



# Kako je nastala

# špilja Veternica?

**Damir Lacković** | Hrvatski prirodoslovni muzej; Speleološki odsjek PDS »Velebit«

**Andrej Stroj** | Hrvatski geološki institut; Speleološki odsjek PDS »Velebit«

**Petra Bajo** | Hrvatski geološki institut; Speleološki odsjek PDS »Velebit«

**Bosiljka Glumac** | Department of Geosciences, Smith College, Northampton, Massachusetts, USA

**Ira D. Sasowsky** | Department of Geosciences, The University of Akron, Ohio, USA

*Erozijom otkriveni slojevi saljeva Kameni slap, važan detalj u istraživanju postanka špilje Veternice. Slojevi su taloženi između 212000 i 205000 godina prije sadašnjosti  
Autor: Ira D. Sasowsky*

Špilja Veternica predstavlja izuzetnu turističku atrakciju u neposrednoj blizini glavnog grada Republike Hrvatske, a u prošlosti je služila kao jedinstveni poligon za uvježbavanje speleoloških vještina brojnim naraštajima hrvatskih speleologa. Osim toga, Veternica je škrinja iz koje su naraštaji hrvatskih geologa crpili vrijedne informacije o paleontološkim i ekološkim uvjetima u geološkoj prošlosti. Posebno se ističu radovi paleontologa Maleza iz sredine dvadesetog stoljeća. Cilj je ovoga rada približiti široj speleološkoj javnosti rezultate istraživanja koja su se u špilji provodila posljednjih dvadeset godina, a sva su usmjerena k boljem razumijevanju postanka ovog jedinstvenog speleološkog objekta Središnje Hrvatske.

## 1. Kratki pregled geoloških istraživanja Veternice

Prva detaljnija speleološka i geološka istraživanja u Veternici započinje Poljak (1934), a nastavljaju, između ostalih, Malez (1965), Čepelak (1977), Panuška i Marjanac (1977), Sutlović (1991), Marjanac i dr. (2005) i Marjanac (2007).

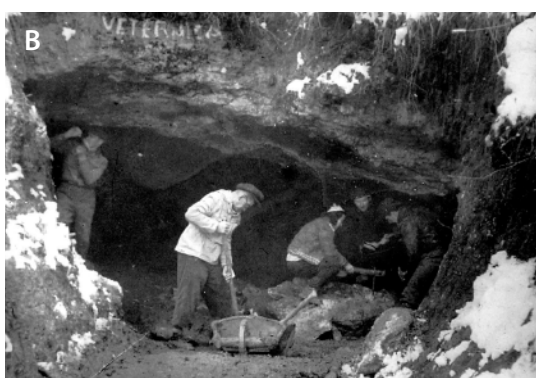
Malez (1965) je proveo sustavna istraživanja ulazne dvorane u špilji, pri čemu je iskopavanjem sedimenta prirodni ulaz proširen s  $0,45 \times 0,29$  m (Hirc, 1905) na oko  $4 \times 3$  m te je otkrivena bogata kasnopleistocenska fauna, kao i neandertalski artefakti (Slika 1). Reviziju ovih sedimenata i paleontoloških nalaza te njihovu paleoklimatsku interpretaciju napravili su Miracle i Brajković (1992; 2010). Prema ovoj studiji sedimenti ulazne dvorane istaloženi su u posljednjih 120 000 godina, nakon prestanka hidrološke aktivnosti tog dijela špilje.

Malez (1965) je također interpretirao i postanak kanala postupnim povlačenjem i spuštanjem aktivnog toka vode od ulaza prema unutrašnjosti špilje, s time da predloženi model nije uzeo u obzir promjene reljefa tijekom razvoja špilje.

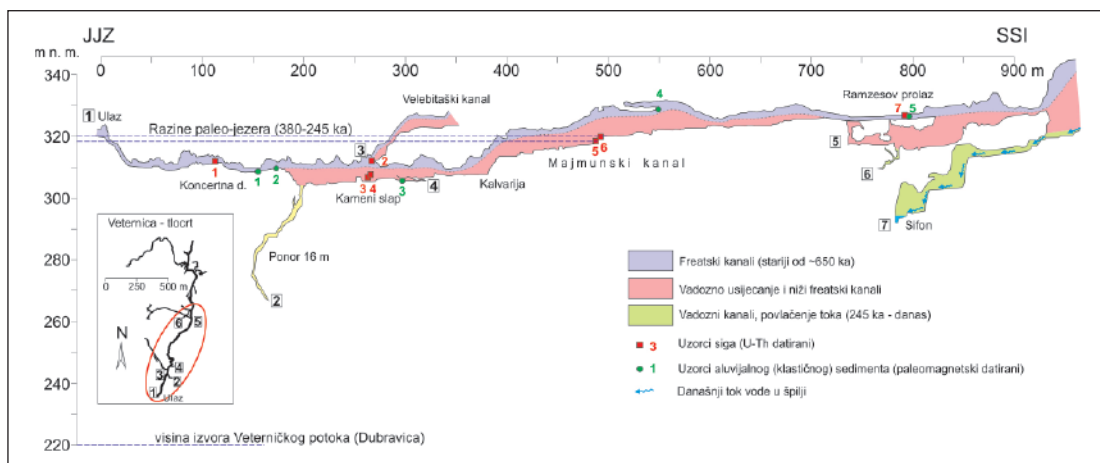
Obalne ploče iz Majmunskog prolaza na oko 450 m od ulaza te saljev Kameni slap (slika lijevo) u turistički posjećenom dijelu špilje na oko 250 m od ulaza prvi su proučavali Lacković i Horvatinčić 1999. godine (neobjavljeno). Pokušaj određivanja starosti uzoraka metodom radioaktivnog ugljika  $^{14}\text{C}$  nije bio uspješan jer su dobiveni rezultati prelazili gornju granicu tada korištene metode (tj. bili su veći od 35 000 godina).

