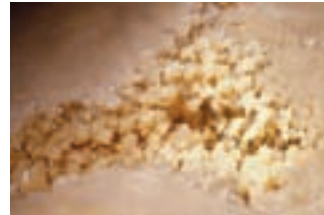


Siga v kraških jamah

Nadja Zupan Hajna

Kras je del zemeljske skorje, katerega nastanek in značilnosti določa kemično delovanje vode na relativno dobro topne karbonatne kamnine. Slovenija je kraška dežela, saj je več kot 40 % njenega površja iz karbonatnih kamnin od devonske do miocenske starosti. V Sloveniji je znanih že več kot 8200 kraških jam, v katerih najdemo različne jamske sedimente, od klastičnih do kemičnih.

Siga je kemična usedlina, ki se izloči iz prenasočene vodne raztopine. Deževnica se v atmosferi in pri prenikanju skozi tla obogati s CO_2 in z njim tvori šibko ogljikovo kislino, ki pri prenikanju skozi karbonatne kamnine le-te topi, pri čemer nastajajo kalcijevi in hidrogenkarbonatni ioni $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. Intenzivnost raztapljanja je odvisna od podnebja, to je od geografske širine, reliefa, količine padavin, temperature, pokritosti s prstjo, količine CO_2 v vodi in od lastnosti



*Kristali kalcita v ponvici, Postojnska jama; širina ponvice 3 cm.
Foto: Jure Hajna*



*Kalcitne cevke rastejo iz razpokanega stropa v jami Bestežovca. Dolžina posameznih cevk je do 30 cm.
Foto: Jure Hajna*



Vrhovi stalaktitov, zaves in cevčic segajo v sedaj suho ponvico, kjer se je nanje izločal kalcit neposredno iz vode v ponvici. Kapniki so različno obarvani in različno stari. Ponvica je v Jami S647 v predoru Kastelec; širina motiva približno 1,5 m. Foto: Nadja Zupan Hajna

karbonatne kamnine. V nižjih legah, toplejšem podnebju in pri večji količini padavin se ponavadi izloči več sige. V trenutku, ko kraška voda, obogatena s kalcijevimi in hidrogenkarbonatnimi ioni, doseže jamski prostor, se ravnotežje v njej poruši. Zaradi spremembe parcialnega tlaka CO_2 in temperature se začne izločati kalcijev karbonat $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Oblika sige je odvisna od načina dotoka vode, mineralna sestava in barva pa od prisotnosti različnih ionov v raztopini, to je od sestave izvorne kamnine, ki jo prenikajoča voda raztaplja. Če se sestava raztopine med rastjo sige spreminja, se posamezne plasti razlikujejo po mineralni sestavi. Najpogostejši minerali, ki gradijo sigo v kraških jamah, so kalcit, aragonit in sadra.

Na slovenskem krasu je siga večinoma kalcitne sestave. **Kalcit** je obenem najpogostejši sekundarni mineral v kraških jamah, tako v Sloveniji kot po svetu, po količini pa mu sledita aragonit in sadra.

Sige razlikujemo glede na njeno zunanjo obliko, način nastanka in kristalografske lastnosti. Kalcitni kristali v sigi se izločajo v plasteh, ki rastejo ena vrh druge. Posamezno plast gradijo skupki istočasno individualno rastočih kristalov na enotni podlagi. Skupna rast in tekmovanje med njimi se začne, ko posamezni kristali pridejo v stik drug z drugim. Kristali, ki so prednostno orientirani, to je pravokotno na podlago, rastejo najhitreje, pri drugače orientiranih pa se rast zavre ali celo preneha. Velikost kristalov v sigi je odvisna od vplivov okolja, predvsem pa od stopnje nasičenosti raztopine. Glede na naraščajočo nasičenost se bodo razvijali: skalenoedri, zelo strmi romboedri, pinakoidi in heksagonalne prizme. Cevka, ki je osnova za rast stalaktita, je zgrajena iz kristalov, ki rastejo



Krožnikasti stalagmiti iz Postojnske jame, zrasli na podoru na Veliki gori. Premer stalagmita je 15 cm. Foto: Nadja Zupan Hajna



Stalagmiti, imenovani pagode, iz Pisanega rova v Postojnski jami so visoki več kot 2 m. Foto: Jure Hajna

pravokotno na strop. Ko pa se začne voda pretakati tudi po zunanji strani cevke, se iz nje izloča kalcit, katerega c-osi so pravokotne na steno cevke. Za stalagmite in ostale sige, kjer se izločajo plasti kalcitnih kristalov druga vrh druge, pa so značilni stebričasti kristali, ki rastejo pravokotno na podlago. Temnejše plasti so največkrat zgrajene iz stebričastih kristalov, ki so zelo trdno zrasli, svetlejša pa iz enakih kristalov, le da je med njimi več prostora (večja poroznost). Menjavanje temnih in svetlih plasti razlagajo s sezonskimi spremembami v času rasti sige.

