipistrellus pygmaeus*, *Nyctalus noctula* a *Nyctalus leisleri*, ktoré nie sú priamo topicky viazané na jaskynné prostredie, ale skôr na stromové dutiny v lesnom komplexe tejto krasovej oblasti. Okrem nami zaznamenaných druhov odchytil Noga (in litt.) v roku 2013 pred Plaveckou jaskyňou aj netopiera alkatoe (*Myotis alcaethoe*). Celkovo počty odchytených jedincov v rámci nettingov neboli vysoké, skôr išlo o jednotlivé exempláre rôznych druhov, spravidla oboch pohlaví. Z hľadiska aktivity zaznamenananej prostredníctvom bat-detektoringu mali v nahrávkach, okrem druhu *Rhinolophus hipposideros* priamo viazaného na jaskynné prostredie, početnejšie zastúpenie druhy *Pipistrellus pipistrellus* a *Pipistrellus pygmaeus* (tabuľka 3).

Tabuľka 3. Prehľad druhov zaznamenaných prostredníctvom bat-detektoringu v blízkosti jaskýň Plaveckého hradného vrchu.

Vysvetlivky: + – ojedinelý výskyt (1 – 10 nahrávok), ++ – stredne početný výskyt (11 – 100 nahrávok), +++ – početný výskyt (viac ako 100 nahrávok).

Table 3. Overview of species recorded through bat-detectoring near the caves of Plavecký hradný vrch Hill Explanations: + – rare occurrence (1 – 10 recordings), ++ – medium occurrence (11 – 100 recordings), +++ – abundant occurrence (more than 100 recordings).

Jaskyňa	Plavecká jaskyňa		Plavecká priepašť			Pec	
Dátum	12. 9. 2020	18. 8. 2022	27. 9. 2019	19. 9. 2020	30. 8. 2022	19. 9. 2019	30. 8. 2022
Rhip	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Mmyo	–	–	–	–	–	–	+
Msp.	–	+	++	++	–	+	+
Eser	+	+	+	–	+	–	+
Ppip	+++	+++	+	++	+	+	++
Pnat	+	–	–	+	+	+	+
Ppyg	+++	++	++	++	++	+++	++
Nnoc	+	+	–	–	+	–	–
Nlei	++	+	+	+	+	+	+
Paur	+	+	–	+	–	+	+
Spolu druhov	8	8	6	7	7	7	9

ZÁVER

Do roku 1994 bol z jaskýň Plaveckého hradného vrchu, presnejšie z 1 lokality (Plaveckej jaskyne), známy výskyt 7 druhov netopierov (*Rhinolophus ferrumequinum*, *Rhinolophus hipposideros*, *Myotis myotis*, *Myotis blythii*, *Barbastella barbastellus*, *Plecotus austriacus* a *Miniopterus schreibersii*), pričom všetky tieto druhy boli zaznamenané počas hibernácie a 4 z nich aj v mimohibernačnom období. Toto druhové spektrum sa cieľovým chiropterologickým výskumom za posledných 30 rokov s použitím viacerých metód podarilo rozšíriť o ďalších 7 druhov zaznamenaných priamo jaskyniach počas hibernácie a 6 druhov zaznamenaných v príľahlom lesnom prostredí v mimohibernačnom období. Celkovo tak počet druhov netopierov na území Plaveckého hradného vrchu stúpol na 20, čo predstavuje 90,9 % druhov doteraz zaznamenaných v rámci celého Plaveckého krasu. Druh *Myotis blythii*, ktorého jedince boli v 60. rokoch 20. storočia zaznamenané v Plaveckej jaskyni (Gaisler, Hanák, 1972) sa od roku 1994 opätovne zaznamenať nepodarilo. Za vzácny a ojedinelý možno považovať aj výskyt druhu *Miniopterus schreibersii*, ktorého jedince sme zaznamenali po približne 30 rokoch v zimných obdobiach 1995/1996 a 1996/1997. Ostatné druhy sa na sledovaných lokalitách síce vyskytujú aspoň raz za cca 5 rokov, avšak ich početnosť je nízka (obr. 16, 20, 25).

Jediný druh, ktorého početnosť za sledované obdobie výrazne stúpla, je *Rhinolophus hipposideros*, a to aj napriek tomu, že počty zimujúcich jedincov v Plaveckej jaskyni (obr. 12) a v jaskyni Pec (obr. 24) do istej miery kolíšu. Predpokladáme, že netopiere poznajú obe tieto jaskyne a za určitých podmienok preferujú jednu z nich. V posledných rokoch sa totiž medziročný pokles v počte jedincov na jednej lokalite prejaví medziročným nárastom v počte jedincov na druhej lokalite (tabuľka 4). Prvý výrazný medziročný nárast nastal v zimnom

Tabuľka 4. Kolísanie početnosti zimujúcich jedincov druhu *Rhinolophus hipposideros* zaznamenaných v Plaveckej jaskyni a v jaskyni Pec znázornené medziročným nárastom (↗) a poklesom (↘) počtu jedincov v jednotlivých jaskyniach, ako aj celkovým (obe jaskyne spolu) nárastom / poklesom vyjadreným v percentách.

Table 4. Fluctuations in the abundance of hibernating individuals of *Rhinolophus hipposideros* recorded in Plavecká cave and Pec cave, illustrated by the annual increase (↗) and decrease (↘) in the number of individuals in individual caves, as well as the overall (both caves together) increase / decrease expressed in percentages.

Plavecká jaskyňa	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↘
Pec	↗	↗	↘	↘	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↗
celkový nárast (+) /pokles (-) v %		+170,6	-2,0	+7,3	+1,6	+62,2	+5,9	+13,9	+9,4	-9,6				

období 2016/2017, kedy počet podkovárov malých v porovnaní s predchádzajúcim zimným obdobím stúpol zo 109 na 295 ex. (tzn. o 170 %). Ďalší výrazný nárast sme pozorovali v zimnom období 2020/2021, a to 315 na 511 ex. (tzn. o viac ako 60 %).

Skúmané územie poskytuje vhodné podmienky pre výskyt širokého spektra druhov, a to aj napriek tomu, že väčšinu druhov sme počas výskumu zaznamenali len sporadicky a v nízkych početnostiach. Z výsledkov výskumu vyplýva, že skúmané jaskyne (najmä Plavecká jaskyňa a jaskyňa Pec) patria k významným chiropterologickým lokalitám Malých Karpát a je potrebné zabezpečiť ochranu v nich vyskytujúcich sa netopierov.

LITERATÚRA

- Bella, P., Hlaváčová, I., Holúbek, P., 2018. Zoznam jaskýň Slovenskej republiky (stav k 31. 12. 2017). Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Liptovský Mikuláš, 528 s.
- Butaš, J., 2003. Plavecká priepať PP-2. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 34/1, 35–38.
- Gaisler, J., Hanák, V., 1972. Netopýři podzemních prostorů v Československu. Sborník ZČM v Plzni – Příroda, 7, 3–46.
- Hochmuth, Z., 2008. Krasové územia a jaskyne Slovenska. Geographia Cassoviensis, 2/2, 1–209.
- Lalkovič, M., 1992. Nový pohľad na históriu poznávania jaskýň Malých Karpát. Slovenský kras 30, 109–130.
- Lehotská, B., 2000. Netopiere Plaveckého krasu a ich praktická ochrana. Acta Environmentalica Universitatis Comenianae, 10, 207–213.
- Lehotská, B., 2002. Netopiere Malých Karpát. Lynx (Praha), n. s., 33, 141–184.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2002. Zimoviská netopierov v Malých Karpatoch II. Vespertilio, 6, 73–86.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2010. Zhrnutie poznatkov o zimovaní netopierov v Plaveckej jaskyni. Ochrana prírody, 26, 71–74.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2016. Zhrnutie poznatkov o reprodukčnej kolónii druhu *Myotis myotis* v Plaveckej jaskyni (Malé Karpaty). Naturae Tutela, 20, 2, 139–148.
- Mihál, T., Lehotská, B., 2014. Vplyv premenných prostredia na dynamiku hibernujúcej kolónie *Rhinolophus hipposideros* v Plaveckej jaskyni (Malé Karpaty). Acta Environmentalica Universitatis Comenianae, 22, 1, 37–46.

- Matoušek, F., 1960. Príspevok k ťahu lietavca sťahovavého (*Miniopterus schreibersii* Kuhl.) na západnom Slovensku. Ac. Rer. Nat. Mus. Slov., 6, 72–78.
- Mitter, P., 1983. Geomorfologická rajonizácia krasu Malých Karpát. Slovenský kras, 21, 3–34.
- Šmída, B., 2010. Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéfortvorby. Dizertačná práca, Katedra fyzickej geografie a geoekológie, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, Bratislava, 223 p.
- Uhrin, M., Lehotská, B., Benda, P., Lehotský, R., Matis, Š., 1997. Rozšírenie netopierov na Slovensku. Časť 3, *Miniopterus schreibersi*. Vespertilio, 2, 113–130.
- Vachold, J., 1956. K otázke výskytu a rozšírenia netopierov (Chiroptera) na Slovensku. Biol. práce 14, 2, 1–68.
- Vachold, J., 2003. Výskyt a rozšírenie netopierov na Slovensku s ekologickými dodatkami. Vespertilio, 7, 185–233.
- Velšmid, M., 2013. Nový objav v Plaveckom krase – jaskyňa Pec. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 44, 1, 58–62.

SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	63/1 – 2	117 – 143	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2025
--	----------	-----------	------------------------

BIOSPELEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA JASKÝŇ PLAVECKÉHO HRADNÉHO VRCHU (MALÉ KARPATY)

ANDREJ MOCK¹ – PETER LUPTÁČIK¹ – ANDREA RENDOŠOVÁ¹ – MICHAL RENDOŠ² – VLADIMÍR PAPÁČ³ – ZUZANA VIŠŇOVSKÁ³ – NATÁLIA RASCHMANOVÁ¹ – MILOŠ MELEGA³ – VLADIMÍR KOŠEL[†] – TOMÁŠ JÁSZAY⁴ – JOZEF OBOŇA² – ZUZANA KRUMPÁLOVÁ⁵ – ĽUBOMÍR KOVÁČ¹

¹ Katedra zoológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Šrobárova 2, 041 54 Košice; andrej.mock@upjs.sk; peter.luptacik@upjs.sk; andrea.rendosova@upjs.sk; natalia.raschmanova@upjs.sk; lubomir.kovac@upjs.sk;

² Katedra ekológie, Fakulta humanitných a prírodných vied, Prešovská univerzita v Prešove, Ul. 17. novembra č.15, 080 01 Prešov; michal.rendos@unipo.sk; jozef.obona@unipo.sk

³ Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; vladimir.papac@ssj.sk; zuzana.visnovska@ssj.sk; milos.melega@ssj.sk

⁴ Šarišské múzeum v Bardejove, Radničné námestie 13, 085 01 Bardejov; jaszaytomas@gmail.com

⁵ Katedra ekológie a environmentalistiky, Fakulta prírodných vied a informatiky, Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, Tr. A. Hlinku 1, 949 01 Nitra; z.krumpalova@ukf.sk

A. Mock, P. Luptáčik, A. Rendošová, M. Rendoš, V. Papáč, Z. Višňovská, N. Raschmanová, M. Melega, V. Košel, T. Jászay, J. Oboňa, Z. Krumpálová, Ľ. Kováč: Biospeleological characteristics of the caves of Plavecký hradný vrch Hill (Malé Karpaty Mountains, Slovakia)

Abstract: In the small karst area of Plavecký hradný vrch Hill (Malé Karpaty Mountains, Western Slovakia) in Triassic limestone, there are several interesting caves of hydrothermal origin. The location and origin of these caves have made them among the warmest in the Western Carpathians (11–13 °C). Terrestrial and aquatic invertebrates have been extensively studied in three caves, two of which are predominantly horizontal, Plavecká Cave (1253 m long, 37 m deep) and Pec Cave (208 m / -15 m), while the third is vertical, Plavecká Shaft (335 m / -70 m). In 2021, we explored these caves in the spring and autumn and collected invertebrates using a combination of methods (individual collection, sampling and analysis of organic substrate, and pitfall traps). Arthropods, particularly mites, springtails, and dipterans, predominated overwhelmingly, and beetles were also rich in species. Contrary to expectations, we consistently noted the absence of troglobiont fauna and only rare occurrences of relict eutroglophiles. Richer communities are concentrated in parts of the caves close to the surface and at sites of organic deposits. The study presents the first published comprehensive findings on the biospeleology of these caves.

Key words: biospeleology, invertebrates, Arthropoda, hypogene cave, Plavecký Karst, faunistics

ÚVOD

V masíve Plaveckého hradného vrchu je zdokumentovaných niekoľko jaskýň (Bella a kol., 2018). Horizontálne lokality Plavecká jaskyňa a jaskyňa Pec boli známe oddávna, avšak veľká časť ich priestorov bola objavená až v nedávnej dobe (Hubek a Magdolen, 2008; Velšmid, 2013). Plavecká jaskyňa bola sprístupnená verejnosti už v 19. storočí nájomníkmi panstva Pálffyovcov, neskôr bola využívaná aj ako skladisko či depozit guána netopierov, ktorý sa

ťažil ako hnojivo, teda dlhodobo bola ovplyvňovaná ľudskými aktivitami (Lalkovič, 2010; Herz, ústna informácia). Plavecká priepať patrí k novodobejším objavom (Butaš, 2003).

