

Mladen Kuhta

GEOLOŠKE OSNOVE SPELEOLOGIJJE

Općenito o geologiji

Naziv znanstvene discipline "Geologija" prvi put se spominje u djelu *Philibiblon* što ga je napisao durhamski biskup R. de Bury, a objavljeno je u Kolnu 1473. Kao i mnogo drugih naziva, geologija je kovanica grčkih riječi i to Ge = Zemlja i logos = misao, nauka, riječ, te dobro iskazuje namjeru autora da razluči geologiju, kao "znanost o zemlji" od teologije; koja se bavi pitanjima neba. U znanstvenoj literaturi naziv je prihvaćen tek u drugoj polovici 18. stoljeća od kada se sve češće susreće, premda je bilo pokušaja da se nadomjesti drugim izrazima.

Danas se pod pojmom geologija, općenito smatra znanost o građi te o prostornoj i vremenskoj dinamici Zemlje kao cjeline. Širenjem spoznaja tijekom vremena, unutar geologije razvilo se nekoliko znanstvenih disciplina koje se djelomično razlikuju po objektu istraživanja, a djelomično po primjenjenoj metodi. najvažnije među njima su:

- Geodinamika - obuhvaća procese koji djeluju u Zemljinoj unutrašnjosti i na njezinoj površini, a činioci su trajnih evolucijskih promjena. Jedna od disciplina geodinamike je i hidrogeologija koji svojim predmetom izučavanja i metodama ima vrlo mnogo dodirnih točaka sa speleologijom.
- Geotektonika - proučava prostorne odnose posebno oblikovanih dijelova litosfere, a koji su nastali kao rezultat geodinamskih promjena u prošlosti.
- Stratigrafija - bavi se razvrstavanjem stijena litosfere prema redosljedu njihova postanka.

Opća konstitucija Zemlje

Zemlja je treći planet po redu u Sunčevu sustavu. Od Sunca je udaljena 150 milijuna kilometara. Prosječna gustoća joj je 5.52 g/cm^3 , a ekvatorski promjer 12 756 km. Zemlja je spljoštena na polovima te je oblikom bliska elipsoidu deformirane površine, odnosno ima oblik prozvan geoid.

Zemlja je zonalne (lupinaste) građe (sl. 1). To potvrđuju različite pojave. Tako prema dubini raste gustoća od 2.7 g/cm^3 do blizu 11 g/cm^3 . To vrijedi i za temperaturu pa se računa da ona u središtu doseže $5\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$. Brz napredak znanosti i tehnike omogućio je da danas znamo mnogo pojedinosti o građi Zemlje. Tu je posebno velik napredak postignut indirektnim metodama istraživanja koje se koriste u okviru geofizike, od izučavanja širenja potresnih i akustičnih valova do preciznih mjerenja Zemljina magnetizma i gravitacije.

U širenju potresnih valova zapaženo je da prema dubini postoji više ploha diskontinuiteta, na kojima se brzina potresnih valova znatno mijenja. Za ispravnu interpretaciju te pojave osobito je zaslužan istaknuti hrvatski seizmolog i geofizičar Andrija Mohorovičić (1857 - 1936). On je na osnovi izučavanja potresa u Pokuplju 1909. god. dao znanstveno objašnjenje

diskontinuiteta na granici Zemljine kore i plašta. Taj je diskontinuitet danas poznat kao Mohorovičićev diskontinuitet (Moho - sloj), a nalazi se na dubinama od 30 - 50 km ispod kontinenata, odnosno 10 - 12 km ispod oceana.

U građi Zemlje mogu se razlikovati tri osnovna dijela; jezgra, plašt i kora;