Kalcit se v sigi večinoma izloča v obliki drobnokristalnih skupkov, večji posamezni kristali so redki in se izločajo v vadozni coni v ponvicah s stoječo vodo in iz mezeče vode na jamskih stenah ali v sipkem sedimentu (manjši nepopolnoma razviti strmi skalenoedri in romboedri). Kristali rastejo v skupkih in so veliki od nekaj milimetrov do okrog enega metra. Ponvice, napolnjene z različnimi kristali kalcita, so v naših jamah zelo pogoste, vendar so ti kristali majhni, večji so redkejši. Večji kristali, ki so zrasli pod gladino vode v sedaj sicer suhih ponvicah, kjer pa se nekdaj višina vode še vidi, so znani iz Jame pod Babjim zobom. Veliki kristali se lahko izločijo tudi iz raztopin, ki mezijo iz jamskih sten. Posamezni kristali so lepo razviti, veliki do nekaj decimetrov in navadno rastejo v skupkih. Kristali so tem bolj pravilnih oblik, čim bolj enakomerno priteka raztopina in čim več prostora in časa imajo kristali za svojo rast. Največji (do okrog 1 m) in najlepši kristali rastejo v freatični, stalno zaliti coni krása, vendar takih v naših jamah ne poznamo. V freatičnih pogojih se kristali kalcita izločajo v nasičeni coni ob gladini podtalnice (romboedri, skalenoedri in njune kombinacije). Slovenske jame niso ravno bogate z velikimi kristali kalcita, vendar dajo poseben pečat tisti jami, v kateri se razvijajo. Zelo lepi so bili v Kristalni jami nad Kupljenikom in



*Paleta, obtežena z izraščajočimi stalaktiti, s premerom 50 cm iz Martinske jame.
Foto: Nadja Zupan Hajna*

Jami pod Babjim zobom, vendar so bili najlepše žal odlomili in odnesli. Za večje med njimi – v Jami pod Babjim zobom jih najdemo kot zapolnitev večjih in manjših votlin – predvidevamo, da so se izločili iz nizekotemperaturnih hidrotermalnih raztopin in da nimajo s kraškimi procesi in z jamo ničesar skupnega ter da so jih jamski rovi po naključju razkrili.

Siga kot drobnokristalni agregat je značilna samo za vadozno cono krasa. Kje in kdaj kakšna oblika raste, pa je odvisno od trenutnih strogo omejenih lokalnih pogojev (mekanika pretakanja) in ne od globine jame. Različne oblike sige nastanejo iz kapljajoče, tekoče, mezeče, ujete, kondenzne vode itd. Iz vode, ki teče po stenah ali tleh, se izloča v plasteh. Nastajajo obloge, »slapovi« in »baldahini«. Kapniki, stalaktiti in stalagmiti, rastejo iz kapljajoče vode v vzdolžni smeri kapljanja.

Siga se izloča različno hitro. Lahko zraste nekaj milimetrov že v nekaj letih ali pa v tisoč letih, kar je odvisno od hidroloških pogojev, ki vplivajo na jakost in stalnost posameznega prenikajočega curka vode, iz katerega se siga izloča.

Barva sige je različna, odvisna je od njene mineralne sestave, bližine različnih kovinskih nečistoč v karbonatnih kamninah, tal na površju, rastlinskega pokrova, klime in jamskega okolja. Izvor barve lahko pripisujemo trem osnovnim kategorijam: organskim snovem, kovinskim ionom ter različnim pigmentom. Organske kisline izvirajo iz prsti in vegetacije nad jamo ter obarvajo sigo oranžnorjavo in krem. V tem primeru se organske molekule vgradijo v posamezne kalcitne kristale ali pa so pigment med posameznimi kristali. Kovinski ioni se vgradijo v kristale ter povzročijo difuzijski odsevni spekter, ki obarva sigo modro in zeleno (Cu), rožnato (Mn), rožnato in modro (Co) in rumeno (Ni). Pigmenti pa so največkrat železovi in manganovi oksidi ter hidroksidi in obarvajo sigo rdeče, rjavo in črno.