Záujem biológov o faunu jaskýň v okolí Plaveckého Podhradia má pomerne pestrú minulosť, ale týka sa takmer výlučne Plaveckej jaskyne. Chvostoskoky v Plaveckej jaskyni študovali Nosek (1962, 1963) a Paclt (1972). Osobitnú pozornosť si zaslúži opis nového taxónu, *Hypogastrura crassaegranulata carpatica* Nosek, 1962, ktorý Skarżyński (2006) predefinoval ako samostatný druh, *Hypogastrura carpatica* (Nosek, 1962). Tento druh je dosiaľ známy len z Malých Karpát, a to z Plaveckej jaskyne a Roštúnskej priepasti (Nosek, 1963; Kováč 2000). Spolu s druhom *Mesogastrura ojcoviensis* (Stach, 1919) tu reprezentujú faunu reliktného charakteru. Pozornosť si zaslúži nález vzácneho druhu *Stenaphorura japygiformis* Absolon, 1900, viazaného na jaskyne a pôdne biotopy v krasových oblastiach. Plavecká jaskyňa v tom čase predstavovala druhú známu lokalitu tohto druhu, pôvodne opísaného z Moravského krasu. Je zaujímavé, že obaja autori, Nosek (1962, 1963) aj Paclt (1972), z Plaveckej jaskyne uvádzajú po 8 druhov (spolu 13), ale len necelá štvrtina druhového spektra je identická. Pre úplnosť treba dodať, že Nosek získal materiál z guána zo „zadného veľkého priestoru“ (terajší Dóm netopierov), ktoré on alebo spolupracovníci odobrali počas štyroch návštev jaskyne v r. 1959 a 1960 a jaskyňu nazýva lokalitou „Plavecké podhradie“ (Nosek 1962). V neskoršej práci Nosek (1963) dopĺňa približné údaje o počte získaných jedincov v jednotlivých vzorkách, v prípade *H. carpatica* to bolo viac ako 10 jedincov, *M. ojcoviensis* a *S. japygiformis* boli ešte početnejšie. V tejto práci Nosek pracoval aj s pôdnymi vzorkami z povrchových biotopov na území Malých Karpát a so vzorkou z Roštúnskej priepasti (tiež v Plaveckom krase). Tieto údaje nám umožňujú hodnotiť väzbu zistených druhov na jaskynné prostredie. Druhy *H. carpatica* a *M. ojcoviensis* našiel Nosek len v jaskynnom prostredí, zatiaľ čo *S. japygiformis* a *Pseudosinella ksenemani* Gisin, 1944 aj v povrchových biotopoch (*P. ksenemani* len vzácné). Druh *Onychiurus ambulans* (Nicolet, 1847) už Nosek (1963) opakovane nenašiel. Paclt (1972) opakuje časť údajov od Noseka (1962, 1963) a prináša aj niekoľko nepublikovaných údajov z Plaveckej jaskyne (=Höhle von Plavecké Podhradie in den Kleinkarpaten) získaných v rokoch 1957 a 1963. Zistené druhy a nálezové miesta Paclt, žiaľ, bližšie necharakterizuje.

Existujú ešte individuálne nálezy iných bezstavovcov v Plaveckej jaskyni. Viacero z nich sa týka dvojkrídlovcov (Diptera). Hůrka (1980) tu našiel dva druhy ektoparazitov netopierov, *Nycteribia schmidlii* Schiner, 1853 a *Penicillidia conspicua* Speiser, 1901. Martinek (1980, 1982, 1984) uviedol druhy *Heteromyza atricornis* Meigen, 1830, *Heleomyza captiosa* (Gorodkov, 1962), *H. modesta* (Meigen, 1838), *Scoliocentra villosa* (Meigen, 1830) *S. brachypterna* (Loew, 1873) a *S. ventricosa* (Becker, 1907). Růžička a Vávra (1993) tu zaznamenali výskyt chladnomilného troglofilného chrobáka *Choleva glauca*. Ševčík a kol. (2010) uvádzajú nález kliešťa *Ixodes vespertilionis* Koch, 1844 z netopiera veľkého. Lehotská a Lehotský (2000) okrem mapovania netopierov získali zo vzorky guána približne 200 jedincov chvostoskokov (3 – 4 druhy z čeľadi Isotomidae a Neanuridae) a 30 jedincov roztočov (rad Trombidiformes, čeľaď Trombididae a rad Sarcoptiformes) (det. I. Országh). Zo stavovcov uvádzajú výskyt 13 druhov netopierov, pozorovaných prevažne v zimnom období, kedy tu dominuje podkovár malý (*Rhinolophus hipposideros* Bechstein, 1800). V lete to bol netopier veľký (*Myotis myotis* (Borkhausen, 1797) v spoločnej kolónii s netopierom ostrouchým (*Myotis blythii* Tomes, 1857) a lietavcom sťahovavým (*Miniopterus schreibersii* (Kuhl, 1817)). Táto letná kolónia sa už v jaskyni v ostatných rokoch neobjavuje. Zo stavovcov uvádzajú tri druhy obojživelníkov (*Salamandra salamandra* Linnaeus, 1758, *Bufo bufo* (Linnaeus, 1758) a *Rana temporaria* Linnaeus, 1758), z cicavcov plcha veľkého (*Glis glis* (Linnaeus, 1766; Lehotská a Lehotský, 2000).

Plaveckú jaskyňu a po objavení aj Plaveckú priepasť opakovane navštívil V. Košel. Poznatky z týchto návštev využil v syntetických prácach o podzemnej faune Západných Karpát (Košel, 2005, 2009, 2012), avšak tie len ojedinele obsahujú aj konkrétne nálezy. Sústredil sa prevažne na parietálnu faunu (imága hmyzu sediace na stenách jaskyne, najmä dvojkrídlavce), pričom opakovane konštatuje, že napriek vhodným podmienkam, je spoločenstvo bezstavovcov týchto jaskýň prekvapivo chudobné. Príčinu tohto fenoménu hľadal v geologickom vývoji tohto územia a pomerne izolovanej polohe voči dôležitým historickým refúgiám (Košel 2009, 2012). Z príspevku o hľadaní najteplejšej jaskyne na Slovensku (Košel, 2005) vyplýva, že autor navštívil v rokoch 2002 – 2004 Plaveckú priepasť päťkrát (v rôznych ročných obdobiach), pričom prvá návšteva bola krátko po objavení hlavných (priepastných) častí jaskyne v júli 2002. Autor tu nameral maximálnu teplotu vzduchu 12,8 °C a teplotu vody vo veľkom podzemnom jazere až 13,1 °C, čo v tom čase ohodnotil ako najteplejšiu jaskyňu na Slovensku. V tejto správe autor konštatuje aj výskyt starého guána netopierov, ktoré spôsobuje tmavý vzhľad niektorých častí dna jaskyne a dna jazera. Zamýšľala sa nad možným prístupom netopierov do jaskyne v minulosti, keďže jaskyňa bola objavená pod odkopaním zasuteného komína a iný vstup do jaskyne známy nebol. Po opakovanom odbere vzoriek vody v podzemnom jazere Košel (2005) konštatuje, že „v jazere nič živé neobjavil“ a to ani po mikroskopickej analýze sedimentu a odchyte planktónnou sieťkou, nakoniec ale potvrdil výskyt slepého kôrovca-kriváka z komplexu *Niphargus tatrensis* Wrześniowski, 1888.

V roku 2005 bol časťou autorského tímu realizovaný komplexný výskum bezstavovcov v Plaveckej jaskyni. Čiastkové poznatky z tohto prieskumu boli využité v rámci nadregiónálne koncipovaných štúdií a slúžili aj pri charakteristike odlišnosti podzemnej fauny jednotlivých krasových území Slovenska (Košel, 2009, 2012; Kováč a kol. 2014). Z tejto jaskyne je známy zatiaľ jediný nález vzácneho pavúka *Pseudomaro aenigmaticus* Denis, 1966 z územia Slovenska (Šestáková a kol., 2018). Ďalšie publikované druhy pavúkov z Plaveckej jaskyne sú *Centromerus cavernarum* (L. Koch, 1872) a *Meta menardi* (Latreille, 1804; Mammola a kol., 2019). Ďalej sa tu našli štyri druhy suchozemských rovnakonôžok, ktoré však predstavujú len dočasnú kolonizáciu podzemia povrchovými formami. Druh *Orthometopon planum* (Budde-Lund, 1885) vyhľadáva vo vstupných častiach jaskyne úkryt a druhy *Hyloniscus riparius* (Koch, 1838), *Haplophthalmus mengii* (Koch, 1838), *Cylisticus convexus* (De Geer, 1778) využívajú dočasné potravné zdroje v eutrofizovaných častiach jaskyne – guáno, drevo (Rudy a kol., 2021). Z dvojkrídlavcov z čeľade Phoridae sa v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu vyskytovali štyri druhy reprezentujúce 3 rody *Borophaga*, *Megaselia* a *Triphleba* (Grundmann a spol., 2023). Všetky boli prítomné v jaskyni Pec, zatiaľ čo v Plaveckej jaskyni a Plaveckej priepasti boli zaznamenané po dva druhy. Ide o drobných dočasných obyvateľov jaskýň, no niektoré druhy sa v jaskyniach aj rozmnožujú a ich larvy sa významne podieľajú na dekompozícii organického substrátu, napr. *Triphleba antricola* (Schmitz, 1918). Aduity aj larvy predstavujú dôležitú zložku potravnjej siete v jaskyniach a sú tiež vektorom mikroorganizmov a foretických živočíchov. Najnovší príspevok k poznaniu fauny Plaveckej priepasti sa týka opisu nového druhu jaskynného panciernika, *Pantelozetes kunsti* Starý et al., 2026, ktorý bol zaznamenaný vo vstupnej časti tejto jaskyne v roku 2021 (Starý a kol., 2026).

Za zmienku stojí aj výskum recentnej vertebratofauny jaskýň Plaveckého hradného vrchu, predovšetkým chiropterofauny. Tej sa venujú najmä manželia Lehotskí (Lehotská, 2002, Lehotská a Lehotský, 2000, 2010, 2016), ktorí nadviazali na staršie chiropterologické štúdie Vacholda, Matouška, Gaislera a spol., Hanáka a spol., Horáčka a spol., Mutkoviča a ďalších, ktoré vznikali od 50. rokov 20. storočia (pozri Lehotská a Lehotský, 2010, 2016). Najviac poznatkov máme z Plaveckej jaskyne, významnej druhovo pestrým spoločenstvom

zimujúcich netopierov a letnou reprodukčnou kolóniou pôvodne troch, od prelome 20./21. storočia už len jedného druhu, netopiera veľkého (*Myotis myotis*), ktorého početnosť v druhej dekáde súvislého monitorovania (od roku 2006) vykazovala trend klesajúceho počtu samíc, a v roku 2015 tu už v letnom období nebol pozorovaný žiadny jedinec. Dlhodobé využívanie priestorov jaskyne netopiermi v zimnom a letnom období významným spôsobom prispieva k prísunu organickej hmoty do jaskyne zvonku a jej ukladaniu v podobe zvyškov potravy a trusu (guána) či uhynutých jedincov, ako aj k transportu foretickej fauny (napr. ektoparazitov netopierov, komenzálnych roztočov a pod.), čo následne jaskyňu eutrofizuje a spúšťa kaskádu zmien v spoločenstvách bezstavovcov, napríklad imigráciu, resp. pribúdanie koprofágnej (guánofilnej), nekrofágnej fauny a pod. Za obdobie rokov 1994 – 2010 bolo v Plaveckej jaskyni zaznamenaných 13 druhov netopierov (Lehotská a Lehotský, 2010) a celkovo je tu známych 16 druhov. V jaskyni Pec bolo zistených 7 druhov a v Plaveckej priepasti 10 druhov netopierov (Lehotská, 2002; Lehotská a Lehotský, 2002). Tieto záznamy sa týkajú zimujúcich netopierov a jesenného odchytu netopierov prelietajúcich cez vchody jaskýň. Údaje pochádzajú z rokov 1997 – 2000, teda ešte pred objavom významného pokračovania oboch jaskýň (jaskyňa Pec mala vtedy známych len 11 m, Plavecká priepasť 38 m a hĺbku 21 m). Analýza jaskynnej tanatocenózy netopierov (osteologického materiálu) v Plaveckej jaskyni potvrdila výskyt piatich druhov s výraznou prevahou netopiera veľkého a lietavca sťahovavého (Noga, 2007). Zaujímavú štúdiu publikovali Mihál a Lehotská (2014), ktorá je čiastkovým výstupom z riešenia dizertačnej práce prvého autora. Práca vyhodnocuje vplyv klimatických premenných v Plaveckej jaskyni a na povrchu pred jaskyňou na časovú a priestorovú aktivitu podkovára malého v hibernačnom a prechodnom období. Autori identifikovali niekoľko dôležitých premenných (napr. teplotné zmeny v jaskyni aj na povrchu, zmeny koncentrácie kyslíka a oxidu uhličitého v jaskyni), ktoré ovplyvňujú správanie netopierov.

Výrazné novodobé zmeny v dlhodobom ustálenom stave netopierov, ktoré sú predbežne interpretované ako reakcia na zmeny mikroklimy v Plaveckej jaskyni v dôsledku rozšírenia vstupných častí jaskyne a prepojenia predtým známych a novoobjavených častí jaskyne, prípadne na časté návštevy a intenzívnu speleologickú aktivitu, majú vplyv nielen na faunu netopierov, ale aj na miestne spoločenstvo bezstavovcov. Rovnako ako proces vytvárania pomerne mohutných depozitov guána v Plaveckej jaskyni v minulosti (silne eutrofizované časti jaskyne) a následné odťaženie guána obyvateľmi z okolia a „upratovanie“ jaskyne speleológmi sú faktory, ktoré ovplyvňujú aj ostatné organizmy. Guáno netopierov je bohatý zdroj potravy, ktorý je v jaskyniach postupne neutralizovaný (spočiatku má veľmi nízke pH) a postupne kolonizovaný mikroorganizmami, hubami, a najmä larvami troglofilného hmyzu a chvostoskokmi. V nezaplavovaných jaskyniach môže byť kľúčovým organickým substrátom (Ferreira, 2019).

