



NEPOPOLNO RAZTAPLJANJE
KARBONATNIH KAMNIN V
KRAŠKIH JAMAH SLOVENIJE
NADJA ZUPAN HAJNA

C A R S O L O G I C A

Carsologica e1

Urednik zbirke
Franci Gabrovšek

Avtor

Nadja Zupan Hajna

NEPOPOLNO RAZTAPLJANJE KARBONATNIH KAMNIN V KRAŠKIH JAMAH SLOVENIJE

Urednik

Nadja Zupan Hajna

Recenzenta

Andrej Kranjc, Pavel Bosak

Oblikovanje in prelom

Nadja Zupan Hajna

Izdajatelj

Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna

Zanj

Tadej Slabe

Založnik

Založba ZRC

Za založnika

Oto Luthar

Glavni urednik

Aleš Pogačnik

Internetna objava • pdf

CIP - Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

911.2:551.442(497.4)(0.034.2)

551.442(497.4)(0.034.2)

552.54:551.3.053(0.034.2)

ZUPAN Hajna, Nadja

Nepopolno raztapljanje karbonatnih kamnin v kraških jamah Slovenije [Elektronski vir] / Nadja Zupan Hajna. - El. knjiga. - Ljubljana : Založba ZRC, 2014. - (Carsologica ; e1)

ISBN 978-961-254-672-4 (pdf)

<https://doi.org/10.3986/9789612546724>

272243712



© 2014, Založba ZRC, ZRC SAZU.

Vse pravice pridržane. Noben del te izdaje ne sme biti reproduciran, shranjen ali prepisan v katerikoli obliki oz. na kateri koli način, bodisi elektronsko, mehansko, snemanjem ali drugače, brez predhodnega pisnega dovoljenja lastnikov avtorskih pravic (copyrighta).

C A R S O L O G I C A



**NEPOPOLNO RAZTAPLJANJE
KARBONATNIH KAMNIN V
KRAŠKIH JAMAH SLOVENIJE**

Nadja Zupan Hajna

POSTOJNA – LJUBLJANA 2014

Predgovor in zahvala

Večina rezultatov je bilo pridobljenih v okviru doktorske disertacije, ki pa je nisem objavila v celoti in tudi ne v slovenskem jeziku. Pokazala se je potreba, da so rezultati mojih raziskav dostopni in razumljivejši čim širši slovenski javnosti, zato sem se tudi odločila za to internetno objavo. Raziskave so bile narejene v okviru programa Raziskovanje krasa in projektov na Inštitutu za raziskovanje krasa ZRC SAZU financiranih s strani ARRS.

Z analizami sem bila omejena predvsem zaradi finančnih sredstev, zato jih nisem mogla izvesti v zadostnem številu in tudi nisem naredila vseh, ki bi jih želela. Del analiz sem lahko naredila samo zaradi dobre volje izvajalcev, ki so mi ponudili v pomoč svojo raziskovalno opremo in svoj čas in se jim tukaj še enkrat lepo zahvaljujem.

Analize preperelih kamnin so izvedli Miran Udovč in dr. Meta Dobnikar z Oddelka za geologijo NTF; Adrijan Košir s Paleontološkega inštituta ZRC SAZU, Zoran Samardžija z Oddelka za keramiko na Inštitutu Jožef Štefan, dr. Matjaž Kavčič iz Laboratorija za analize z ionskim (protonskim) žarkom Odseka za fiziko nizkih in srednjih energij Reaktorskega centra Podgorica Inštituta Jožefa Štefan, dr. Andulka Langrova z Inštituta za geologijo Češke akademije znanosti in Mateja Zadel z IZRK ZRC SAZU. Geokemijske analize vzorcev (litogeokemijske analize, koda 4E) so naredili v Actlabs laboratoriju v Ancastru, Kanada. Mikrobiološke preiskave je naredil dr. Janez Mulec z našega Inštituta v laboratoriju Katedre za molekularno genetiko in mikrobiologijo Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete. Vrednosti pH mi je v jami meril dr. Tomaž Polak z Oddelka za živilstvo Biotehnične fakultete v Ljubljani. Vzorce iz globokih brezen Kaninskega pogorja so mi prinesli Stanislav Glažar, dr. Philippe Audra in dr. Franci Gabrovšek.

Pri terenskem delu so mi pomagali sodelavci Franjo Drole, Jurij Hajna, dr. Andrej Mihevc, dr. Janez Mulec ter prijatelj Jože Žumer. Merili in risali so jamske rove, opremljali jame, pomagali pri vzorčevanju, prenašali opremo in vzorce, vrtali profile, merili temperaturo in fotografirali.

Vsem, ki so mi pomagali pri terenskem delu in analiziranju vzorcev, se tukaj še enkrat lepo zahvaljujem.

Kazalo

1. UVOD	1
1.1. Tematika in predpostavke.....	1
2. SPLOŠNE ZNAČILNOSTI KARBONATNIH KAMNIN IN NAČINI NJIHOVEGA PREPEREVANJA	5
2.1. Karbonatni minerali.....	5
2.2. Apnenci in dolomiti.....	7
2.3. Preperevanje kamnin in njihovi produkti.....	9
2.4. Raztapljanje karbonatnih kamnin.....	11
3. PROCESI OBLIKOVANJA JAMSKI ROVOV	21
3.1. Intenziteta raztapljanja na krasu.....	21
3.2. Jame.....	23
3.3. Rast rogov in oblikovanje njihovih sten.....	25
4. AVTOHTONI KARBONATNI KLASTI KOT DEL NEVEZANIH FLUVIALNIH JAMSKIH SEDIMENTOV	30
4.1. Uvod in dosedanja literatura.....	30
4.2. Povišanje deleža kalcita in dolomita v naplavinah iz Postojnske in Planinske jame.....	32
4.3. Avtohtoni karbonatni litoklasti v recentnih jamskih sedimentih Kaninskega pogorja.....	35
4.4. Diskusija o izvoru avtohtonih karbonatnih klastov.....	43
5. OSTANKI NEPOPOLNEGA RAZTAPLJANJA KARBONATNIH KAMNIN V JAMSKIH ROVIH	45
5.1. Uvod.....	45
5.2. Izbor vzorčnih jam.....	45
5.3. Pečina v Borštu.....	48
5.4. Martinska jama.....	62
5.5. Krempljak.....	70
5.6. Jama II na Prevali.....	77
5.7. Turkova jama.....	83
5.8. Ostale jame.....	86
5.9. Diskusija in zaključki terenskih raziskav.....	93
6. ANALIZE VZORCEV PREPERELE KARBONATNE KAMNINE IZ JAMSKIH ROVOV	95
6.1. Pregled opravljenih analiz vzorcev preperelih kamnin in klastičnih sedimentov.....	95
6.2. Optične analize vzorcev preperelih apnencev in dolomitov.....	98
6.3. Analiza z rentgensko difrakcijo.....	112
6.4. Kemična analiza.....	121
6.5. Analiza organskega ogljika.....	126
6.6. Kompleksometrija.....	128
6.7. Vrstični elektronski mikroskop – EDS analiza.....	135
6.8. Analiza s protonskim žarkom.....	150
6.9. Mikrobiološke analize.....	158
6.10. Diskusija o rezultatih opravljenih analiz in zaključki.....	162
7. RAZMERJE MED AVTOHTONO KEMIJSKO EROZIJO PRI NASTAJANJU KRAŠKIH ROVOV NA PRIMERU VELIKE LEDENE JAME V PARADANI	164
7.1. Glavni geološki elementi v Veliki ledeni jami v Paradani.....	164
7.2. Tipi kamni, način preperevanja in nastanek klastičnih sedimentov.....	169
7.3. Diskusija in zaključki.....	174
8. DISKUSIJA IN ZAKLJUČKI O PREPEREVANJU KARBONATNIH KAMNIN V JAMAH	176
8.1. Pregled rezultatov analiz.....	176
8.2. Diskusija.....	177
8.3. Zaključki.....	186
9. LITERATURA	187
10. PRILOGA	201

1. UVOD

1.1. Tematika in predpostavke

Raziskave predstavljene v tem delu posegajo v malo raziskano področje nepopolnega raztapljanja apnencev in dolomitov. Med preučevanjem jamskih klastičnih sedimentov me je najprej presenetil velik delež karbonatnih klastov v jamskih naplavinah, kasneje pa tudi pojavljanje debelih, mehkih con neznanega minerala na stenah jamskih rovov. Po ugotovitvi, da gre za »topne« ostanke raztapljanja apnencev in dolomitov, sem skušala spoznati, kaj se dogaja v karbonatnih kamninah med preperevanjem in zakaj se ne raztopijo do konca.

Med raziskavami jamskih klastičnih sedimentov se je pokazalo, da se v njih velikokrat poveča delež karbonatnih klastov velikostnega reda melja in gline (NEWSON 1971a,b; ZUPAN 1990, ZUPAN HAJNA 1997a, 1998a). V Veliki Britaniji so velike količine karbonatnega plavja opazili tudi med vodnim sledenjem (NEWSON 1972). Karbonati tako v jamskih klastičnih sedimentih niso prisotni le kot vmesne plasti sige ali kot vezivo. Velikokrat so to drobni delci matične karbonatne kamnine, litoklasti, velikostnega reda drobnega peska, melja in gline. Iz tega dejstva izhaja tudi hipoteza, da se karbonatne kamnine vedno ne raztopijo popolnoma in da imajo karbonatni klasti izvor s sten jamskih rovov (ZUPAN & MIHEVC 1988). To pa pomeni, da voda ne odnaša apnenca samo v ionski obliki, ampak tudi v obliki delcev, katerih velikost je odvisna od strukture karbonatne kamnine, od trajanja preperevanja in intenzitete raztapljanja. Zanimalo me je, v kakšnih primerih raztapljanje karbonatno kamnino smo načne, in jo tako pripravi, da lahko predstavlja izvor drobnozrnatih karbonatnih klastov.



Slika 1.1.1. Do mehkega preperel apnenec pod debelimi sedimenti; gradbišče avtoceste severovzhodno od Novega mesta.

Preperevanje kamnin je odvisno od razkroja kamnine in odnašanja nastalih produktov (SUMMERFIELD 1991). Za karbonatne kamnine velja, da je preperevanje razpadno omejeno, to pomeni, da je hitrost preperevanja odvisno edino od raztapljanja. Te raziskave pa kažejo, da je delno omejeno tudi s transportom. Za apnenca in dolomite je značilno mehansko in kemično

preperevanje. Kemično preperevanje se odvija največkrat v obliki raztapljanja z ogljikovo kislino, ki je za nastajanje krasa tudi zadostno (DREYBRODT 1988, 1992; GABROVŠEK 2000).

Opazila sem, da je nepopolno ali postopno raztapljanje apnencev in dolomitov značilno tako za raztapljanje karbonatne kamnine na površju (sl. 1.1.1.), na primer pod prstjo ali drobnozrnatim sedimentom, kot za raztapljanje v kraških jamah, kjer je ta pojav posebno pogost v rovih, ki so bili ali so še popolnoma zapolnjeni z naplavinami, kjer se dogaja kondenzna korozija ali čez stene meži voda. Tako raztapljanje je navadno tudi izrazito selektivno, saj se večji kristali topijo počasneje kot majhni. V nadaljevanju se bom posvetila primerom nepopolnega raztapljanja v jamskem okolju.



Slika 1.1.2. Preperel, razbarvan, porozen in mehak rob temnega krednega apnenca iz Martinske jame v Matarskem podolju, JZ Slovenija.

Zanimivo je vprašanje zakaj se vsa karbonatna kamnina ne raztopi takoj, ampak kot preperina ostane na stenah jamskih rogov (sl. 1.1.2.). Da na jamskih stenah ostajajo preperile cone apnenca ter dolomita in, da ne gre za izločanje sekundarnih mineralov, je razvidno že iz same strukture in teksture preperine, ki je zadržala osnovne lastnosti matične kamnine, ki se ji poroznost močno poveča (sl. 1.1.3.) ter iz zveznega prehoda med svežim in preperelim delom kamnine. V primerih, ko je na voljo tekoča voda, je preperina lahko sprana s stene in se v obliki karbonatnega melja ter gline akumulira v jamskih klastičnih sedimentih.

Za kemično preperevanje je značilno, da se karbonatna kamnina najprej razbarva, v nadaljevanju pa postaja tudi vedno bolj porozna. V tej študiji sem skušala ugotoviti zakaj se vsa karbonatna kamnina ne raztopi takoj in kaj se dogaja med njenim kemičnim preperevanjem, ter kakšna je razlika v kemični in mineralni sestavi med preperelim in svežim delom kamnine.

Predpostavila sem, da je mehansko odplavljanje trdnih delcev iz prekrystaljenih in dolomitiziranih apnencev, ki jih sestavljajo velika sparitna zrna večje kot iz drobnozrnatih neprekrystaljenih in nedolomitiziranih apnencev.



Slika 1.1.3. Kredni apnenec z rudistinimi školjkami, ki štrlijo iz močno preperele mehke osnove; jama Pečina v Borštu v Matarskem podolju, JZ Slovenija.

Podobno je tudi v primerih, kjer je karbonatna kamnina tektonsko močno porušena, drobna voda mehansko lažje odplakne in ga tudi lažje raztaplja. Drugače je pa primarno raztapljanje in takrat pridobi na pomembnosti njena mineralna sestava ter struktura. Raztapljanje načne najprej robove ter napake na površini zrn in raztopijo ali natopijo se najprej najmanjša zrna. Na površini kamnine najdemo značilne strukture selektivnega raztapljanja, saj se najprej raztopi mikritna osnova, kalcitne žile in odlomki fosilov pa neprepereli (natopljeni) štrle iz površine (sl. 1.1.3. in 1.1.4.).



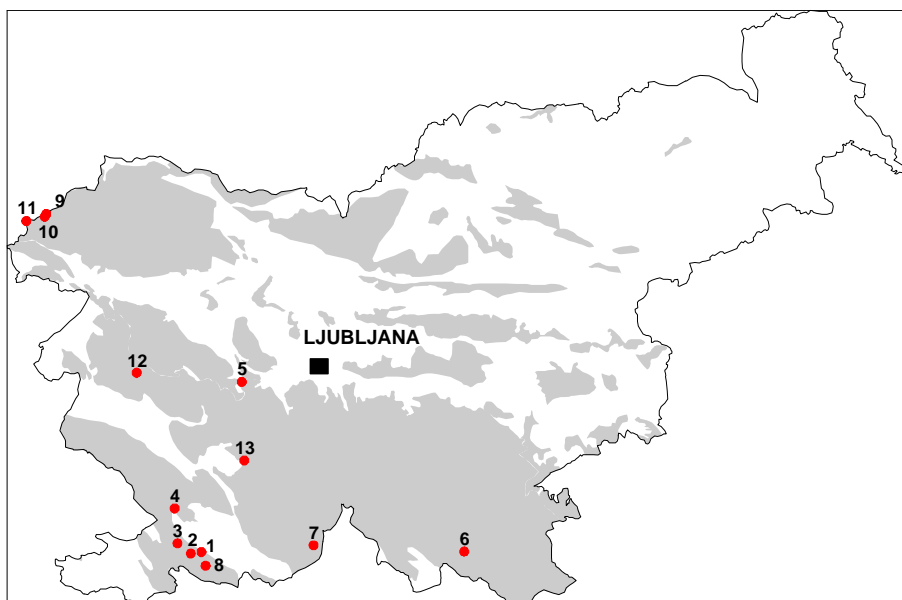
Slika 1.1.4. Kalcitne žile izstopajo iz selektivno preperele osnove krednega apnenca; steno prekriva rjav, delno cementiran sediment. Rov Koalicije, Postojnska jama.

Ali raztapljanje poteče do konca ali ne, je odvisno od mnogih dejavnikov. Kemični proces lahko kamnino samo načne, ostalo opravi voda tako, da pripravljene delce iz načete kamnine samo še odplakne. Obstajata torej dve transportibilni obliki: raztopina in plavje.

Strokovne izraze v tekstu uporabljam v smislu kraške terminologije, ki jo uporabljajo GAMS (1974) ter FORD & WILLIAMS (1989, 2007) in to brez sprotnih razlag. Med samim tekstom razlagam pojme, ki so se mi zdeli manj jasni, vendar pomembni za razumevanje besedila.

Izbor jam mi je narekovalo pojavljanje preperle cone karbonatne kamnine na stenah jamskih rogov, povečan delež karbonatnih mineralov v nevezanih jamskih naplavinah in dostopnost vzorčnih mest. Omejila sem se na vzorce iz Slovenije, čeprav sem pojav nepopolnega raztapljanja apnencev in dolomitov opazila tudi drugod po svetu.

Pojavljanje debelih preperelih con je značilno za jame z različno geografsko lego, v različnih tipih krasa in za jame, ki so bile oblikovane v različnih karbonatnih kamninah tako po nastanku kot po starosti. Obdelala sem dele jamskih rogov iz izbranih jam, katerih lege so predstavljene na sliki 1.1.5.. V izbranih rovih sem evidentirala obstoječe stanje, globino preperle cone, poskušala razložiti prisotnost pojava ter vzela vzorce za nadaljnje preiskave. Z različnimi preiskovalnimi metodami, ki sem jih uporabila, sem skušala problem zajeti čim širše.



Slika 1.1.5. Lege preiskovanih jam v Sloveniji: 1- Pečina v Borštu, 2- Martinska jama, 3- Krempljak, 4- Jama II na Prevali, 5- Turkova jama, 6- Remergrund II, 7- Spodmol na Ždroclah, 8- Polina peč, 9- Črnelško brezno, 10- Jama Čehi 2, 11- Renejevo brezno, 12- Velika ledena jama v Paradani, 13- Jama pod Pečno rebrijo.

Poudarek raziskav je bil predvsem na načinu preperevanja karbonatne kamnine ter vpliva njenih litoloških parametrov na način in hitrost preperevanja. Del študije je bil že objavljen v nekaj prispevkih na konferencah in knjigi (ZUPAN HAJNA 2001, 2002a,b, 2003a,b,c, 2005; MULEC et al. 2002).

2. SPLOŠNE ZNAČILNOSTI KARBONATNIH KAMNIN IN NAČINI NJIHOVEGA PREPEREVANJA

Za nastanek krasa in jam je pomembna tako primarna kot sekundarna poroznost karbonatnih kamnin, mineraloška sestava, zrnavost, tekstura, debelina plasti in tektonska pretrtost. Voda v karbonatne kamnine penetrira po odprtih prostorih kot so lezike (meje med plastmi), razpoke, prelomi in jih obenem s korozijo dodatno širi. Naštejem naj nekaj dejstev: a. bolj je kamnina čista, manj ima netopnega ostanka; b. bolj je kamnina tektonsko pretrta, hitreje se raztaplja; c. vsebnost žvepla pospeši raztapljanje; d. dolomit se počasneje raztaplja kot apnenec in tudi lažje mehansko razpada; itd.. Kras tako nastaja v vseh karbonatnih kamninah, če je na razpolago voda, ki jih raztaplja.

Za procese, ki oblikujejo jamske rove, so prav lastnosti karbonatnih kamnin eden pomembnejših dejavnikov. Sedimentne karbonatne kamnine sestavljajo karbonatni minerali (>50 %) in to predvsem karbonati kalcija ter magnezija. V nadaljevanju podajam splošne lastnosti karbonatnih mineralov s poudarkom na kalcitu in dolomitu ter kamnin, tako apnencev kot dolomitov.

2.1. Karbonatni minerali

Lastnosti karbonatnih mineralov sem povzela po DEER et al. (1967), po LIPPMANN (1973) in po KLEIN & HURLBUT (1993).

Karbonatni minerali so soli ogljikove kisline. Soli so spojine, ki v talinah in vodnih raztopinah disociirajo v pozitivno nabite kovinske ione in negativno nabite kislinske ostanke. Minerali tega tipa so vezani na srednje do nizke temperature. Anionska skupina $(\text{CO}_3)^{2-}$ v karbonatih nase veže kovinske katione različnih ionskih radijev.

Osnovna zgradba karbonatov izvira iz strukture NaCl, vendar trikotna oblika skupine $(\text{CO}_3)^{2-}$ pogojuje, da je struktura rombična in ne kubična (KLEIN & HURLBUT 1993). Trikotna oblika skupine $(\text{CO}_3)^{2-}$ pa nastane, ker je C^{4+} kation v 3-koordinaciji s kisiki in je vez med ogljikovim ionom in posameznimi kisiki močna, medtem ko na vsakem kisiku ostane pribitek negativnega naboja, ki je enak $-2/3$. Zato skupina deluje kot radikal z negativnim nabojem -2 .

Karbonatni trikotnik je osnovna gradbena enota karbonatnih mineralov. Ločimo dve osnovni skupini karbonatov, to je karbonate brez vode in drugih anionov ter karbonate z vodo in s tujimi anioni. Čeprav je vez med centralnim ogljikom in njegovimi kisiki v $(\text{CO}_3)^{2-}$ skupini močna, ni tako močna kot kovalentna vez v CO_2 . Zato postane v prisotnosti vodikovega iona karbonatna skupina nestabilna in razpade na CO_2 in vodo.

Glede na obliko kristalne mreže ločimo trigonalne karbonate in rombične karbonate. Trigonalni karbonati vsebujejo Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} in Fe^{2+} katione, katerih premeri so manjši od Ca^{2+} kationa in vsak od njih je v kristalni rešetki obkrožen s šestimi kisiki. Rombični karbonati vsebujejo katione, ki so večji od Ca^{2+} kationa, to so Sr^{2+} , Pb^{2+} in Ba^{2+} , vsak od kationov je obkrožen z devetimi kisiki. Samo Ca^{2+} kation je lahko vgrajen v oba tipa kristalne mreže.

Trigonalni karbonati imajo ionski radij manjši od kalcijevega iona. Minerali te skupine so: kalcit, magnezit, rodohrozit, siderit in smitsonit. Našteti minerali so si morfološko zelo podobni, strukturno pa popolnoma enaki. Vendar zaradi znatnih razlik v velikosti njihovih ionskih radijev ne obstaja možnost popolnega izomorfnega mešanja med vsemi. Samo po velikosti najbližji kationi se lahko v popolnosti zamenjujejo; kadar so pa razlike v ionskih radijih večje, je zamenjava omejena. Popolno se lahko mešajo: kalcit in rodohrozit (CaCO_3 - MnCO_3), rodohrozit in siderit (MnCO_3 - FeCO_3) ter siderit in magnezit (FeCO_3 - MgCO_3).

Izomorfno mešanje med kalcitom in magnezitom je zelo omejeno. Glede na možnost mešanja in odnosom primešanih komponent razlikujemo več mineralov.

Popolno izomorfno mešanje med kalcitom in magnezitom ne obstaja, zato nastaja dolomit. V tej dvojni soli je lahko del ali ves Mg zamenjan z Fe ali Mn.

Zaradi tega razlikujemo predstavnike: dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, kutnahorit $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$ in ankerit $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$.

Zelo redko se v zmanjšanem obsegu, vgrajujejo Mg ioni v kalcitovo mrežo, presežki Ca ali Mg ionov v dolomitovo mrežo in Ca ionov v magnezitovo mrežo.

Dolomit in ankerit, kristalijo v nižji simetriji, trigonalno romboedrski, ker se zaradi izmenične zamenjave Ca in Mg ionov, odnosno Ca in Mg, Fe ter Mn ionov, zniža simetrija. Kristalografske lastnosti vseh naštetih mineralov so si zelo podobne. Kot petrogeni minerali so pomembni samo kalcit, dolomit in magnezit. Aragonit v recentnih karbonatnih kamninah izločajo organizmi. Aragonit ni obstojen in s časom prehaja v kalcit.

Kalcit, CaCO_3 , kristali heksagonalno in to v trigonalni singoniji. Struktura kalcita temelji v nalaganju $(\text{CO}_3)^{2-}$ skupin en vrh druge in na prisotnosti Ca^{2+} ionov v nezasedenih prazninah paketa z antiprizmatsko koordinacijo (LIMA-DE-FARIA 1994).

$(\text{CO}_3)^{2-}$ skupine gradijo vodoravne plasti, katerih struktura je lahko izpeljana iz deformiranega heksagonalnega zgoščenega nalaganja kisikovih atomov, ki z ogljikovimi atomi zasedajo trikotne praznine z oktaedrsko koordinacijo. Plasti nalaganja skupin $(\text{CO}_3)^{2-}$ so zamaknjene po smeri c-osi (tretje kristalografske osi). Vsak kisik je koordiniran na dva kalcija in obenem na ogljik v središču $(\text{CO}_3)^{2-}$ skupine.

Obstajajo tri osnovne oblike kalcitovih kristalov (KLEIN & HURLBUT 1993): prizmatska, romboedrska in skalenoodrska. Prizmatski kristali so lahko dolge ali kratke prizme. Skalenoodrski kristali so običajno kombinacija $\{2131\}$ in $\{1011\}$, skalenoodri so lahko omejeni tudi samo s ploskvami $\{2131\}$, romboedrski kristali pa so največkrat omejeni s ploskvami osnovnega romboedra $\{1011\}$ in redkeje s ploskvijo $\{0221\}$. Ploskve in robovi so velikokrat blago zaobljeni, zaradi tega ploščati romboedri kažejo lečasto obliko.

Za kalcit je značilno dvojlično zraščanje kristalov. Kalcit pogosto ga najdemo tudi v zrnatih, kroglastih, stebričastih in drugih oblikah.

Mineral dolomit je dvojna sol Ca-karbonata in Mg-karbonata, katerega kristalna mreža sestoji iz pravilne izmenjave slojev CaCO_3 in MgCO_3 .

Struktura minerala dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, je podobna kalcitovi le, da se po c-osi izmenjujejo plasti s Ca in Mg. Velika razlika med velikostjo ionov Ca^{2+} in Mg^{2+} (33%) povzroči v strukturi ureditev kationov v dve različni plasti. Zaradi neenakosti Ca in Mg plasti, 2-kratna rotacijska os ne obstaja več in simetrija se zmanjša.

Zgradba dolomita je med CaCO_3 in MgCO_3 , za Ca : Mg = 1 : 1. Čisti dolomit je v naravi redek; večina dolomitov vsebuje višek CaCO_3 . Vrednosti razmerja Ca : Mg so v naravnih dolomitih med 58 : 42 do 47,5 : 52,5. Plasti v kristalni mreži, ki vsebujejo Mg ione, so gostejše, zato se pri dolomitizaciji apnencev poroznost kamnine poveča.

Vgrajevanje slednih elementov v kalcitovo kristalno rešetko je pogojeno z napakami v kristalni mreži, katerih količina se močno poveča s povišano hitrostjo precipitacije (TUCKER & WRIGHT 1990).

Sledni elementi lahko zasedejo medprostore med plastmi kristalne mreže, se absorbirajo, lahko zasedejo napake v kristalni mreži, lahko pa se vgradijo tudi kot trdni ali tekočinski vključki ali pa se pojavljajo vzdolž meje kristala.

Način vgrajevanja ionov v karbonatno mrežo določa koncentracijo slednega elementa. Kadar v kalcitu sledni element nadomesti Ca v kristalni mreži, lahko njegovo koncentracijo napovemo s povprečjem njegovega koeficienta porazdelitve.

2.2. Apnenci in dolomiti

Apnenci in dolomiti so najznačilnejše karbonatne sedimentne kamnine, ki zakrasevajo in so različnih starosti ter geneze. Karbonatne sedimentne kamnine so tudi peščenjaki, konglomerati in breče, v katerih so posamezna zrna ali vezivo karbonatne sestave. Karbonatne kamnine po nastanku niso vedno sedimentne, lahko so tudi magmatske (karbonatit) ali pa metamorfne (marmor) in zaradi svoje mineralne sestave tudi zakrasevajo.

Po Ford & Williamsu (1989) sedimentne karbonatne kamnine zavzemajo 12 % površine kopne Zemlje, njihove plasti so lahko debele po več kilometrov. V sedaj nastajajočih karbonatnih usedlinah se v približno enakem deležu izločata minerala kalcit in aragonit, dolomit pa se izloča samo izjemoma. Litificirani karbonati, starejši od srednjega terciarja, vsebujejo samo majhen delež aragonita, saj je nestabilen in s časom prehaja v kalcit. Apnenc in dolomit sta v različno starih kamninah zastopana različno; starejše ko so, večji je delež dolomita. Razmerje med maso apnenca in dolomita je v krednih kamninah 80 : 1, v spodnje paleozojskih kamninah 3 : 1 in v predkambrijskih kamninah 1 : 3. V Sloveniji karbonatne kamnine predstavljajo 43 % površja; 35 % je apnencev, 8 % pa dolomitov (Gams 1974).

Karbonatne kamnine po definiciji vsebujejo več kot 50 % karbonatnih mineralov (BLATT et al. 1972; TUCKER & WRIGHT 1990). Volumsko najpomembnejša minerala sta kalcit in dolomit. Na zemeljskem površju ohranjene sedimentne karbonatne kamnine so večinoma plitvomorskega nastanka in izvirajo z nekdanjih platform. Danes se največ karbonatov kopiči na globokomorskem dnu in na kontinentalnih pobočjih. Njihovi starejši ekvivalenti pa so izginili v conah subdukcije (FORD & WILLIAMS 1989).

Osnovne lastnosti kamnine so odvisne od mineralne sestave, velikosti in oblike zrn, njihove orientacije in zgoščenosti, to je poroznosti (SKABERNE 1980). Oblika posameznih zrn v kamnini je odvisna od razmerja med posameznimi osmi v zrnju, zaobljenosti, sferičnosti in strukture površine.

Karbonatne kamnine klasificiramo glede na velikost zrn, sestavo, teksturo in facies. Pomembni sta klasifikaciji po DUNHAMU (1962) in po FOLKU (1962). Pri DUNHAMU je osnova mikritna ali skeletna. Glede na delež alokemičnih komponent deli karbonatne kamnine na mudstone, wackstone, packestone, greinstone in boundstone. Folk deli karbonatne kamnine glede na vsebnost ortokemičnih (mikrit, sparit) in alokemičnih komponent (intraklasti, peleti, fosili, ooidi, onkoidi) na intramikrit, intrasparit, oomikrit, oosparit, pelmikrit, pelsparit, biomikrit, biosparit, biolitit in dismikrit ter na vse možne kombinacije med njimi.

Apnenc so najznačilnejša kraška kamnina. Kratek opis apnencev in dolomitov ter diagenetskih procesov, ki se odvijajo v njih sem povzela po BLATT et al. (1972), FÜCHTBAUER (1974), BATHURST (1975), SCHOLLE et al. (1983), MORSE & MACKENZIE (1990), TUCKER & WRIGHT (1990), PURSER et al. (1994) in AL-AASAM & PACKARD (2000).

Večina apnencev na zemeljskem površju je nastala v plitvomorskem okolju s tropsko in zmerno toplo klimo. Po poenostavljenem modelu WILSONA (1975) nastajajo apnenci in zgodnje diagenetski dolomiti v območjih od globokega morja, šelfa, grebena, skozi lagune do nadplimskih okolij kot so slana močvirja itd.

V vsakem sedimentacijskem okolju, pogojenim z njemu lastnimi fizikalno-kemijskimi in biološkimi lastnostmi, se izločajo karbonate kamnine z jasno določenimi značilnostmi, ki jih izraža kamninski »facies«.

Tudi sulfatne kamnine in haloidi se lahko oblikujejo v nekaterih od teh okolij in se tako odlagajo med karbonatne usedline. Večino aragonita in kalcita izločijo z morski organizmi, nekaj aragonita lahko nastane tudi s kemijskim obarjanjem.

Cementacija in rekristalizacija v času diagenoze lahko dodata anorganski sparitni kalcit. Glede na velikost zrn ločimo mikrit, mikrosparit in sparit. Najpomembnejšo maso apnenca predstavlja karbonatno blato ali mikrit, ki lahko gradi celo plast ali formacijo, lahko pa služi samo kot osnova ali zapolnitev. V okoljih z višjim energijskim indeksom se odlagajo

karbonatni peski. Poleg mikrita so glavni sestavni deli apnencev peleti, ooliti, onkoliti, skeleti organizmov, intraklasti in litoklasti.

V času diageneze se karbonati litificirajo, začne se cementacija, raztapljanje in nadomeščanje, oblikujeta se primarna ter sekundarna poroznost, lahko pride do zgodnje ali pa pozno-diagenetske dolomitizacije.

Diageneza je lahko izokemična ali pa alokemična. Izokemično diagenozo predstavljata cementacija in prekristalizacija, medtem ko obsega alokemična diageneza dolomitizacijo, anhidratizacijo, silifikacijo in novotvorbe silikatov.

Dolomiti so karbonatne kamnine, sestavljene pretežno iz minerala dolomita. Po definiciji vsebujejo več kot 50 % minerala dolomita (BLATT et al. 1972). Dolomit nastaja iz apnenca pri procesu dolomitizacije (FÜCHTBAUER 1974; TIŠLJAR 1976) le izjemno majhen delež se obarja neposredno v morskem okolju. Za dolomitizacijo apnencev je potrebna tekočina, ki prinaša Mg^{2+} ione in odnaša Ca^{2+} ione.

Dolomitizacija se lahko dogaja v času zgodnje diageneze ali pozne diageneze. Mehanizmi zgodnjediagenetske dolomitizacije so:

- Izparevanje morske vode iz por še mehkih apnenčastih usedlin v nadplimskem okolju, kar poveča koncentracijo Mg^{2+} iona.
- Evaporitno črpanje v porah mehkih apnenčastih usedlin v nadplimskem okolju. V porah nastaja podtlak, ki pogojuje vsesavanje morske vode iz lagun in plitvin tako, da se poveča koncentracija Mg^{2+} iona in nastane potrebno razmerje Mg/Ca.
- Povratno strujanje, pri katerem prihaja zaradi razlike v koncentraciji vode iz izolirane lagune ali saline ter morske vode v plitvini do strujanja ali precejanja vode iz saline skozi mehek sediment v plitvini, to strujanje omogoča stalen dotok magnezija, izparevanje pa omogoča njegovo potrebno koncentracijo.
- Močno evaporacija vode iz izolirane lagune, zaliva ali slanega jezera, kar povzroča izločanje sadre in s tem povišanje razmerja Mg/Ca.

Za nastanek zgodnjediagenetskega dolomita sta pomembna predvsem prva dva mehanizma. V okolju s toplo klimo in visoko koncentracijo Mg ionov nastanejo zelo drobni kristali dolomita, tako, da se primarne teksture lepo ohranijo. Za zgodnjediagenetski dolomit so značilne tudi stromatolitne lamine in izsušitvene razpoke, ki kažejo na nadplimsko okolje nastanka, v njih pa se lahko nahajajo tudi evaporitni sedimenti. Meja proti apnencem nad in pod dolomitno plastjo je ostra, saj se je dolomitizacija ostro končala s spremembo okolja in s ponovnim usedanjem apnenca.

Poznodiagenetska dolomitizacija se odvija v že strjenem apnencu, pri kroženju in difuziji Mg ionov s porno vodo skozi različne apnenice. Meje poznodiagenetskega dolomita niso ostre, tako da bočno in vertikalno prehaja v apnenice. Delež dolomita pada od sredine dolomitne mase proti robovom, obenem pa raste delež nedolomitiziranega apnenca. Za poznodiagenetski dolomit so značilni veliki kristali, ki zrastejo zaradi majhne količine kristalizacijskih jeder, nizke koncentracije magnezija in počasne kristalizacije. Zaradi rasti velikih dolomitnih kristalov se primarna tekstura in struktura apnencev zakrije, nastane debelo kristalni dolomit. Ti dolomiti imajo zaradi nizke koncentracije magnezija ponavadi razmeroma nizko stopnjo urejenosti kristalne rešetke. Velikokrat idiomorfni kristali dolomita vsebujejo vključke bitumna in glinenih mineralov.

Dedolomitizacija je diagenetski proces kalcitizacije dolomita in ponovne tvorbe apnenca.

2.3. Preperavanje kamnin in njihovi produkti

2.3.1. Procesi preperavanja

Ko pridejo apnenci iz okolja usedanja v vadozno cono, začnejo preperavati. Preperavanje je proces retrogradne diageneze, takrat lahko začne nastajati karbonatni melj, oblikujejo se različne skorje, pizoliti ter sige. Procesi površinskega razpadanja kamnin so fizikalni, kemijski in biološki (OLLIER 1984). V primernih pogojih, preperavanje nikoli ne preneha.

Na potek retrogradne diageneze karbonatnih kamnin vplivajo številni dejavniki, najpomembnejši so (WOLF & CHILINGARIAN 1994):

- temperatura,
- pH,
- Eh,
- organske snovi,
- CO₂,
- raztopljene snovi,
- razmerje Ca/Mg,
- pretok fluida, itd..

Kemični procesi lahko kamnino delno ali popolno spremenijo. Nastajajo lahko različne skorje, ki so produkt preperavanja: Fe in Al-oksidi, boksiti, lateriti in karbonatne skorje (kaliče), lahko pa vsa gmota odide v raztopini.

Procesi kemijskega razpadanja kamnine so:

- hidratacija,
- hidroliza,
- oksidacija,
- izmenjava baz,
- delovanje kislin,
- raztapljanje,
- nastajanje koloidov.

Hidratacija je absorbcija vode, molekule vode se vežejo v kristalno mrežo, na primer: CaSO₄ v CaSO₄ x 2H₂O. Hidroliza je absorbcija OH⁻ in H⁺ ionov. Reakcija je eksotermna, tako se osvobajajo kationi, ki prehajajo v raztopino ali v koloide. Izmenjava baz se pojavi po hidrataciji in hidrolizi. Omenjene reakcije nastajajo iz selektivne adsorpcije na površini trdnih delcev in ionov, ki se nahajajo v prisotni tekoči fazi. Takrat prihaja do izmenjave ionov in njihovega oddaljevanja iz zunanjih slojev kristalne snovi in kar je še značilnejše, iz koloidnih produktov hidrolize. Značaj izmenjave je odvisen od niza dejavnikov, predvsem od vrste prisotnih kationov in anionov ter njihove koncentracije, od samega minerala ali koloida ter od pH raztopine.

Do oksidacije pride v vlažnih kamninah površinske cone razpadanja, ker je prisotnost vode najpomembnejša za aktivno oksidacijo s plinskim kisikom.

Mehanski pogoji za preperavanje kamnin so:

- drobljenje,
- razpokanost v bližini površja,
- razpokanost zaradi tektonskih deformacij,
- klimatska kolebanja,
- rast kristalov ledu in soli v razpokah ter s tem pogojeno raztezanje.

Biološki dejavniki, ki vplivajo na razpad kamnin, so:

- vegetacija, ki s koreninami vpliva na mehansko in kemijsko razpadanje, pomembno pa je tudi
- raztapljanje z organskimi kislinami, ki nastajajo predvsem pod vplivom delovanja bakterij, delno pa tudi rastlin, živali.

Na preperevanje kamnin vplivajo odpornost primarnih mineralov, klima ter relief in drenaža. Odpornost primarnih mineralov na preperevanje je podan z Goldishevim nizom, ki je obraten Bownovemu nizu izločanja (OLLIER 1984). Minerali, ki kristalijo pri višji temperaturi, so v atmosferskih pogojih manj odporni na nove razmere.

Podobno velja za karbonatne kamnine. Atmosferski pogoji so precej drugačni kot so pogoji v katerih so karbonatne kamnine nastale. Zato se minerali v kamnini skušajo ponovno uravnotežiti.

Za odpornost proti preperevanju je pomembna tudi velikost zrn. Manjša so zrna v kamnini, manj odporna so in to zaradi površinske proste energije. Ta je močnejša na robovih zrn; manjša zrna pa imajo glede na svojo površino višji odstotek robov in zato hitreje preperevajo. Za podvrženost preperevanju je pomembna tudi urejenost kristalne rešetke minerala. Med preperevanjem kamnine prvotni minerali velikokrat razpadejo, se topijo, s tem se pa povečuje tudi poroznost kamnine. Povečana poroznost kamnine nadalje zmanjšuje njen odpornost proti delovanju mehanskih sil. Tako se trdota kamnine spreminja v odvisnosti od stopnje, do katere je kamnina preperela.

Glavna klimatska faktorja, ki vplivata na razpadanje kamnin sta količina padavin in temperatura. Temperatura vpliva na hitrost reakcij. Padavine vplivajo na transport mase in tip vegetacije, le ta pa na tvorbo različnih organskih kislin. Najmočnejše kemijsko preperevanje je v vlažnih tropskih predelih z visoko temperaturo in veliko količino padavin. V aridnih in arktičnih predelih prevladuje mehansko razpadanje.

Preperevanje kamnine in transport njenih preperelih ostankov je pomemben geomorfološki proces predvsem pri nastajanju pobočij in tal na njih (SUMMERFIELD 1991). Procesi, ki odnašajo kamnino s primarnega mesta so lahko omejeni s:

- preperevanjem ali
- transportom.

CARSON & KIRKBY (1972) navajata, da so s preperevanjem omejeni tisti,

- kjer je transport nastajajoče preperine na površini matične kamnine hitrejši od preperevanja.

S transportom omejeni pa so tisti,

- kjer je preperevanje hitrejšo od transporta.

Preperevanje apnenca je tako v normalnih okoliščinah omejeno s transportom (hitrost odnašanja raztopljenih ionov je odvisna od količine vode).

2.3.2. Produkti preperevanja

Ostanki preperevanja so lahko zrnati ali v obliki raztopine. Tako ločimo primarne minerale, sekundarne minerale ter topne ostanke preperevanja.

Rezidualni primarni minerali, so ostanki preperevanja primarnih kamnin. V atmosferskih pogojih so stabilni glineni minerali, hidrosljude, kremen, kloriti in težki minerali.

Sekundarni minerali pa nastanejo pri izluževanju in hidrolizi primarnih mineralov. Nastajajo novi minerali, kot so minerali glin ter hidroksidi Fe in Al. Razen na primarnem mestu lahko nastajajo tudi s koagulacijo koloidov, to je značilno predvsem za Fe hidrokside ter amorfni kremen in kalcit.

Topni produkti preperevanja so ostanki matičnih kamnin, pri karbonatih so to Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , pri bazičnih kamninah so Ca^{2+} , Mg^{2+} , in pri kislih kamninah K^+ in Na^+ .

2.4. Raztapljanje karbonatnih kamnin

2.4.1. Pregled osnov iz literature

V sedimentološkem smislu je raztapljanje proces, ki se odvija v okolju »meteorske« diageneze, ki obsega še izločanje, cementacijo, in pretvorbo mineralov (TUCKER & WRIGHT 1990; MORSE & MACKENZIE 1990).

Raztapljanje karbonatnih kamnin z ogljikovo kislino ali korozija je za kras značilen proces. Za razvoj krasa in med drugim tudi za oblikovanje kraških rovov, so pomembne predvsem litološke lastnosti karbonatnih kamnin, vrsta poroznosti in klimatski dejavniki.

V strokovni literaturi raztapljanje karbonatnih kamnin na krasu imenujejo tudi korozija, kemijska denudacija, kemijsko preperevanje ter kemijska erozija. Vsi ti termini pa predstavljajo več ali manj isti proces. Po GAMSU (1973) korozija v krasoslovju pomeni kemično ali v manjši meri fizikalno raztapljanje kraške kamnine, večji del s posredovanjem vode, ki vsebuje ogljikovo kislino. Korozija pomeni tudi odnašanje raztopljenih snovi. Glede na kraj dogajanja ista terminologija razlikuje biogeno korozijo, korozijo mešanice, aluvialno korozijo, podtalno korozijo, robno korozijo, ploskovno korozijo, pospešeno korozijo in linearno korozijo. LOWE & WALTHAM (1995) opredeljujeta korozijo kot erozijo materiala s kemijsko aktivnostjo, ki vodi v raztapljanje. Po GOUDIE et al. (1994) je korozija proces raztapljanja kamnine s kemičnimi dejavniki v vodi, z razliko od mehanskega odnašanja kamnine z vodo ali njenega nosečega tovora. Raztapljanje dejansko pomeni prehod trdne faze v raztopino.

Raztapljanje poteka na krasu v različnih okoljih (FORD & WILLIAMS 1989, 2007). Zgornji del kraškega okolja predstavlja vadozna cona, kjer prevladujeta difuzni tok, pretakanje vode skozi pore in tok po kanalih. V vadozni coni so pore v kamnini praviloma napolnjene z zrakom. V tej coni ločimo dve podconi, to je cono infiltracije in cono perkolacije. Voda se pretaka po načelu težnosti, kar je v razpokanih kamninah zelo hitro. Voda, ki se pretaka skozi vadozno cono vsebuje atmosferski CO_2 in tistega, ki izvira iz tal ter organske kisline. Med vadozno cono in med stalno zalito ali freatično cono, kjer sta atmosferski in hidrostatični tlak enaka, je cona gladine podtalnice. Prehod med conama predstavlja kapilarna cona, kjer se voda zaradi kapilarnih sil dvigne nad gladino podtalnice. Drugo okolje je okolje freatična cone, kjer so vse pore v kamnini stalno zalite z vodo. V kontinentalnih področjih freatična cona navzdol prehaja v globoko zalito cono, ki se v primeru bližine oceana meša s slano vodo.

Nenasičene meteorne vode se obogatijo z atmosferskim CO_2 , s CO_2 iz prsti, z organskimi in drugimi kislinami iz tal in nato raztapljajo karbonatne kamnine. Kemijski procesi in kinetika raztapljanja karbonatnih kamnin so zelo kompleksen proces, ki so jih proučevali različni avtorji z mnogih zornih kotov. Naj naštejem najpomembnejše: GARRELS & CHRIST (1965), THRAILKILL (1968), PLUMMER & WIGLEY (1976), BÖGLI (1978), PLUMMER et al. (1978), BUSENBERG & PLUMMER (1982), DREYBRODT (1980, 1981, 1988), REDDY et al. (1981), SJOBERG & RICKARD (1984), BAUMANN et al. (1985), BUHMANN & DREYBRODT (1985a, 1985b, 1987), HERMAN & WHITE (1985), TRUDGILL (1985, 1986), SHOPOV & GEORGIEV (1989), MORSE & MACKENZIE (1990), DREYBRODT & BUHMANN (1991), SVENSSON & DREYBRODT (1992), PINGITORE et al. (1993), DREYBRODT et al. (1996), DREYBRODT & ZAIHUA (1997), EISIENLOHR et al. (1997), EISIENLOHR et al. (1999) in GABROVŠEK (2000). Obdelano je raztapljanje pri različnih vrednostih pH, temperature, v

bližini ravnotežnih pogojev, pri dodajanju Mg iona, z nečistočami vezanimi v kalcijev karbonat, v poroznem mediju in tako dalje.

Hitrosti raztapljanja dolomita v odvisnosti od temperature in pH obravnavajo predvsem novejša razprava (PURSER et al. 1994; GAUTEILIER et al. 1999; SHERMAN & BARAK 2000; XU et al. 2013), vendar pa kinetika raztapljanja dolomita še vedno ni popolnoma razjasnjena. Pri svojem delu sem upoštevala dognanja omenjenih avtorjev in jih v nadaljevanju tudi povzemam, nisem pa se ukvarjala s samo kinetiko raztapljanja kalcita in dolomita.

Raztapljanje je odvisno od lastnosti karbonatne kamnine, vode ter okolja, v katerem se raztapljanje odvija ter narave reakcij na površini minerala (COLMAN & DETHIER 1986).

Kamnina na raztapljanje vpliva z mineralno sestavo, urejenostjo kristalne rešetke mineralov v kamnini, strukturo, velikostjo in obliko zrn, kontakti med zrni ter vrsto in stopnjo poroznosti.

Voda vpliva na raztapljanje s svojo kemijsko sestavo in z mehanskimi lastnostmi kot so količina, način pretakanja ter z načinom in velikostjo stika s kamnino.

Deževnica, ki se pri prenikanju skozi tla obogati s CO₂ tvori ogljikovo kislino, ki raztaplja karbonate. Raztapljajo jih pa tudi druge vode, ki pridejo v stik z njimi ali pa krožijo po njihovem skeletu. Vrednost pH kraških vod je okrog 8, medtem ko ima običajna deževnica vrednost pH od 5,6 do 6,4, kisel dež pa pod 5, nekje celo pod 3,5.

V okolju so pomembni klimatski pogoji kot je količina padavin, temperatura, pH, Eh, potem pa še tlak, pokritost s prstjo in vegetacijo, parcialni tlak CO₂ in seveda čas.

Tako se pri pH vrednostih nižjih od 4, raztapljanje odvija neodvisno od parcialnega tlaka CO₂ in je odvisno od hitrosti difuzije (SJOBERG & RICKARD 1984).

Pri vrednostih pH med 4 in 5,5 je hitrost raztapljanja odvisna od pH in parcialnega tlaka CO₂ in je počasnejša kot pri nižjih pH vrednostih.

Pri pH večjih od 5,9 se hitrost raztapljanja še zmanjša, odvisna pa je predvsem od reakcij na površini kristala.

Vrednost pH 7,8 je meja obstojnosti kalcita, nad to vrednostjo se kalcit praviloma ne raztaplja in pod to vrednostjo se ne izloča (GARRELS 1960).

Ko pride voda, ki vsebuje raztopljen ogljikov dioksid, v stik s kalcijevim karbonatom, ga prične raztapljati. Koncentracija kalcijevih ionov narašča, posledica tega je naraščanje koncentracije hidroksidnih ionov in poraba vodikovih ionov, ki se spajajo s karbonatnimi ioni.

Ogljikova kislina disociira, ker se vodikovi ioni porabljajo; narašča pa koncentracija karbonatnih ionov, kar je posledica disociacije hidrogenkarbonatnih ionov zaradi porabe vodikovih ionov (vzdrževanje ravnotežja disociacije vode).

Če upoštevamo vrednost ravnotežne konstante $K_2 = \frac{\langle H^+ \rangle \langle HCO_3^- \rangle}{\langle H_2CO_3 \rangle}$ iz Bjerrumovega diagrama (GARRELS 1960; DREVER 1988; MORSE & MACKENZIE 1990) vidimo, da prične ogljikova kislina močno disociirati šele pri pH vode 6-7. Koncentracija hidrogenkarbonatnih ionov je maksimalna pri pH 7-10, nato prične disociirati, zato pri višjih vrednostih pH prevladuje karbonatni ion. Teoretično bi se sicer moralo vzpostaviti ravnotežje med trdno fazo in raztopljenim CaCO₃, vendar v posebnih pogojih, kjer se ne pojavljajo kristalizacijska jedra in ni mehanskih motenj, lahko vlada stanje prenasičenosti.

Topnost kalcita, kot tudi topnost CO₂ v vodi, teoretično pada z naraščanjem temperature. To podaja enačba (ATKINS 1995):

$$d \ln K / dT = dH_r^0 / RT^2,$$

pri čemer je T temperatura, dH_r^0 je entalpija reakcije, ki lahko niha s temperaturo, R je plinska konstanta, K je termodinamična ravnotežna konstanta. Ravnotežno konstanto pa lahko

izračunamo tudi s pomočjo eksperimentalnih konstant A,B,C,D,E,F in absolutne T iz (PLUMMER & BUSENBERG 1982; MORSE & MACKENZIE 1990):

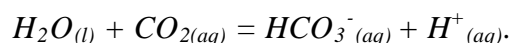
$$\ln K = A + B/T + C \ln T + DT + ET^2 + F/T^2.$$

Za karbonatni kislini sistem so, glede na zakon o delovanju mas, vrednosti za ravnotežnih konstant v odvisnosti od temperature $K_H = \text{CO}_2$, $K_1 = \text{HCO}_3^-$ in $K_2 = \text{CO}_3^{2-}$, v tabelah (GARRELS & CHRIST 1965; PLUMMER & BUSENBERG 1982; MORSE & MACKENZIE 1990). Na topnost vpliva tudi sprememba tlaka, ki je v tesni povezavi s spremembo temperature.

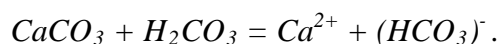
Karbonatne kamnine so v geološkem smislu lahko topne kamnine. Voda je univerzalno topilo. Ko prenikajoča ali podzemna voda pride v stik s kamnino, začne z njo vzpostavljati fizikalno-kemijsko ravnotežje.

- Kemija raztapljanja apnenca se odvija v glavnem v sistemu $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CaCO}_3$. Seveda ga pospešujejo tudi prisotnost mikroorganizmov, žvepla itd.. Vendar je ta sistem najpomembnejši in za nastajanje krasa tudi zadosten (GABROVŠEK 2000).

Osnovni proces raztapljanja na krasu je tak, da deževnica, ki se je v atmosferi in pri prenikanju skozi tla obogatila s CO_2 , tvori šibko ogljikovo kislino (PLUMMER & BUSENBERG 1982):



Ta kislina pri prenikanju skozi karbonatne kamnine le te topi, pri čemer nastajajo kalcijevi in hidrogenkarbonatni ioni



Raztopina se lahko nasiti in ni več agresivna. Lahko pa se ravnotežje v raztopini poruši, ko ta doseže jamski prostor in se zaradi spremembe parcialnega tlaka CO_2 in temperature iz raztopine začne izločati kalcijev karbonat v obliki sige



V osnovi gre za masno akcijo, katere rezultat je ravnotežni diagram, ki upošteva dva ekstremna sistema, to je stik z atmosfero in s tem odprt sistem CO_2 in za freatične pogoje ali zaprt sistem CO_2 .

Kinetika raztapljanja nam pove, kako hitro se raztapljanje odvija. Hitrost raztapljanja na površini opisuje empirični zakon, ki temelji na rezultatih eksperimenta s sintetičnim kalcitom (PLUMMER et al. 1978). Zato je raztapljanje linearno. Za primer naravnega kalcita navaja GABROVŠEK (2000), da je raztapljanje linearno le v začetku reakcije. Zaradi nečistoč, ki se naberejo na površini kalcita (netopni ostanek) pa postane nelinearno.

Po DREYBRODTU (1988) in GABROVŠKU (2000) določajo hitrost raztapljanja:

- raztapljanje na površini kristala,
- transport ionov skozi mejno plast,
- hitrost konverzije $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$.

Avtorji, ki so se ukvarjali z raztapljanjem karbonatnih kamnin na krasu, so izpostavili pomembnost različnih dejavnikov kot so na primer prisotnost Mg ionov (PICKNETT 1972 in 1977) in korozijsko mešanico (BÖGLI 1965 in 1978).

Na topnost apnenca v naravnih vodah najmočneje vpliva:

- prisotnost raztopljenega CO₂ v vodi, saj že njegova rahlo povečana koncentracija občutno poveča topnost apnenca. Tako je to glavni dejavnik, ki vpliva na raztapljanje karbonatnih kamnin vzpostavljaje karbonatnega ravnotežja.

Ostali pomembni dejavniki so še:

- nastajanje kompleksnih ionov,
- efekt tujih ionov,
- velikost zrn v kamnini,
- poroznost,
- čas in površina stika med vodo ter kamnino,
- polimorfnost CaCO₃ in
- vpliv organizmov.

Procese raztapljanja na kraškem površju in v jamah ter oblike v njih, ki so njihova posledica sem podrobneje predstavila v 3. poglavju.

2.4.2. Karbonatno ravnotežje

Pomembno je ali se raztapljanje odvija v odprtem ali zaprtem sistemu, to je z dovajanjem novega CO₂ ali brez. V odprtem sistemu delimo raztapljanje bikarbonata na sedem stopenj (GARRELS 1960; FORD & WILLIAMS 1989):

- Raztapljanje CO₂ v vodi.
- Hidratacija in disociacija raztopljenega CO₂, kar se v glavnem pojavlja v masnem toku, v področju hitre vrtinčaste difuzije ali v mejni plasti.
- Potencialno agresivni ioni, H⁺, raztopljeni CO₂ in H₂CO₃, prečkajo mejno in adsorpcijsko plast z molekularno difuzijo.
- Pojavijo se reakcije: Ca²⁺ ali CO₃²⁻ disociirata iz kristalove površine ali pa se H⁺ kombinira s CO₃²⁻ in ga preseli.
- Raztopljene snovi difundirajo skozi mejno plast.
- Nadaljnje uravnoteženje se pojavi v masnem toku, na primer Ca²⁺ + HCO₃⁻ = CaHCO₃⁺.
- Nasičena tekočina se razplini, vrnitev CO₂ v atmosfero.

Topnost plina CO₂ izraža Henryev zakon. V standardni atmosferi je na morski gladini vrednost pCO₂ med 0,02 in 0,04 %. pCO₂ pada zelo počasi z naraščajočo višino, v gozdu je lahko znižan zaradi asimilacije, največ pa ga je v tleh, v coni korenin.

2.4.3. Vpliv v vodi raztopljenih ionov in nastajanje kompleksnih ionov

Vpliv tujih ionov na raztapljanje opredeljuje DREYBRODT (1988) z več neodvisnimi mehanizmi. Prvi je efekt ionske moči, drugi je efekt običajnih ionov, tretji kislinski efekt, četrti efekt baz in zadnji efekt ionskih parov.

Daleč najpomembnejši dejavnik je prisotnost v vodi raztopljenih ionov, ki lahko topnost določene snovi povečajo tudi nekaj 100-krat. Vzrok razpada kemičnih spojin je visoka dielektrična konstanta vode, ki zmanjša privlačnost med raztopljenimi ioni. Polarne molekule vode tvorijo zaščitni plašč, ki preprečuje, da bi prevladale privlačne sile med ionoma in bi se sol, kot na primer tudi kalcit, izločala. Vpliv elektrolitov je v povečanju moči zaščitnega plašča. Tako na primer dodatek CaSO₄ v raztopino CaCO₃ zmanjša topnost kalcita, ker ta vsebuje Ca²⁺ ione, medtem ko jo dodatek NaCl poveča.

Topnost soli je odvisna od koncentracije in vrste elektrolita. Vpliv elektrolita na topnost natančneje opredeljuje aktivnost, ki predstavlja realno koncentracijo iona v raztopini. V splošnem s povečanjem koncentracije in dodajanjem več valentnih ionov topnost soli raste.

Koeficient aktivnosti je odvisen od ionske moči raztopine in narave iona. Ionska moč je izražena kot

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2,$$

kjer je m_i koncentracija iona in z_i naboj iona.

Z naraščajočo ionsko močjo narašča tvorba ionskih parov, kar reducira aktivnost ionov. Kadar vrednost ionske moči zraste nad 0,1 imajo v raztopini pomembno vlogo kompleksne substance, tako organske kot anorganske (FORD & WILLIAMS 1989). Ko koncentracija raztopljenih soli v vodni raztopini naraste, začnejo ioni, ki so navadno relativno daleč narazen, medsebojno delovati. Zaščitni plašč vode in elektrolitov preprečuje tvorbo kompleksnih ionov.