Istraživanje je nastavljeno 2008. i 2009. godine izradom elaborata za Park prirode Medvednica (Buzjak i dr., 2009). Uranij-torij (U-Th) analize određivanja starosti uzoraka siga i analize izotopnog sastava kisika i ugljika obalnih ploča i saljeva Kameni slap obavljene su u laboratorijima u Sjedinjenim Američkim Državama (Lacković i dr., 2011; Slika 2), a mineraloško-petrografska istraživanja potočnih sedimenata Veternice provedena su u Hrvatskom prirodoslovnom muzeju (Crnjaković i dr., 2010). Kemijske analize potočnih sedimenata napravljene su u komercijalnom laboratoriju ACME u Vancouveru u Kanadi. Rezultati istraživanja predstavljeni su djelomično na Hrvatskom geološkom kongresu 2010. godine i objavljeni u časopisu *Geologia Croatica* (Crnjaković i dr., 2010; Lacković i dr., 2011).

Geološka istraživanja Veternice nastavljena su 2013. godine uzorkovanjem **klastičnih potočnih sedimenata za paleomagnetske** analize te



Slika 1. Prirodni ulaz špilje Veternice (A) proširen je i produbljen paleontološkim iskopavanjima sedimenta (B) Preuzeto iz: Poljak (1934) (A); Malez (1965) (B)



Slika 2. Profil istraživanog dijela špilje Veternice, obojen u skladu s tipom morfologije kanala. Na profilu su označene razine paleojezera i lokacije uzorkovanja špiljskih sedimenata. Preuzeto iz: Lacković i dr., 2011; Stroj i dr., 2024.

**Klastični sediment** je taložina čestica nastalih fizičkom razgradnjom (dezintegracijom) starijih stijena.

uzimanjem novih uzoraka siga za analize određivanja starosti U-Th metodom datiranja. Povezivanje rezultata starih i novih analiza siga i špiljskih potočnih sedimenata s rezultatima speleomorfološkog kartiranja kanala, površinskom topografijom i tektonskom aktivnošću Medvednice iznjedrilo je najnoviji rad (Stroj i dr., 2024) koji je, zajedno s rezultatima prethodnog rada (Lacković i dr., 2011), pojednostavljeno prikazan u nastavku.

## 2. Metode i rezultati istraživanja

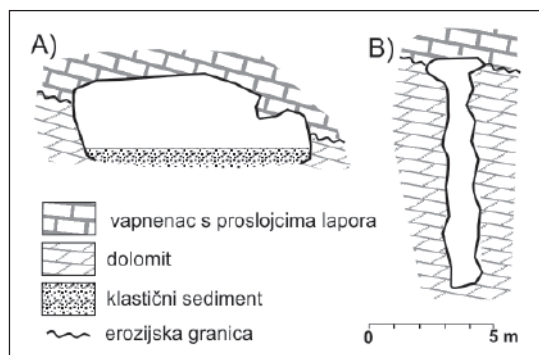
### 2.1. Speleomorfološko kartiranje

Kartiranje morfoloških značajki špiljskih (ili jamskih) kanala osnovna je metoda u istraživanjima speleogeneze speleoloških objekata. Morfološke značajke pružaju direktan uvid u hidrološke uvjete koji su vladali tijekom nastanka podzemnih krških kanala. U tipičnim krškim speleološkim objektima tako razlikujemo: 1. freatske (Slika 3A), 2. vadozne i 3. kanale oblika ključanice (Slika 3B). Freatski kanal nastaje u **freatskoj zoni**, u kojoj voda korozivski širi kanal jednako u svim smjerovima, pri čemu nastaje »kružni« poprečni presjek kanala, tzv. freatska cijev. Vadozni kanal nastaje radom podzemnog

**Vodno lice** – razina podzemne vode na kojoj se razdvajaju vadozna i freatska zona. Sezonski se mijenja, ovisno o dotoku vode s površine.

vodenog toka u **vadoznoj zoni**. Vodeni tok teče po dnu kanala te ga pod utjecajem gravitacije produbljuje, pri čemu nastaje »vertikalno izduženi« poprečni presjek kanala, tzv. vadozni kanjon. Kanal

**Vadozna (prozračna) zona** je hidrografska zona krškog podzemlja u kojoj su šupljine ispunjene zrakom i vodom koja se procjeđuje s površine i gravitacijski kreće prema vodnom licu. Nalazi se iznad razine vodnog lica.



Slika 3. Karakteristični presjeci špiljskih kanala koje nalazimo u špilji Veternici: A) Freatski kanal; B) Kanal oblika ključanice. Preuzeto iz: Lacković i dr. (2011).

**Paleomagnetno datiranje** je određivanje starosti stijena na temelju promjena intenziteta i smjera zemljinog magnetskog polja tijekom geološke prošlosti.

oblika ključanice nastaje kada freatska cijev uslijed snižavanja razine **vodnog lica** dospije u vadoznu zonu, pa se u njezinom donjem dijelu usijeca vadozni kanjon (Bočić, 2016).

Speleomorfološka kartiranja špiljskih kanala ukazuju na iznimno raznoliku morfologiju pojedinih dijelova špilje Veternice. Nadalje, speleomorfološke karakteristike kanala, kao i njihov položaj, omogućili su razlikovanje nekoliko faza speleogeneze.

Prvi dio glavnog kanala špilje, koji se prostire od ulaza do 180 m (od ulaza do Skupštinske dvorane), karakteriziraju široki, kružni do eliptični presjeci kanala, s dnom ispunjenim potočnim (klastičnim) sedimentima (Slike 2, 4A, 4B i 4C). Cjelokupni oblik kanala, nedostatak ravnomjernog nagiba dna kanala (tipičnog za vadozno usijecanje) te blago valovita površina potočnih sedimenta ukazuju na prisutnost freatskih ili **epifreatskih** uvjeta u ovom dijelu špilje sve do samog kraja hidrološke aktivnosti. Za bolju ilustraciju, na Slici 4D prikazan je recentni primjer iz izvor-špilje Zagorska Mrežnica, gdje se u današnjim freatskim uvjetima talože slični sedimenti u obliku humaka nalik fosilnim humcima u Veternici.