- Jezgra je najdublja sferna zona, srednje gustoće $10,7 \text{ g/cm}^3$, a njezina se gornja granica nalazi na dubini od 2900 km. Prema dosadašnjim istraživanjima dijeli se na unutrašnji kruti dio i vanjski dio za koji se pretpostavlja da je žitak i nešto manje gustoće. Izgrađena je pretežno od željeza i nikla. Tlak je izuzetno visok i iznosi više milijuna hektopaskala, te se unutrašnja i vanjska jezgra zajedno često nazivaju i barisfera.
- Plašt se sastoji iz tri sfere ili lupine ukupne debljine oko 2880 km. Sastavljen je od različitih minerala i odlikuje se znatnom termalnom dinamikom. Donji plašt naziva se još i mezosfera, a srednji astenosfera. Njegov gornji dio tijesno je povezan s korom i često se zajedno nazivaju litosfera ili tektosfera zbog izloženosti strukturnim (tektonskim) promjenama izazvanim dinamikom astenosfere.
- Kora je površinska sfera Zemlje relativno male debljine, prosječno 40 km u području kontinenata i tek 10 - 12 km ispod oceana. Kontinentalna kora izgrađuje konsolidirane, kontinentalne dijelove površine Zemlje. Naziva se još i granitna kora po glavnoj stijeni od koje je izgrađena, ili *SiAl* po glavnim elementima siliciju i aluminiju. Oceanska kora izgrađuje čvrstu podlogu oceana. Sastoji se uglavnom od bazalta (bazaltna kora), odnosno od elemenata silicija i magnezija, te se naziva i *SiMa*.

Geološka prošlost Zemlje

Zanimanje za Zemljinu geološku prošlost pojavilo se vrlo rano, a nastojanja da se pokuša odrediti relativna starost pojedinih naslaga objedinjena su u znanstvenoj disciplini nazvanoj stratigrafija. Polaznu osnovu za prva razmatranja našlo se u činjenici da prilikom taloženja naslaga one mlađe prekrivaju starije. Problem je nastao kada je uočeno da u prirodi slojevi nisu u svom prvotnom položaju, te da ponekad slijed može biti potpuno suprotan. Već u drugoj polovici 17. stoljeća shvaćena je presudna uloga fosila u određivanju relativne starosti naslaga.

Fosili su ostaci ili otisci biljaka i životinja koje su ugibale u doba postanka određenih taložnih stijena i na razne načine se u njima sačuvali. Najpogodniji za očuvanje bili su organizmi koji su sadržavali mineralne kosture, oklope ili ovoje. Počeci razvrstavanja stijena temelje se na pretpostavci da su slojevi u kojima su sačuvani jednostavniji organizmi stariji od onih koji sadrže razvijenije oblike. S vremenom, razvijen je vrlo detaljan sustav koji omogućava pouzdano razvrstavanje stijena po relativnoj starosti.

Izučavanje apsolutne starosti stijena novijeg je datuma i zasniva se na otkriću zakona o raspadanju radioaktivnih elemenata. Računa se da Zemljina geološka prošlost, od oblikovanja prve kore do danas, traje oko 4,5 milijarde godina. To dugo vremensko razdoblje razdvojeno je na ere, periode, i epohe i doba, od kojih svako ima svoje specifične osobine. Razdoblja geološke prošlosti Zemlje prikazana su u tabeli.

Mineraloško - litološki sastav Zemlje

Zemljina kora sastoji se od minerala i stijena različitih fizičko-kemijskih svojstava i različitog ponašanja prema utjecaju egzogenih sila.

Minerali su nakupine atoma, iona i molekula međusobno povezanih različitim vezama i silama. To su homogena tijela koja u svakom svojem najmanjem dijelu imaju iste fizičko-kemijske osobine. Minerali se najčešće pojavljuju u obliku kristala, odnosno kao tijela vrlo pravilne geometrijske građe. Zbog znatne brzine kristalizacije i gotovo redovnog pomanjkanja prostora kristali su obično sitnozrnati i nepravilnog vanjskog oblika, premda se u unutrašnjosti odlikuju vrlo pravilnom prostornom (kristalnom) rešetkom. Amorfni minerali su malobrojni i nepravilne su građe. Proučavanjem minerala bavi se mineralogija.

Najčešći minerali koji se susreću u speleologiji svakako su kalcit (CaCO_3) i dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), koji izgrađuju karbonatne stijene vapnenac i dolomit, te većinu speleotema (špiljski ukrasi).

Stijene su nakupine ili fizička mješavina minerala u različitim odnosima i omjerima. Proučavanjem njihovog postanka i razvrstavanjem bavi se znanstvena disciplina petrologija.