V roku 2021 sme komplexne skúmali vodné a suchozemské bezstavovce v Plaveckej jaskyni, Plaveckej priepasti a jaskyni Pec, čo sú tunajšie najrozsiahlejšie jaskynné systémy. Charakterom podzemných priestorov reprezentujú tri odlišné typy jaskynných ekosystémov: prevažne horizontálna Plavecká jaskyňa zasahuje pomerne hlboko do masívu, Plavecká priepasť ma prevažnú časť priestorov vertikálnu, a jaskyňa Pec je z väčšej časti vytvorená v tesnom kontakte s povrchovým prostredím. V prípade Plaveckej jaskyne sme nadviazali na náš predchádzajúci výskum z roku 2005, ktorý dosiaľ nebol v plnom rozsahu publikovaný (Kováč et al., 2005). V súvislosti s faunou bezstavovcov týchto jaskýň sme mali značné očakávania. Pomerne rozsiahle podzemné priestory, navyše hydrotermálneho pôvodu, a relatívne vysoká teplota vzduchu v miestnych jaskyniach sú výnimočné nielen v malokarpatskom priestore a vytvárajú potenciálne vhodné podmienky pre rozvoj subteránnych ekosystémov.

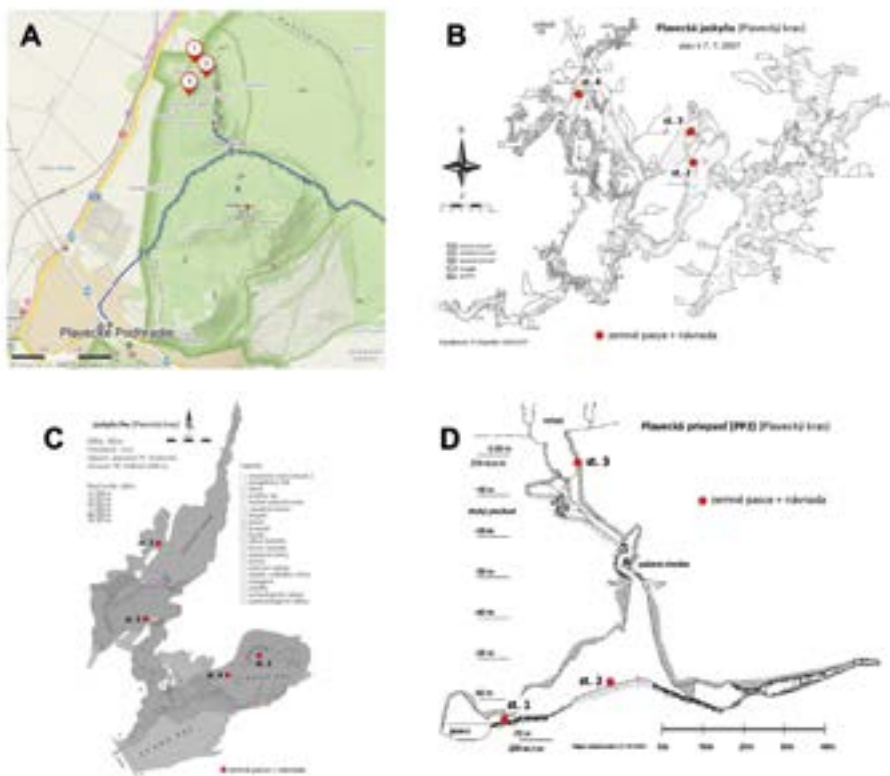
Cieľom výskumu bolo čo najkompletnejšie zmapovať štruktúru spoločenstiev voľne žijúcich suchozemských a vodných bezstavovcov, zistiť ich priestorovú distribúciu a špecifickú väzbu na potravné zdroje, získať faunistický materiál na taxonomickú a populačno-genetickú analýzu a fylogenetické štúdium subteránnej fauny Západných Karpát. Vďaka opakovanému mapovaniu biodiverzity v Plaveckej jaskyni (s odstupom 16 rokov) tu vieme zhodnotiť časovo-priestorové zmeny v miestnom spoločenstve a populačné trendy najvýznamnejších zložiek fauny. Nadobudnuté poznatky predstavujú podklad k účinnejšej ochrane predmetných jaskynných lokalít pred nevhodnými zásahmi človeka v nich a ich kontaktnom území.

OPIS LOKALÍT

Plavecký hradný vrch je súčasťou Plaveckého krasu, ktorý patrí do útvaru Plavecké predhorie. To tvorí okrajovú časť Plaveckého krasu a je situované na najzápadnejšom výbežku hrastového pohoria Malé Karpaty blízko zlomovej línie medzi Karpatmi a Viedenskou panvou. Genéza tohto geomorfologického útvaru a jaskýň, ktoré sa v ňom nachádzajú, je veľmi osobitá v kontexte Malých Karpát. V masíve triasových, tzv. veternických vápencov chočského príkrovu, situovanom v blízkosti výraznej tektonickej poruchy na rozhraní spomenutého pohoria a Záhorskej nížiny (Viedenskej panvy) v západnom úbočí, vzniklo niekoľko jaskýň hypogénneho (hydrotermálneho) pôvodu, ktoré modelovali korózne stúpajúce podzemné mierne teplé vody (Bella, 2010). Tento fakt recentne prezrádzajú povrchové a podzemné vody a vzduch v jaskyniach, ktoré majú vyššiu teplotu ako je priemerná ročná teplota zemského povrchu v tejto oblasti. Genézu jaskýň, pôvodne považovaných za korózne prípadne fluviokrasovo-korózne, vytvorené pôsobením atmosférických vôd v tektonicky narušenom podloží, reintrepretuje Bella a kol. (2019a, b) ako freatickú hypogénnu resp. hydrotermálnu.

Biospeleologický výskum sme sústredili do 3 najrozsiahlejších jaskýň na tomto území. Všetky majú vchody situované v západnom svahu Plaveckého hradného vrchu, severne od obce Plavecké Podhradie, v katastrálnom území ktorej sa nachádzajú (obr. 1). Jaskyne ležia na území Chránenej krajiny oblasti Malé Karpaty a sú súčasťou Národnej prírodnej rezervácie Pohanská, ktorá bola zriadená v roku 1980 na ochranu zachovalých teplomilných spoločenstiev rastlín a živočíchov na vápencovom podklade, krasových fenoménov a významných archeologických pamiatok (<https://data.sopsr.sk/chranene-objekty/chranene-uzemia/detail/136>). Aktuálne ide o lokality verejnosti neprístupné (so zamknutými vchodmi), ale Plavecká jaskyňa bola v minulosti sprístupnená verejnosti (vstupné časti), a to už v 19. storočí a ťažilo sa tu netopierie guáno ako prírodné hnojivo (dnes tu už väčšie depozity guána nie sú). Sprístupnenie jaskyne sprevádzali úpravy vchodu (rozšírenie štrbinovej chodby, výstavba murovanej brány), kultivácia okolia, úprava podlahy hlavných chodieb, prítomnosť dočasných drevených prvkov, umiestnenie svietnikov na sviečky a poškodenie kvapľovej výzdoby. Jaskyňa sa pomerne často spomína v literatúre pod rôznymi menami, ktoré zväčša odrážajú historické nemecké a maďarské pomenovanie obce Plavecké Podhradie a Plaveckého hradu (Lalkovič, 2010). Táto lokalita sa opätovne pripravuje na sprístupnenie. Jaskyňa Pec bola v minulosti známa a osídlená už od Paleolitu (Bárta, 1982).

Pec (N 48°29'47,50" E 17°16'4,27") má vchod situovaný v nadmorskej výške 296 m. Prevažne horizontálne priestory hypogénneho pôvodu majú dĺžku 208 m a prevýšenie 15 m (Veľšmid, 2013; Bella a kol., 2019a). Jaskyňa je vytvorená prevažne v povrchových vrstvách masívu, preniká sem pôda a korene stromov, a sediment je bohatý na organickú časť. Vytvorili sa tu aj tzv. koreňové stalagmity. Jaskyňu sme navštívili 2. 6. 2021 a 27. 10. 2021. Zber fauny sme



Obr. 1. Poloha a mapky vybraných jaskýň Plaveckého hradného vrchu so zberovými miestami (podľa Butaša, 2003, Hubeka a Magdolena, 2008, Velšmida, 2013).

Figure 1. Location and maps of three investigated caves situated in Plavecký hradný vrch Hill, with marked sampling places.

sústredili na 4 stanovištia s pascami a návnadou, individuálne sme ale preskúmali faunu celej jaskyne a na viacerých miestach sme odobrali aj organický substrát. Jaskyňu sme navštívili aj 10. 4. 2024 a 25. 7. 2025 za účelom dodatočného zberu fauny roztočov (Prostigmata).

Plavecká jaskyňa (N 48°29'47,77" E 17°15'58,83") má vchod na úpätí svahu hradného vrchu. Ide o umelo rozšírený otvor fosílnkej vyvieračky situovaný v nadmorskej výške 222 m, ktorý je známy už od 18. storočia. Priestory v jaskyni sú zväčša horizontálne (chodby i väčšie siene) v mieste niekdajšej dlhodobej stagnácie podzemnej vody, okrem toho sa tu nachádzajú šikmé, nižšie priestory kopírujúce uloženie vrstiev vápenca (ide sa o medzi-vrstvové priestory) a zvislé komíny modelované výstupnou vodou prúdiacou pozdĺž tektonických puklín. Jaskyňa má aktuálnu dĺžku 1253 m a hĺbku 37 m (Hubek a Magdolen, 2008; Bella, 2010; Tencer 2021). Jaskyňu sme od roku 2005 navštívili opakovane viackrát. Intenzívne sme spoločenstvá bezstavovcov študovali v r. 2005 (30. 4. a 14. 9.) a opakovane v roku 2021 (2. 6. a 3. 6. a 28. 10.). Zber fauny kombinovanými metódami bol realizovaný hlavne na štyroch stanovištiach, pričom dve z nich (Dóm netopierov a spodné poschodie jaskyne neďaleko vchodu) boli rovnaké v oboch rokoch štúdia (tabuľka 1) so zemnými pascami a exponovanou návnadou a individuálny zber tiež v celej dostupnej dĺžke jaskyne.

Plavecká priepasť (N 48°29'43,30" E 17°15'58,50") sa nachádza v rovnakom svahu s vchodom v nadmorskej výške 270 m. Priestory majú prevažne vertikálny charakter s dominantnými dvoma priepasťovitými dómami, v strope jedného z nich je aj objavný vstup do jaskyne. Celková hĺbka jaskyne je 70 m, horizontálny rozmer je 335 m (Butaš, 2003; Bella a spol., 2018). Košel (2005) tu meral teplotu vzduchu a vody, ktorá sa pohybuje v rozpätí 11,9 – 13 °C a opakované merania na tých istých miestach ukázali veľmi statické podmienky (rozdiel medzi meraniami bol len 0,1 °C). Jaskyňu sme navštívili 2. 6. 2021 a 27. 10. 2021 a zber fauny sme sústredili na 3 stanovištia (dve na dne jaskyne a jedno vo vstupnej časti), kde sme exponovali zemné pasce a návnadu. Z dna jaskyne sme odobrali aj vzorky staršieho sedimentu bohatého na guáno netopierov a vykonali individuálny zber v celej dostupnej časti jaskyne.

METÓDY ZBERU A SPRACOVANIA ÚDAJOV

A/ Suchozemská fauna

Na každom monitorovacom stanovišti bolo inštalovaných päť zemných pascí. Dve zemné pasce s 96 % benzínalkoholom (100 ml PET nádoba s lievikom, ø 9 cm), dve pasce s 4 % roztokom formaldehydu (250 ml plastový kelímok, ø 7 cm) a jedna pasca s vodným roztokom propylénglykolu (1 : 1) (100 ml PET nádoba s lievikom, ø 9 cm) (obr. 1E). Pasce boli exponované medzi jarnou a jesennou návštevou jaskýň.

V blízkosti pascí bola inštalovaná návnada pozostávajúca z vymrzenej zmesi drevených hoblín, mulčovacej kôry, ovsených vločiek a granúl pre mačky. Odobratá bola po expozícii od mája do októbra 2021. Na vhodných miestach v niektorých jaskyniach boli odobrané aj vzorky pôvodného organického materiálu (sediment, guáno, pôda, listie); veľkosť vzoriek bola približne 1 dm³. Organický materiál bol transportovaný do laboratória a následne boli živočíchy extrahované vo vysoko gradientnom extraktore (Berleseho-Tullgrenov aparát) do 75 % alkoholu.

Na štúdium distribúcie fauny boli na rôznych miestach pozdĺž jaskyne robené individuálne zbery bezstavovcov. Takto získaný materiál bol fixovaný čistým etanolom, aby mohol byť použitý aj na izoláciu DNA a štúdium vnútrodrohovej genetickej variability, kryptickej špeciácie a fylogenetických vzťahov.

B/ Vodná fauna

Na zachytenie živočíchov z priesakovej (epikrasovej) vody boli inštalované zberné zariadenia podľa Pipan (2005), pozostávajúce z plastového lievika usmerňujúceho priesakovú vodu do plastovej zbernej nádoby (hranatého tvaru) so sieťkou s veľkosťou oka 60 μm upevnenou na dvoch susediacich stenách. Po expozícii od mája do októbra 2021 bol obsah zbernej nádoby preliaty cez sito s veľkosťou oka 60 μm a zachytený materiál sa zlieval do transportnej nádoby. Vodná fauna z jazierok alebo prúdiacej vody bola odchyťovaná pomocou sieťky na zber planktónu. Všetky získané vzorky boli konzervované v 96 % etanole priamo v jaskyni a prenesené do laboratória na detailnú determináciu.