Iz konstante ravnotežja CaCO_3 je razvidno, da se večina kalcija v vodi nahaja v ionski obliki, če je le koncentracija karbonatnih ionov dovolj majhna. Ravnotežna konstanta je (DREYBRODT 1988):

$$K = (Ca^{2+})_{eq} \cdot (CO_3^{2-})_{eq},$$

in $\log(K) = -8,5$. V naravi so raztopine z večjo koncentracijo karbonatnih ionov redke, kar pomeni, da se v večini primerov topnost kalcijevega karbonata poveča le do 1 %, izjema so visoko alkalna okolja.

Vpliv tujih ionov lahko prikazuje že dodatek Na^+ , K^+ , Cl^- ionov, ki v bikarbonatni vodi znižajo aktivnost Ca^{2+} in HCO_3^- in s tem povečajo topnost kalcita ter dolomita (FORD & WILLIAMS 1989).

Dodatek tujih ionov raztopini lahko topnost kalcita in dolomita zvišuje ali pa znižuje (PICKNETT 1977); vsebnost 0 – 10% Mg^{2+} zmanjšuje topnost Ca^{2+} , >10 % pa jo povečuje.

2.4.4. Polimorfnost CaCO_3

V naravi se kalcijev karbonat najpogosteje pojavlja v dveh oblikah. To sta kalcit in aragonit. Tretji polimorf, vaterit, pa je neobstoje in redek. Topnost aragonita je večja kot topnost kalcita.

2.4.5. Velikost zrn v kamnini

Zaradi predpostavke, da struktura karbonatne kamnine, predvsem velikost zrn, močno vpliva na njeno raztapljanje, sem temu posvetila malo večjo pozornost.

Eksperimentalno je ugotovljeno, da se zaradi večje količine robov pri manjših zrnih, odkoder se lahko ioni vezani v kristal lažje odtrgajo, drobna zrna kažejo večjo topnost (FORD & WILLIAMS 1989).

Zaradi večje topnosti manjših delcev je raztopina prenasičena glede na velike delce. To pomeni, da se majhni delci morajo raztopiti, večji pa zrasti na njihov račun (FÜCHTBAUER 1974; MORSE & MACKENZIE 1990). Rast delcev je na začetku izredno hitra, nato je vse počasnejša. Večja topnost majhnih delcev je le kratkotrajen pojav, saj kristali v stiku z raztopino dosežejo stabilne dimenzije v nekaj sekundah ali minutah.

Velika površina kristala pomeni, da je vodi izpostavljeno veliko atomov, ki nimajo kemično zasičenih vezi, tako da je tak kristal ali mineralno zrno bolj topno.

Probleme pri raztapljanju karbonatne kamnine povzročajo tako presežki proste energije, povezane z mrežno napetostjo in napakami v kristalni mreži kot, presežki površinske proste energije in tudi heterogenosti v sestavi (LIMA-DE-FARIA 1994).

Glavno načelo stabilnosti fizičnega sistema ustreza minimalni prosti energiji G . To je Gibbsova prosta energija, ki je izražena kot

$$G = H - TS,$$

kjer je H entalpija sistema, T temperatura in S njegova entropija. V pogojih, ko sta tlak in temperatura konstantna pa velja (BORG & DIENES 1992):

$$dG = dU + pdV - TdS;$$

kjer je U notranja energija sistema, p je tlak, V je prostornina, T je temperatura in S je entropija.

Gibbsova prosta energija je torej pomembna pri procesih, ki tečejo ob stalni temperaturi in tlaku (DREVER 1988). Če to načelo upoštevamo za doseg stabilnosti kristalne strukture, pomeni, da mora biti pri danem tlaku in temperaturi notranja energija minimalna in entropija maksimalna (LIMA-DE-FARIA 1994). Minimalna notranja energija ustreza minimalnemu volumnu, maksimalna entropija pa ne sme biti interpretirana kot maksimalni nered (ampak kot homogenizacija razporeditve delcev).

Energija robov (Gibbsova prosta energija) je v razmerju proti prostornini pri manjših zrnih večja kot pri velikih, zato so manjša zrna bolj topna (BORG & DIENES 1992). Topnost trdnih snovi lahko izrazimo tudi s spremembo celokupne Gibbsove proste energije (dG_T), v MORSE & MACKENZIE (1990):

$$dG_T = dG_r^0 - G_s,$$

kjer je dG_r^0 sprememba proste energije reakcije in G_s površinska prosta energija, če je dG_r^0 izpeljana iz ravnotežne konstante trdne snovi $\ln K_{sp} = -dG_r^0 / RT$. Iz tega je razvidno, da topnost trdnih snovi narašča eksponentno z njihovo naraščajočo površino, ki je v reakciji z raztopino.

Ker je topnost obratno sorazmerna z energijo kristalne mreže, na topnost vpliva velikost kristalov. Zato bo površinska korozija izdatnejša tam, kjer se bo vlaga zadrževala dlje in kjer je kamnina tektonsko bolj pretrta, porozna in bolj drobnozrnata. Drobni delci imajo glede na kamninsko gmoto večjo specifično površino.

Iz tega sklepam, da imajo večjo površino za reakcijo z raztopino na primer mikritni apnenci s povečano primarno poroznostjo in močno tektonsko pretrte karbonatne kamnine, zato so bolj topni. Manjši so delci, bolj so zdrobljeni, hitreje se bodo raztapljali.

Iz terenskih opazovanj SWEETING (1968, 1972) ugotavlja, da so biomikriti lažje topljivi kot spariti in da so angleške jame v sparitnih apnencih ozke, razvite samo ob lezikah. Raztapljanje močno upada, kjer je sparita več kot 40 – 50%.

Drobnozrnati apnenci so lahko manj topni (DREISS 1984), če so zrna enotna po velikosti in so površine tako zglajene, da se s tem izpostavljena področja zmanjšajo. Podobno kot pri apnencih, se tudi pri dolomitih kažejo razlike v raztapljanju glede na velikost zrn. Iz vsega tega sledi, da s heterogenostjo zrn glede velikosti, narašča hrapavost površine, kar povečuje topnost. Tako je biomikrit bolj topen od mikrita, saj deli fosilov štrlijo iz kamnine in s tem povečujejo hrapavost.

Primer selektivnega raztapljanja, zaradi različne velikosti kalcitnih zrn, je tako imenovani »boxwork«. Boxwork je dobil ime zaradi podobnosti zmešnjavi poštnih škatel (HILL & FORTI 1997). Avtorja ga opisujeta kot kompaktne liste kristalnega materiala, razporejenega v mrežo, ki štrli iz jamskih sten, stropa, sige ali glinenih tal. PALMER (1981, 2007) in HILL & FORTI (1997) boxwork definirajo kot pojav selektivnega preperevanja in

njegov nastanek razlaga v treh stopnjah. Jamski rov se oblikuje v zaliti coni, ko voda odteče, se rov, razpoke in pore v apnencu ali dolomitu jamskih sten napolnijo z zrakom, CO₂ se izgublja v coni preperevanja in kalcit delno zapolni odprte razpoke. Po nadaljevanju raztapljanja in preperevanja boxwork zaštrli iz jamskih sten v jamo. Po LOWE & WALTHAM (1995) je boxwork tridimenzionalna mreža tankih mineralnih plasti štrlečih iz jamskih sten. Boxwork je zapolnitev žil izjedkanih iz jamskih sten z raztapljanjem apnenca, ki sestojijo večinoma iz kalcita ali kremenca.

Pri nas boxwork opažamo na jamskih stenah, ki so bile preoblikovane s kondenzno korozijo in na delih jamskih sten, kjer je apnenec na debelo preperel. Vendar ne najdemo boxwork-a velikih dimenzij. Kalcitne žile štrlijo iz razjedenih jamskih sten do nekaj milimetrov in tudi prepredenost z žilami ni zelo gosta. V primeru nastajanja boxwork-a se osnova kamnine raztaplja hitreje kot žile, ki zato štrlijo iz stene. Enako se dogaja tudi s prekrstaljenimi lupinami fosilov in njihovimi odlomki, saj zaradi hitrejšega raztapljanja mikritne osnove štrlijo iz jamskih sten.

2.4.6. Vrsta poroznosti

Poroznost lahko definiramo kot delež praznin glede na celoten volumen (DOMENICO & SCHWARTZ 1990). Razlikujemo več vrst poroznosti, tako glede na čas nastanka por kot na obliko por. V sedimentološkem smislu primarna poroznost nastane v času sortiranja in strjevanja kamnine, sekundarna poroznost pa se oblikuje v času diagenoze, na primer zaradi drobljenja pri tektoniki in zaradi raztapljanja.

Poroznost sedimentnih kamnin lahko zavzame 0 in 60 %. Manjši kot so delčki sedimentne kamnine, manjša je poroznost. Poroznost v mikritu je običajno manjša od 2 %, v sparitu pa se giblje med 5 in 10 %. Dolomitizacija poviša poroznost za 5 do 15 %.

Po TUCKER & WRIGHT (1990) ločimo tipe poroznosti tudi glede na obliko por, ki je lahko odvisna od strukture kamnine ali pa ne. S strukturo pogojene vrste poroznosti so medzrnska, znotrajzrnska, medkristalna, fenestralna, dežnikasta in ogrodna (framework). Poroznost, ki ni odvisna od strukture kamnine je lahko razpoklinska, kanalska, vugy (točkovna, ki se vidi makroskopsko), kaverna in stiliolitska. Obstajajo tudi tipi por, ki so ali pa niso pogojeni s strukturo kamnine, taka sta na primer brečasta poroznost, sledovi vrtanja itd.. Zaradi kasnejšega nastanka sekundarne poroznosti lahko v kamnini pride do mešanih tipov poroznosti, ki se med seboj prekrivajo.

Za pretakanje vode po kamnini je veliko bolj kot celokupna poroznost pomembna efektivna poroznost. Efektivna poroznost je definirana kot odstotek medsebojno povezanih por. Za podzemno pretakanje vode so pomembni dejavniki oblikovanje in rušenje por ter njihova razporejenost in povezava (RAUCH & WHITE 1970). Stopnjo povezanosti por usmerja prevodnost ali prepustnost kamnine, ki nam pove s kakšno lahkoto in na kakšen način se tekočina premika skozi kamninsko maso. Tok vode skozi kamnino pa je odvisen tudi od hidravličnega potenciala in efektivnih tlakov.

2.4.7. Čas in površina stika med vodo in kamnino

Od njunega prvega stika dalje med vodo in karbonatno kamnino se skuša vzpostaviti ravnotežje. Dokler pa se to ne vzpostavi, voda karbonatno kamnino raztaplja. Raztopina je s karbonatno kamnino lahko tudi v ravnotežju, tako da ni nobene spremembe, ne v sestavi raztopine in ne v sestavi trdne snovi v teku časa.

Na raztapljanje karbonatne kamnine, če še enkrat poudarim, vplivajo lastnosti kamnine, temperatura, tlak, volumen in sestava vode, velikost kontaktne površine in čas trajanja stika in gradient koncentracije. Potrebno je upoštevati, da je hitrost raztapljanja po Nernstovem zakonu proporcionalna deficitu zasičenosti podzemne vode (JURJOVEC 1989). To

pomeni, da bo koncentracija vode tem večja, čim manjša bodo zrna ali čim bolj bo kamnina tektonsko porušena. Pri tem je seveda pomembna vrsta poroznosti in dolžina stika med kamnino in vodo.

Koncentracija in oblika raztopljenih karbonatnih ionov je odvisna od pH vode, kar je razvidno iz Bjerrumovega diagrama (GARRELS 1960; MORSE & MACKENZIE 1990). Koncentracija raztopljenih ionov ne preseže vrednosti, ki je določena z vzpostavitvijo ravnotežja med vodo in kamnino po kateri se pretaka. Če se sestava kamnine spremeni, se spremeni tudi sestava vode, ki teži k vzpostavitvi ravnotežja z novo kamnino.

Raztapljanju neprestano sledi spreminjanje kemične sestave vode. V njej se dogajajo izmenjava baz, redukcija, oksidacija in novo raztapljanje ali obarjanje.

Poleg mehanizma, ki raztaplja kristalna zrna, delujejo še mehanizmi, ki odnašajo raztopljene ione stran od sten mineralnih zrn ter preprečujejo popolno nasičenje raztopine v bližini zrn. Taki mehanizmi so Brownovo termično gibanje molekul, difuzija in disperzija, ki vzpostavijo tok vode v porozni kamnin. V posebnih primerih je tak mehanizem še kemično nevtraliziranje raztopljenih ionov z ustvarjanjem kompleksov.

Pomembno vlogo ima tudi kapilarnost, ki je rezultat kombinacije površinske napetosti na tekočini in zmožnostjo določenih tekočin, da zmočijo površino, s katero pridejo v stik. Na stiku med najnižjim delom suhega poroznega materiala in nasičenega materiala, se voda dvigne do določene površine nad gladino nasičenega materiala (DOMENICO & SCHWARTZ 1990).

Difuzija odreja hitrost raztapljanja kamninskega skeleta v vodi in odnaša ione s primarnega mesta. Lahko je molekularna, v laminarnem toku, ali pa vrtinčasta, v turbulentnem toku.

Molekularna difuzija je proces, kjer se molekule gibljejo skozi statični medij. Difuzija je proces migracije molekul ali ionov, ki ga povzroča gradient njihove koncentracije, oziroma gradient kemičnega potenciala. Ioni in molekule se gibljejo z območja z višjo koncentracijo na območje z nižjo koncentracijo. Smer pretoka snovi je obratna smeri gradienta koncentracije. Matematično difuzijo opišemo s Fickovima zakonoma. Prvi Fickov zakon pravi, da je tok molekul sorazmeren gradientu koncentracije:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \text{ (g/s cm}^2 \text{ ali mol/s m}^2\text{)},$$

dC/dx je gradient, sprememba koncentracije na določeni razdalji in D je difuzijski koeficient. Vrednosti difuzijskih koeficientov so za večino snovi v vodni raztopini med 10^{-6} in 10^{-5} cm^2/s , v trdnih snoveh pa so bistveno manjši. Vrednosti D na krasu se gibljejo med 1 in 2×10^{-5} cm^2/s pri T je 25°C , pri 0°C pa pade na polovico vrednosti.

V poroznem mediju se difuzijski koeficient zmanjša, zato takrat velja empirično določen difuzijski koeficient D^* .

Drugi Fickov zakon povezuje Prvi Fickov zakon s kontinuitetno enačbo. Z njim izračunamo časovno in prostorsko odvisnost koncentracije v določenih mejnih pogojih.

Na difuzijo v naravnih sistemih močno vpliva pojav soodvisnih procesov, na difuzijo posameznih ionov vpliva prisotnost drugih ionov v raztopini. Hitrost difuzije skozi kamnino v naravnih sistemih lahko na videz močno spremenita tudi procesa adsorpcije in ionske izmenjave (JURJOVEC 1989).

Pri kraških procesih imamo največkrat opravka z vrtinčasto difuzijo, vendar je na meji med kamnino in tekočino plast vode, v kateri prevladuje molekularna difuzija. Tako bo ta plast, glede na mineral, ki je v vodi skoraj ali popolnoma nasičena. Omenjena plast je zelo tenka, od 10^{-6} do 10^{-3} m. Odebeli se s hrapavostjo površine minerala, viskoznostjo tekočine in hitrostjo ter maso tekočine. Hitrost vrtinčaste difuzije pa je bistveno večja od hitrosti

molekularne difuzije in je odvisna od smeri transporta. Hitrosti vrtničaste difuzije v vodi so v območju od 10^{-1} do 10^{-3} cm^2/s .

Na raztapljanje samo vpliva tudi vzorec kristalne mreže. Razpad ionske kristalne mreže (KLEIN & HURLBUT 1993) je posledica raztapljanja v topilu, na krasu seveda v vodi. Polarne molekule vode zmanjšajo elektrostatične privlačne sile med ioni tako, da lahko ti zapustijo kristalno mrežo. Pri vodi je lastnost zmanjševanja elektrostatične privlačnosti v kristalu posebno izrazita. Eno od meril je dielektrična konstanta, ki je v tem primeru zelo velika. V vodni raztopini se vsak ion takoj obda s hidratno ovojnico (filmom), ki jo sestavljajo polarne molekule vode. Ta proces, ki je posledica elektrostatične privlačnosti, imenujemo hidratacija ionov. Dipolne molekule se k pozitivno nabitim ionom obrnejo z negativno, k negativno nabitemu pa s pozitivno stranjo.

Pomembno je tudi poudariti, da so sile med zrn v kamnini skoraj vedno šibkejše kot so sile, ki so prisotne v posameznem zrnju kamnine.

Reakcije na površini kristala (FORD & WILLIAMS 1989) so odvisne od urejenosti kristalne mreže. Atomi in molekule v kalcitu so razporejeni po plasteh. Atomi na »stopnici« imajo višjo prosto energijo, ker izpostavljajo dve ploskvi, na vogalu pa tri. To so mesta, kjer sta raztapljanje in odlaganje najmočnejša. H^+ ion, ki difundira na površino kristala, se bo gibal naokrog do trčenja s CO_3^{2-} molekulo. Oblikuje se HCO_3^- ion, ki difundira stran, njemu nasproti pa disociira Ca^{2+} .

Mnogo kristalov vsebuje nepravilnosti, na primer razpoke, tudi tu je topnost povečana. Ko pride agresivna voda v stik s kalcitovim kristalom, se njegova površina nabije negativno. Nastane dvojna ionska plast, debela nekaj 100 nanometrov. Prvi je zaradi presežka karbonatnih ionov, negativno nabiti sloj na površini zrna, drugi pa je zunanji pozitivno nabiti sloj, na primer zaradi vodikovih ionov, ki jih privlači negativno nabita plast. pH v okolici zrn znižuje, to pa poveča raztapljanje kalcita. Med raztapljanjem kalcijevega karbonata negativni naboj zrn naprej raste. Izgine, ko voda doseže ravnotežje s trdnim kalcijevim karbonatom. pH vode v bližini zrna pada in razlika v pH-ju dvojne ionske plasti ter vode izgine pri uravnoveženju kalcijevega karbonata z vodo.

JURJOVEC (1989) je opredelila stik vode in kamnine na nivojih: mineralno zrno – voda, kamninski skelet – porna voda in porozna kamnina – podzemna voda.

Nivo mineralno zrno voda je prikazan z mehanizmom raztapljanja na meji kristala kalcit – voda, kjer agresivna voda povzroči, da se površina kristala kalcita nabije negativno. Ta pojav je opazen samo, če so kristali zelo majhni in je stična površina med vodo in kristalom relativno velika. Hitrost raztapljanja na tem nivoju za posamezne pare, mineral – voda, pogojuje zakon o delovanju mas, oziroma z vrednost njegove ravnotežne konstante. Ta pa je odvisna od aktivnosti v vodi raztopljenih ionov in temperature. Aktivnost ionov seveda odvisna od ionske moči raztopine.

Na nivoju kamninski skelet - porna voda poleg prej omenjenih vstopajo še mehanizmi, ki odnašajo raztopljene ione skozi porno vodo proč od sten mineralnih zrn in preprečujejo popolno zasičenje raztopine. Na tem nivoju hitrost raztapljanja kamninskega skeleta določa molekularna difuzija. Proces je še hitrejši, če se raztapljanje odvija v turbulentnem toku, kjer imamo opravka z vrtničasto difuzijo.

Na nivoju porozna kamnina – podzemna voda, imamo opravka s tokom podzemne vode skozi porozno kamnino. Ob difuziji je tok podzemne vode še dodaten faktor, ki odnaša ione proč od meje zrn seveda, če prej razbije laminarno plast. Z raztapljanjem anizijskega in skitskega dolomita, zdrobljenega na dve različni frakciji, je JURJOVEC (1989) proučevala hitrost mineralizacije vode, hitrost spreminjanja koncentracije posameznih ionov, velikost stične površine, poroznost, volumen vode v stiku s kamnino, hitrost pretakanja vode in temperaturo. Raztapljala je z deževnico, v zaprtem sistemu, brez dostopa zraka in nove vode. Ugotovila je, da je hitrost spreminjanja kemizma vod izredno hiter proces, še posebej, ker ga

je pospešilo umetno povečanje stične površine zrno – voda. Poudarila je, da bi bilo raztapljanje v naravnih pogojih še hitrejše, ker podzemne vode vsebujejo več CO₂ kot ga je vsebovala deževnica, ki je bila njeno topilo.

2.4.8. Vpliv organizmov

Organska aktivnost lahko povečuje topnost kalcijevega karbonata s proizvodnjem ogljikovega dioksida. Pri razpadu organizmov z delovanjem mikroorganizmov lahko nastajajo različne substance, ki povečujejo kislost ali alkalnost okolja, to pa pospeši raztapljanje ali izločanje kalcijevega karbonata. Kjer je delovanje organizmov in mikroorganizmov pri raztapljanju posebno močno izraženo, oziroma je to edini razlog za raztapljanje, proces imenujemo tudi biokorozija (GAMS 1973). V splošnem gre vedno za delovanje mikroorganizmov, saj so ti glavni dejavnik za nastajanje kemijskih procesov, tudi napr. v primeru raztapljanja pod koreninami.

V večini poznane mi literature, ki se ukvarja z vplivom mikroorganizmov na raztapljanje ali obarjanje kalcita (VILES 1987; HILL & FORTI 1997; NORTHUP et al. 1997; CASTANIER et al. 1999), so evidentirali njihovo prisotnost (MULEC et al. 2002). Opisali so tudi oblike na kamnini, ki naj bi bile posledica njihovega delovanja. Zelo malo avtorjev pa se je ukvarjalo s samimi procesi, in proučevalo, kako mikroorganizmi v določenih primerih delujejo (JONES 1994; STERFLINGER & KRUMBEIN 1997; PERRY 1998; BENNETT et al. 2000; YEE et al. 2000). Delovanje mikroorganizmov v kraškem okolju, obogatenem s sulfidi in njihov prispevek k oblikovanju kraških rogov, je raziskoval PALMER s sodelavci na primeru jame Cueva de Villa Luz v Mehiki (HOSE et al. 2000).

Vsekakor delovanje različnih organizmov raztapljanje kamnine lahko pospešuje. V določenih pogojih pospešuje ali celo povzroča obarjanje kalcita, vendar procesi še niso povsem razjasnjeni čeprav so raziskave na tem področju v zadnjem desetletju precej napredovale (na primer: PROVENCIO & POLYAK 2001; DAVIS et al. 2007; JACOBSON et al. 2009; BISSETT et al. 2011; FLOREA et al. 2011; SULU-GAMBARI 2011).

3. PROCESI OBLIKOVANJA JAMSKIH ROVOV

3.1. Intenziteta raztapljanja na krasu

V naravi se apnenci zaradi že v prejšnjem poglavju omenjenih dejavnikov ne raztapljajo vedno tako, kot naj bi se po pričakovanjih iz laboratorijskih poizkusov. Topnost apnenca je kljub vsemu že dokaj dobro opisana in raziskana, o raztapljanju dolomita pa je se kljub novejšim raziskavam (BURGER 1989; PURSER et al. 1994; GAUTEILIER et al. 1999; AL-ASAM & PACKARD 2000; SHERMAN & BARAK 2000; XU et al. 2013) še vedno znanega bolj malo.

V nadaljevanju navajam in uporabljam izsledke o zakonitostih raztapljanja karbonatnih kamnin po obstoječi literaturi. Največ teoretskih razprav o raztapljanju, modeliranju in laboratorijskih raziskav je bilo posvečenih lastnostim vode, predvsem njenim kemijskim ter mehanskim lastnostim ter stiku vode s karbonatno kamnino in načinu ter hitrosti raztapljanja.

Namen mojih raziskav ni bil določati lastnosti raztopine in spremembo njene sestave v času raztapljanja oziroma vpliva razlik v kamnini na raztapljanje, ampak načinu preperavanja karbonatnih kamnin na stenah jamskih rogov v odvisnosti od lastnosti kamnine.

Intenziteta raztapljanje karbonatnih kamnin na krasu se razlikuje predvsem v vertikalni smeri, tako v področju vertikalnega prenikanja, kot avtigenega in alogenega vodnega toka (v FORD & WILLIAMS 1989 po WILLIAMS & DOWLING 1979; LAURITZEN 1990). Za intenzitete raztapljanja v odvisnosti od različnih dejavnikov FORD & WILLIAMS (1989) navajata različne preglednice. Podatkov o meritvah vertikalne porazdelitve intenzitete raztapljanja ne obstoja prav dosti, vendar GAMS (1962) ter tudi FORD in WILLIAMS (1989) poudarjajo, da se večina avtigenega raztapljanja odvija na vrhu kamninske mase, predvsem na stiku s prstjo. V primeru, ko je kras prekrit z nekarbonatno kamnino, ga ta štiti pred korozijo.

Zniževanje površja lahko izračunamo iz razmerja med količino padavin in količino raztopljenih ionov na iztoku z določenim pretokom. V povprečju se 70 % raztapljanja (50 – 90 %, odvisno od litologije) dogaja v zgornjih 10 m cone vertikalnega prenikanja (FORD & WILLIAMS 1989). Slednja dva tudi poudarjata, da večina kemijske denudacije vodi k zniževanju površja, tako da je raztapljanje v jamskih rovih glede na celokupno denudacijo relativno manj pomembno, je pa temeljno za razvoj krasa.

Denudacija kraškega površja ali kraška erozija je ploskovno zniževanje površja., ki predstavlja odnašanje mase s površja v ionski obliki (GABROVŠEK 2007). Hitrost denudacije se izraža v m^3/km^2 na leto ali $\text{mm}/1000$ let. Vrednosti temeljijo na predvsem na klimi (količina padavin, temperatura), evapo-transpiraciji, na parcialnem tlaku CO_2 in na sestavi kamnine (minerali, tekstura, struktura, itd.). Posredno intenziteto denudacije lahko merimo v določenem območju z merjenjem vsebnosti raztopljenih ionov na izviri, ki odvajajo vodo z nekega območja. Lahko izrazimo količino posameznih ionov v vodi ali pa celokupno trdoto (seštevek Ca^+ in Mg^+ ionov). Količino raztopljenega kalcita izražamo v $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$, lahko pa tudi s trdoto vode po nemški trdotni lestvici (GAMS 1974, 2003), kjer je 1 stopnja = 17.8 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$. V Sloveniji se na kraških izviri, za raztopljene ione HCO_3 -Ca-Mg, vrednosti gibljejo med 140 do 400 mg/l (GAMS 1974, 2003). Korozijo so merili tudi z drugimi metodami (GAMS 1974, 2003), na primer erozijski mikrometer (mm na tisoč let) in tablete (izguba teže v časovnem obdobju). Različne metode pa so dale glede denudacije tudi zelo različne rezultate, tako naj bi se v milijonu let raztopilo od 20 do 80 m kraškega površja. Največje so vrednosti v področjih z veliko količino padavin (Norveška 400 $\text{mm}/1000$ let, Papua New Gvineja 450 $\text{mm}/1000$ let); v področjih z manj/nič padavin se približa vrednost 0 (7 $\text{mm}/1000$ let v Alžiriji). Denudacija deluje navpično in korozija načinja kamnino do

določene globine ter razgrajuje površju najbližje dele (GAMS 1997). Ta ugotovitev velja tudi za napadene dele kamnine, to je kraške votline, ki sta nastali v freatični in vadozni coni (ŠUŠTERŠIČ 1999a).

Zaradi razvoja sekundarne poroznosti s korozijskim širjenjem razpok in z daljšanjem in širjenjem kanalov, se razvije značilno kraško pretakanje vode. Navpična razporeditev denudacije je odvisna od dveh dejavnikov: od razporeditve vodnega toka in razporeditve koncentracij raztopljenе snovi.

Terenski dokazi nakazujejo, da je v popolnoma avtigenih sistemih v vadoznih jamskih rovih korozija, razen v primeru občasnih poplav, zanemarljiva.

Z modelom razvoja vertikalnega odprtega vodonosnika, ki temelji na mreži različno velikih razpok in prisotnosti freatične površine pri predvidenem konstantnem dotoku, je GABROVŠEK (2000) prikazal, da je v freatični coni korozijski učinek vode največji ob gladini kraške vode, kjer je tudi širjenje razpok najhitrejše. Zato se glavni del vode pretaka v tem nivoju, del vode pa gre tudi skozi freatično površino v notranjost sistema. Vodna gladina se s časom znižuje zaradi naraščanja hidravlične prepustnosti. Ko pa se vodna gladina spusti do nivoja iztoka, raste kanal vzdolž nivoja od izvira nazaj v kraški sistem.

Razvoj vertikalnega vodonosnika je študiral tudi WORTHINGTON (1991), ki je upošteval večino pogojev, ki so prisotni v naravi in je z svojo razlago bližji realnosti.

Raztapljanje pospešuje več različnih dejavnikov. To so mešanje dveh nasičenih kraških vod, prisotnost žveplovih spojin, predvsem pirita ter sadre ter prisotnost različnih organskih kislin (PALMER 1995, 2007). Pojav mešanja dveh vod z različnimi ravnotežnimi koncentracijami, ki z mešanjem ustvarita novo agresivno raztopino, ki ima ponovno moč raztapljanja, se imenuje korozija mešanice. Njen pomen za intenzivnejše raztapljanje je opredelil LAPTEV (1939) in BÖGLI (1965, 1978, 1980) in nato tudi DREYBRODT (1981). Nekaj časa je nato prevladalo mnenje, da korozija mešanja v speleogenezi nima bistvenega pomena, saj linearno raztapljanje zadostuje za razvoj dolgih kanalov. GABROVŠEK (2000) je ponovno poudaril pomen korozije mešanja (on jo imenuje mešalna korozija) v zgodnji speleogenezi. Prisotnost mešalne korozije, kot jo on imenuje, močno vpliva na prostorski in časovni razvoj razpok in lahko tudi za polovico skrajša prebojni čas.

Prebojni čas je funkcija kemijskih in fizikalnih parametrov, ki določajo reakcijsko hitrost v razpoki (lahko tudi leziki) ob začetku razvoja, preboj pa označuje konec začetne faze speleogeneze in vzpostavitev turbulentnega toka.

Poleg načina in razporeditve vodnega pretakanja ter kemijskih lastnosti vode, je za raztapljanje najpomembnejša mineralna sestava kamnine in njena struktura. Na raztapljanje vpliva kamnina s sestavo, pa tudi z velikostjo zrn ter njihovo razporejenostjo. Topnost apnencev in dolomitov je odvisna od njihove čistosti, to je od količine netopnih primesi, ki jih vsebujejo. V apnencih in dolomitih so najpogostejše netopne primesi glineni minerali in kremen. Tako je kras na apnencih z 20 do 30 % manj razvit, ker obilica gline zamaši prve kanale (FORD & WILLIAMS 1989). Za zakrasedanje so najprimernejše kamnine tiste, ki vsebujejo več kot 70 % karbonatnih mineralov.

V Sloveniji prevladujejo zelo čisti apnenci, saj vsebujejo zelo malo (1-2 %) netopnih ostankov (GAMS 1974; OGORELEC & ROTHE 1993). Po HERAKU (1972) vsebujejo apnenci Dinarskega krasa različen delež CaCO_3 , pač glede na sedimentacijske pogoje v določenem obdobju, tako vsebujejo spodnjekredni apnenci 80 do 95 % CaCO_3 , spodnjekredni 95 do 98 % CaCO_3 in zgornjekredni med 98 in 100 % CaCO_3 .

Z merjenjem učinkov preperevanja na kraškem površju in v jamah se je ukvarjalo več avtorjev (GAMS 1962, 1965, 1980, 1995, 1997, 1998; GUNN 1986; FORD 1988; CUCCHI et al. 1987, 1996; SMITH et al. 1995; GILLIESON 1997; TRUDGILL & VILES 1998), z učinki preperevanja sadre pa malo manj (FORTI 1996; KLIMCHOUK 2000). Z vplivom tipa kamnine na intenzivnost raztapljanja se je ukvarjal tudi MANOJLOVIĆ (1992), ki je ugotovil, da ima na

raztapljanje močan vpliv predvsem moč kristalne rešetke, da pa v pogojih brez filtracije vode prihaja do prevlade selektivnega razpadanja kamnin in da na celokupno mineralizacijo vode najbolj vplivajo minerali, ki hitreje razpadajo.

Zadnjih nekaj let so se v Sloveniji precej ukvarjali s preperevanjem apnencev, ki se jih uporablja kot gradbeni kamen. Tako so bile preiskane njihove mikrotrode (KLANJC et al. 2000), obstojnost glede na spreminjanje temperature (JARC 1996) in sposobnost raztapljanja s spreminjanjem različnih dejavnikov kot so pH, koncentraciji kalcija in magnezija ter velikost in porazdelitev delcev (JARC 2000). Ugotovila je, da čim manjši so delci in čim bolj je njihova porazdelitev enakomerna, hitreje se apnenec raztaplja. KLANJC et al. (2000) pa ugotavljajo, da se trdota apnencev s časom zaradi povečane poroznosti znižuje. Le ta narašča s preperevanjem, ki je bilo povzročeno z namakanjem v destilirani vodi in z izmeničnem ogrevanjem in ohlajanjem. Svojo razpravo zaključujejo z dejstvom, da se minerali v naših klimatskih razmerah ne samo raztapljajo, ampak se tudi krčijo in širijo v taki meri, da prihaja do mehanskega razpadanja kamnine zaradi slabljenja stikov med mineralnimi zrnji. Že po enem letu pospešenega staranja se je trdota apnenca zmanjšala v povprečju za 5 %. Vpliv mineralne sestave in strukture na obstojnost apnencev kot naravnega kamna sta preučevala tudi SKOBE & MIRTIC (2005). KRAMAR et al. (2011) so preučevali propadanje Črnega apnenca z Drenovega griča na objektih kulturne dediščine v Ljubljani si so ugotovili, da se kamen pod atmosferskimi vplivi močno raztaplja, razbarva, postaja porozen, in se zaradi tega drobi in lušči, procese pa naj bi pospeševala transport in obarjanje topnih soli v apnencu.

Raztapljanje kamnine ne pomeni samo zniževanja kraškega površja in večanja podzemeljskih rogov, ampak tudi je temelj začetne faze speleogeneze. Tako se ne morem popolnoma izogniti v preteklih letih tako popularne in občutljive teme kot je začetek nastajanja kraških kanalov.

3. 2. Jame

Jame so v krasoslovju za človeka prehodne podzemeljske votline (GAMS 1974). Jamski rovi so lahko nastali v freatični, epifreatični ali vadozni coni. O pogojih za razvoj in oblikovanje začetnih kanalov je bilo že veliko napisanega. Predloženih je bilo veliko teorij in narejenih mnogo modelov. Narava pa se največkrat obnaša po svoje, vendar vedno sledi fizikalno-kemijskim zakonitostim, ki v danem primeru prevladujejo. Voda sledi linijam najmanjšega odpora, pa naj bo to mejam med litološkimi lastnostmi kamnine kot so na primer lezike, tektonskim conam, razpokam itd., ter na svoji poti kemijsko in mehansko erodira karbonatne kamnine ter pri tem oblikuje kanale.

Proces, ki je najpomembnejši za nastanek krasa, za nastanek povezanih odprtih kanalov v podzemlju po katerih se lahko pretaka voda in s tem za nastanek jam, je vsekakor raztapljanje kamnine (karbonatne, anhidriti, soli, itd.). Za klasični kras in nastanek jam v njem so najpomembnejše vode, ki v kamnino pritečejo/preniknejo s površine in se na svoji poti obogatijo z CO₂ iz prsti in rastlin; takim jamam, ki nastajajo z ali pa pod vplivom meteorne vode pravimo tudi **epigene** jame. Za primerjavo pa **hipogene** jame nastanejo v pogojih, kjer raztopine, ki te jame oblikujejo, nimajo veze s površinsko vodo in so za njihov nastanek »krive« vode, ki se dvigujejo iz globin in so se tam obogatile s CO₂, žveplom, imajo višjo temperaturo in so zato bolj agresivne in bolj intenzivno raztapljajo kamnino (FORD & WILLIAMS 2007; PALMER & PALMER 2012). Primerjavo vzorca razporeditve jamskih rogov epigenega in hipogenega izvora pa je v svojem delu obdelal PALMER (2011).

Jame začnejo nastajati (DREYBRODT 1992, 1996; DREYBRODT & GABROVŠEK 2000; DREYBRODT & SIEMERS 2000; FORD et. al. 2000) v **freaticni** (stalno zaliti) **coni**, se rovi oblikujejo s tlačnim počasnejšim pretakanjem vode pod gladino kraške vode. Voda v freaticni coni zapolnjuje vse praznine v kamnini, pretakanje pa uravnava pravilo veznih posod. V tej

coni se zbirajo vode iz vadozne cone, iz drugih delov freatične cone in možne alogene vode. Tu nastane tudi večina vseh jamskih rogov, ki kasneje rastejo in se preoblikujejo v pogojih epifreatične in vadozne cone. V začetni fazi speleogeneze se raztapljanje odvija po načelih difuzije in z laminarnim tokom. Voda širi drobne razpoke itd., in pri tem oblikuje večje odprte kanale (GABROVŠEK 2000). Ko pretok skozi razpoko toliko naraste, da pride do preboja ter se vzpostavi turbulentni tok, kanal dalje raste enakomerno po vsej dolžini. Raztapljanje v pogojih turbulentnega toka je večje (do 10^4) kot v laminarnem toku. Poplavljeni rov raste, dokler njegove dimenzije niso tako velike, da hitrost vode pade in se rast ustavi. Nekateri pogojujejo ustavitev rasti rogov z naplavljanjem delcev sedimentov na stene rova, ki jih tok, katerega pretok je maksimiran zaradi specifičnega odtoka, ni več sposoben trgati s sten in se zato ti delci ohranjajo na stenah rogov ter s tem upočasnijo rast rogov. Obdobje v razvoju jame, ko se to stanje vzpostavi, imenujejo paragenetski prag. Procesi parageneze (RENAULT 1968a,b; FORD & EWERS 1978; MIHEVC 1991a,b; PALMER 2007; FARRANT & SMART 2011) večajo rov s korozijo nad naplavljenimi sedimenti. Osnovne oblike rogov, ki so nastali v freatični, prežeti coni, so vsi tipi na prehodu od geoloških struktur do popolnoma izoblikovanih cevi z ovalnimi (eliptičnimi) preseki. Lahko nastanejo tudi vertikalni kanali, ki so po tlorisu podobni breznom. Z nižanjem gradienta, nivo talne vode lahko začne padati in rovi se začnejo poglobljati (sl. 3.2.1.); tako preidejo v epifreatično cono.



Slika 3.2.1. Prvotni freatični rov se je s padcem nivoja talne vode, poglobil v ožji kanal, Markov spodmol. Fasete na stenah rova nakazujejo nastanek v zalitem vodnem rovu.

V **epifreatični coni** se tokovi skozi rove pretakajo hitreje. V sušnem obdobju voda prekriva le dno rova ali struge, drugače pa so rovi zaliti. Na nivoju nihanja podtalnice se oblikujejo največji jamski rovi. Več o nastanku in oblikovanju jamskih rogov v epifreatični coni pa lahko na primer preberete v PRELOVŠEK (2012) in SLABE & PRELOVŠEK (2013).

Ko se nivo kraške vodne gladine zaradi različnih vzrokov zniža, pridejo jamski rovi v pogoje **vadozne cone**. Voda se v vadozni, neprežeti coni, če povzamem po ŠUŠTERŠIČU (1991), pretaka po načelu prostega pada oziroma adhezivnega polzenja po stenah, izjeme so viseči tokovi. Orientacija teh votlin in oblikovanost njihovih sten odražata geometrijski element navpičnosti, osnovni tip votline je kamin in nekoliko spremenjena inačica v obliki

brezna, nastajajo pa tudi meandri, ki jih dolbejo viseči tokovi. V vadozni coni, se pogosto oblikujejo hitri vodni tokovi s prosto gladino ali pa je v njih prisotna prenikajoča voda.

Rovi in s tem kamnina v vadozni coni so izpostavljeni mehanski eroziji, raztapljanju, kondenzni vlagi, biogeni koroziji, zmrzovanju ter rušnim procesom. Na pomenu vsekakor pridobi mehanska erozija, tako v obliki abrazije z tovorom, ki ga voda prenaša, kot s trganjem delcev kamnine zaradi viskoznosti vodne mase, rušnih procesov in procesov zmrzovanja. Jamski rovi hitro rastejo in se preoblikujejo tudi z abrazijo prodnikov in lebdečega tovara v vodnem toku. Močan vodni tok, ki teče zadosti hitro, pa lahko trga tudi delce s površine jamskih sten.

Stene jamskih rogov močno preoblikujejo tudi rušni procesi, ki so v povezavi z mehanskimi napetostmi v kamnini. Posledica rušnih procesov so bloki kamnin, plošče in kosi kamnin ter manjši odkruški. Iz sten jamskih rogov lahko odpadajo posamezni bloki in odkruški ali pa celi podori. Podor sestavlja gmota padlega kamenja z razponom več kot ene plasti. Podori jamskih stropov in sten se lahko pojavljajo v času oblikovanja jamskih rogov, v času sprememb pogojev v zalitih kanalih in v kanalih s prosto vodno gladino. Nenazadnje so podori tudi del degradacijskih procesov kraškega sistema. Podori v jamah in oblikovanje večjih podornih dvoran ter udornic, so genetsko povezani z geološkimi strukturami, to je različnimi pretrtimi conami ter ponavadi debeloskladovitimi apnenci in prisotnostjo aktivnega vodnega toka ali nihajoče podtalnice. Razvoj udornic v pretrtih conah karbonatnih kamnin so med drugimi preučevali tudi MIHEVC (2001) in GABROVŠEK & STEPIŠNIK (2011).

Zmrzal in led imata na preoblikovanje jamskih rogov velik vpliv. Predvsem v predelih, kjer sta led in sneg v njih prisotna stalno ali sezonsko. Pomembna sta predvsem v zvezi z mehanskim razpadanjem kamnin v vhodnih delih rogov in v delih jame, ki imajo stik s površjem. V takih delih jamskih rogov zasledimo intenzivno mehansko razpadanje sten rogov in preperevanje površine sten in kapnikov zaradi temperaturnih sprememb, ko vezi med mineralnimi zrni zaradi nihanja temperature oslabijo. Bloki kamnin so ostrorobi in različnih velikosti, jih pa kondenzna korozija lahko zaobli. Jamske rove je v nekaterih primerih zasul tudi krioklastični grušč, ki je nastajal v času pleistocena, ko je bilo mehansko razpadanje kamnine precej intenzivnejši proces kot raztapljanje. Danes pa je mehansko oblikovanje pobočij, udornic na primer, skoraj zanemarljivo v primerjavi z raztapljanjem. Tako se kamenje, ki se zvali s pobočij, kmalu tudi raztopi. O delovanju mrzlega zraka in zmrzovanju vode v sedimentih v vhodnih delih jam in v globokih kraških depresijah je pri nas največ pisal MIHEVC (na primer: 2009, 2012).

Oblike na stenah jamskih rogov, ki odražajo različne procese SLABE (1995), v svojih razpravah imenuje skalne. Tako skalne oblike na stenah povezuje v skalni relief, ki odraža različne procese. Iz skalnih oblik tako lahko sklepamo na procese, ki so jih oblikovali (GINÉS et al. 2009).

Zaradi denudacije površja so jamski rovi vedno bližje površju (MIHEVC 1996c, 2001). Končno ostanejo brez stropa in se vgradijo v morfologijo kraškega površja, z nadaljevanjem zniževanja površja pa tudi zadnji ostanki jamskih rogov in sedimentov iz njih izginejo (MIHEVC & ZUPAN HAJNA 1996; MIHEVC 2007).

3. 3. Rast rogov in oblikovanje njihovih sten

3.3.1. Rast in oblikovanje

Oblikovanost jamskih rogov, iz katere lahko sklepamo na njihovo genezo, je predvsem posledica hidravličnih pogojev, kjer so nastali. Rovi so lahko nastali v freatični, epifreatični ali vadozni coni (na primer: BRETZ 1942; GAMS 1973, 1974; BÖGLI 1978; MAIRE 1980;

PALMER 1982, 1991, 2007, 2011; TRUDGILL 1985; FORD & WILLIAMS 1989, 2007; ŠUŠTERŠIČ 1991, 1999a; SLABE 1995; GABROVŠEK 2000; LAURITZEN & LUNDBERG 2000).

V freatični ali stalno zaliti coni (nasičena, prežeta), se rovi oblikujejo s tlačnim počasnejšim pretakanjem vode pod gladino kraške vode. Voda v freatični coni zapolnjuje vse praznine v kamnini, pretakanje pa uravnava pravilo veznih posod. V tej coni se zbirajo vode iz vadozne cone, iz drugih delov freatične cone in možne alogene vode.

V epifreatični coni (občasno zalita cona, cona nihanja kraške vode) se tokovi skozi rove pretakajo hitreje. V sušnem obdobju voda prekriva le dno rova ali struge, drugače pa so rovi zaliti.

V vadozni coni ali stalno nezaliti coni (nenasičena, neprežeta), se pogosto oblikujejo hitri vodni tokovi s prosto gladino ali pa je v njih prisotna prenikajoča voda. Rovi in s tem kamnina v vadozni coni so izpostavljeni mehanski eroziji, raztapljanju, kondenzni vlagi, biogeni koroziji, zmrzovanju ter rušnim procesom.

Zaradi denudacije površja so jamski rovi vedno bližje površju. Končno ostanejo brez stropa in se vgradijo v morfologijo kraškega površja, z nadaljevanjem zniževanja površja pa tudi zadnji ostanki jamskih rogov in sedimentov iz njih izginejo (MIHEVC 1996c, 2001).

Osnovne oblike rogov (ŠUŠTERŠIČ 1991), ki so nastali v freatični, prežeti coni, so vsi tipi na prehodu od geoloških nezveznosti do popolnoma izoblikovanih cevi, ob lezikah. Lahko nastanejo vertikalni kanali, ki so po tlorisu podobni kot brezna.

V začetni fazi speleogeneze se raztapljanje odvija po načelih difuzije in z laminarnim tokom. Ko pretok skozi razpoko toliko naraste, da pride do preboja ter se vzpostavi turbulentni tok, kanal dalje raste enakomerno po vsej dolžini (GABROVŠEK 2000). Raztapljanje v pogojih turbulentnega toka je večje (do 10^4) kot v laminarnem toku (FORD & WILLIAMS 1989).

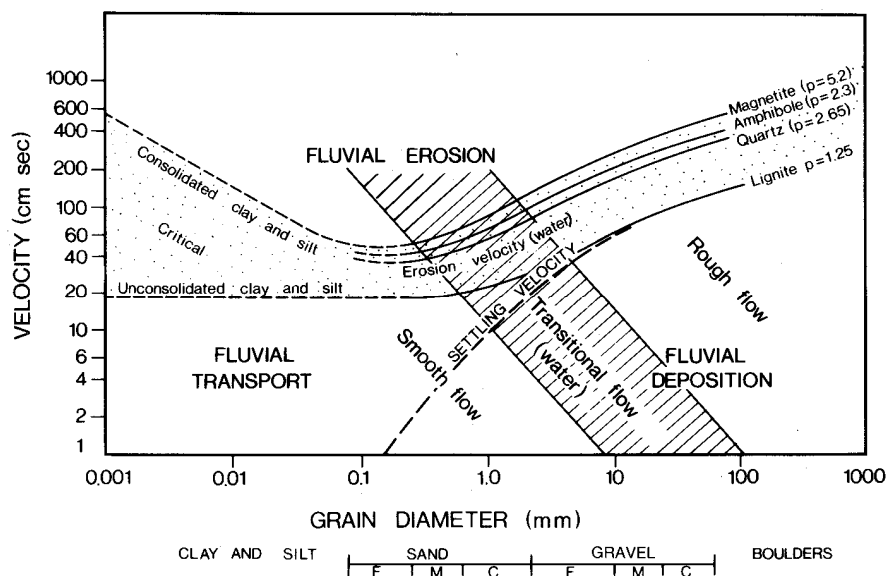
Poplavljeni rov raste, dokler njegove dimenzije niso tako velike, da hitrost vode pade in se rast ustavi. Nekateri pogojujejo ustavitev rasti rogov z naplavljanjem delcev sedimentov na stene rova, ki jih tok, katerega pretok je maksimiran zaradi specifičnega odtoka, ni več sposoben trgati s sten in se zato ti delci ohranjajo na stenah rogov ter s tem upočasnijo rast rogov. Obdobje v razvoju jame, ko se to stanje vzpostavi, imenujejo paragenetski prag (WORTHINGTON 1991).

Procesi parageneze, kot jih pojmujejo RENAULT (1968b), FORD & EWERS (1978), MIHEVC (1991a) in FARRANT & SMART (2011), večajo rov s korozijo nad naplavljenimi sedimenti. Ko se nivo kraške vodne gladine zaradi različnih vzrokov zniža, pridejo jamski rovi v pogoje vadozne cone. Voda se v vadozni, neprežeti coni, če povzamem po ŠUŠTERŠIČU (1991), pretaka po načelu prostega pada oziroma adhezivnega polzenja po stenah, izjeme so viseči tokovi. Orientacija teh votlin in oblikovanost njihovih sten odražata geometrijski element navpičnosti, osnovni tip votline je kamin in nekoliko spremenjena inačica v obliki brezna, nastajajo pa tudi meandri, ki jih dolbejo viseči tokovi.

S časom se prvotne freatične oblike rogov v vadozni coni preoblikujejo in to na različne načine. Lahko ju preoblikuje tekoča voda, to je hitrimi vodni tok s prosto gladino ali prodonosna ponornica, lahko polzeča voda, kondenzna voda in tudi biogena korozija, raztapljanje pod sedimenti, podori, zmrzovanje, itd.. Na pomenu vsekakor pridobi mehanska erozija, tako v obliki abrazije z tovorom, ki ga voda prenaša, kot s trganjem delcev kamnine zaradi viskoznosti vodne mase, rušnih procesov in procesov zmrzovanja.

Jamske rove lahko oblikuje tudi abrazija lebdečega tovara v vodnem toku (GAMS 1959a; NEWSON 1971a) ali pa vodni tok, ki teče zadosti hitro, da trga delce s površine jamskih sten (TRUDGILL 1985). Voda zrno odplavi, kadar se pojavi sila, ki je večja od njegove odpornosti proti gibanju (WHITE et al. 1994).

Za vsak delec obstaja kritična hitrost, ko je še zmožen gibanja, to hitrost imenujemo kritična hitrost erozije (BRIGGS 1977). Voda odtrgana zrna odnaša in jih nato kopiči.



Slika 3.3.1. Razmerje med velikostjo zrn in kritično hitrostjo za tekočo vodo, ki prenaša material z različno specifično težo (iz Ford & Williams, 1989 po Sundborg, 1956).

Do kdaj voda zrna nosi ali kotali je odvisno od njene hitrosti, velikosti delcev in njihove specifične teže. Razmerje med velikostjo delcev in kritično hitrostjo podajam po SUNDBORGU (1956); na sl. 3.3.1.).

Razmerje med kemijsko in mehansko erozijo v tekoči vodi je pogojeno s prevladujočim hidrodinamskim dejavnikom (LAURITZEN & LUNDBERG 2000). Merjenje izdatnosti kemijske in mehanske erozije je bilo zasnovano eksperimentalno, s ploščicami, tako imenovanimi tabletami.

Najbolj znan je GAMSOV (1959b) poizkus v Podpeški jami. Ploščice iz lipiškega apnenca je položil na ilovico v stoječo vodo, granitne ploščice pa v brzice potoka. V prvem primeru je bila dokazana korozija, v drugem pa erozija. Kasneje so bile za ponovitev eksperimenta ploščice lipiškega apnenca razposlane na različne konce sveta. Za eno leto so bile izpostavljene v različne pogoje, tako da bi bili rezultati primerljivi, in primerni za izračun izdatnosti korozije in mehanske erozije (GAMS 1985). V zadnjem času delajo poizkuse z različnimi apnenci, tako da rezultati niso več neposredno primerljivi (GAMS 1996; KRKLEC 2011, KRKLEC et al. 2013).

Pregled rezultatov merjenja razmerja med korozijo in erozijo z ploščicami lipiškega apnenca po svetu podajata v svoji monografiji FORD in WILLIAMS (1989) in KRKLEC (2011) v svoji doktorski disertaciji. Zaključki, ki jih navajata FORD & WILLIAMS (1989) so naslednji:

- Izguba teže izpostavljenih ploščic v določenem časovnem obdobju je večja v tleh kot na zraku ali na površju in je bolj odvisna od količine padavin kot od temperature.
- Hitrosti raztapljanja odražajo klimatske razmere in so višje v vlažni tropski klimi.
- Spremembe v litologiji imajo večji vpliv kot klimatska nihanja.
- Mehanska erozija je lahko pomembna tudi v področjih z visoko stopnjo raztapljanja.
- V višjih predelih Slovenije in Francije je raztapljanje tablet, izpostavljenih na površju, manj izdatno kot v nižjih predelih.
- V suhih klimatskih pogojih je izguba teže na zraku navadno večja kot na tleh, obratno je v vlažnih področjih.
- Izguba teže na vseh mestih v Sloveniji je bila precej manjša kot so glede na znane podatke pričakovali na osnovi izračunov hitrosti raztapljanja.

Z merjenjem korozije in erozije na stenah jamskih rogov se je v zadnjih letih ukvarjal MIHEVC (1993, 1996a), ki je z mikrometrom meril izdatnost obeh procesov v Ponoru v Odolini in v Škocjanskih jamah. Rezultati njegovih meritev kažejo na dejstvo, da se v strugi Škocjanskih jam izmenjujejo oblike, ki jih oblikuje korozija in površine, ki jih oblikuje erozija, kar kaže na delovanje različnih procesov na kamnino ob različnih vodostajih in lego v strugi. Največ zavzemajo erozijske površine. Prevladujejo brušene ploskve v hidravlično različnih delih korita. S prodniki obtolčenih površin je precej manj, manj je tudi delov, kjer je zasledil korozijsko zniževanje skalnega dna in sten rova. Velikokrat se na stenah jamskih rogov prepletata mehanska in kemijska erozija, obe pa sta pomembni za rast in oblikovanje jamskih rogov.

O pomembnosti kondenzne korozije pri oblikovanju sten jamskih rogov se v zadnjem času veliko razpravlja. Njen dejavnik je kondenzna voda, ki se nabira v kapljicah na jamskih stenah ali stropu, navadno na mestu mešanja toplejšega in hladnejšega zraka predvsem v poletnem času (DUBLYANSKY & DUBLYANSKY 2000; DREYBRODT et al. 2005). Kondenzna korozija pa ne preoblikuje samo površine jamskih sten (CIGNA & FORTI 1986; HILL 1987; SLABE 1988; PAVUZA 1993), ampak tudi sigove tvorbe (HILL & FORTI 1997; TARHULE-LIPS & FORD 1998).

Stene jamskih rogov močno preoblikujejo tudi rušni procesi, ki so v povezavi z mehanskimi napetostmi v kamnini (WHITE & WHITE 1969, 1997; BREŇIČ 1993; KORTNIK & ŠUŠTERŠIČ 2000). Posledica rušnih procesov so bloki kamnin, plošče in kosi kamnin ter manjši odkruški. Iz sten jamskih rogov lahko odpadajo posamezni bloki in odkruški ali pa celi podori. Podor sestavlja gmota padlega kamenja z razponom več kot ene plasti. Podori jamskih stropov in sten se lahko pojavljajo v času oblikovanja jamskih rogov, v času sprememb pogojev v zalitih kanalih in v kanalih s prosto vodno gladino (WHITE & WHITE 2000). Nenazadnje so podori tudi del degradacijskih procesov kraškega sistema.

Podori v jamah in oblikovanje večjih podornih dvoran so genetsko povezani z geološkimi strukturami (ŠEBELA 1997, 1998). Vse podorne dvorane v Postojnski jami so ujete v področjih tektonskih nestabilnosti, to je v ali med prelomnimi conami (ŠEBELA 1998).

Zmrzal in led imata na preoblikovanje jamskih rogov velik vpliv. Predvsem v predelih, kjer sta led in sneg v njih prisotna stalno ali sezonsko. Pomembna sta predvsem v zvezi z mehanskim razpadanjem kamnin v vhodnih delih rogov in v delih jame, ki imajo stik s površjem. V takih delih jamskih rogov zasledimo intenzivno mehansko razpadanje sten rogov in preperevanje površine sten in kapnikov zaradi temperaturnih sprememb, ko vezi med mineralnimi zrni zaradi nihanja temperature oslabijo. Bloki kamnin so ostrorobi in različnih velikosti, jih pa kondenzna korozija lahko zaobli.

Jamske rove je v nekaterih primerih zasul tudi krioklastični grušč, ki je nastajal v času pleistocena, ko je bilo mehansko razpadanje kamnine precej intenzivnejši proces kot raztapljanje. Grušč se je kopičil v večjih količinah. Danes pa je mehansko oblikovanje pobočij, udornic na primer, skoraj zanemarljivo v primerjavi z raztapljanjem. Tako se kamenje, ki se zvali s pobočij, kmalu tudi raztopi.

Za manjše odlome, predvsem v obliki odkruškov, naj bi bil vzrok tudi rast mineralov v razpokah, ponavadi sadre (WHITE & WHITE 2000), lahko pa tudi ledu.

Jame so tedaj rezultat različnih speleogenetskih dejavnikov, ki delujejo pod različnimi pogoji in ustvarjajo različne speleogenetske oblike (LAURITZEN & LUNDBERG 2000). Te oblike, izražene v mikro in makro-merilu, odražajo delovanje glavnih in tudi manj pomembnih speleogenetskih dejavnikov. Mezo in mikro oblike odvijajo korozivni in erozivni procesi, vendar so obenem litološko ter tektonsko pogojene.

Jamski rovi ne nastajajo vedno samo z omenjenimi procesi, ampak tudi drugače. Primer drugačnega načina nastanka z »in situ« preperevanja apnenca. Struktura kamnine ostane ista, spremeni pa se mineralna sestava kamnine (VERGARI & QUINIF 1997). Preperele

predele apnenca, ki so nepravilnih oblik in locirani v sredino kamninske mase imenujejo »fantomske kamnine«. Prepereli deli pa so veliko bolj porozni, zato jih voda lahko izpira in oblikuje nekakšne jame. Jame so tako »psevdo-endokraškega« nastanka (VERGARI 1998), ostanek raztapljanja krednih apnencev pa je kremenova mikrokristalna mreža (KAUFMANN et al. 1999).