Prema postanku razlikuju se tri osnovne skupine stijena:

- Magmatske stijene (često se nazivaju i eruptivne ili vulkanske stijene) nastaju kristalizacijom pri hlađenju alumosilikatne taljevine - magme od koje je građena unutrašnjost Zemlje. Ako se magma utisnula u dubini Zemljine litosfere nastaju intruzivne ili unutrašnje magmatske stijene poput granita, diorita ili gabra. Za razliku od njih, efuzivne ili površinske stijene nastaju kada se magma izlije na površinu. Najčešće efuzivne stijene su bazalt, riolit i andezit.
- Sedimentne ili taložne stijene nastaju taloženjem trošnog materijala, lučenjem iz zasićenih otopina ili radom različitih organizama.

Mehaničke sedimentne stijene sastoje se od materijala nastalog razaranjem drugih stijena. Njihovi krupniji ili sitniji fragmenti nošeni su vodom, vjetrom ili ledom i zatim odlagani uslijed smanjenja energije transporta. Najčešći predstavnici ovih stijena su konglomerat (valutičnjak), pješčenjak, lapor i prapor (les). Breča ili kršnik nastaje povezivanjem uglatih fragmenata stijena neposredno uz mjestu njihovog odlamanja, dakle bez znatnijeg transporta i zaobljavanja.

Kemijski sedimenti nastaju kristalizacijom iz zasićenih otopina. Na taj način najčešće nastaju razne vrste soli. Kemogeno može nastati i dio dolomita, a rijede vapnenaca. Lučenjem iz vodenih otopina bogatih kalcijevim hidrokarbonatom nastaju i špiljski ukrasi u podzemlju krških terena.

Organogene sedimentne stijene nastaju aktivnošću i posredovanjem organizama te se razlikuju fitogene i zoogene stijene, prema tome da li je prevladavao utjecaj biljaka ili životinja. Najznačajnija organogena stijena je vapnenac. Nastaje taloženjem dijelova i ljuštura raznih organizama, a najčešće foraminifera, koralja, školjaka ili algi.

- **Metamorfne stijene** nastaju preobrazbom magmatskih i sedimentnih stijena pod utjecajem povećanog tlaka, temperature, različitih otopina i plinova, koji mogu djelovati pojedinačno ili povezano. Posljedice se očituju u prekrystalizaciji, promjeni sastava ili strukture stijene. Najznačajniji predstavnici metamorfnih stijena su razni škriljci, gnajs, kvarcit i mramor.

Sa stajališta speleologije svakako su najinteresantnije sedimentne stijene, jer je u njima formiran daleko najveći broj špilja i jama. U magmatskim i metamorfnim stijenama speleološki objekti javljaju se vrlo rijetko. Smatra se da sedimentne stijene izgrađuju svega 5 % od ukupnog volumena 16 km debele Zemljine kore. S obzirom na činjenicu da debljina sedimentnih stijena nije velika i na kontinentima prosječno iznosi oko 2000 metara (max. 13 km), njihova zastupljenost na površini znatno je veća. Prema proračunima, sedimentne stijene izgrađuju više od 75 % površine zemlje do dubine za koju je vezana ljudska djelatnost. Nadalje, od ukupnog udjela sedimentnih stijena u građi Zemljine kore od 5 - 9 % odnosi se na karbonatne stijene (vapnenice i dolomite), na kojima se razvija krš kao specifičan oblik reljefa.

Endogeni pokreti i globalni reljef

Endogeni pokreti nastaju duboko u Zemljinoj litosferi, a uzrokuju ih izuzetno snažne endogene sile. Endogene sile nastaju kao posljedica stvaranja toplinske energije zbog gravitacijskog gibanja materije u dubini Zemlje, radioaktivnog raspadanja i usporavanja rotacije Zemlje s jedne, te hlađenja na površini s druge strane. Zagrijavanje materije na jednom mjestu dovodi do njezina širenja i smanjenja tlaka, a hlađenje izaziva suprotnu pojavu. Zbog toga se u litosferi formiraju žarišta pojačanog oslobađanja energije, a time započinju određeni procesi i pokreti.

U geološkoj znanosti razvijeno je nekoliko teorija o načinu i mehanizmima koji dovode do formiranja glavnih oblika reljefa na površini Zemlje. Danas je najšire prihvaćena neomobilistička teorija globalne tektonike ploča. Ona je zasnovana na *Wegenerovim* pretpostavkama o plutanju kontinenata. On je zaključio da se kontinenti kreću plutanjem *siala* po *simi* pod utjecajem centrifugalne sile i privlačne sile Sunca i Mjeseca. Time je dao zaokruženo znanstveno objašnjenje davno zapažene činjenice da postoji podudarnost obrisa nekih nasuprotnih kontinenata.

