

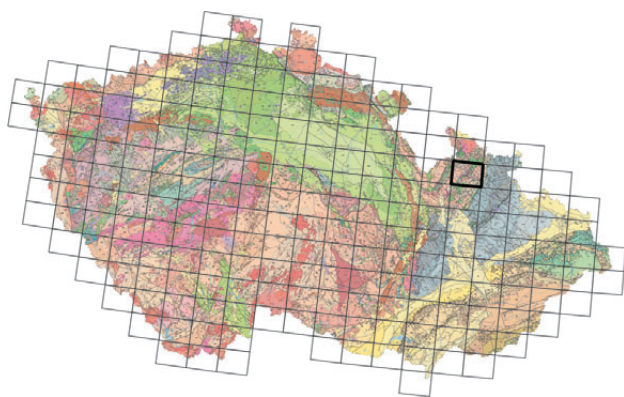
KRÁPNÍKOVÉ ÚTVARY V PODZEMNÍCH PROSTORÁCH PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY DLOUHÉ STRÁNĚ

Speleothems in underground spaces of the power plant Dlouhé Stráně

VÁCLAV VÁVRA – JINDŘICH ŠTELCL – JIŘÍ FAIMON – MONIKA SCHWARZOVÁ

Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno

(14-24 Bělá pod Pradědem)



Key words: calcite; carbon dioxide; concrete; dripwater; power plant; speleothem; water

Abstract: Stalactites found on the concrete walls and roofs of power station adits show different structure in comparison to the cave stalactites known from carbonate karst. The adit stalactites are often constituted by unique skeletal calcite crystals with parallel orientations. The growth mechanism is opposite to cave speleothem growth mechanism: waters percolating through concrete reach supersaturation with respect to calcite after dissolving of an additional CO₂ from atmosphere. In agreement with many cave stalactites, the adit stalactites are formed by pure calcite. The growth rate of the adit straw stalactite is enormous: it can reach 70 mm in length per year.

V roce 1994 byly dokončeny práce na podzemních železobetonových konstrukcích přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně (dále v textu PVE DS). Ve vyražených podzemních prostorách je uloženo veškeré provozní zařízení elektrárny, zatímco na povrchu byla vybudována správní budova a dvě umělé vodní nádrže. Během 14 let provozu vznikly na některých místech podzemních betonových konstrukcí krápníkové útvary (dále stalaktity), které svým tvarem nápadně připomínají krasové speleotémy (obr. 1). Studie si klade za cíl posoudit jejich fázové a chemické složení, vnitřní stavbu a procesy vedoucí k jejich vzniku.

Stavba a složení stalaktitů

Stalaktity se v podzemních prostorách PVE DS vyskytují pouze v jejich netemperovaných částech. Obvyklá délka stalaktitů se pohybuje v rozmezí 250–300 mm, nejdelší zaznamenaná délka byla 840 mm. Průměr stalaktitů je zhruba konstantní – kolísá v úzkém intervalu od 5 do 10 mm. Oje-

diněle se vyskytují stalaktity s kónickým tvarem, které se od krčku k ústí zužují. Všechny zkoumané stalaktity byly duté s vyvinutým centrálním kanálkem.

Z morfologického hlediska byly rozlišeny tři základní typy stalaktitů:

Typ I tvoří symetrická silnostěnná brčka (obr. 2). Tyto útvary mají v celé délce zhruba konstantní průměr, typická



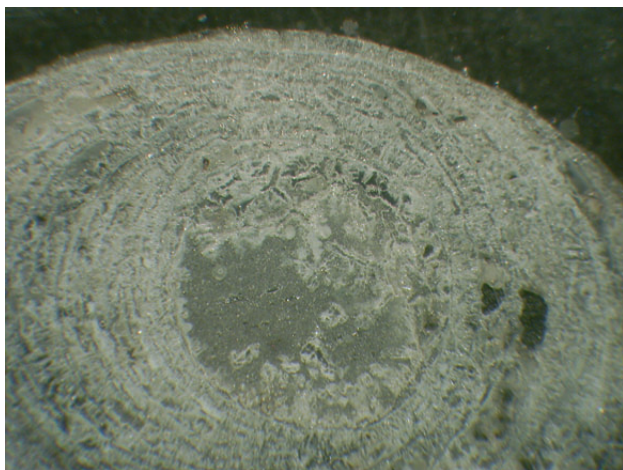
Obr. 1. Krápníkové útvary narostlé na betonové konstrukci jedné z chodeb podzemních prostor PVE DS. Nejdelší stalaktity mají délku 25 cm.



Obr. 2. Stavba silnostěnného symetrického brčka typu I. Vpravo podélné řezy a vlevo příčné řezy v různých částech brčka. Měřítko je v centimetrech.



Obr. 3. Stavba nesymetrického tenkostěnného brčka typu II. Na vnitřní straně tenké stěny vyrůstají kalcitová individua se shodnou orientací. Délka krystalu je 1 mm.