Drugi dio špilje, koji se proteže od 180 do 380 m od ulaza (od Skupštinske dvorane do Kalvarije), prvobitno je formiran u freatskim uvjetima te je

**Freatska (saturirana) zona** je hidrografska zona krškog podzemlja u kojoj su sve šupljine potpuno ispunjene vodom. Nalazi se ispod razine vodnog lica.



*Slika 4.*

- A) Freatski oblik glavnog kanala ispred Koncertne dvorane ispunjen potočnim sedimentom;*  
*B) Valovita površina sedimenta nastala taloženjem u freatskim uvjetima (sifonu);*  
*C) Fosilni muljno-pješčani humak u Koncertnoj dvorani nastao taloženjem u vodom potpuno ispunjenom kanalu (sifonu);*  
*D) Recentni muljno-pješčani humak u sifonu izvor-špilje Zagorska Mrežnica.*

*Autori: Damir Lacković (A, B i C) i Petra Kovač Konrad (D)*



**Slika 5.**  
**A)** Primjer freatskog kanala na oko 270 m od ulaza (iscrtkan na slici) koji je naknadno produbljen vodenim tokom u vadoznim uvjetima;  
**B)** Majmunski prolaz s kružnim freatskim presjekom u vršnom dijelu kanala (iscrtkan na slici) i duboko usječenim kanjonskim kanalom u podu (spaja se s kaminom prikazanim na Slici 5D);  
**C)** Vrtložni lonac na dnu Majmunskog prolaza sa in situ valuticama koje su sudjelovale u njegovom formiranju tijekom vadozne faze razvoja kanala;  
**D)** Vadozni kanjonski profil Majmunskog prolaza.  
 Autori: Ira D. Sasowsky (A, C i D) i Damir Lacković (B)

**Epifreatska zona** je hidrografska zona krškog podzemlja između najviše i najniže razine vodnog lica. Dio godine nalazi se u freatskoj, a dio godine u vadoznoj zoni.

naknadno produbljen tokom vode u vadoznim uvjetima, što je ostavilo jednoličan nizvodni smjer nagiba dna kanala (Slika 5A). Nekadašnji vadozni potok završavao je u bočnom kanalu Ponor 16 m, na dnu Skupštinske dvorane.

Treći dio glavnog kanala, koji se proteže od Kalvarije (na 380 m od ulaza) dalje u špilju, tzv. Majmunski prolaz, uzak je i visok do oko 20 m. Na samom vrhu profila u ovom dijelu špilje nalazi se freatski kanal (Slika 5B) ispod kojega je naknadno u vadoznim uvjetima usječen duboki kanjon (Slike 5C i 5D).

## 2.2. Potočni (aluvijalni klastični) sedimenti

Taloženje potočnih sedimenata pokazatelj je povremene ili stalne hidrološke aktivnosti špiljskih kanala. Mineraloško-petrografske analize fosilnih i recentnih potočnih sedimenata, uzorkovanih na više mjesta iz glavnog i Velebitaškog kanala, pokazuju da oba tipa sedimenta odražavaju geokemijski sastav izvorišnih stijena (Crnjaković i dr., 2010). Povišen sadržaj nekih elemenata u fosilnom sedimentu Veternice, odnosno njihov izostanak u analiziranim uzorcima recentnih sedimenata, interpretiran je kao rezultat erozije i potpunog nestanka nekih izvorišnih stijena u zaleđu Veternice (Crnjaković i dr., 2010), do kojih je došlo tijekom speleogeneze ove špilje.

Fosilni potočni sediment uzorkovan je za paleomagnetske analize na pet lokacija duž glavnog kanala na različitim nadmorskim visinama (Slika 2): u turističkom dijelu špilje (tri lokacije), u Majmunskom prolazu te u kanalu iza Ramzesa (Slike 6A do 6D), a

**Aluvijalni sediment** je sediment nanesen vodenim tokom (riječni ili potočni).



*Slika 6. Lokacije uzorkovanja klastičnog sedimenta za paleomagnetske analize:  
A) Usjek turističke staze na oko 150 m od ulaza;  
B) Usjek turističke staze na ulazu u Separe;  
C) Blizu stropa u Majmunskom prolazu;  
D) U boku kanala iza Ramzesovog šetališta.  
Autor: Damir Lacković*

rezultati su objavljeni u Stroj i dr. (2024). Budući da je sediment široko rasprostranjen i nepoznate debljine, odabrane lokacije su reprezentativne, ali ne obuhvaćaju cijeli sedimentni profil istaložen u ovoj špilji.

Rezultati paleomagnetskih analiza pokazali su da je fosilni potočni sediment na svim istraživanim lokacijama taložen u vrijeme današnje orijentacije magnetskih polova, odnosno da je mlađi od 780 000 godina, kada se dogodila posljednja paleomagnetska inverzija.

### 2.3. Istraživanje siga

Osim klastičnih sedimenata, sige također mogu biti korištene kao indikator uvjeta u špiljskim kanalima u vrijeme njihova taloženja. Njihova velika prednost je u tome da mogu biti precizno i točno datirane radiometrijskim metodama određivanja starosti poput uranij-torij (U-Th) ili uranij-olovo (U-Pb) metoda datiranja. Iako sige većinom nastaju tijekom kasnijih (vadoznih) uvjeta speleogeneze, njihov položaj u prostoru, a posebno u odnosu na klastične sedimente, može rezultirati inače nedostupnim podacima o višefaznim izmjenama freatskih i vadoznih uvjeta u špilji, kao što je to u slučaju Veternice (Stroj i dr., 2024).