Stalaktiti rastejo s stropa navzdol in so najrazličnejših velikosti ter debelin, kar je odvisno od moči vodnega curka, njegove nasičenosti in njegove stalnosti. Stalaktit začne rasti v obliki dolge tanke cevke, ki je v sredini votla. Cevke lahko zrastejo več metrov v dolžino, pa se še ne začnejo debeliti. Kasneje začne raztopina oblivati tudi zunanjo steno cevke in kalcit se izloča na njej v tankih plasteh, zato je njihova zgradba koncentrična. V teh koncentričnih plasteh kristalizira kalcit s kristalografsko c-osjo pravokotno na steno cevke. Stalaktit se pri tem vedno bolj debeli. Zanimiva oblika so tudi čebulasti kapniki, ki so kot votle krogle pritrjeni na strop, iz njih pa raste krajša ali daljša cevka. Če se pretok skozi cevko zmanjša, se konice stalaktitov močno odebelijo, ker se dotekajoča voda razlije čez oviro in se kalcit izloča na površini cevke. Odebeljene so tudi konice stalaktitov, ki so potopljene v ponvice, ker se okrog njih izloča kalcit iz vode v ponvici.



*V povnci izloženi kalcit na konicah stalaktitov v Jami pod Babjim zobom.
Foto: Nadja Zupan Hajna*

Stalagmiti rastejo na tleh iz kapljajoče vode. Kadar je višina curka manjša, se plasti sige odlagajo ena vrh druge v stožčasti obliki, če pa voda kaplja z velike višine, se kapljica razprši in dobimo stalagmite s popolnoma ravnim vrhom krožnikaste oblike. Stalagmiti so zaradi razlik v intenzivnosti kapljanja, načina razpršitve kapljice, vpliva kapilarnosti, gravitacije ter kristalizacije najrazličnejših oblik. Nekateri so podobni cipresam, božičnim drevesom, orjakom, kijem, pagodam itd. Če se stalaktit in stalagmit zrasteta s konicama, nastane steber.

Starejši kapniki v jamah Postojnskega krasa in na Krasu so bolj razvejani (ciprese), veliko je tudi že podrtih, kar kaže na drugačno klimo (mehaniko pretakanja, temperaturo) v času njihove rasti.

V teh jamah je tudi več palet, ki v Sloveniji niso ravno pogoste. **Paleta** so bolj ali manj ovalne ploščaste sige, ki jih gradita po dve tanki vzporedni plošči, med katerima doteka raztopina. Iz te raztopine se na robovih plošč izločajo vedno novi kalcitovi kristali. Paleta ali ščiti, kakor imenujemo večje, lahko rastejo iz razpok v steni jamskega rova, že obstoječega kapnika itd., in to pod različnimi koti. Na njihovi spodnji strani večkrat rastejo cevčice, zavese ali stalaktiti.

Monokristalni oziroma *trikotni* kapniki, kot jih pri nas največkrat imenujemo, so redka oblika kalcita. Najpogostejši monokristalni kapniki so lahko posamezni heliktiti ali stalaktiti, monokristalni stalagmiti pa so zelo redki (opisali so jih v Romuniji, Texasu, New Mexicu, Južni Afriki in Braziliji). Monokristalni kalcita rastejo v teh primerih iz nizko nasičene raztopine pri visoki vlagi in visokem parcialnem tlaku CO_2 ter minimalnem pretoku zraka, kar je značilno za zaprte jame.

Zavese se na stenah izločajo iz mezeče vode. Zavesa je lahko različnih oblik, ravna ali valovita, raste v plasteh, ki so različne po barvi in velikosti kalcitovih kristalov. Kristali v plasti rastejo



Presek odlomljenih trikotnih kapnikov iz Jame v Borštu. Stranica preseka zgornjega stalagmita je dolga 8 cm. Foto: Nadja Zupan Hajna



*Okrog 2 m visoka zavesa v Stari jami; Postojnska jama. Za zaveso je značilno, da kristali kalcita rastejo po plasteh, ki so lahko različno obarvane.
Foto: Nadja Zupan Hajna*

iz raztopine pravokotno na steno in smer toka. Če so zadnje plasti zaveso sestavljene iz makroskopskih kristalov kalcita, je rob zaveso nazobčan.