Obr. 4. Stalaktit typu III má v příčném řezu koncentrickou stavbu, šířka záběru je 18 mm.

je rovná a hladká stěna bez výraznější modelace. Stěna je vzhledem k průměru centrálního kanálku relativně silná – kanálek představuje maximálně 1/3 z celkového průměru brčka. Makroskopicky je stěna brčka tvořena jemnozrnnou karbonátovou hmotou. Zatímco vnější okraj stěny je zrnitostně homogenní, dochází směrem do centrálního kanálku ke kostrovitému růstu mikrozrnného agregátu kalcitových jedinců. V okrajových partiích kostrovitých útvarů lze lokálně pozorovat počínající rekrystalizaci.

Typ II lze označit jako nesymetrická tenkostěnná brčka (obr. 3). Tyto stalaktity se od typu I liší variabilním průměrem ve směru dlouhé osy brčka. Dalším charakteristickým znakem je extrémně tenká „skořápkovitá“ stěna s mocností 0,5–1 mm. Centrální kanálek zde tvoří kolem 95 % celkového průměru brčka. Mechanická odolnost tohoto typu je velmi nízká. Na skořápkovitou stěnu narůstají z vnitřní strany směrem do centra kostrovité agregáty kalcitu. Tyto postupně rekrystalují na drobná kalcitová individua. Všechny kostrovité agregáty vykazují téměř shodnou orientaci – svírají úhel ~ 45° s vnější stěnou brčka ve směru proudění skapové vody. Vnější okraj stěny brčka bývá z větší části rekrystalovaný na kalcitová individua dlouze

sloupečkovitého až vláknitého tvaru – pravděpodobně odpovídající vyššímu romboedru.

Typ III má kónický tvar, délka je obvykle kratší než u předchozích typů. Tyto stalaktity se vyznačují výrazně větším průměrem (až 23 mm) a výrazně vyšší mechanickou odolností. Stěna brčka vykazuje výraznou koncentrickou zonální stavbu (obr. 4). Jednotlivé přírůstkové zóny jsou různě mocné a jsou tvořeny krystalovými individui skalenoedrického typu. Orientace krystalových individuí je shodná s krystalografickou osou *c* kolmo na kruhový obvod stalaktitu. Centrální kanálek je zvolna vyplňován krystaly kalcitu, takže v horní části stalaktitu je užší než v jeho spodních partiích.

RTG prášková difrakce potvrdila ditrigonálně skalenoedrickou polymorfní modifikaci CaCO_3 – kalcit. Mřížkové parametry ($a = 4,995 \cdot 10^{-10}$ m; $c = 17,066 \cdot 10^{-10}$ m) naznačují, že se jedná o velmi čistý kalcit bez izomorfních příměsí. Jiné fáze nebyly identifikovány nebo byly pod mezí citlivosti použité metody. Chemické složení všech stalaktitů je uniformní. Ze sledovaných prvků (Ca, Fe, Mg, Mn, Sr, P, S, Si, K a Al) byl prokázán pouze vápník.

Mikroklima a složení podzemních vod

V podzemních železobetonových prostorách s nejhojnějším výskytem stalaktitů byly sledovány koncentrace CO_2 , teplota a vlhkost. Koncentrace CO_2 se pohybovaly od 440 do 620 obj. ppm, přičemž vyšší hodnoty byly měřeny u stropu štoly. Teploty vzduchu v podzemních prostorách kolísají v rozmezí 10–12,2 °C, relativní vlhkost v rozmezí 72,5–89,7 % (rosný bod 5,6–6,5 °C). Jednorázově byly určeny hydrogeochemické parametry protékajících podzemních vod (tab. 1). Zatímco voda protékající chodbou (značena M1) vykazuje složení typické pro běžné podzemní vody, skapové vody prošlé betonovými konstrukcemi se liší extrémně vysokou hodnotou pH. Rozdíly ve složení skapové a průtočné vody naznačují, že z betonů je silně vyplavován vápník, karbonátové složky a OH^- ionty, méně pak Na^+ a K^+ ionty.

Diskuse

Fázové a chemické složení studovaných stalaktitů z betonových konstrukcí PVE DS vykazuje nápadnou shodu s přírodními brčky. Ve všech případech jde o velmi čistý kalcit bez příměsí dalších fází. Stavebním uspořádáním se však studovaná brčka od přírodních výrazně odlišují. Zatímco stalaktity z podzemních prostor PVE DS mají více méně uniformní stavbu (viz popis výše), již dříve studovaná brčka z jeskyní Moravského krasu jsou typicky složena ze tří vrstev (FAIMON et al. 2002; ŠTELCL et al. 2004). Vnější vrstvu tvoří jemně zrnitý kalcitový agregát o mocnosti několik desetin milimetru, ve střední vrstvě jsou to velké kalcitové krystaly (v extrémních případech jde o několik monokrystalů), tvořící primární „kostru“ celého brčka. Vnitřní vrstva o mocnosti 0,1–0,3 mm se skládá ze zrnitého kalcitového agregátu s různou orientací zrn.

