

Brajerjeva jama

– siga in njena sestava

Nadja Zupan Hajna
Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna

Uvod

V Brajerjevi jami v Grč vrhu pri Mirni Peči so člani Jamarskega kluba Novo mesto našli zanimive kapniške oblike, ki kažejo na izločanje v drugačnih pogojih, kot so v jami prisotni sedaj. V jami so poleg običajnih kapniških oblik, kot so stalagmiti, stalaktiti, stebri in slapovi, prisotni tudi helektiti najrazličnejših oblik in aragonitni kristali. Helektiti so značilni predvsem za jame na Krasu (Leopardova jama, Divaška jama), kjer jih je tudi največ. Aragonitne kristale najdemo samo v jamah, ki so oblikovane v dolomitih ali pa so dolomitne plasti prisotne v neposredni bližini, saj je za izločanje aragonita nujno potrebna prisotnost magnezijevih ionov v raztopini.

Izločanje in rast sige

Siga je kemična usedlina, ki se izloči iz prenasičene 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 ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{Ca}^{2+} + (\text{HCO}_3)^-$). V trenutku, ko raztopina obogatena s kalcijevimi in hidrogenkarbonatnimi ioni doseže jamski prostor, se ravnotežje v raztopini poruši. Raztopina se prezračí, predvsem zaradi spremembe parcialnega tlaka CO_2 in temperature, in začne se izločati kalcit: $\text{Ca}^{2+} + (\text{HCO}_3)^- = \text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Če so za to dani pogoji se kalcit izloča v posameznih kristalih, največkrat pa v obliki sige. Oblika sige je odvisna od načina dotoka vode, mineralne sestave, 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. Najpogostejša minerala, ki gradita sigo v slovenskih kraških jamah, sta kalcit CaCO_3 in aragonit CaCO_3 .

Lastnosti posameznih vrst sige in kalcitnih kristalov so v članku povzete po Hill & Forti (1986) in Zupan Hajna (2006). Sige razlikujemo glede na zunanjo obliko, način nastanka in kristalografske lastnosti. 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 (mehanika 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 izločajo kalcitni kristali v plasteh, ki rastejo ena vrh druge. Nastajajo obloge, "slapovi" in "baldahini". 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.

Kapniki, kot so stalaktiti in stalagmiti, rastejo iz kapljajoče vode v vzdolžni smeri kapljanja. Cevka, ki je osnova za rast stalaktita, je zgrajena iz kristalov, ki rastejo 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. Pri rasti stalagmitov se plasti kalcitnih kristalov izločajo druga vrh druge. Zanje so značilni stebričasti kristali, ki rastejo pravokotno na podlago; tako kot pri slapovih, baldahinih itd.

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 oranžno-rjavo in krem. V tem primeru se organske molekule vgradijo v posamezne kalcitne kristale ali pa predstavljajo pigment med posameznimi kristali. Kovinski ioni se vgradijo v posamezne kristale ter povzročijo difuzijski odsevni spekter, ki obarva sigo modro in zeleno (Cu), roza (Mn), roza in modro (Co) in rumeno (Ni). Pigmenti pa so največkrat železovi in manganovi oksidi ter hidroksoidi in obarvajo sigo rdeče, rjavo in črno. Temnejše plasti v sigi 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.

Oblike sige, prisotne v Brajerjevi jami

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 do 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 kalcit kristalizira s kristalografsko c-osjo pravokotno na steno cevke. Stalaktit se pri tem vedno bolj debeli. Stalaktit ima vedno votlo cevko v sredini, razen, če se kasneje, v času rekristalizacije, cevka zapolni z novo rastočimi kristali kalcita, ki pa so navadno brezbarvni in se da dobro razločiti, da gre za zapolnitev prej prazne cevke.

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.

Kalcitni kristali se lahko izločajo tudi kot individualno rastoči kristali v dnu ponvic in na površini že prej obstoječe sige (lahko na stalaktitu, stalagmitu, zavesi, itd.). Kalcit se v sigi večinoma izloča v obliki drobnih kristalnih 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 zrastle pod gladino vode v sedaj suhih ponvicah, kjer pa se nekdanji nivo vode še vidi, so znani iz Jame pod Babjim zobom. Veliki kristali se lahko izločijo tudi iz raztopin, "mezečih" 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 krasa, vendar takih v naših jamah ne poznamo.

Na jamskih stenah, ali pa že iz prej zrastle sige, lahko rastejo **posamezni majhni kalcitni kristali**, ki zaradi rasti iz istega centra sestavljajo ježke ali rože. Tak primer so tudi kristali, ki v skupkih rastejo iz zasiganih sten Brajerjeve jame. Vsak posamezni kristal raste iz vodnega filma, ki obliva vsak kristal posebej, prirašča pa najbolj na konicah. Posamezne iglice lahko zrastejo že kot kalcitni kristali, največkrat pa se v jamah, kjer je matična kamnina dolomit, izločijo najprej aragonitni kristali (značilne



Mreža helektitov, ki se preraščajo v vseh smereh s cevkami in rastočo zaveso.