Koralaste sige so najrazličnejših koralam podobnih oblik, velikosti in barv. Najdemo jih na tleh, kot stalagmite, ali pa preraščajo jamske stene, stalaktite in stalagmite. Značilno je, da za svojo rast v jami potrebujejo precej vlažen zrak in da rastejo iz pljuskajoče, pršeče in kapilarne vode. *Ježki* so koralasta oblika sige, kjer iz stoječih ilovnatih kapnikov rastejo sigove iglice, bodice.



*Stromatoliti stalagmit iz Šmidlove dvorane v Škocjanskih jamah.
Foto: Nadja Zupan Hajna*



*Raznobarvna siga iz Pisanega rova Postojnske jame. Višina osrednjega, kijastega stalagmita, je 2,8 m.
Foto: Nadja Zupan Hajna*



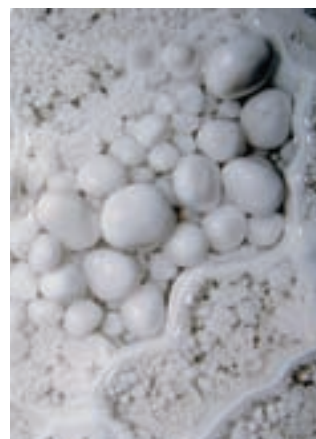
Koralasta siga iz jame na trasi avtoceste Čebulovica – Dane. Širina motiva je 12 cm. Foto: Franjo Drole



Paleta, iz katere izraščajo cevke, v Martinski jami; premer palete približno 20 cm. Foto: Nadja Zupan Hajna

Ponvice so dokaj pogosta oblika sige. Za njihov nastanek je potreben določen naklon pobočja in dokaj stalen vodni tok. Pri nas najdemo v jamah različne ponvice, od zelo majhnih, ki so velike nekaj milimetrov, do tako velikih, kot so tiste iz Dvorane ponvic v Škocjanskih jamah, ki so globoke od 10 do 40 cm. Te ponvice so se oblikovale na nagnjenem ilovnatem pobočju, na površini okrog 80 m² in jih je okrog 100. Ponvicam podobne so sigove pregrade, ki se izločajo takrat, kadar teče voda čez različne ovire v strugi in pri tem izhaja ogljikov dioksid, kar povzroči izločanje kalcita.

Jamski biseri so bolj ali manj gladke kroglaste konrecije. Nastajajo pod kapljajočim curkom ali v plitvi vodni ponvici s počasnim, vendar stalnim vodnim dotokom, ko se okrog že obstoječega jedra izloča kalcit v koncentričnih plasteh. Koncentrične so, ker se kalcit izloča okrog jedra v vseh smereh enakomerno hitro. Jedro je lahko iz različnih drobcov kamnine, kapnikov itd. Biseri so veliki od nekaj milimetrov do 1 cm, redko so večji. Nekateri so v prerezu podobni onkoidom, njihove plasti so valovite kot pri stromatolitih. V teh primerih so izločanje kalcita verjetno povzročili organizmi (bakterije ali alge). Biseri so največkrat bele barve, lahko pa tudi sive ali rumene. Če se biseri nehajo premikati, se z novo rastočo sigo prilepijo na podlago.



Jamski biseri iz Postojnske jame; izrez 10 cm. Foto: Andrej Mihevc

Heliktiti so manj pogosta oblika sige; rastejo iz kapilarne vode, ki meži skozi tanke kanale, največkrat skozi prečne razpoke v stalaktitih.

Rastoči heliktiti sledijo načelom kristalizacije in ne gravitacije. So brezbarvni, beli in rumeni. Lahko so različnih oblik, razlikujemo predvsem dve: tanke dolge cevke, ki med rastjo zavijajo v različne smeri, in kratke čokate monokristale, ki so podobni manjšim rogovom.