Triedenie získaných bezstavovcov do systematických skupín a ďalej na druhovú úroveň prebiehalo pomocou stereoskopických mikroskopov Leica EZ4 a Leica S6E a pomocou svetelných mikroskopov Leica DM1000 a Zeiss Axiolab 5 na pracovisku riešiteľov, poprípade spolupracujúcich externých špecialistov. Pozorované diagnostické znaky boli porovnávané s kľúčmi na určovanie európskej fauny.

Klimatické údaje a chemizmus vody.

Teplota vzduchu bola meraná meračom COMET D3631 (presnosť merania $\pm 0,4$ °C) a teplota priesakovej vody z epikrasu kombinovaným meračom Hanna HI98129 (presnosť merania $\pm 0,5$ °C). Parametre prostredia boli zaznamenané počas jarnej a jesennej návštevy jaskýň v rokoch 2005 a 2021 a sú zhrnuté v tabuľke (tabuľka 1).

VÝSLEDKY

Namerané parametre prostredia potvrdzujú špecifický režim skúmaných lokalít (tabuľka 1). Všetky tri skúmané jaskyne majú pomerne vysokú teplotu (maximum 12,8 °C v najhlbšie časti Plaveckej priepasti), ktorú spôsobujú dozvuky hydrotermálnej činnosti. Z hľadiska stability prostredia vykazujú Plavecká jaskyňa a Plavecká priepasť znaky klimaticky statických jaskýň s minimálnymi ročnými výkyvmi teplôt. Jaskyňa Pec má dynamickejšiu klímu, výrazne ovplyvnenú vonkajšími teplotami vzhľadom na jej prepojenie s povrchom. Všetky jaskyne sú pomerne suché. Stabilný vodný biotop je len v Plaveckej priepasti (jazierko v Bratislavskej sieni), podzemný tok chýba. Ojedinelý priesak vody zo stropov vykazuje výraznejšiu teplotnú dynamiku v priebehu roka ako teplota vzduchu (tabuľka 1).

Všetky tri skúmané jaskyne sú obývané druhovo pestrými spoločenstvami bezstavovcov (tabuľka 2, 3, 4). Z početného materiálu sa predbežne podarilo determinovať 146 druhov, pričom reálny počet druhov bude ešte výrazne vyšší. Výraznú prevahu majú suchozemské článkonožce. Počtom druhov dominovali chrobáky, ďalšími druhovo pestrými skupinami sú roztoče, chvostokoky a dvojkrídlovce. Jednotlivé jaskyne sa líšia v počte zistených druhov a zaujímavá je pomerne malá miera spoločných druhov. Približne dve tretiny všetkých druhov boli zistené len v jednej zo skúmaných jaskýň. Jaskyňa Pec má druhovo najpestrejšie spoločenstvá, hoci je najkratšia a najmenej vertikálne členitá. Identifikovali sme tu spolu 120 taxónov bezstavovcov, teda dvakrát viac ako v Plaveckej jaskyni a v Plaveckej priepasti (tu v oboch prípadoch predbežne po 56 druhov). Rozdiely v biodiverzite tejto trojice jaskýň sa dajú pekne ilustrovať chrobákmi. V skúmaných jaskyniach sme zaznamenali spolu predbežne 43 druhov (a ďalších 6 iných taxónov, ktoré nebolo možné bližšie determinovať). V jaskyni Pec sme zaznamenali 33 druhov chrobákov, v Plaveckej jaskyni 15 druhov a v Plaveckej priepasti len 8 druhov; napr. troglofilné chrobáky rodu *Quedius* boli v jaskyni Pec zastúpené 3 druhmi, v Plaveckej jaskyni 1 druhom a v Plaveckej priepasti zistené neboli. Pec a Plavecká jaskyňa mala 5 spoločných druhov, Pec a Plavecká priepasť len 2 druhy a Plavecká jaskyňa a Plavecká priepasť dokonca žiadny spoločný druh (tabuľky 2, 3, 4, 5).

Tabuľka 1. Teplota vzduchu (na povrchu sedimentu) a vody kvapkajúcej zo stropu v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu v čase biospeleologického vzorkovania (2021).

Table 1. Air temperature measured on the surface of the sediment and water dripping from the ceiling in the caves of Plavecký hradný vrch Hill at the time of biospeleological sampling (2021).

Jaskyňa / študijné miesto	Teplota (°C) VI/X 2021	
	vzduch	voda
Pec		
st. 1 Druhý dóm	8,6/10,7	
st. 2 Sieň Jakuzi	9,4/10,2	
st. 3 Prvý dóm	9,6/10,6	
st. 4 starý vchod (Nová Pec)	---/10,5	
Plavecká jaskyňa (IV/IX 2005)	11,0/11,3	
Dóm netopierov	10,8/11,4	
Kvapľová sieň (zadná časť)	10,6/11,3	
Kvapľová sieň (predná časť)	8,9/10,6	
spodné poschodie		
Plavecká jaskyňa (VI/X 2021)		
st. 1 Sieň Pjetka	11,8/11,8	
st. 2 Dóm netopierov	11,0/11,6	8,6/11,7
st. 3 bočná sieň nad Dómom netopierov	11,0/11,5	
st. 4 spodné poschodie pri vchode	9,9/10,7	
Herzov dóm	---/11,7	8,7/12,0
Plavecká priepasť		
st. 1 Bratislavská sieň, pri jazere	12,9/12,8	
st. 2 Bratislavská sieň – horná časť	12,4/12,4	
st. 3 bočná sieň pri priepastnom vstupe	9,6/10,2	
Plavecká sieň, vzadu	---/12,2	8,7/12,7
Plavecká sieň, vpredu	---/12,2	8,6/12,6

Pec

V tejto jaskyni sme zachytili veľmi bohaté spoločenstvo bezstavovcov, v ktorom dominovali roztoče (dravé aj saprofágne), chvostoskoky, chrobáky a dvojkrídlovce (tabuľka 2). Zaznamenaný bol výskyt troglofilných roztočov rodov *Kunstidameus* a *Poecilophysis*, ako aj pavúkov z čeľade Linyphiidae (*Centromerus cavernarum*, *Porrhomma* spp., *Palliduphantes pallidus*). Z chrobákov bol potvrdený druh *Atheta spelaea* a zriedkavá koexistencia troch druhov rodu *Quedius*. Významným nálezom bol jedinec (adultná samička) drobnej, slepej, depigmentovanej mnohonôžky predbežne určenej ako *Macrosterodesmus palicola*. V spoločenstve celkovo prevažovali taxóny viazané prevažne na povrchové biotopy, pôdu, nory a hniezda iných živočíchov, prípadne sezónne využívajúce jaskyne.

Plavecká jaskyňa

V jaskyni sme zistili druhovo pomerne pestré spoločenstvo článkonožcov. V r. 2005 predbežne dominovali chvostoskoky (15 druhov), avšak časť materiálu, najmä hmyzu, tu ale nebola určená do druhu (tabuľka 3). V r. 2021 druhovou pestrosťou dominovali chrobáky (15 druhov), dvojkrídlovce (11 druhov) a chvostoskoky (8 druhov) (tabuľka 4). Tieto počty ešte nie sú definitívne, keďže časť materiálu ešte čaká na spracovanie, najmä chvostoskokov. Chvostoskoky a dvojkrídlovce (adultné jedince a larvy) boli najpočetnejšími bezstavovcami. Bohato zastúpené sú aj roztoče, dosiaľ tiež len čiastočne determinované. V spomenutých skupinách bezstavovcov, ale aj medzi ostatnými zistenými taxónmi prevažujú druhy, ktoré jaskyňu kolonizujú skôr krátkodobo a nateraz chýba nález troglobiontnej fauny. Najbohatšie

Tabuľka 2. Prehľad a priestorová distribúcia bezstavovcov získaných kombináciou zberových metód v jaskyni Pec v roku 2021. Legenda: 1 – 4 – stanovištia s biospeleologickými stacionármi (viď text), VS – cca 15 m od vstupu, DD – Druhý dóm, HP – horné poschodie, PD – Prvý dóm, NV – sieň pod novým vchodom, VD – vstupný dóm, VC – vchod.

Table 2. List and spatial distribution of invertebrates sampled by a combination of collection methods in the Pec Cave in 2021. Legend: 1 – 4 – sites with biospeleological stations (see text), VS – approx. 15 m from the entrance, DD – Second Dome, HP – upper floor, PD – First Dome, NV – hall under the new entrance, VD – entrance dome, VC – entrance.

Vyššie taxóny	Druhy	Stanovištia				
		1	2	3	4	Ostatné
Platyhelminthes	<i>Microturbellaria</i> non det.					PD+
Mollusca						
Gastropoda	<i>Limax cinereoniger</i> Wolf, 1803					PD+
	<i>Oxychilus</i> sp.	++		++	++	
Oligochaeta						
Clitellata	non det.		+		+	
Arachnida						
Acari	<i>Amerobelba decedens</i> Berlese, 1906					NV+
	Astigmata non det.	++		+		NV+++
	<i>Ceratozetes mediocris</i> Berlese, 1908					NV++
	<i>Ceratozetes peritus</i> Grandjean, 1951					NV++
	<i>Coccorhagidia clavifrons</i> (G. Canestrini, 1886)			++		
	Damaeidae non det.					Jakuza++
	<i>Dorycranosus acutus</i> (Pschorn-Walcher, 1951)					NV+, Jakuza+
	<i>Foveacheles</i> sp.	++		+	+	
	<i>Heminothrus targionii</i> (Berlese, 1885)					NV+
	<i>Chamobates spinosus</i> Sellnick, 1928					Jakuza+
	<i>Ixodes vespertilionis</i> C. L. Koch, 1844	+++		+		
	<i>Kunstidamaeus lengersdorfi</i> (Willmann, 1932)	+		+		Jakuza+++
	<i>Kunstidamaeus tecticola</i> (Michael, 1888)	+		++		
	Mesostigmata non det.		+++	+++	+++	NV+++ Jakuza+
	<i>Multiopppia glabra</i> (Mihelcic, 1955)	+++		+		NV+++
	<i>Neotrichoppia hauseri</i> Mahunka & Mahunka-Papp, 2000	++		++		
	<i>Oppia nitens</i> C. L. Koch, 1835	++		++	++	
	Oribatida non det.	+		++	+	NV++
	<i>Parasitus loricatus</i> (Wankel, 1861)	+++		+++	+++	
	<i>Poecilophysys pratensis</i> (Koch, 1835)			+		
	<i>Poecilophysys wankeli</i> (Zacharda, 1978)	++		++		
	<i>Poecilophysys weyerensis</i> (Packard, 1888)			+		

	Prostigmata non det.					NV++
	<i>Punctoribates punctum</i> (C.L.Koch, 1839)					Jakuza+
	<i>Quadroppia pseudocircumita</i> Minguez et al., 1985				+	
	Rhagidiidae non det.			+		
	<i>Shibaia longisensilla</i> Shiba, 1969			++		
	<i>Scheloribates laevigatus</i> (C. L. Koch, 1835)	+		+		
	<i>Zygoribatula cf. exilis</i> (Nicolet, 1855)	+				
Araneae	<i>Centromerus cavernarum</i> (L. Koch, 1872)	+			+	
	<i>Meta menardi</i> (Latreille, 1804)					PD++
	<i>Metellina merianae</i> (Scopoli, 1763)			+		
	<i>Nesticus cellulans</i> (Clerck, 1757)			++	++	
	<i>Palliduphantes pallidus</i> O.Pickard-Cambridge, 1871			+		
	<i>Porrhomma pallidum</i> Jackson, 1913			+		
	<i>Porrhomma</i> sp.	+				
Opiliones	<i>Mitostoma chrysomelas</i> (Hermann, 1804)			+	++	
Pseudoscorpiones	non det.			+		
Crustacea						
Isopoda	<i>Cylisticus convexus</i> (De Geer, 1778)			+		
	<i>Hyloniscus riparius</i> (C. Koch, 1838)			++	++	DV+
	<i>Orthometopon planum</i> (Budde-Lund, 1885)	+				
	<i>Porcellium collicola</i> (Verhoeff, 1907)					VC++
Myriapoda						
Diplopoda	<i>Blaniulus guttulatus</i> (Fabricius, 1798)	+++				
	<i>Brachydesmus superus</i> Latzel, 1884	++		++	+++	NV++
	<i>Cylindroiulus boleti</i> (C.L.Koch, 1847)		–			VC+
	<i>Enantiulus nanus</i> (Latzel, 1884)			+		NV++, VC+++
	<i>Glomeris hexasticha</i> Brandt, 1833			+		NV++, VC+++
	<i>Glomeris pustulata</i> (Fabricius, 1781)					PD+
	<i>Leptoiulus</i> sp.					VC+
	<i>Macrosternodesmus palicola</i> Brölemann, 1908					Jakuza+
	<i>Megaphyllum projectum</i> (Verhoeff, 1894)					VC++
	<i>Polydesmus complanatus</i> (Linnaeus, 1761)		+			
Chilopoda	<i>Lithobius</i> sp. juv.	+				
	<i>Strigamia</i> sp.					Jakuza+
Paupoda	non det.			+		NV++
Symphyla	non det.	+		+		
Hexapoda						
Diplura	Campodeina non det.	++		++		