3.3.2. Oblikovanje površine jamskih sten

Različni speleogenetski dejavniki odvijajo procese na površini karbonatne kamnine in odnašajo njihove proizvode. Proces, ki deluje na kamnino v jamskih rovih, so korozija in erozija z laminarnim in turbulentnim vodnim tokom, podtalna korozija, kondenzna korozija, zmrzovanje itd..

SLABE (1992) je v svoji disertaciji procese, ki delujejo na kamnino, razporedil v točkovne, črtne in ploskovne.

- Točkovni dejavniki so padec vodnega toka, prenikanje vode skozi razpoke in kapljanje.
- Črtni so vrtinčast vodni tok, voda, ki se pretaka pod in nad drobnozrnato naplavino, prenikajoča voda in vrtinčasti zračni tok.
- Ploskovni so stoječa voda ter vlaga na stiku med drobnozrnato naplavino in kamnino, kjer je značilno predvsem difuzijsko odnašanje proizvodov raztopljenih kamnine.

Oblike, ki odražajo različne procese, SLABE (1992, 1995) v svojih razpravah imenuje skalne. Skalne oblike na stenah jamskih rogov se povezujejo v značilni skalni relief. Različni procesi na kamnini ustvarjajo različne skalne oblike, ki so zajedene pod nivo osnovne skalne površine. Iz njihove oblike sklepamo na procese, ki so jih oblikovali, saj so posledica predvsem načina sklenjenega odnašanja karbonatne kamnine (SLABE 1995).

Površina skalnih oblik, ki je gladka ali hrapava, je odvisna od sestave kamnine in učinkovitosti procesa, ki deluje nanjo. Vodni tokovi zaradi raztapljanja in mehanskega brušenja kamnine ustvarijo gladko, razeno ali obtolčeno površino, skala je pogosto gladka tudi pod drobnozrnato naplavino, ledom in pod vplivom močne kondenzne korozije, drobno pa skalo členi šibkejša kondenzna korozija in biogeni dejavniki (SLABE 1992).

4. AVTOHTONI KARBONATNI KLASTI KOT DEL NEVEZANIH FLUVIALNIH JAMSKIH SEDIMENTOV

4.1. Uvod in dosedanja literatura

Zanimalo me je, od kje izvirajo drobni karbonatni klasti v sedimentih in kako mora biti kamnina predhodno pripravljena, da jo lahko voda mehansko odnaša z jamskih sten kot drobne delce. Avtohtoni karbonatni prod in pesek nastajata tako, da se iz jamskih sten izsipajo večji in manjši kosi, predvsem iz pretrtih con, v podorih in iz sten v vhodnih delih jam zaradi temperaturnih nihanj, ki jih nato voda odnese in zaobli (GOSPODARIČ 1976; KRANJC 1989). Karbonatni melj lahko nastaja z razpadom že obstoječega karbonatnega proda in peska, ki nastajata na prej omenjeni način ali pa, kot bomo videli v nadaljevanju, nastaja s spiranjem preperelih sten jamskih rovov.

Povečan delež karbonatnih klastov velikostnega reda melja in gline sem v jamskih naplavinah opazila že med pripravo magistrske naloge in pri kasnejših analizah jamskih klastičnih sedimentov. Poleg nekarbonatnih mineralov v alohtonih klastičnih sedimentih, ki jih v jamo nanaša vodni tok, sem prisotnost karbonatnih klastov zaznala v recentnem pesku in melju v Veliki ledenici v Paradani (ZUPAN & MIHEVC 1988), v meljastem sedimentu v izviri v Malnih, v nekaterih vzorcih peska in ilovice iz Postojnske ter Planinske jame (ZUPAN 1990; ZUPAN HAJNA 1997a, 1998a), v fluvialnih sedimentih Zelških jam (ZUPAN 1990; ZUPAN HAJNA 1998a), nekaterih peskih in ilovicah v Brlogu na Rimskem (ZUPAN 1990; ZUPAN HAJNA 1998a) ter v poplavni ilovici iz Martelove dvorane v Škocjanskih jamah ter Labodnice (ZUPAN HAJNA 1995). Ali je v obliki karbonatnih klastov mineral kalcit ali dolomit je odvisno od tega ali so jamski rovi izvotljeni v apnencu ali dolomitu.

- Kot avtohtone karbonatne klastične sedimente v jamskih fluvialnih sedimentih torej pojmem delčke karbonatne kamnine, ki imajo svoj izvor v samih stenah jamskega rova.

Avtohtoni karbonatni klastični sedimenti v tu opisanih primerih nimajo nobene zveze s cementi ali skorjami sige, ki se izločajo kot avtohtoni kemični sedimenti v klastičnih jamskih sedimentih.

Prisotnost manjših karbonatnih delcev v jamskih nevezanih naplavinah velikostnega reda melja in gline ter tudi prisotnost karbonatnih koloidov v podzemeljskih vodnih tokovih omenja v svojih razpravah več avtorjev. V nadaljevanju jih nekaj omenjam.

ZOGOVIĆ (1966) je opazil, da se dolomit lahko topi nezvezno in da za njim ostajajo mineralna zrna, ki se izločajo iz podlage v obliki melja. Ugotovil je, da se lahko droben dolomitni pesek nakopiči v ožinah ter zavre pretok vode.

NEWSON (1971a) je med vodnim sledenjem v Mendipih opazil naraščanje deleža karbonatnih klastov in padanje deleža kremenca v jamskih sedimentih med vodom in izhodom iz jamskega sistema. Preučeval je naraščanje vsebnosti karbonatov v klastičnih sedimentih ter njihov transport vzdolž sistema. Obenem je opazoval padanje velikosti zrn v zaporedju pesek – melj – glina ter zaobljenost kremenovega peska, ki se je vzdolž sistema povečevala. Vzroke za velike količine karbonatnega materiala na nastavljenih mrežah po visokih vodah je iskal v abraziji jamskih sten. V svojem delu izpostavlja pomembnost abrazije pri razvoju jam. Predvsem se mu je zdela pomembna abrazija s kremenovim peskom, ki ga nosi voda v obliki lebdečega tovara. Ugotavlja tudi obnavljanje erozijske moči z dotokom svežega apnenčevega materiala k že obstoječemu lebdečemu tovoru vzdolž podzemnega vodnega toka. Da bi ugotovil razmerje med korozijo in abrazijo, je v vodnem toku izpostavil apnenčeve tablete ter meril izgubo njihove teže. Ugotovil je, da je pri normalnem vodnem toku prevladovalo raztapljanje in da abrazija postane pomembnejša samo blizu iztoka iz

sistema, kjer se vodni padec lokalno poveča. Abrazija dobi na pomenu tudi ob visokih vodah, vendar vedno samo v področju vodne struge. NEWSON (1971b, 1972) se je v kasnejših razpravah posvetil predvsem hidrološkemu dejavniku mehanske erozije v podzemlju, ni pa se podrobneje ukvarjal z izvorom karbonatnih delcev (tako tudi SMITH & NEWSON 1974).

Drobnih karbonatnih klastov v jamskih sedimentih ne omenja veliko avtorjev, vendar so zato toliko zanimivejši. FORD & WILLIAMS (1989) omenjata veliko prisotnost avtohtonih karbonatnih klastov v suspendiranem tovoru velikostnega reda melja in gline, ki ima izvor v preperelih jamskih stenah. WORTHINGTON (1991) ugotavlja, da prisotnost karbonatnih delcev v suspenzu in jamskih naplavinah omenja le malo avtorjev. Po njegovem ni presenetljivo, da se ob raztapljanju apnenca sprostijo njegovi manj topni delci, ki jih kasneje odstrani vodni tok in se akumulirajo v nižjem energijskem okolju jame. ŠUŠTERŠIČ & MIŠIČ (1996) omenjata v Piparskem rovu Najdene jame nastajanje karbonatnega melja na stalno vlažni dolomitni steni in premikanje teh delcev s polzenjem vode ter njihovo odnašanje in odlaganje z malo močnejšim tokom v manjših lužah. ATTEIA (1997) pri analizah koloidov in delcev kraškega vodonosnika Švicarske Jure omenja kalcit in dolomit kot njihov sestavni del, njuna prisotnost pa se mu zdi zelo zanimiva.

Poleg karbonatnih klastov, ki so del lebdečega tovara podzemeljskih vodnih tokov, najdemo v literaturi tudi omembe karbonatnih delcev v suspenzu prenikajočih vodnih curkov. Karbonatne delce v suspenzu prenikajočih vodnih curkov Planinske jame navajata KOGOVSĚK & HABIĀ (1981), ki sta glede na koliĀino kemiĀno raztopljenega materiala in koliĀino suspenza v prenikli vodi ugotavljala razmerje med korozijo in erozijo v odvisnosti od koliĀine vode. V razpravi ugotavljata, da sta erozija in korozija ob nalivih enako učinkoviti, saj se je v istem časovnem obdobju raztopila skoraj enaka koliĀina karbonatov kot jih je bilo prinesenih v jamo v obliki suspenza. Karbonatni suspenz v vodnem curku navajata tudi KOGOVSĚK & ZUPAN (1992) v curkih iz Planinske jame in Pivke jame, ter povezujeta njegov izvor s preperino karbonatnih kamnin na površju in transportom preperelih delcev kamnine skozi odprte razpoke v jamo. KOGOVSĚK (1994) razlaga prisotnost karbonatnih delcev v suspenzu vodnih curkov v Vilenici z njihovim nastankom ob stiku s prstjo, kjer je raztapljanje hitrejše ter transportom po odprtih razpokah v jamo. Razpravam o karbonatnem suspenzu v prenikli vodi je skupno, da omenjajo karbonatne delce kot del tovara, ki ga voda s površja prinaša v jamo skozi odprte razpoke.

Prisotnost karbonatnih klastov v jamskih klastiĀnih sedimentih najveĀkrat povezujejo s poledenitvami in taljenjem snega. Ledenik in voda izpod ledenika ter tudi taleĀi sneg mehansko erodirajo karbonatne kamnine na površju, nato pa voda erodirane drobnozrnate karbonatne delĀke nanaša v jame in jih tam odlaga. AUDRA (1995) povezuje usedanje karbonatnih varv (drobno laminirane gline) v visokogorskih jamah z velikimi koliĀinami vode, ki so pritekale izpod površinskih ledenikov, polne melja, ki se je nato v jamskih rovih usedal.

Vendar ne smemo pozabiti, da v visokogorskih jamah najdemo tudi glinene sedimente, ki jih sestavljajo karbonatni klasti drugaĀnega izvora. Kakšen je pa ta izvor opisujem v nadaljevanju.

Zanimalo me je:

- Kje se kot sestavni del jamskih klastiĀnih sedimentov pojavljajo avtohtoni karbonatni klasti ?
- Kakšna mora biti kamnina v steni rova, da jo lahko voda, ki sicer ne prenaša lebdeĀega tovara, trga v obliki delcev in nato odtrgane delce odnaša naprej po jami ter jih odlaga, ko vodi transportna moĀ pade.

V preglednici (sl. 4.1.1.) dajem pregled analiziranih vzorcev jamskih klastiĀnih sedimentov z metodo rentgenske difrakcije.

JAMA	VZORCI								
Planinska jama, Malni	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	PI6	PI7	M1	M2
Jama Čehi 2	Čh1	Čh2	Čh3						
Črnelško brezno	Čr1	Čr2							
Renejevo brezno	Re2								
Velika led. v Paradani	LPs1	LPs2	LPs3	LPs4	LPs5	LPs6	LPs7		

Slika 4.1.1. Pregled analiziranih vzorcev drobnozrnatih jamskih sedimentov.

Poudarim naj, da se pri svojem delu nisem ukvarjala:

- z mehaniko transporta klastičnih sedimentov,
- z mehanskimi in kemičnimi lastnostmi vode, ki prenaša klastične sedimente po jamah,
- s sedimentacijo klastičnih sedimentov v jamskih rovih, in ne
- s kvantitativnimi ter granulacijskimi analizami klastičnih sedimentov.

To, povsem drugo področje, so podrobno obdelali mnogi avtorji, tako vzdolž površinskih vodnih tokov (PETTIJOHN et al. 1972; FÜCHTBAUER 1974; ALLEN 1985; MORRIS & WILLIAMS 1999; itd.) kot vzdolž jamskih kanalov (NEWSON 1971a; GOSPODARIČ 1974, 1984; FORD & WILLIAMS 1989; KRANJC 1989; AUDRA 1995; KADLEC 1999; itd.).

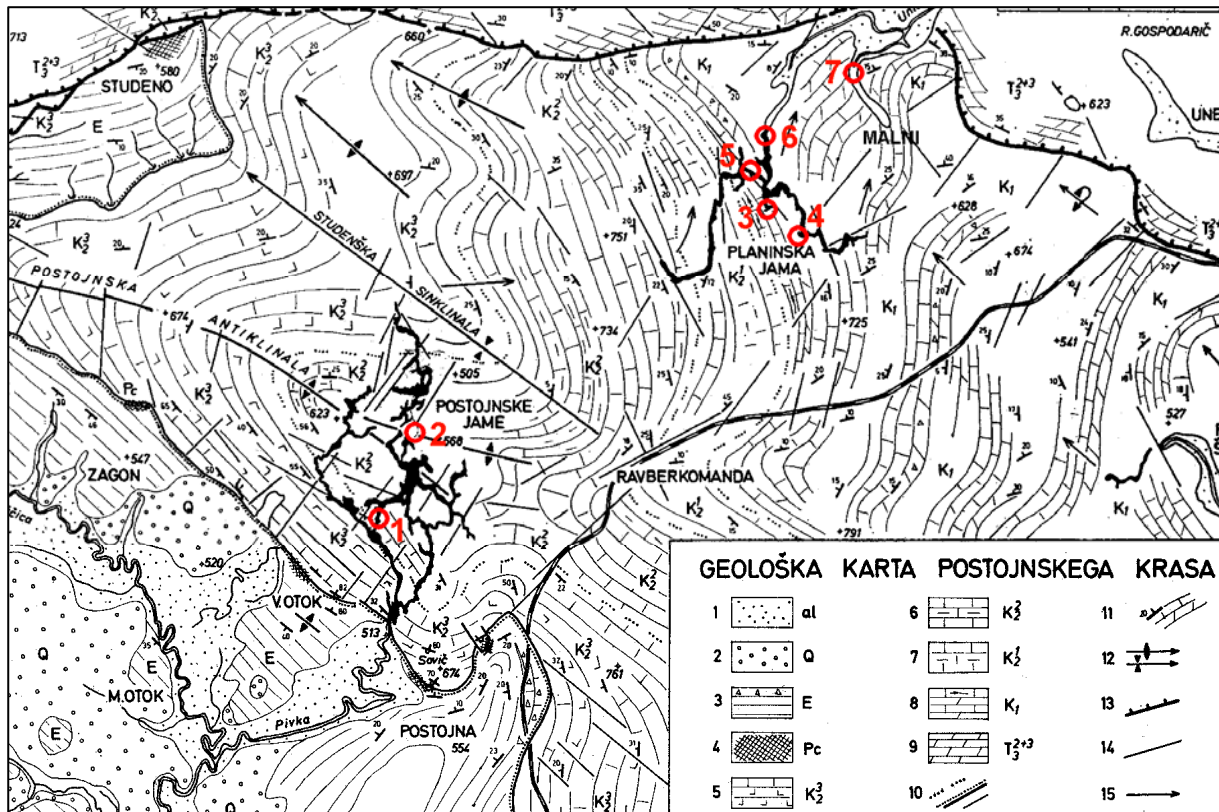
4.2. Povišanje deleža kalcita in dolomita v naplavinah iz Postojnske in Planinske jame

Primer povišanja vsebnosti deleža karbonatnih litoklastov v jamskih klastičnih sedimentih sem opazila pri preučevanju naplavin v Postojnski in Planinski jami (ZUPAN 1990; ZUPAN HAJNA 1997a, 1998). Glavni izvor naplavin v Postojnski jami so prepereli ostanki flišnih kamnin, ki jih reka Pivka nanaša in jih je nanašala v jamo. Zaradi povišanega deleža karbonatnih klastov v nekaterih vzorcih sem napravila še dodatne mineraloške analize starejših in recentnih peskov ter ilovic iz Postojnskega jamskega sistema, Planinske jame in dveh izvirov v Malnih pri Planini.

4.2.1. Osnovne geološke in speleološke značilnosti krasa med Postojno in Planino

Reka Pivka ponika v podzemlje na severni strani Pivške kotline na nadmorski višini 511 m ($y = 5438\ 280$, $x = 5073\ 010$) in skozi Postojnski jamski splet, ki ga sestavljajo Postojnska jama, Otoška jama, Magdalena jama, Črna jama in Pivka jama, teče proti Planinski jami, iz katere izvira kot Unica. Skupna dolžina jamskih rogov Postojnskega jamskega sistema je večja od 20 km. Iz Pivke jame teče voda skozi zalite rove proti Pivškemu rokavu Planinske jame. Med obema jamama je sedaj še okrog 1 km neznanih rogov. Pivški rokav se v jami združi z Rakovim rokavom, od tam proti izhodu iz jame voda teče skupaj in izvira kot Unica. Vhod v Planinsko jamo leži na jugozahodnem robu Planinskega polja na nadmorski višini 453 m ($y = 5441\ 755$, $x = 5075\ 350$), izviri v Malnih pa ležijo približno kilometer vzhodno od vhoda v Planinsko jamo.

Področje med Pivško kotlino in Planinskim poljem gradijo karbonatne kamnine spodnje in zgornje kredne starosti (GOSPODARIČ 1976), ki pri vhodu v Postojnsko jamo mejijo na eocenske flišne kamnine. Najbolj izrazite strukture tako imenovanega Postojnskega krasa so Postojnska antiklinala, Studenška sinklinala in Predjamski nariv. Obe gubi imata dinarsko smer SZ – JV. Tako so rovi Postojnskega jamskega sistema in Planinske jame oblikovani v različnih apnencih in dolomitu in ob različnih strukturnih elementih, ki se odražajo v obliki rogov (ŠEBELA 1998).

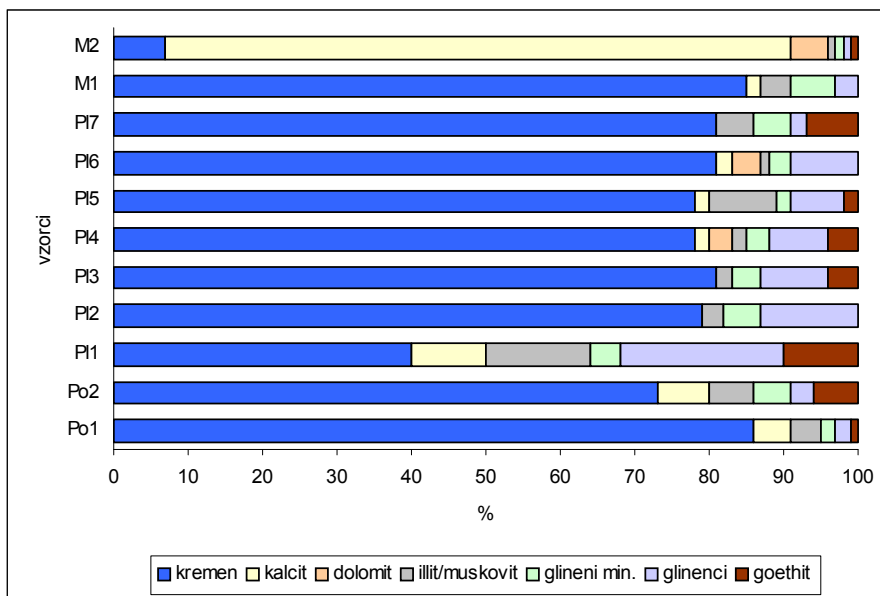


Slika 4.2.1. Geološka karta z vrisanim Postojnskim jamskim sistemom, Planinsko jamo in Malni (po GOSPODARIČ 1976). Legenda: 1 – Sp. Tartar, 2 – Umetni rov, 3 – Rudolfov rov, 4 – Slepič, 5 – Pivški rokav, 6 – Vhod v Planinsko jamo, 7 – izviri v Malnih.

4.2.2. Mineralna sestava vzorcev

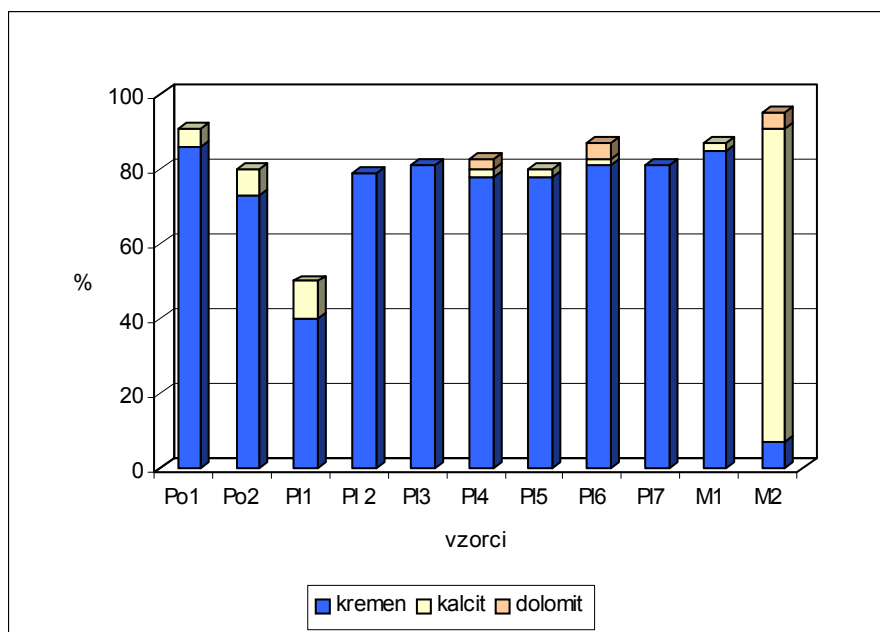
Mineralna sestava vzorcev je bila določena z metodo rentgenske difrakcije. Na slikah so predstavljeni vzorci glede na oddaljenost od ponora Pivke v Postojnsko jamo do izvira Unice v Planinski jami in izvirov v Malnih. Iz Postojnske jame je bila določena mineralna sestava peskov in ilovic iz zasutega žepa v Umetnem rovu med Postojnsko jamo in Črno jamo (ZUPAN 1990). Mineralna sestava enega od vzorcev iz Umetnega rova je prikazana na sl. 4.2.2. pod oznako **Po1**. Vzorec **Po2** je iz Spodnjega Tartarja, kjer starejši pasoviti peski in ilovice zapolnjujejo manjši stranski rov. Vzorci nevezanih peskov in ilovic iz Spodnjega Tartarja in zasutega žepa v Umetnem rovu vsebujejo največ kremenca, nekaj glinenih mineralov, glincev ter goethit.

Analiziranih je bilo več vzorcev iz Planinske jame (ZUPAN 1990), mineralna sestava je prikazana na sl. 4.2.2.. Iz Rudolfovega rova sta vzorca starejše pasovite ilovice, glinena lamina je vzorec **PI1**, peščena lamina je vzorec **PI2**. Iz Slepiča so vzorci starejšega nanosa peska in ilovice **PI3**, **4** in **5**, iz Pivškega rokava je vzorec recentne naplavine **PI6**, iz struge v vhodnem delu jame pa je vzorec recentne naplavine **PI7**. Z iste slike pa je razvidna tudi mineralna sestava dveh vzorcev iz izvirov v Malnih, **M1** je sediment iz zgornjega izvira in **M2** je sediment iz spodnjega izvira. Mineralna sestava vzorcev iz Planinske jame je precej podobna tistim iz Postojnske jame, saj imajo naplavine isti izvor. V nekaterih vzorcih je opazno povišanje deleža kalcita in dolomita. Kalcit in dolomit sta v klastičnih sedimentih prisotna v obliki drobnih klastov (presevani mikroskop) velikostnega reda melja in gline. V bolj peščenih vzorcih pa ni bilo opaziti njune prisotnosti, tam prevladuje kremen.



Slika 4.2.2. Mineralna sestava izbranih vzorcev iz Postojnske jame, Planinske jame in Malnov. Vzorca Po1 in Po2 sta iz Postojnskih jam, vzorci P11, P12, P13, P14, P15, P16 in P17 so iz Planinske jame, vzorca M1 in M2 pa iz izvirov v Malnih.

Relativni delež kalcitnih in dolomitnih delcev v primerjavi z deležem kremenovih zrn v vzorcih je prikazan na sl. 4.2.3.. Primerljivost padanja in rasti deleža kremenovih in karbonatnih zrn ni mogoča. Upoštevati moramo, da količina enih in drugih klastov ni odvisna samo od dolžine transporta (glede na lego od vhoda v sistemu proti izvirov), ampak je odvisna tudi od hitrosti vode in dimenzij rovov, skozi katere se voda pretaka. Iz diagrama (sl. 4.2.3.) je razvidno le rahlo upadanje deleža kremenovih zrn od ponora proti izvirov in obenem naraščanje deleža karbonatnih klastov.



Slika 4.2.3. Primerjava relativnega deleža litoklastov apnenca in dolomita ter zrn kremenca v vzorcih jamskih naplavin iz Postojnske(Po) in Planinske jame(Pl) ter izvirov v Malnih (M). Kar manjka do 100 % so glineni minerali, glinenci in nekaj goethita.

4.2.3. Zaključki

Povišanje deleža kalcita in dolomita je bilo opaziti v nekaterih vzorcih naplavin iz Postojnske in Planinske jame (ZUPAN HAJNA 1997a). Mineralna združba je zelo podobna v vseh vzorcih, le delež posameznih mineralov se delno spreminja glede na stopnjo preperelosti jamskih sedimentov, granulacijo in dolžino transporta.

Prisotnost dolomita v klastičnih naplavinah notranjih delov jame in v sedimentu na enem od izvirov potrjuje, da ga je iz sten rogov odplaknila voda in ga odložila, ko je izgubila svojo transportno moč. Dolomit se namreč v jamskem okolju ne obarja in ne veže klastičnih zrn kot cement. Zato je njegov izvor povezan samo s preperevanjem dolomita, ki gradi posamezne dele jamskih rogov in mehanskim trganjem delčkov s površine stene. Obogatitev jamskih alohtonih naplavin s karbonatnimi minerali je lepo izražena v primerih, kjer je voda hitro teče ali še teče skozi ožje kanale in sifone in zato stene rogov izraziteje mehansko erodira. Del obogatitve jamskih klastičnih sedimentov z avtohtonimi karbonatnimi klasti pa moramo pripisati tudi spiranju preperelih delcev karbonatnih kamnin s površja z vodnimi curki skozi jamski strop (KOGOVŠEK & HABIČ 1981).

4.3. Avtohtoni karbonatni litoklasti v recentnih jamskih sedimentih Kaninskega pogorja

4.3.1. Osnovne geološke in speleološke značilnosti Kaninskega pogorja

V Kaninskem pogorju je največ globokih jam na Kaninskih in Rombonskih podih (GABROVŠEK 1997). V jamah se prepletajo stopnjasta brezna z meandri in starejšimi sedaj neaktivnimi horizontalnimi rovi (MOREL 1989; AUDRA 2000; AUDRA et al. 2007, GABROVŠEK & OTONIČAR 2010).

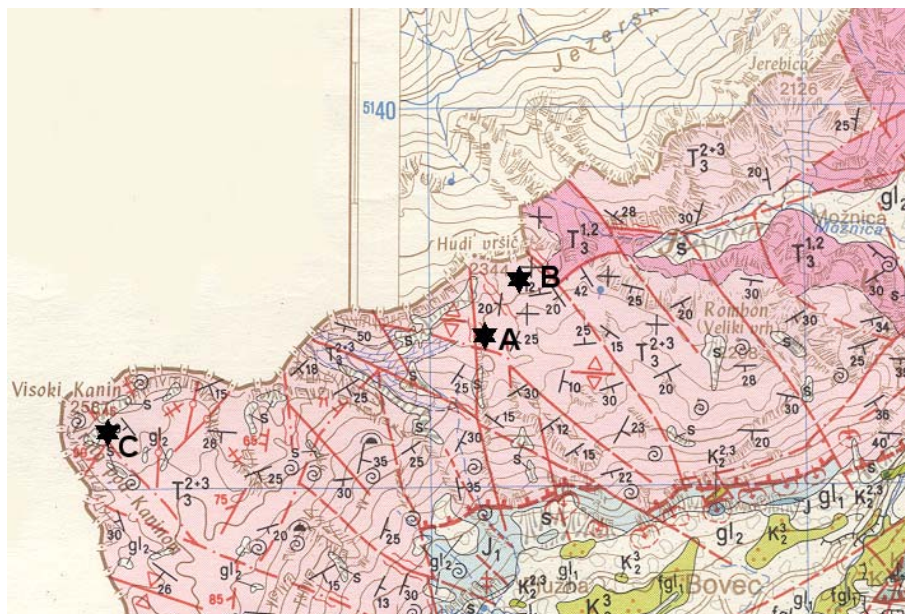


Slika 4.3.1. Lega jam na Kaninskem pogorju iz katerih so analizirane kamnine.

V jamah najdemo podorne bloke, grušč, v horizontalnih delih jam pa starejše pasovite ilovice in peske, ki jih včasih prekrivajo tudi recentni peski in ilovice, ki jih sedanji vodni

curki spirajo (MOREL 1989). Recentni drobnozrnati sedimenti se nabirajo predvsem pod aktivnimi brezni v globljih delih jam (MANCA 1998). V okviru raziskav jamskih karbonatnih avtohtonih klastičnih sedimentov so bile narejene tudi rentgenske analize nekaj ilovic iz Črnelskega brezna, jame Čehi 2, katerih vhoda sta na s področju Goričice pod Hudim vršičem zahodno od Rombona in Renejevega brezna na Kaninskih podih (sl. 4.3.1.). Več o krasu in jamah na Kaninskih podih najdete v GABROVŠEK & OTONIČAR (2010).

Po Osnovni geološki karti 1: 100000 list Beljak in Ponteba (JURKOVŠEK 1986) gradi področje Kaninskega pogorja zgornjetriasni dachsteinski apnenec T_3^{2+3} (sl. 4.3.2.). Plasti apnenca vpadajo generalno proti JZ pod kotom 15° do 40° . V bazi dachsteinskega apnenca leži norijsko-retijski »glavni dolomit«, kar je vidno v dolinah Možnice in Krnice ter v globljih delih nekaterih jam. Dolomit vpada proti JZ pod kotom 50° do 25° . Na dolomitizirani apnenec so v jami Led Zeppelin na italijanski strani Kanina naleteli na globini 800 m (1330 m.n.v.), plasti dolomita pa se pojavijo na globini okrog 850 m in se nadaljujejo do dna jame na globini 960 m (MANCA 1998; AUDRA 2000). V Vandimi dolomitiziranega apnenca do samega dna jame (-1182 m) niso našli, našli so ga pa v sosednjih jamah Čehi 2 in Črnelskem breznu (GABROVŠEK & PINTAR 1993). Ista avtorja navajata, da je prav stik apnenca in močno dolomitiziranega apnenca, skoraj dolomita, osnova za velike, večinoma vodoravne in lahko prehodne galerije s številnimi dvoranami in soteskami z jezeri. Dachsteinski apnenec leži na glavnem dolomitu v normalni legi, med obema litološkima nivojema pa se nahaja horizont močno spremenjenih satastih kamnin (ČAR & JANEŽ 1992). Kraške oblike na površju so na dolomitu izražene drugače kot na apnencu, saj je dolomit bolj podvržen mehanskemu preperevanju (KUNAVER 1983).



Slika 4.3.2. Lege vhodov v Jamo Čehi 2 - A, Črnelsko brezno - B in Renejevo brezno - C in geološka situacija površja po OGK Beljak in Ponteba (iz JURKOVŠEK 1986).

GABROVŠEK (osebo) mi je povedal, da so pri raziskovanju Renejevega brezna v globini več kot 700 m naleteli na močno preperle stene menadra; preperel del kamnine sega več cm globoko. Voda preperino spira s stene in sprana zrna se nabirajo kot belo blato v dnu brezna. Voda del blata odnaša naprej po rovih, zanimivo pa je, da enako blato cementira tudi podor v nadaljevanju. Kopičenje karbonatnega peska sem opazila v dnu brezen vhodnega dela Skalarjevega brezna na Kaninu, vendar žal nisem vzela vzorcev. Vzorce klastičnih sedimentov so mi prinesli iz Jame Čehi 2, Črnelskega brezna in Renejevega brezna. Vse

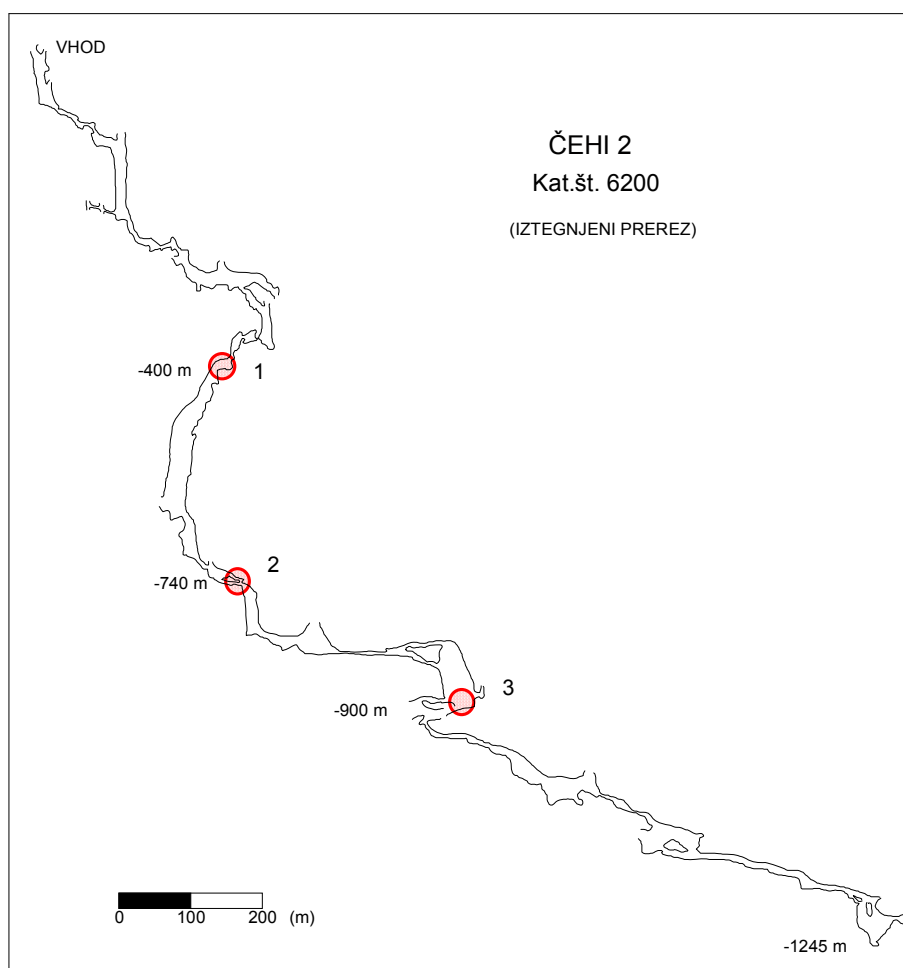
omenjene jame so globoka brezna na Kaninskem pogorju med Velikim Kaninom in Rombonom.

4.3.2. Speleomorfološke značilnosti Jame Čehi 2, kat. št. 6200

Vhod v Jamo Čehi II leži na grebenu južno od Hudega vršiča na nadmorski višini 2034 m ($y = 53855\ 735$, $x = 5136\ 950$). Do globine 900 m si sledijo globoka brezna, med katerimi so krajše vodoravne galerije, nato se jama nadaljuje v obliki poševnih rovov, ki jih sekajo manjša brezna. Jama je konkavne oblike (AUDRA 1995). Je najgloblja jama v Sloveniji: globina 1502 m in dolžina 5291 m (kataster JZS in IZRK).

4.3.3. Vzorci klastičnih sedimentov iz Jame Čehi 2 in njihova mineralna sestava

Leta 1993 mi je vzorce ilovice iz jame prinesel Stanislav Glažar. Prvi vzorec **Čh1** z dna manjšega brezna na globini 400 m, pred breznom z imenom »Grosso e stanco«, je mlečnorjava glina (7.5 YR 5/4) s preperelimi koščki apnenca. Drugi vzorec **Čh2** iz galerije »El vecchio tribbola«, globina 740 m, je bela glina (10 YR 8/2 (8/3)) z rahlim rumenorjavom odtenkom. Tretji vzorec **Čh3** iz globine 900 m pri Bivaku pa je bela glina (10 YR 8/2). Lega vzorcev je označena na iztegnjenem prerezu (sl. 4.3.3.).

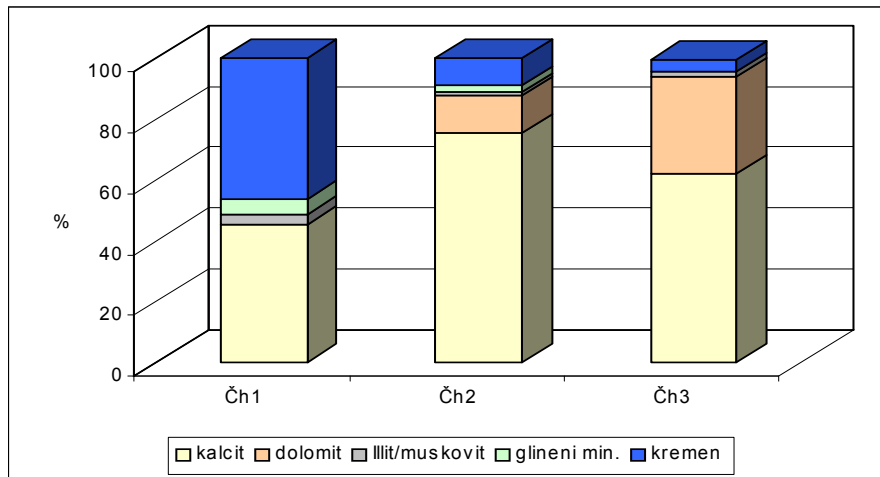


Slika 4.3.3. Shematski načrt jame Čehi II do globine 1245 m z označeno lego vzorcev: 1 – vzorec Čh1, 2 – vzorec Čh2 in 3 – vzorec Čh3.

Mineralna sestava vzorcev iz Jame Čehi 2 določena z metodo rentgenske difrakcije (rentgenogrami v Prilogi 1) je razvidna iz diagrama na sl. 4.3.4., kjer so deleži posameznih mineralov relativni, glede na jakost njihovega glavnega odboja.

Vzorec **Čh1** (globina 400 m), vsebuje največ kremenca in kalcita, vsebuje pa tudi nekaj glinenih mineralov. Prisotni so še minerali illit/muskovitove skupine in v sledovih hematit. Vzorec ne vsebuje dolomita.

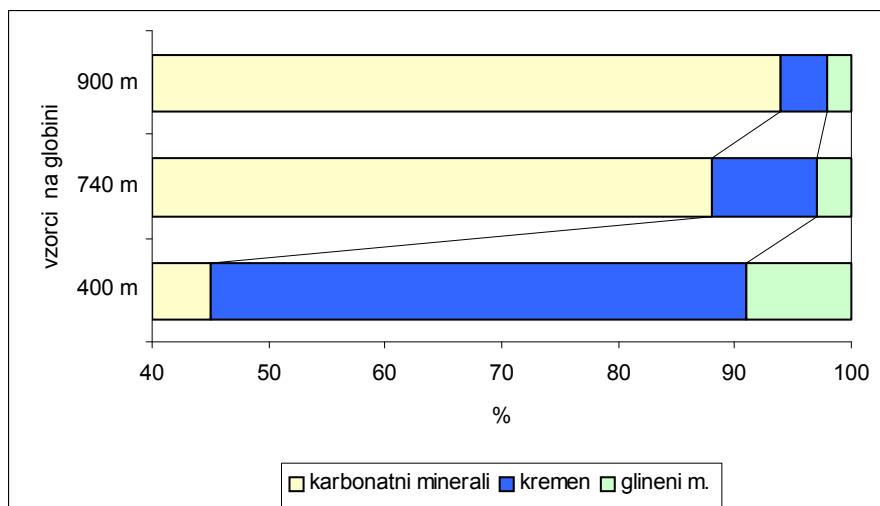
Vzorec **Čh2** (globina 740 m), vsebuje največ kalcita. Dolomita je več kot kremenca, obeh pa je relativno malo. Zelo malo je v vzorcu glinenih mineralov (illit/muskovit in klorit).



Slika 4.3.4. Mineralna sestava vzorcev ilovice iz Jame Čehi 2, deleži so izračunani glede na jakost mineralovega glavnega odbija.

V vzorcu **Čh3** (globina 900 m), je največ kalcita, močno je zrasel delež dolomita; kremenca je zelo malo, glineni minerali pa so v sledovih.

Naraščanja deleža karbonatnih zrn v klastičnih sedimentih z globino in vzporedno padanje deleža kremenca ter glinenih mineralov je lepo vidno iz diagrama na sl. 4.3.5..

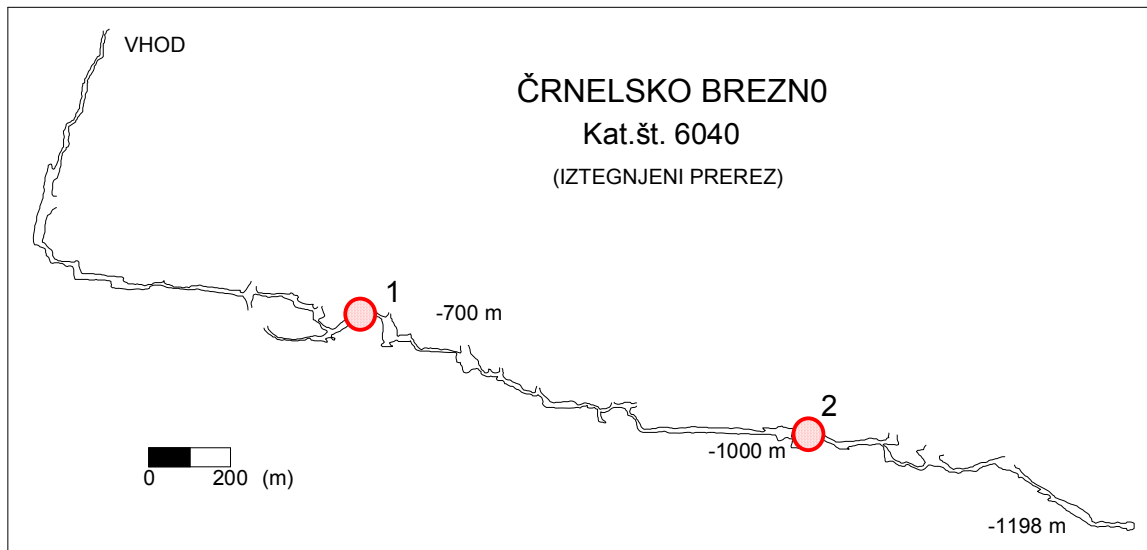


Slika 4.3.5. V jami Čehi 2 z globino delež karbonatnih mineralov narašča.

4.3.4. Speleomorfološke značilnosti Črnelskega brezna, kat. št. 6040

Vhod v Črnelsko brezno leži južno od Črnelskih vršičev pod Veliko Črnelsko špico. Vhod v jamo je na nadmorski višini 2080 m ($y = 5386\ 179$, $x = 5137\ 707$). Skupna globina jame je 1241 m. V vhodnem delu si do globine 520 m sledijo večja in manjša brezna, od tam pa se jama nadaljuje po ozkih vodoravnih galerijah, ki so oblikovane ob tektonski razpoki (NAGODE 1993) in presekanke z manjšimi brezni.

4.3.5. Vzorci klastičnih sedimentov iz Črnelskega brezna in njihova mineralna sestava



Slika 4.3.6. Shematski načrt Črnelskega brezna z označeno lego vzorcev: 1 – vzorec Čr1, 2 – vzorec Čr2.

Dva vzorca klastičnih sedimentov mi je iz jame prinesel Philippe Audra, ki je vzorce v jami pobral prvenstveno za paleomagnetno datiranje (AUDRA 2000). Lega vzorcev je označena na iztegnjenem prerezu (sl. 4.3.6.).

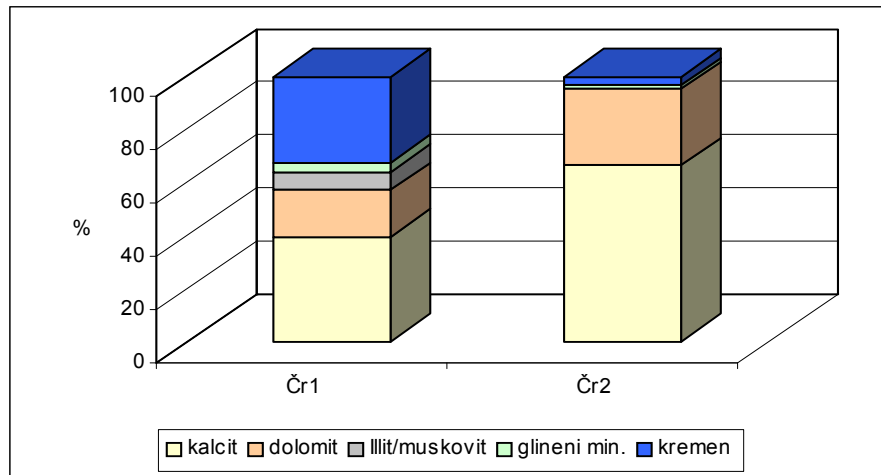
Prvi vzorec **Čr1** so gline z globine 700 m, iz galerije Ho-Chi- Minh. V vzorcu so določili inverzni magnetizem (AUDRA 2000), kar pomeni, da so gline stare več kot 780.000 let, ko je znan Brunhes/Matuyama obrat magnetnega polja.

Drugi vzorec **Čr2** je del glacio-kraških varv z globine 1000 m pri bivaku. V tem vzorcu so določili normalni magnetizem (AUDRA 2000).

Mineralna sestava vzorcev iz Črnelskega brezna, določena z metodo rentgenske difrakcije (rentgenogrami so v Prilogi 1), je razvidna iz diagrama na sl. 4.3.7.. Deleži posameznih mineralov so izračunani glede na jakost njihovega glavnega odboja.

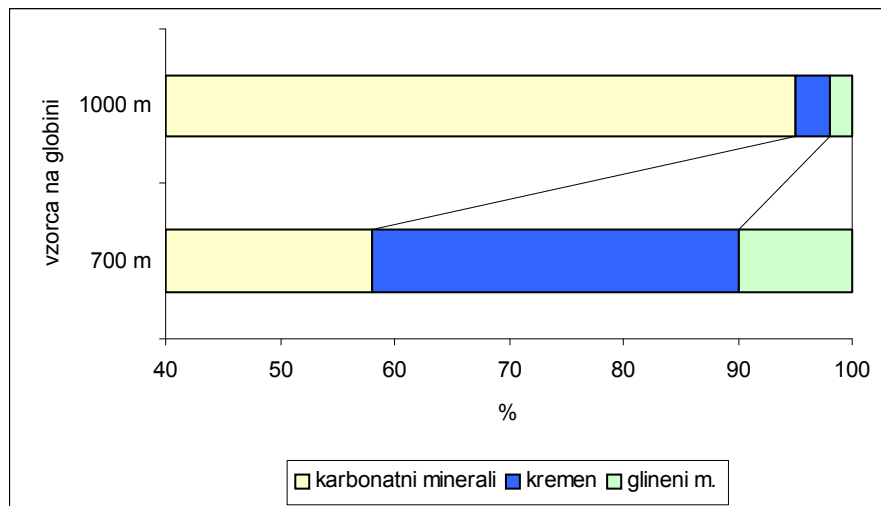
Vzorec **Čr1** (globina 700 m), vsebuje največ kalcita, tudi kremena je veliko, dolomita je malo manj, malo pa je v vzorcu glinenih mineralov (illit/muskovita in klorita).

V vzorcu **Čr2** (globina 1000 m), je največ kalcita, povečal se je delež dolomita, kremena je zelo malo, glineni minerali pa so opazni samo še v sledovih.



Slika 4.3.7. Mineralna sestava vzorcev iz Črnelskega brezna.

Tudi v vzorcih iz te jame je opazno, da se z globino delež karbonatnih zrn v primerjavi s kremenovimi in glinenimi minerali, močno poveča (sl. 4.3.8.).



Slika 4.3.8. Tudi v Črnelskem breznu narašča delež karbonatnih mineralov z globino.

4.3.6. Speleomorfološke značilnosti Renejevega brezna, kat. št. 7090

Vhod v Renejevo brezno leži na prehodu med Kaninskimi Podi in južnim pobočjem Kanina na nadmorski višini 2260 m ($y = 5380\ 710$, $x = 5135\ 760$). V jami si sledijo brezna in meandri, trenutno je jama izmerjena do globine 1238 m.

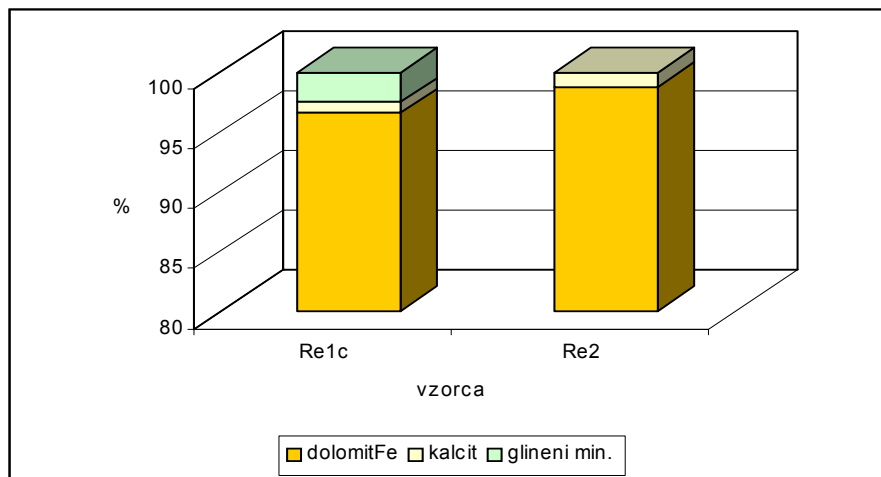
4.3.7. Vzorci iz Renejevega brezna in njihova mineralna sestava

Iz zadnje raziskovalne akcije DZRJL v Renejevem breznu mi je Franci Gabrovšek prinesel vzorce iz jame. Prvi vzorec *Re1c* s stene jamskega rova imenovane Mokavec (globina 650 m) je preperela kamnina. Drugi vzorec *Re2* (globina 750 m) iz sipin v dnu dvorane nad Tomovino pa je rjavkasti melj.

Vzorec *Re1c* so močno preperela zelo drobna karbonatna zrna. Barva suhega vzorca je bela 10YR 8/2. Vzorec sestavlja skoraj samo dolomit, ki vsebuje precej Fe, v sledih je prisoten calcit.

Vzorec **Re2** je drobnozrnat melj s posameznimi zrnji kremenca in glinenih mineralov (klorit), v katerem so prisotni posamezni večji rombični kristali dolomita. Barva suhega vzorca je zelo svetlorjava 10YR 8/3. V vzorcu prevladuje dolomit z visoko vsebnostjo Fe, zelo malo je glinenih mineralov. Kalcit je prisoten samo v sledovih; kremenca z metodo rentgenske difrakcije nisem našla, čeprav so posamezna zrna vidna pod mikroskopom.

Da je bil del Mg v dolomitu nadomeščen z Fe sklepam glede na položaj glavnega dolomitovega odboja, ki je zamaknjen proti ankeritovemu odboju. Mineralna sestava obeh vzorcev, določena z metodo rentgenske difrakcije, je prikazana na sl. 4.3.9..



Slika 4.3.9. Mineralna sestava, preperine s stene Mokavca - Re1c in melja iz sipin v dvorani nad Tomovino - Re2 v Renejevem breznu.

Dolomitu s precejšno vsebnostjo železa sem izračunala tudi stopnjo urejenosti kristalne rešetke (GOLDSMITH & GRAF 1958), ker me je zanimalo, kaj se dogaja z dolomitom med preperevanjem. V vzorcu preperlega dolomita **Re1c** je stopnja urejenosti 0,78; v naplavini dolomitnega melja **Re2** pa je stopnja urejenosti kristalne rešetke samo 0,54.

4.3.8. Diskusija in zaključki

Mineralna sestava klastičnih sedimentov, ki so po legi sodeč starejši, je drugačna od mineralne sestave drobnozrnatih klastičnih sedimentov, ki se v dnu brezen na Kaninskem pogorju danes nabirajo. V aktivnih brezni se recentni avtohtoni klastični sedimenti nabirajo v dnu kot blato in glina, pa tudi pesek. Stare horizontalne galerije sekajo mlajša aktivna brezna. Galerije nimajo nobene genetske povezave s sedanjim oblikovanjem jame, ker so nastale v popolnoma drugačnih razmerah (freatični nastanek) in so bile zapolnjene z sedimenti nekarbonatnega porekla. V teh, sedaj večinoma neaktivnih delih jam, najdemo alohtone pasovite peske in ilovice (MANCA 1998). Po mineralni sestavi, v glavnem kremen in glineni minerali, so drugačni od sedaj nastajajočih in kažejo na alohtoni izvor. Starejše sedimente voda ponekod spira in jih meša z recentno nastajajočimi karbonatnimi klastičnimi sedimenti. V teh primerih najdemo klastične sedimente z mešano mineralno sestavo (včasih tudi v več različnih časovnih obdobjih dodani karbonatni klasti).

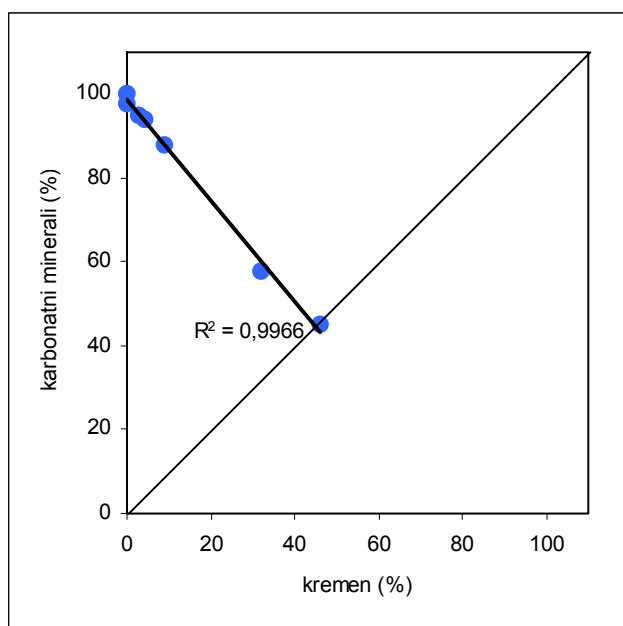
Delež karbonatnih klastov v klastičnih sedimentih z globino narašča, kar je posledica dejstva, da zraste delež materiala spranega s sten.

Dolomit se pojavi kot sestavni del šele v večjih globinah (sl. 4.3.10.), kar je zaradi lege dolomita v bazi dachsteinskega apnenca samoumevno. Glede na generalni vpad skladov proti JZ in odtekanje vode iz masiva (ČAR & JANEŽ 1992), je v globlje ležečih rovih možen tudi dotok delcev dolomita iz nekaj višje ležečih rovov in špranj v dolomitu ali dolomitiziranem

apnencu. Največji pa je delež dolomitnih klastov prav v najglobljih delih jam, kjer so rovi izoblikovani v dolomitu in voda delce kamnine spira s sten rofov.

GLOBI- NA	JAMA ČEHI 2				ČRNELSKO BREZNO				RENEJEVO BREZNO		
	kalcit %	dolomit %	kremen %	glineni m. %	kalcit %	dolomit %	kremen %	glineni m. %	kalcit %	dolomit %	glineni m. %
400	45	0	46	9							
650									1	97	2
700					40	18	32	10			
740	76	12	9	3							
750									1	99	
900	62	32	4	2							
1000					66	29	3	2			

Slika 4.3.10. Mineralna sestava klastičnih sedimentov na različnih globinah Jame Čehi 2, Črnelskega brezna in Renejevega brezna.



Slika 4.3.11. Primerjava izračunanih deležev kremenca in karbonatnih mineralov v vzorcih iz jam Kaninskega pogorja.

V vzorcih iz jame je lepo izraženo naraščanje deleža karbonatnih zrn v vezi s padanjem deleža kremenovih zrn (sl. 4.3.11.). Korelacija med njima je negativna, vendar zelo dobra (korelacijski koeficient je skoraj 1).

Mineralna sestava recentnih sedimentov in starejših ilovice kaže na dejstvo, da se spiranje jamski sten dogaja sedaj in enako tudi v preteklosti. Spiranje jamskih sten in morda tudi večjo mehansko erozijo površja bi lahko v posameznih časovnih obdobjih pospešila poledenitev.

Vprašanje nastanka visokogorskih meljastih sedimentov je preobsežno, da bi z nekaj analizami sedimentov razjasnila njihov nastanek. Kot enega od možnih nastankov na tem mestu samo navajam tudi spiranje drobnih karbonatnih klastov z jamskih sten.

V vzorcih iz Renejevega brezna mineralna sestava dokazuje neposredno nastajanje dolomitnega melja pri preperevanju stene rova, saj je mineralna sestava in struktura v obeh

vzorcih skoraj enaka. Količina, z spiranjem jamskih sten, nastalega dolomitnega melja je velika, saj se nabira v dnu dvorane nad Tomovino celo v sipine.

Karbonatni pesek in melj se nabirata v večjih količinah tudi v stopnjastih brezni Velike ledenice v Paradani (glej 7. poglavje).

4.4. Diskusija o izvoru avtohtonih karbonatnih klastov

Pri rentgenskih analizah klastičnih naplavin v izbranih jamah sem opazila povečan delež karbonatnih mineralov v jamskih naplavinah, ki imajo izvor v nekarbonatnem zaledju, posebno visok delež karbonatnih klastov pa je v sedimentih v dnu aktivnih brezen.

Karbonatni minerali v klastičnih jamskih naplavinah so zrna kalcita in dolomita, to je litoklasti apnenca in dolomita, ki so bili odtrgani s sten jamskih rovov. Drobna zrna, ki jih voda mehansko erodira s sten se nabirajo v obliki avtohtonega karbonatnega melja in gline na mestih, kjer vodi transportna sposobnost upade. Zanimivo je, da se zrna kljub svoji majhnosti ne raztopijo, saj se raztapljanje prej ustavi.