Plavajoče skorje ali *rafti* so tanke kalcitne skorje, ki rastejo iz ujete vode v lužah in ponvicah. Skorje se na gladini izločajo zaradi spremembe parcialnega tlaka CO_2 . Večje skorje potonejo, ker postanejo pretežke, še posebej zato, ker na njihovi spodnji strani rastejo kalcitovi kristali, ki jih še dodatno obtežijo. Na dno se usedejo tudi v primeru, če voda v ponvicah izhlapi.

Zanimiva oblika sige je tako imenovano **jamsko mleko**, ki ga imenujejo tudi gorsko mleko, Marijino mleko itd. Izloča se kot mikrokristalna bela plastična masa na stenah in sigi, ki ima med mineralnimi zrni do 70 % vode; kadar je suha, pa je precej drobljiva. Mineralna sestava jamskega mleka je različna, največkrat je iz kalcita ali aragonita, lahko pa je tudi iz nekarbonatnih mineralov. Nastaja s kemičnim obarjanjem iz prenasičenih raztopin in tudi s pomočjo mikroorganizmov. Posebno pogost je v visokogorskih jamah. Jamsko mleko imenujemo tudi preperino apnenca in dolomita, ki ostaja na jamskih stenah in vsebuje precej vlage, vendar pa z izločanjem kalcita nima nobene zveze.



Več kot 20 cm dolg heliktit iz Leopardove jame, ki izrašča iz razpoke v stalaktitu. Foto: Nadja Zupan Hajna

Posebnost so tudi tako imenovani **biokapniki**, ki kot stalaktiti rastejo v vhodnih delih jam ali na stenah udornic in z rastjo svojih konic sledijo svetlobi. Kalcit se izloča zaradi delovanja mikroorganizmov, vendar mehanizem njihove rasti še ni popolnoma poznan. Ena od zanimivosti so stromatolitni kapniki, ki jih najdemo pri vhodu v Škocjanske jame v Šmidlovi dvorani. Rebrasti stromatolitni stalagmiti so v bistvu sladkovodni stromatoliti, opisani tudi v Avstraliji, ki se izločajo iz prenikajočega curka vode s pomočjo cianobakterij, ki rastejo na vlagi, do koder še seže dnevna svetloba. Razpotegnjeni so v smeri prepriha, ker je kapljanje vode usmerjeno v smeri pihanja.

Starost posameznih kapnikov je znana samo iz nekaterih slovenskih jam. Starosti so bile določane z absolutnima radioaktivnima metodama ogljika ter uran/torija. Metodo radioaktivnega izotopa ogljika (^{14}C) se uporablja za datacije relativno mlajših kapnikov, ker je njen doseg do 40.000 let. Z U/Th metodo, ki temelji na razmerju med izotopoma urana ^{234}U in torija ^{230}Th , datiramo starejše kapnike, ker je njen doseg do 350.000 let. Še pred dobrimi desetimi leti je prevladovalo mnenje, da so sige pri nas zelo mlade. Največ sige naj bi se, po takratnem mnenju, izločilo po zadnji ledeni dobi, predvsem v atlantiku (pred okrog 6.000 leti), ko je bilo pri nas precej toplo. Vendar so datacije z absolutnimi metodami pokazale, da je veliko do sedaj preiskanih sig starejših od 10.000 let, pa tudi starejših od dosega U/Th metode, to je 350.000 let. Starejše kapnike lahko datiramo z ESR metodo (rezonanca elektronskega spina), ki s sedanjo metodologijo, prirejeno za sige, seže do starosti 3 milijone let, vendar ni najbolj zanesljiva. Trenutno najstarejša s to metodo datirana siga v Sloveniji je iz Pisanega rova v Postojnski jami, kjer naj bi bilo rdeče jedro stalaktita staro 530.000 let. V zadnjem času jamske sedimente čedalje pogosteje datiramo s paleomagnetno metodo, ki pa je le primerjalna. Zato je potrebno poleg geomagnetne časovne skale za natančnejšo opredelitev starosti uporabiti še kakšno drugo metodo. Tako je bila v jami Matarskega podolja posredno, glede na določitev fosilov in magnetnih lastnosti sedimentov v profilu, določena do sedaj najstarejša siga pri nas in sicer nekaj več kot 2 milijona let.