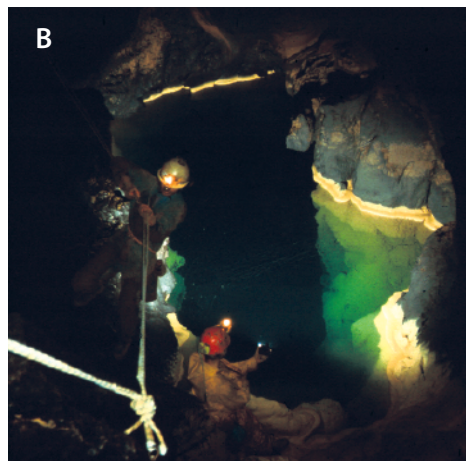
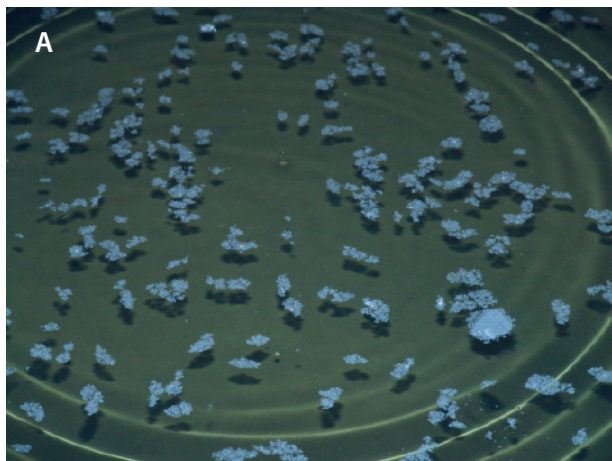
Uzorci siga prikupljeni su na sedam lokacija duž glavnog kanala Veternice, od ulaza do oko 800 m prema unutrašnjosti špilje (Lacković i dr., 2011.;

Stroj i dr., 2024; Slika 2). Uzorkovani su različiti tipovi siga: obalne ploče, saljevi i stalaktiti.

#### Obalne ploče

Obalne ploče posebna su vrsta siga koje nastaju po rubovima podzemnih jezera, odnosno u razini vode. Za njihov nastanak neophodno je da razina vode podzemnih jezera duže vrijeme bude stabilna i da je voda prezasićena s obzirom na kalcijev karbonat. Špiljske splavi koje nastaju na površini jezera s vremenom se povezuju i pričvršćuju na rubu jezera za stijenu formirajući obalne ploče. Recentni primjer špiljskih splavi iz jame Munižabe prikazan je na Slici 7A, a primjer obalnih ploča prikazan na Slici 7B je iz Špilje u kamenolomu Tounj. Karakteristični uvjeti pri kojima nastaju obalne ploče čine ih idealnim pokazateljima pretežno stabilne razine vode u podzemlju (što ne isključuje povremene kratkotrajne poraste ili snižavanja razine vode, nakon kojih se vraća na uobičajenu razinu). Obalne ploče u Veternici pronađene su u Majmunskom prolazu na udaljenosti između 410 i 475 m od ulaza na devet različitih razina (Slike 8A do 8D). Najviša razina obalnih ploča je na 20 cm iznad današnje razine ulaza špilje, na 320,2 m, a najniže su nađene na 120 cm ispod razine ulaza, tj. na 318,8 m.

Prateći ostatke obalnih ploča, rekonstruirano je 85 m dugo paleojezero koje se prostiralo u



Slika 7. Primjeri špiljskih splavi i obalnih ploča:

A) Na površini paleojezera u Veternici plutale su u geološkoj prošlosti špiljske splavi nalik današnjima u jami Munižabi. Veličine splavi na slici su do oko 3 cm;

B) Uz obalu paleojezera u Veternici rasle su obalne ploče nalik današnjima u Špilji u kamenolomu Tounj

Autori: Damir Lacković (A) i Ana Bakšić (B)



**Slika 8. Obalne ploče u špilji Veternici:**  
 A) Speleologinja pokazuje višestruke horizontalne ostatke obalnih ploča, debljine oko 1 cm, na zidu Majmunskog prolaza u Veternici;  
 B) Detalj 1 cm debele obalne ploče prikazane na Slici 8A;  
 C) Ostatak obalne ploče oko 1 cm debljine;  
 D) Fotografija izbliza pokazuje obalne ploče na 4 razine, svaka je debljine oko 1 cm  
 Preuzeto iz: Lacković i dr. (2011).

Majmunskom kanalu od 475 m od ulaza pa sve do stropa Kalvarije na 390 m od ulaza te paleosifon koji se prostirao od Kalvarije pa sve do izlaza špilje u duljini od 390 m (Slika 2). Prema U-Th analiza-ma dviju obalnih ploča, jezero i sifon bili su aktivni 380 000 i 245 000 godina prije sadašnjosti.

### Saljev u Koncertnoj dvorani

Saljevi se talože u zraku ispunjenim krškim šupljinama te su time pokazatelji postojanja vadoznih uvjeta u kanalu. U Koncertnoj dvorani postoje dva saljeva. Saljev koji je u fokusu turističkih posjetitelja nalazi se u središnjem dijelu dvorane, a ispod njega je šupljina ponekad ispunjena vodom, znana i kao »bunar želja« (Slika 9A). Ponekad, posebno za vrijeme dugotrajnijih kiša, saljev je aktivan. Drugi, manje poznati saljev maleni je erozijski ostatak nekadašnjeg većeg saljeva koji se nalazi na sjevernom kraju dvorane (Slika 9B).



**Slika 9. Saljevi u koncertnoj dvorani:**  
 A) Povremeno aktivan saljev u središnjem dijelu dvorane;  
 B) Datirani erozijski ostatak saljeva na zidu sjevernog dijela dvorane  
 Autori: Boris Krstinić (A) i Damir Lacković (B)