Nastajanje karbonatnih litoklastov in njihovo izpadanje iz jamskih sten je pogojeno s korozijsko in abrazijsko sposobnostjo vodnega toka ter strukturo kamnine. Učinkovitost raztapljanja kamnine je odvisna od hitrosti reakcije na površini kamnine, prenosa reaktantov in proizvodov raztapljanja, konverzije CO_2 z vodo - $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ (DREYBRODT 1988) ter litoloških lastnosti kamnine.

Mehansko delovanje vodnega toka na kamnino delimo na delovanje sile vode in na dolbenje z materialom, ki ga voda prenaša. V primerih, ki jih opisujem, ne gre za izbivanje delcev kamnine z lebdečim tovorom, na primer s kremenovimi zrnji (GAMS 1959a; NEWSON 1971a), ampak za trganje delcev s površine kamnine zaradi adhezije. Zaradi adhezije med vodo in steno (TRUDGILL 1985) trga hiter, vrtinčast vodni tok s stene manjše delce, ki jih osami korozija. Hitrost vodnega toka, ter procese kemijske in mehanske erozije na stenah jamskih rovov odražajo tudi skalne oblike (SLABE 1995) in različno hrapavost skalne površine na stenah jamskih rovov, ki pa niso bile predmet mojega preučevanja

Da so karbonatni delčki v klastičnih sedimentih res avtohtoni litoklasti mi nakazuje tudi mineralna sestava recentne naplavine v Renejevem breznu. V naplavini je v glavnem dolomit, ki se praviloma ne izloča kot jamski kemični sediment, dovolj ga je pa preperelga v stenah brezen pred dvorano z akumulirano naplavino. Hkrati pa s pojavom dolomita v naplavini ovržem tudi možnost, da so karbonatni melji ledeniški melj, ker na površju ni dolomita.

Da so karbonatni delčki v klastičnih sedimentih res avtohtoni litoklasti, bi lahko potrdil tudi z izotopskimi analizami ogljika v zrnih. V primerjavi z apnenci morskega nastanka so kemični jamski sedimenti namreč obogateni z lahkim izotopom ogljika (PEZDIČ 1999). Nižji delež lahkega izotopa ogljika pa bi potrjeval izvor klastov iz apnencev. Teh analiz pa nisem naredila, ker nisem imela na razpolago dovolj finančnih sredstev.

Povečanega deleža karbonatnih klastov v jamskih sedimentih ni opaziti v primeru, če jih vodni tok prenaša skozi velike kanale s prosto gladino in velike zalite kanale, kjer je pretakanje vode počasnejše. Pri transportu sedimentov skozi rove manjših dimenzij in v manjših zalitih rovih, kjer je vodni tok hitrejši in ta spira jamske stene, se delež karbonatov v jamskih naplavinah močno poveča. Največji pa je delež karbonatnih klastov, ko voda v slapovih ali curkih spira stene rovov. Najbolj je to izraženo v stopnjastih brezni, kjer voda po nalivih teče z veliko hitrostjo spira jamske stene.

Avtohtone karbonatne klastične sedimente v tu opisanih primerih tako sestavljajo delci matične kamnine, to je litoklasti, ki izvirajo iz preperelih sten jamskih rovov, od koder jih je

voda odtrgala. V nadaljevanju jih voda odloži v zatišnih delih. Lahko same, lahko pa pomešane z materialom, ki ga voda prinaša v jamo iz nekraškega zaledja.

Zaključim naj z odgovorom na prvo zastavljeno vprašanje iz uvodnega dela tega poglavja:

- karbonatni klasti se pojavljajo kot sestavni del klastičnih sedimentov predvsem v dnu aktivnih brezen, kjer stene spirajo vodni hitri vodni tokovi in v občasno zalitih jamskih rovih, kjer se voda pretaka dovolj hitro.

Najmočnejše je mehansko spiranje sten po nalivih in času taljenja snega, ko se hitrost vode v brezni poveča.

- Odgovor na drugo vprašanje, kakšna mora biti kamnina, da lahko voda njene delce mehansko odnaša skušam najti v naslednjih treh poglavjih.

5. OSTANKI NEPOPOLNEGA RAZTAPLJANJA KARBONATNIH KAMNIN V JAMSKIH ROVIH

5.1. Uvod

V tem poglavju podajam pregled ostankov nepopolnega raztapljanja karbonatnih kamnin, ki sem jih zabeležila pri terenskem delu. Proces se je ustavil, preden se je kamnina popolnoma raztopila. Ostanek raztapljanja tako niso netopne primesi, ki jih vsebujejo apnenci in dolomiti, ampak močno preperela matična kamnina.

- Z izrazom nepopolno raztapljanje tako opredeljujem pojav, ko se karbonatna kamnina ne raztopi popolnoma, ampak ostane na stenah rovov močno preperel del matične kamnine, zelo porozen in razbarvan ter izgleda kot kreda ali karbonatni melj.

Netopne ostanke preperevanja sem zanemarila predvsem zato, ker so tako apnenci kot dolomiti v izbranih primerih zelo čisti in je zato njihov delež zelo majhen. V splošnem so netopni ostanki karbonatnih kamnin tako v svetu kot pri nas (MARIĆ 1964; GREGORIČ 1969; FITZPATRICK 1984; KOČEVAR 1995; itd.) dokaj dobro raziskani, predvsem v povezavi z nastankom tal na karbonatnih kamninah.

5.2. Izbor vzorčnih jam

Karbonatne kamnine v Sloveniji predstavljajo 48 % njenega površja, večinoma so to apnenci različnih starosti, nekaj pa je tudi dolomitov, konglomeratov in breč.

Izbor vzorčnih jam sem prilagodila cilju, da ugotovim ali prihaja do enakega načina preperevanja v karbonatnih kamninah, ki so si različne po:

- sestavi,
- strukturi in
- starosti.

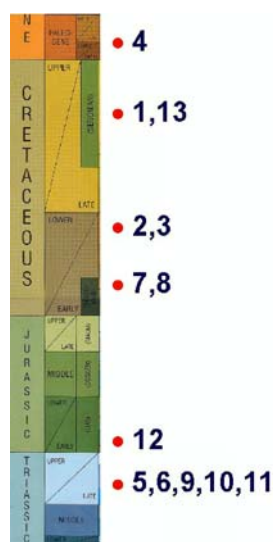
Na osnovi obravnavanih primerov sem skušala razložiti, kje in zakaj se nepopolno raztapljanje pojavlja in to glede na:

- lego v jami,
- na prisotno vlago,
- na stik s sedimentom,
- in tip (strukturo) kamnine.

Nekaj jam sem izbrala za podrobnejše raziskave, iz nekaterih sem vzela samo posamezne vzorce za analize, v nekateri pa sem način selektivnega in nepopolnega raztapljanja samo evidentirala in si jih skušala razložiti s pomočjo bolj raziskanih primerov.

Obdelala sem dele jamskih rovov iz Pečine v Borštu, Martinske jame, Krempljaka, Jame II na Prevali ter posamezne vzorce iz Turkove jame, Remergrunda II in Spodmola na Ždroclah. Načrte jam, merske podatke ter lege jam sem povzela po Jamskem katastru JZS in IZRK ZRC SAZU.

Obdelala sem posamezne vzorce, delno raztopljenih ali tudi samo načetih karbonatnih kamnin iz jam, ki so nastale v karbonatnih kamninah od triasa do terciarja (sl. 5.2.1.). Največ primerov je iz jam v krednih kamninah, v katerih je v Sloveniji največ jam (GOSPODARIČ 1986).



Slika 5.2.1. Starost matične kamnine v izbranih jamah: 1- Pečina v Borštu, 2- Martinska jama, 3- Krempljak, 4- Jama II na Prevali, 5- Turkova jama, 6- Remergrund II, 7- Spodmol na Ždroclah, 8- Polina peč, 9- Črnelsko brezno, 10- Jama Čehi 2, 11- Renejevo brezno, 12- Velika ledena jama v Paradani, 13- Jama pod Pečno rebrijo.

Posamezne dele jamskih rovov, ki sem jih podrobneje proučevala, je izmeril in narisal Franjo Drole s pomočjo sodelavcev na Inštitutu za raziskovanje krasa ZRC SAZU (slika 5.2.2.) in Jožeta Žumra.



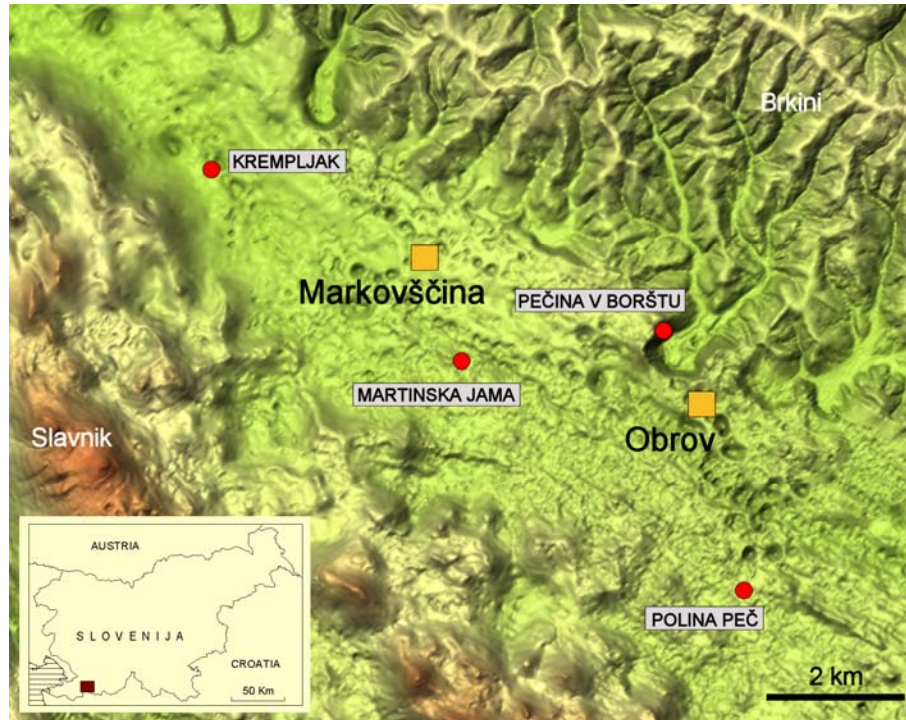
Slika 5.2.2. Deli posameznih jam so bili ponovno izmerjeni v raziskovalne namene; na sliki preperela stena v Martinski jami (foto J. Žumer).

Sodelavci so me opozorili še na mnogo drugih lokacij, kjer se pojavljajo debele ali tanke cone preperelih apnencev in dolomitov ter mi prinesli nekaj posameznih vzorcev. Franci Gabrovšek mi je prinesel vzorce iz Renejevega brezna in Andrej Mihevc iz Remergrunda II. Odločila pa sem se podrobneje obdelati le nekaj najprezentativnejših primerov.

Da bi ugotovila delež karbonatnih klastov v naplavinah, ki so v neposrednem stiku s preperelimi stenami jamskih rovov, sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala še nekaj posameznih vzorcev alohtonih peskov in ilovic z njihovega stika s preperelimi stenami. Iz

poznavanja njihove mineralne sestave sem ugotavljala možnost njihovega vpliva na preperevanje matične kamnine in ali vendarle vsebujejo njihov netopni ostanek.

Jame z najdebelejšimi conami preperelega apnenca se nahajajo v Matarskem podolju v JZ delu Slovenije (slika 5.2.3.). Matarsko podolje je območje kontaktnega krasa, kjer ponikalnice s fliša prinašajo velike količine naplavin v kras, ki s svojo prisotnostjo močno vplivajo na preperelost sten v tamkajšnjih jamah.



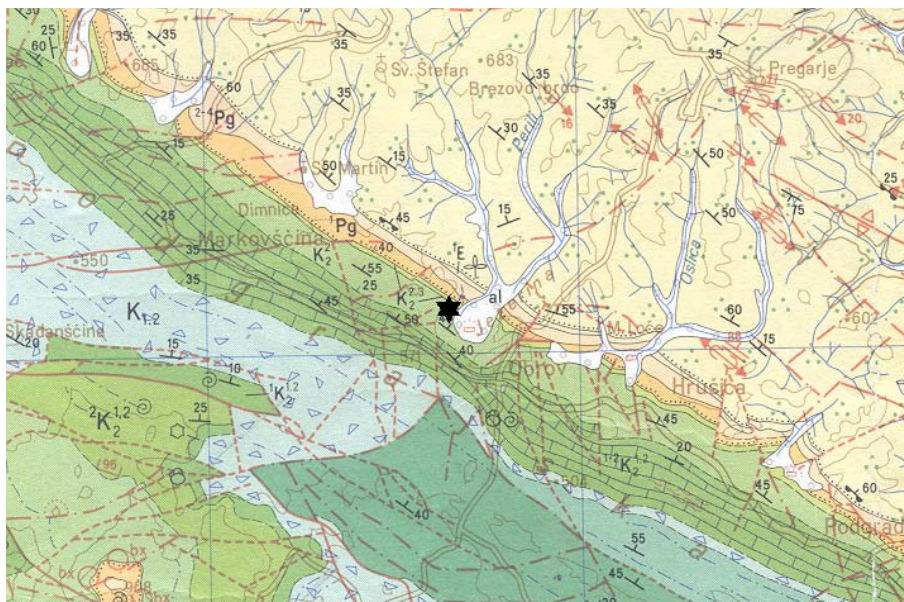
Slika 5.2.3. Lege preiskovanih jam v Matarskem podolju; JZ Slovenija. V teh jamah so na nekaterih stenah debele cone preperelega apnenca.

5.3. Pečina v Borštu, kat. št. 935

Pečino v Borštu sem izbrala za vzorčno jamo, ker je lahko pristopna in je v njenem končnem delu večja količina močno preperelega apnenca. Tudi stene v ostalih delih jame so preperete, vendar so večinoma zakrite s sigo.

5.3.1 Lega jame in geologija okolice

Jama Pečina v Borštu leži na zahodnem pobočju slepe doline Jezerine v Matarskem podolju na nadmorski višini 566 m ($y = 5428\ 460$, $x = 5045\ 715$). Slepa dolina je nastala na stiku med krednimi in paleogenskimi apnenci ter flišnimi kamninami (MIHEVC 1991a, 1994). V dnu doline ponikata dva potoka, ki pritečeta z Brkinov. V strugah obeh potokov je več ponorov, ki so aktivni glede na višino vode. V dnu doline je jama Ponikve v Jezerini, ki je občasen ponor enega od potokov, njeni nižji deli so večkrat na leto poplavljeni (SLABE 1992). Pečina v Borštu pa je okrog 100 m nad dnom slepe doline. V zahodnem pobočju slepe doline je tudi Mitjetova jama, ki leži nekoliko nižje kot Pečina v Borštu. V njej je bil z U/Th datacijsko metodo datiran začetek rasti kapnikov na podorih na več kot 16 000 let (MIHEVC 1999, 2001).



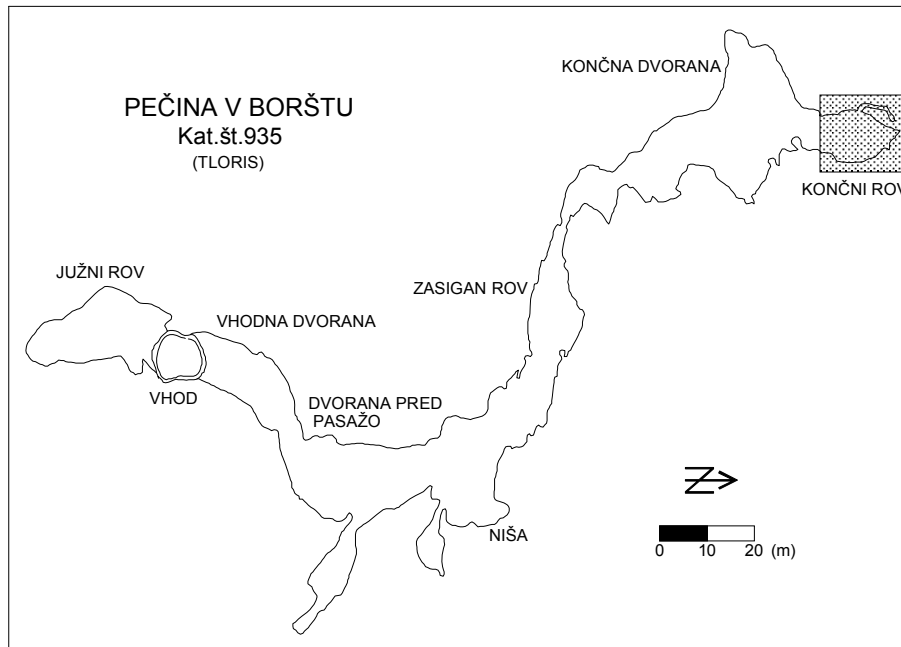
Slika 5.3.1. Označena lega vhoda v Pečino v Borštu in geološke razmere po OGK Ilirska Bistrica (iz ŠIKIĆ et al. 1972).

Vhod v jamo se odpira v zgornjekrednih apnencih K_2^2 , to so dobro plastoviti turonijski apnenci (sl. 5.3.1.). Po Osnovni geološki karti 1 : 100 000 (ŠIKIĆ et al. 1972) na stiku s flišnimi kamninami karbonatne kamnine strmo vpadajo proti SV.

5.3.2. Speleomorfološke značilnosti jame

Vhod je 5 m pod vrhom zahodnega pobočja Jezerine pod Bukovjem. Odprl se je s 5 m globokim udorom, s premerom 10 x 15 m. Jama je dolga okrog 250 m in leži v smeri S - J. Stene rovov so zelo zasigane, vendar posamezne oblike nakazujejo njen nastanek v freatičnih pogojih. V jami se na posameznih mestih najde ostanke peščene naplavine, ki kaže na obdobje intenzivnega zasipanja jame. Kasneje je voda naplavino spet sprala.

Za lažje razumevanje in opisovanje sem dele jame opisno poimenovala (sl. 5.3.2.). Krajši del jame, ki leži južno od vhoda sem poimenovala Južni rov, rov proti severu pa Severni rov. Od vhoda si proti severu sledijo Vhodna dvorana, Dvorana pred pasažo, Pasaža, Zasigani rov, Končna dvorana in Končni rov ter Odkopani rov. Odkopani rov je bil ves zapolnjen s peščeno naplavino, jamarji so izkopali okrog 15 m naplavine.



Slika 5.3.2. Tloris Pečine v Borštu, iz označenega Končnega rova je narejena povečava.

V jami ni tekoče vode, prenikajoča voda se po dežju nabira v ponvicah. Jama je precej suha, po dežju pa je v nekaterih delih Zasiganega rova lahko precej vlažna. Kaplja povsod in tudi ponvice v Končni dvorani so takrat napolnjene z vodo. Dva tedna po dežju v januarju so bile ponvice suhe, samo v Mali ponvici je bilo okrog 0,5 cm vode, na njej pa so plavale tanke skorje. Skorje so se izločile na površini vode, večje skorje, ki so že potonile, so bile obložene z drobnimi kristali kalcita.

Skorje se na gladine vode v ponvicah izločajo zaradi spremembe parcialnega tlaka CO_2 , v anglosaški literaturi jih imenujejo »rafts« - splavi (HILL & FORTI 1997). Ob istem obisku je rahlo kapljalo še iz cevčic v vsej jami.

Prvotne oblike freatičnega nastanka so vidne samo v manjši dvoranici ob vzhodni steni Dvorane pred pasažo, kjer ni veliko sige. Drugod so skoraj vse stene jamskega rova prekrte s tanko plastjo rdečerjave sige, jama pa je tudi sicer bogato zasigana. Da gre za staro jamo kažejo U/Th datacije, kapnik iz manjše dvoranice za pasažo je MIHEVC (1999, 2001) datiral na starost višjo od 200.000 let. V jami najdemo več generacij sige, kapniki so različnih oblik, nekateri so podrti, drugi nagnjeni, nekateri so prenehali rasti, drugim je razpoke zapolnila mlajša siga.

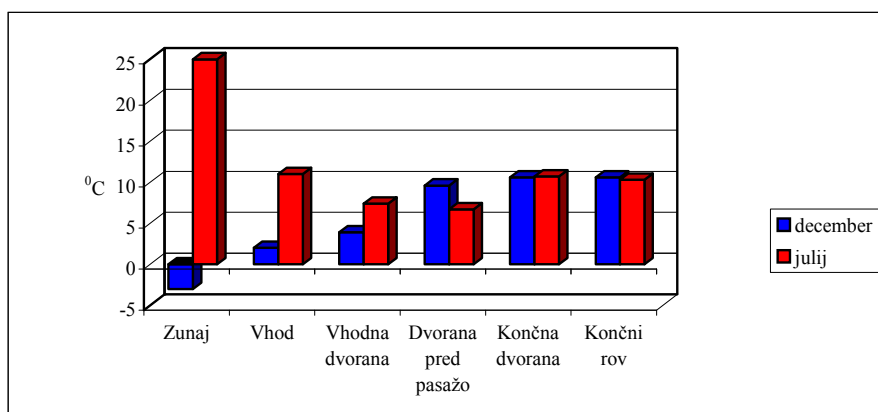
Brez sige sta samo del stropa in sten dvoranice v vzhodni steni Dvorane pred pasažo, ki jo imenujem Niša in del Končnega rova, pa nekaj manjših površin sten v Končni dvorani in Zasiganem rovu. Tam, kjer kamnina ni prekrita s sigo, kaže znake preperevanja. Površina stene je načeta in ponekod se je oblikoval nekaj milimetrov globok »boxwork«. Ponekod je na stenah jamskega rova »boxwork« opazen tudi skozi tanko skorjo sige, ki prekriva stene. V Končnem rovu najdemo lumakelo rudistnih školjk, katerih lupine štrlijo iz stene (sl. 5.3.3.). Kamnina je preperela nekaj centimetrov v globino in tudi školjčne lupine so delno preperle in mehke.



Slika 5.3.3. Preperele lupine rudistov na steni Končnega rova v jami Pečina v Borštu.

Fluvialne klastične sedimente najdemo v po jamskih tleh v Končnem rovu in v Odkopanem rovu, ki so ga tudi popolnoma zatrpali. Jamarji odstranjujejo peščen sediment z vmesnimi plastmi melja, da bi našli nadaljevanje jame. Ponekod v jami siga s svojo obliko in lego kaže na to, da je bila odložena čez naplavine, ki so bile pa kasneje odstranjenei.

Temperaturo sem v jami merila zato, da bi videla, ali se v Končnem rovu zazna možna povezava s površjem in ali v zimskem času v jamo vdira hladni zrak. V vhodnem delu jame temperatura niha glede na zunanjo temperaturo, vpliv površinskega zraka pa je pozimi čutiti do Pasaže. Konec decembra je bila na primer v Vhodni dvorani takoj pod stropom $T=3,9^{\circ}\text{C}$, v Dvorani pred pasažo $T=9,6^{\circ}\text{C}$, v Končni dvorani $T=10,4^{\circ}\text{C}$ in v Končnem rovu $T=10,4^{\circ}\text{C}$. Julija pa je bila v vhodnih delih jame drugačna situacija, saj je bilo v Dvorani pred pasažo precej bolj mrzlo. V diagramu (sl. 5.3.4.) so podatki o izmerjenih temperaturah konec decembra 1999 in v začetku julija 2000.



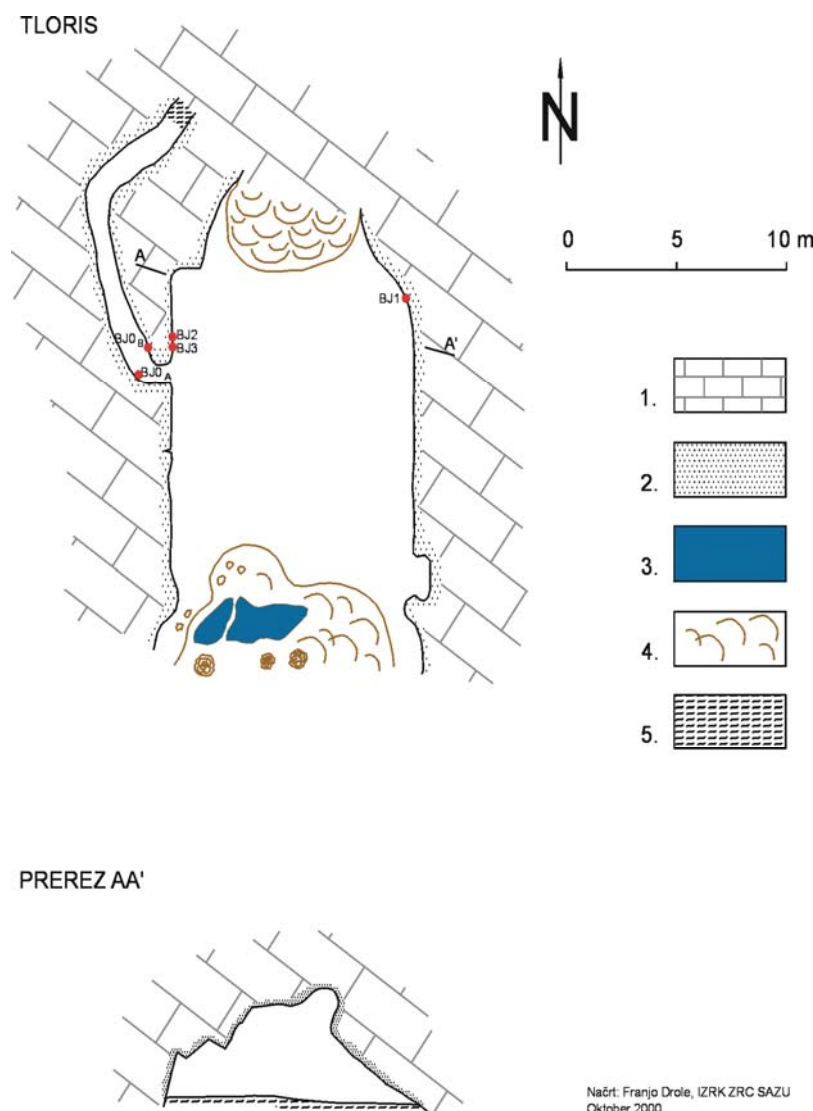
Slika 5.3.4. Temperature izmerjene v Pečini v Borštu, dne 30. 12. 1999 in 7. 7. 2000.

Iz primerjave temperatur, konec decembra in v začetku julija je razvidno, da je v Dvorani pred pasažo pozimi topleje kot poleti. To dvorano pozimi očitno segreva zrak iz jame, poleti pa je temperatura nižja zaradi cirkulacije zraka iz jame. Tudi temperatura v Niši,

v vzhodni stene Dvorane pred pasažo, je bila julija samo 7°C . Za Pasažo pa je temperatura celo leto konstantna in se giblje med $10,3$ in $10,6^{\circ}\text{C}$.

Z vdorom hladnega zraka v jamo se pojavi kondenzacija in s tem tudi kondenzna korozija. Vendar v Končni dvorani kondenza nisem opazila. V rovu je temperatura enaka tudi v zimskem času tako, da vlage na stropu in stenah Končnega rova ne moremo pripisovati kondenzaciji, temveč je posledica zamakanja prenikajoče vode. V Dvorani pred pasažo smo v januarju opazili veliko kondenznih kapljic vode in to takoj za zožitvijo pri prehodu iz Vhodne dvorane, pa tudi v manjši dvoranici ob vzhodni steni iste dvorane. Kondenza v ostalih delih jame ni bilo. Julija je bilo kondenznih kapljic manj in ponvice v Končni dvorani so bile suhe. Po dežju sredi julija je bila jama vlažna. Kapljalo je iz cevčic in Velika in Mala ponvica v Končni dvorani sta bili polni vode. Kondenznih kapljic v Dvorani pred pasažo je bilo malo. Temperatura je bila tu za skoraj 3°C nižja kot januarja.

5.3.3. Končni rov



Slika 5.3.5. Tloris Končnega rova s prerezom AA' v smeri V–Z in označeno lego vzorcev (BJ1, BJ2, BJ3, BJ0_A in BJ0_B). Legenda: 1 – apnenec, 2 – preperina, 3 – voda, 4 – siga, 5 – naplavina.

V Končnem rovu najdemo na stenah večje količine močno preperelega apnenca več centimetrov na globoko. Rov smo ponovno izmerili, narisali načrt in izrisali profil rova (sl. 5.3.5.).

Plasti apnenca v jami vpadajo proti SV. Na zahodni steni rova plast z odlomki rudistnih školjk in plast s stromatoliti strmo vpadata proti SV. V rovu pa so prisotne strukture, ki dajejo vtis navidezne plastnatosti, ta rahlo vpada proti JV. V stropu in stenah Končnega rova so lepo vidne razpoke v smeri S – J, tej razpoklinski coni v glavnem sledi tudi jama.

Ponekod so stene Končnega rova prekrivane z nekaj milimetrov debelo rdečerjavo skorjo. V začetnem delu stropa rova iz prenikajoče vode rastejo sive cevčice. Vse stene in strop Končnega rova so močno prepereli, sveže kamnine na površini sten ne najdemo (sl. 5.3.6.).

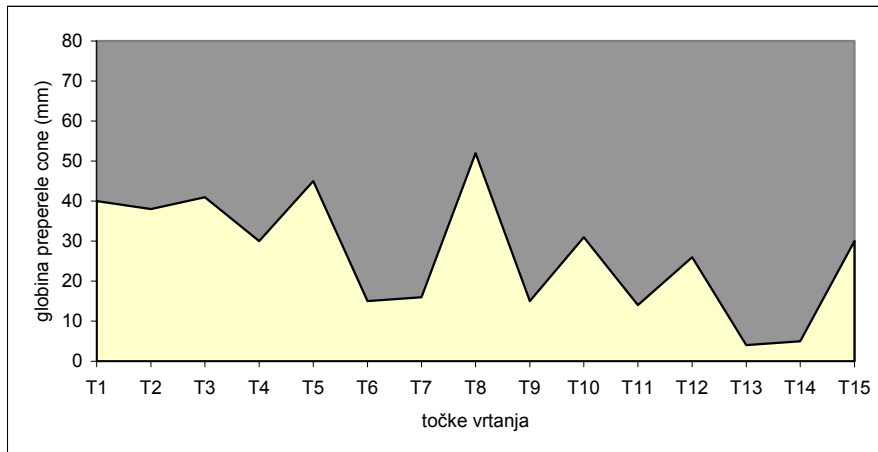


Slika 5.3.6. Preperele stene Končnega rova.

Kamnina zaradi preperevanja ni samo drugačne barve, ampak je zgornja plast močno porozna in je zelo mehka na otip ter v nižjih delih rova tudi precej vlažna. Ponekod sega mehki del preperele kamnine do 10 cm globoko. Sledi nekaj centimetrov trdne močno razbarvane in porozne kamnine, ki z globino postaja manj razbarvana in manj porozna. Z drugimi besedami najprej v svetlo sivo in nazadnje v sivo, manj preperele kamnino. Popolnoma sveže in nerazbarvane kamnine v Končnem rovu nisem dosegla, ker so stene rova tako enakomerne, da bi z jemanjem vzorca poškodovala površino stene (zglede stene).

Zanimalo me je, koliko se spreminja debelina preperele cone v steni jamskega rova. S predpostavko, da stik z naplavljenim sedimentom povzroča preperevanje apnenca bi pomenilo, bi bila stena rova preperele samo do določene višine (do višine naplavljenega peščenega sedimenta). V jami smo zato preperele cone merili v zahodni in vzhodni steni rova. Vrtanje smo končali na višini 4 m, saj više z aluminijasto lestvijo nismo segli. Vrtali smo z električnim vrtalnikom, svedra s premerom 6 mm, ki se je ustavil, kadar je prišel v stik z svežo kamnino. Grafični prikaz izmerjene debeline preperele cone v posameznih točkah na zahodni (sl. 5.3.7) in vzhodni steni (sl. 5.3.8.) kaže, da je debelina preperele cone neenakomerna.

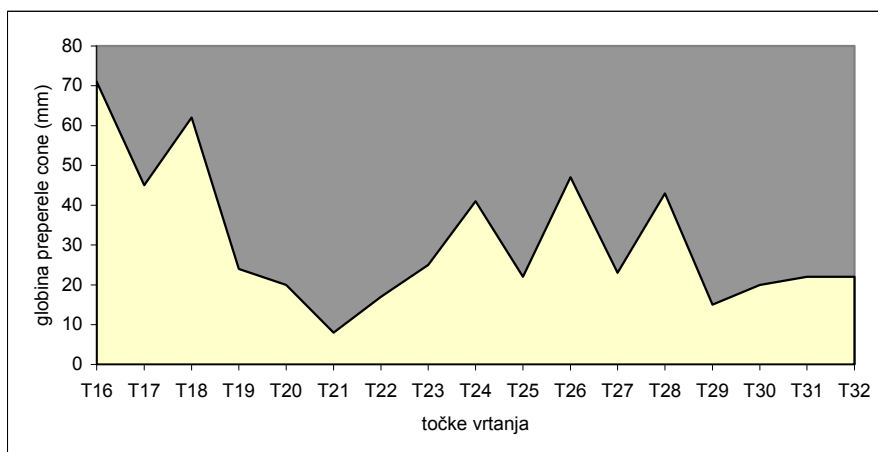
Na zahodni steni Končnega rova znaša globina preperele cone apnenca od 4 do 52 mm. Z vrtanjem smo začeli nad Odkopanim rovom, tako da je bila izvrtana točka T1 na višini 0,83 m. Če se je le dalo, so bile točke po horizontali oddaljene približno 30 cm. Od točke T1 do točke T5 preperele kamnino prekriva tanka skorja rdečerjave sige. Točki T6 in T7 sta brez skorje. V T8 se siga spet pojavi, nad to točko pa je ni več.



Slika 5.3.7. Globina preperlega apnenca (rumena barva) na zahodni steni Končnega rova.

Desno od Odkopanega rova je bila na višini 1,34 m (vzorec **BJ3**) navrtana globina preperle cone 47 mm, nekaj centimetrov stran pa 54 mm. Prepereli del apnenca je bil precej vlažen, najbolj v spodnjem delu stene, ki je še vedno v stiku s peščenim sedimentom.

Na vzhodni steni Končnega rova je globina preperle cone apnenca med 8 in 71 mm. Vrtati smo začeli na višini 0,2 m od tal. Površino stene med točkami T16 in T19 prekriva tanka plast sige, debela od 1 do 2 mm. Preperina je tu bila zelo suha, saj se je izpod svedra kar prašilo. Od T19 do T24 na površini stene ni izločene sige. Ob T25 iz razpoke v steni, mezi voda, tako da je razpoka zasigana. Tudi stena med točkama T27 in T28 je zasigana. Dalje proti stropu, do točke T32, je na površini videti preperelo kamnino, ki je na otip trda. V njej se vidijo večje ploskve sekundarnih kalcitnih kristalov, tako da je ta del preperine v bistvu povezan s kalcitnim cementom. Profil smo končali na višini 4 m.



Slika 5.3.8. Globina preperle cone apnenca (rumena barva) na vzhodni steni Končnega rova.

Preperela kamnina je v nekaterih delih stene jamskega rova precej vlažna. Še posebej po večjih padavinah v jesenskem in zimskem času, poleti pa je vlage v preperini precej manj (razen po dežju). Povišana vlažnost se obdrži čez vse leto samo v vznožju jamskih sten in v stiku z naplavljenim sedimentom.

Da bi dejansko ugotovila na oko precejšen delež vlage, sem desno od Odkopanega rova, v vznožju stene (tako nad sedimentom), vzela vzorec preperle kamnine **BJ3**. Še vlažnega sem stehala in ga nato posušila na sobni temperaturi. Takoj, ko je bil izpostavljen

sobnim pogojem, se je začel sušiti tako hitro, da mu je teža vidno padala. Po 7 dneh sušenja je vzorcu teža precej padla. Razlika v teži predstavlja vlago v kamnini. Delež vlage v mokrem vzorcu je bil precej visok, saj je znašal 23,97 %, kar je skoraj $\frac{1}{4}$ teže vzorca (sl. 5.3.9.). To pomeni, da je kamnina močno porozna in kadar je vlažna, tudi zelo mehka.

Vzorec BJ3	Teža vzorca (g)	%
Moker	25,2305	100
Zračno suh (7 dni)	19,1824	76,03
Razlika	6,0481	23,97

Slika 5.3.9. Delež vlage v preperem apnencu je visok, saj predstavlja skoraj $\frac{1}{4}$ teže mokrega vzorca.

5.3.4. Opis vzorcev

S sten Končnega rova sem vzorčevala na treh mestih:

- vzorec **BJ1** je del skalnega roglja, ki je štrlel iz spodnjega dela vzhodne stene Končnega rova,
- vzorec **BJ2** je del mehke preperine s stene nad vhodom v Odkopani rov, in
- vzorec **BJ3** je del zelo vlažne in mehke preperine s stene levo od vhoda v Odkopani rov.



Slika 5.3.10. Vzorec BJ1 na zahodni steni Končnega rova, njegova površina je luknjičasta. (Širina slike je 60 cm.)

V vzorcu **BJ1** kamnina prehaja iz trde v mehko, to je iz manj porozne v močno porozno. Ves vzorec je v primerjavi s svežo kamnino iz Končne dvorane že precej razbarvan. Razbarvanje je več ali manj enakomerno po vsem vzorcu, opazne so samo temnejše lise nepravilnih oblik proti notranjosti vzorca. Barva na sobni temperaturi posušenega vzorca je svetlo rožnatosiva (5YR 8/1). Načeta, delno razbarvana kamnina, je svetlosiva (N7), medtem, ko je barva sveže kamnine iz Končne dvorane srednjemetlosiva (N6). Po površini skalnega roglja so razporejene luknjice s premerom od 2 mm do 8 mm in globoke do največ 10 mm (sl. 5.3.10.). Kamnina je dokaj homogena, s posameznimi manj razbarvanimi »otoki« in drobnimi razpokami, ki prepedajo vzorec v več smereh. Skalni roglj je močno preperel do globine 2

cm. V spodnjem delu pa je vzorec preperel samo delno, opazna je le delna razbarvanost kamnine. Poroznost je večja v močnejše razbarvanih delih vzorca. Površina vzorca je prekrita z rjavo skorjo (10YR 7/4), v kateri ni prisotnih velikih kristalov.

Vzorec **BJ2** je s stene tik nad vhodom v Odkopani rov, na višini 1,8 m. Je del mehke preperine, površina je prekrita s tanko plastjo rdečkaste sige, ki je na nekaterih mestih že korodirana (sl. 5.3.11.).



Slika 5.3.11. Vzorec BJ2 je bil odvzet nad vhodom v Odkopani rov, kjer je preperina prekrita s tanko plastjo rdeče sige. (Višina slike je 60 cm.)

Vzorec **BJ3** je iz stene levo od vhoda v Odkopani rov, na višini 0,6 m. Je del zelo vlažne in mehke preperine v stiku s peščenim sedimentom. Barva vlažnega vzorca je rahlo sivkasto oranžna (10 YR 8/2), suhega pa bela (N9). Zaradi velike vlage sem lahko z lakmusovim papirjem v vzorcu izmerila pH, ki je bil 7,4.

Za primerjavo mineralne sestave preperile jamske stene in naplavljenih jamskih sedimentov sem vzela dva vzorca naplavine. Prvi je vzorec flišnega peska iz začetka Odkopanega rova (sl. 5.3.12.), z oznako **BJ0_A**, drugi vzorec je kepa peska iz vdolbine v močno prepereli steni Odkopanega rova, z oznako **BJ0_B**.

S sten Končnega rova sta bila vzeta še vzorca **BJm1** in **BJm2** za mikrobiološke raziskave.



Slika 5.3.12. Stik med drobnozrnato flišno naplavino in preperelo kamnino jamske stene v odkopanem rovu. Iz te naplavine sta vzorca z oznako $BJ0_A$ in $BJ0_B$.

5.3.5. Merjenje pH

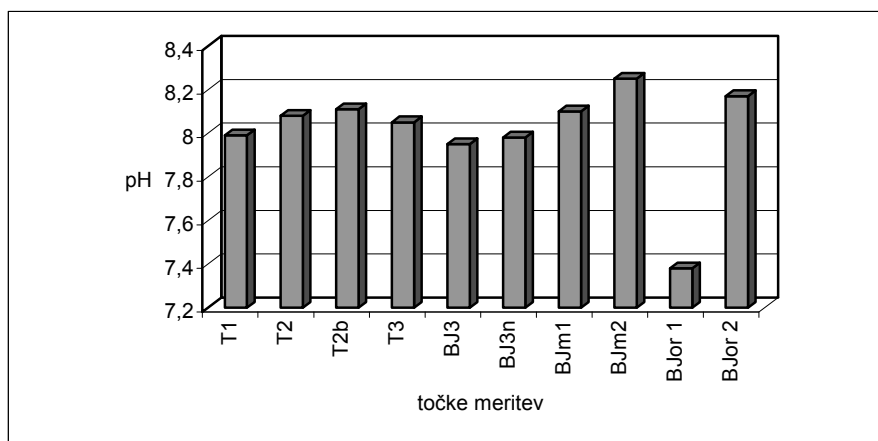
Meritve smo izvedli s pH-metrom znamke Testo 230, ki ima na elektrodi gelsko membrano Tip 03pH. Ta pH-meter uporabljajo v živilski industriji za merjenje vrednosti pH v mesu. pH-meter smo preizkusili za neposredno meritev aktivnega pH v prepereli vlažni kamnini in v vlažnem peščenem sedimentu, ki je v Odkopanem rovu v neposrednem stiku s preperelo steno jamskega rova. Poizkusne meritve so bile uspešne, zato smo se odločili za izvedbo meritev v prepereli kamnini, naplavini in v sigotvorni vodi.

V jami smo meritve pH izvedli sredi julija, pri $T=10,6^{\circ}\text{C}$, nekaj dni po deževju. Preperete stene Končnega rova so bile vlažne, vendar precej manj kot v januarju. V Končnem rovu smo štiri meritve (T1, T2, T2b - med T1 in T2, in T3) izvedli v izvrtinah, kjer smo prej merili debeline preperete cone.

Dve meritvi smo izvedli na mestu vzorca **BJ3**. Izmerili smo vrednosti pH na obeh mestih, kjer so bili vzeti vzorci za mikrobiološke raziskave (**BJm1** in **BJm2**). V Odkopanem rovu smo izmerili pH v preperini takoj za vhomom v rov, v neposrednem stiku kamnine in peščenega sedimenta.

Rezultate meritev pH v prepereli kamnini prikazuje sl. 5.3.13.. V glavnem so se vrednosti so v glavnem okrog 8. V vzorcu, kjer je bila prisotna še velika vlažnost, je bi pH = 7,38.

Vrednost vzorca, ki je bil vzet za ponovljene mikrobiološke raziskave, **BJm2**, je imel ob vzorčevanju pH = 8,25. Čez nekaj dni v laboratoriju, po dodatku destilirane vode pa je bil pH = 9,01. Mikrobiolog to razlaga z delovanjem bakterij, ki jih je v tej preperini kar precej vrst in so tudi številne. Razlika se je pojavila tudi pri merjenju pH v vzorcu **BJ3**. V ob tem merjenju je bila vrednost pH = 7,95. Januarja, ko je bil vzorec precej bolj premočen in sem v njem merila vlago, pa je bila vrednost pH = 7,4.



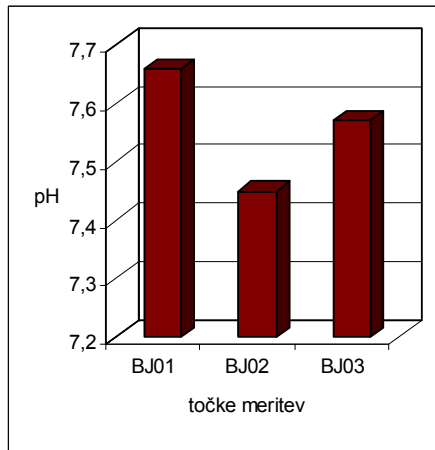
Slika 5.3.13. Vrednosti pH v prepereli kamnini.

Meritve pH v peščeni naplavini smo izvedli v Odkopanem rovu, kjer leži še »in situ« in je v stiku s preperelo steno rova (sl. 5.3.12. in sl. 5.3.14.). Površina preperle kamnine je relativno gladka in ni pokrita s sigo.



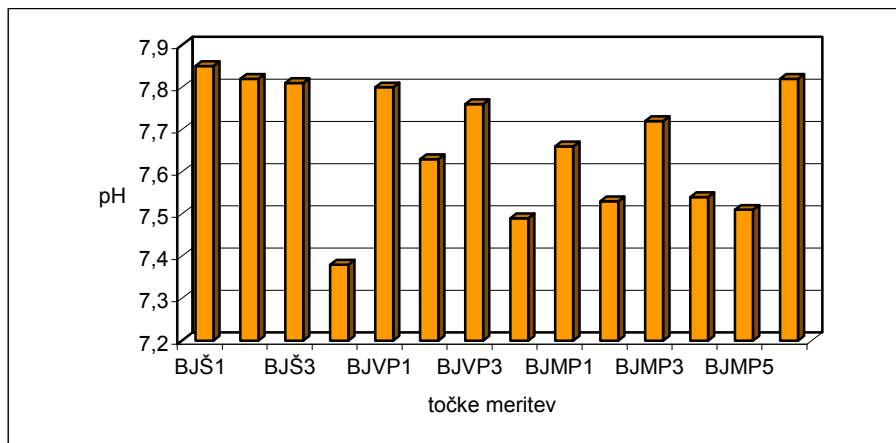
Slika 5.3.14. Stik med preperelo kamnino in peščeno naplavino v Odkopanem rovu, kjer smo merili pH.

Sediment (v točki BJ01) v stiku s preperelim apnencem (v točki BJOR1) je imel pH = 7,66. Sediment (v točki BJ02) v stiku s preperelim apnencem (v točki BJOR2) pa 7,45. Ilovica (v točki BJ03), med obema prejšnjima vzorcema in po legi pod njima, je imela pH = 7,57. Rezultati meritev pH v peščeni naplavini so na sl. 5.3.15..



Slika 5.3.15. Vrednosti pH v peščenem sedimentu (BJ01-3 so mesta meritev).

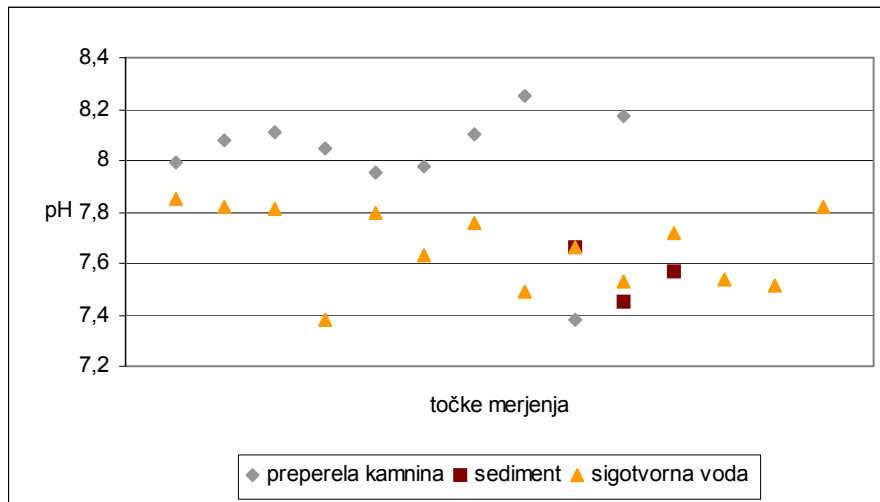
Za primerjavo smo izmerili še pH prenikajoče vode. Ulovili smo jo na koncu cevčic (kapniki BJŠ1, BJŠ2, BJŠ3 IN BJŠ4) in v dveh ponvicah v Končni dvorani, ki se napolnita po močnejšem deževju. V ponvicah se na površini izloča kalcit v obliki plavajočih skorij. V Veliki ponvici (točke meritev: BJVP1, BJVP2, BJVP3, BJVP4) in Mali ponvici (točke meritev: BJMP1, BJMP2, BJMP3, BJMP4) smo merili pH na površini, kjer so skorje in tam, kjer jih ni ter v dnu istih ponvic. Zadnji dve meritvi sta iz dna ob straneh Male ponvice, kjer se pretežke kalcitne ploščice že usedajo (točki meritev: BJMP5, BJMP6). Rezultati meritev prenikajoče vode in vode iz ponvic so na sl. 5.3.16..



Slika 5.3.16. Vrednosti pH v vodi, kjer se izloča siga. BJŠ- kapljice na koncu stalaktitov; BJVP- voda v Veliki ponvici; BJMP- voda v Mali ponvici.

Različne vrednosti pH v isti ponvici in na tako kratkih razdaljah kažejo na izločanje sige v vrhni plasti vode in na rahlo raztapljanje v dnu. V ponvicah ne pride do mešanja vode, ampak se v njih vzpostavijo plasti z različnimi koncentracijami H^+ ionov, voda se stratificira. To pomeni, da je difuzija zanemarljiva in da se plasti z različnimi koncentracijami raztopljenih ionov ne mešajo.

Primerjava vrednosti pH iz vlažne preperine, peščenega sedimenta in vode, kjer se izloča siga, je prikazana na sl. 5.3.17.. Primerljive so vrednosti za preperelo kamnino ter sediment, ker so bile merjene na stiku med njima, za vodo pa ne, ker ni bila merjena na istem mestu.



Slika 5.3.17. Primerjava izmerjenih vrednosti pH v prepereli kamnini, peščenem sedimentu in v vodi, kjer se izloča siga.

Meritve pH kažejo, da je voda (vlaga), v preperem delu kamnine prenasočena s kalcitom, saj vrednosti pH v prepereli kamnini, razen v enem vzorcu, presegajo vrednost pH = 8 in se zato, če je vode dovolj, siga tudi izloča (sl. 5.3.18.). Sigotvorna voda v istem delu jame ima vrednosti okrog pH = 7,8. Iz tega sklepam, da se raztapljanje apnenca v prepereli coni v trenutku meritev pH ni odvijalo. Izjema je v delu Odkopanega rova, kjer je imela površina preperelega apnenca v stiku z peščenim sedimentom vrednost pH = 7,38.



Slika 5.3.18. Vlažen del preperelega stropa je sivo obarvan; iz precejajoče vode se izločajo drobne bele cevčice in tanka plast bele sige.

5.3.7. Terenski zaključki

Tam, kjer stene rovov ne prekriva tanka skorja sige, je opazno preperevanje površine apnenca, to je stene rova. Ponekod je načeta samo površina, drugod je na debelo preperel. Stene in strop Končnega rova so močno prepereli. Preperele površine stene ne vidimo samo tam, kjer je ta prekrita s tanko plastjo rdečerrjave sige. Le ta je ponekod naknadno korodirana z agresivno vodo, ki polzi po steni, sl. 5.3.19..



Slika 5.3.19. Tanka plast sige, ki prekriva preperele stene rova je naknadno korodirana. Od blizu se skozi tanko skorjo sige vidi relief izstopajočih kalcitnih žil in luknjic.

Iz cevčic na stropu Končnega rova po dežju kaplja (sl. 5.3.18.). Strop nad njimi, ki je tudi preperel, pa je delno prekrit s plastjo bele ali sive sige. Na stropu in zgornjih delih rova je preperina cementirana, trda, iz nje se svetijo velike kristalne ploskve kalcita. V spodnjem delu rova so stene rova gladke po površini, vendar tudi na debelo preperele. Povečini je preperina v spodnjem delu rova vlažna, močnejše v zimskem času.



Slika 5.3.20. Preperele školjčne lupine so mehke in razbarvane; južna stena Končnega rova.

Zunanji del preperelega apnenca je zaradi povečane poroznosti izgubil tudi svojo primarno trdnost, zato je sedaj mehak. V globini, kjer je preperevanje kamnino samo načelo,

je opazna samo razbarvanost, ne pa povišana poroznost. Zato je kamnina še trdna. Močno prepereli deli so tudi precej vlažni, saj se v porah zadržuje voda, ki mezi po stenah rova. Zelo vlažna je predvsem mehka preperina na stiku s flišno naplavino v dnu rova. Višje je mehak, prepereli del apnenca manj vlažen.

V višjih delih Končnega rova, kjer je stena še bolj suha, so na površini preperete kamnine vidne različne sedimentne teksture, kot so na primer plast z izsušitvenimi porami ali plast z odlomki rudistnih školjk, ki so tudi preperete (sl. 5.3.20.) in zaradi tega mehke.

Mehanizma raztapljanja in izločanja se v jamah neprestano menjavata pri mejnih pogojih pH in nasičenosti. Vode na krasu imajo ponavadi vrednosti pH malo nad 8. V primeru, da je raztopina prenasočena glede na CaCO_3 , se ji zniža pH. Do razlik v na istem mestu preperete kamnine izmerjenih pH vrednostih je verjetno prišlo zaradi tega, ker v poletnem času v porah zastaja nasičena voda. Izdatnejše padavine jo lahko iztisnejo iz por in vanje lahko priteče sveža, agresivnejša voda, ki nadaljuje raztapljanje. Zato je bil pH v zimskem času, po daljših jesenskih padavinah, nižji za skoraj eno enoto. Ko sveža voda nasičeno iztisne iz por, se zaradi izhajanja CO_2 iz raztopine na stenah izloča sige. Stopnja vlažnosti in nasičenosti preperete kamnine na posameznem delu stene rova je odvisna od mikro-lokalnih dejavnikov:

- od načina stika vode in kamnine,
- časa stika,
- načina in hitrosti dotoka vode ter
- njene agresivnosti ali zasičenosti.

Povišanja agresivnosti vode, ki se pretaka med naplavljenim drobnozrnatim sedimentom in kamnino nisem mogla določiti. Drobnozrnat sediment očitno ohranja vlago v kamnini, saj je pri tleh, kjer je preperela kamnina v kontaktu z naplavino, precej bolj vlažna kot v višjih delih stene. Kamnina je v stiku s sedimentom močno preperela, njena površina pa je gladka. Na površini preperete kamnine na stiku med kamnino in naplavino ni nikjer izločene sige.

Pri preperovanju apnenca v Pečini v Borštu vsekakor ne gre za kondenzno korozijo. Ta namreč oblikuje površino sten jamskih rovov, kjer je prisotno kroženje hladnega in toplega zraka. Ponekod, vsaj v vhodnih delih jam tak način raztapljanja s kondenzno vodo verjetno deluje. Vendar sem v Končnem rovu izključila možnost nastajanja kondenza, ker ni:

- povezave s površjem in zaradi tega
- mešanja mrzlega in toplega zraka,
- temperatura je v rovu celo leto konstantna.

Voda, ki kaplja s stropa in polzi po stenah in vlaži preperelo kamnino na stenah je prenikajoča voda.

Za vlažnost sten in njihovo preperevanje je najpomembnejša v tem primeru prenikajoča (mezeča) voda, ki stene ciklično vlaži v odvisnosti od padavin. Ta razlaga izhaja iz dejstva, da je v jami in Končnem rovu zaznati povečano kapljanje ter tudi vlažnost jamskih sten po močnejšem deževju.

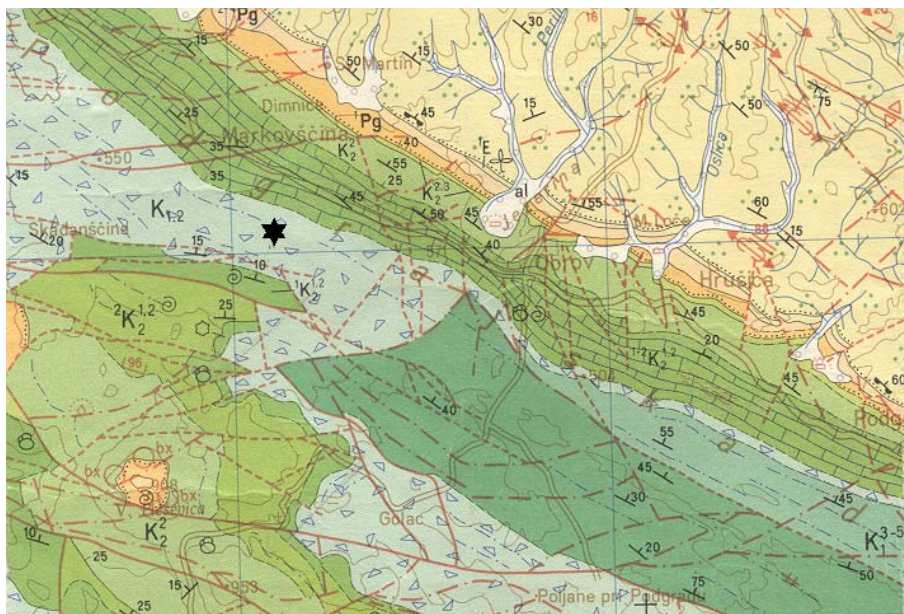
5.4. Martinska jama, kat. št. 2883

Martinsko jamo sem izbrala, ker so v njenem stranskem rovu, imenovanem Boeganov rov, skoraj vse stene jamskega rova na debelo preperle. Zato sem ta del jame tudi podrobneje obdelala.

5.4.1. Lega jame in geologija okolice

Martinska jama leži v Matarskem podolju južno od Markovščine na pobočju Velikega Mavrovca na nadmorski višini 565 m ($y = 5425\ 555$, $x = 5045\ 305$).

Jama je po Osnovni geološki karti, list Ilirska Bistrica (ŠIKIĆ et al. 1972), oblikovana v krednih $K_{1,2}$ apnencih in dolomitih (sl. 5.4.1.), ki generalno vpadajo proti S – SV pod kotom 20 do 30°.



Slika 5.4.1. Označena lega vhoda v Martinsko jamo in geološke razmere po OGK Ilirska Bistrica (iz ŠIKIĆ et al. 1972).