Danas se smatra da su litosferne ploče temeljne strukturne jedinice Zemljine površine. Izdvojeno je 7 glavnih ploča, a to su: euroazijska, sjevernoamerička, južnoamerička, afrička, indijsko-australijska, pacifička i antarktička ploča. Litosferne ploče se pokreću nekoliko centimetara godišnje, a pokreti su rotacijskog karaktera. Tako se npr. Afrika približava Europi 1.9 - 2.6 cm/god., Arapski poluotok se udaljava od Afrike, Sjeverna Amerika se približava Aziji, a udaljava od Europe. Prema vrstama procesa razlikuju se konstruktivne, destruktivne i konzervativne granice između ploča, te se ovisno o tome oblikuju sasvim određene forme.

- Na konstruktivnim granicama dolazi do razmicanja ploča, a kroz nastale pukotine probija se užarena magma i oblikuje oceanske hrbate, odnosno specifična *gorja* koja se se dižu s oceanskog dna. Razmicanja ploča rijetka su na kopnu (ali postoje).
- Destruktivne granice karakterizira podvlačenje (subdukcija) jedne ploče pod drugu, uglavnom na rubovima oceanskog podmorja gdje se formiraju i do 12 km duboki podmorski jarci. Na površinskoj ploči pojavljuju se vulkani i nastaju *ulančani planinski masivi*.
- Duž konzervativnih granica ploče se pomiču jedna uz drugu, te duž nje ne dolazi do formiranja ulančanih gorja već se formiraju velike i vrlo aktivne pukotine npr. rasjed San Andreas u Kaliforniji.

Područja duž granica ploča prati snažna i česta potresna aktivnost, a u prva dva slučaja i vulkanska aktivnost te predstavljaju najnestabilnija područja na Zemlji.

Osnovni strukturni elementi litisfere

Osnovni primarni strukturni element sedimentnih stijena je sloj. Sloj je više ili manje kompaktna nakupina minerala omeđena dvjema plohama. Granične plohe posljedica su prekida ili kraćih (manjih) promjena uvjeta u kojima je određena stijena nastajala. Učestalost promjena i količina taloženog materijala uvjetuju debljinu slojeva, koja se kreće od par milimetara do nekoliko metara. Tijekom formiranja slojevi se najčešće nalaze u horizontalnom položaju ali zbog djelovanja endogenih sila u geološkoj prošlosti danas ih rijetko nalazimo u tom položaju. Današnji prostorni položaj slojeva definiran je pružanjem sloja, smjerom nagiba i kutem nagiba (sl. 2).

Pružanje je sjecište sloja s horizontalnom ravninom. Smjer nagiba (azimut nagiba) pokazuje na koju je stranu svijeta sloj nagnut. Pružanje sloja i smjer nagiba zatvaraju kut od 90°. Navedeni elementi mjere se pomoću geološkog kompasa ali ih je moguće odrediti i bilo kojim planinarskim kompasom. Kut nagiba sloja je kut što ga sloj zatvara s vodoravnom ravninom, a mjeri se pomoću inklinometra (ugrađen u geološki kompas), odnosno padomjera.

Sekundarni strukturni elementi litosfere ili tektonski elementi nastali su nakon formiranja stijena kao posljedica globalnih i lokalnih endogenih procesa. U geološkom smislu međusobni odnosi i položaj slojeva može biti vrlo složen i različit, ali najučestalije su tri osnovne forme ili strukturne jedinice: bore, rasjedi i navlake.

Bore su valovita savijanja odnosno deformacije slojeva koje najčešće nastaju pod utjecajem sila kompresije. Potpuna bora sastoji se od jednog izbočenog (konveksnog) i jednog udubljenog (konkavnog) dijela; prvi se naziva *antiklinala*, a drugi *sinklinala* (sl. 3). Antiklinala i sinklinala uzdužno se mogu rastaviti u dva krila ravninom koja se naziva osna ploha. Obzirom na položaj osne plohe prema horizontalnoj ravnini razlikujemo; *uspravne, kose, prebačene, polegle i utonule* bore (sl. 4). S obzirom na položaj krila bore prema osnoj plohi, bore se dijele na *normalne ili pravilne, izoklinalne i lepezaste* (sl. 5). Sustavi povezanih bora koji u nizovima generiraju veću strukturnu formu generalno sličnog oblika kao i pojedinačna bora, nazivaju se *sinklinorij* i *antiklinorij* (sl. 6).