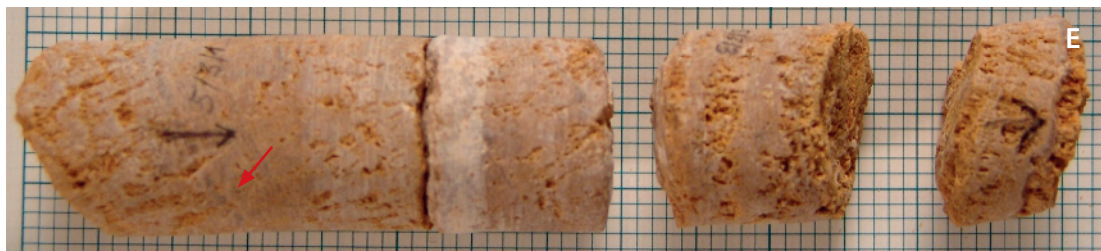
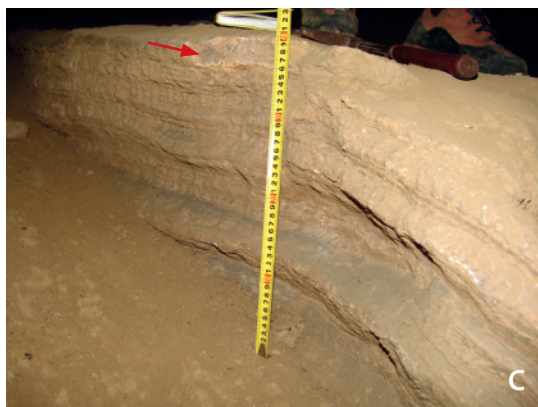


Prema rezultatima U-Th analiza, njegova je starost 550 000 godina, što pokazuje da je ovaj dio kanala imao vazodnu fazu i prije formiranja jezera u Majmunskom prolazu odnosno sifona u turističkom dijelu špilje, koji su postojali prije 380 000 godina prema rezultatima analiza obalnih ploča.

### Saljev Kameni slap

Saljev Kameni slap nalazi se na oko 250 m od ulaza te je najveća i najatraktivnija siga u turističkom dijelu špilje (Slika 10). Njegova površina (Slika 10B) prekrivena je korozijsko-erozijskim oblicima

*Slika 10. Istraživani saljevi kod Kamenog slapa: A) Lokacija uzorkovanja erodiranog saljeva na ulazu u Velebitaški kanal (starost 235 000 godina); B) Saljev Kameni slap u turističkom dijelu špilje. Površina saljeva prekrivena je škrapama i malim strujnicama; C) Mjesto uzorkovanja najmlađeg površinskog sloja (starost 205 000 godina) na vrhu erozijskog usjeka na saljevu Kameni slap; D) Strelica pokazuje lokaciju bušotine na dnu erozijskog usjeka u saljevu Kameni slap; E) Fotografija jezgre uzorkovane bušenjem saljeva. Strelica pokazuje lokaciju najstarijeg analiziranog uzorka Kamenog slapa (starost 212 000 godina) Preuzeto iz: Lacković i dr. (2011).*





**Slika 11. Lokacija istraživanja stalaktita zatrpanih potočnim sedimentom:**  
**A) Stalaktiti djelomično zatrpani potočnim sedimentom na rubu freatskog kanala iza Ramzesovog šetališta;**  
**B) Uzorak stalaktita koji je datiran U-Th metodom starosti 640 000 godina**  
**Autori: Ira D. Sasowsky (A) i Damir Lacković (B)**

(strujnicama), a u središnjem dijelu saljeva nalazi se erozijski usjek dubine 40 cm. Donji dio saljeva prekriven je potočnim sedimentom u kojemu su prilikom uređivanja špilje 1990. godine pronađene kosti špiljskog medvjeda (Malinar i Lacković, neobjavljeni podaci). U 40 cm dubokom usjeku saljeva, na najdubljem mjestu, napravljena je bušotina duboka 15 cm pomoću benzinske terenske bušilice te su izvađeni uzorci kamene jezgre, čime se doprijelo do starijih dijelova saljeva, no ne i do najstarijeg sloja (Slike 10C, 10D i 10E). Ukupna istraživana debljina, od dna bušotine pa do najmlađeg površinskog sloja saljeva, iznosi 55 cm.

Osim uzoraka saljeva Kamenji slap, uzet je i uzorak drugog, također erodiranog saljeva smještenog iznad Kamenog slapa, na ulazu u Velebitaški kanal (Slika 10A). Erozijske ostatke ovog saljeva nije moguće na terenu povezati sa slojevima Kamenog slapa koji se nalazi ispod njega.

Uzorak saljeva na ulazu u Velebitaški kanal pokazuje starost od 235 000 godina, a slojevi Kamenog slapa starost u rasponu od 212 000 do 205 000 godina.

Dobivene starosti pokazuju da prije 235 000 godina u turističkom dijelu špilje više nije bilo sifona koji je, prema analizama obalnih ploča u Majmunskom prolazu, prije 245 000 godina još uvijek postojao. U vremenskom razdoblju od 10 000 godina (između 245 000 i 235 000 godina)