Foto Jože Avbar.

iglice), ki pa sčasoma preidejo v aragonit. Kalcit zamenja aragonit (preraščanje kalcita po aragonitu), kalcitni kristali pa obdržijo obliko prvotnih aragonitnih kristalov.

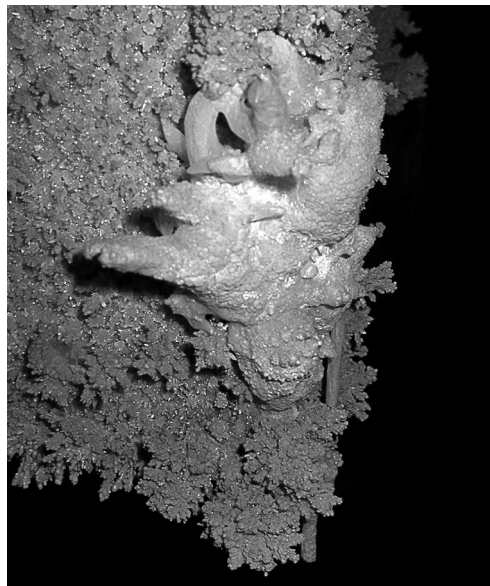
V sigah (kapniki, slapovi, baldahini), ki so jih prvotno gradile plasti drobno kristalnega kalcita, sčasoma pride do prekristalitve. To pomeni, da iz več majhnih kristalov zraste en večji. Višja je stopnja njene prekristalizacije, večji so posamezni kristali v sigi in starejša je siga, ker se za oblikovanje velikih kristalov potrebuje veliko časa. Končna stopnja rekristalizacije je, da že sam kapnik (na primer stalagmit) dobi obliko monokristala. Monokristalni kapnik v redkih primerih lahko zraste že kar neposredno iz raztopine. Najpogostejši monokristalni kapniki, ki zrastejo neposredno iz prenasičene razopine, so helektiti, redko stalaktiti, monokristalni stalagmiti pa so zelo redki.

Helektiti so manj pogosta oblika sige in rastejo iz mezeče kapilarne vode, ki mezi skozi tanke kanale – največkrat skozi prečne razpoke v stalaktitih. So prozorni, brezbarvni, beli ali rumeni. Lahko so različnih oblik. Razlikujemo predvsem dve obliki: tanke dolge cevke, ki med rastjo zavijajo v različne smeri in kratke čokate monokristale, ki so podobni manjšim rogovom. Razmerje med izločanjem iz kapilarne vode in filma, ki teče čez helektit, še ni popolnoma razjasnjeno (lahko gre za oboje). Rastoči helektiti sledijo načelom kristalizacije in ne gravitacije. Za helektite, ki zrastejo iz kapilarne vode, je značilen sredinski kanal; helektiti, ki zrastejo iz mezeče vode kot monokristali, pa te sredinske cevke nimajo. V primerih, da se med svojo rastjo helektit na enem koncu odebeli (iz odebeljenega konca začne rasti cevka) dobi obliko metulja, ali pa polovice metulja.

Aragonit je polimorf kalcijevega karbonata, kar pomeni, da ima isto kemično sestavo kot kalcit, vendar drugačno kristalno strukturo. Najpogostejša oblika **arago-**