Rasjedi su strukturne jedinice litosfere nastale izdizanjem, spuštanjem ili uzdužnim pomicanjem dijelova litosfere duž pukotine koju nazivamo paraklaza. Rasjedi nastaju kao posljedica ekspanzije, kompresije i gravitacije, ili njihovom kombinacijom. Obično se razlikuju tri osnovna tipa rasjeda, a to su *normalni, reversni i rasjed s horizontalnim pomakom* (sl. 7 i 8).

Navlake su specifični oblici rasjednih deformacija Zemljine kore kod kojih se obično starije naslage prebacuju iznad mlađih i to često na velikim udaljenostima. Navlake nastaju kao posljedica dugotrajne i snažne kompresije istog smjera.

Egzogeni procesi

Za razliku od endogenih procesa koji ishodište djelovanja imaju u Zemljinoj unutrašnjosti, endogeni procesi djeluju na njenoj površini, a nastaju kao posljedica djelovanja kemijske, toplinske i nuklearne energije sunca. Energija sunca pokreće cjelokupan mehanizam egzogenog modeliranja Zemljine površine, uvjetujući složene klimatske odnose, cirkulaciju vode u prirodi i život organizama. Današnji reljef Zemljine površine oblikovan je dugotrajnim i najčešće složenim djelovanjem različitih egzogenih činitelja kao što su insolacija, gravitacija, voda, led, vjetar i dr. Sve destruktivske (razarajuće) morfološke procese nazivamo *denudacijom ili ogoličavanjem*. Najznačajniji procesi koji sudjeluju u oblikovanju reljefa Zemlje su; mehaničko trošenje, derazija, erozija, kemijsko raspadanje ili korozija, te organogeno razaranje.

- **Mehaničko trošenje** najčešće je posljedica termičkih promjena kojima je stijena izložena, a manifestira se odlamanjem manjih ili većih fragmenata bez promjene njihovog mineralnog sastava. Velike temperaturne razlike (npr. dan - noć) uzrokuju nejednolike i učestale promjene obujma stijene (stezanje i rastezanje površinskog dijela) što dovodi do njenog drobljenja i usitnjavanja. Pored toga pri niskim temperaturama dolazi do smrzavanja vode u pukotinama stijena. Pritisak leda dostiže i nekoliko tisuća atmosfera (ovisno o temperaturi), te može uzrokovati odlamanje i vrlo velikih blokova.
- **Derazija** je oblikovanje padina zbog utjecaja gravitacije, koja uzrokuje puzanje, kliženje, odlamanje i odronjavanje, često velikih masa stijena ili pokrovnog tla.
- **Erozija** je proces razaranja površine terena djelovanjem vanjskih činitelja vode, vjetra ili leda, te razlikujemo fluvijalnu, eolsku ili glacijalnu eroziju.
- **Kemijsko raspadanje ili korozija** nastaje nizom kemijskih procesa u stijenama, pri čemu se njihov mineralni sastav mijenja. Nosioci ovog procesa su najčešće voda, ugljični dioksid i kisik. Procesima otapanja vrlo su podložne karbonatne stijene, naročito vapnenac, te je korozija jedan od najbitnijih procesa u oblikovanju krškog reljefa.
- **Organogeno razaranje** može biti fizičko i kemijsko. Fizičko je posljedica djelovanja korjenja biljaka koje rastom u pukotinama pritiče stijene i uzrokuje njihovo odlamanje. Kemijsko djelovanje je posljedica djelovanja humusnih i drugih organskih kiselina koje nastaju u procesu rasta biljaka ili njihovim truljenjem.

Danas prisutni morfološki oblici ne mogu se objasniti samo na osnovi danas prisutnih procesa, već je potrebno poznavati zbivanja i klimatske promjene u geološkoj prošlosti. Mladi ili recentni procesi obično brišu ili prekrivaju tragove starijih, a svojim intenzitetom mogu biti slabiji ili jači nego je to bio slučaj u prošlosti. Na našim prostorima važno je ukazati na klimatske promjene tijekom pleistocena, odnosno na razdoblja ledenih doba (glacijali) i vodom

bogata razdoblja između njih (interglacijali), tijekom kojih su nastajali i najznačajniji površinski i podzemni morfološki oblici na području krša. Istovremeno došlo je i do globalnog podizanja razine mora, a općenito se smatra da se duž naših obala ono podiglo za cca 100 - 120 m.