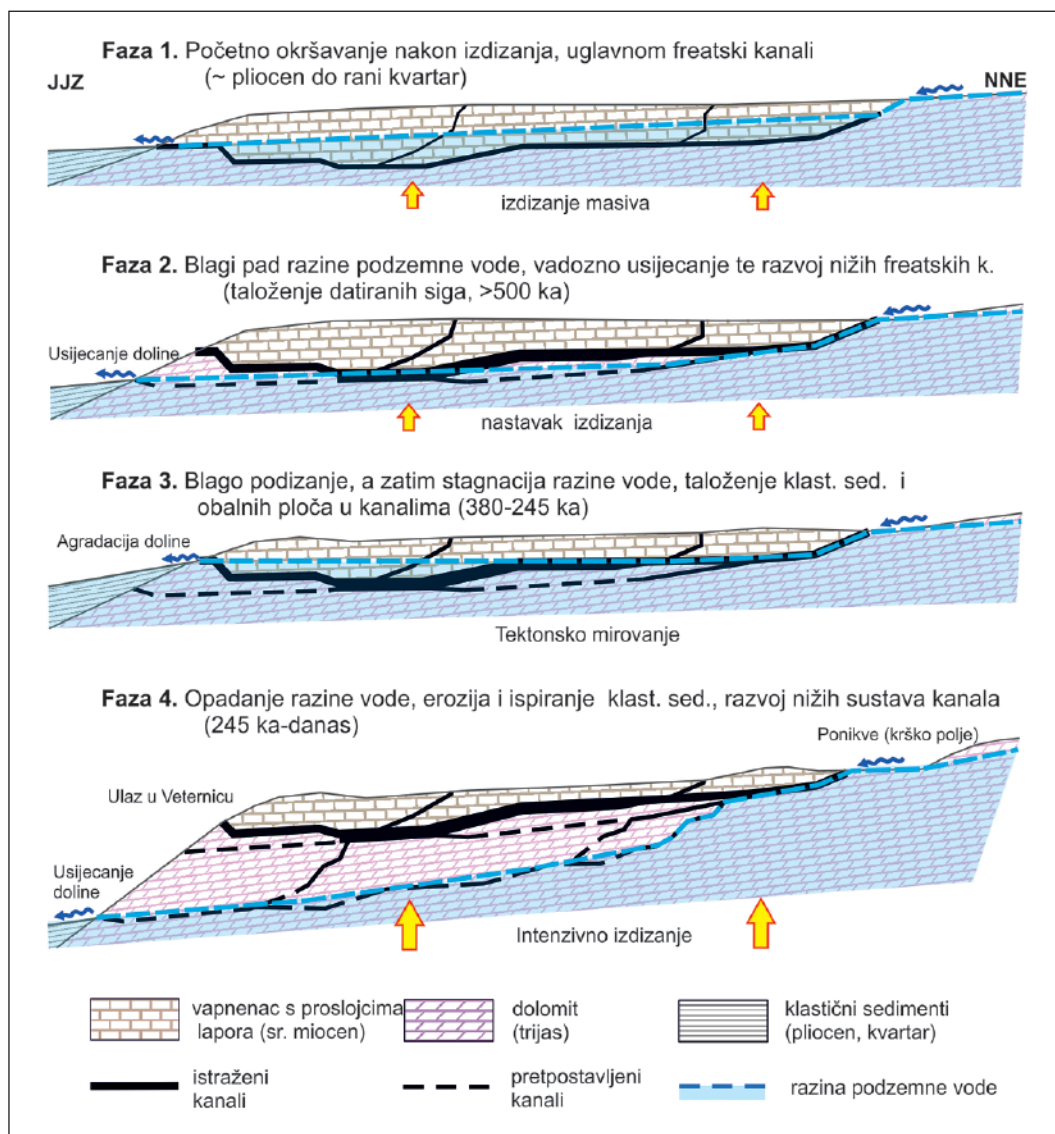
došlo je do naglog pada razine podzemne vode za minimalno 6 m (taloženje saljeva na ulazu u Velebitaški kanal), a do vremena od prije 205 000 godina (taloženje najmlađeg sloja saljeva Kamenji slap) razina je pala za ukupno oko 14 m!

### Stalaktiti iza Ramzesovog prolaza

U morfološki freatskom kanalu neposredno iza Ramzesovog šetališta, na oko 680 m od ulaza, uzorkovan je stalaktit koji je djelomično prekriven potočnim sedimentom (Slika 11). Njegova starost od oko 640 000 godina pokazuje da je freatski kanal imao vadoznu fazu prije taloženja potočnih sedimenata koji su ga djelomično zatrпали i koji su taloženi u obnovljenim freatskim uvjetima. Paleomagnetska mjerenja potočnog sedimenta uzorkovanog na ovoj lokaciji potvrđuju da je sediment kojim su stalaktiti zatrpani mlađi od 700 000 godina.

### 2.4. Speleogeneza špilje Veternice

Na temelju svih prikupljenih rezultata istraživanja, uključujući speleomorfološke karakteristike kanala, rezultate paleomagnetskih analiza klastičnog sedimenta te U-Th analize različitih tipova sigaa, izdvojeno je nekoliko speleogenetskih faza koje su se dogodile u Veternici kroz geološku prošlost. Ove faze grafički su prikazane na Slici 12 te su zasebno opisane u poglavlju koje slijedi.



Slika 12. Shematski prikaz glavnih faza razvoja špilje Veternice  
Preuzeto iz: Stroj i dr. (2014)

▪ **Faza 1 – Početak okršavanja i nastanak najstarije generacije freatskih kanala (od pliocena do ranog kvartara)**

Špilja Veternica nalazi se na južnim padinama zapadnog dijela Medvednice u blizini današnje doline rijeke Save, koja čini regionalnu erozijsku bazu. Razvoj špilje Veternice u direktnoj je vezi s razvojem šireg područja te odražava dinamiku tektonskog izdizanja masiva Medvednice. Posljednje

tektonsko izdizanje i geomorfološki razvoj zapadne Medvednice započeli su tijekom tzv. neotektonske faze, koja počinje otprilike početkom pliocena, prije oko 5 milijuna godina. U to vrijeme započelo je izdizanje miocenskih stijena iznad morske površine, a time i njihovo okršavanje. U podzemlju, ispod tadašnje razine podzemne vode, na neravnom **transgresivnom kontaktu** srednjemiocenskog vapnenca s trijaskim dolomitom počeli su se



**Slika 13. Dokazi postojanja freatskih uvjeta u Veternici, koji vjerojatno potječu iz najstarije freatske faze postanka špilje:**  
 A) i B) Freatski eliptični oblici kanala u stropnim dijelovima glavnog kanala kod Ramzesovog prolaza;  
 C) Velike strujnice u stropu turističkog dijela Veternice;  
 D) Vrtložna niša u miocenskom konglomeratu u stropu Velebitaškog kanala  
 Autori: Ira D. Sasowsky (A, B i C) i Damir Lacković (D)

oblikovati sustavi freatskih krških kanala. Dokaze ove faze nalazimo na više mjesta u špilji.

U ulaznom dijelu špilje (prvih 200-tinjak m) glavni je kanal u potpunosti freatske morfologije, dok je u dubljim dijelovima špilje freatska morfologija sačuvana najčešće u stropnim dijelovima kanala (uz izuzetak Ramzesovog prolaza, koji je u potpunosti freatske morfologije). Osim freatskih poprečnih presjeka kanala (Slike 13A i 13B), u ovim dijelovima špilje nalazimo i strujnice (Slika 13C), vrtložne niše (Slika 13D) i stropne kupole, specifične reljefne oblike u stijenama koji su nastali korozivnim radom vode u freatskim uvjetima.