Collembola	non det.	+++	+++	+++	+++	
	<i>Folsomia lawrencei</i> Hopkin, 2007				+	
	<i>Heteromurus nitidus</i> (Templeton, 1835)	+++	++	+++		HP++, VD+
	<i>Hypogastrura purpureescens</i> (Lubbock, 1870)			+++		
	<i>Hypogastrura socialis</i> (Uzel, 1891)	+++	+	+++	+++	
	<i>Kalaphorura paradoxa</i> (Schäffer, 1900)		++	+	+	Jakuza++
	<i>Lepidocyrtus</i> sp.			+		
	<i>Megalothorax</i> cf. <i>incertus</i> Börner, 1903			++		
	<i>Megalothorax minimus</i> Willem, 1900		+		+	Jakuza++
	<i>Mesaphorura jirii</i> Rusek, 1982	+				
	<i>Mesaphorura</i> sp.			+		
	<i>Oncopodura crassicornis</i> Shoebotham, 1911				+	
	<i>Onychiurus ambulans</i> (Linnaeus, 1758)				++	
	<i>Parisotoma notabilis</i> (Schäffer, 1896)			++	+++	
	<i>Pogonognathellus flavescens</i> (Tullberg, 1871)					VD++
	<i>Pygmarrhopalites</i> cf. <i>pygmaeus</i>		+			
	<i>Pygmarrhopalites pygmaeus</i> (Wankel, 1860)		++			Jakuza++
	Tomoceridae sp. juv.				+	
	Aphidinea	+++		+++		
Auchenorrhyncha	non det.	+				
Coleoptera	non det.		++	+++	+++	
	<i>Acales</i> sp.			+		
	<i>Aleochara funebris</i> Wollaston, 1864+	++	+++	++	+++	PD++
	<i>Atheta spelaea</i> (Erichson, 1839)	+++	+++	+++	+++	
	<i>Atomaria</i> sp.	++		+		VC+
	<i>Barypeithes</i> sp.			++		
	<i>Bryaxis carinula</i> (Rey, 1888)			+		VC+
	<i>Calathus fuscipes fuscipes</i> (Goeze, 1777)	+				
	<i>Carabus scabriusculus</i> Olivier, 1795			+		
	<i>Catops fuliginosus fuliginosus</i> Erichson, 1837				++	PD+
	<i>Catops picipes</i> (Fabricius, 1792)					NV+, PD+
	<i>Catops subfuscus subfuscus</i> Kellner, 1846	++	++	+++	+++	
	<i>Colenis immunda</i> Sturm, 1807					VC+
	<i>Cryptophagus schmidti</i> Sturm, 1845			+	+	
	<i>Cryptophagus</i> sp.	++		++	++	
	<i>Gabrius osseticus</i> (Kolenati, 1846)				+	VC++
	<i>Heterothops dissimilis</i> (Gravenhorst, 1802)					VC++
	<i>Heterothops praeivius</i> Erichson, 1839	+		+	+	
	<i>Leptinus testaceus</i> P. W. J. Müller, 1817				+	
	<i>Longitarsus</i> sp.			+		

Diptera	<i>Meligethes</i> sp.					VC++
	<i>Micrurua melanocephala</i> (Marsham, 1802)					VC+++
	<i>Nargus brunneus</i> (Sturm, 1839)					PD+, VC++
	<i>Ocypus brunnipes</i> (Fabricius, 1781)			+		
	<i>Omalius rivulare</i> (Paykull, 1789)			+	+++	
	<i>Quedius fulgidus fulgidus</i> (Fabricius, 1792)		+			
	<i>Quedius invreae</i> Gridelli, 1924	+++	++	++	++	
	<i>Quedius m. mesomelinus</i> (Marsham, 1802)	++	+++	++		
	<i>Rhizophagus perforatus</i> Erichson, 1845		+			
	<i>Sepedophilus immaculatus</i> (Stephens, 1832)	+		+		PD+
	<i>Sepedophilus testaceus</i> (Fabricius, 1792)			+		
	<i>Sericoderus lateralis</i> (Gyllenhal, 1827)					VC+
	<i>Stelidota geminata</i> (Say, 1825)					VC+
	<i>Sunius melanocephalus</i> (Fabricius, 1792)					VC+
	<i>Syntomus obscuroguttatus</i> (Duftschmid, 1812)					VC+
	non det.	+++	+++	+++	+++	
	<i>Heleomyza captiosa</i> (Gorodkov, 1962)	+		+		
	<i>Heteromyza atricornis</i> Meigen, 1830	+		++		
	<i>Limonia nubeculosa</i> Meigen, 1804					VS++
	<i>Megaselia breviterga</i> (Lundbeck, 1920)	+				
	<i>Megaselia pulicaria</i> (Fallén, 1823)	++	+	++		
	<i>Megaselia</i> sp.	++	+	+		
	<i>Rymosia affinis</i> Winnertz, 1863					VS+
	<i>Speolepta leptogaster</i> (Winnertz, 1863)					VS+
	<i>Tarnania fenestralis</i> (Meigen, 1818)					VS+++
	<i>Terrilimosina racovitzai</i> (Bezzi, 1911)	+	++	+++	++	
	<i>Triphleba antricola</i> (Schmitz, 1918)	+++	+++	+++	+++	
	<i>Triphleba transparens</i> (Schmitz, 1922)			+		
Hyme- noptera	non det.			+		
Lepidoptera	<i>Aglaia io</i> (Linnaeus, 1758)					
	<i>Digitivalva pulicariae</i> (Klimesch, 1956)	++		+		PD++
Siphonaptera	non det.			+		
Trichoptera	<i>Stenophylax permistus</i> McLachlan, 1895					VS+
SPOLU	(120)	41	20	65	31	54

kolonizované bolo okolie stanovišťa č. 4 situovaného na spodnom poschodí pomerne blízko vchodu. K ojedinelým nálezom patrí napr. roztoč *Kunstidamaeus lengersdorfi*, pavúky *Centromerus cavernarum* a *Nesticus cellulans*. Pozoruhodný je aj početný výskyt drobného subtrogllofilného motýľa *Digitivalva pulicariae*. Vodná fauna študovaná v malých sintrových jazierkach v Herzovom dome a v zberných zariadeniach filtrujúcich priesakovú (epikrasovú) vodu. Okrem ojedinelej terestrickej fauny (Collembola, Acarina)

Tabuľka 3. Prehľad suchozemských bezstavovcov v Plaveckej jaskyni z prieskumu v roku 2005. Kvantitatívne údaje: + 1 jedinec; ++ 2 až 9 jedincov; +++ 10 až 99 jedincov, ++++ 100 a viac jedincov, n – pozorované, nezberané jedince.

Table 3. Overview of terrestrial invertebrates in the Plavecká Cave from the 2005 survey. Quantitative data: + 1 individual; ++ 2 to 9 individuals; +++ 10 to 99 individuals; ++++ 100 or more individuals; n – observed, not collected individuals.

Vyššie taxóny	Druhy	Početnosť
Oligochaeta	<i>Lumbricidae</i> (non det.)	++
Gastropoda	(non det.)	++
Arthropoda		
Arachnida		
Araneae	<i>Centromerus cavernarum</i> (L. Koch, 1872)	++
	<i>Meta menardi</i> (Latreille, 1804)	++
	<i>Pseudomaro aenigmaticus</i> Denis, 1966	+
Acari	<i>Damaeus</i> sp.	+
	<i>Damaeidae</i> juv. non det.	+
	<i>Gamasida</i> non det.	+++
	<i>Gemmazetes cavaticus</i> (Kunst, 1962)	+++
	<i>Ixodes vespertilionis</i> C. L. Koch, 1844	++
	<i>Lauroppia cf. maritima</i> (Willmann, 1929)	++
Crustacea		
Oniscidea	<i>Cylisticus convexus</i> (De Geer, 1778)	+++
	<i>Haplophthalmus mengii</i> (Zaddach, 1844)	++
	<i>Hyloniscus riparius</i> (Koch, 1838)	++
	<i>Orthometopon planum</i> (Budde-Lund, 1855)	++
Myriapoda		
Diplopoda	<i>Proteroiulus fuscus</i> (Am Stein, 1857)	+++
	<i>Trachysphaera costata</i> (Waga, 1857)	+
	<i>Brachydesmus superus</i> Latzel, 1884	+++
Pauropoda	non det.	++
Hexapoda		
Collembola	<i>Arrhopalites pygmaeus</i> (Wankel, 1860)	++++
	<i>Ceratophysella bengtssoni</i> (Ågren, 1904)	+++
	<i>Desoria tigrina</i> (Nicolet, 1842)	+
	<i>Folsomia candida</i> (Willem, 1902)	++
	<i>Heteromurus nitidus</i> (Templeton, 1835)	+++
	<i>Hypogastrura assimilis</i> (Krausbauer, 1898)	+++
	<i>Hypogastrura purpurescens</i> (Lubbock, 1867)	+
	<i>Mesachorutes quadriocellatus</i> Absolon, 1900	++++
	<i>Mesogastrura ojcoviensis</i> (Stach, 1919)	+++

	<i>Onychiurus</i> sp.	++
	<i>Orchesella bifasciata</i> Nicolet, 1842	+
	<i>Protaphorura armata</i> (Tullberg, 1869)	++
	<i>Protaphorura auranwtiaca</i> (Ridley, 1880)	++
	<i>Pseudosinella ksenemani</i> Gisin, 1944	+
	<i>Willemia scandinavica</i> Stach, 1949	+
Diplura	non det.	+
Coleoptera	non det.	+++
Diptera	non det.	+++
Diptera (larvy)	non det.	+
Lepidoptera	<i>Scoliopteryx libatrix</i> (Linnaeus, 1758)	++
Trichoptera	non det.	++
SPOLU		37

Tabuľka 4. Prehľad a priestorová distribúcia bezstavovcov získaných kombináciou zberových metód v Plaveckej jaskyni v roku 2021. Legenda: 1, 4, stanovištia s biospeleologickými stacionármi (pozri obr. 1), DN – Dóm netopierov, HD – Herzov dóm, NS – sieň nad kovovými schodmi, VN – od vchodu do Dómu netopierov, PJ – Pjetka, SP – spodné poschodie, VC – vstupná chodba, VD – vchod.

Table 4. List and spatial distribution of invertebrates sampled by a combination of collection methods in Plavecká Cave in 2021. Legend: 1, 4, sites with biospeleological stations (see Fig. 1), DN – Bat Dome, HD – Herz's Dome, NS – hall above the metal stairs, VN – from the entrance to the Bat Dome, PJ – Pjetka, SP – lower floor, VC – entrance hall, VD – cave entrance.

Vyššie taxóny	Druhy	Stanovištia				
		1	2	3	4	Ostatné
Mollusca						
Gastropoda	<i>Oxychilus</i> sp.			++		DN+
Clitellata			++			
Arachnida						
Acari	non det.				++	
Ixodida	<i>Ixodes vespertilionis</i> C. L. Koch, 1844				+	DN++, PN+++, SJ+, HD+
	<i>Parasitus loricatus</i> (Wankel, 1861)			++	++	
	Mesostigmata non det.	+++	+++	+++	+++	DN+
	Macrochelidae non det.					NS+++
	Parasitidae non det.					NS++
	Uropodina non det.					NS+++
	Prostigmata non det.	++				DN+
	<i>Kunstidamaeus lengersdorfi</i> (Willmann, 1932)					HD+
Araneae	non det.				+	
	<i>Centromerus cavernarum</i> (L. Koch, 1872)		+			DN+

Crustacea	<i>Nesticus cellulans</i> (Clerck, 1757)		+			
	Copepoda					HD+
	Isopoda					SP+, VD+
	<i>Armadillidium vulgare</i> Latreille, 1804					
	<i>Cylisticus convexus</i> (De Geer, 1778)		+++	+++	++	PJ++, SP+
	<i>Haplophthalmus danicus</i> Budde-Lund, 1880					VD+
	<i>Hyloniscus riparius</i> (C. Koch, 1838)		+	++		
	<i>Orthometopon planum</i> (Budde-Lund, 1885)					VD+
	Myriapoda					
	Diplopoda					
Hexapoda	<i>Brachydesmus superus</i> Latzel, 1884	+	+++	++		DN+, VD+
	<i>Glomeris pustulata</i> (Fabricius, 1781)					VD++
	<i>Trachysphaera costata</i> (Waga, 1857)					VD+
	<i>Trachysphaera gibbula</i> (Latzel, 1884)					VD++
	Chilopoda					
	<i>Schendyla nemorensis</i> (C. L. Koch, 1837)				++	
	Collembola					
	non det.	+++	+++	+++		PJ++, HD++
	<i>Folsomia candida</i> Willem, 1902	+++	+++			PJ+, HD++
	<i>Heteromurus nitidus</i> (Templeton, 1835)		++	+		DN+++ , NS+, PN+, VC++
Coleoptera	<i>Megalothorax cf. incertus</i> Börner, 1903	+++				
	<i>Megalothorax minimus</i> Willem, 1900				++	
	<i>Onychiurus rectospinatus</i> Stach, 1922					DN++
	<i>Parisotoma notabilis</i> (Schäffler, 1896)					HD+
	<i>Protaphorura armata</i> (Tullberg, 1869)	+++		++		DN++, PJ++
	<i>Pygmarhopalites pygmaeus</i> (Wankel, 1860)	+++		+++	++	HD++
	non det.		++	++	++	PJ+, VD+++
	<i>Aleochara funebris</i> Wollaston, 1864				+	
	<i>Atheta hybrida</i> (Sharp, 1869)				++	
	<i>Atheta spelaea</i> (Erichson, 1839)				+	