Geomorfologija krša

Krš je specifičan reljef koji se razvija na terenima izgrađenim od topljivih stijena. Premda se u tu skupinu ubrajaju još neke stijene (npr. gips, halit), zbog najveće rasprostranjenosti i značenja, pojam krša najčešće se veže uz područja izgrađena od karbonatnih naslaga, odnosno od vapnenca i dolomita.

Premda na području krša mogu manjim ili većim intenzitetom djelovati svi ranije spomenuti denudacijski procesi, osobito važnu ulogu ima korozijsko i erozijsko djelovanje vode, kako na površini tako i u podzemlju, te govorimo o krškom procesu, odnosno procesu okršavanja. Okršavanje je prvenstveno posljedica cirkulacije vode koja obogaćena ugljičnim dioksidom iz atmosfere, rastvara čvrste karbonatne stijene.

Kao posljedica specifičnosti procesa okršavanja nastaju osobiti krški oblici; kamenice, škrape, ponikve, uvale i polja na površini terena, te špilje i jame u podzemlju.

- Kamenice su najčešće nekoliko desetaka centimetara široke i desetak centimetara duboka ovalna udubljenja u kompaktnim blokovima vapnenca, nastala korozijom. Kamenice su povremeno ispunjene oborinskom vodom.
- Škrape su žljebovi nastali korozijskim djelovanjem vode prilikom njenog slijevanja duž ogoljenih i nagnutih ploha vapnenca. Dužina škrapa je najčešće od nekoliko centimetara do nekoliko metara.
- Ponikve (vrtače, vrtline, dolci) su ljevkasta udubljenja na površini krškog terena. Promjer na vrhu može biti od nekoliko metara do nekoliko stotina metara. Dubina im se mijenja sukladno širini, a može doseći i stotinu metara. Ponikve su nastale korozijskim i erozijskim djelovanjem površinske, ali i podzemne vode.
- Uvale su duguljaste udubine u krškom području. Duljina im iznosi od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, a širina im je mnogo manja. Oblikovane su u tektonski razlomljenim terenima korozijskim i erozijskim radom vode. Duž uvala mogu se javiti povremeni vodotoci koji završavaju u ponorima.
- Polja su najveće morfološke pojave u kršu. Duljina polja iznosi i nekoliko desetaka kilometara uz znatno manju širinu. Redovito su izdužena smjerom pružanja glavnih tektonskih jedinica. Dna polja su zaravnjena mlađim kvartarnim naslagama. Kroz većinu polja protjeću ponornice, a izvori im se nalaze na jednom

dok su ponori na drugom kraju polja. Naše najveće krško polje je Ličko polje (465 km²), a slijede Imotsko, Gacko, Krbavsko, Sinjsko itd.

- Podzemni krški oblici - špilje i jame, zasebno su prikazane.

Krš u Hrvatskoj dio je dinarskog krškog područja koje se rasprostire od Slovenije do Crne Gore. Obuhvaća površinu od oko 26.000 km², odnosno oko polovice ukupnog teritorija Hrvatske. Organizirana istraživanja krških terena rađena su u područjima Hrvatske i Slovenije prije više od dva stoljeća te je i sam naziv "karst" nastao na tim prostorima (kao germanska inačica riječi krš). Nadalje, zbog zastupljenosti i karakteristika prisutnih krških morfoloških fenomena nazivi, ponor i polje prihvaćeni su kao međunarodne riječi u svjetskoj stručnoj literaturi. U novije vrijeme svjetski istraživači spominjući i citirajući dinarski krš koriste naziv "klasični krš" što nedvojbeno ukazuje na njegov širi značaj.

Pored specifičnih morfoloških formi jedna od osnovnih karakteristika krških područja je opća bezvodnost. Stalni površinski tokovi i izvori su vrlo rijetki, odnosno hidrografska mreža je daleko slabije razvijena nego na drugim terenima. Ovakova situacija posljedica je raspucanosti i okršenosti karbonatnih naslaga koje su uslijed toga vrlo propusne, te se oborinske vode vrlo brzo gube u podzemlju. S druge strane, upravo mnogobrojne šupljine unutar krškog podzemlja omogućavaju prikupljanje vode, odnosno formiranje krških vodonosnika. Konceptijski model krškog vodonosnika prikazan je na slici 9. U zonama koncentracije podzemnih tokova nastaju prošireni podzemni prostori, odnosno speleološki objekti, ponekad izuzetno velikih dimenzija.