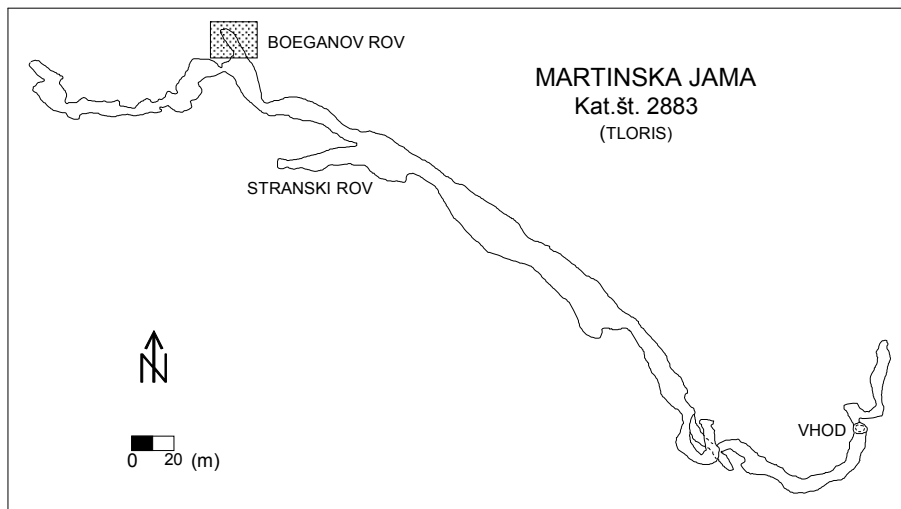
5.4.2. Speleomorfološke značilnosti jame

Vhod v jamo je udor na jugovzhodnem robu manjše udorne vrtače. Jama ima še dva navpična vhoda. Skupna dolžina jamskih rofov znaša 1004 m, skupna globina jame pa je 120 m. Tloris jame je na sliki 5.4.2..

Iz udora se jama nadaljuje v dveh smereh. Zahodni del se po nekaj deset metrih konča. Glavno nadaljevanje v vhodnem delu drži smeri S – J. Glavni rov se nato obrne v smer SZ – JV, zadnji del jame pa leži v smeri V - Z. Skoraj vsi rovi sledijo prelomnim conam in razpokam v dinarski smeri, SZ – JV.

Ob njih so nastale tudi podorne dvorane z velikimi podornimi bloki v dnu. Okrogel profil, ki nakazuje freatični nastanek rova, je viden samo med merskima točkama 42 in 43, ko zapustimo manjšo podorno dvorano in se spuščamo po rovu. Freatične oblike so v glavnem zabrisali podorni procesi in na nekaterih mestih so rovi tudi precej zasigani.

Preperelo kamnino sem našla na stenah rova med merskima točkama 37 in 38, to je na vzponu pred 20 metrsko stopnjo. Kamnina je v tem delu precej preperela, vendar je skoraj po celotnem obodu rova prekrita s tanko skorjo rdečkaste sige, ki je na nekaterih mestih že korodirana.



Slika 5.4.2. Tloris Martinske jame; iz označenega Boeganovega rova je narejena povečava.

V spodnjem delu južne stene sta po rdečkasti sigi izločena bel oprh in beli kalcitni kristali. Preperela je tudi kamnina na stenah stranskega rova, v smeri V – Z, ki vodi do drugega vhoda v jamo. Kamnina je razbarvana do nekaj centimetrov v globino, ni pa zelo porozna in zato tudi ni mehka na otip. Rov so nekoč naplavine zapolnile do stropa, saj najdemo po poličkah njihove ostanke. Na stropu so na nekaterih mestih vidne drobne anastomoze. Po celem stropu vijuga ožji stropni kanal, ki ga je voda oblikovala, ko je tekla po stiku med naplavino in kamnino. Za moje raziskave je bil najbolj zanimiv Boeganov rov, katerega stene so popolnoma preperle (sl. 5.4.3.).

5.4.3. Boeganov rov



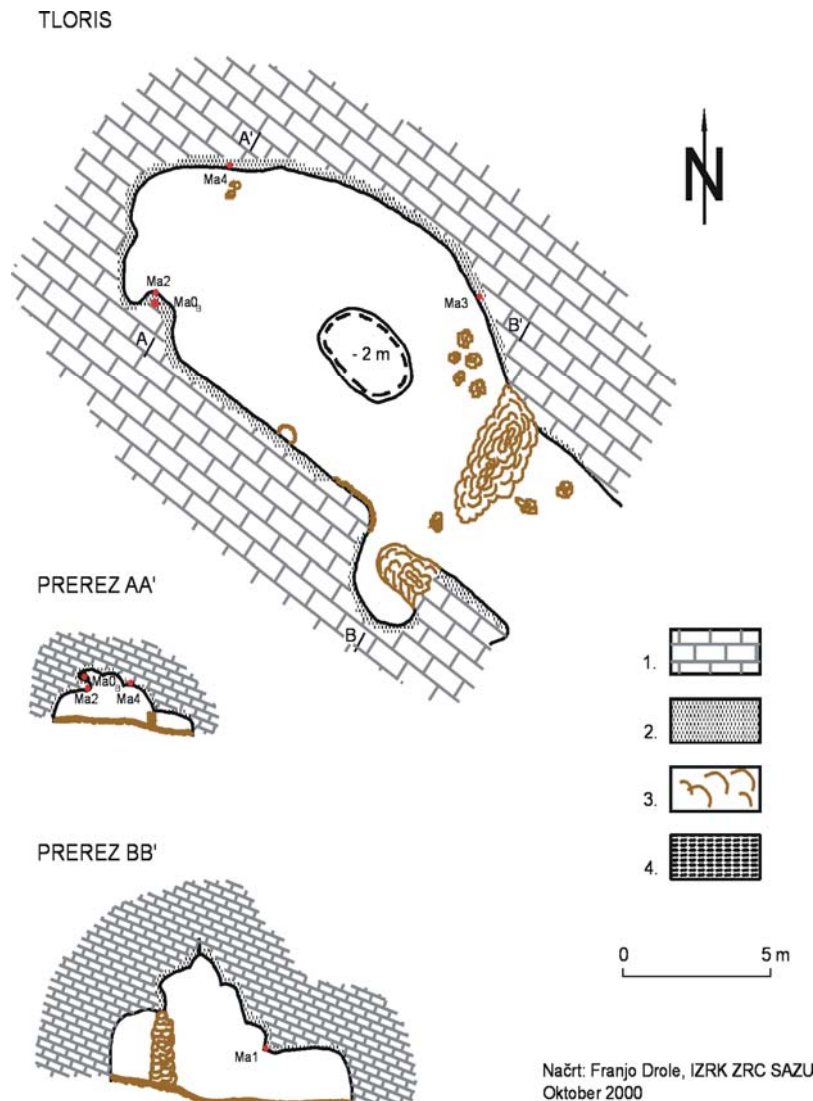
Slika 5.4.3. Preperle stene Boeganovega rova. Po tleh rova je pod skorjo sige debela plast peščene naplavine.

Boeganov rov leži približno 100 m pred koncem jame in je malo dvignjen nad dnom glavnega rova. Vhod, ki je v severni steni Zadnje dvorane je ozek in precej zasigan. Za

vhodom se odpre manjša dvoranica. Izmerjene letne temperature v rovu so bile v razponu od $T = 8,7^{\circ}\text{C}$ do $9,0^{\circ}\text{C}$.

Glede na ostanke naplavine v dnu rova, in na stenah po poličkah ob lezikah, lahko sklepamo, da je bil rov v nekem obdobju napolnjen s peščenim sedimentom, ki je bil kasneje odstranjen. V sredini rova je v sedimentu večji udor, zrnati sedimenti v dnu so prekriti s skorjami sige.

Rov smo ponovno izmerili, narisali načrt in izrisali profil rova (sl. 5.4.4.). Plasti v Boeganovem rovu vpadajo proti SV pod kotom 20° (vpad 30/20).



Slika 5.4.4. Tloris Boeganovega rova s prerezoma v smeri JV – SZ in označeno lego vzorcev (Ma_1 , Ma_2 , Ma_3 , Ma_4 in Ma_{0B}). AA' prerez na koncu rova, BB' prerez, kjer smo merili debelino preperine. Legenda: 1 – apnenec, 2 – preperina, 3 – siga, 4 – naplavina.

Rov je zaprt in odmaknjen, v njem ni čutiti prepaha. Proti koncu se močno zniža in konča zapolnjen s sedimenti. Izraziti so stilolitni šivi, ki jih je mnogo predvsem v zgornjih delih rova ter po stropu in stenah zadnjega dela.

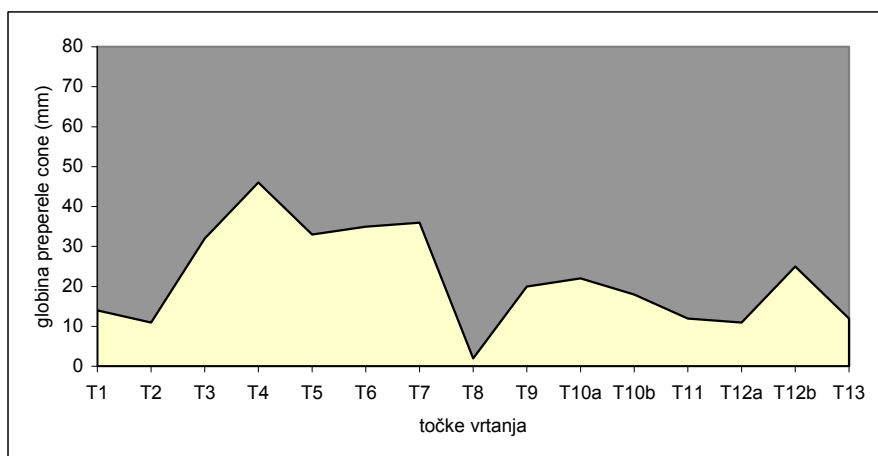
Siga se po stenah izloča predvsem iz vode, ki priteka po leziki, ki jo sledimo vzdolž celega rova. Posebno lepo je izražena v zahodni steni, kjer opazimo tudi rdeč stilolitni šiv. Lahko, da je lezika tudi tektonizirana. Zaradi preperelosti kamnine v celem rovu tega nisem mogla ugotoviti. Površina apnenca je pa preperela tudi ob njej v globino.

Pod to leziko se izloča siga v obliki skorje in kapnikov. Ob koncu rova je preperela kamnina nad najizrazitejšo leziko na nekaterih mestih sivo obarvana. Predvsem zato, ker je vlažnejša od okolice. Ponekod je njena površina rahlo otrdela, saj se je čez preperino izločila tanka plast sive sige iz prenikle kapljajoče in mezeče vode. Stiloliti in tudi kalcitne žile štrlijo iz preperle površine kamnine do nekaj mm, mreža žil tvori začetke »boxworka«.

Stene rova so preperle tudi kjer so prekrte s sigo. Zato smo se odločili izmeriti globino načete cone z vrtnjem v obodu rova (sl. 5.4.5.). Vrtali smo z električnim vrtalnikom, svedra s premerom 6 mm, ki se je ustavil, kadar je prišel v stik z svežo kamnino. Za preizkus metode smo najprej navrtali neposredno pred vzorcem *Mal*, kjer sem na njegovem odbitem delu na steni izmerila globino načete cone med 30 mm in 44 mm. Pri poskusu smo izvrtali 31 mm, tako da se je navrtana globina skladala z globino preperle cone (sl. 5.4.5.).



Slika 5.4.5. Mesto, kjer je bil na vzhodni steni Boeganovega rova vzet vzorec *Mal*; merjenje globine preperle cone z električnim vrtalnikom.



Slika 5.4.6. Globina preperle cone apnenca (rumena barva) v obodu Boeganovega rova.

Po potrditvi pravilnosti meritev smo navrtali luknje po izbranem profilu, ki je profilu BB' izrisan na sl. 5.4.4.. Grafični prikaz izmerjene debeline preperete cone v posameznih točkah kaže, da je njena debelina dokaj enakomerna (sl. 5.4.6.) Preperela cona je zelo tanka samo na mestu mlajšega odloma (T8).

Vrtati smo začeli na SV steni rova. Prva točka je bila zavrtana nad previsom, na višini 1,42 m, v bližini vzorca **Ma1** v vzhodni steni Boeganovega rova. Pod previsom je rov razširjen, stene pa so prekrite s sigo. Globina cone močno poroznega preperlega apnenca je po obodu rova znašala med 2 mm v točki T8, do 46 mm v T4. Vrh meritev je bil v stropu rova, na višini 3,70 m. V točki T10a, ki je na vrhu rova, je bilo zavrtano v belo preperino 3 cm desno od stilolitnega šiva. T10b pa je bila izvrtana poleg stilolitnega šiva, v sivo precej vlažno preperino. Razlika v globini preperete cone med točkama T10a in T10b je bila 4 mm.

Vrtanje smo z vrha rova nadaljevali v JZ steni, ki pa je v spodnjem delu prekrita z debelo plastjo sige. Zato so bile 4 točke izvrtane v zgornjem delu stene. Pod višino 2,4 m natančnost pri vrtanju ni bila več mogoča. Na vrh stene je bila izvrtana T11. T12a je bila izvrtana v sivo vlažno preperino, vendar bolj trdo, od bela in manj vlažne preperete kamnine v točki T12b. V sivih delih je preperina vlažna in iz vlage, ki prenika skozi jamski stop, se sedaj izloča siga, ki preperelo kamnino ponovno veže (cementira).

Sredi avgusta, dva tedna po padavinah, je bila preperela kamnina veliko vlažnejša kot konec aprila, ko padavin ni bilo precej dlje. Da bi ugotovila delež vlage, ki jo vsebuje zelo vlažna preperina, sem na SV steni rova, v njegovem stropu, vzela vzorec preperete kamnine **Ma4**. Še vlažnega sem stehala in ga nato posušila na sobni temperaturi 7 dni. Razlika, ki predstavlja vlago v kamnini, je znašala 39,79 % (sl. 5.4.7.). Delež vlage je v porozni kamnini odvisen od trenutne navlaženosti jamske stene, to je od količine padavin v zadnjem obdobju, lege na jamski steni in evaporacije.

Vzorec Ma4	Teža vzorca (g)	%
Moker	24,3712	100
Zračno suh (7 dni)	14,6948	60,21
Razlika	9,6764	39,79

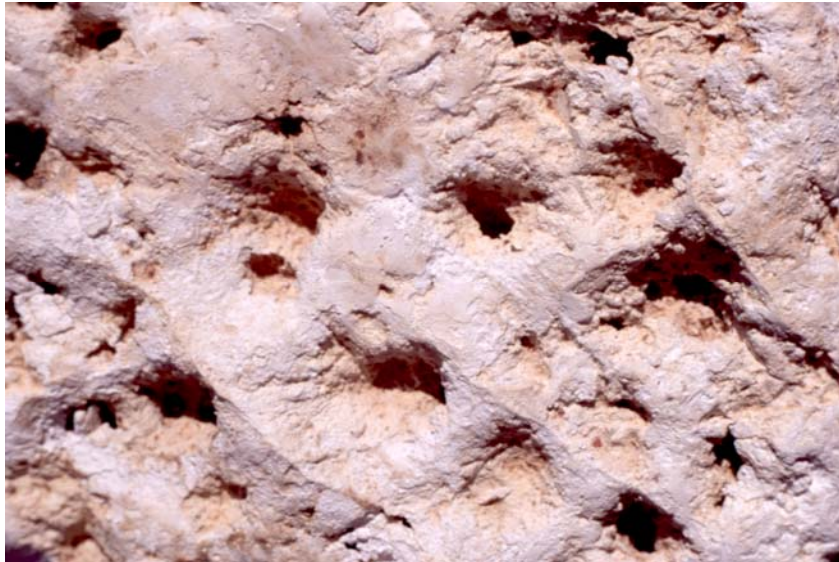
Slika 5.4.7. Delež vlage v preperelem apnencu je visok, saj predstavlja skoraj 40 % teže mokrega vzorca.

5.4.4. Opis vzorcev

S sten Boeganovega rova sem vzorčevala na štirih mestih:

- vzorec **Ma1** je skalna štrlina, ki je preperela z vseh strani iz vzhodne stene na višini 1,8 m,
- vzorec **Ma2** je del plasti na koncu rova, kjer pride plast omejena z močnim stilolitnim šivom v stik z jamsko naplavino,
- vzorec **Ma3** preperela kamnina na SV steni, v bližini vzorca **Ma1**,
- vzorec **Ma4** je preperina z SV stene rova.

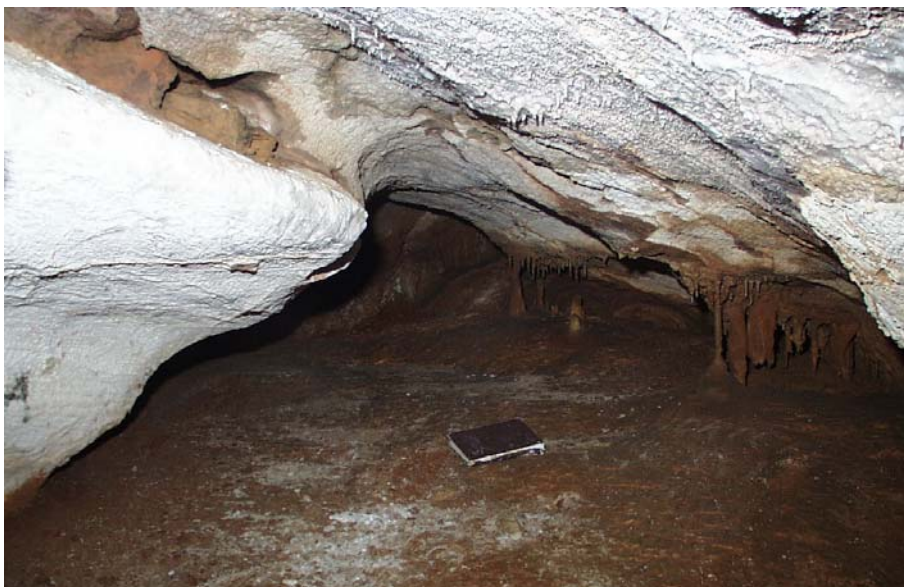
Vzorec **Ma1** je kos kamnine z od 30 mm do 44 mm debelim preperelim robom (sl. 5.4.5., sl. 5.4.9.). Na površini vzorca je mreža luknjic, vdolbinic, s premerom okrog 0,5 cm (sl. 5.4.8.). V sredini vzorca je z razpoko ločen manj preperel del. Proti robu pa je vzorec vedno bolj svetel in porozen (sl. 5.4.9.). Sveži apnenca, je srednjesisiv (N5), načeti in prepereli del sta bela z rožnatosivim odtenkom (5YR 8/1). Površina vzorca je mehka, močno porozna in luknjičasta, delno prekrita z rjavkasto skorjo.



Slika 5.4.8. Površina vzorca Ma1 je popolnoma preperela in luknjičava. (Širina izreza je 6 cm.)



Slika 5.4.9. Prerez vzorca Ma1; po močno preperelem obodu apnenca so razporejene do 2 cm globoke luknje s premerom okrog 0,5 cm.



Slika 5.4.10. Preperel apnenec v stiku z naplavino na koncu Boeganovega rova.

Vzorec **Ma2** je del preperete plasti pod naplavino, ki se je odlomil po stilolitnem šivu (sl. 5.4.11.). Mehki del plasti je debel od 8 mm do 80 mm. Razbarvan del kamnine pa je debel do 18 mm. Vzorec je v sredini dokaj svež, samo rahlo razbarvan, proti robu pa vedno bolj porozen. Izrazito močno preperel rob je debel do 20 mm. Sveži del kamnine je srednjesiv (N5), razbarvani del je zelosvetlosiva (N8) in prepereli del je bel z rožnatosivim odtenkom (5YR 8/1). Površina vzorca je gladka in brez sige, njegov zgornji je bil v neposrednem stiku z naplavino.



Slika 5.4.11. Vzorec Ma2 na zahodni steni Boeganovega rova; odlom je ob stilolitnem šivu pod najizrazitejšo leziko v rovu.



Slika 5.4.12. Začetki boxworka na stropu Boeganovega rova, preperete so tudi kalcitne žile; od tu je tudi vzorec Ma4.

Vzorec **Ma3** je iz spodnjega dela SV stene, kjer je apnenec tudi močno preperel. Sveži del vzorca je srednj svetlosive barve (N6), njegov prepereli rob pa je močno porozen in bele barve (N9), ponekod z rožnatosivim odtenkom (5YR 8/1). Vzorec **Ma4** je preperela zelo vlažna kamnina s SV stene v zaključnem delu Boeganovega rova. Na površini so izraženi začetki boxworka (sl. 5.4.12.). Barva posušene preperine je bela z rožnatosivim odtenkom.

Za primerjavo med mineralno sestavo preperle jamske stene in naplavljenega jamskega sedimenta sem vzela v jami dva vzorca naplavine. Prvi vzorec naplavine je iz stranskega rova pri merski točki 21. Vzorec **Ma0_A** je peščen sediment, ki se je ohranil v zgornjih delih stene rova. Drugi je vzorec naplavine, **Ma0_B**, iz poličke nad vzorcem kamnine **Ma2** (sl. 5.4.10.), kjer je naplavljen sediment v neposrednem stiku z močno preperelo steno Boeganovega rova. Tretji pa je vzorec **Ma0_C**, ki je glinen material iz lezike ob vzorcju **Ma2**.

5.4.5. Terenski zaključki

Stene Boeganovega rova vlaži prenikajoča voda in ne kondenzna voda, saj bi glede na mikroklimatske pogoje v tem rovu, kondenzno korozijo kot možni mehanizem preperevanja izključila.

Glede na prisotnost naplavljenih sedimentov v Boeganovem rovu in velikih debelin preperlega apnenca bi lahko sklepala, da sta naplavina in prepereli apnenec v tesni povezavi. Povezava je bolj verjetna zaradi zadrževanja vlage v kamnini pod sedimentom, kot pa zaradi neposrednega kemijskega delovanja naplavine. Vlaga, ki mezi skozi strop in iz lezike, moči stene in jih raztaplja, dokler je korozivna. Ko pa se vlaga v porah nasiti, se lahko začne izločati siga. Kamnina je preperela tudi v notranjost ob tektonizirani leziki, to je pod in nad ilovico, ki je bila odložena v leziki.

Prenikla voda mezi po stenah in jih raztaplja, v nekaterih delih pa se siga sedaj izloča. Dotok povečane količine vode se na stenah odraža v sivih vlažnih madežih in izločanju sige v obliki cevčic in palet ter cementiranih delov preperle kamnine (sl. 5.4.13.). V cementiranih delih preperle kamnine se zaradi v porah sekundarno izločenega kalcita poroznost preperine močno zniža.



Slika 5.4.13. Ob povečanem dotoku sigotvorne vode, se to na preperelih stenah odraža v obliki sivih vlažnih madežev, cementiranih delov in izločanja cevčic iz kapljajoče vode.

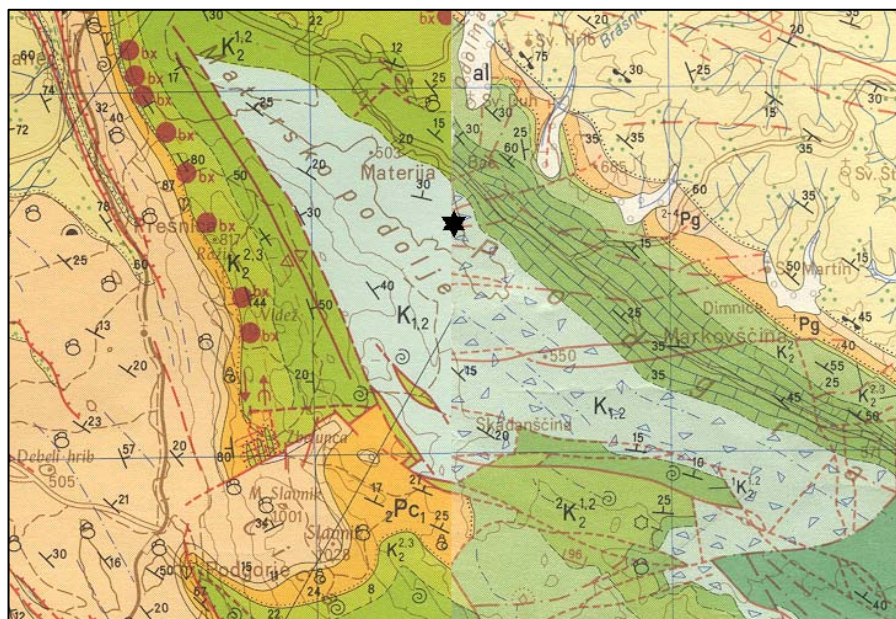
5.5. Krempljak, kat. št. 2718

Jama Krempljak je zanimiva, ker se v stropu Stranskega rova preperela kamnina pojavlja v obliki napolitank. Močno preperela kamnina je namreč ločena na več plasti s tankimi laminami sekundarnega kalcita, ki se je izločil po sekundarno razprti mikroplastovitosti v apnencu.

5.5.1. Lega jame in geologija okolice

Krempljak je jama v Matarskem podolju, jugozahodno pod Materijo pri vasi Polžane. Vhod v jamo je na nadmorski višini 492 m ($y = 5421\ 955$, $x = 5048\ 080$).

Po Osnovni geološki karti 1: 100 000 list Trst (PLENIČAR et al. 1969) in Ilirska Bistrica (ŠIKIĆ et al. 1972), je jama v prehodnih skladih med spodnjo in zgornjo kredo $K_{1,2}$, kjer se menjavajo dolomit, breča in apnenec. Plasti vpadajo proti SV pod kotom 20 do 30°.



Slika 5.5.1. Lega vhoda v jamo Krempljak in geološke razmere po OGK Trst in Ilirska Bistrica (iz PLENIČAR et al. 1969 in ŠIKIĆ et al. 1972).

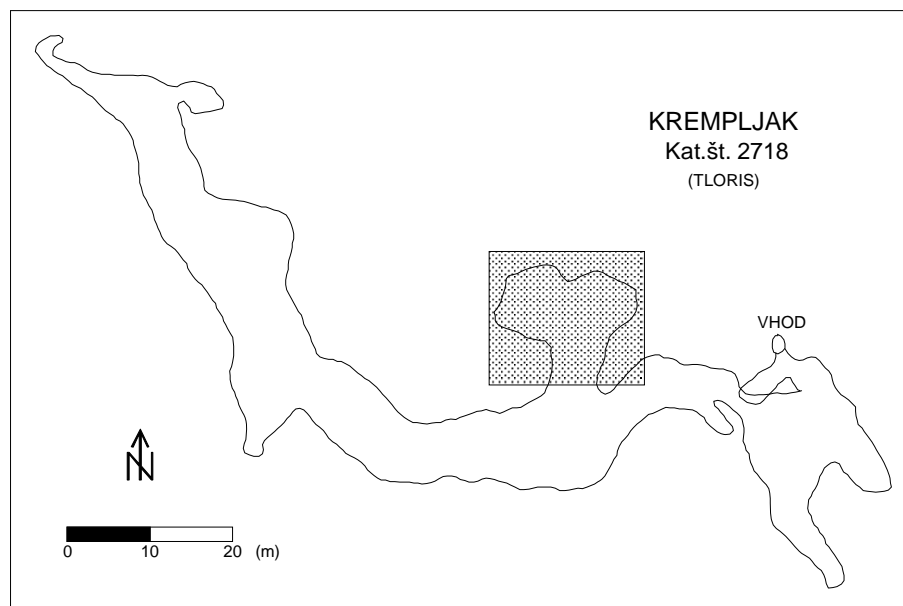
5.5.2. Speleomorfološke značilnosti jame

Skupna dolžina jamskih rogov je 290 m, skupna globina jame pa 47 m. Vhod v jamo je skozi razširitev ob prelomu. Vhodno brezno je globoko 3 m, nato se nadaljuje v strmo pobočje, ki se konča s 3 m globoko stopnjo.

V dnu vhodne dvorane je nasipni stožec, od koder se glavni rov nadaljuje proti zahodu čez sigovo kopo. Sledi podorna dvorana, kjer se proti vzhodu odcepi Stranski rov, glavni rov pa se nadaljuje proti zahodu. Po približno 50 m se glavni rov nadaljuje proti SZ in se strmo spusti po melišču, ki je že delno zasigano. Melišče sestavlja droben krioklastični grušč, ki v rov priteka izpod stropa, kar kaže na bližino površja. Po melišču je zrastle nekaj do 25 cm velikih stalagmitov. Čez grušč so podrti večji in manjši kamninski bloki, ki so se odtrgali z stropa ter sten rova.

Stene tega dela jame niso prvotne, ampak so vse preoblikovane z rušnimi procesi. Stene rova se v tem delu lomijo po plasteh in razpokah, kot da bi se kamnina krojila. Razpoke, ki krojijo kamnino, so tektonske in razbremenitvene, tako da se kamnina iz sten

izsuva zaradi napetosti v kamnini. Odlomljeni deli kamnine so veliki med 10 in 15 cm. V tem delu jame ni opaziti naplavljenih sedimentov, niti ni njihovih ostankov po stenah rova.



Slika 5.5.2. Tloris Krempljaka, iz označenega Stranskega rova je narejena povečava.

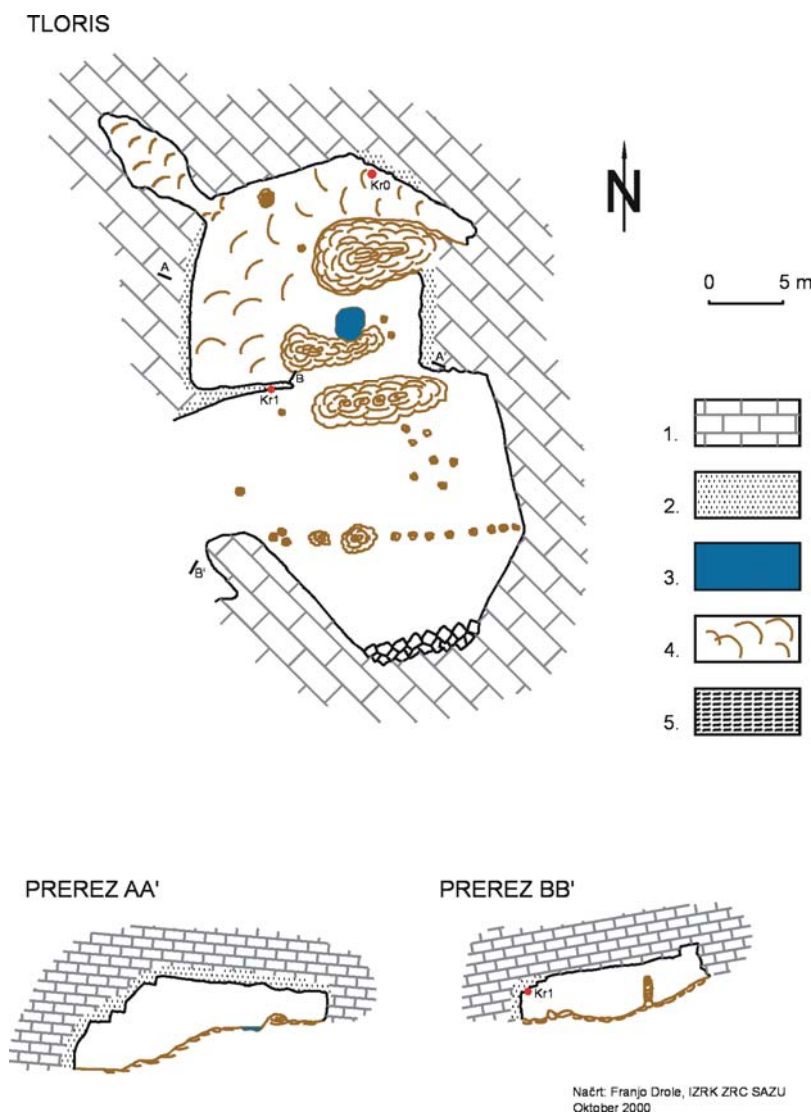
Jama je danes blizu površja. Zaradi podornih procesov, ki so preoblikovali prvotne oblike jamskih rogov, pa nisem našla dokazov o njenih prejšnjih stopnjah razvoja. ŠUŠTERŠIČ (1999b) povezuje genezo Krempljaka z Svidretovo pečino (kat. št. 3643), ki leži v neposredni bližini Matarskega dola. Ugotavlja tudi, da se brez podrobnejših raziskav nastanka podzemskih prostorov v tem področju ne more ugotoviti, ali so nastali zaradi izvotljevanja brkinskih ponikalnic ali pa so preostanek starejših hidrogeoloških razmer.

5.5.3. Stranski rova

Zame je zanimiv del jame, ki se od točke 19 v podorni dvorani spušča proti severu in sem ga imenovala Stranski rova. Rova je precej zasigan, izraziti so kapniški stebri in koralasta siga. Konec julija leta 2000 je bila temperatura v tem delu jame $8,8^{\circ}\text{C}$. Ponvice v srednjem delu rova so bile napolnjene s kapljajočo vodo, medtem ko so bile konec maja, ki je bil zelo suh, brez vode. Rova smo ponovno izmerili, narisali načrt in izrisali profil rova (sl. 5.5.3.).

Stene Stranskega rova so vse preperle, razen tam, kjer jih prekriva siga in, kjer je strop sveže odlomljen. Strop rova sledi eni sami plasti, katere spodnji del je pravzaprav njegov strop (sl. 5.5.4.). Plast se pod kotom 20° spušča proti SV (vpad 45/20). Kjer ravni strop sekajo razpoke, mezi voda in se izloča siga. Siga ima obliko skorje, ki zapolnjuje razpoke in je debela do 10 cm, ali pa se pojavljajo v obliki kapniških stebrov, ki sledijo razpokam čez ves rova.

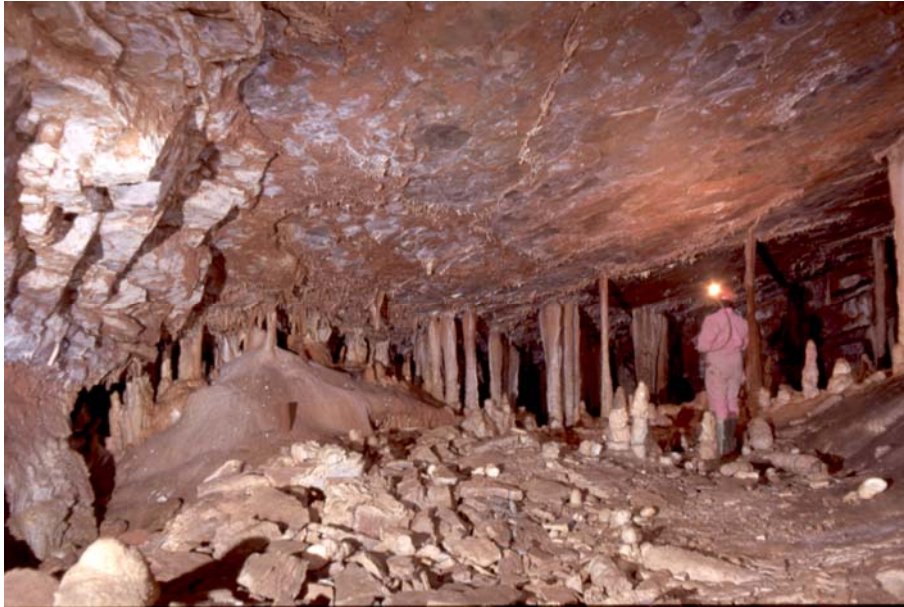
Zaradi neprestanega odlamljanja tankih pol po vzporedni mikro-plastovitosti, ki si po debelini plasti sledi na približno 0,5 cm in manj, je strop rova večji del svež. Laminiranost je verjetno pogojena s sedimentološkimi lastnostmi apnenca. Lamine so razprte zaradi tektonskih deformacij ali razbremenitev v kamnini.



Slika 5.5.3. Tloris Stranskega rova z označeno lego vzorcev (Kr1 in Kr0) in prerezoma v smeri SZ - JV in SV - JZ. Strop rova in odlomi sledijo lezikam. Legenda: 1 – apnenec, 2 – preperina, 3 – voda, 4 - siga, 5 – naplavina.

Voda, ki zateka med lamine, jih ploskovno širi (odpira), tako da spodnjo lamino vleče navzdol in prihaja do neprestanih odlomov tankih plasti s stropa. Obenem pa odlome pospešujejo (pogojujejo) tudi kristali kalcita, ki ponekod rastejo v teh razprtih plasteh in jih dodatno razširjajo. Z raztezanjem (odmikanjem lamin) zaradi rasti kristalov se v apnencu dodatno povečujejo nestabilnost, ki se zaradi tega lomi po plasteh (laminah). Na tleh je opaziti tudi večje količine sige, skorje s stalaktiti, ki so se odtrgale s stropa skupaj s tanko plastjo apnenca.

Jugozahodno steno rova predstavlja gladka tektonska ploskev, ki pod kotom 80° vpada proti jugozahodu (vpad $210/80$). Po nekaj metrih, zaradi podora, ki se tu izsuje v rov, zavije proti severu. Severna stena začetnega dela Stranskega rova se po nekaj metrih konča. V steni rova so lepo izražene različno debele plasti, ki jih seka močnejša razpoklinska cona v smeri SV – JZ. Rov se od tu nadaljuje proti severu, obenem pa se nadaljuje tudi proti vzhodu.



Slika 5.5.4. Raven strop in stene Stranskega rova so preperete, razen predelov, kjer je kamnina sveže odlomljena.

V tem delu gradijo steno tanko plastoviti temnosivi apnenci, ki so po površini močno prepereli. Stene in strop so v tem delu rova prepereli, do okrog 2 centimetra na globoko, od tu je vzorec **KrI**. Zanimivo je, da je apnenec in s tem stena rova na otip trdna. Zunanji rob je bel, nato pa prehaja preko več svetlosivih odtenkov v temno, svežo kamnino. Nekaj predvsem tanjših plasti je zaradi mlajših odlomov, ki so pogojeni s plastnatostjo in razpoklinsko cono v smeri SV-JZ, obarvanih sivo. Tam, kjer se stena rova ni odlomila, je pod skorjo rdečerjave sige mehka preperina.

V vzhodnem nadaljevanju rova je veliko kapnikov in sige, vendar je vmes najti tudi dele stene, ki jih siga ne prekriva. V dvoranici za kapniki sem opazila zanimivo strukturo preperlega apnenca, kakršne nisem videla v nobeni drugi jami. Strop rova je v tem delu vzporeden z glavno leziko. V stropu rova, med polami kalcita izločenega v razprtih laminah po mikroplastovitosti apnenca (na 0,5 cm in manj), najdemo popolnoma preperelo kamnino (sl. 5.5.5.). Ponekod so pole ovira za raztapljanje in preperevanje v globino. Apnenec je med kalcitnimi polami preperel v več različnih stopnjah. Debeli kristali kalcita v večini primerov niso načeti in ne prepereli ter v večini primerov preprečujejo nadaljnje raztapljanje v globino. Kjer pa je kalcitna pola odpadla ali bila raztopljena, zaradi večjega dotoka agresivne vode skozi prečne razpoke, je apnenec načet ali celo močno preperel tudi v globino.

Preperela cona na površini stropa je v tem delu rova, mehka in na mestih, kjer je preperela kamnina odnešena prepredena s kanali (žlebiči?). Preperina je tu bolj ali manj suha. Prepereli površini v notranjost sledi tanka pola kalcita, ki je gladka in trda, torej nepreperela. V globino sledi plast preperle mehke kamnine, ki je lahko precej vlažna. Tej prepereli plasti kamnine sledi nova pola kalcita in nato plast delno preperle kamnine, ki je samo razbarvana. Lahko pa se plast s preperelo vlažno kamnino ponovi. Preperle plasti in pole kalcita si tako sledijo kot vafli v napolitankah v globino kamninske mase.



Slika 5.5.5. Kamnina je preperela med trdnimi kalcitnimi polami, ki so pogojene z mikroplastovitostjo kamnine.

V vogalih iste dvoranice je preperela kamnina ponovno cementirana (sl. 5.5.6.). Na otip je trda in iz nje odsevajo velike kristalne ploskve kalcita. Torej je dotekajoča prenikla voda tukaj sigotvorna. Ponekod rastejo iz teh delov tudi drobne cevčice.



Slika 5.5.6. Preperela kamnina je mestoma spet cementirana, siva področja.

Iz dvorane na koncu Stranskega rova se manjši rov spusti proti severozahodu in se dvigne naprej proti severovzhodu v dvoranico pod stropom. Dvoranica je zanimiva, ker ima močno preperel strop. V njem je izrazita mreža globokih razpok, ki so korozijsko razširjene.

Po dvoranici rastejo kapniki in skorje. Zanimivo je, da je del rdečkaste skorje in nekaj stalaktitov močno korodiranih, kot bi bili načeti s kislino. Dno dvoranice je prekrito s plastovito ilovico, ki je v drugih delih jame nisem opazila. Del ilovice je prekrit s sigo in je zato ostala na mestu. Plasti apnenca, na katerih leži naplavina, so preperele. Njihova površina na stiku z naplavino je gladka in ni prekrita s skorjo sige.

5.5.4. Opis vzorcev

V Stranskem rovu sem vzorčevala samo na enem mestu:

- vzorec **Kr1** je del preperele plasti s stene v začetnem delu rova.



Slika 5.5.7. Na severni steni v začetnem delu Stranskega rova je mesto odvzema vzorca *Kr1*.

Steno ob vzorcu in vzorec apnenca **Kr1** prekriva tanka skorja rdečkaste sige, ki je mestoma korodirana tako, da se vidi preperela površina (sl. 5.5.7.). Vzorec ima bel (N9) močno porozen rob, ki je širok od 0,5 cm do 2 cm. V notranjost vzorca sledijo cone obarvane z različnimi odtenki sive barve (različna stopnja preperelosti), od N7 in N6 do N4, ki je barva svežega dela vzorca. Vzorec je zanimiv predvsem zaradi tega, ker je na enem koncu počen in zamaknjen po razpoki za 5 mm, kar se izraža tudi v zamiku preperelih con. To pomeni, da je bila kamnina preperela, še preden je počila. Razpoka je zapolnjena z rdečkasto drobnozrnato sigo in večjimi kalcitnimi kristali. Prepereli rob apnenca je suh in trden.

Za primerjavo med mineralno sestavo preperele matične kamnine in zrnate naplavine, sem vzela tudi njen vzorec, **Kr0**. Plastovita, že rahlo vezana ilovica se nahaja v dvoranici na koncu Stranskega rova.

5.5.5. Terenski zaključki

Kamnina je v Krempljaku najbolj preperela v Stranskem rovu, kjer so rušni procesi precej manj izraziti kot v glavnem rovu. V glavnem rovu se strop in stene neprestano rušijo, tako da za sabo na mestih odloma puščajo svežo kamnino. V Stranskem rovu prenikajoča voda izloča sigove tvorbe (sl. 5.5.8.), kalcit pa se izloča tudi med razprtimi laminami, ki so v kamnini razporejene po mikroplastovitosti. Izločanje kristalov kalcita povzroča krojenje plasti po tej plastovitosti in neprestane odlome jamskega stropa. Prenikajoča vlaga se zadržuje v teh »mikrolezikah« kot po stenah rovov in povzroča preperevanje. Kljub temu, da sem na koncu

Stranskega rova našla naplavljene sedimente, ki so bili v stiku s preperelo kamnino, nimam dokazov, da bi bil v preteklosti ves rov zapolnjen s sedimenti in da bi na preperevanje apnenca odločilno vplivala prisotnost naplavine; vendar je po vsej verjetnosti bil. Kondenzacijo vode in posledično kondenzno korozijo v Stranskem rovu Krempljaka lahko kot dejavnik preperevanja izključim.



Slika 5.5.8. Preperele stene Stranskega rova so delno prekrite z rdečo sigo. Novo rastoča siga v osrednjem delu stene je sive barve.

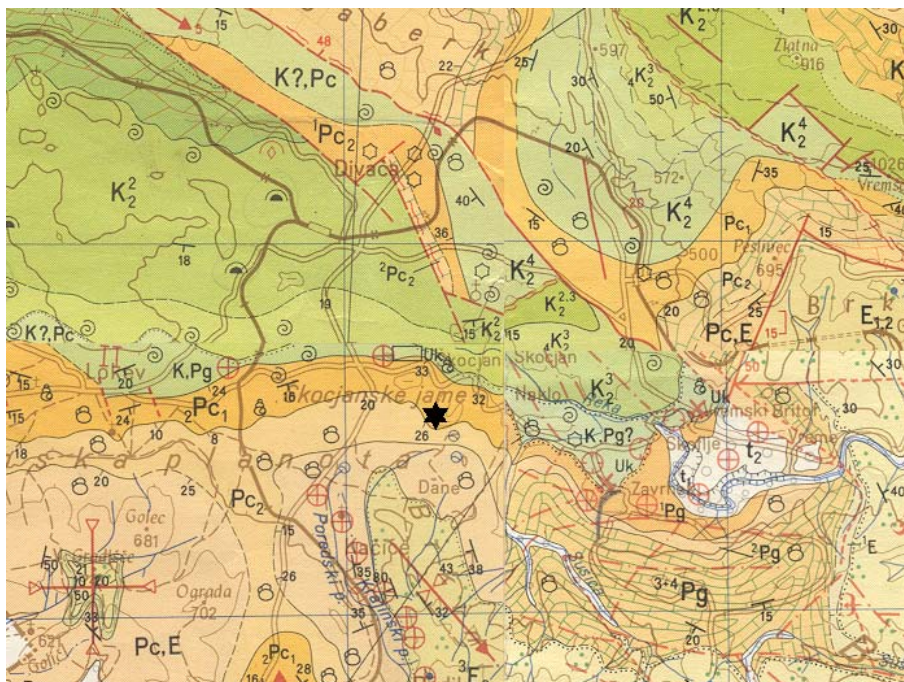
5.6. Jama II na Prevali, kat. št. 1095

V Jami II na Prevali sem se prvič srečala s preperelo kamnino na jamski steni. Stena v začetku manjšega rova v južnem delu jame je preprejena s sledovi živalskih zob. Izdolbeni so v mehko kamnino, za katero najprej nisem vedela, ali je rezultat izločanja sekundarnih mineralov ali preperevanja matične kamnine.

5.6.1 Lega jame in geologija okolice

Jama II na Prevali je znana kot arheološko najdišče z imenom Mušja jama. Vhod v jamo leži na Prevalu južno od doline Sokolak pri Škocjanskih jamah, na nadmorski višini 467 m ($y = 5421\ 155$, $x = 5057\ 590$).

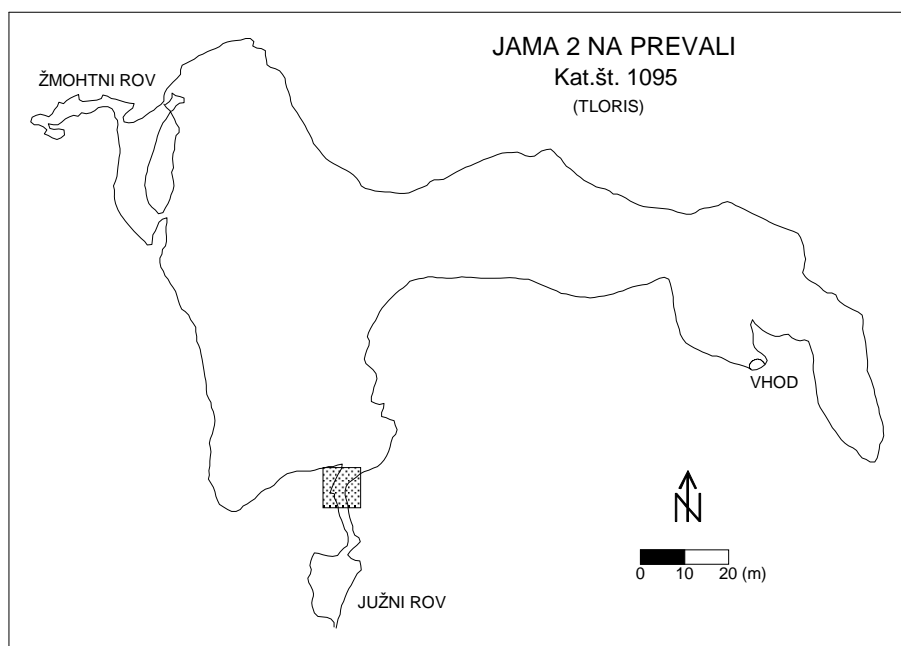
Po formacijski karti južnega dela Tržaško-komenske planote (JURKOVŠK et al. 1996) območje gradita Slivski in Alveolinsko-numulitni apnenec. Po GOSPODARIČU (1983) in OGK, list Trst (PLENIČAR et al. 1969), leži jama v paleocenskih apnencih (sl. 5.6.1.). Teren med Prevalom (474 m) in cesto Kozina – Divača ter vhomom v jamo pa gradijo miliolidni in alveolinsko-numulitni apnenci srednjega in zgornjega paleocena. Apnenci so skladnati in debelo masivni. Plasti na površju vpadajo proti JZ (223/30).



Slika 5.6.1. Lega Jame II na Prevali in geološka razmere po OGK Trst, Ilirska Bistrica, Gorica in Postojna (iz PLENIČAR et al. 1969, ŠIKIĆ et al. 1972; BUSER et al. 1968 in BUSER et al. 1967).

5.6.2 Speleomorfološke značilnosti jame

Vhod v jamo je na meji med Pc_1 in Pc_2 apnencem, jama pa je v glavnem izoblikovana v Pc_2 apnencih (GOSPODARIČ 1983). Vhod je zvonasto brezno, globoko 45 m. V dnu je večja dvorana z nasipnim stožcem iz kosov apnenca, ki v veliki meri kažejo na korozijsko preoblikovanje pod prstjo. V jamo so prišli, ker so jih ljudje vanjo zmetali pri čiščenju pašnikov v okolici (MIHEVC 1998). Za vhodno dvorano se jama nadaljuje z rovom v smeri V - Z, ki se nato razširi v veliko dvorano, ki ima smer S – J. Iz dvorane se cepi nekaj manjših rofov. Skupna dolžina vseh rofov znaša več kot 200 m, globina pa 90 m (sl. 5.6.2.).



Slika 5.6.2. Tloris Jame II na Prevali, iz označenega dela Južnega rova je narejena povečava.

Glavna dvorana je po tleh prekrita s sigo in podornim kamenjem, ki je ponekod pomešano z ilovico. V južnem delu dvorane se ob prelomu v prečno dinarski smeri odpira vhod v krajši rov, ki sem ga zaradi lažjega opisovanja poimenovala Južni rov. Do vhoda v rov se vzpnemo čez nekaj metrsko stopnjo, pod katero je manjše brezno.

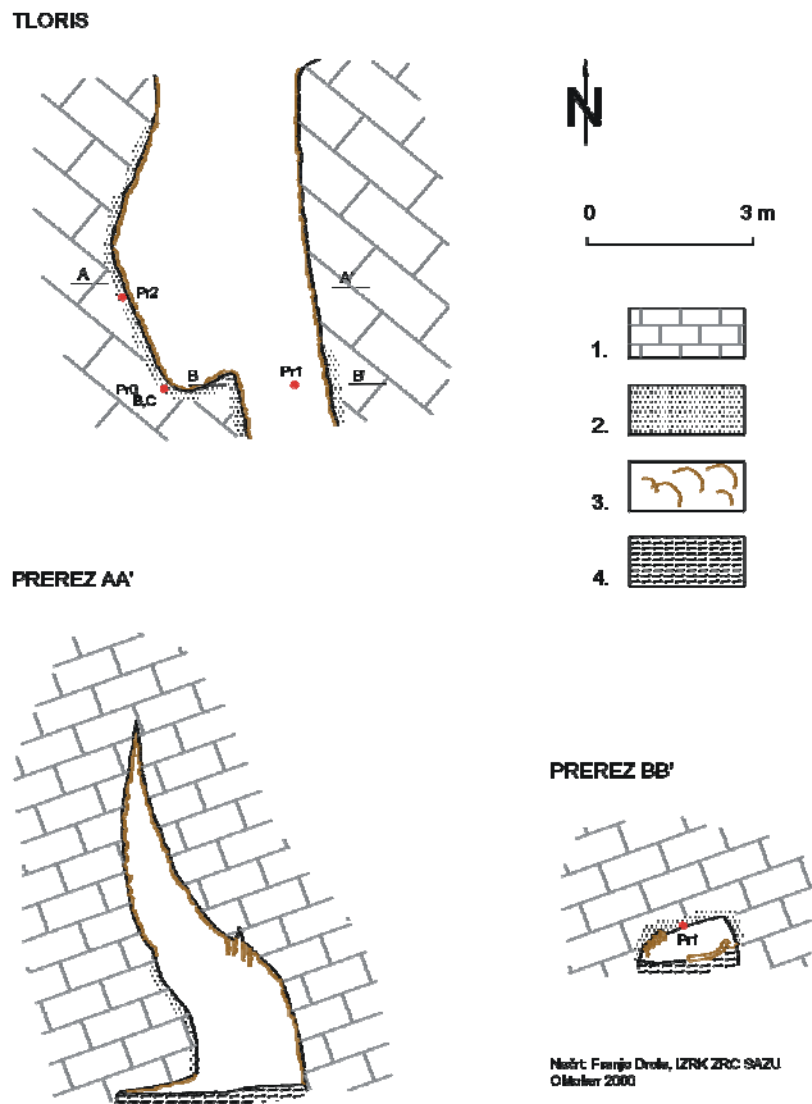
5.6.3. Južni rov



Slika 5.6.3. Preperela stena vhodnega dela Južnega rova.

Južni rov se začne ob razpoki v smeri S – J in se nadaljuje skozi več metrsko ožino. Rov se konča v manjši dvoranici, katere dno je prekrito z nasipom grušča. Na sredini pobočja nasipa, je v grušču manjša depresija. Nastala z raztapljanjem grušča pod močnejšim curkom prenikajoče vode. Vhodi del Južnega rova smo ponovno izmerili, narisali načrt in profil rova (sl. 5.6.4.).

Apnenec je v tem delu jame debelo skladovit in ima vpad 220/20. Zahodna stena začetka Južnega rova in začetni del ožine, sta močno preperela (sl. 5.6.3.). Kamnina na steni rova je bele barve in večinoma precej mehka.



Slika 5.6.4. Tloris vhodnega dela Južnega rova z označeno lego vzorcev (Pr1, Pr2, Pr0_B in Pr0_C) in prerezoma v smeri V–Z. AA' prerez čez rov ob tektonski ploskvi, BB' prerez čez vhod v pasažo. Legenda: 1 – apnenec, 2 – preperina, 3 – siga, 4 – naplavina.

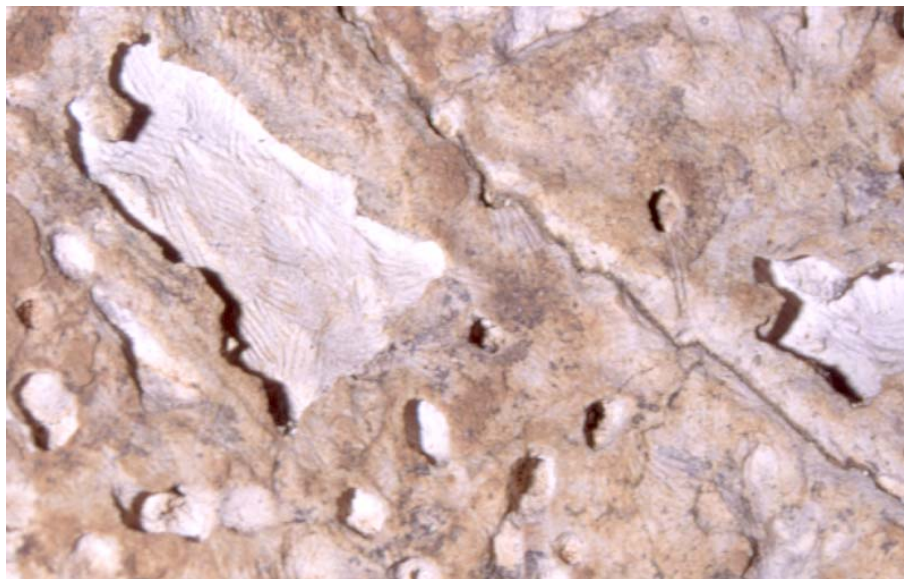
Precejšen del stene je prekrit s plastjo rdečerjave sige, vmes pa so izjedene površine, ki so posledica dolbenja z zobmi (sl. 5.6.5.). Izjede so sodeč po njihovi legi, nastale v več časovnih obdobjih. Tiste, ki so bližje površini, so že bolj suhe in rumenkasto obarvane. Druge, ki so globlje, zaradi bele barve delujejo bolj sveže in zato mlajše (sl. 5.6.6.).

Belo obarvane dele stene s sledovi glodanja živali v jami je MIHEVC (1996b) opredeli kot rezultat raztapljanja s kondenzno korozijo, ki je načela površino paleocenskih apnencev in jih prekrila s patino. Razjedanje skalne površine z kondenzno korozijo pogojuje z obliko površine skale, kjer je vezivo med posameznimi zrni odstranjeno, zaradi česa je kamnina tudi izgubila del svoje mehanske trdnosti. V steni ga je predvsem zanimala oblika in nastanek izjednosti skalne površine. V vdolbinicah stene rova se pojavljajo vzporedni žlebovi, ki so nedvomno sledovi zob manjših sesalcev. Ostankov kamnine na tleh ni opazil. Zato predvideva, da so živali kamnino pojedle. Na osnovi enakega načina izjedene skalne površine

iz Kevdrca pod Raskovcem (kat. št. 654) in Dolarjeve jame pri Kališah (kat. št. 201) predvideva, da so kamnino najverjetneje izglodali polhi. Tako naj bi vzrok za pojavljanje izdolbenih zaplat v kamnini ne bile razlike v sedimentoloških lastnostih kamnine, čeprav podrobnejših analiz ni naredil.



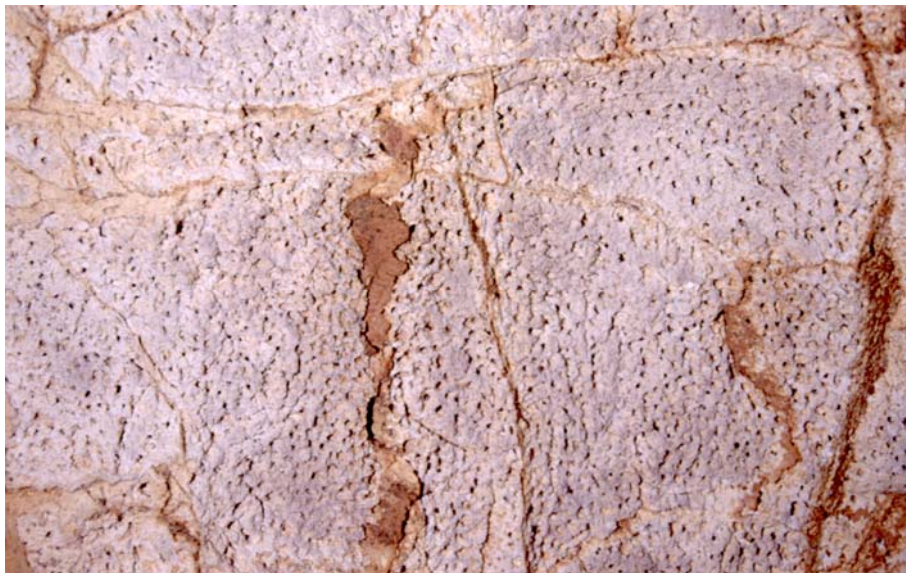
Slika 5.6.5. Več generacij izjedenih votlinic na prepereli steni.