Diptera	<i>Brassicogethes aeneus</i> (Fabricius, 1775)					VD+
	<i>Cryptophagus pilosus</i> Gyllenhal, 1828				+	
	<i>Cryptophagus setulosus</i> Sturm, 1845				++	
	<i>Cryptophagus schmidtii</i> Sturm, 1845				++	
	<i>Cryptophagus</i> sp. Curculionidae (non. det.)				++	VD+
	<i>Dienerella elongata</i> (Curtis, 1830)					VD++
	<i>Choleva reitteri</i> Petri, 1915				++	
	<i>Palorus depressus</i> (Fabricius, 1790)					VD++
	<i>Phyllotreta</i> sp.					VD+
	<i>Ptomaphagus medius</i> (Rey, 1889)					VD+
	<i>Ptomaphagus sericatus</i> (Chaudoir, 1845)				+	
	<i>Quedius m. mesomelinus</i> (Marsham, 1802)	+	+++	++	+++	PJ+
	<i>Rhizophagus perforatus</i> Erichson, 1845				+	
	Diptera non det.	+++	+++	+++	+++	VN+++ , SP++
	<i>Culex pipiens</i> Linnaeus, 1758					VN+++
	<i>Culex</i> sp.					SP++
	<i>Eccoptomera pallescens</i> (Meigen, 1830)					SP+
	<i>Exechiopsis intersecta</i> (Meigen, 1818)					VN+
	<i>Gigalimosina flavipes</i> (Zetterstedt, 1847)				++	
	<i>Limonia nubeculosa</i> Meigen, 1804					VN+++
	<i>Megaselia pulicaria</i> (Fallén, 1823)				++	
	<i>Megaselia</i> sp.			+	++	
	<i>Scoliocentra brachypterna</i> (Loew, 1873)					VN++
	<i>Scoliocentra villosa</i> (Meigen, 1830)					VN++
	<i>Tarnania fenestralis</i> (Meigen, 1818)					VN+++
	<i>Terrilimosina racovitzai</i> (Bezzi, 1911)			++	+	
	<i>Triphleba antricola</i> (Schmitz, 1918)	+++	+++	+++	+++	

Lepidoptera	<i>Digitivalva pulicariae</i> (Klimesch, 1956)					VN+++ , SP+
	<i>Scoliopteryx libatrix</i> (Linnaeus, 1758)					VN+
Trichoptera	<i>Micropterna nycterobia</i> McLachlan, 1875					VN+
Siphonaptera	non det.			++		
SPOLU	(56)	9	11	13	20	37

sme sporadicky zaznamenali len drobné vodné máloštetinavce (Oligochaeta) a niekoľko drobných drobných kôrovcov – plaziviek (Harpacticoida). V jazierkach boli len plazivky, v skvapovej vode aj máloštetinavce.

Plavecká priepať

Fauna Plaveckej priepasti je o niečo chudobnejšia oproti predošlým dvom jaskyniam, zvlášť keby sme brali do úvahy len zbery z hlbších častí, málo ovplyvnených migráciou živočíchov z povrchu. V súpise druhov (tabuľka 5) vidno dramatický pokles druhovej

Tabuľka 5. Prehľad a priestorová distribúcia bezstavovcov získaných kombináciou zberových metód v Plaveckej priepasti v roku 2021. Legenda: 1 – 3 – stanovištia s biospeleologickými stacionármi (viď text), BS – Bratislavská sieň, DN – dno prístupovej priepasti pri rebríku, PS – Plavecká sieň, NR – pri plošine nad rebríkom, VŠ – vstupná šachta.

Table 5. List and spatial distribution of invertebrates sampled by a combination of collection methods in the Plavecká Shaft in 2021. Legend: 1 – 3 – sites with biospeleological stations (see text), BS – Bratislava Hall, DN – bottom of the access abyss near the ladder, PS – Plavecká Hall, NR – near the platform above the ladder, VŠ – entrance shaft.

Vyššie taxóny	Druhy	Stanovištia			
		1	2	3	Ostatné
Mollusca					
Gastropoda	<i>Limax cinereoniger</i> Wolf, 1803				VŠ++
Arachnida					
Acari	Astigmata non det.			+++	
	<i>Ceratozetes peritus</i> Grandjean, 1951			+	
	<i>Dissorhina ornata</i> (Oudemans, 1900)			++	
	<i>Hemileius initialis</i> (A. Berlese, 1908)				BS+
	<i>Hypochothonius rufulus</i> C. L. Koch, 1835			+	
	<i>Chamobates birulai</i> (Kulczyński, 1902)			+++	
	<i>Ixodes vespertilionis</i> C. L. Koch, 1844			+	
	Mesostigmata non det.		++	+++	
	<i>Multiopbia glabra</i> (Mihelcic, 1955)			++	
	<i>Multiopbia laniseta</i> Moritz, 1966			+	
	<i>Oppia nitens</i> C. L. Koch, 1835			+++	
	<i>Oppiella keilbachi</i> (Moritz, 1969)			+	
	Oribatida non det.			++	
	<i>Pantelozetes cavaticus</i> (Kunst, 1962)			+++	
	<i>Pantelozetes kunsti</i> Starý et al., 2026			+++	
	<i>Parasitus loricatus</i> (Wankel, 1861)	++			

Araneae	<i>Phthiracarus</i> sp.			+	
	<i>Poecilophysis spelaea</i> (Wankel, 1861)		+		
	<i>Punctoribates punctum</i> (C. L. Koch, 1839)			+	
	<i>Shibaia tatrica</i> Zacharda, 1980			+	
	non det.			++	
	<i>Centromerus cavernarum</i> (L. Koch, 1872)			+	
	<i>Porrhomma rosenhaueri</i> (L. Koch, 1872)		++		
Crustacea	<i>Porrhomma</i> sp.			+	
	Cladocera	indet sp. (efipium s vajíčkami)			BS+
	Copepoda	Cyclopoida sp.			BS++
	Ostracoda	Candonidae indet. sp.			BS+
	Isopoda	<i>Porcellium collicola</i> (Verhoeff, 1907)			VŠ+
Myriapoda	Diplopoda	<i>Brachydesmus superus</i> Latzel, 1884	++	++	
		<i>Glomeris pustulata</i> (Fabricius, 1781)	+		VŠ+++
		<i>Enantiulus nanus</i> (Latzel, 1884)			VŠ+
		<i>Polydesmus denticulatus</i> C. L. Koch, 1887			NR+
	Pauropoda	non det.		++	
Hexapoda	Collembola	Collembola non det.	+	+++	BS++
		<i>Folsomia candida</i> Willem, 1902		+++	
		<i>Hypogastrura socialis</i> (Uzel, 1891)		+++	
		<i>Lepidocyrtus</i> sp.		++	
		<i>Mesachorutes quadriocellatus</i> Absolon, 1900		++	
		<i>Pogonognathellus flavescens</i> (Tullberg, 1871)		+++	
		<i>Protaphorura armata</i> (Tullberg, 1869)	+++	+++	BS++
		<i>Pseudosinella thibaudi</i> Stomp, 1977	++		
		<i>Pygmarrhopalites pygmaeus</i> (Wankel, 1860)	+++		BS+, PS++
		<i>Pygmarrhopalites</i> sp.	+		
	Coleoptera	<i>Anommatus pannonicus</i> Kaszab, 1947		+	
		<i>Aphodius sticticus</i> (Panzer, 1798)		+	
		<i>Cryptophagus lysholmi</i> Munster, 1932		++	
		<i>Cryptophagus</i> sp.		++	
		<i>Leptinus testaceus</i> P. W. J. Müller, 1817		+	
		<i>Lesteva l. longoelytrata</i> (Goeze, 1777)		+	
		<i>Phosphaga atrata atrata</i> (Linnaeus, 1758)		+	
		<i>Proteinus brachypterus</i> (Fabricius, 1792)		+	
		<i>Sericoderus lateralis</i> (Gyllenhal, 1827)		+	

Diptera	non det. <i>Heteromyza atricornis</i> Meigen, 1830 <i>Limonia nubeculosa</i> Meigen, 1804 <i>Megaselia</i> sp. <i>Tarnania fenestralis</i> (Meigen, 1818) <i>Terrilimosina racovitzai</i> (Bezzi, 1911) <i>Triphleba antricola</i> (Schmitz, 1918)	+++	+++	++	BS+++ VŠ+ VŠ+++ VŠ+++
Lepidoptera	<i>Triphosa dubitata</i> (Linnaeus, 1758)			++	VŠ++
Trichoptera	<i>Stenophylax permistus</i> McLachlan, 1895	+++	++		VŠ+
SPOLU	(56)	7	9	31	16

pestrosti za vstupnou časťou jaskyne (ešte pred hlavnou šachtou sprístupňujúcou hlavné priestory jaskyne). Zvlášť nápadné je to napr. v prípade roztočov, kde takmer všetky druhy boli detekované vo vstupných častiach jaskyne. Hlbšie časti sú bez intenzívnejšieho transportu potravných zdrojov a sú aj priestorovo izolované. Poznanie fauny tejto jaskyne poskytuje zrejme reprezentatívny pohľad na kolonizáciu hlbšieho podzemia Plaveckého krasu pred výrazným ovplyvnením človekom, resp. bez intenzívnej migrácie povrchovej fauny. V hlavných priestoroch jaskyne, ktorými sú 2 veľké siene na dne, sme zaznamenali prekvapivo chudobné spoločenstvo článkonožcov, zastúpené len početnejšie troma troglofilnými druhmi chvostoskokov (za zmienku stojí vzácnejšia *Pseudosinella thibaudi*) a jednotlivito prítomnými taxónmi roztočov, dvojkrídlorcov s ojedinelými výskytmi jedincov z iných taxónov. Zaujímavý je tiež spoločný početný výskyt dvoch veľmi podobných kavernikolných panciernikov, *Pantelozetes cavaticus* a novoopísaného druhu *Pantelozetes kunsti*, a to len vo vstupnej časti jaskyne. V jazierku vode sme popri napadanej terestrickej faune zaznamenali len veslonôžky, aj to len ojedinele. V skvapovej vode bol len väčší počet utopených terestrických lariev dvojkrídlorcov.

DISKUSIA

Biodiverzita a biogeografia bezstavovcov v jaskyniach Plaveckého krasu

Výskum jaskýň v okolí Plaveckého hradu bol spojený s očakávaním špecifickej fauny v rámci Malých Karpát i celých Západných Karpát vďaka okrajovej polohe územia aj osobitej genéze a klimatickým podmienkam v jaskyniach. Dosiaľ bola jaskynná fauna Plaveckého krasu a krasu Malých Karpát zahrnutá do biogeografických analýz na základe veľmi nedostatočných poznatkov a predbežne charakterizovaná najmä absenciou subteránnej fauny typickej pre iné západokarpatské regióny (Košel, 2009, 2012; Kováč a kol., 2014). Naš komplexný prieskum terestrických bezstavovcov Plaveckej jaskyne, doplnený o poznatky akvatickej fauny a prvé ucelené poznatky o faune Plaveckej priepasti a jaskyne Pec, umožňuje toto biogeografické hodnotenie spresniť. Suchozemské spoločenstvá sú tu druhovo veľmi pestré, no absentuje troglobiontná a endemická fauna, čím sa potvrdzuje predpoklad, že podzemná fauna Malých Karpát je výrazne chudobnejšia v porovnaní s krasovými oblasťami Slovenska (Kováč a kol., 2005; Mock ed., 2023). Absenciu typickej západokarpatskej subteránnej fauny nahrádza prítomnosť ojedinelých druhov, ktoré na Slovensko zasahujú zo západnej časti Európy (napr. pavúk *Pseudomaro aenigmaticus*, mnohonôžka *Macrostermodesmus palicola*), alebo výskyt reliktnéj fauny (napr. viaceré druhy roztočov, chvostoskokov a chrobákov). Mnohonôžka *Macrostermodesmus palicola* na Slovensku dosiaľ zaznamenaná nebola, je to teda prvonález. Tento drobný, slepý a depigmentovaný západoeurópsky druh žije primárne v pôde. V suchšej a premenlivejšej klíme strednej Európy sú známe len sporadické nálezy tohto druhu z jaskýň,

pričom najbližšie lokality ležia v Mladečskom krase na Morave (Tajovský a Mlejnek, 2007). Jediný exemplár bol odchytený planktónnou sieťkou v plastovej nádobe na zachytávanie skvapovej vode v jaskyni Pec (časť Jakuza). Napriek opakovaným neskorším návštevám tejto lokality (M. Melega), sa zatiaľ nepodarilo zaznamenať viac jedincov tohto druhu. Predpokladáme, že na tejto lokalite obýva skôr hlbšie vrstvy pôdy a sutinové prostredie. Absencia alebo len ojedinelý výskyt synantropných alebo ekologicky adaptabilných druhov svedčí o malej miere antropogénneho narušenia týchto jaskýň a ich okolia. Pri podrobnejšej analýze zistených spoločenstiev suchozemských článkonožcov v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu môžeme konštatovať, že pomerne vysoká biodiverzita v tunajšom podzemnom prostredí, najmä v jeho plytších častiach, vrátane výskytu vzácnej fauny, poukazuje na veľký význam týchto jaskýň pre celkovú heterogenitu prostredia podmieňujúcu vysokú biodiverzitu.

Priestorová distribúcia bezstavovcov

Jaskyne majú vo všeobecnosti zložitú fyziografiu, do značnej miery unikátnu pre každú jaskyňu, ktorá determinuje podmienky, pestrosť mikrohabitatov, ich atraktivitu a dostupnosť kolonizovaní organizmami (Moldovan et al. 2018). Fyziografia a vnútorná heterogenita podmienok troch skúmaných jaskýň v Plaveckom hradnom vrchu je značne navzájom odlišná. Zjednodušené distribučné údaje zo všetkých troch jaskýň (tabuľky 2, 3, 5) umožňujú získať základnú predstavu o variabilite druhovej pestrosti a akumulácii jedincov bezstavovcov na študovaných miestach. Tie do istej miery odrážajú prirodzený gradient podmienok v jaskyni od povrchu do hlbších častí, a to kľúčovo a pomerne predvídateľne ovplyvňuje rozmiestnenie fauny. Ďalšími faktormi sú akumulácie potravy, ktoré majú alebo nemajú súvis s plynu sa meniacim prostredím od vchodu do vnútra jaskýň. Zvyčajne je vzdialenosť od povrchu zároveň vzdialenosťou od najbohatších potravných zdrojov (pôda, drevo, huby a pod.). Nepravidelnosti v distribúcii živočíchov podmieňuje najmä nerovnomerná distribúcia a akumulácia potravy (napr. guánové kopy netopierov v minulosti najmä v Dóme netopierov v Plaveckej jaskyni a na dne Plaveckej priepasti; uhynutý väčší živočích, drevné konštrukcie), alternatívnymi transportnými koridormi (voda presakujúca z povrchu cez pôdu a epikras len na niektorých miestach v jaskyniach) alebo trvácnejším výskytom vodných biotopov v inak prevažne terestrickom prostredí skúmaných jaskýň.