Veličina poprečnog presjeka kanala prvenstveno ovisi o raspoloživom vremenu i količini vode koja je tekla kanalom. Nakon početnog proširenja špiljski kanali često postižu ravnotežnu veličinu s obzirom na protok (Worthington,

**Transgresivni kontakt** je nepravilan kontakt stijena različitih starosti nastao podizanjem morske razine i taloženjem mlađih sedimenata preko površine nekadašnjeg kopna.

1991; Audra i dr., 2007). Veći freatski presjeci u glavnom kanalu Veternice od ulaza do 400 m u unutrašnjost špilje mogu biti rezultat dugotrajnih freatskih uvjeta u ovom dijelu kanala, uz povećanje protoka zbog postupnog povlačenja površinskih tokova u podzemlje tijekom rane faze okrašavanja. Za razliku od glavnog kanala, bočni kanali (Velebitaški, Pakleni, Željezničarski i ostali) imali su ulogu sporednih kolektorskih kanala, zbog čega su znatno užii i manjih površina presjeka, u pravilu nekoliko kvadratnih metara, često teško prohodni za speleologe.



Slika 14.

(A) Sediment s fosilnim kostima pleistocenskih životinja u ulaznoj dvorani špilje Veternice

(B) Izuzetno očuvani fosilni ostaci špiljskog medvjeda u potočnom sedimentu na oko 350m od ulaza špilje

Autor: Damir Lacković

- **Faza 2 (Slika 12) – opadanje razine podzemnih voda, vadozno usijecanje i taloženje prvih sig (započelo prije više od 500 000 godina)**

Tijekom druge faze nastavilo se tektonsko izdizanje Medvednice, što je dovelo do spuštavanja erozijske baze (dolina Save) i posljedično do spuštavanja razine podzemne vode u špilji. Viši kanali prelaze iz freatskih (potopljenih) u vadozne (suhe) uvjete, ali zadržavaju freatsku morfologiju, a niži kanali ostaju i dalje potopljeni. Dok se u freatskim okolišima nastavlja proširivanje kanala, u gornjim, sada vadoznim okolišima, događa se kanjono usijecanje kanala te rast prvih sig. Dokaz ove faze je vadozni kanjon Majmunskog prolaza (Slike 5B, 5C i 5D), saljev u Koncertnoj dvorani (freatske morfologije) starosti 550 000 godina (Slika 9 B) te stalaktiti u freatskom kanalu iza Ramzesovog šetališta stari 640 000 godina (Slika 11).

- **Faza 3 (Slika 12) – umjereno podizanje razine podzemnih voda i taloženje obalnih ploča i potočnog (klastičnog) sedimenta (od oko 380 000 do 245 000 godina)**

Usljed privremenog zaustavljanja tektonskog izdizanja Medvednice dolazi do blagog podizanja i kasnije stagnacije razine vode u špilji. Podizanje razine vode moglo je biti posljedica nakupljanja sedimenata u podnožju planine (agradacija doline) i/ili blagog tonjenja masiva. U špilji se formiralo jezero (Slike 2, 7 i 8) i sifon u ulaznom dijelu glavnog

kanala te se kanal dijelom zapunio klastičnim sedimentom (Slike 4A, 4B, 4C i 6).

Prema rezultatima U-Th analiza uzoraka obalnih ploča, stabilan vodostaj trajao je najmanje od 380 000 do 245 000 godina. Pretpostavljamo da su i klastični sedimenti (prema paleomagnetskim analizama mlađi od 780 000 godina) taloženi tijekom jezerske faze, u mirnim hidrološkim uvjetima koji su omogućili ne samo taloženje obalnih ploča uz površinu jezera, već i djelomično ispunjavanje sifona potočnim sedimentima.

- **Faza 4 (Slika 12) – reaktivacija tektonskog izdizanja Medvednice, naglo opadanje razine podzemne vode, stvaranje novih vadoznih i freatskih kanala (od 245 000 godina prije sadašnjosti do danas)**

Rezultati U-Th datiranja uzoraka saljeva ispod Velebitaškog kanala i saljeva Kameni slap (Slika 10) otkrili su da je nakon faze ujezerivanja uslijedio brzi pad razine vode u glavnom kanalu špilje, najkasnije prije 235 000 godina (Lacković i dr., 2011). Pad razine vode u špilji u vremenu između 245 000 i 235 000 godina iznosio je minimalno 6 m, a uzrok mu je najvjerojatnije reaktivacija tektonskog izdizanja Medvednice, koje traje od prije 245 000 godina pa sve do danas (serija zagrebačkih potresa 2020. godine odraz je recentne tektonske aktivnosti ovog područja).

Najniži vadozni kanali (označeni žutom bojom na Slici 2), karakterizirani strmim nagibom i uskim poprečnim presjecima, najmlađa su generacija kanala koji nastaju nakon faze stabilnog jezera. Proces opadanja i povlačenja toka vode kroz špilju i dalje je aktivan, što je označeno velikim visinskim gradijentom između aktivnog toka u unutrašnjosti špilje i sadašnje razine izvora (Slika 2). Ovo ukazuje na razmjerno brzo izdizanje masiva, uslijed čega današnja morfologija hidrološki aktivnih kanala nije dosegla ravnotežno stanje, već je u fazi prilagođavanja promjenama morfologije terena.

Smanjenje slivnog područja zbog fragmentiranja izdignute krške zaravni dolinskim usjecima rezultiralo je smanjenjem protoka vode u špilji, što je dodatno smanjilo brzinu rasta recentnih kanala i dimenzije njihovih poprečnih presjeka (u odnosu na fosilne kanale).

Ulazna dvorana, a moguće i dublji dijelovi glavnog kanala, isušivanjem postaju prikladna skloništa za životinje i čovjeka, čiji su ostaci i artefakti istaloženi u posljednjih 120 000 godina (Miracle i Brajković, 1992; 2010). Za razliku od klastičnog potočnog sedimenta (mulja, pijeska i šljunka) u dubljim dijelovima špilje, sediment ulazne dvorane i ulazne strmine sastoji se od padinskog nanosa stijenskog kršja, gline, humusa i ostataka fosilnih kostiju (Slika 14).