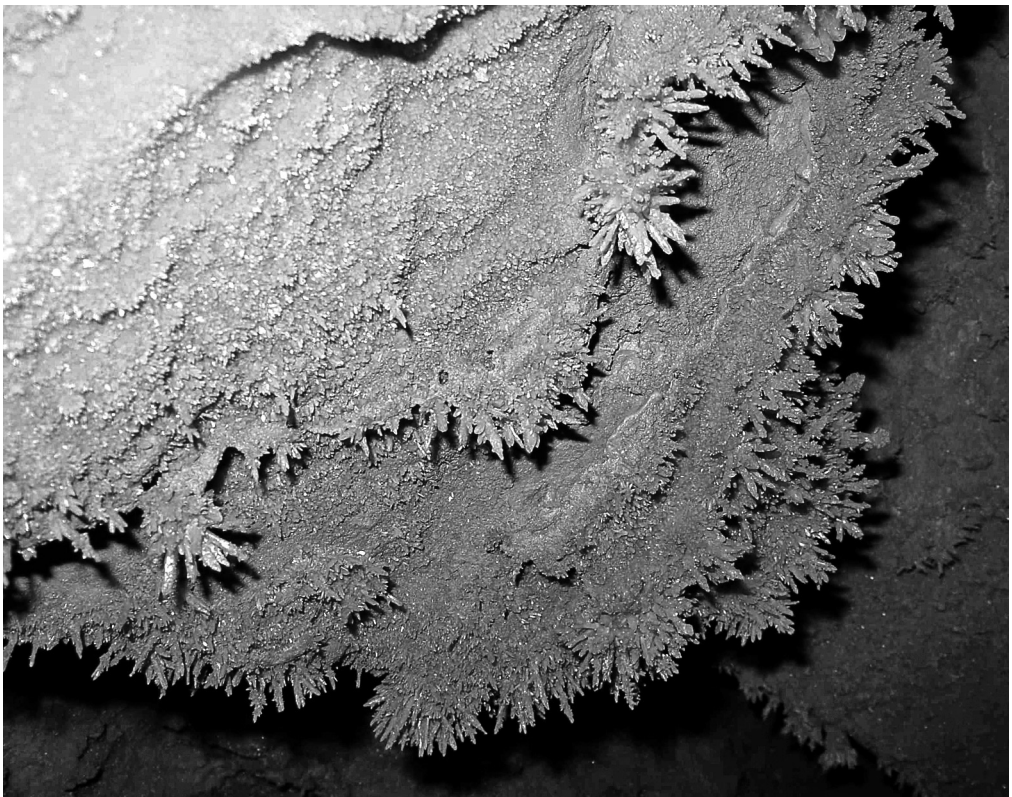


Nepopolna "polovica metulja" – oblika sige, ki nastane, kadar se helektit na enem koncu začne odebeliti ali iz njega začne rasti stalaktit. Foto Andrej Gašperič.



Čokat razvejan helektit. Foto Jože Tomšič.

nita 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 obstaja? O problemu izločanja aragonita v jamah je veliko teorij. Najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na njegovo izločanje pred kalcitom, so magnezijevi ioni v raztopini. To pomeni, da voda, iz katere se izloča aragonit, prej raztaplja dolomit, ki mora biti nekje v bližini jame, da se lahko obogati tudi z Mg ioni. 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 obenem 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 aragonitovih 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.



Skupki kalcitnih kristalov, ki rastejo iz skupnega centra, sestavljajo ježke ali rože. Lahko zrastejo že kot kalcitni kristali ali pa kalcitni kristal preraste aragonitnega in zadrži njegovo igličasto obliko. Foto Mihael Rukše.

Hitrost izločanja sige in njena starost

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, ter nasičenost vode s Ca in karbonatnimi ioni. Nekateri od sigotvornih curkov lahko prenehajo delovati, pretok vode (kapljanje) se lahko za vedno ali samo za nekaj časa prekine. To pomeni, da se je odprta razpoka zamašila s prstjo, prinešenim sedimentom, odkrušenim kamenčkom, itd., ali pa se je zaradi spremembe pogojev kalcit odložil že v sami razpoki. Tako se siga, ki je rasla pod sedaj neaktivnim curkom, ne izloča več. Če pa se čez nekaj časa (nekaj let ali več tisoč let) pot za vodo spet odpre, se siga ponovno začne odlagati. V posameznih kapnikih (plasteh sige) lahko tako opazujemo prekinitve (hiatuse) v rasti sige, ki pa niso vedno povezane s klimatskimi spremembami v okolju (manj vode, bolj mrzlo, manj CO₂ na razpolago, itd.), ampak so lahko čisto lokalnega izvora.

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 starejše od 350.000 let (Ford & Gospodarič, 1989; Zupan, 1991; Mihevc, 2001). 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 (Ikeya et al., 1983). V zadnjem času jamske sedimente čedalje pogosteje datiramo s paleomagnetno metodo, ki pa je le primerjalna. Poleg geomagnetne časovne skale za natančnejšo opredelitev starosti je zato potrebno 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 s starostjo nekaj več kot 2 milijona let (Mihevc et al., 2005).

Literatura

- Ford, D. & Gospodarič, R., 1989: U series dating studies of Ursus spelaeus deposits in Križna jama, Slovenia. *Acta carsologica*, 18, 39-51, Ljubljana.
- Ikeya, M., Miki, T. & Gospodarič, R., 1983: ESR Dating of Postojna Cave Stalactite. *Acta carsologica*, 11 (1982), 117-130, Ljubljana.
- Hill, C. A., P. Forti, 1986: Cave Minerals of the World. National speleological society, 238 str., Huntsville.
- Mihevc, A., 2001: Speleogeneza Divaškega krasa. Zbirka ZRC, 27, 1-180. Ljubljana.
- Mihevc, A., Bosak, P., Pruner, P. & Zuoan Hajna, N., 2005: Datacije sedimentov iz Račiške pečine. V: Zborovanje slovenskih jamarjev in raziskovalcev krasa, Gorjuša 2005 : zbornik 2004. Domžale: Društvo za raziskovanje jam, str. 30.
- Zupan Hajna, N., 2006: Siga v kraških jamah. V: JERŠEK, Miha (ur.). Mineralna bogastva Slovenije, (Scopolia, Supplementum, 3): Prirodoslovni muzej Slovenije: = Slovenian Museum of Natural History, 2006, str. 192-203, Ljubljana.
- Zupan, N., 1991: Flowstone datations in Slovenia. *Acta carsologica*, 20, 187-204, Ljubljana.