Hoci jaskyne vo všeobecnosti považujeme za oligotrofné ekosystémy (Moldovan et al. 2018), aj v rámci nich rozlišujeme škálu od lokalít extrémne chudobných na potravné zdroje (a organizmy) až po tie, ktoré majú potravné zdroje pomerne a dlhodobo saturované a obýva ich relatívne veľké množstvo organizmov. Jaskyne v Plaveckom hradnom vrchu patria k tým s bohatšími potravnými zdrojmi. V dostupnosti a spektre potravných zdrojov sú medzi nimi rozdiely. Plavecká priepasť obsahuje staršiu rozsiahlu akumuláciu guána netopierov, ktoré sa ale obnovuje len v nepatrnej miere, dostupné živiny v ňom sú už prevažne spotrebované. Plavecká jaskyňa mala donedávna veľké akumulácie guána z letnej kolónie netopierov, ale v ostatných dvoch dekádach sa letná kolónia odsťahovala a guáno bolo odťažené ľuďmi. V prípade oboch jaskýň sa staršie guáno prevažne už len spotrebúva. V Plaveckej jaskyni sa vyskytuje aj sekundárny zdroj v podobe výdrevy, ale už len v zbytkoch. Jaskyňa Pec je blízko povrchu svahu, cez vstupy a presakujúcu vodu sa sem dostávajú živiny z pôdy, prerastajú sem aj koreňové systémy stromov a migruje tu množstvo živočíchov, vrátane menších cicavcov, ktoré tu odkladajú trus, sú tu teda zdroje v rôznom stupni rozkladu a kontinuálne, čo vytvára podmienky pre mimoriadne pestré spoločenstvo. Vo všetkých troch jaskyniach počtom druhov aj jedincov výrazne prevládajú bezstavovce, ktoré jaskyňu dočasne osídľujú z povrchu (troglonexy až subtrogllofilly), len ojedinele sú tu prítomné reliktné trogllofilly (najmä mezofauna, napr. chvostoskoky, niektoré roztoče, drobné pavúky). Makrofauna, bohatá najmä v blízkosti vchodov, je len chudobne reprezentovaná trogllofilnými druhmi,

bez reliktných zástupcov. Výnimkou môže byť predpokladaný reliktný výskyt drobnej mnohonôžky *Macrosternodesmus palicola*. V priestorovej distribúcii fauny v podzemí je všeobecný trend poklesu druhov od vchodu do hlbších častí jaskyne, v Plaveckej jaskyni je tento pokles pozvoľný, v Plaveckej priepasti výrazný a v jaskyni Pec je iný vzor distribúcie (vzdialenosť od povrchu je príliš malá na to, aby sa prejavila).

Časové zmeny v spoločenstvách bezstavovcov v jaskyniach

Časový aspekt osídlenia jaskýň je možné hodnotiť len v prípade Plaveckej jaskyne, kde sú k dispozícii historické údaje o faune netopierov aj bezstavovcov (najmä chvostoskokov). Dlhodobý monitoring netopierov (Lehotská a Lehotský, 2000, 2010, 2016) zaznamenal ústup a napokon úplný zánik letnej kolónie, čo znemožnilo obnovu depozitov guána, ako najvýznamnejšieho potravného zdroja pre bezstavovce. Zastavenie prísunu guána a odstránenie starého guána pri čistení jaskyne a používaní guána ako hnojiva do záhrad speleológmi a návštevníkmi jaskyne sa nutne muselo podpísať pod zmeny v abundancii aj druhovom spektre bezstavovcov.

Štúdie Noseka (1962, 1963) a Paclta (1972) sú dnes cenným zdrojom poznatkov, ktoré umožňujú čiastočne zachytiť časové zmeny v spoločenstve bezstavovcov v Plaveckej jaskyni s odstupom približne 50 až 60 rokov. Predpokladáme, že časť jaskynnej fauny podlieha len minimálnym zmenám v biodiverzite v krátkodobej perspektíve. Dynamickou zložkou sú akcesorické druhy a tie, ktoré jaskyne kolonizujú za predpokladu dočasného atraktívneho potravného zdroja alebo počas krátkodobého extrémnych výkyvov klimatických podmienok v okolí jaskyne. Možné rozdiely mohli vzniknúť aj v rozdielnych metodických prístupoch či skúsenostiach autorov štúdií, prípadne nejednotným názorom na taxonómiu skúmaných živočíchov (subjektívny faktor). Druhová skladbu chvostoskokov Plaveckej jaskyne zachytávajú štyri výskumy v rozpätí približne 60 rokov (tabuľka 6). Kumulovaný nárast počtu druhov sa dá interpretovať precíznejším terénnym vzorkovaním spojeným s nálezmi druhov so sporadickým výskytom. Je ale zaujímavé, že štúdie druhovej biodiverzity s odstupom času zdieľajú pomerne málo spoločných druhov. Medzi štúdiami Noseka (1962, 1963) a Paclta (1972) je to necelá štvrtina druhov (3 z 13 spp.). Neskorší výskum Kováča a kol. (2005) priniesol 15 druhov, pričom porovnaní všetkých troch výskumov priniesol zhodu len v jednej tretine druhov. Pozornosť si zasluhuje fakt, že v dosiaľ analyzovanom materiáli z r. 2021 neboli zistené zriedkavejšie druhy, predovšetkým *Hypogastrura carpatica*, *Mesogastrura ojcoviensis* či *Pseudosinella ksenemani*. Odzrkadľuje to zrejme dynamiku populácií jednotlivých druhov chvostoskokov a inej fauny podľa aktuálnej potravnnej ponuky. Negatívny antropogénny vplyv na faunu jaskyne možno predpokladať tiež, napr. v dôsledku odstránenia prirodzených depozitov guána a starej výdrevy z jaskyne.

Citlivosť podzemného ekosystému na podobné zásahy je známa a treba sa jej vyvarovať aj v budúcnosti, najmä v súvislosti s úvahami o prispôsobenie jaskyne na jej sprístupnenie verejnosti. Jaskyne – okrem ojedinelých prípadov lokalít s chemolitotrofnými (chemoautotrofných) bakteriálnych spoločenstiev – sú totiž plne závislé na prísune a deponovaní organického substrátu z vonkajšieho prostredia. Organizmy sú tu plne odkázané na organický detrit. Výrazné zasiahnutie do týchto potravných vzťahov ohrozuje podzemnú biodiverzitu a ekologickú hodnotu a výnimočnosť jaskynného prostredia konkrétnej jaskyne (Moldovan et al. 2018). V prípade čistenia jaskýň od organického substrátu z ekologického hľadiska možno odporučiť taký postup, ktorý čo najmenej naruší prirodzené prostredie (sedimenty, štruktúru dna) a potravné zdroje. Ak je potrebné z jaskyne odstrániť väčšie množstvo guána alebo zvyškov drevených konštrukcií, odporúčame to urobiť po etapách, materiál postupne zhromaždiť vo vstupnej časti jaskyne po niekoľkých dňoch až týždňoch

Tabuľka 6. Časové zmeny v skladbe spoločenstva chvostoskokov v Plaveckej jaskyni. Legenda: • kavernikolné druhy / (•) pravdepodobne kavernikolné druhy (zväčša reliktná fauna), *zatiaľ nekompletné údaje, (+) sekundárny údaj prevzatý zo staršej literatúry.

Table 6. Temporal changes in the species composition of the springtail community in the Plavecká Cave. Legend: • cavernicolous / (•) probably cavernicolous species (mostly relict fauna), *data not yet complete, (+) secondary data taken from older literature.

Collembola	Nosek (1962, 1963)	Paclt (1972)	Kováč a kol. (2005)	Táto štúdia (2021)*
• <i>Ceratophysella bengtssoni</i> (Ågren, 1904)			+	
<i>Desoria tigrina</i> (Nicolet, 1842)			+	
• <i>Folsomia candida</i> Willem, 1902			+	+
<i>Heteraphorura variotuberculata</i> (Stach, 1934)	+	(+)		
• <i>Heteromurus nitidus</i> (Templeton, 1835)		+	+	+
<i>Hypogastrura assimilis</i> (Krausbauer, 1898)	+		+	
(•) <i>Hypogastrura carpatica</i> (Nosek, 1962)	+			
• <i>Hypogastrura purpureascens</i> (Lubbock, 1867)		+	+	
<i>Kalaphorura burmeisteri</i> (Lubbock, 1873)	+	(+)		
<i>Lepidocyrtus lanuginosus</i> (Gmelin, 1788)		+		
• <i>Megalothorax</i> cf. <i>incertus</i> Börner, 1903				+
• <i>Megalothorax minimus</i> Willem, 1900				+
• <i>Mesachorutes quadriocellatus</i> Absolon, 1900			+	
• <i>Mesogastrura ojcoviensis</i> (Stach, 1919)	+	(+)	+	
<i>Neanura muscorum</i> (Templeton, 1835)		+		
<i>Onychiurus ambulans</i> (Nicolet, 1847)	+	(+)		
<i>Onychiurus rectospinatus</i> Stach, 1922				+
<i>Onychiurus</i> sp.			+	
<i>Orchesella bifasciata</i> Nicolet, 1842			+	
<i>Parisotoma notabilis</i> (Schäffer, 1896)				+
• <i>Protaphorura armata</i> (Tullberg, 1869)		+	+	+
<i>Protaphorura aurantiaca</i> (Ridley, 1880)			+	
<i>Pseudosinella ksenemani</i> Gisin, 1944	+		+	
• <i>Pygmarrhopalites pygmaeus</i> (Wankel, 1860)			+	+
• <i>Stenaphorura japygiformis</i> (Absolon, 1902)	+	(+)		
<i>Willemia scandinavica</i> Stach, 1949			+	
SPOLU (druhov)	8	5 (10)	15	8
	13			
	21			
	25			

ho vyniesť z jaskyne, prítomné živočíchy majú možnosť opustiť substrát ešte v jaskyni. Rovnako nie je vhodné do jaskyne zanášať a ponechať tam cudzorodý organický materiál a médium (napr. kartón, vodu z povrchových zdrojov a pod.).

ZÁVER

Jaskyne Plaveckého hradného vrchu sú unikátne svojou hypogénnou genézou, fyziografiou a v prípade Plaveckej jaskyne a Plaveckej priepasti aj výzdobou. Popri

dlhodobom mapovaní a monitorovaní chiropterofauny v týchto jaskyniach, ale i historických údajoch o niektorých bezstavovcoch, dosiaľ chýbali komplexnejšie poznatky o spoločenstvách bezstavovcov a ich priestorovej distribúcii. Táto štúdia poukazuje na bohaté suchozemské spoločenstvá, ktoré reprezentuje zaujímavá druhová skladba s výlučným zastúpením pôvodnej fauny. Viacero druhov považujeme za vzácne. Chýbajú tu ale reliktné, výlučne jaskynné (troglobiontné) formy živočíchov. Každá zo skúmaných jaskýň vykazuje vysokú druhovú špecifickosť v porovnaní s ostatnými. Porovnanie historických a aktuálnych údajov o výskyte chvostoskokov v Plaveckej jaskyni ukazuje, že došlo k zmenám, ktoré môžu mať čiastočne antropogénne pozadie. Tieto poznatky je vhodné zohľadniť pri dlhodobej ochrane týchto jaskýň a ich bezprostredného okolia. Biospeleologický výskum v jaskyniach Plaveckého hradného vrchu ešte pokračuje laboratórnym spracovaním ďalších vzoriek, ale i pokračujúcim terénnym výskumom vodnej fauny (epikrasu) v Plaveckej jaskyni a ďalším výskumom terestrickej fauny v jaskyni Pec. Prezentovaná štúdia je prvým čiastkovým výstupom z rozsiahleho biospeleologického výskumu Malých Karpát.

Pod'akovanie. Za pomoc pri determinácii ďakujeme týmto špecialistom: Bern Grundman (Diptera, Phoridae), Ľubomír Panigaj (Lepidoptera), Ivan Hadrián Tuf (Chilopoda). Blanka a Roman Lehotskí doplnili prehľad publikovaných údajov o netopieroch a sprievodnej faune v študovaných jaskyniach. Ďakujeme jaskyniarom Milanovi Herzovi a Pavlovi Staníkovi, ktorí nás v jaskyniach sprevádzali. Počas terénneho výskumu bol s nami ostatný raz aj biospeleológ a hydrobiológ, priateľ Dr. Vladimír Košel, ktorý sa konca terénnych prác nedožil a nestihol už ani spracovať nazbieraný materiál. Ďakujeme trojici recenzentov, ktorých pripomienky pomohli odstrániť chyby a skvalitniť úroveň rukopisu. Z nich menovite ďakujeme Anne Šestákovéj za precíznu obsahovú, štylistickú a veľmi detailnú formálnu revíziu rukopisu. Výskum bol v rámci zo zdrojov Európskej únie v rámci Operačného programu Kvalita životného prostredia projektom Ochrana a starostlivosť o jaskyne Slovenska I. (kód ITMS: 310011P445).

BIOSPELEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE CAVES OF PLAVECKÝ HRADNÝ VRCH HILL (MALÉ KARPATY MOUNTAINS, SLOVAKIA)

S u m m a r y

The study brings the first comprehensive insights into the terrestrial and aquatic fauna of three caves located in the Plavecký Karst on the western edge of the Malé Karpaty Mountains and the entire Carpathian Arc in Slovakia. In addition to the geographical location of these caves, they have a relatively rare, hypogene (hydrothermal) origin and valuable speleothems. They are inaccessible to the public, with locked entrances, and are part of the Pohanská National Nature Reserve, with the highest level of protection. The caves differ significantly from each other in their physiography: Plavecká Cave is the longest one (1253 m, elevation difference 37 m), predominantly horizontal, extending deeper into the massif; Pec Cave is shorter, formed shallowly beneath the surface (208 m length, 15 m elevation difference); and Plavecká Shaft consists of large domes with a vertical, artificially created entrance (length 335 m, depth 70 m). Their entrances are at an altitude of 222 to 270 m above sea level. The slopes surrounding the cave entrances are covered with a leafy forest community of rubble type (mainly linden-maple forest). The caves have no active water flow, but there are smaller and larger pools present. A consistently relatively high temperature in the deeper parts of the caves, on average ranging from 9.0 to 12.7 °C, which is significantly higher than in the relatively warm caves of the Western Carpathians. We explored the caves as a team during several visits in 2005 and from 2021, using a combination of collection methods suitable for capturing terrestrial (direct collection, several types of pitfall traps, bait) and aquatic invertebrates (plankton net capture, long-term filtration of water dripping from the cave ceiling).

In this paper, we confront our findings with historical data (previous partial biospeleological studies concern only the Plavecká Cave) and place them in a biogeographical context. In the caves,

we observed a marked contrast between species-rich communities with high individual abundance concentrated in the shallower underground, and poor, low-diversity communities in the deeper parts of the cave systems (Tables 2, 3, 4, 5). Rich terrestrial communities dominated by springtails, dip-terans, and beetles contrast with the very poor aquatic fauna. We recorded the presence of several relict, eutroglophilic species (e.g., several mites, the spider *Pseudomaro aenigmaticus*, some species of springtails, the beetle *Atheta spelaea*). The edaphic and troglophilic millipede *Macrosterodesmus palicola* in the Pec Cave was recorded for the first time in Slovakia. However, the troglobiontic, endemic Carpathian fauna is absent. One species of springtail is a rare exception, *Hypogastrura carpatica* (Nosek, 1962), which has its type locality here (Plavecká Cave) and so far, it is overall known from only two caves in the Malé Karpaty Mountains. However, its recent occurrence could not be confirmed. Little is known about the ecological association of this species with the cave environment; it might represent a species surviving in climatically specific microhabitats of karst relief, including cave entrances. The site of its historical finding is today altered by the disappearance of a summer colony of bats and the collection of guano heaps by the local population. When reconstructing temporal changes in the species composition of springtails in the Plavecká Cave over more than 60 years (Table 6), a shift in species composition can be seen. The positive aspect is that no significant colonization by synanthropic and introduced fauna is observed so far.

The biospeleological research of the mentioned caves is part of a comprehensive study of the fauna of the caves in all karstic regions of the Malé Karpaty Mountains. Our ambition is to enrich basic knowledge but also to contribute to discussions on why and how to protect underground ecosystems and biodiversity from disturbance, for example connected with the planned opening of Plavecká Cave to recreational (mass) tourism.

LITERATÚRA

- Bárta, J., 1982. Nové paleolitické sídlisko v Malých Karpatoch jaskyňa Pec pri Plaveckom Podhradí. *Krásy Slovenska*, 59, 10, 4–7.
- Bella, P., 2010. Vytváranie jaskýň vodami vystupujúcimi pozdĺž okrajového zlomu Malých Karpát pri Plaveckom Podhradí – hydrogeologické podmienky a morfológické znaky. *Aragonit, Liptovský Mikuláš*, 15, 2, 65–70.
- Bella, P., Bosák, P., Littva, J., 2019a. Hypogénny pôvod jaskyne Pec (Plavecký kras, Malé Karpaty): tektonická predispozícia a morfológické znaky. *Slovenský kras*, 57, 2, 133–146.
- Bella, P., Bosák, P., Mikysek, P., Littva, J., Hercman, H., Pawlak, J., 2019b. Multi-phased hypogene speleogenesis in a marginal horst structure of the Malé Karpaty Mountains, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 48, 2, 203–220.
- Bella, P., Hlaváčová, I., Holúbek, P., 2018. Zoznam jaskýň Slovenskej republiky. Stav k 31. 12. 2017. *Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Liptovský Mikuláš*, 528 s.
- Butaš, J., 2003. Plavecká priepasť PP-2. *Spravodaj SSS*, 34, 1, 35–38.
- Ferreira, R. L., 2019. Guano communities. In White, B. W., Culver, D. C., Pipan, T., (Eds.): *Encyclopedia of Caves*. Third Edition. Academic Press, 474–484.
- Grundmann, B., Oboňa, J., Mocek, B., Mock, A., 2023. Scuttle flies (Diptera: Phoridae) of subterranean habitats in Slovakia: a review and a case study. *Biologia*, 78, 3591–3597.
- Hubek, M., Magdolen, P., 2008. Plavecká jaskyňa – nové objavy a nová mapa. *Spravodaj SSS*, 39, 1, 58–61.
- Hůrka, K., 1980. Nycteribiidae – muchulovití. In Chvála, M. (Ed.): *Krevsající mouchy a střečci. Bloodsucking and warble flies. Fauna ČSSR*, 22, Academia, Praha, 479–509.
- Košel, V., 2005. Ktorá je najteplejšia. *Spravodaj SSS*, 36, 4, 29–30.
- Košel, V., 2009. Subteránna fauna Západných Karpát. *Ústav pôdnej biologie, Biologické centrum AVČR, České Budějovice*, 204 s.
- Košel, V., 2012. Subterranean fauna of the Western Carpathians. *Tribun EU, Brno*, 210 s.
- Kováč, L., 2000. A review of the distribution of cave Collembola (Hexapoda) in the Western Carpathians. *Mémoires de Biospéologie*, 27, 71–76.

- Kováč, E., Mock, A., Luptáčik, P., Hudec, I., 2005. Prieskum spoločenstiev bezstavovcov jaskyne Driny, Plaveckej jaskyne a priepasti Michňová, Záverečná správa z prieskumu v roku 2005. Prírodovedecká fakulta UPJŠ, Košice. Deponované na Správe slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš, 18 s.
- Kováč, E., Elhottová D., Mock, A., Nováková, A., Krištúfek, V., Chroňáková, A., Lukešová, A., Mulec, J., Košel, V., Papáč, V., Luptáčik, P., Uhrin, M., Višňovská, Z., Hudec, I., Gaál, L., Bella, P., 2014. The cave biota of Slovakia. *Speleologia slovaca* 5. State Nature Conservancy of the Slovak Republic, Slovak Caves Administration, Liptovský Mikuláš, 192 s.
- Lalkovič, M., 2010. Plavecká jaskyňa – prvá sprístupnená jaskyňa na Slovensku. *Aragonit*, 15, 1, 19–28.
- Lehotská, B., 2000. Netopiere Plaveckého krasu a ich praktická ochrana. *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*, 10, 207–213.
- Lehotská, B., 2002. Netopiere Malých Karpát. *Lynx*, n. s. (Praha), 33, 141–184.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2000. Plavecká jaskyňa – jedna z najvýznamnejších chiropterologických lokalít západného Slovenska. In Mock, A., Kováč, E., Fulín, M. (Eds.): *Fauna jaskýň – Cave Fauna*. Zborník Fauna jaskýň, 20. – 21. október 1999 Východoslovenské múzeum, Košice, 99–108.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2002. Zimoviská netopierov v Malých Karpatoch II. Katalóg zimovísk netopierov SR. *Vespertilio*, 6, 73–86.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2010. Zhrnutie poznatkov o zimovaní netopierov v Plaveckej jaskyni. *Ochrana prírody*, 26, 71–74.
- Lehotská, B., Lehotský, R., 2016. Zhrnutie poznatkov o reprodukčnej kolónii druhu *Myotis myotis* v Plaveckej jaskyni (Malé Karpaty). *Naturae tutela*, 20, 2, 139–148.
- Mammola, S., Cardoso, P., Angyal, D., Balázs, G., Blick, T., Brustel, H., Carter, J., Čurčić, S., Danflous, S., Dányi, L., Déjean, S., Deltshv, C., Elverici, M., Fernández, J., Gasparo, F., Komnenov, M., Komposch, C., Kováč, E., Kunt, K. B., Mock, A., Moldovan, O., Naumova, M., Pavlek, M., Prieto, C. E., Ribera, C., Rozwałka, R., Růžicka, V., Vargovitch, R. S., Zaenker, S., Isaia M., 2019. Continental data on cave-dwelling spider communities across Europe (Arachnida: Araneae). *Biodiversity Data Journal* 7, e38492.
- Martinek, V., 1980. New or rare species of some families of Diptera-Acalyprata in the fauna of the ČSR. *Acta Universitatis Carolinae, Biologica*, 1977, 343–351.
- Martinek, V., 1982. Discovery of some new species of Diptera-Acalyprata in the fauna of Czechoslovakia. *Folia Facultatis Scientiarum Naturalium Univ. Purkynianae Brunensis*, 23, *Biologia*, 74, 75–81.
- Martinek, V., 1984. Další údaje o rozšíření některých druhů skupiny Acalyprata (Diptera) na území SSR I. (Čeledi: Heleomyzidae a Lauxaniidae). *Acta Rerum Naturalium Musei Nationalis Slovaci*, 30, 127–142.
- Mihál, T., Lehotská, B., 2015. Vplyv premenných prostredia na dynamiku hibernujúcej kolónie v Plaveckej jaskyni (Malé Karpaty). *Acta environmentalica Universitatis Comenianae (Bratislava)*, 22, 37–46.
- Mock, A. (Ed.), 2023. Biospeleologický výskum a monitoring bezstavovcov. Záverečná správa. PF UPJŠ v Košiciach, Košice, 91 s.
- Moldovan, O. T., Kováč, E., Halse, S. (Eds.), 2018. *Cave ecology*. Springer Cham, 545 s.
- Noga, M., 2007. Osteologické nálezy netopierov z územia Malých Karpát. *Vespertilio*, 11, 109–118.
- Nosek, J., 1962. The Collembola from the Cave Plavecké Podhradie in Small Carpathians. *Časopis Československé společnosti entomologické*, 59, 1, 12–18.
- Nosek, J., 1963. Zur Kenntnis der Apterygoten der kleinkarpathischen Wald- und Dauergrünlandböden. *Pedobiologia*, 2, 108–131.
- Paclt, J., 1972. Verzeichnis der Höhlen-Springschwänze Mährens und der Slowakei. *Senckenbergiana biologica*, 33, 411–425.
- Pipan, T., 2005. Epikarst: A promising habitat. Copepod fauna, its diversity and ecology: a case study from Slovenia (Europe). ZRC Publishing, Postojna, 101 s.
- Rudy, J., Papáč, V., Mlejnek, R., Mock, A., 2021. Terrestrial isopods (Oniscidea) in Slovak caves: species diversity and distribution along regional and geographical gradients. *Acta Carpathica Occidentalis*, 12, 12–42.

- Skarżyński, D., 2006. A taxonomic revision of *Hypogastrura crassaegranulata* (Stach, 1949) (Collembola, Hypogastruridae). *Zootaxa*, 1109, 27–37.
- Starý, J., Galicová, P., Ľuptáček, P., Žurovcová, M., 2026. A new cave species of the genus *Pantelozetes* (Acari, Oribatida, Thyrisomidae) and its genetical delimitation from selected congeneric species. *Systematic & Applied Acarology*, 31, 327–339.
- Šestáková, A., Mock, A., Christophoryová, J., Gajdoš, P., 2018. Two subterranean-dwelling spiders new to Slovakia (Araneae: Linyphiidae). *Arachnologische Mitteilungen / Arachnology Letters*, 55, 25–29.
- Ševčík, M., Krištofik, J., Uhrin, M., Benda, P., 2010. New records of ticks (Acari: Ixodidae) parasitising on bats in Slovakia. *Vespertilio*, 13–14, 139–147.
- Tajovský, K., Mlejnek, R., 2007. Nálezy nových druhů troglofilních mnohonožek. *Ochrana Přírody*, 62, 19–20.
- Tencer, J., 2021. Tabuľka najdlhších jaskýň na Slovensku (stav k 31. 3. 2021). *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 52, 2, 98.
- Velšmid, M., 2013. Nový objav v Plaveckom krase, jaskyňa Pec. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 44, 1, 58–62.

Slovenský kras, ročník 63, číslo 1 – 2
Acta Carsologica Slovaca

Rok vydania:	august 2026
Vydanie:	prvé
Evidenčné číslo:	EV 3878/09
Vydavateľ:	Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva
Sídlo vydavateľa a adresa redakcie:	Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva, Liptovský Mikuláš, Školská 121/4, 031 01 Liptovský Mikuláš, IČO: 361 45 114
Jazyková korektúra:	Mgr. Bohuslav Kortman; Mgr. Miroslav Kudla, PhD.
Anglické preklady:	autori príspevkov
Grafika:	Ing. Jiří Goralski
Tlač:	EQUILIBRIA Krásnohorská 82, 040 11 Košice
Náklad:	200 ks
Obálka:	Plavecká jaskyňa. Herzov dóm. Foto: P. Staník

ISSN 0560-3137

ISSN 0560-3137