Slika 5.6.6. Povečava najmlajše votlinice s prejšnje slike z izjedenimi kanalčki (živalski sledovi).

Vzroke za nastanek mehkejših delov kamnine išče med kondenzno korozijo, izločanjem soli na skalni površini ali v delovanju mikroorganizmov. Le ti naj bi imeli na delih jamske stene zaradi mikroklimatskih razmer primerna gojišča. MIHEVC (1996b) tudi omenja, da se je s pojavom ukvarjal že VALVASOR (1689), ki je poročal o tem, kako so polhi v neki jami lizali kamnite plošče, kar VALVASOR razlaga s pojavljanjem solitru podobne snovi v skali.

Na nekaterih delih zahodne stene rova sem našla prilepljene klastične sedimente, ki so v neposrednem stiku s preperelo kamnino. Pod temi sedimenti je preperela stena gladka, brez vdolbinic in sledov zob. Zato sklepam, da je bil ta del jame napolnjen z naplavinami. Ko pa je bil sediment odplavljen, so živali lahko pričele preperelo kamnino glodati. V pasaži preperete stene rova niso izjedene, ampak je njihova površina v nekaterih delih na gosto prepredena z kalcitnimi žilami. Žile, ki štrlijo iz površine so tudi preperete in mehke, drugje pa je preperela kamnina na gosto posejana z luknjicami premera od 0,3 do 0,5 cm in globino do 0,5 cm (sl. 5.6.7.).



Slika 5.6.7. Luknjičava površina preperete kamnine prepredena s kalcitnimi žilami in polami v pasaži Južnega rova, od koder je tudi vzorec Pr1.

Vzhodna stena vhodnega dela Južnega rova je prekrita z rdečerjavo sigo, na katere površini so se skupaj z belim oprhom na gosto izločili beli kristalčki. V dnu tega dela rova pa rastejo kapniki, katerih površina je prekrita s koralasto sigo. Koralsta siga je značilna za celo jamo, nastaja pa iz mezeče in razpršene vode ter za svojo rast potrebuje precejšno vlažnost zraka v jami.

5.6.4 Opis vzorcev

S sten vhodnega dela Južnega rova sem vzorčevala na dveh mestih:

- vzorec **Pr1** je del stropa pasaže,
- vzorec **Pr2** pa je del izjedene zahodne stene.

Vzorec **Pr1** je del skalnega roglja, ki je štrlel v pasažo. Apnenec je preperel več centimetrov globoko. Preperel del kamnine je zelo vlažen in mehak. Iz površine vzorca izstopajo kalcitne žile, vmes pa je razporejena mreža luknjic. Kalcitne žile so zelo preperete in na otip mehke ter vlažne. Zračno posušen vzorec je v notranjosti srednjesive barve (N5). Notranji sveži, del kamnine ima močno preperel rob in je bele barve (N9). Kamnina je v notranjost preperela tudi ob razpoki.

Vzorec **Pr2** je kos kamnine z do 2,5 cm preperelim robom z zahodne stene rova. Na površini je mreža vdolbinic s premerom od okrog 0,5 cm in več, v katerih so sledovi zob v obliki majhnih kanalčkov in to po 5 vzporednih (sl. 5.6.8.). Sveža kamnina vzorca je srednjatemnosive barve (N4), in ima od 1 do 3 cm debel preperel rob, ki je zelo porozen in bele barve (N9). Zunanji rob kamnine je tako porozen, da ga je pri pripravi vzorca za skaniranje, odnašal že zelo rahel vodni curek.



Slika 5.6.8. Površina vzorca Pr2 je preperela in prepredena s starejšimi sledovi.

Za primerjavo med mineralno sestavo preperela jamske stene in naplavljenega jamskega sedimenta sem Analizirala še tri vzorce ilovice. Prvi vzorec **Pr0_A** je naplavina iz Žmohtnega rova, vzorec ilovice **Pr0_B** pa je bil nalepljen na preperelo in izjedeno steno ob vzorcu apnenca **Pr2**, vzorec **Pr0_C** pa je črno obarvani del vzorca **Pr0_B**.

5.6.4. Terenski zaključki

Glede na nekaj ostankov naplavljenih sedimentov na prepereli steni vhodnega dela Južnega rova predvidevam, da se je preperevanje apnenca dogajalo v stiku s sedimentom. Glede na okoliščine in mineralno sestavo naplavine (glej poglavje 6.3.5.) menim, da vpliva sediment na preperevanje samo s svojo vlažnostjo ali s sposobnostjo zadrževanja prenikle vlage. Z vlago, ki jo ohranja v kamnini vpliva na raztapljanje v apnencu. Nimam pa dokazov, da bi določeni minerali iz naplavine kemično reagirali z apnencem.

Močnejše kondenzacije vode v tem delu jame nisem opazila. Žal mikroklimatskih pogojev v jami ne poznam dovolj, da bi možnost kondenzne korozije lahko popolnoma izključila.

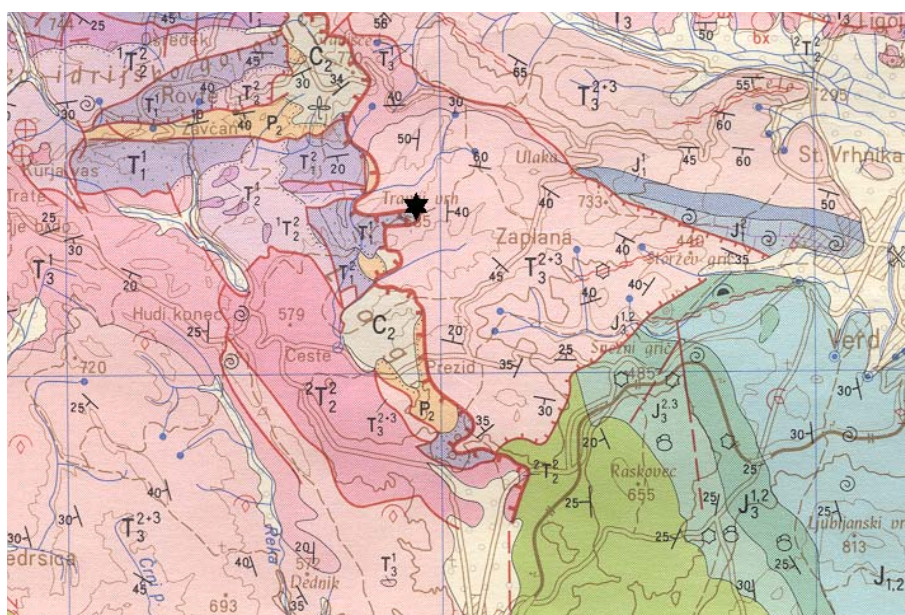
5.7. Turkova jama, kat. št. 41

Turkovo jama pri Zaplani sem izbrala kot primer z aktivnim vodnim tokom. Rovi so izdolbeni v zgornjetriasnem dolomitu. Njihove stene so hrapave, in preperle samo nekaj mm globoko. V nekaterih delih jame pa je najti debelejše cone preperle kamnine.

5.7.1. Lega jame in geologija okolice

Turkova jama leži severozahodno od Zaplane na južnem pobočju Travnega vrha, ki je visok 685 m, na nadmorski višini 640 m ($y = 5439\ 450$, $x = 5092\ 000$).

Po Osnovni geološki karti 1: 100 000 list Postojna (BUSER et. al. 1967) je jama v zgornjetriasnem dolomitu T_3^{2+3} (sl. 5.7.1.). Vhod v jama je v neposredni bližini narivnega čela zgornjetriasnega dolomita na spodnjetrojstne klastite z oolitnimi apnenci in sljudnatim dolomitom. Plasti vpadajo proti V pod kotom 25^0 .

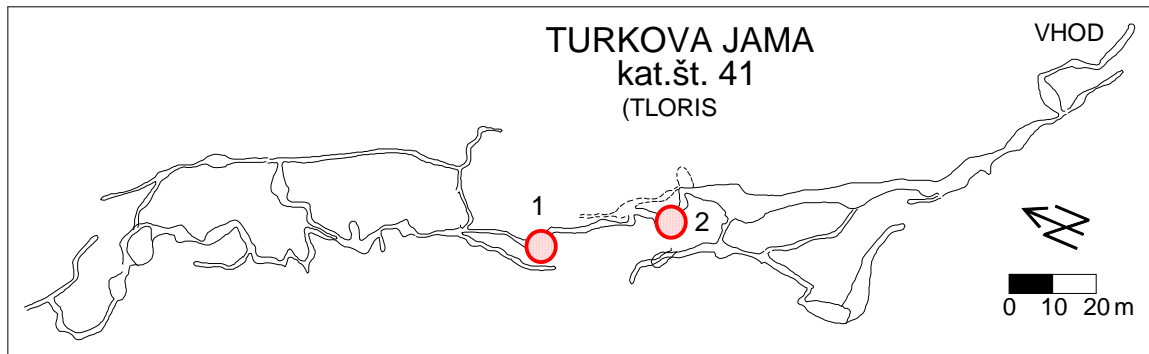


Slika 5.7.1. Lega vhoda v Turkovo jama in geološke razmere po OGK Postojna (iz BUSER et al. 1967).

5.7.2. Speleomorfološke značilnosti jame

Vhod v jama je precej navpičen in se nadaljuje po zelo strmem, okrog 30 m globokem rovu. Skupna dolžina rofov znaša 900 m, skupna globina pa 80 m. Kjer se vhodni rov izravna, se sreča z Stinkovim rovom, po katerem v jama priteka manjši potok. Jama se nadaljuje v Veliki rov, ki se rahlo spušča. V začetnem delu Velikega rova še teče potok, ki pa se kmalu izgublja v stranske rove, vendar v jami nanj naletimo še večkrat. Februarju 2000 je bil pretok potoka v jami nekaj l/s. Veliki rov je od točke 16 naprej brez aktivnega vodnega toka. Jama se nato razveji v več smereh. Po dnu rofov s sedaj aktivnim vodnim tokom se nahajajo različni prodniki, največ jih je iz skrilavih meljavcev, boksita in peščenjaka.

V najvišjih delih jame so še vidne freatične oblike rofov, kajti ti rovi nikoli niso bili zapolnjeni z naplavljenimi sedimenti. V ostalih delih jame skoraj povsod najdemo ostanke naplavin, prodov, peskov in ilovic, ki so očitno v nekem obdobju popolnoma zapolnjevali nižje predele. V jami najdemo dele rofov z izravnanim stropom, stropne kanale in anastomoze, to je oblike, ki so značilne za nastanek nad naplavino.



Slika 5.7.2. Tloris Turkove jame z označeno lego vzorcev: 1 – vzorec TJ1, 2 – vzorec TJ2.

Stene rovov v vsej jami so preperle do nekaj milimetrov debeli coni. Tam pa, kjer voda nastajajoče preperine ne spira sproti, na steni ostaja debela preperela cona, ki je lahko široka več centimetrov. Vrhnja plast preperle kamnine se odraža v hrapavosti skalne površine na stenah rovov. Površina stene je manj hrapava v delih, ki jih tekoča voda nenehno spira voda (prenikajoči curki ali voda iz potoka).

5.7.3. Labirint

Zame je posebno zanimiv del jame, ki se imenuje Labirint, med točko 23 do točke 30. Po točki 30 se glavni rov usmeri ob prelomni ploskvi z vpadom 95/80. Vse njegove stene so preperle precej globoko. Zanimiv je tudi manjši stranski rov z močno preperelimi stenami, ki se pri točki 24 odcepi od glavnega rova. Vhod vanj je nekaj metrov nad dnom glavnega rova. To je sedaj neaktivni del jame, strop rova je bil uravnan pod sedimenti, na njem je izoblikovan tudi stropni kanal (sl. 5.7.3.).

Po stenah rova in v njegovem dnu je polno ostankov naplavljenih sedimentov, od prodnikov in peskov do laminiranih ilovic, katerih nanos tudi zapira nadaljevanje rova.



Slika 5.7.3. Preperle stene manjšega rova z ostanki naplavin; mesto vzorca TJ2.

V Labirintu med točko 27 in 30 je v dnu rova blatno jezerce, ki ga napaja curek prenikle vode. Voda spira strme ozkega rova, sprani delčki pa se nabirajo v obliki

drobnozrnatega blata v njegovem dnu. Po točki 30, ko se rov obrne in sledi prelomni ploskvi, je rov precej višji in pod stropom bogato zasigan. Glavni rov se ob prelomni ploskvi nadaljuje proti severu. V začetnem delu dno neaktivnega dela rova zapolnjujejo naplavljeni sedimenti nekarbonatnega izvora. V sedimentih najdemo prodnike in laminirane ilovice s peski. Stena rova je v stiku z naplavinami popolnoma preperela več centimetrov globoko.

5.7.4. Opis vzorcev

S sten Turkove jame sem vzorčevala na dveh mestih:

- vzorec **TJ1** je preperel dolomit s stene rova pri točki 30 in
- vzorec **TJ2** preperel rogelj dolomita iz manjšega stranskega rova pri točki 24.

Vzorec **TJ1** je s stene rova nad potočkom (točka 30), kjer je kamnina v stiku z naplavljenim sedimentom močno preperela. Neposredno na prepereli steni rova so tudi manjše površine mastne rdeče ilovice, ki ponekod zapolnjuje tudi manjše vdolbine, ki so razporejene po prepereli steni. Rdeča ilovica je na pogled precej drugačna kot so naplavljene laminirane ilovice in peski. Notranji del vzorca **TJ1** je še trden, vendar razbarvan v zelosvetlosivo (N8), rob vzorca pa je popolnoma razbarvan (N9) in mehak ter zelo vlažen.

TJ2 je vzorec preperelega dolomita iz spodnjega dela zahodne stene manjšega stranskega rova pri točki 24 (sl. 5.7.3.). Rov je bil nekoč popolnoma zapolnjen z naplavljenimi sedimenti. Prepereli rogelj dolomita je štrlel v rov, tako da je skoraj vsa njegova površina močno preperela. Prav sveže kamnine v vzorcu ni, le v notranjosti je manj preperel del kamnine, ki je srednj svetlosive barve (N6). Preperel rob je razbarvan (N8) in močno porozen, njegova površina je hrapava.

V jami sem vzela še vzorec rdečkaste ilovice **TJ0_A**, ki je bila nalepljena na vzorec preperle kamnine **TJ1** in vzorec naplavljene laminirane ilovice **TJ0_B**.

5.7.5. Terenski zaključki

Na stenah so debelejšše cone preperle kamnine samo tam, kjer voda natopljuje kamnine sproti ne odnaša, ter na tistih mestih, kjer je še danes ali pa je bila v preteklosti, v stiku z naplavinami. V delih rovov, kjer voda odnaša natopljeno kamnino, je močnejše preperela cona kamnine debela le od enega do dveh milimetrov. Površina sten je močno hrapava, saj dolomitna zrna štrlijo iz površine. Malo manj je površina stene hrapava le v primerih, ko voda sproti spira stene, to je pod stalnimi curki in kjer potok stalno teče. Stena je na otip bolj gladka, ker voda vsa razrahljana zrna takoj spere.



Slika 5.7.4. Preperle stene v Labirintu so preperle pod naplavinami, vendar je debelina preperle cone majhna.

5.8. Ostale jame

5.8.1. Uvod

Pojav nepopolnega raztapljanja ali delnega preperevanja karbonatnih kamnin sem opazila tudi v drugih jamah pri nas in po svetu. Naštela bi le nekaj primerov, ki so se mi osebno zdeli zanimivi.

V vhodnem delu Skalarjevega brezna, kat. št. 6000, na Kaninskih podih, katerega vhodni del je v dachsteinskem apnencu, najdemo selektivno preperele stene vhodnih brezen. Kako je globlje od 100 m ne vem, ker tam nisem bila. Apnenec v vhodnem breznu vsebuje velike megalodontidne školjke, katerih lupine štrlijo iz sten, vmes pa je kamnina močno preperele in na otip peskasta.

V Snežni jami na Raduhi, kat. št. 1254, sem opazila hrapavo, močno preperele kamnino na steni rova, kjer se vhodni del jame napolnjen z ledom konča. Stena rova je preperele, njena površina pa močno hrapava. Na tem mestu bi lahko preperevanje povezali tako z zmrzovanjem kot s kondenzno korozijo (sl. 5.8.1.), saj se tu mešata hladen zrak iz ledene dvorane in topel jamski zrak.



Slika 5.8.1. Bele stene v Snežni jami na Raduhi; bleščijo se posamezne kapljice kondenza.

Lep primer selektivne korozije in nastanka nekaj milimetrov debele cone preperele kamnine sem videla tudi v Koněpruskih jamah na Češkem krasu. V zgornjem delu, kjer je še zaznavna izmenjava jamskega in zunanega zraka, je jama razvita v spodnjedevonskih apnencih (BOSÁK 1996) po leziki. Jamski strop sledi leziki. Je raven in močno preoblikovan s kondenzno korozijo. Strop je selektivno korodiran, ven štrlijo kalcitne žile. Lahko bi rekli, da gre za začetke »boxworka«.

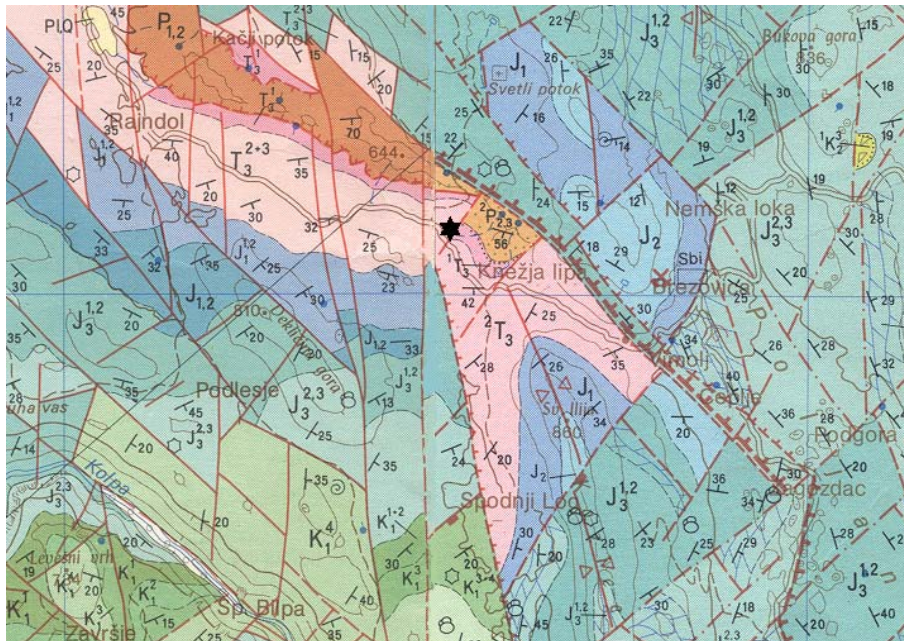
Zanimiv se mi je zdel tudi način preperevanja matične kamnine v najgloblji jami na Češkem krasu, Arnoldki, ki je globoka 100 m. Jama je hipogenega nastanka. Zanimivo je, da so hidrotermalne raztopine, ki so se po kamnini pretakale po razpokah, dale na pogled enak rezultat, kot je rezultat preperevanja kamnine pod sedimenti, s kondenzno korozijo ali pa z zmrzovanjem. Kamnina v okolici razpok je razbarvana, porozna in s tem mehkejša. V tem primeru ni preperele kamnina jamske stene, ki je v stiku z jamskim prostorom, ampak

kamnina ob razpokah, po katerih so hidrotermalne raztopine prihajale vanjo. Meje preperevanja so ostre in razporejene po stenah glede na razporeditev razpok.

Seveda nepopolno raztapljanje karbonatnih kamnin ni značilno samo za klimatske razmere zmernege pasu, ali morda za alpske podnebne razmere. Pojav smo opazili tudi v klimatskih razmerah južnokitajskega krasa, kjer so kamnine v jamskih rovih in na površju v stiku s klastičnimi sedimenti in prstjo močno preperele (ZUPAN HAJNA 1998b; SLABE 1999) ter v jamah v Avstraliji, posebno tistih, ki so bile zapolnjene z naplavinami.

5.8.2. Remergrund II, kat. št. 2698

Vhod v jamo leži blizu Knežje Lipe na Kočevskem, na nadmorski višini 490 m (y = 5500 140, x = 5045 835).



Slika 5.8.2. Lega vhoda v Remergrund II in geološke razmere po OGK Črnomelj in Delnice (iz BUKOVEC et al. 1983 in SAVIĆ & DOZET 1984).



Slika 5.8.3. Tloris Remergrunda II z označeno lego vzorca Rm.

Jama je občasni požiralnik na stiku med permskimi ter spodnjetriasnimi klastiti in plastovitim triasnim dolomitom (SAVIĆ & DOZET 1984; NOVAK & ROGELJ 1993) in OGK, list Črnomelj (BUKOVEC et al. 1983), na sliki 5.8.2.. Oblikovana je v triasnem dolomitu, rovi v glavnem sledijo eni sami leziki in različno usmerjenim strukturam, največ v smeri S – J in prečno dinarskim.

Iz jame sem analizirala en sam vzorec, ki ima močno hrapavo površino:

- vzorec **Rm** je del dolomita s stene Dragove pasaže v vhodnem delu jame.

Lega vzorca je označena na tlorisu jame (sl. 5.8.3.). Vzorec **Rm**, je masivni debeložrnati dolomit. Sredina vzorca je dokaj sveža in je srednjesvetlosive barve (N6). Vzorec je po robu tudi precej preperel in razbarvan (N8) ter po površini zelo hrapav.

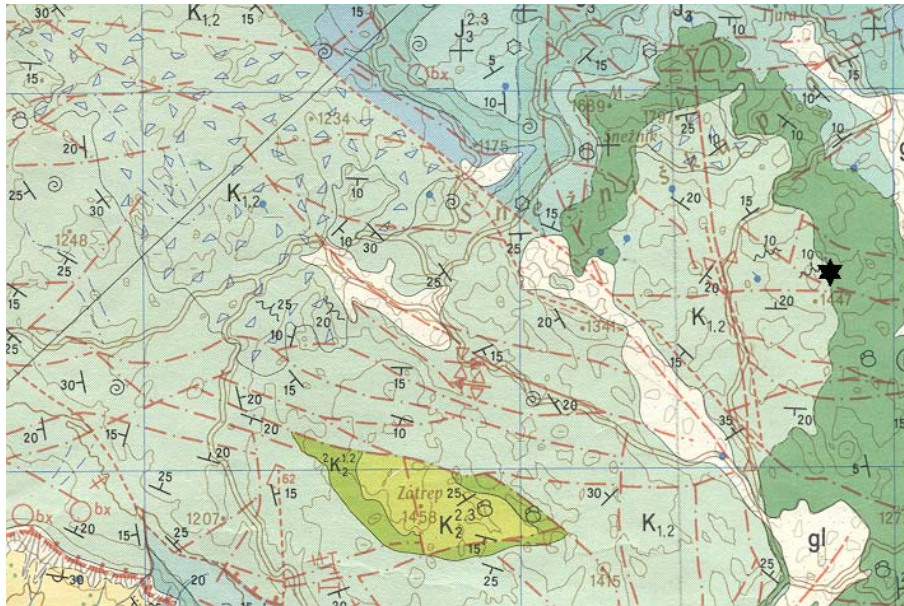
5.8.3. Spodmol na Ždroclah

Spodmol na SV strani Ždrocle 3 (sl. 5.8.4.), ki ima katastrsko številko 4263, leži na nadmorski višini 1389 m ($y = 5459\ 060$, $x = 5047\ 550$). Ždrocle so globoke kraške depresije s prepadnimi stenami. Te depresije so tipične za planoto jugovzhodno od vrha Snežnika, na nadmorski višini med 1300 in 1400 m. Oblikovane so v spodnjekrednih apnencih z dolomiti in dolomitnimi brečami (po OGK Ilirska Bistrica (ŠIKIĆ et al. 1972). Prepadne stene so kontrolirane z razpoklinsko cono v smeri S – J in s prelomi v dinarski smeri, SV – JZ (ZUPAN HAJNA 1997b). V dnu Ždrocel se zadržuje sneg, včasih tudi čez vse leto in tako preoblikuje njihovo dno.



Slika 5.8.4. Spodmol na SV strani Ždrocle 3.

Plasti vpadajo pod kotom 70/20, nekaj metrov jugozahodno od spodmola jih seka močan prelom v dinarski smeri, ob katerem je kamnina porušena. Spodmol je nastal ob leziki, kjer kamnina močneje razpada ter je malo bolj lapornata in zelenkasto obarvana. Preperela kamnina ob leziki je precej vlažna, ker lezika prevaja padavinsko vodo, obenem pa kamnina tudi močno mehansko razpada, saj je izpostavljena zmrzovanju (sl. 5.8.6.). Ne samo, da kamnina poka zaradi nihanja temperature, mehanski razkroj je pospešen tudi z zmrzovanjem vode v razpokah in porah preperle kamnine ob leziki.



Slika 5.8.5. Lega Ždrocle 3 in geološke razmere po OGK Ilirska Bistrica (iz ŠIKIĆ et al. 1972).

Iz spodmola sem vzela dva vzorca preperle kamnine:

- vzorec **Žd1** je prepereli apnenec iz plasti nad glavno leziko v spodmolu,
- vzorec **Žd2** pa je preperina iz lezike.

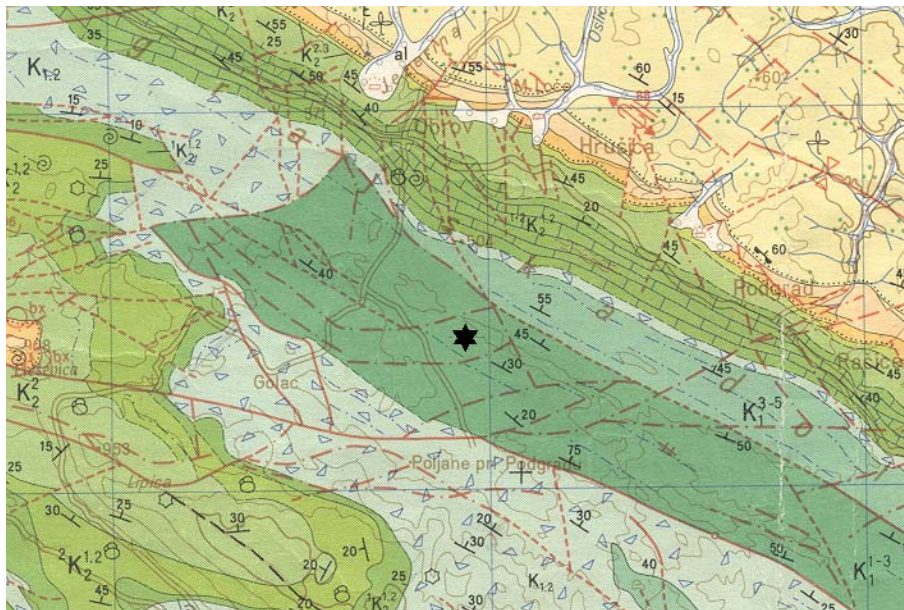


Slika 5.8.6. Preperela kamnina ob leziki je precej vlažna in mehka; na polici se nabira drobnnozrnat karbonatni pesek in melj.

5.8.4. Polina peč, kat. št. 938

Polina peč se nahaja v Matarskem podolju južno od Obrova pred Poljanami pri Podgradu, na nadmorski višini 570 m (y = 5429 610, x = 5041 990). Jama je oblikovana v spodnjekrednih

karbonatnih kamninah, ki jih sestavljajo debeloskladoviti apnenci in dolomiti ter apnene breče (iz ŠIKIĆ et al. 1972), plasti vpadajo pod kotom od 20 do 30° proti SV (sl. 5.8.7.).



Slika 5.8.7. Lega vhoda v Polino peč in geologija po OGK Ilirska Bistrica (iz ŠIKIĆ et al. 1972).

Vhodni del jame je večji spodmol v dnu vrtače, ki se skozi pasažo nadaljuje v večjo dvorano. Dvorana in ves zgornji del jame je močno podrt in zasigan, opazni so močnejši premiki med plastmi. Po sredi majhnega freatičnega rova se lepo vidi zmik rova ob leziki, ob kateri je nastal. Kapniki in stene so v tem delu precej podrti, kar kaže na intenzivnejše premike. Zgornji del jame je preoblikovalo rušenje, je pa tudi zasigan. Spodnji del jame je v začetku podoben zgornjemu. Nato pa se morfologija rova spremeni, ker je oblikovan v sedimentacijski breči. Tla rova so prekrita s svežim blatom, kar kaže na občasne poplave.



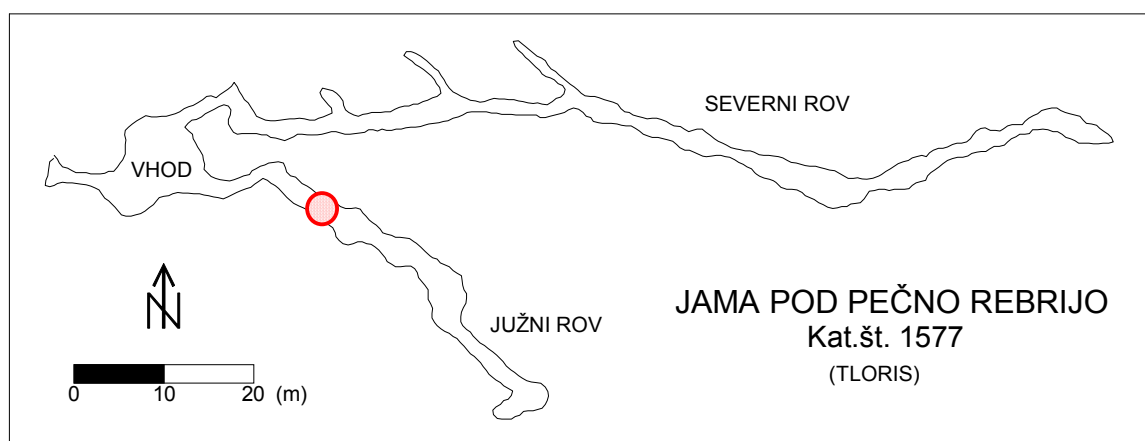
Slika 5.8.8. Preperela in stena z živalskimi sledovi (biogena erozija).

V zgornjih delih jame najdemo tudi ostanke fluvialnih sedimentov. V naplavinah se menjavajo plasti prod, peska in ilovice, ponekod naplavine prekrivajo skorje sige. V najvišjem delu rova so klastični sedimenti še vedno v neposrednem stiku z steno rova. Stene so preperle v večjih površinah, apnenec je razbarvan in močno porozen do 1 cm globoko. Površina stene ni vlažna, je pa vsa preprejena z ozkimi in kratkimi zarezi, ki jih delajo manjše živali, tako kot v Jami II na Prevali. Manjši sesalci glodajo steno, kar lahko imenujemo tudi biogena erozija (sl. 5.8.8.).

Preperela stena je suha tudi v stiku z naplavino. Iz okoliščin sklepam, da se je dotok prenikajoče vode, ki je mezela po steni, ustavil. Tudi sediment v stiku s steno rova je suh. Zato se je ustavilo tudi preperavanje. V zadnjem času se na prepereli steni zgornjega dela jame dogaja samo mehansko odstranjevanje preperelih delov kamnine.

5.8.5. Jama pod Pečno rebrijo, kat. št. 1577

Jama leži SV nad Postojno, na nadmorski višini 650 m ($y = 5440\ 160$, $x = 5070\ 620$). Jama je nastala v zgornjekrednih apnencih, katerih plasti vpadajo proti JZ pod kotom 30° (BUSER et. al. 1967). Jama ima dva vertikalna vhoda in dva rova, ki imata povprečno 10 m stropa (sl. 5.8.9.). Južni rov je krajši, stene so prekrite s tanko plastjo oprha (sl. 5.8.10.).



Slika 5.8.9. Tloris Jame pod Pečno rebrijo z označeno lego vzorca JPI1.

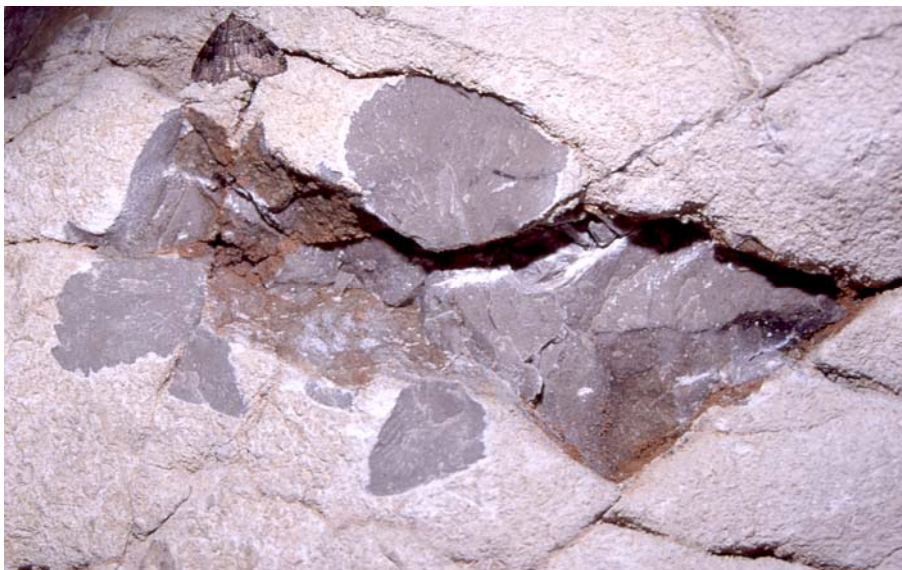
Severni rov ne prikriva freatičnega nastanka. Oblikoval se je ob dveh lezikah. Smer rova je glede na vpad plasti apnenca v glavnem zamaknjena za 30° , samo v zahodnem delu rov sledi vpadu plasti (ŠEBELA 1997). Glede na oblikovanost površine stene daljšega, severnega rova, sem domnevala, da gre tudi tu za nepopolno raztapljanje in debele ostanke preperle matične kamnine na steni.

A podrobnejši pregled vzorca je pokazal, da je po površini prisotna tanka plast belega oprha, ki prekriva steno, po mojih predvidevanjih rahlo preoblikovano s kondenzno korozijo. V rovu je namreč zelo močna cirkulacija zraka in na stenah rova je večkrat izločenega precej kondenza v obliki vodnih kapljic. Na posameznih delih površine stene so lepo izražene oblike, ki so nastale s selektivno korozijo (sl. 5.8.10.), saj lupine rudistnih školjk, kalcitne žilice in stiloliti štrlijo iz preperle površine.



Slika 5.8.10. Stene rova so preoblikovane s kondenzno korozijo in prevlečene s tankim belim oprhom.

Po korodirani steni rova se je se je iz kondenzne vlage v času sušenja, izločil kalcitni oprh. Enak pojav opisuje SLABE (1988) v Komarjevem rovu v Dimnicah, da je izločanje drobnih kalcitnih kristalov na površini preperlega apnenca pa omenja tudi JARC (2000). Meja med kamnino in oprhom je ostra in lepo izražena (sl. 5.8.11.).



Slika 5.8.11. Meja med svežim temno obarvanem zgornjekrednim apnencem in obarjenim belim kalcitnim oprhom je ostra.

Primer dodajam zaradi razlike v videzu prereza preperle kamnine in kamnine prekrte z oprhom. Iz južnega rova jame je vzorec: **JP1** - apnenec z oprhom.

Vzorec apnenca je svetlosive barve (N7), seka ga nekaj kalcitnih žil in ne kaže znakov preperelosti, površino pa prekriva bel oprh.

5.9. Diskusija in zaključki terenski raziskav

Nekaj milimetrov načete kamnine najdemo na stenah jamskih rovov zelo pogosto, tako v razpokah kot na površini kamninske mase. Kamnina je lahko preperela povsod tam, kjer je v stiku z meteorno vodo ali zrakom, to je s pogoji, ki so drugačni od pogojev, v katerih je nastala. Raztapljanje se ponavadi odvija frontalno na površini kamnine, globina cone raztapljanja pa zavisi od hrapavosti površine (FORD & WILLIAMS 1989).

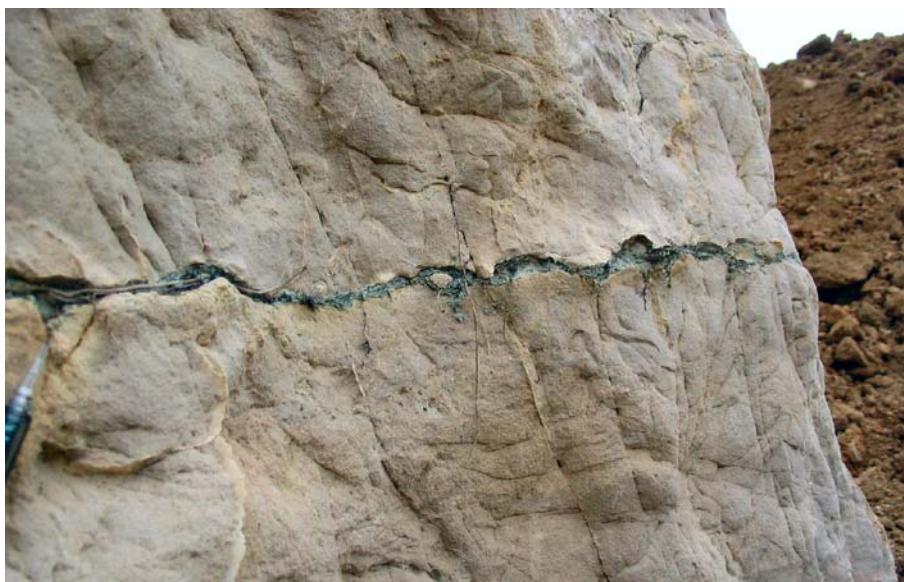
Tanjše preperele cone matične kamnine so na stenah jamskih rovov pogost pojav in se odražajo predvsem v hrapavosti skalne površine. Debelejših con preperele matične kamnine pa je manj, posebno v večjih prostorskih razsežnostih.

- V primerih, ki sem jih obdelala gre raztapljanje v globino. Za seboj pušča porozno, spužvi podobno preperelo cono.
- Raztapljanje ne napreduje samo ob odprtih razpokah, ampak tudi po različnih strukturah v kamnini (topi manjša zrna, meje med večjimi zrnji ter polja v mikritnih in biomikritnih apnencih po nam nezaznavnih strukturah).

ŠUŠTERŠIČ (1991) pravi, da se kamnine razlikujejo v tem ali prehajajo iz čvrste faze v raztopino tako, da je fronta raztapljanja gladka ter povprek reže mineralna zrna in vezivo, ali pa se kamnina obnaša kot mozaik, v katerem se mineralna zrna in vezivo topijo počasneje kot okolica in se v obliki posameznih zrn velikostnega reda melja izločajo iz podlage. Kot primer navaja dolomit (sl. 5.8.12.), ki se zaradi petrografskih značilnosti in tektonske porušeniosti lahko topi na oba načina (ZOGOVIĆ 1966).

Pojav nepopolnega raztapljanja karbonatne kamnine srečujemo v jamskih rovih in na površju. Izkazalo se je, da so v globino najbolj preperele stene jamskih rovov:

- **ki so v stiku z drobnoznatimi naplavinami nekarbonatnega izvora,**
- ki jih zamaka prenikajoča voda in
- ki jih vlaži kondenzna voda.



Slika 5.8.12. Površina preperlega dolomita je zrnata, izstopajo kalcitne žile; razpoka je zapolnjena s preperelo kloritno glino; gradbišče avtoceste severovzhodno od Novega mesta.

Karbonatna kamnina, ki je prekrita s klastičnimi sedimenti ali prstjo, pod njimi in ob njih ponavadi prepereva (na primer: sl. 1.1.1.). Na površini skale, prekrite z naplavinno ali prstjo se zaradi pretakanja vode po njenem stiku oblikujejo tako imenovane podtalne skalne oblike (GAMS 1971, 1997; SLABE 1992, 1995, 1999; sl. 5.8.13). O nastanku podsedimentnih

skalnih oblik in oblikovanju njihove površine pa poleg načina pretakanja vode soodloča tudi matična kamnina s svojo sestavo, skladovitostjo in pretrtostjo (SLABE 1999).



Slika 5.8.13. Pod, nad in ob sedimentu v jamah nastajajo značilne skalne oblike; na stropu Turkove jame so nad sedimentom nastale anastomoze (foto A. Mihevc).

Kako med seboj kemijsko reagirata karbonatna kamnina in naplavljeni sediment je pisal že RENAULT (1968b), ki trdi, da kislasi nasičena glina v primeru kontakta z dolomitom, absorbira Ca^{2+} iz dolomita in dolomit postane mehak.

V primerih, ki sem jih obdelala, sta v stiku karbonatna kamnina, ki prepereva in naplavina nekarbonatne sestave in porekla. Kakršne koli kemične reakcije med njimi (v smislu PEZDIČ et al. 1989) nisem opazila, vsaj ne na nivoju terenski raziskav in poznavanjem mineralne sestave obeh.

Najdejo pa se tudi primeri, ko karbonatna kamnina v stiku s klastičnimi sedimenti ni vidno preperela (MIHEVC 1996c).

Ob koncu poglavja naj poudarim, da:

- v tu opisanih primerih gre za »in situ« preperovanje apnenca ter dolomita, vendar ne nastajajo fantomske kamnine s spremenjeno mineralno sestavo (VERGARI & QUINIF 1997; KAUFMANN et al. 1999).

Kadar se proces raztapljanja iz kakršnega koli vzroka ustavi na stenah rovov mnogih jam najdemo debele cone preperelega apnenca ali dolomita. To se zgodi, ko:

- ni več dotoka agresivne vode in
- če preperete kamnine sproti ne odnaša tekoča voda.

6. ANALIZE VZORCEV PREPERELE KARBONATNE KAMNINE IZ JAMSKIH ROVOV

Z izbrano tematiko sem posegla v malo znano področje. Zato sem morala najprej izbrati primerne raziskovalne metode. Le te so ostale predvsem na nivoju kvalitativnih preiskav, saj nisem razpolagala s statistično primernim vzorcem in to predvsem zaradi nizkih finančnih sredstev.

Najbolj so me zanimala razlike med svežim in preperelim delom vzorcev, predvsem razlike, če sploh so, v mineralni in kemični sestavi obeh delov. Na primer, katerih elementov ni v preperelem delu, da je kamnina razbarvana.

Z različnimi analizami sem predvsem skušala odgovoriti na vprašanji:

- kako struktura karbonatne kamnine vpliva na raztapljanje - ali so razlike pri načinu raztapljanja mikrita, sparita (tudi različnih starosti); in
- kaj pogojuje globino preperele cone v karbonatni kamnini.

6.1. Pregled opravljenih analiz vzorcev preperelih karbonatnih kamnin in klastičnih sedimentov

Poleg terenskih raziskav je za razumevanje vpliva litoloških značilnosti kamnine na raztapljanje ključnega pomena poznavanje njene sestave in strukture. Za čim boljše poznavanje kamnine, predvsem s poznavanjem razlik v preperelem in svežem delu vzorca, sem vzorce analizirala z različnimi metodami. Iz preglednice (sl. 6.1.1.) je razvidno, katere analize so bile opravljene na posameznih delih preperelih karbonatnih kamnin iz jamskih rogov.

Podrobnejši makroskopski opisi vzorcev so v sklopu opisov jam. V tem poglavju pa so zbrani rezultati različnih analiz, njihova interpretacija ter primerjava med njimi. Z analizami sem hotela predvsem ugotoviti mineralno sestavo preperele kamnine, razliko med svežo in preperelo kamnino ter prehod med obema skrajnostma.

Makroskopsko je v kamnini opazna delna do popolna razbarvanost, močno povečana poroznost in s tem zmanjšana trdota vzorca.

Preperele karbonatne kamnine sem glede na stopnjo preperelosti delila v tri cone:

- **a - sveža kamnina**; sveža barva,
- **b - razbarvana kamnina**; zbledela barva, vendar poroznosti ni opaziti,
- **c - preperela kamnina**; popolnoma razbarvana in močno porozna.

Za nekatere analize sem ločila med seboj vse tri cone, pri drugih, predvsem analizah površine in prehodov, pa sem jih obravnavala skupaj. Opravljene analize delim na

- **optične analize**: skeniranje in povečevanje delov prerezov in optična presečna mikroskopija,
- **kemične analize**: analiza kemične sestave, kompleksometrija, analiza organskega ogljika, EDS analiza, analiza s protonskim žarkom;
- **mineraloške analize**: analiza z rentgensko difrakcijo; ter
- **mikrobiološke analize**,

Vse analize so kvalitativne (razen EDS analiz nekaj vzorcev, ki so kvantitativne), saj sem s svojimi raziskavami zašla v malo raziskano področje in sem najprej morala izbrati primerne raziskovalne metode ter predvsem spoznati, kaj se med prepevanjem dogaja, ne pa še kako.

VZOREC	ANALIZE								
	RENTGEN. DIFRAKCIJA	KOMPLEKS OMETRIJA	ELEMENTAR NA	ORGANSKI OGLJIK	PREREZI	PRESEVNI MIKROSKOP	SEM - EDS	PROTONSKI ŽAREK	MIKROBIOL OGIJA
BJ1b	▲				▲				
BJ1c	▲	▲			▲				
BJ2c	▲	▲							▲
BJ3c	▲	▲							▲
Ma1b	▲	▲	▲		▲	▲	▲		
Ma1c	▲	▲	▲		▲	▲	▲		
Ma2a	▲	▲		▲	▲	▲	▲		
Ma2b	▲				▲	▲	▲		
Ma2c	▲	▲		▲	▲	▲	▲		
Ma3a					▲				
Ma3c	▲	▲			▲				▲
Kr1a	▲	▲		▲	▲		▲		
Kr1c	▲	▲		▲	▲		▲		
Pr1a	▲				▲	▲		▲	
Pr1c	▲				▲	▲		▲	
Pr2a	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
Pr2c	▲		▲	▲	▲	▲	▲		
TJ1b	▲								
TJ1c	▲								
TJ2b	▲	▲			▲				
TJ2c	▲	▲			▲				
Rm	▲	▲			▲	▲	▲		
ŽD1	▲								
ŽD2	▲								
LP1	▲				▲	▲			
LP2	▲				▲	▲			
LP3	▲								
LP4	▲								
LP5	▲								
LP6	▲				▲				
LP7					▲	▲			
LP8	▲				▲	▲			
LP9	▲				▲	▲			
JP1					▲				
Re1c	▲					▲			

Slika 6.1.1. Preglednica analiz vzorcev svežih in preperelih delov karbonatnih kamnin iz Pečine v Borštu – BJ, Martinske jame – Ma, Krempljaka – Kr, Jame II na Prevali – Pr, Turkove jame – TJ, Remergrunda II – Rm, Spodmola na Ždroclah – ŽD, Veliki ledene jame v Paradani – LP, Jame pod Pečno rebrijo – JP in Renejevega brezna – Re.

V vzorcih dolomita sem pri analizi z metodo rentgenske difrakcije izračunala tudi **stopnjo urejenosti** njihove **kristalne rešetke**. Zanimalo me je, ali se stopnja urejenosti s prepevanjem spremeni. Za izračun sem uporabila enačbo, s katero sta urejenost kristalne rešetke pri dolomitu definirala GOLDSMITH in GRAF (1958) kot razmerje med intenziteto rentgenskih odbojev dolomita s ploskve (221) pri kotu 2Θ je $35,3^{\circ}$ (ki je pod vplivom menjave Ca in Mg vzdolž c-osi) in ploskve (101) pri kotu 2Θ je $37,3^{\circ}$. Pri idealno urejeni rešetki dolomita je stopnja urejenosti enaka 1. Slabša ko je njena urejenost, bližja ničli je njena vrednost.

Poleg analiz preperelih kamnin so bile narejene še mineraloške analize vzorcev klastičnih sedimentov z rentgensko difrakcijo. Pregled analiziranih vzorcev klastičnih sedimentov je na sliki 6.1.2..

JAMA	VZORCI		
Pečina v Borštu	BJ0 _A	BJ0 _B	
Martinska jama	Ma0 _A	Ma0 _B	Ma0 _C
Jama II na Prevali	Pr0 _A	Pr0 _B	
Krempljak	Kr0		
Turkova jama	TJ0 _A	TJ0 _B	
Postojnska jama	Po1	Po2	

Slika 6.1.2. Preglednica vzorcev drobnozrnatih klastičnih sedimentov, ki so v stiku s preperelo karbonatno kamnino na stenah jamskih rovov.

Pod vrstičnim elektronskim mikroskopom sem opazovala tudi nekaj površin preperelih in nepreperelih delov vzorcev apnencev (sl. 6.1.3.) in se prepričala, da mineralna zrna na površini niso rezultat sekundarnega izločanja kalcita v jami, ker je lepo vidna preperelost posameznih karbonatnih zrn. Vendar se v podrobnejše analize površin nisem spuščala, ker mi opazovanje reliefa preperelih apnencev o načinu raztapljanja ni veliko povedalo. Prehod iz svežega v prepereli del vzorca pa ni viden na površini, zato podrobnejše analize puščam za prihodnost. V preperelih površinah je opazna zaobljenost zrn, raztapljanje po kontaktih med zrn in močnejše preperevanje manjših zrn. To pa so ugotovitve, do katerih je s preiskavami preperelih vzorcev apnencev v svoji magistrski nalogi prišla tudi JARC (2000). Oblikovanje površine apnencev z raztapljanjem je pod vrstičnim elektronskim mikroskopom opazoval tudi SLABE (1995), ki je ugotovil, da je skalna površina kot posledica zaradi raztapljanja s kondenzno korozijo in raztapljanja pod drobnozrnato naplavino enaka.



Slika 6.1.3. Del vzorca Kr1; v različnih stopnjah preperel kredni apnenec iz Krempljaka pripravljen za EDS analizo.

6.2. Optične analize vzorcev preperelih apnencev in dolomitov

6.2.1. Uvod

Za analizo prerezov preperelih karbonatnih kamnin sem se odločila, ker se v njih lepo vidi prehod iz nepreperete v preperelo kamnino. Z makroskopskimi analizami sem v prerezih ugotavljala teksturo, razpokanost, razpored kalcitnih žil, razbarvanost, njeno ploskovno razporejenost in lego poroznih delov. Posebno pozornost sem posvetila prehodom v predele s povišano poroznostjo in identificirala prisotnost obarvane gline ter navzočnost sigove skorje.

Terenskemu opisu vzorcev apnencev in dolomitov v tem poglavju dodajam še opise prerezov in mikroskopskih zbruskov nekaterih vzorcev iz Pečine v Borštu, Martinske jame, Krempljaka, Jame II na Prevali, Turkove jame, Remergrunda II in Jame pod Pečno rebrijo.

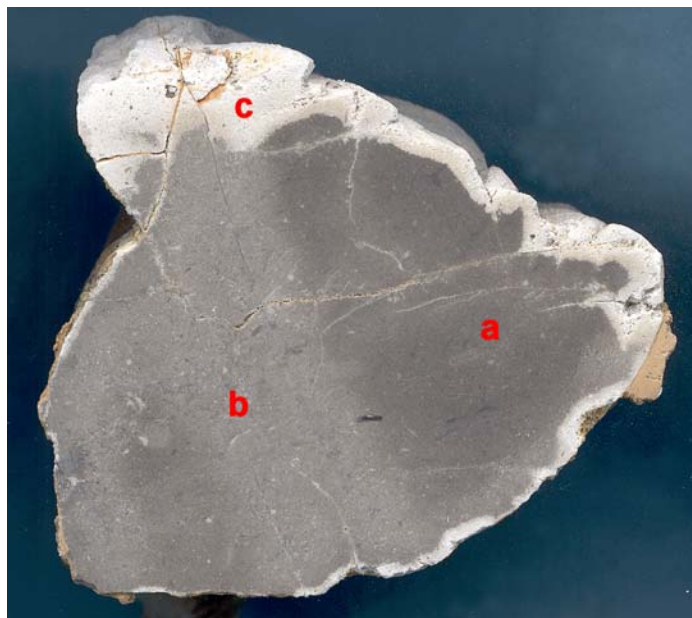
Posamezna območja na vzorcih kamnin ločim glede na stopnjo njihove preperelosti (sl. 6.2.1.):

- na nepreperelo kamnino (svežo kamnino) in
- na načeto kamnino, (delno razbarvana)
- na preperelo kamnino (popolno razbarvana in porozna).

Torej je izgubila svojo mehansko trdnost in je zato mehka. Prehod iz svežega v prepereli del pa ločim:

- na oster prehod,
- na stopnjast prehod prek med seboj ločljivih različno preperelih delov in
- na zvezni prehod.

Zaradi lažje dokumentacije in preučevanja podrobnosti sem prerezane vzorce skenirala in jih naprej obdelovala na računalniku, kjer sem lahko povečevala zanimive izseke. Metoda se je izkazala za zelo uporabno, predvsem za opazovanje napredovanja preperevanja v svežo kamnino.



Slika 6.2.1. Stopnja preperelosti apnenca prikazano na prerezu vzorca Pr1 (6,5 cm): a- sveža kamnina, b- razbarvana kamnina, c- bela in porozna preperela kamnina.

Barve sem določevala po Rock-color chart (GODDARD et al. 1970). V vzorcih sem določila naslednje barve: N4– srednjetemnosiva, N5– srednjesiva, N6– srednjesvetlosiva, N7– svetlosiva, N8– zelosvetlosiva, N9– bela in 5YR 8/1– rožnatosiva.

Stopnjo preperelosti vzorcev, barvo, poroznost, prisotnost razpok, korozijskih votlinic in fosilnih ostankov kaže razpredelnica (sl. 6.2.2.).

vzorec	preperelost	barva	poroznost	prerez	razpoke	votlinice	fosili
BJ1	a	N6	ni	2	številne; odprte in kalcitizirane	številne; po površini in v prerezu	ni
	b	N7	delna				
	c	5YR 8/1	močna				
BJ2	c	N9	močna	0			
BJ3	c	N9	močna	0			
Ma1	a	N5	ni	1	številne; kalcitizirane	malo; po površini in v prerezu	odlomki
	b	5YR 8/1	delna				
	c	5YR 8/1	močna				
Ma2	a	N5	ni	1	številne; kalcitizirane	malo; po površini in v prerezu	ni
	b	N8	delna				
	c	5YR 8/1, N9	močna				
Ma3	a	N6	ni	1	malo; odprte	malo; ob razpokah	ni
	c	5YR 8/1, N9	močna				
Kr1	a	N4	ni	1	številne; odprte in kalcitizirane	ni	ni
	b	N6, N7	ni				
	c	N9	močna				
Pr1	a	N5	ni	2	številne; odprte	malo; zelo majhne	odlomki in foraminifere
	b	N7	ni				
	c	N8, N9	močna				
Pr2	a	N4	ni	1	številne; kalcitizirane	ni	foraminifere in iglokožci
	b	N7	ni				
	c	N8, N9	močna				
TJ1	c	N8, N9	močna				ni
TJ2	b	N6	delna	1	številne; odprte in kalcitizirane	korozijsko razširjene razpoke	ni
	c	N9	močna				
Rm	b	N8	delna				ni
JP1	a	N6	ni	1	malo; kalcitizirane	ni	odlomki rudistov
	c	N9	močna				

Slika 6.2.2. Makroskopske značilnosti vzorcev iz Pečine v Borštu - BJ, Martinske jame - Ma, Krempljaka - Kr, Jame II na Prevali - Pr, Turkove jame - TJ, Remergrunda II - Rm in Jame pod Pečno rebrijo - JP. V razpredelnici so opisane značilnosti, ki jih opazimo po površini vzorca in v prerezu.

6.2.2. Pečina v Borštu

Iz Končnega rova jame so vzorci: **BJ1** – prepereli skalni rogelj, **BJ2** – bela mehka preperina, **BJ3** – preperina in **BJ4** – preperina.

Vzorec BJ1

Površina apnenca je preperela, prekrita z rjavkastim oprhom in posejana z mrežo luknjic premera do 0,8 cm in globine do 2 cm. V prerezu so te luknje lepo vidne. Del vzorca preperlega apnenca prekriva tanka rjava plast sige. Iz vzorca sem naredila dva prereza, ki sta na slikah sl. 6.2.3. in sl. 6.2.4..

Površina prereza vzorca **BJ1** (sl. 6.2.3.) je obarvana neenakomerno, fosilni ostanki niso vidni. Vzorec prepletajo odprte razpoke, na katere se naslanjajo tudi večje votlinice. Večina razpok je popolnoma ali delno zapolnjenih z mlečnobelim kalcitom. Površina celotnega prereza je precej preperela. Razbarvanost je različna, od delne v spodnjem delu vzorca (svetlosiva N7) do precejšnje (zelosvetlosiva N8) in skoraj popolne (rožnatosiva 5YR 8/1) v močno poroznem delu prereza. Po robovih je vzorec močno porozen, tako da posamezna zrna odpadajo. Viden je zelo postopen prehod iz razbarvane kamnine v popolnoma razbarvano in močno porozno kamnino. Drugi prerez (sl. 6.2.4.) je bolj homogen; lepo je izražena postopna razbarvanost in naraščanje poroznosti od sredine prereza proti robovom.



Slika 6.2.3. Prepereli apnenec, vzorec BJI, je razbarvan, po robovih močno porozen, ob razpokah in po površini pa so razporejene večje votlinice. (Dolžina prereza je 11 cm.)



Slika 6.2.4. Drugi prerez vzorca BJI, razbarvanost je postopna, poroznost se povečuje od spodnjega dela proti robovom. (Dolžina prereza je 6 cm.)

Apnenec je močno prekristaljen in preperel. Vidni so samo odlomki fosilov (ki so tudi prepereli) in številne kalcitne žile ter močna medzrnska poroznost. Apnenec je močno preperel rekrystaliziran biomikrit.

6.2.3. Martinska jama

Iz Boeganovega rova so vzorci: **Ma1** – prepereli skalni rogelj, **Ma2** – del preperete plasti ob močni leziki in razpoki z ilovico, **Ma3** – preperela kamnina in **Ma4** – bela mehka preperina z štrlečimi kalcitnimi žilami, ki so tudi močno preperete.