Kalcit in aragonit sta polimorfa kalcijevega karbonata, kar pomeni, da imata isto kemično sestavo, vendar drugačno kristalno strukturo. Najpogostejša oblika **aragonita** so igličasti skupki, drobne prevleke in sige v obliki stalaktitov in stalagmitov, kjer se v istem kapniku lahko izmenjuje s kalcitom. Kateri mineral se bo izločal v določenem primeru, je odvisno od trenutne sestave raztopine, ki doteka v jamski prostor. V jamskem okolju je pri normalnih pogojih aragonit glede na kalcit manj stabilen in sčasoma prehaja v kalcit. Vprašanje je, zakaj potem aragonit v jamah sploh je, posebno če vemo, da je za kalcitom aragonit drugi najbolj pogosti jamski mineral, tako po svetu kot v slovenskih jamah.



*Jamsko mleko na spodnjem delu stalaktita, ki je bil potopljen v ponvico v Jami S647 v predoru Kastelec; izrez 3,5 cm.
Foto: Nadja Zupan Hajna*



Ledeni stalagmiti iz vhodnega dela Potočke zijalke. Karbidovka je postavljena za merilo.
Foto: Andrej Mihevc

O problemu izločanja aragonita v jamah je veliko teorij, najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na njegovo izločanje pred kalcitom, pa so magnezijevi ioni v raztopini. Na zvišanje razmerja Mg/Ca v raztopini, bolj kot sprememba tlaka CO₂, vpliva evaporacija, ki je vzrok za zaporedno izločanje kalcita, aragonita in Mg mineralov iz raztopine. Mg²⁺ ion v raztopini deluje tudi kot ovira pri nastajanju kalcitovih kristalizacijskih jeder, zaradi česar ima raztopina zadostno prenasíčenje, ki omogoča izločanje aragonita.

Pomemben dejavnik pri izločanju aragonita je tudi stroncijev ion, ki pospešuje nastajanje aragonitnih kristalizacijskih jeder. Ko začnejo jedra nastajati, se aragonit izloča na račun kalcita, ki ima višjo kristalizacijsko bariero. Na razmerje med izločanjem kalcita in aragonita imajo verjetno vpliv tudi pH, temperatura, sledni elementi in organske snovi.

Jamske ledene tvorbe nastajajo z zmrzovanjem kapljajoče in pronicajoče vode skozi razpoke v kamnini ter z zmrzovanjem vodnih hlapov. **Led** v jamah ima najpogosteje obliko prosojnih do prozornih stalaktitov, stalagmitov, stebrov, zaves in ledenih jezer. Kapniki so navadno gladki, brez izraščajočih kristalov. Pri nas so ledeni kapniki značilni za vhodne dele nekaterih jam visokogorskega krasa, pozimi pa tudi za vhodne dele nižje ležečih jam. Stalaktiti so kar ledene sveče, ki visijo s stropa in sten. V jamskih tleh, ki zmrzujejo, pa najdemo do več centimetrov dolge vlaknate ledene kristale. Najbolj slikoviti so po obliki kijasti stalagmiti, ki v vhodnih delih jam zrastejo v višino tudi preko 2 m. V ledenih jamah na ploskvah ledu včasih najdemo tudi pravilne kristale ledu, ki nastanejo s sublimacijo. V posameznih primerih se kristali oblikujejo v šesterostranih stopničastih lijakih, najpogosteje pa v igličastih skupkih. V posameznih primerih pa lahko kristalizirajo v ploščatih in več centimetrov velikih heksagonalnih kristalih.

Literaturni viri:

- HILL, C. A., P. FORTI, 1986: *Cave Minerals of the World*, 238 str. National speleologica society, Huntsville.
- COX, G., J. M. JAMES, R. A. L. ARMSTRONG, K. E. A. LEGGETT, 1989: *Stromatolitic cryfish-like stalagmites*, str. 339-358. Proc. Univ. Bristol Speleological Society, 18, Bristol.
- PLACER, L., B. OGORELEC, J. ČAR., M. MIŠIČ, 1989: *Nekaj novih podatkov o Ravenski jami na Cerkljanskem*, str. 129-138. Acta carsologica, št.18, SAZU, Ljubljana.
- KNEZ, M., N. ZUPAN, 1992: *Minerali v slovenskih kraških jamah*, 43 str. IZRK ZRC SAZU, Postojna.
- SELF, C. A., C. A. HILL, 2003: *How speleothems grow: an introduction to the ontogeny of cave minerals*, str.130-151. Journal of Cave and Karst Studies 65(2), National Speleological Society, Huntsville.