Mechanismus vzniku stalaktitů z PVE DS se rovněž výrazně liší od analogických útvarů v přirozených krasových systémech. Podzemní voda se při průsaku betonovou konstrukcí obohacuje ionty Ca^{2+} a OH^- . Přes zřetelné obohacení karbonátovými ionty (alkalita) zůstává skapová voda silně nenasycená oxidem uhličitým. Důsledkem je rozpouštění atmosférického $\text{CO}_2(\text{g})$, což vede k přesycení vod vzhledem ke kalcitu a růstu kalcitu ve formě krápníkových útvarů a sintrových povlaků. Celý mechanismus růstu lze znázornit rovnicí:



V přírodním karbonátovém krasu jsou skapové vody typicky přesyceny oxidem uhličitým a přesycení ke kalcitu dosahují odplyněním CO_2 .

Rychlost růstu stalaktitů na podzemních betonových konstrukcích PVE DS je závažnější. Předpokládáme-li jeho začátek v časovém období po roce 1994, kdy byla stavba dokončena, je tvorba stalaktitů limitována dobou 14 let. Největší změněná délka stalaktitu je 840 mm, což odpovídá průměrné rychlosti růstu 70 mm/rok. Podle DESMARCHELIER et al. (2006) lze rychlost růstu analogických forem krasových speleotém vyjádřit hodnotou řádově v jednotkách mm/rok (přírůstek na obvodu přibližně 0,2 mm/rok).

Závěr

Studované stalaktity v podzemních betonových konstrukcích PVE DS se odlišují svou stavbou od podobných přírodních útvarů (speleotém) známých z karbonátových krasových systémů. Typický je především kostrovitý růst kalcitových individuí směrem k centrálnímu kanálku. Z hlediska fázového a chemického složení jsou stalaktity z PVE DS a krasových jeskyní identické: jsou tvořeny čistým kalcitem, prakticky bez příměsí jiných prvků. Mechanismus tvorby stalaktitů z betonových konstrukcí je odlišný od mechanismů řídících jejich tvorbu v přírodních karbonátových systémech. V podzemních prostorách PVE

Tabulka 1. Základní hydrogeochemické parametry podzemních vod

	průtočná voda	skapové vody (SV)		obohacení SV
proměnná/vzorek	M1	V11	V12	$\Delta = \text{V11} - \text{M1}$
průtok (kapky/min)	N	33	10	–
pH	7,68	11,81	11,34	–
OH^-	$1,73 \cdot 10^{-7}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$
alkalita [ekv/L]	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$3,20 \cdot 10^{-3}$
Cl^- [mol/L]	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	N	$-6,40 \cdot 10^{-5}$
SO_4^{2-} [mol/L]	$1,80 \cdot 10^{-4}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	N	$6,00 \cdot 10^{-5}$
Ca [mol/L]	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
Mg [mol/L]	$8,61 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-6}$	N	$-8,24 \cdot 10^{-5}$
Na [mol/L]	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$9,86 \cdot 10^{-4}$	N	$8,51 \cdot 10^{-4}$
K [mol/L]	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$5,52 \cdot 10^{-4}$	N	$4,88 \cdot 10^{-4}$
$\text{SI}_{(\text{kalcit})}$	-1,89	1,69	1,75	–
$\log P_{\text{CO}_2}$	-3,67	-8,96	-7,9	–
ΔCa [mol/L]	$+5,73 \cdot 10^{-4}$	$-7,39 \cdot 10^{-4}$	$-3,48 \cdot 10^{-4}$	–

M1 – průtočná voda, V11 a V12 – skapové vody, které prošly železobetonovou konstrukcí, N – nestanoveno

dosahují prosakující silně alkalické vody přesycení ke kalcitu dodatečným rozpouštěním CO_2 , zatímco v krasovém prostředí dosahují skapové vody přesycení odplyňováním CO_2 . Rychlost růstu speleotém z vod prosakujících betonem je překvapivě vysoká.

Poděkování

Autoři děkují společnosti ČEZ, jmenovitě ing. Janu Babákovi, za finanční podporu výzkumu, umožnění přístupu do podzemních prostor PVE DS a vstřícné jednání.

Literatura

- DESMARCHELIER, J. M. – HELLSTROM, J. C. – MCCULLOCH, M. T. (2006): Rapid trace element analysis of speleothems by ELA-ICP-MS. – *Chemical Geology*, 231, 102-117.
- FAIMON, J. – ŠTELCL, J. – ZIMÁK, J. (2002): Mineralogické studium samovolné destrukce brček ve vybraných jeskyních Moravského krasu. – MS Přírodověd. fak. Masaryk. univ., Brno.
- ŠTELCL, J. – FAIMON, J. – ZIMÁK, J. (2004): Nové poznatky o stavbě a vývoji kalcitových brček. In: BELLA, P., ed.: Výskum, využívanie a ochrana jaskýň. Sbor. ref. 4. vědecké konference s mezinár. účastí, 75–77, Liptovský Mikuláš.