Vzorec Ma1

Površina vzorca je preperela, površina bele barve je ponekod obarvana z nekaj rjavkastega in črnega oprha. Po površini je tudi nekaj luknjic s premerom do 0,5 cm in globino do 1 cm. Prerez vzorca kaže sl. 6.2.5.. Apnenec ni enakomerno obarvan, je pisan, zelo drobno brečast in vsebuje odlomke fosilov ter intraklaste. Popolnoma svežega apnenca v tem vzorcu ni. Površina prereza prehaja iz apnenca srednjesive barve N5 proti robovom v rožnatosivo barvo 5YR 8/1. Vzorec prepletajo številne kalcitizirane razpoke, prisotnih je tudi nekaj votlinic. V osrednjem delu vzorca, med močnejšima kalcitnima žilama je apnenec manj

preperel. V njem so vidni odlomki fosilov in drugače obarvani klasti. Ob stiku z žilama je apnenec močnejše razbarvan, od žil proti zgornjima robovoma vzorca pa je lepo izražena še močnejša razbarvanost in naraščanje poroznosti. V tem zunanem delu vzorca so posamezna manjša polja, ki so manj preperela (temneje obarvana) in pripadajo litoklastom v kamnini.



Slika 6.2.5. Prerez vzorca Ma1 iz Martinske jame. (Dolžina prereza je 11 cm.)

Apnenec vsebuje fosilne ostanke alg, delčke rudistnih školjk in orbitoline (?). Poleg fosilov so v apnencu še veliki intraklasti, ki kažejo znake raztapljanja. Prisotni so tudi peleti ter rdečkasto obarvani deli. Apnenec prepredajo kalcitne žile. Mikritna osnova je pretežno rekristalizirana, v natopljeni mikritni osnovi rastejo sparitna zrna. Prepereli apnenec je biointrapelmikrit (grainstone).

Vzorec Ma2

Površina vzorca je preperela in bele barve. Na strani, ki je bila v stiku s steno rova, je površina zaradi ilovice infiltrirane ob razpoki obarvana rdečerjavo (7,5YR 6/8). Po površini je posejan z luknjicami s premerom do 0,8 cm in globino do 1,5 cm. Prerez vzorca je na sl. 6.2.6.. Manj preperel apnenec ni homogen, je pisan. V osrednjem delu je apnenec zelo temen, srednjesive barve (N5), ki proti spodnjemu robu, v stiku z infiltrirano ilovico, postopno postaja vse bolj razbarvan.



Slika 6.2.6. Prerez vzorca Ma2 iz Martinske jame. (Dolžina prereza je 11 cm.)

Barva tega nekoliko bolj preperlega dela je zelosvetlosiva (N8). Stik z ilovico ni porozen, ampak v nekaterih delih celo manj preperel (temno obarvana polja na stiku z ilovico). Vzorec prepletajo številne kalcitne žile, od katerih so tri zelo izrazite in v dveh je

kalцит že močno preperel. Meji med temneje obarvanim osrednjim delom in zgornjim razbarvanim tu bolj poroznim delom vzorca sta dokaj ostri. Porozni in prepereli rob je rožnatosive barve 5YR 8/1. Robovi vzorca so popolnoma prepereli, zelo porozni in mehki ter bele barve (N9).

Notranji del apnenca vsebuje veliko fosilnih ostanov, peletov in intraklastov. Apnenec sekajo kalcitne žile, del mikrita je prekristaljen. Zunanji del apnenca je močno preperel, kot tudi njegovi posamezni deli, povečana je poroznost in veliko je rjavo obarvanih polj. Prepereli apnenec je delno prekristaljeni biopelintramikrit.

Vzorec Ma3

Površina vzorca je preperela, močno porozna in mehka. Je bele barve in na eni strani prekrita z plastjo sige rjave barve. Po površini je nekaj luknjic ob razpokah. Prerez vzorca je na sl. 6.2.7.. Apnenec je močno preperel, v spodnjem delu je manjši temen predel, srednjesvetlosive barve N6, ki je tudi še kompakten. Drugače pa je ves del vzorca močno preperel, razbarvan in porozen. Prepereli del je rožnatosiv (5YR 8/1) do bel (N9). V prerezu je nekaj odprtih razpok, ob katerih je apnenec še bolj preperel. Ob razpokah so izoblikovane tudi korozijske votlinice. Meja med temneje obarvanim delom in bolj poroznim delom vzorca je dokaj ostra.



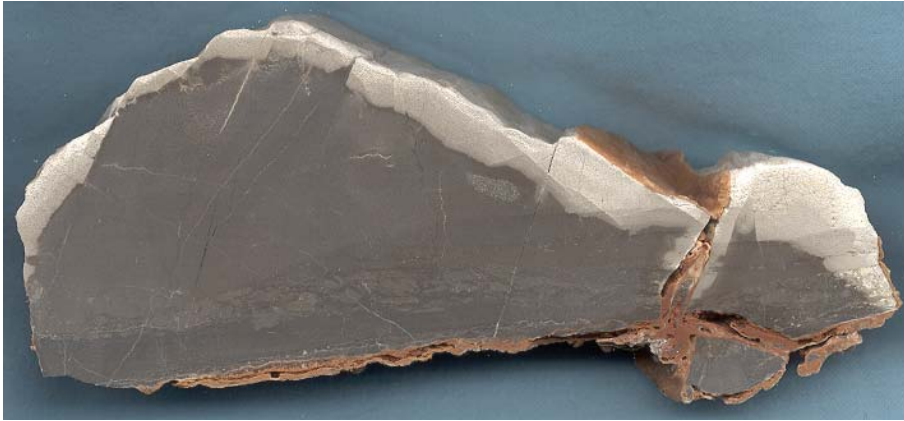
Slika 6.2.7. Prerez vzorca Ma3 iz Martinske jame. (Dolžina prereza je 5 cm.)

6.2.4. Kremljak

Iz Stranskega rova jame je vzorec **Kr1**- temen apnenec z močno preperelim robom.

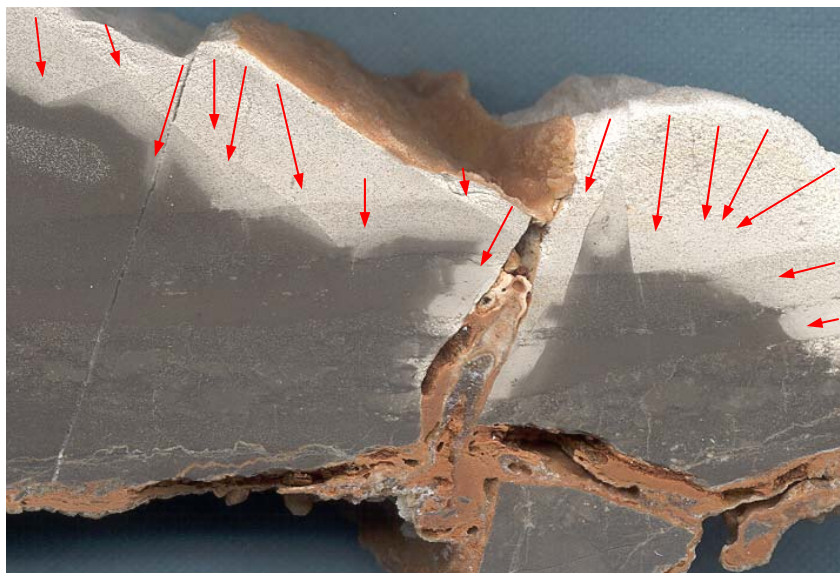
Vzorec Kr1

Površina vzorca je preperela, rahlo znata in bele barve. Ponekod jo prekriva tanka plast rjave sige. Vzorec je prelomljen, v razpoki se je infiltrirala ilovica rjave barve, v ilovici pa je kristalil prozoren vlaknat kalцит. Prerez vzorca je na sl. 6.2.8..



Slika 6.2.8. Prerez vzorca Kr1 iz Krempljaka. (Dolžina prereza je 16 cm.)

Apnenec ni homogen, v spodnjem delu je najprej svetlo temnosiv (N4) in homogen, ki prehaja v brečasti del z vzporedno orientiranimi svetlejšimi klasti (svetlosivi N7). Zgornji del je kompakten, homogen in srednjesvetlosive barve (N6). Zgornji rob vzorca je močno preperel, porozen. Prehod med neporoznim in poroznim zelo svetlosivim (N8) delom je dokaj oster, razen tam, kjer so ločeni z razpokami, pojavljajo svetlosivo (N7) obarvani predeli. Skrajni zunanji rob in predel ob prelomu je pa bele barve (N9) in močno porozen. Vzorec sekajo številne razpoke, ene so odprte, druge pa zapolnjene s kalcitom. Ob nekaterih odprtih razpokah je opazno tudi močnejše preperevanje. Močnejše je bilo preperevanje tudi ob razpoki, kjer so različno močno prepereli deli zamaknjeni med seboj. Zamik kaže na to, da je razpoka mlajša od preperevanja v osrednjem delu vzorca, preperevanje ob razpoki (vzporedno belo polje) pa je mlajše (sl. 6.2.9.).



Slika 6.2.9. Različne stopnje preperelosti v prerezu vzorca Kr1. Skozi s kalcitne žile preperevanje napreduje počasneje. Puščice nakazujejo možne smeri napredovanja preperevanja. (Dolžina izreza je 7 cm.)

6.2.5. Jama II na Prevali

Iz južnega rova jame sta vzorca *Pr1* – del stropa pasaže in *Pr2* – del izjedene stene.

Vzorec Pr1

Površina apnenca je preperela, prekrita z rjavkastim oprhom in skorjo rjave sige. Površina je posejana z mrežo luknjic premera do 0,5 cm in globino do 1 cm. V prerezu luknje niso vidne. Analizirala sem dva prereza vzorca, sl. 6.2.10. in 6.2.11..

Površina prvega prereza (sl. 6.2.10.) je neenakomerno obarvana, opazen je prehod iz temnega, srednjesiv (N5), v svetlejši, svetlosiv (N7), del vzorca z vidnimi fosilnimi ostanki in drugače obarvanimi litoklasti. Vzorec prepletajo odprte razpoke, ob katerih je kamnina močnejše preperela. Ob njih se pojavljajo tudi manjše votlinice, nastale z raztapljanjem.



Slika 6.2.10. Prerez vzorca Pr1 iz Jame II na Prevali. Osrednji del vzorca je kompakten in različno obarvan, prepereli rob je razbarvan in močno porozen. Po površini je rjava siga, ki je od vzorca ostro ločena. (Širina prereza je 6,5 cm.)

V nekaterih razpokah je opazna infiltrirana ilovica. Prehod iz sivega, kompaktnega dela v porozni in razbarvani del je oster. Močno preperel rob vzorca je zelo svetlosive (N8) do bele (N9) barve in zaradi velike poroznosti tudi mehak.

Drugi prerez (sl. 6.2.11.) je bolj homogen, notranji del je temen, srednjesiv (N5) in kompakten, v njem so vidne posamezne foraminifere. Prehod iz kompaktnega v porozni in popolnoma razbarvani del je oster. Prepereli rob je bele barve (N9) in od malo do zelo porozen. Vzorec prepletajo odprte razpoke, ob katerih je kamnina v notranjost močnejše preperela. Po površini je lepo vidna skorja rjave sige, ki je v spodnjem delu debelejša.

Apnenec vsebuje foraminifere (miliolide, majhne numulitine / thanecij) in alge. Poleg fosilov so v apnencu še intraklasti in peleti. Posamezni delci so usmerjeni, opazne so sinsedimentne zapolnitve (s sedimentom). Mikritna osnova je pretežno rekristalizirana v mikrosparit (grainstone). Apnenec je rekristalizirani intrabiopelmikrit.



Slika 6.2.11. Drugi prerez vzorca Pr1 iz Jame II na Prevali. (Širina prereza je 7 cm.)

Vzorec Pr2

Površina apnenca je preperela, izjedena (ali izpraskana) in prekrita z rjavkastim oprhom. Prerez vzorca je na sl. 6.2.12..



Slika 6.2.12. Prerez vzorca Pr2 in Jame II na Prevali. Razpoke večinoma napredovanje raztapljanja omogočajo, ena od njih pa preprečuje njegovo prodiranje. (Širina prereza je 7 cm.)

Površina prereza je neenakomerno obarvana, viden je prehod iz kompaktnega temnega, srednjesivo obarvanega dela (N5), v svetlejši, svetlosivo obarvani del (N7). V kompaktnem delu prereza so vidni fosilni ostanki in posamezne svetle pike.

Vzorec **Pr2** prepletajo odprte in s kalcitom zapolnjene razpoke. Razpoke večinoma napredovanje raztapljanja pospešujejo, ena od njih pa preprečuje njegovo prodiranje v kompaktni del kamnine (sl. 6.2.13.). Prehod iz sivega kompaktnega dela v porozni in razbarvani del, je oster vendar valovit. Na prehodu med obema deloma obstaja okrog 0,5 cm debela, nekoliko temneje obarvanega porozna cona (zelosvetlosiva N8). Močno preperel zunanji del vzorca je bele barve (N9) in zaradi velike poroznosti tudi mehak.

Apnenec vsebuje fosilne ostanke krinoidov (prekristaljeni - potemniijo na 90⁰) in foraminifer (numulitine?). Poleg fosilov so v apnencu še intraklasti in peleti. Apnenec prepredajo kalcitne žile. Mikritna osnova je pretežno rekristalizirana v mikrosparit. Apnenec je rekristalizirani intrabiopelmikrit. Zunanji del apnenca je tako močno preperel, da so njegove strukture komaj še opazne.



Slika 6.2.13. Izrez vzorca Pr2 prikazuje način prodiranja raztapljanja ob odprtih razpokah in v kompaktno kamnino (mozaično napredovanje). Kalcitna žila napredovanje preperavanja ustavi za nekaj časa, nato pa tudi sama preperi in postane prepustna. (Širina izreza je 2,5 cm.)

6.2.6. Turkova jama

Iz jame sta vzorca **TJ1** – popolnoma preperel dolomit ob točki 30 in **TJ2** – preperel dolomit iz rova pri točki 24.

Vzorec TJ2

Površina vzorca je preperela, peskasta in delno prekrita z rjavkastim oprhom. Prerez vzorca je na sl. 6.2.14.. Dolomit je gost, drobnokristalen, brez fosilnih ostankov. Površina prereza je precej pretirna, sekajo ga različno usmerjene razpoke, ki so odprte ali pa zapolnjene s kalcitom. Ob nekaterih odprtih razpokah je dolomit tudi močneje preperel. Temnejši, manj prepereli deli vzorca so svetlosive barve (N7), proti zunanjemu, bolj preperelomu robu je barva zelo svetlosiva (N8). Najbolj porozni deli so bele barve (N9). Viden je prehod iz

kompaktnega temnega, srednjesimo obarvanega dela (N5), v svetlejši, svetlosivo obarvni del (N7).



Slika 6.2.14. Prerez vzorca TJ2 iz Turkove jame. (Širina prereza je 4,5 cm.)

6.2.7. Remergrund II

Iz Dragove pasaže je vzorec **Rm** – prepereli zrnati dolomit (sl. 6.2.15.).



Slika 6.2.15. Prerez vzorca Rm iz Remergrunda II. Rob vzorca je močno preperel. (Širina prereza je 4 cm.)

Vzorec Rm

Površina vzorca je preperela in hrapava. Iz površine štrlijo dolomitna zrna. Prerez vzorca je na sl. 6.2.15.. Barva dolomita je enakomerna, preperelost je najmočnejša na zunanjem robu vzorca. Sveži del je gost dolomit srednj svetlosiv (N6), prepereli rob je pa močno porozen in bele barve (N9).

Gre za po robovih močno preperel poznodiagenetski dolomit (dolosparit), v katerem je prisotna medzrnska poroznost. Raztapljanje v kamnino napreduje po kontaktih med zrni, ki so tudi močno preperela in ob odprtih razpokah.

6.2.8. Jama pod Pečno rebrijo

V jami so stene obeh rovov razjedene s kondenzno korozijo. Vendar kamnina na površini ni preperela, ampak se bel kalcitni oprh izloča na steno preoblikovano s selektivnim raztapljanjem. Gre za izločanje iz kondenzne vlage. Primer dodajam zaradi razlike v videzu prereza preperete kamnine in kamnine prekrte z oprhom.

Iz jame je vzorec **JP1** - apnenec z oprhom.

Vzorec JP1

Površina vzorca je prekrita z drobnoznatim oprhom bele barve. Zrna so povezana z mlajšimi kalcitnimi kristali. Prerez vzorca je na sl. 6.2.16..

Apnenec je trden in kompakten, enakomerno obarvan, z neenakomerno porazdeljenimi fosilnimi ostanki, predvsem delci rudistnih školjk. Apnenec je svetlosive barve (N7), seka ga nekaj kalcitnih žil in ne kaže znakov preperelosti. Na stiku z oprhom štrli iz površine apnenca nekaj debelokristalnih delov školjk.

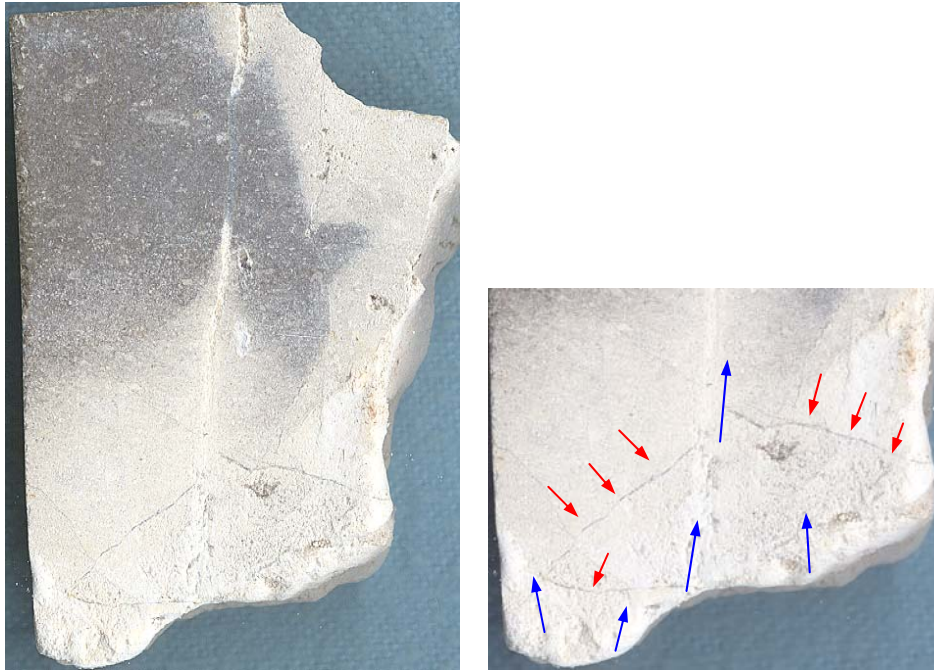


Slika 6.2.16. Prerez vzorca JP1 iz Jame pod Pečno rebrijo. Kalcitni oprh in drobni kristali so izločeni na nepreperelo kamnino, katere površina je selektivno izjedena. (Širina prereza je 5,5 cm.)

6.2.9. Prodiranje vode v preperelo kamnino

Voda v prepereli del kamnine prodira izredno hitro. Navzgor jo vlečejo kapilarne sile, malo več časa pa vlaga potrebuje, da zaobide ali pa prebije kalcitne žile. Kalcitne žile napredovanje raztopine za nekaj časa ustavi, dokler tudi sama ne preperi in postane prepustna.

Hitrost prodiranja vlage v preperelo kamnino sem preizkusila tudi s preprostim eksperimentom. Prepereli del vzorca **Ma2** sem izpostavila v stik s stoječo vodo in opazovala napredovanje vlage v preperem delu vzorca, ki je prepreden z odprtimi razpokami in kalcitnimi žilami. Vzorec sem v začetku in na koncu poizkusa stehtala.



Slika 6.2.17. V stik z vodo sem izpostavila prepereli del vzorca Ma2. V prerezu vzorca je vidna močnejša preperelost ob odprtih razpokah (modre puščice) in zaustavljanje ob kalcitnih žilah (rdeče puščice). (Širina prereza je 2,4 cm.)

V prerezu vzorca **Ma2** (sl. 6.2.17.) sta dve izraziti kalcitni žili (označeni z rdečimi puščicami), ki predstavljata oviro pri napredovanju korozivne vlage in s tem preperevanja. Najmočnejša odprta razpoka poteka po sredini vzorca. Ob njej je kamnina tudi najbolj preperela v globino. Kalcitni žili sta neprepereli, zato vlaga ob napredovanju ti dve oviri zaobide po odprtih razpokah, ki ju sekajo in ob robovih vzorca, kjer sta kalcitni žili že prepereli in zato vodo prepustni (sl. 6.2.18.).

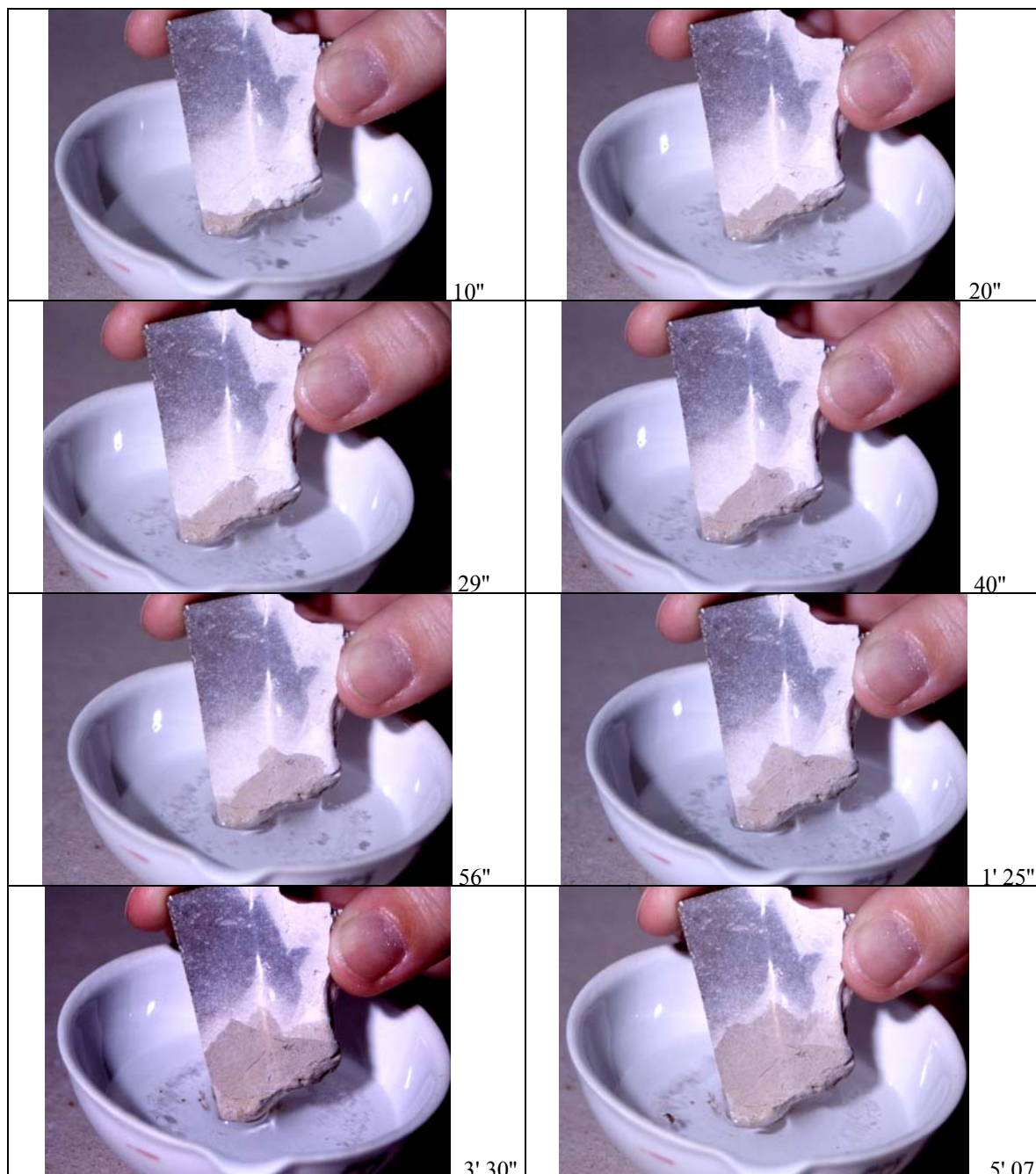
Eksperiment je potekal do takrat, da je voda prišla do konca preperete (popolnoma razbarvane) cone. Podatki so prikazani v razpredelnici na sl. 6.2.18., fotografije posameznih stopenj v prodiranju vlage pa so na sl. 6.2.19..

Vzorec je v začetku poizkusa tehtal 28,65 g. Po 5 minutah vlaženja pa 31,64 g. Razlika v teži je 2,99 g. V razliko teže sem upoštevala tudi delčke, ki so se razpustili in plavali na površini stoječe vode (filtriranje), bilo jih je 0,1414 g .

To pomeni, da v 5 minutah vlaženja v reakcijo z izbranim vzorcem, vstopa skoraj 3 g vlage.

STOPNJE	ČAS	OPIS NAPREDOVANJA VLAGE
1.	10"	Do prve manjše žilice; 0,4 cm od izvora.
2.	20"	Do glavne razpoke in malo čez; 1,2 cm od izvora.
3.	29"	Proti drugi izrazitejši kalcitni žili; 2 cm od izvora.
4.	40"	Do druge izrazite kalcitne žile; 2,4 cm od izvora.
5.	56"	Ob glavni razpoki na sredini in čez kalcitne žile.
6.	1' 25"	Ob glavni razpoki; 1 cm v višino in ob robu.
7.	3' 30"	Ob robu do tanjših kalcitnih žil; na višini 1,5 cm.
8.	5' 07"	Skoraj do vrha preperele (razbarvane) cone.

Slika 6.2.18. Razpredelnica časovnega poteka eksperimenta. Prodiranje vlage v preperelo kamnino je zelo hitro. (Fotografije poteka eksperimenta so na naslednji sliki.)



Slika 6.2.19. Gibanje vode je omejeno z kalcitnimi žilami in pospešeno ob odprtih razpokah. (Slike si sledijo po stopnjah iz razpredelnice na sl. 6.2.16.).

6.2.10. Diskusija o rezultatih optičnih analiz in zaključki

V prerezih preperelih apnencev in dolomitov se prehod iz sveže kamnine v prepereli del vidi zelo lepo. Lahko opazujemo različne stopnje preperelosti, strukture, po katerih preperevanje napreduje v kamnino in debelino močno preperelih con. Pod mikroskopom je videti, da je na delu raztapljanje kamnine, za katerim ostajajo neraztopljeni deli, vmes pa ponekod istočasno kristali zapolnitev v obliki sparita. V primerih, ko ni sekundarne kristalizacije poroznost ostaja. V mikroskopskih zbruskah je problem slaba ločljivost, zrna so premajhna. Raztapljanje načinja zrna enako močno, manjša raztopi, večja ostajajo. Tista, ki jih ne raztopi do konca, ostajajo kot drobni karbonatni delčki, katerih struktura ni več razpoznavna (karbonatni drobir), poroznost kamnine je tako majhna, da pod mikroskopom ni opazna. Pri pripravi vzorcev so nastale težave zaradi izpadanja zrn, tako da v mikroskopskih zbruskah nimam lepo vidnih prehodov iz sveže kamnine v preperelo.

Raztapljanje v kamnino napreduje po odprtih razpokah in po nevidni mikroporoznosti, ki je ne vidimo niti v prerezih, niti pod mikroskopom. Med preperevanjem se kamnina najprej rahlo razbarva. Z nadaljevanjem preperevanja se razbarvanost postopoma večja, kar vodi do popolne razbarvanosti, ko je ostanek kamnine bel. S preperevanjem, to je raztapljanjem posameznih delov kamnine, pa v začetku kompaktna kamnina postaja vse bolj porozna. In to ne samo ob razpokah, kot bi bilo pričakovati, ampak tudi v popolnoma kompaktnih delih. Agresivna raztopina dele kamnine največkrat selektivno raztaplja, najprej manjša zrna in stike ter cement med zrni, kar je lepo izraženo v prekristaljenih apnencih in poznodiagenetskem dolomitu. Lahko pa raztaplja tudi dele mikrita, ki se na videz nikakor ne razlikujejo od sosednjih delov. Morda je mikritizacija kamnine zakrila prvotne strukture ali pa v kamnini že od začetka obstajajo nevidne strukture, ki so tudi podvržene hitrejšemu raztapljanju.

Raztapljanje napreduje po izbranih strukturah v notranjost kamnine in za seboj pušča vedno večje in povezane pore, ki se lahko vežejo tudi v manjše votlinice. Za prodirajočo agresivno raztopino pa ostaja porozen kamninski skelet, katerega delci so močno prepereli, brez barve in oblike, ki dobiva značilno spužvasto strukturo. Delci so v odvisnosti od primarne strukture kamnine lahko velikostnega reda melja ali gline. V primeru, da se raztapljanje nadaljuje, se lahko spužvasta struktura sesuje in zunanji del nekoč kompaktne kamnine, postane popolnoma mehak. Raztapljanje napreduje posebno hitro po odprtih razpokah, zapolnjene razpoke pa napredovanje ovirajo. Ovirajo ga pa tudi manj topni deli kamnine in to ne samo večji kristali, ampak tudi polja mikrita, ki so zaradi meni neznanega vzroka manj topna. Te ovire raztapljanje pri napredovanju zaobide in jih »napade« tudi od strani in od zadaj. Ko pa enkrat preperijo tudi te manj topne ovir, postanejo prepustne za prevajanje novo prodirajoče agresivne vlage. Raztapljanje napreduje v kamnino mozaično, da pa bi obstajali centri preperevanja, od koder bi se radialno širili, nimam dovolj dokazov.

6.3. Analiza z rentgensko difrakcijo

6.3.1. Uvod

Kvalitativna mineralna sestava vzorcev je bila določena z metodo praškovne rentgenske difrakcije. Vzorci so bili analizirani z difraktometrom Philips na Oddelku za geologijo NTF. Pogoji snemanja so bili anoda $\text{Cu}_{K\alpha}$, pri napetosti 40 kV in toku 30 mA, uporabljena sta bila Ni filter in proporcionalni števec ter avtomatska divergenčna zaklopka. Snemanje je bilo zvezno, s hitrostjo $2^\circ 2\Theta/\text{min}$ v območju kota 2Θ od 2° do 70° . Difraktogrami so v PRILOGI (glej Poglavje 10), rezultati analiz in primerjave med sestavo vzorcev pa so predstavljeni v nadaljevanju.

Predvsem sem želela ugotoviti, ali obstoja razlika v mineralni sestavi med svežim in preperelim delom vzorca. Obdelani so bili vzorci preperelih kamnin iz Pečine v Borštu, Martinske jame, Krempljaka, Jame II na Prevali, Turkove jame, Remergrunda II in Spodmola na Ždroclah.

Na vzorcih kamnin sem, če je bilo to možno, glede na stopnjo preperelosti izločila posamezna polja z oznakami a, b in c. Tako je

- **a** - sveža kamnina,
- **b** - razbarvani del in
- **c** - prepereli del.

Deleži posameznih mineralov v vzorcih so predstavljeni relativno, preračunani so glede na jakost njihovega glavnega odboja.

6.3.2. Pečina v Borštu

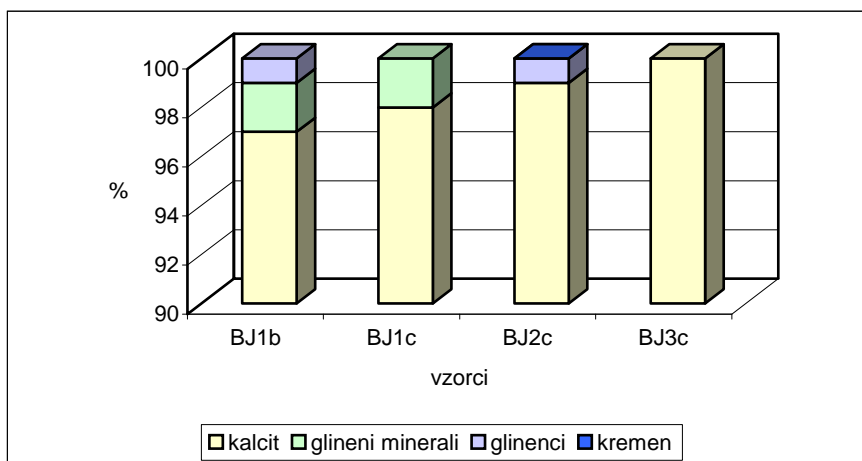
Iz Pečine v Borštu sem analizirala tri vzorce preperlega apnenca s sten Končnega rova in dva vzorca peščene naplavine, ki je v neposrednem stiku s steno (sl. 6.3.1.).



Slika 6.3.1. Flišna naplavina v stiku s preperelim apnencem v steni Končnega rova Pečine v Borštu.

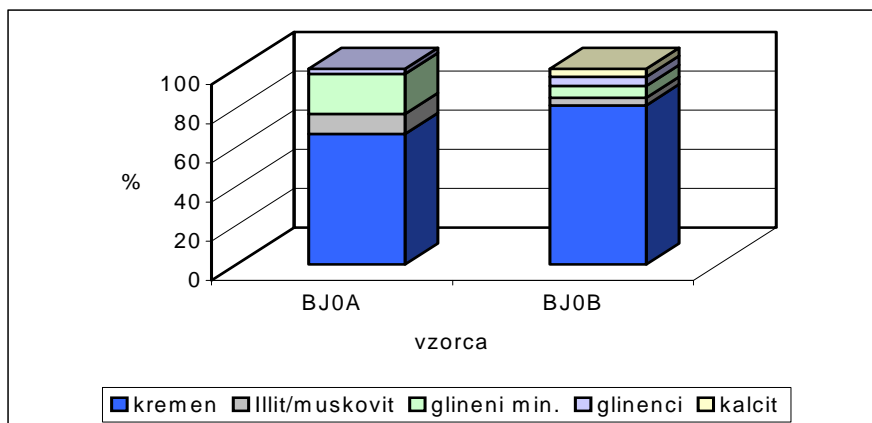
Vzorec **BJ1**, prepereli skalni rogelj z vzhodne stene Končnega rova, sem ločila na razbarvani del **BJ1b** in prepereli del **BJ1c**, ki je mehek in zelo porozen. Vzorec **BJ2** je mehka preperina s stene nad vhodom v Odkopani rov, vzorec **BJ3** pa zelo mehka preperina s stene ob vhodu v Odkopani rov. Oba imata zato oznako c. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.2..

V **BJ1b** prevladuje kalcit (97 %), v sledih so prisotni glinenci in glineni minerali (verjetno montmorillonit in mineral iz illit/muskovitove skupine). Tudi v **BJ1c** je največ kalcita (98 %), v sledih so prisotni glineni minerali (verjetno je montmorillonit).



Slika 6.3.2. Mineralna sestava preperlega apnenca iz Končnega rova Pečine v Borštu.

Analizirana sta bila tudi dva vzorca peščene naplavine. Prvi vzorec **BJ0A** je naplavljeni pesek iz začetka Odkopanega rova, drugi vzorec **BJ0B** je kepa peska iz vdolbine v močno prepereli steni Odkopanega rova. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.3..



Slika 6.3.3. Mineralna sestava peščene naplavine iz Odkopanega rova Pečine v Borštu.

V peščeni naplavini iz začetka Odkopanega rova vzorec **BJ0A** prevladuje kremen s 67 %, 10 % je minerala illit/muskovitove skupine, 20 % je ostalih glinenih mineralov ter glinencev 3 %. V kepi peska s preperle stene (vzorec **BJ0B**) je 81 % kremen, 5 % glinencev in po 4 % kalcita ter minerala iz illit/muskovitove skupine.

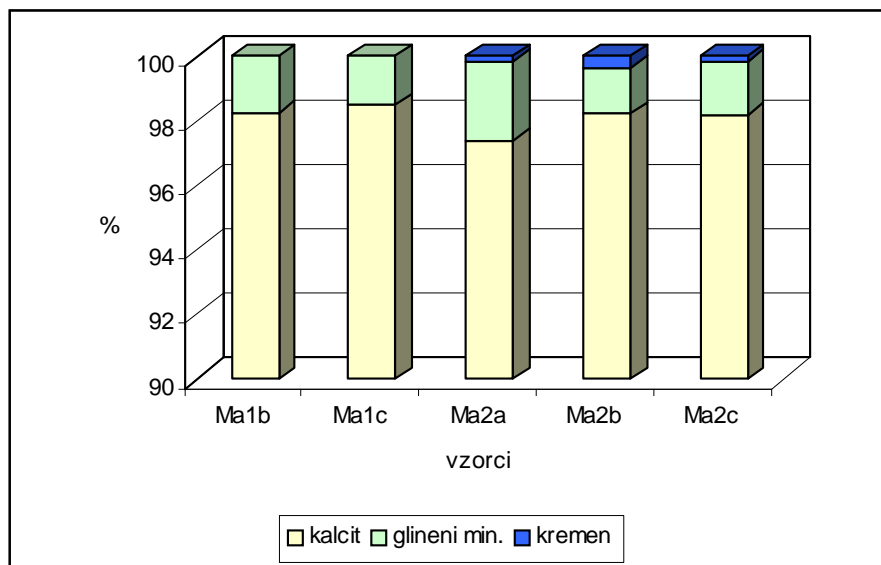
Mineralna sestava kaže na izvor peščene naplavine iz flišnih kamnin Brkinov, s katerih vode dotekajo v slepo dolino Jezerina. V naplavini iz rova kalcita ni. V vzorcu iz vdolbinice v prepereli steni je kalcita malo. Njegova mineralna sestava je podobna mineralni sestavi peščene naplavine v dnu rova.

Mineral kalcit vzorcu s preperete stene prispevajo preperela zrna apnenca, ki so v neposrednem stiku z naplavino.

6.3.3. Martinska jama

Iz Martinske jame sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala dva vzorca preperlega apnenca s sten Boeganovega rova in dva vzorca naplavine, ki je v neposrednem stiku s steno jamskega rova.

Vzorec **Ma1**, ki je preperela skalna štrlina z vzhodne stene rova, sem za rentgensko analizo ločila na razbarvani del **Ma1b** in prepereli del **Ma1c**. Vzorec **Ma2**, ki je del preperete plasti apnenca pri koncu rova, sem za rentgensko analizo ločila na sveži del **Ma2a**, razbarvani del **Ma2b** in prepereli del **Ma2c**. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.4..



Slika 6.3.4. Mineralna sestava preperlega apnenca iz Boeganovega rova Martinske jame.

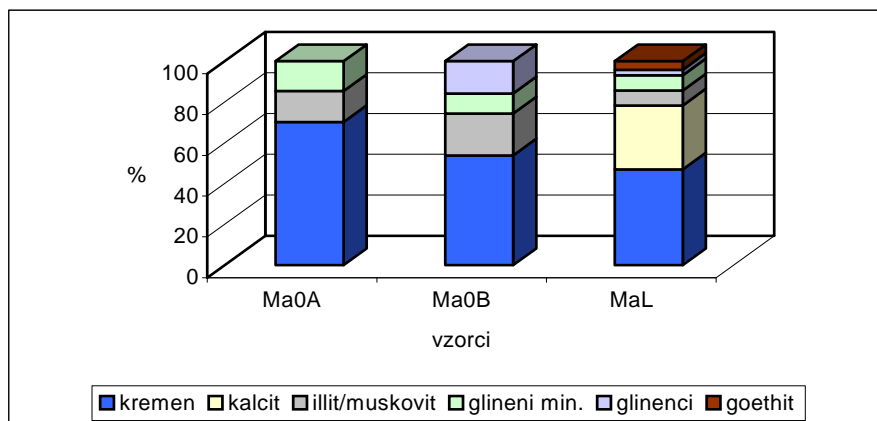
Razbarvani del apnenca, vzorec **Ma1b**, sestavlja skoraj samo kalcit, v sledih pa so prisotni glineni minerali (verjetno montmorillonit). V **Ma1c** je samo kalcit, glineni minerali (montmorillonit) so v sledih. V vzorcu **Ma2a** je kalcita 97 %, v sledih so glineni minerali (montmorillonit) in kremen. Tudi vzorca **Ma2b** in **Ma2c** vsebujeta samo kalcit 98 %, glineni minerali (montmorillonit) in kremen so v sledovih.

V preperlem delu apnenca so kalcitovi odboji višji kot v nepreperlem, netopnih mineralov pa je nekaj več v vzorcih preperlega apnenca. V preperelih delih vzorcev je malo manj glinenih mineralov.

Analizirala sem še dva vzorca naplavine. Prvi, **Ma0A** je naplavina iz stranskega rova pri merski točki 21, drugi, **Ma0B** je s poličke nad vzorcem Ma2 v Boeganovem rovu, kjer je naplavljeni sediment v neposrednem stiku z močno preperelim apnencem. Analizirala sem tudi rdečo ilovico **Ma0L** iz lezike nad vzorcem Ma2, da bi ugotovila ali je netopen ostanek apnenca ali vložek drugačne kamnine ali celo infiltrirana ilovica. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.5..

V vzorcu naplavine iz stranskega rova **Ma0A** je največ kremen (70 %), glinenih mineralov in minerala illit/muskovitove skupine je po 15 %, v sledih pa je goethit. V vzorcu naplavine iz Boeganovega rova **Ma0B** prevladuje kremen (54 %), glinencev (plagioklaz) je 16 %, minerala illit/muskovitove skupine je 20 %, ostalih glinenih mineralov je 10 %. V rdeči ilovici iz lezike **Ma0L** prevladuje kremen (47 %), veliko je tudi kalcita (31 %), minerala

illit/muskovitove skupine je 7 %, ostalih glinenih mineralov je 8 %, goethita je 4 %, glincev (plagioklaz) je 3 %. Hematit je v sledeh.

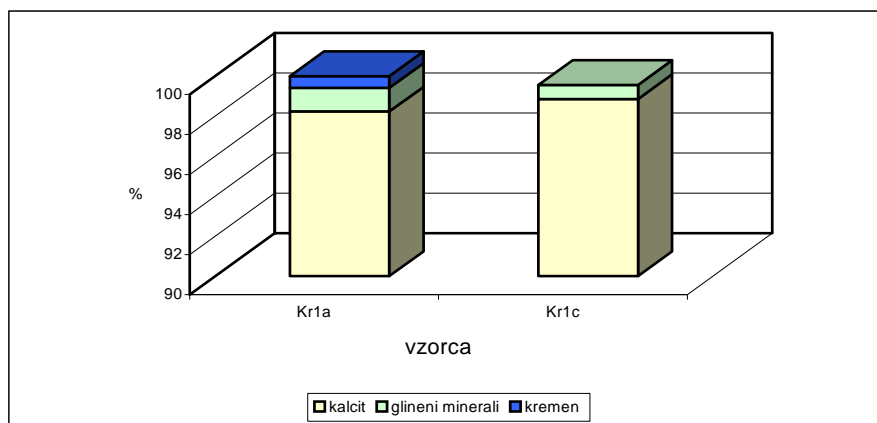


Slika 6.3.5. Mineralna sestava naplavine iz Martinske jame.

Mineralna sestava kaže na izvor peščene naplavine iz flišnih kamnin, najverjetneje z Brkinov. Rdeča ilovica iz lezike pa je mešanica netopnega ostanka apnenca in infiltrirane ilovice.

6.3.4. Krempljak

Iz Krempljaka sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala vzorec preperlega apnenca s stene Stranskega rova in vzorec rahlo vezane ilovnate naplavine. Vzorec **Kr1**, prepereli apnenec s severne stene Stranskega rova, sem ločila na sveži del **Kr1a** in prepereli del **Kr1c**. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.6..



Slika 6.3.6. Mineralna sestava svežega in preperlega apnenca iz Stranskega rova Krempljaka.

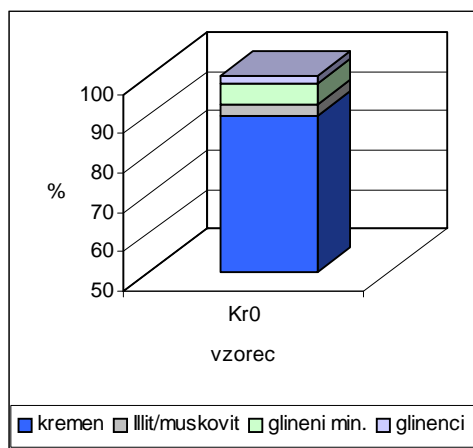
V vzorcu **Kr1a** je največ kalcita (98 %), v sledeh so glineni minerali in kremen. V vzorcu **Kr1c** je 99 % kalcita, glineni minerali in kremen so v sledeh.

V preperlem delu so kalcitovi odboji višji kot v nepreperlem. Netopnih mineralov je več v svežem delu kot v preperlem, kar se izmika logični razlagi. Zakaj je več netopnih ostankov v svežem delu apnenca kot v preperlem mi ni jasno, saj bi se s preperevanjem, količina netopnega ostanka morala večati. Izgleda pa, da se med preperevanje apnenec čisti

in so glineni minerali odplavljeni (sprani iz njegove strukture) lahko v ionski ali pa verjetneje v koloidni obliki.

Analiziran je bil tudi vzorec laminirane naplavine s konca Stranskega rova **Kr0**, mineralna sestava vzorca je prikazana na sl. 6.3.7..

V vzorcu **Kr0** je največ kremen (90 %), glinenih mineralov je 5 %, minerala illit/muskovitove skupine je 3 % in glinenci so v sledih. Peščeni sediment je bil v jamo naplavljen najverjetneje iz flišnega zaledja.

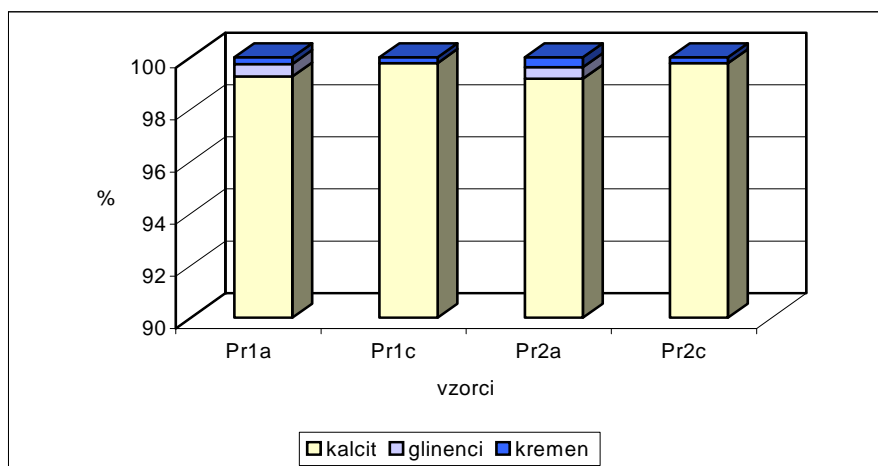


Slika 6.3.7. Mineralna sestava peščene naplavine iz Stranskega rova Krempljaka.

6.3.5. Jama II na Prevali

Iz Jame II na Prevali sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala dva vzorca preperlega apnenca s stene in dva vzorca naplavine.

Vzorec **Pr1**, ki je prepereli apnenec s stropa pasaže v južnem rovu, sem za rentgensko analizo ločila na sveži del **Pr1a** in prepereli del **Pr1c**. Vzorec **Pr2**, ki je del preperete in izjedene stene pred vhodom v južni rov, sem za rentgensko analizo ločila na sveži del **Pr2a** in prepereli del **Pr2c**. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.8..

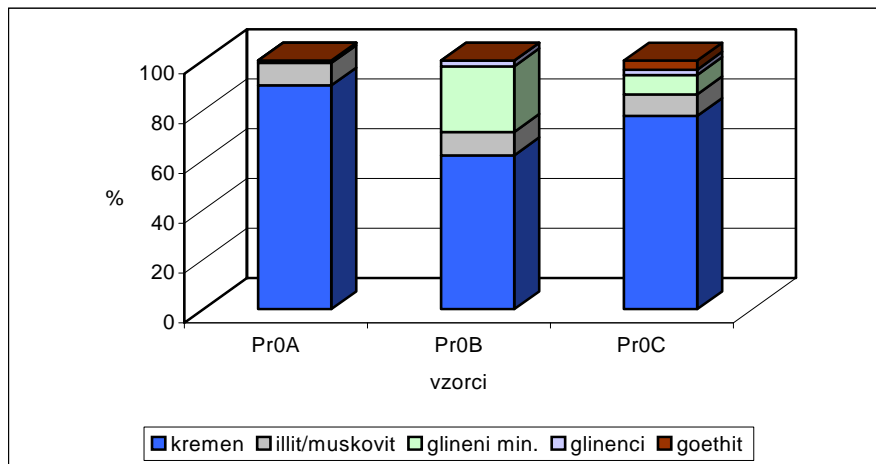


Slika 6.3.8. Mineralna sestava preperlega apnenca iz Jame II na Prevali.

V svežem delu apnenca **Pr1a** je skoraj samo calcit, v sledih so glinenci in kremen; v prepereltem delu apnenca **Pr1c** je samo calcit s kremenom v sledovih. V svežem delu apnenca **Pr2a** je samo calcit z glinenci in kremenom v sledih, v prepereltem delu **Pr2c** je samo calcit s kremenom v sledih.

V obeh vzorcih so v svežem apnencu prisotni tudi glinenci. V preperem delu jih ni niti v sledeh, kar pomeni, da so se med preperevanjem odstranili. Kam so šli glinenci in v kakšni obliki, mi ni jasno. Najverjetneje gre za odplavljanje v koloidni obliki. Kremen pa je ostal v preperini. Glavni kalcitov odboj je v *Pr1* višji v preperem delu, v *Pr2* pa v svežem delu, kar pomeni, da ni povezave med preperevanjem in urejevanjem kalcitove kristalne rešetke.

Iz jame sem analizirala še tri vzorce ilovice. Prvi vzorec *Pr0_A* je naplavina iz Žmohtnega rova, vzorec ilovice *Pr0_B* je bil nalepljen na preperelo in izjedeno steno ob vzorcu apnenca *Pr2*. Vzorec *Pr0_C* je črno obarvani del vzorca *Pr0_B*. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.9..



Slika 6.3.9. Mineralna sestava naplavin iz Jame II na Prevali.

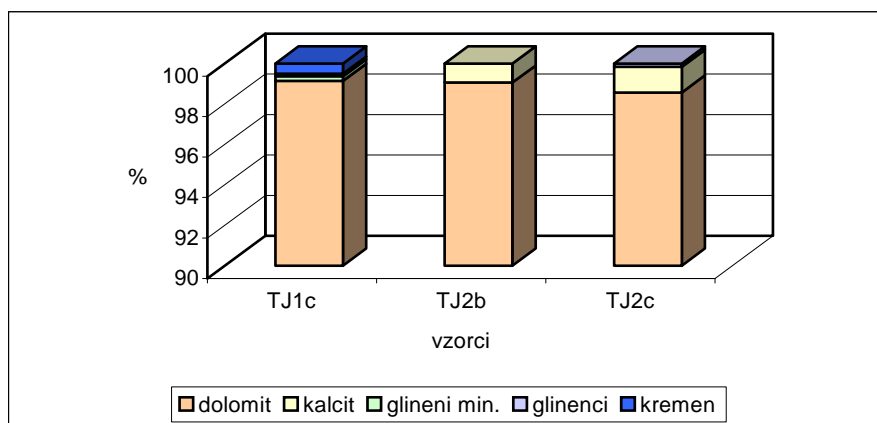
Vzorec ilovice *Pr0_A* iz Žmohtnega rova vsebuje kremen (90 %), minerala illit/muskovitove skupine je 9 % , v sledeh so kaolinit, glinenci in goethit (ZUPAN HAJNA 1995). Vzorec ilovice, nalepljene na izjedeno steno *Pr0_B*, vsebuje kremen (62 %), mineral illit/muskovitove skupine 9 %, ostalih glinenih mineralov (montmorillonit) 26 % in v sledeh glinence ter goethit. V črno obarvanem delu nalepljene naplavine, vzorec *Pr0_C*, prevladuje kremen (78 %), minerala illit/muskovitove skupine je 9 %, ostalih glinenih mineralov je 8 %, goethita 4 % in v sledeh so glinenci.

Mineralna sestava kaže na izvor peščenega sedimenta iz Žmohtnega rova iz flišnih kamnin, na steno nalepljena ilovica (glineni melj) ima enako mineralno sestavo, le da vsebuje več glinenih mineralov. Vsekakor ilovice niso netopni ostanek apnenca, ampak so v jamo nanešene. Stik med paleocenskimi apnenci in eocenskim flišem je v bližini jame, tako da bi v jamo prepereli fliš lahko nanosila že manjša ponikalnica. Lahko pa so to ostanki nanosov večjega vodnega toka, ki je oblikoval tudi Škocjanske jame.

6.3.6. Turkova jama

Iz Turkove jame sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala dva vzorca preperlega dolomita in dva vzorca ilovice.

Vzorec *TJ1* je popolnoma prepereli dolomit s stene glavnega rova pri točki 30, ki je zelo mehak, zato ima oznako *TJ1c*. Vzorec *TJ2* je del preperlega dolomita v stranskem rovu pri točki 24. Ločila sem ga na razbarvani del *TJ2b* in prepereli del *TJ2c*. Mineralna sestava vseh vzorcev je prikazana na sl. 6.3.10..



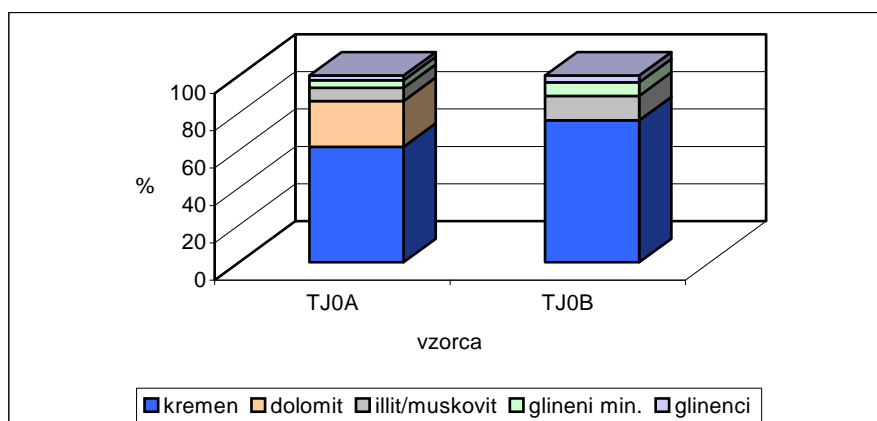
Slika 6.3.10. Mineralna sestava vzorcev preperlega dolomita iz Turkove jame.

V popolnoma preperelom dolomitu (vzorec **TJ1c**) je 99 % dolomita. V sledeh so glineni minerali, glinenci in kremen. V razbarvanem dolomitu, vzorec **TJ2b**, je 99 % dolomita, v sledeh je samo kalcit. V preperelom delu dolomita **TJ2c** je 99 % dolomita, v sledeh pa so kalcit in glinenci.

V vzorcih iz preperlega dela dolomita so dolomitovi odboji višji kot v manj preperelom vzorcu. Dolomitu sem izračunala tudi stopnjo urejenosti kristalne rešetke (glej poglavje 6.1.). V vzorcu preperlega dolomita **TJ1c** je stopnja urejenosti kristalne rešetke 0,69; v **TJ2b** je 0,8 in v **TJ2c** je stopnja urejenosti 0,6. Stopnja urejenosti kristalne rešetke dolomita je tako najvišja v najmanj preperelom delu vzorca. To pomeni, da se s preperevanjem verjetno ruši urejenost kristalne rešetke.

Analizirana sem še dva vzorca naplavine. Prvi vzorec, **TJ0_A**, je rdeča ilovica v stiku s preperelim dolomitom, tik ob vzorcu **TJ1**. Vzorec rjave laminirane ilovice **TJ0_B** pa je iz rova zapolnjenega z naplavljenimi sedimenti ob točki 30. Mineralna sestava vzorcev je prikazana na sl. 6.3.11..

Vzorec rdeče ilovice **TJ0_A** vsebuje 62 % kremenca, 24 % dolomita, 7 % minerala illit/muskovitove skupine in 4 % ostalih glinenih mineralov, v sledeh so glinenci. V vzorcu naplavljenih laminiranih ilovic **TJ0_B** je 76 % kremenca, 13 % minerala illit/muskovitove skupine in 7 % ostalih glinenih mineralov ter 4 % glincev.



Slika 6.3.11. Mineralna sestava vzorcev ilovic iz Turkove jame.

Mineralna sestava kaže na izvor laminirane ilovice iz ostankov preperevanja spodnjetriasnih skrilavih kamnin in peščenjakov, ki se nahajajo v stiku z zgornjetriasnimi

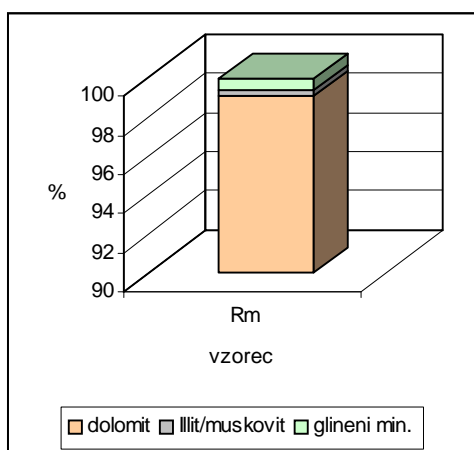
dolomitom v bližini vhoda v jamo. Rdeča ilovica, ki je v neposrednem stiku s preperelim dolomitom, zato dolomita tudi malo vsebuje.

6.3.7. Remergrund II

Iz Remergrunda II sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala samo vzorec preperlega dolomita s stene Dragove pasaže v vhodnem delu jame.

Vzorec **Rm** je zrnat dolomit s stene Dragove pasaže v vhodnem delu jame, njegova mineralna sestava je prikazana na sl. 6.3.12..