### 3. Zaključak

Prikazani rezultati istraživanja raznovrsnih sedimentata špilje Veternice, kao i speleomorfološkog kartiranja, omogućili su djelomičnu rekonstrukciju geneze ove špilje. Dobiveni geokronološki podaci bili su ključni za izdvajanje pojedinih faza speleogeneze špilje te su izvrstan primjer korištenja špiljskih sedimentata u rasvjetljavanju geološke, odnosno tektonske evolucije šireg područja.

Objava rezultata provedenih istraživanja predstavlja tek početak, a ne kraj istraživanja ovog fenomena krša. Buduća istraživanja, prvenstveno kroz dodatne analize uzoraka sica i klastičnog sedimenta, imaju perspektivu da baci novo svjetlo na kompleksnu genezu ovog sustava i dodatno poboljšati sadašnji model speleogeneze, ali i tektonske aktivnosti ovog dijela Hrvatske.

### Zahvale

Zahvaljujemo dr. sc. Nenadu Buzjaku i prijateljima speleolozima iz Speleološkog odsjeka PDS »Veletit« i Speleološkog kluba »Samobor« na pomoći u terenskom radu te Parku prirode Medvednica, koji je i financijski potpomogao dio ovih istraživanja.

### Literatura

- Audra, P., Bini, A., Gabrovšek, F., Hauselmann, P., Hoblèa, F., Jeannin, P. Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Šušteršič, F., Tognini, P., Trimmel, H., Wildberger, A., 2007: Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography, *Acta Carsologica* 36 (1), 53–67, DOI: 10.3986/ac.v36i1.208.
- Bočić, N., 2016: *Osnove speleologije*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb.
- Buzjak, N., Lacković, D., Stroj, A., 2009: *Špilja Veternica – geološka, hidrogeološka, geomorfološka i mikroklimatska istraživanja te interpretacija rezultata za potrebe geoekološkog vrednovanja i turističkog korištenja špilje*, elaborat, JUPP Medvednica, Zagreb.
- Crnjaković, M., Lacković, D., Mikulčić-Pavlačić, S., Bukovec, D., 2010: Correlation of Veternica fossil cave sediments (Medvednica) with recent alluvium, u: *4. Hrvatski geološki kongres*, (ur. Horvat, M.), Hrvatsko geološko društvo i Hrvatski geološki institut, Zagreb, 12–13.
- Čepelak, M., 1977: Novija i buduća speleološka istraživanja u Veternici, *Speleolog* 24–25, 1–8.
- Hirc, D., 1905: Vjeternica, u: *Prirodni zemljopis Hrvatske, knjiga prva: Lice naše domovine* (ur. Hirc, D.), Antun Scholz, Zagreb, 698–699.
- Lacković, D., Glumac, B., Asmerom, Y., Stroj, A., 2011: Evolution of the Veternica Cave (Medvednica Mountain, Croatia) drainage system: insights from the distribution and dating of cave deposits, *Geologia Croatica* 64 (3), 213–221, DOI: 10.4154/GC.2011.18.
- Malez, M., 1965: Pećina Veternica u Medvednici. I opći speleološki pregled, II stratigrafija kvartarnih taložina, *Acta Geologica* 5, 175–229.
- Marjanac, T., 2007: Špilja Veternica – geološka riznica, *Speleolog* 55, 40–44.

*Obalnom pločom djelomično  
pregrađen vadozni kanjon  
Majmunskog prolaza  
Autor: Damir Lacković*



- Marjanac, T., Marjanac, Lj., Bermanec, V., 2005: Veternica on Medvednica Mt. near Zagreb – A cave developed in dolomites, clastics and pyroclastics, u: *13th International Karstological School »Classical karst«: Karst in various rocks*, Postojna, 32–33.
- Miracle, P. T., Brajković, D., 1992: Revision of the ungulate fauna and Upper Pleistocene stratigraphy of Veternica Cave (Zagreb, Croatia), *Geologia Croatica* 45 (1), 1–14, DOI: 10.4154/GC.1992.01.
- Miracle., P. T., Brajković, D., 2010: The palaeoecological significance of the Pleistocene mammalian fauna from Veternica Cave, Croatia. Revision of the lagomorpha, canidae, mustelidae and felidae, *Geologia Croatica* 63 (2), 207–224.
- Panuška, Lj., Marjanac, T., 1977: Rezultati nekih novijih geoloških istraživanja u spilji Veternici, *Speleolog* 24–25, 13–14.
- Poljak, J., 1934: Pećina Veternica u Zagrebačkoj gori, *Priroda* 5, 133–139.
- Stroj, A., Lacković, D., Sasowsky, I. D., Bajo, P., Glumac, B., 2024: The application of cave morphological and sedimentary deposit investigations to unravel tectonic history and landscape evolution: Insights from Veternica Cave, Medvednica Mountain, Croatia, *Geomorphology* 446, DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.109000.
- Sutlović, A., 1991: Novi metri u staroj Veternici, *Velebiten* 8, 34–36.
- Worthington, S. R. H., 1991: *Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*, doktorska disertacija, McMaster University, Hamilton.

## How did Veternica Cave form?

Besides being a speleological and tourist attraction, Veternica Cave holds a wealth of information about environmental conditions of the geological past. Sedimentary deposits from this cave have been the subject of numerous investigations, especially since the middle of the 20th century. This article gives a concise historical account of geological research and presents new details about the results of research conducted in the last twenty years. By combining speleomorphological mapping, paleomagnetic analyses of stream (clastic) sediments, and dating of speleothems using the Uranium-Thorium (U-Th) method, it was possible for the first time to obtain chronological data on the development of Veternica Cave over more than the last 600,000 years. The research identified several speleogenic phases that reflect alternating intervals of long and stable versus shorter and tectonically active periods within the wider area. During the active tectonic uplift of Medvednica Mountain and the corresponding lowering of the erosional base level, the cave passage morphology quickly adapted to the decrease of ground water level, which occurred at the rate of about 6 m per 10,000 years. This rate is comparable to rates measured in other caves from similar tectonically active areas.