Speleološki objekti

Speleološki objekti su prirodno formirani podzemni prostori duži ili dublji od 5 m, koji svojim dimenzijama omogućavaju ulazak čovjeka. U novije vrijeme sve je popularnije istraživanje i tzv. umjetnih speleoloških objekta, odnosno starih rudnika, tunela, bunara katakombi i sl.

Postanak i razvoj (geneza) speleoloških objekata složen je proces na koji utječe velik broj činitelja, od prostornog položaja i tektonike do klimatskih, hidroloških, hidrogeoloških i drugih elemenata. Međutim, osnovni i zajednički nazivnik geneze je korozivno i erozijsko djelovanje vode u raspucanim, topivim karbonatnim stijenama, odnosno proces okršavanja.

Korozivno djelovanje vode u podzemlju predisponirano je brojnim tektonskim pukotinama, nastalim tijekom endogenih pokreta, a duž kojih dolazi do prodiranja voda s površine terena. Agresivnim djelovanjem voda obogaćena ugljičnim dioksidom iz zraka, te humusnom i drugim organskim kiselinama iz pokrovnog tla, otapa stijenske pukotina postupno ih proširujući. Proces je relativno spor no s vremenom broj i dimenzije pojedinih pukotina se povećava, i dolazi do njihovog međusobnog povezivanja, te se stvaraju uvjeti jačeg i bržeg protjecanja podzemnih voda. Protjecanje aktivira procese erozije pri kojima voda mehaničkim djelovanjem odlama i odnosi čestice ili fragmente stijene, te se proširivanje inicijalne pukotine znatno ubrzava. U zonama koje su bile pogodnije ili podložnije napredovanju opisanih procesa, dolazi do koncentracije podzemnog tečenja, a samim tim i do stvaranja uvjeta pod kojima mogu nastati podzemne šupljine vrlo velikih dimenzija. Koristeći se vertikalnom razdiobom krškog prostora kako je to prikazano na slici 9, može se reći da su navedeni procesi mogući i prisutni u svim zonama, kako u površinskom dijelu ili epikršu, tako i u nezasićenoj i zasićenoj zoni. Intenzitet procesa je različit i općenito se smatra da uslijed smanjenih brzina protjecanja sporije napreduje u dubljim dijelovima zasićene zone.

Geološke i druge specifičnosti određenog područja nedvojbeno utjeću na procese okršavanja, pa se tako mogu jače eksponirati procesi poput "natražne erozije", odnosno formiranje podzemnih šupljina odozdo prema gore, uslijed vertikalnog tečenja izazvanog čestim podizanjem razine podzemne vode. Znatno broj današnjih ulaza u speleološke objekte može se vezati upravo uz navedeni mehanizam postanka. Upravo zbog mogućih posebnosti, kao i činjenice da su speleološki objekti većinom nastajali u drugačijim uvjetima od danas prisutnih (u svakom pogledu), nije uputno generalizirati područja prema vrsti pojava koje se javljaju, no ipak, može se ukazati da vertikalni speleološki objekti većinom nastaju na prostorima s dubokom nezasićenom zonom.

Tijekom geneze već formirani speleološki objekti mogu proći kroz nekoliko različitih faza razvoja koje ukazuju na raznovrsne promjene kojima je bilo izloženo neko područje. Nakon razdoblja s intenzivnom cirkulacijom podzemnih voda može doći do bitnog smanjenja dotoka (klimatske promjene npr.). U tom slučaju bitno se smanjuje intenzitet erozijskih i korozivskih procesa i nastupa faza u kojoj dolazi do djelomičnog urušavanja nastalih šupljina, taloženja ili zaponjavanja raznim nanosima, te taloženja špiljskih ukrasa. Ponovnim aktiviranjem snažnih dotoka dolazi do djelomične ili potpune erozije istaloženih materijala, te formiranja novih podzemnih kanala i prostora. Navedene faze mogu se ponoviti u nekoliko navrata uvetujući složenu građu i geomorfološke karakteristike speleoloških objekata.

Najveći broj danas poznatih speleoloških objekata više nije aktivan, odnosno nalaze se visoko iznad utjecaja razine podzemnih voda, a nisu povezani s nekim od rijetkih površinskih vodotoka. Aktivni speleološki objekti prema hidrogeološkoj funkciji najčešće su stalni ili povremeni izvori i ponori. Neki objekti imaju stalne podzemne tokove u dubljim dijelovima, a estavele i vrulje su rijetke. Ovdje je nužno ukazati na vrlo realnu opasnost od naglog podizanja razine podzemnih voda ili nailaska površinske vode koja može djelomično ili u cjelosti potopiti takove objekte. Zbog navedenog, istraživanje stalno ili povremeno aktivnih objekata potrebno je provoditi oprezno, poznavajući lokalne hidrološke uvjete. Hrvatski speleolozi u novijem razdoblju nekoliko puta su sretno izbjegli ovim pojavama, ali u svijetu je evidentiran žalosno velik broj tragičnih udesa.

U Hrvatskoj osnovna podjela speleoloških objekata je prema nagibu kanala i razlikujemo :

1. Špilje - pretežito horizontalan speleološki objekat, prosječni nagib $< 45^\circ$
2. Jame - pretežito vertikalni speleološki objekat, prosječni nagib $> 45^\circ$

Navedeni kriterij nije univerzalan niti isključiv, jer je moguće da recimo objekat s ulaznom vertikalom od 200 m koji se na dno nastavlja s horizontalnim kanalom od 300 m svrstamo u špilje, premda promatrano s ulaza itekakao ostavlja dojam jame, a za njeno istraživanje nužna je upotreba speleološke tehnike za vertikale. Naravno, moguće je zamisliti i obrnut primjer. U takovim slučajevima speleolozi razvrstavaju objekat na osnovi vlastite prosudbe.

U krškoj terminologiji vrlo se često susrećemo s pojmom *kaverni*, a koji nije obuhvaćen niti jednom od postojećih klasifikacija te ga je nužno opisati. Kaverne su prirodne podzemne šupljine (prazne ili zapunjene) najrazličitijih dimenzija, u koje nema prirodnih ulaza s površine terena (ili nam nisu poznati). S aspekta speleologije značajne su kaverne većih dimenzija, odnosno one koje se mogu istraživati. Otkrivanje ovakvih kaverni i otvaranje pristupa u njihovu unutrašnjost vezano je uz veće građevinske zahvate na krškim terenima, a posebnu uz probijanje tunela. Načinom postanka i geomorfološkim osobinama takove kaverne se ne razlikuju od klasičnih speleoloških objekata, špilja i jama, u koje ulazimo s površine terena.

Zbog specifičnih mikroklimatskih uvjeta mogu nastati *ledenice* ili *snježnice*. To su špilje ili jame u kojima se tijekom cijele godine zadržava led ili snijeg, a obično se javljaju na visokoplaninskim krškim područjima.

Podjelu speleoloških objekata prema različitim kriterijima detaljno su razradili Čepelak i Garašić (1976, 1982) u Tumaču zapisnika speleoloških istraživanja. Kako je riječ o zapisniku koji je i danas u upotrebi u nastavku su izravno preneseni osnovni kriteriji i termini korišteni u toj podjeli. Za temeljitije upoznavanje s prikazanim podjelama uputno je konzultirati navedeni Tumač. Speleološki objekti razvrstani su prema morfološkom tipu, genezi ili načinu postanka, hidrološkim karakteristikama i hidrološkoj funkciji.

Prema morfološkom tipu:

1. jednostavan
2. razgranat
3. stubasti ili koljenasti
4. etažni
5. sustav

Prema genezi ili postanku:

1. tektonski
2. abrazijski
3. eroijski
4. korozijski
5. vulkanogeni
6. umjetni
7. poligenetski

Prema hidrološkim karakteristikama:

1. suh
2. s nakapnicom
3. s povremeno stjaćom vodom
4. sa stjaćom vodom
5. s povremenim tokom
6. sa stalnim tokom
7. povremeno potopljen
8. potopljen

Prema hidrogeološkoj funkciji:

1. povremeni izvor
2. stalan izvor
3. povremen ponor
4. stalan ponor
5. estavela
6. vrulja
7. protočan