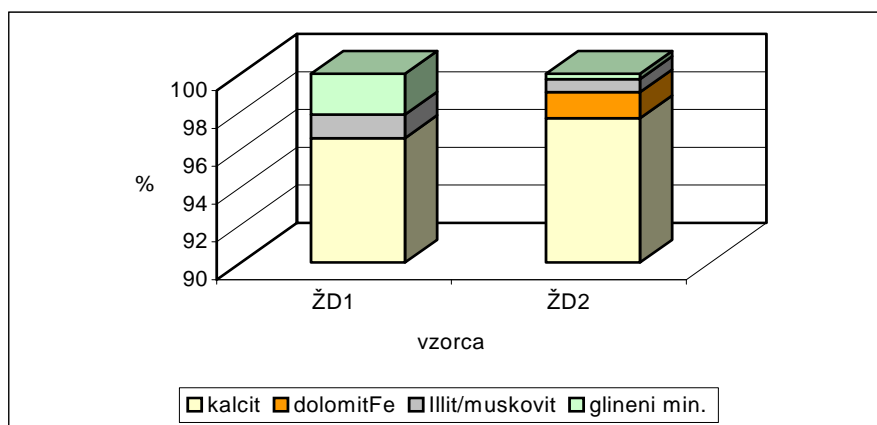
V vzorcu dolomita **Rm** je 99 % dolomita, v sledeh so glineni minerali. Dolomitu sem izračunala tudi stopnjo urejenosti kristalne rešetke, ki je kar visoka namreč 0,8.



Slika 6.3.12. Mineralna sestava preperlega dolomita iz Remergrunda II.

6.3.8. Spodmol pri Ždrocli 3

Iz Spodmola pri Ždrocli 3 sem z metodo rentgenske difrakcije analizirala dva vzorca preperlega apnenca. Vzorec **Žd1** je prepereli apnenec iz plasti nad glavno leziko v spodmolu, vzorec **Žd2** pa je preperina iz omenjene lezike. Njuna mineralna sestava je prikazana na sl. 6.3.13..



Slika 6.3.13. Mineralna sestava preperlega apnenca iz Spodmola pri Ždrocli 3.

V načetem apnencu **Žd1** je 97 % kalcita, v sledeh so glineni minerali. V prepereli skrilavi plasti iz lezike **Žd2** je 98 % kalcita, v sledeh je dolomit s precej Fe in glineni minerali. Glede na položaj glavnega dolomitovega odboja, ki je zamaknjen proti ankeritovemu odboju, je bil del Mg v dolomitu nadomeščen z Fe.

6.3.9. Zaključki rentgenske analize

Analizirani vzorci apnenca in dolomita so zelo čisti, razen redkih izjem. Glede na vrsto karbonatne kamnine jih gradita kalcit ali dolomit. Drugih mineralov je v kamnini zelo malo in še ti so prisotni le v sledih. Za kakšna večja posploševanja sem imela premalo vzorcev, med analiziranimi pa obstajajo razlike.

Zanimivo je, da je v nekaj primerih netopnih mineralov (glinenci, glineni minerali, kremen) več v svežem delu kamnine kot v preperelem. V preperelem delu jih v nekaterih primerih ni niti v sledih, kar pomeni, da so se med preperevanjem odstranili. Apnenec in dolomit se med preperevanje čistita, kam so šli glinenci in glineni minerali mi ni jasno. Najverjetneje gre za odplavljanje v koloidni obliki, lahko pa tudi ionski, nimam pa dokazov ne za prvo in ne za drugo predvidevanje. Kremen včasih ostane v preperini, drugič pa ne. Morda je čiščenje apnenca povezano tudi z razbarvanjem, vendar v delno razbarvanih conah v večini primerov poroznost ni opazna.

Glavni kalcitov odboj je v nekaterih primerih višji v preperelem delu, v drugih pa v svežem delu, kar pomeni, da ni povezave med preperevanjem in urejevanjem kalcitove kristalne rešetke. Urejenost dolomitove kristalne rešetke pa je višja v svežih in manj preperelih delih kot v preperelih.

Peščeni, meljasti in glinasti klastični sedimenti, ki so v stiku s preperelo steno jamskega rova, niso netopni ostanki matične kamnine, saj je njihova mineralna sestava drugačna. Ti sedimenti vsebujejo minerale illit/muskovitove skupine, ki jih apnenca in dolomita v tu opisanih primerih ne. Tako vemo, da so alohtonega izvora (iz fliša) in da so bili v jame nanesen.

Mineralna sestava svežega in preperelega dela vzorcev se v večini primerov ne razlikujeta bistveno:

- netopnega ostanka je včasih več v preperelem, drugič pa v svežem delu;
- ni nujno, da je v preperelem delu netopnega ostanka več;
- v preperelem delu so z nekaj izjemami glavni kalcitovi in dolomitovi odboji višji;
- s preperevanjem se stopnja urejenosti kristalne rešetke v dolomitu zniža.

Znižanje stopnje urejenosti pri preperelem dolomitu sem opazila tudi v vzorcih iz jam Kaninskega pogorja in iz Velike ledene jame v Paradani, ki so obdelani v posebnih poglavjih.

Glavni zaključek pa bi bil ta, da se v večini primerov karbonatne kamnine med preperevanjem očistijo netopnih primesi.

6.4. Kemična analiza

6.4.1. Uvod

Natančno kvalitativno kemično analizo 4 vzorcev so izvedli v laboratoriju Actlabs v Kanadi. Vzorce so analizirali z metodami zajetimi v **Paket 4E** (EXPLORATION GRADE) (ICP - metoda induktivno vezane plazemske spektroskopije, INAA – instrumentalna nevtronska aktivacijska analiza in ICP/MS - metoda induktivno vezane plazemske spektroskopije/ masni spektrometer). Meje detekcije analiziranih oksidov in slednih prvin s kompletno litogeokemijsko analizo (ACTLABS 2000) so razvidne iz tabele na sl. 6.4.1..

OKSID ALI ELEMENT	MEJA DETEKCIJE	OKSID ALI ELEMENT	MEJA DETEKCIJE
Ag	0,5 ppm	Mo	5 ppm
Al ₂ O ₃	0,01 %	Na ₂ O	0,01 %
As	2 ppm	Nd	5 ppm
Au	5 ppb	Ni	1 ppm
Ba	3 ppm	P ₂ O ₅	0,01 %
Be	1 ppm	Pb	5 ppm
Bi	10 ppm	Rb	20 ppm
Br	1 ppm	Sb	0,2 ppm
CaO	0,01 %	Sc	0,1 ppm
Cd	0,5 ppm	Sm	0,1 ppm
Ce	3 ppm	Se	3 ppm
Co	1 ppm	SiO ₂	0,01 %
Cr	1 ppm	Sr	2 ppm
Cs	0,5 ppm	Ta	1 ppm
Cu	1 ppm	Tb	0,5 ppm
Eu	0,1 ppm	TiO ₂	0,005 %
Fe ₂ O ₃	0,01 %	U	0,5 ppm
Hf	0,5 ppm	V	5 ppm
Ir	5 ppb	W	3 ppm
K ₂ O	0,01 %	Y	1 ppm
La	0,5 ppm	Yb	0,1 ppm
Lu	0,05 ppm	Zn	1 ppm
MgO	0,01 %	Zr	4 ppm
MnO	0,01 %		

Slika 6.4.1. Meja detekcije analiziranih oksidov in slednih prvin s kompletno litogeokemično analizo – Paket 4E (exploration grade), Actlabs (2000).

6.4.2. Elementarna analiza vzorcev iz Martinske jame in Jame II na Prevali

Analizirana sta bila vzorca preperlega apnenca **Ma1** in **Pr2**:

- vzorec **Ma1a**- Martinska jama, sveža kamnina iz vzorca **Ma1**;
- vzorec **Ma1c**- Martinska jama, preperel rob vzorca **Ma1**;
- vzorec **Pr2a**- Prevala 2, sveža kamnina iz vzorca **Pr2**; in
- vzorec **Pr2c** – Prevala 2, preperel rob vzorca **Pr2**.

Raziskave so bile orientacijske, zato so v vzorcih v vzorcih iz Martinske jame in Jame II na Prevali določili količino vseh oksidov in prvin ter žarilno izgubo vzorca (LOI), ki so zajete v osnovni komplet geokemičnih raziskav na raziskovalni stopnji.

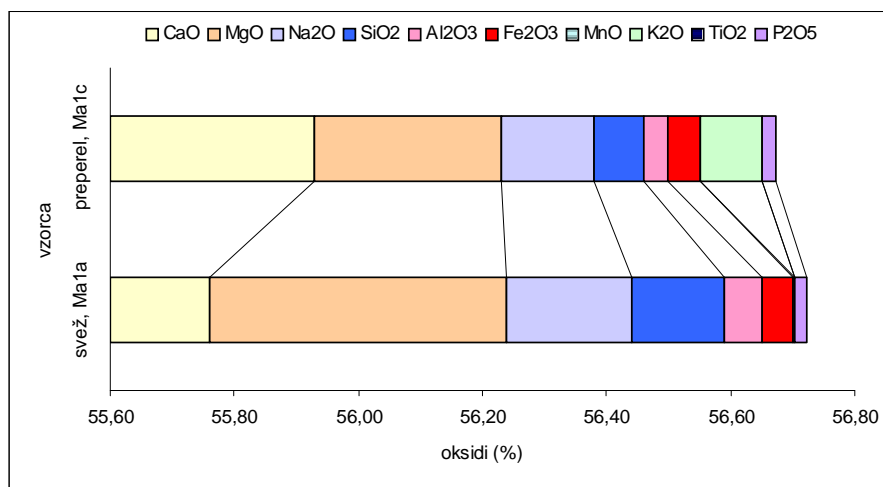
OKSID / PRVINA		Ma1a sveža kamnina	Ma1c prep. kamina		Pr2a sveža kamnina	Pr2c prep. kamina
SiO ₂	%	0,15	0,08		0,07	0,20
Al ₂ O ₃	%	0,06	0,04		0,03	0,08
Fe ₂ O ₃	%	0,05	0,05		0,02	0,05
MnO	%	0,002	0,002		0,006	0,006
MgO	%	0,48	0,30		0,46	0,26
CaO	%	55,76	55,93		56,25	55,82
Na ₂ O	%	0,20	0,15		0,15	0,20
K ₂ O	%	-0,01	0,10		0,04	0,04
TiO ₂	%	-0,001	-0,001		-0,001	-0,001
P ₂ O ₅	%	0,02	0,02		0,02	0,02
LOI	%	43,09	42,90		41,47	42,47
TOTAL	%	99,81	99,56		98,50	99,14
Ba	ppm	2	2		2	4
Sr	ppm	229	176		607	427
Y	ppm	2	3		4	7
Zr	ppm	20	17		15	18
Be	ppm	-1	-1		-1	-1
V	ppm	13	10		13	16
Ag	ppm	0,4	0,6		0,6	0,4
Cd	ppm	-0,3	-0,3		0,4	0,9
Cu	ppm	2	2		2	3
Ni	ppm	-1	-1		-1	2
Pb	ppm	-3	-3		-3	-3
Zn	ppm	-1	-1		-1	-1
Bi	ppm	-2	-2		-2	-2
Au	ppb	92	24		123	49
As	ppm	-2	-2		-2	-2
Br	ppm	1	1		-1	1
Co	ppm	-1	-1		-1	-1
Cr	ppm	-2	3		13	12
Cs	ppm	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5
Hf	ppm	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5
Ir	ppb	-5	-5		-5	-5
Mo	ppm	-5	-5		-5	<5
Rb	ppm	-20	-20		-20	-20
Sb	ppm	0,8	0,4		0,4	0,4
Sc	ppm	-0,1	0,3		0,1	0,2
Se	ppm	-3	-3		-3	-3
Ta	ppm	-1	-1		-1	-1
Th	ppm	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5
U	ppm	1,4	0,7		1,4	1,3
W	ppm	-3	-3		-3	-3
La	ppm	0,3	1,1		1,1	2,1
Ce	ppm	-3	-3		-3	-3
Nd	ppm	-5	-5		-5	-5
Sm	ppm	-0,1	0,3		0,1	0,3
Eu	ppm	-0,1	-0,1		-0,1	-0,1
Tb	ppm	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5
Yb	ppm	-0,1	-0,1		0,1	0,2
Lu	ppm	-0,5	-0,5		-0,5	-0,5

Slika 6.4.2. Rezultati kvalitativne litogeokemične analize vzorcev iz Martinske jame in Jame II na Prevali (ACTLABS, Kanada). Negativni predznak označuje vrednosti, ki so manjše od meje detekcije, modra barva označuje vrednosti, ki so višje v preperem delu vzorca in rdeča barva vrednosti, ki so nižje.

V Laboratoriju so določili vsebnosti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Ba, Sr, Y, Zr, Be, V, Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Bi, žarilno izgubo LOI, Au, As, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Ir, Mo, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Th, U, W, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb in Yb. Rezultati so v preglednici na sl. 6.4.2., negativno so označene količine, katerih vrednosti so pod mejo detekcije preiskovalnih metod.

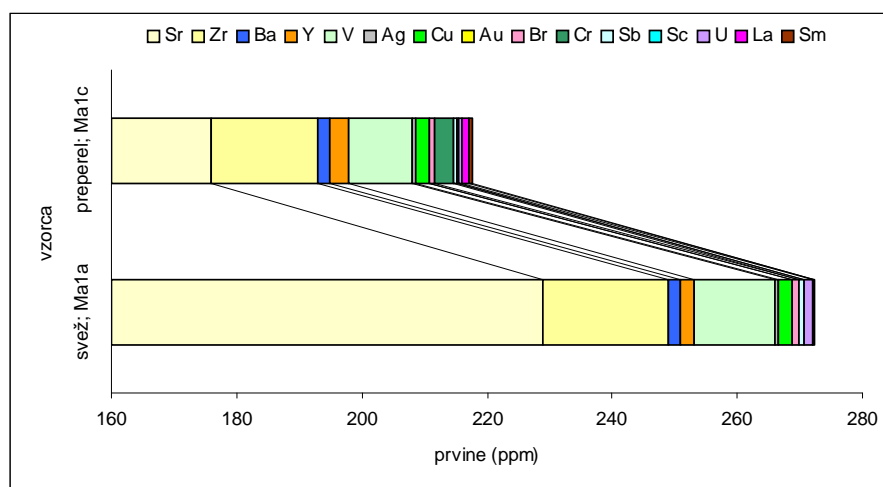
6.4.3. Kemična sestava svežega in preperlega apnenca iz Martinske jame

Vzorec **Ma1** iz Martinske jame sem razdelila na sveži del **Ma1a** in prepereli del **Ma1c**. Rezultati kemične analize (sl. 6.4.2.) kažejo, da so količine titanovega oksida, berilija, kadmija, niklja, svinca, cinka, bizmuta, arzena, kobalta, cezija, hafnija, iridija, molibdena, rubidija, selena, tantalata, torija, volframa, cerija, neodima, evropija, terbija, iterbija in lutecija v obeh delih apnenca pod mejo detekcije.



Slika 6.4.3. Količina oksidov v svežem in preperlem delu apnenca iz Martinske jame.

V preperlem delu vzorca **Ma1c** se zmanjša količina MgO , SiO_2 , Al_2O_3 in Na_2O , precej pa se poveča količina K_2O , sl. 6.4.3.. V preperlem delu vzorca se zmanjša tudi količina stroncija, cirkonija, vanadija, zlata, antimona in urana, več pa je itrija, srebra, kroma, skandija, lantana in samarija, sl. 6.4.4.. Žarilna izguba LOI je višja v svežem delu apnenca; oksidi predstavljajo 99,81 % svežega apnenca in 99,56 % preperlega dela istega apnenca.



Slika 6.4.4. Količina prvin v svežem in preperlem delu apnenca iz Martinske jame

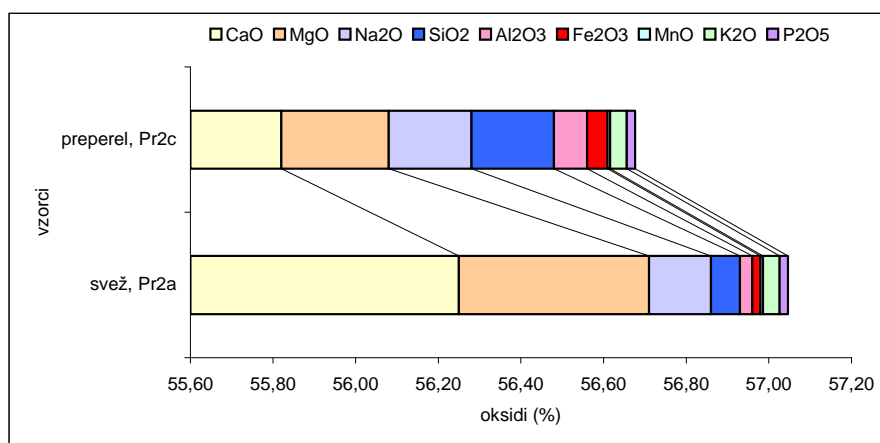
V primerjavi med kemično sestavo svežega in preperlega dela kamnine v vzorcu **Ma1** se v preperem delu:

- zmanjša količina SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Na_2O , LOI (žarilna izguba), stroncija, cirkonija, vanadija, zlata, antimona in urana;
- poveča količina CaO , K_2O , itrija, srebra, kroma, skandija, lantana in samarija;
- ostane enaka količina Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5 , barija, bakra in broma.

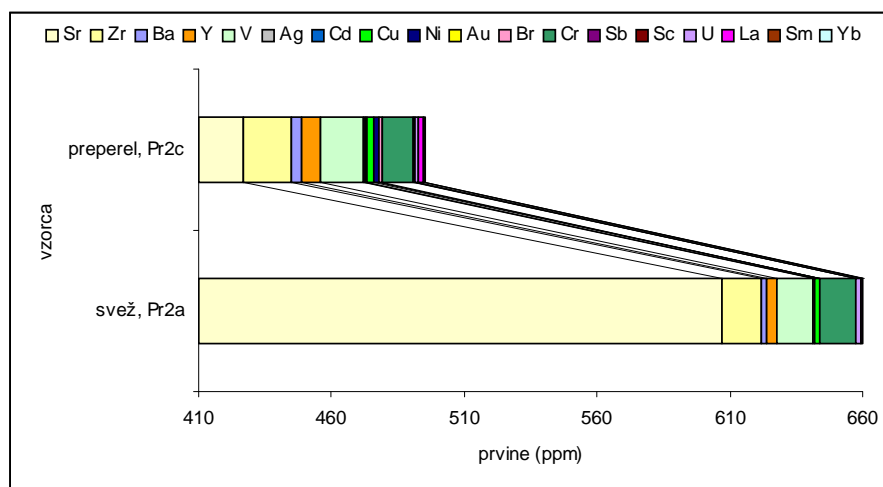
6.4.4. Kemična sestava svežega in preperlega apnenca iz Jame II na Prevali

Vzorec **Pr2** iz Jame II na Prevali sem razdelila na sveži del **Pr2a** in prepereli del **Pr2c**. Rezultati kemične analize (sl.6.4.2.) kažejo, da so količine titanovega oksida, berilija, svinca, cinka, bizmuta, arzena, kobalta, cezija, hafnija, iridija, molibdena, rubidija, selena, tantala, torija, volframa, cerija, neodima, evropija, terbija in lutecija v obeh delih apnenca pod mejo detekcije.

V preperem delu vzorca **Pr2c** se zmanjša količina MgO in CaO , poveča pa se količina SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 in Na_2O , sl. 6.4.5.. Zmanjša se tudi količina stroncija, srebra, zlata, kroma in urana, več pa je barija, itrija, cirkonija, vanadija, kadmija, bakra, niklja, skandija, lantana, samarija in iterbija, sl. 6.4.6.. Žarilna izguba LOI je nižja v svežem delu apnenca. Oksidi predstavljajo 98,50 % svežega apnenca in 99,14 % preperlega dela istega apnenca.



Slika 6.4.5. Količina oksidov v svežem in preperem delu apnenca iz Jame II na Prevali.



Slika 6.4.6. Količina prvin v svežem in preperem delu apnenca iz Jame II na Prevali.

V primerjavi med kemično sestavo svežega in preperelega dela apnenca v vzorcu **Pr2** se v preperlem delu:

- zmanjša količina MgO, CaO, stroncija, srebra, zlata, kroma in urana;
- poveča količina, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, LOI (žarilna izguba), barija, itrija, cirkona, vanadija, kadmija, bakra, niklja, skandija, lantana, samarija in iterbija;
- ostane enaka količina, MnO, K₂O, P₂O₅ in antimona.

6.4.5. Zaključki kemične analize

Iz rezultatov analiz sledi, da je v vzorcih apnenca **Mal** in **Pr2** v preperlem delu količina štirih prvin manjša ter količina štirih prvin večja:

- zmanjša se količina MgO, Sr, Au in U; in
- poveča se količina Y, Sc, La in Sm.

Pri preperevanju (raztapljanju) odnaša voda iz apnenca magnezij, stroncij, zlato in uran. Po literaturi se med preperevanjem v apnencu in dolomitu manjša vsebnost Mg, Sr in U ter v dolomitu tudi Na (GASCOYNE et al. 1978; KOGOVŠEK & HABIČ 1981; GAUTLIER et al. 1999; AL- AASM & PACKARD 2000; PANAHİ et al. 2000).

Količine ostalih oksidov in prvin so v nekaterih primerih v preperlem delu enega vzorca manjše, v drugem vzorcu pa večje in obratno. Količine nekaterih oksidov in prvin pa so v vseh primerih ostale nespremenjene. Žarilna izguba LOI je v **Mal** večja v svežem delu vzorca, v **Pr2** pa je večja v preperlem delu vzorca. Delež oksidov je v **Mal** večji v svežem delu kamnine, v **Pr2** pa je večji v preperlem delu.

Iz tega lahko zaključim, da je v preperlem delu apnenca **Pr2** netopnih ostankov manj, v preperlem delu apnenca pa **Mal** več. To pomeni, da se z raztapljanjem količina netopnega ostanka ne povečuje vedno, ne vem pa kam in v kakšni obliki ti izginejo med preperevanjem.

6.5. Analiza organskega ogljika

6.5.1. Uvod

Odgovora na vprašanje, zakaj se kamnina med prepevanjem razbarva, mi elementarna kemična analiza ni dala. V preperem delu je bilo manj samo MgO, Sr, Au in U, drugih oksidov in prvin pa je bilo v svežem in preperem delu enako. Zato sem se odločila preveriti še v nekaj vzorcih, kaj se dogaja z organskim ogljikom. Organska snov v morskem sedimentu izhaja iz različnih okolij in organizmov, njegov izvor pa določamo glede na izotopsko sestavo organskega ogljika (PEZDIČ 1999).

Analiza organskega ogljika je bila narejena na IZRK ZRC SAZU po metodi za določanje C_{org} v prsteh po Walkley-Black metodi z uporabo kalijevega bikromata. Vzorce sem ločila na tri podvzorce ter jih zmlela.

Analizirala sem vzorce iz nepreperlega (*a.*) in preperlega (*c.*) dela kamnine:

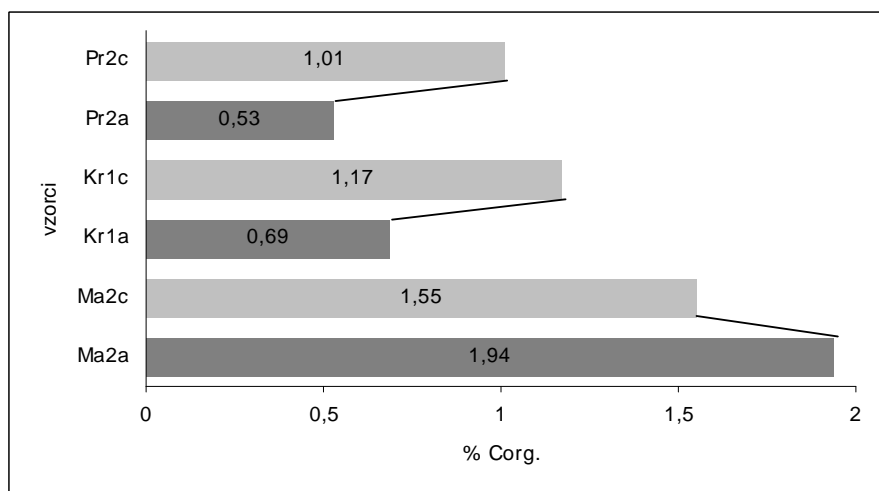
- **Ma2** - kredni apnenec iz Martinske jame,
- **Kr1** - kredni apnenec iz Krempljaka, in
- **Pr2** - paleocenski apnenec iz Jame II na Prevali.

6.5.2. Rezultati analize

Vsebnost organskega ogljika v vzorcih je razvidna iz preglednice na sl. 6.5.1.. Primerjava med svežim in preperelim delom posameznega vzorca pa je prikazana na sl. 6.5.2..

VZORCI	Corg %
Ma2a	1,94
Ma2c	1,55
Kr1a	0,69
Kr1c	1,17
Pr2a	0,53
Pr2c	1,01

Slika 6.5.1. Količina organskega ogljika v vzorcih iz Martinske jame, Krempljaka in Jame II na Prevali.



Slika 6.5.2. Primerjava vsebnosti organskega ogljika med svežim(*a.*) in preperelim(*c.*) delom apnenca v vzorcih iz Martinske jame, Krempljaka in Jame II na Prevali.

V vzorcu **Ma2** je v svežem delu 1,94 % organskega ogljika, v preperem delu pa 1,55 %. V vzorcu **Kr1** je v svežem delu organskega ogljika samo 0,69 %, v preperem delu vzorca pa ga je 1,17 %. V vzorcu **Pr2** je v svežem delu organskega ogljika manj, samo 0,53 %, v preperem delu pa ga je 1,01 %.

Organskega ogljika je tako v preperem delu vzorca manj samo v apnencu iz Martinske jame, v apnencu iz Krempljaka in Jame II na Prevali pa ga je v preperem delu vzorca več.

6.5.3. Zaključek

Organskega ogljika je v preperem delu manj samo v enem primeru - vzorec **Ma2**. V ostalih dveh primerih **Kr1** in **Pr2** je vsebnost organskega ogljika v preperem delu še celo za enkrat večja kot v svežem delu. Tega si ne znam razložiti drugače kot s prisotnostjo mikroorganizmov. Očitno organski ogljik v izbranih primerih ne daje barve svežim delom karbonatne kamnine in je verjetno vezan v različne spojine ali pa je del prisotnih organizmov.

6.6. Kompleksometrija

6.6.1. Uvod

Kompleksometrija je metoda, pri kateri s titracijo dobimo odstotek skupnega karbonata v vzorcu ter delež CaO in MgO, z izračunom pa še vsebnost kalcita, dolomita in netopnega ostanka. Kompleksometrijske analize vzorcev so bile narejene na IZRK ZRC SAZU.

6.6.2. Rezultati analize

	CaO %	MgO %	kalcit %	dolomit %	sk.karb.%	net.ost.%	CaO/MgO
BJ1a	55,24	0,69	96,86	3,14	100	0	80,06
BJ1c	55,69	0,28	98,7	1,29	99,9	0,1	198,89
BJ2c	55,29	0,44	97,47	2,03	99,5	0,5	125,66
BJ3c	52,32	0,2	92,98	0,92	93,8	6,2	261,6
<i>povprečje BJ</i>	<i>54,635</i>	<i>0,4025</i>	<i>96,5025</i>	<i>1,845</i>	<i>98,3</i>	<i>1,7</i>	<i>166,553</i>
Ma1a	55,13	0,8	96,31	3,69	100	0	68,91
Ma1c	55,24	0,6	97,07	2,77	99,84	0,16	92,07
Ma2a	55,12	0,8	96,31	3,69	100	0	68,9
Ma2c	55,18	0,73	96,68	3,32	100	0	75,59
Ma3c	54,12	0,61	94,1	2,77	97,87	2,13	88,72
<i>povprečje Ma</i>	<i>54,958</i>	<i>0,708</i>	<i>96,094</i>	<i>3,248</i>	<i>99,542</i>	<i>0,458</i>	<i>78,838</i>
Pr2a	55,29	0,68	96,68	3,32	100	0	81,31
Pr2c	55,35	0,28	98,46	0,92	99,38	0,62	197,68
<i>povprečje Pr</i>	<i>55,32</i>	<i>0,48</i>	<i>97,57</i>	<i>2,12</i>	<i>99,69</i>	<i>0,31</i>	<i>139,495</i>
Kr1a	51,87	0,93	89,29	4,24	94,53	5,47	55,77
Kr1c	52,77	0,48	92,97	2,21	95,18	4,82	109,94
<i>povprečje Kr</i>	<i>52,32</i>	<i>0,705</i>	<i>91,13</i>	<i>3,225</i>	<i>94,855</i>	<i>5,145</i>	<i>82,855</i>
TJ2b	30,45	19,6	5,71	89,63	95,34	4,66	1,55
TJ2c	29,89	17,9	8,91	81,88	90,79	9,21	1,67
<i>povprečje TJ</i>	<i>30,17</i>	<i>18,75</i>	<i>7,31</i>	<i>85,755</i>	<i>93,065</i>	<i>6,935</i>	<i>1,61</i>
Žd1b	54,29	0,19	93,6	3,5	97,1	2,9	285,74
Žd2c	50,75	0,69	88,88	3,14	92,02	7,98	73,55
<i>povprečje Žd</i>	<i>52,52</i>	<i>0,44</i>	<i>91,24</i>	<i>3,32</i>	<i>94,56</i>	<i>5,44</i>	<i>179,645</i>
Rmab	29,97	20,86	1,68	95,44	97,12	2,88	1,44

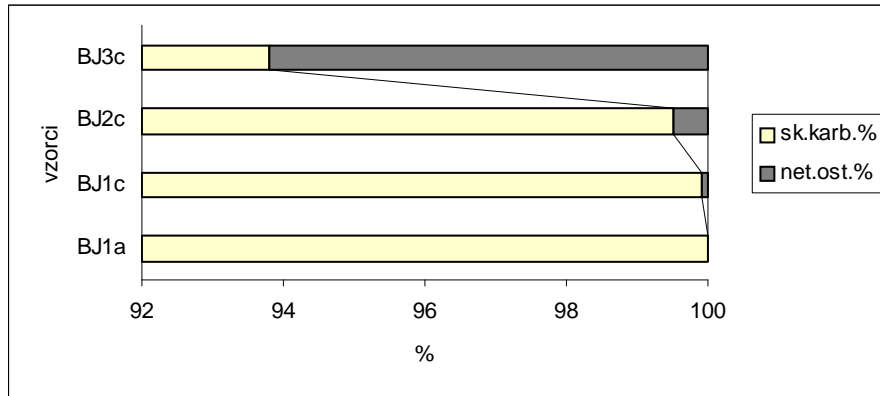
Slika 6.6.1. Rezultati kompleksometrije vzorcev iz Pečine v Borštu – BJ, Martinske jame – Ma, Jame II na Prevali – Pr, Krempljaka – Kr, Turkove jame – TJ, Spodmola na Ždroclah – Žd in Remergrunda – Rm; a – sveža kamnina, b – načeta kamnina, c – preperela kamnina.

S to analizo so bili obdelani vzorci iz: Pečine v Borštu – **BJ**, Martinske jame – **Ma**, Jame II na Prevali – **Pr**, Krempljaka – **Kr**, Turkove jame – **TJ**, Spodmola na Ždroclah – **Žd** in Remergrunda – **Rm**. Rezultati in izračunana povprečja za posamezne jame so predstavljeni v preglednici (sl. 6.6.1.).

6.6.3. Pečina v Borštu

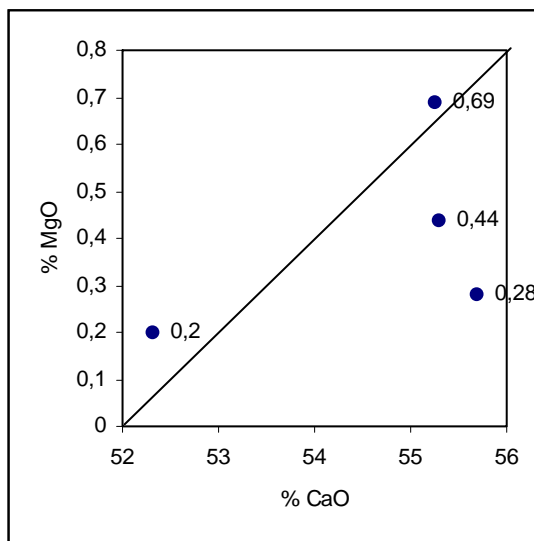
Iz Pečine v Borštu so bili analizirani 4 vzorci iz svežega dela apnenca in trije iz preperlega dela. Vrednosti rezultatov so v preglednici (sl. 6.6.1.). Vsebnost karbonatov je v vzorcih iz jame zelo visoka, med 99,5 do 100 %. Nekoliko manj jih je v vzorcu **BJ3c**, samo 93,8 %. Vendar je bil v tem vzorcu prisoten stiloliti šiv, tako da je bilo v vzorcu več netopnega ostanka.

Na splošno je netopnega ostanka v vzorcih iz preperlega apnenca več kot v vzorcu iz svežega dela (sl. 6.6.2.). Posebno veliko je netopnega ostanka v vzorcu **BJ3c** (močno preperel) kar lahko pripisujemo ali infiltraciji s površja, ali slučajni poplavi, ki je nanese materiala v porozno kamnino, ali pa naključju, da je bil v tem delu prisoten kakšen stilolitni šiv zapolnjen z netopnimi minerali.



Slika 6.6.2. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Pečine v Borštu.

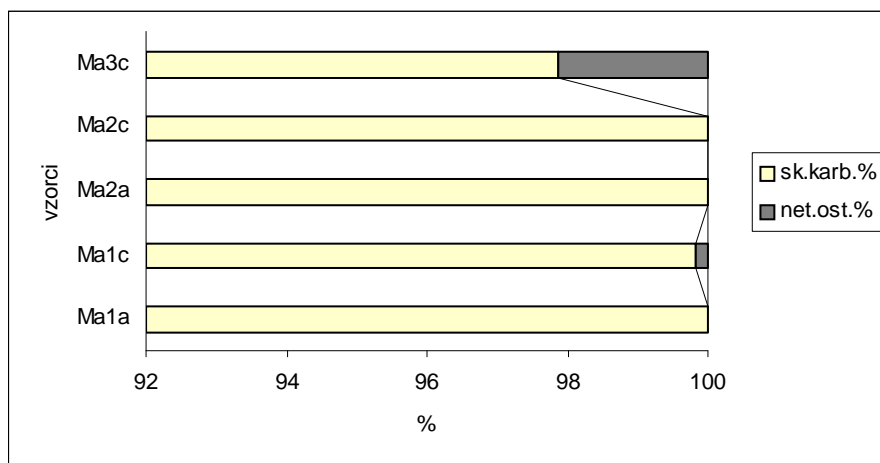
V vzorcu iz svežega dela apnenca **BJ1a** je odstotek MgO najvišji, v vzorcih iz preperlega dela apnenca je povsod nižji (sl. 6.6.3.), kar pomeni, da s prepevanjem apnenca Mg ion migrira iz kalcitove kristalne rešetke.



Slika 6.6.3. Odstotek CaO in MgO v vzorcih iz Pečine v Borštu. V preperelih vzorcih je manj MgO kot v svežem. Označene so vsebnosti MgO.

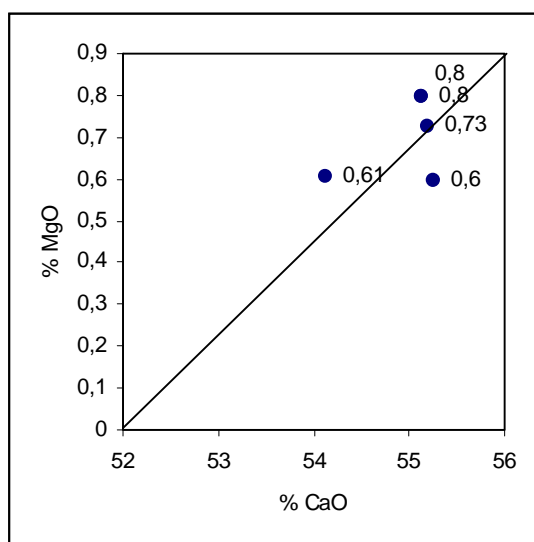
6.6.4. Martinska jama

Iz Martinske jame je bilo analiziranih 5 vzorcev, dva iz svežega dela apnenca in trije iz preperlega dela. Vrednosti rezultatov so v preglednici (sl. 6.6.1.). Delež karbonatov je v vzorcih iz jame zelo visok, saj zavzema vrednosti od 99,84 do 100 %. Izjema je vzorec **Ma3c**, kjer ga je 97,87 %, vsebuje pa več netopnega ostanka. Netopnega ostanka v vzorcih iz svežega dela (**a**) apnenca ni, v preperlem apnencu (**c**) ga ni v enem od vzorcev, v drugih dveh pa je njegov delež različen (sl. 6.6.4.).



Slika 6.6.4. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Martinske jame.

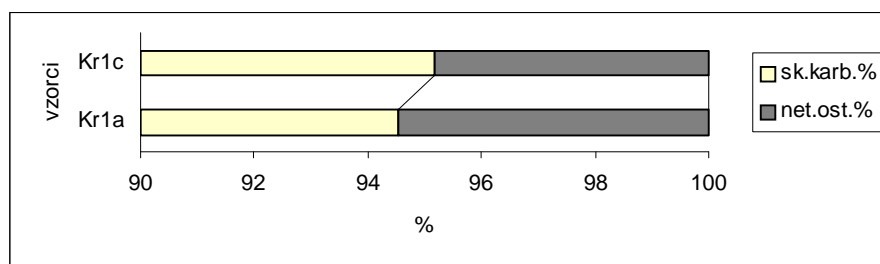
V vzorcih iz svežega dela apnenca **Ma1a** in **Ma2a** je odstotek MgO najvišji, v vzorcih iz preperelega dela apnenca pa je nižji (sl. 6.6.5.), kar spet kaže na izgubljanje Mg iona med preperevanjem.



Slika 6.6.5. Odstotek CaO in MgO v vzorcih iz Martinske jame. V preperelih vzorcih je manj MgO kot v svežem. Označene so vsebnosti MgO.

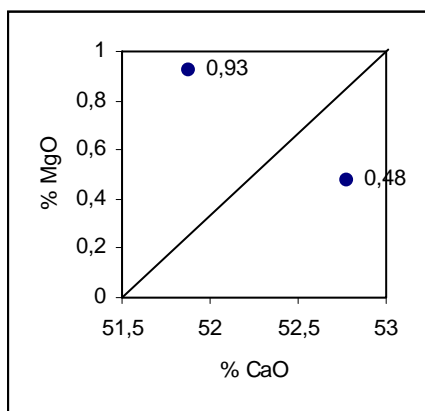
6.6.5. Krempljak

Iz Krempljaka sta bila analizirana 2 vzorca, eden s svežega apnenca in eden s preperelega. Vrednosti rezultatov so v preglednici (sl. 6.6.1.). Delež karbonatov je v vzorcih iz jame nižji v primerjavi z vzorci iz drugih jam, med 94,53 % in 95,18 %. Netopnega ostanka je v vzorcu svežega dela apnenca več kot v vzorcu iz preperelega dela (sl. 6.6.6.).



Slika 6.6.6. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Krempljaka.

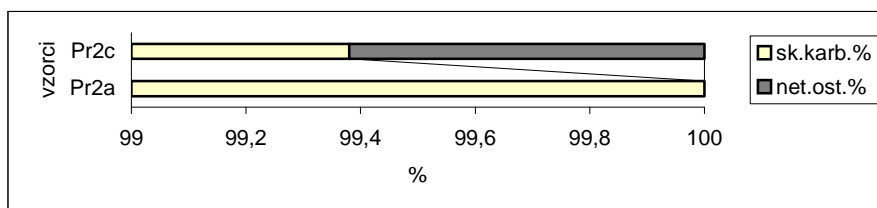
V vzorcu iz svežega dela apnenca **Kr1a** je odstotek MgO višji kot v vzorcu iz preperelega dela apnenca (sl. 6.6.7.), kar se je izkazalo za pomemben podatek – pri preperevanju gre iz apnenca najprej magnezij.



Slika 6.6.7. Odstotek CaO in MgO v vzorcih iz Krempljaka. V preperelem delu je manj MgO.

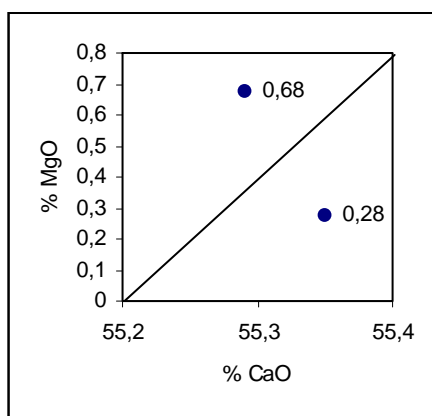
6.6.6. Jama II na Prevali

Iz Jame II na Prevali sta bila analizirana 2 vzorca, po eden s svežega dela apnenca in s preperelega. Vrednosti rezultatov so v razpredelnici (sl. 6.6.1.). Delež karbonatov je v vzorcih iz jame zelo visok, med 99,3 do 100 %. Netopnega ostanka v vzorcu iz svežega dela apnenca sploh ni, v preperelem delu pa ga je manj kot 1 % (sl. 6.6.8.).



Slika 6.6.8. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Jame II na Prevali.

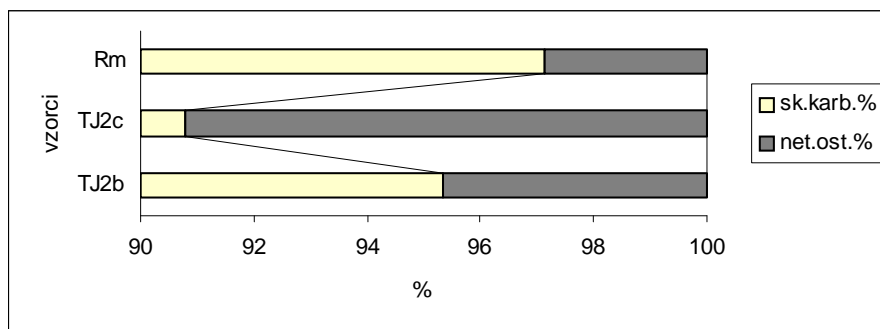
V vzorcu iz svežega dela apnenca **Pr2a** je odstotek MgO višji kot v vzorcu iz preperelega dela apnenca **Pr2c** (sl. 6.6.9.).



Slika 6.6.9. Odstotek CaO in MgO v vzorcih iz Jame II na Prevali. MgO je manj v preperelem delu.

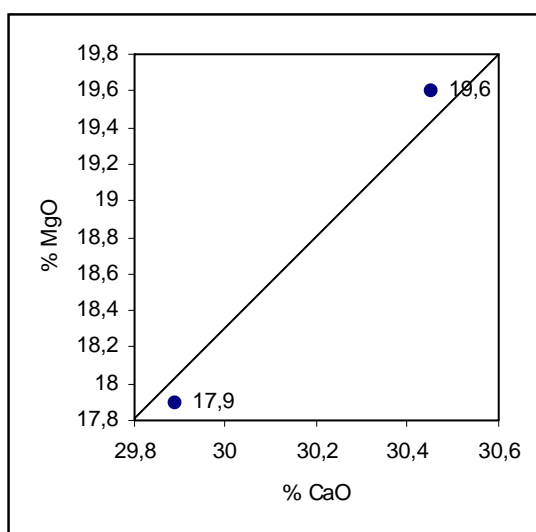
6.6.7. Turkova jama in Remergrund II

Iz Turkove jame sta bila analizirana 2 vzorca, po eden s svežega in preperlega dolomita. Iz Remergrunda II pa je bil analiziran vzorec dolomita, ki je bil površinsko preperel v zelo tanki plasti. Vrednosti rezultatov so v preglednici (sl. 6.6.1.). Delež karbonatov ima v vzorcih iz Turkove jame vrednosti med 90,79 in 95,34 %, v vzorcu iz Remergrunda II pa ima vrednost 97,12 %. Netopnega ostanka je v vzorcu preperlega dolomita **TJ2c** več kot v vzorcu iz razbarvanega dela dolomita (sl. 6.6.10.).



Slika 6.6.10. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Turkove jame in Remergrunda II.

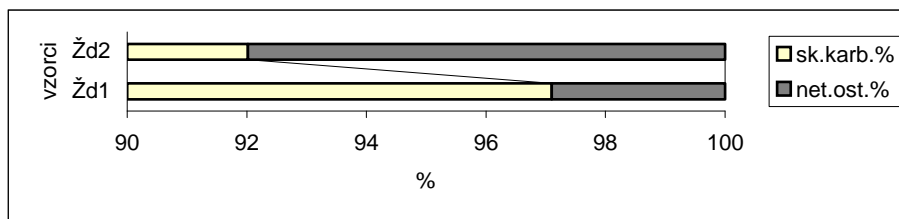
V vzorcu iz svežega dela dolomita **TJ2b** je odstotek MgO višji kot v vzorcih iz preperlega dela dolomita **TJ2c** (sl. 6.6.11.). To pomeni, da med prepevanjem Mg najverjetneje migrira iz dolomitove rešetke.



Slika 6.6.11. Odstotek CaO in MgO v vzorcih iz Turkove jame. V bolj preperlem vzorcu je manj MgO.

6.6.8. Spodmol na Ždroclah

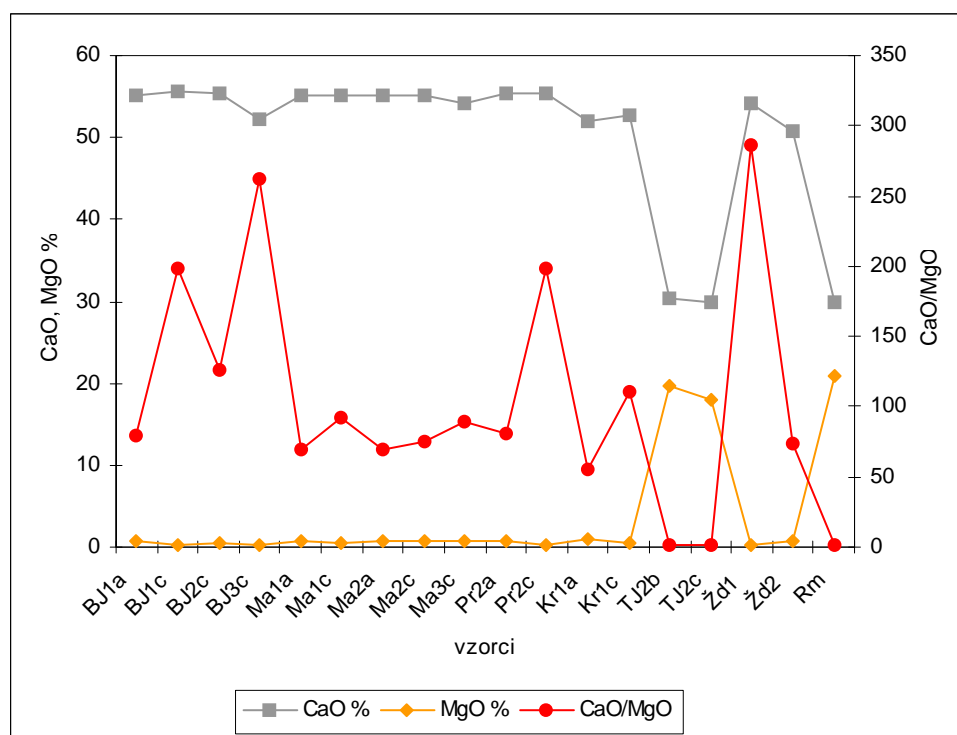
Iz Spodmola pri Ždrocli 3 sta bila analizirana dva vzorca. Prvi je prepereli apnenec tik nad leziko **Žd1**, drugi pa močno prepereli lapornati apnenec iz lezike **Žd2**. Vrednosti rezultatov so v preglednici (sl. 6.6.1.). Vsebnost karbonatov v obeh vzorcih je med 92,02 % in 97,1 %. Netopnega ostanka je v obeh vzorcih kar precej, več ga je v lapornatem apnencu **Žd2** (sl. 6.6.12.). V vzorcu iz **Žd2** je odstotek MgO višji kot v vzorcu **Žd1**.



Slika 6.6.12. Vsebnost karbonatov in netopnega ostanka v vzorcih iz Spodmola na Ždroclah.

6.6.9. Diskusija o rezultatih kompleksometrije in zaključki

Odstotek skupnega karbonata se spreminja od lokacije do lokacije posameznih jam. Najnižji povprečni delež karbonatov ima apnenec v jami Krempljak, kjer ga je povprečno 94,85%. V vzorcih iz dolomita je najnižja vsebnost karbonata v Turkovi jami, povprečno 93,06 %. Povprečno največa pa je v apnencu iz Jame II na Prevali z vrednostjo 99,69 % in v apnencu iz Martinske jame, kjer znaša njeno povprečje 99,54%.



Slika 6.6.13. Vrednosti CaO, MgO in razmerje CaO/MgO v vzorcih svežega in preperlega apnenca in dolomita iz Pečine v Borštu – BJ, Martinske jame – Ma, Krempljaka – Kr, Jame II na Prevali – Pr, Turkove jame – TJ, Spodmola na Ždroclah – ŽD in Remergrunda II – Rm.

V primerjavi med izmerjenimi vsebnostmi karbonatov v posameznih vzorcih so vrednosti nižje v vzorcih iz preperlega apnenca in dolomita, kar pomeni, se delež netopnega ostanka v preperlem delu poveča. Izjema sta vzorca iz jame Krempljak, kjer je netopnega ostanka več v vzorcu iz svežega dela apnenca.

Najmanjša vsebnost kalcita v vzorcih apnenca je 88,88 % CaCO_3 , največja pa 98,7 % CaCO_3 . Odstopajo tisti vzorci, ki vsebujejo dolomit. Najmanjša vsebnost kalcita v vzorcih dolomita znaša 1,68 % CaCO_3 in dolomita 81,88 % $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, največja je vsebnost 8,91 % CaCO_3 in 95,44 % $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Vsebnost CaO in MgO se razlikuje od vzorca do vzorca

glede na omenjene vrednosti kalcita in dolomita, temu je primerno tudi razmerje CaO/MgO (sl. 6.6.13.).

Zmanjšanje deleža Mg iona v preperelih delih apnencev in dolomitov je opazilo več avtorjev. Da se pri raztapljanju iz apnenca izloča Mg sta ugotovila tudi KOGOVSĚK & HABIĚ (1981) z merjenjem magnezijeve trdote. Vodni curek v Planinski jami je magnezijeva trdota bila 35 %, vendar se je iz vode izloćal samo kalcit. Vzrok je v većjem topnostnem produktu $MgCO_3$ v primerjavi s $CaCO_3$. Izgubo Mg pri preperevanju dolomita navaja tudi BURGER (1989), vendar je ne razlaga. NiŹji deleŹ Mg na povrŹini s korozijo raztopljene jamske stene v Komarjevem rovu Dimnic razlaga SLABE (1988) s popolno raztopitvijo nećistega apnenca, ki vsebuje Mg in ponovnim izloćanjem ćistih kalcitnih kristalov iz kondenzne vlage. Vendar v vseh mojih primerih ne gre za izloćanje, ampak za preperevanje apnencev in dolomitov.

NajpomembnejŹa zakljućka rezultatov kompleksometrićnih analiz sta

- V vzorcih preperlega dela kamnine je odstotek MgO niŹji kot v vzorcih sveŹega dela, kar pomeni, da se MgO med preperevanjem izgublja. Izgublja se iz tako iz kalcitove kot iz dolomitove kristalne reŹetke. Kam in kako migrira, mi ni znano.
- Na stenah ostaja vedno bolj ćisti kalcit, katerega notranja struktura pa je vedno bolj preperela in je ostanek preperlega apnenca.

6.7. Vrščni elektronski mikroskop – EDS analiza

6.7.1. Uvod

EDS je elementarna analiza, ki temelji na meritvi energije ali valovanja ter jakosti porazdelitve rentgenskega signala, ki ga vzbudi na vzorec usmerjeni elektronski žarek. Na vrščnem elektronskem mikroskopu JEOL JSM 5800 – SEM Laboratorija za mikrostrukturno analizo Odseka za keramiko so mi naredili EDS kvalitativno in semikvantitativno analizo vzorcev preperlega apnenca iz Martinske jame in iz Jame II na Prevali. Drugi set EDS analiz so mi naredili na Inštitutu za geologijo Češke akademije znanosti v Pragi na Brukerjevem Quantax AXS microanalizatorju (Bruker AXS Microanalysis GmbH, Nemčija).

6.7.2. EDS analiza vzorcev na vrščnem elektronskem mikroskopu JEOL JSM 5800

EDS kvalitativna in semikvantitativna elementarna analiza je bila narejena na dveh izbranih vzorcih:

- **Ma2** - stik med svežim in preperelim delom, počasen prehod, široka cona postopnega preperevanja, Martinska jama (isti del vzorca za zbrusek); in
- **Pr2** - oster prehod med svežo in preperelo kamnino, Jama II na Prevali.

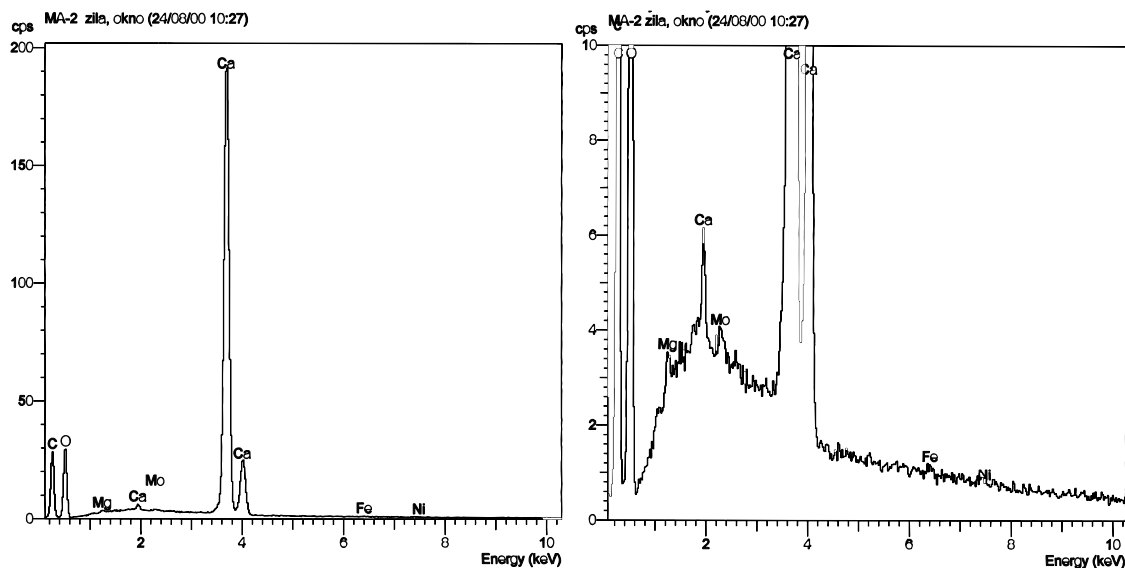
Vzorca sta bila metalografsko polirana in naprašena z grafitom. Kljub temu njuna površina ni bila popolnoma gladka zaradi velike poroznosti preperlega dela vzorca. Narejene so bile tudi fotografije poroznosti vzorcev.

6.7.2.1. Elementarna sestava svežega in preperlega apnenca iz Martinske jame

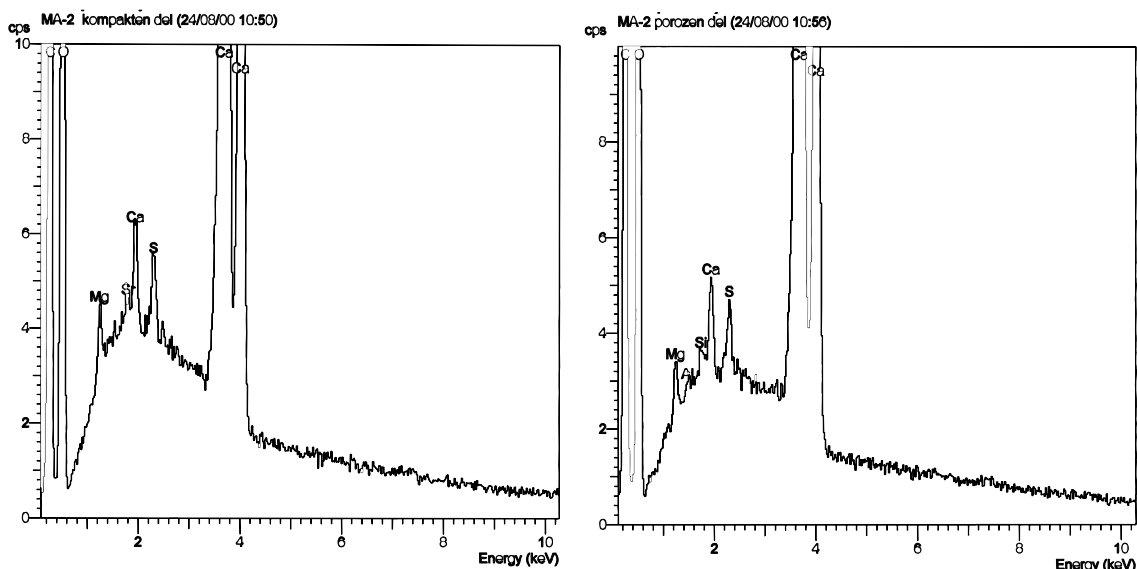
V vzorcu **Ma2** meja med svežim in preperelim delom ni ostra, prehod med obema deloma je v široki coni in zvezen. V preperlem delu so vidne tudi temne mikritne žile nepreperlega apnenca (sl. 6.7.3.).

Najprej je bila izvedena kvalitativna analiza temne žile in njene preperete okolice, v oknu velikosti 50 x 50 μm . Kvalitativna analiza je v neprepereli žili (sl. 6.7.5.) pokazala prisotnost C, O, Ca, Mg, S in Sr ter Fe in Ni v sledovih; Fe in Ni sta na meji detekcije EDS (sl. 6.7.1). V prepereli okolici (sl. 6.7.6.) so bili določeni C, O, Ca, Mg, Al, S, Si in Cl. Prisotnost Mo je vprašljiva, bolj verjetno je prisoten samo S (sl. 6.7.1). Iz analiz v neprepereli žili in preperlem delu je razvidno, da je v svežem delu apnenec čistejši, prepereli del pa vsebuje še Al, Si in Cl. Nisem mogla ugotoviti, ali so Al, Si in Cl v prepereli del prinešeni ali pa so netopni ostanek.

Kvalitativna analiza je bila izvedena še v oknu velikosti 100 x 100 μm svežega dela vzorca in oknu iste velikosti v preperlem delu. V svežem delu vzorca (sl. 6.7.7.) so bili določeni C, O, Ca, Mg, S in Sr (sl. 6.7.2.), v preperlem (sl. 6.7.8.) pa C, O, Ca, Mg, Al, S in Si (sl. 6.7.2.).



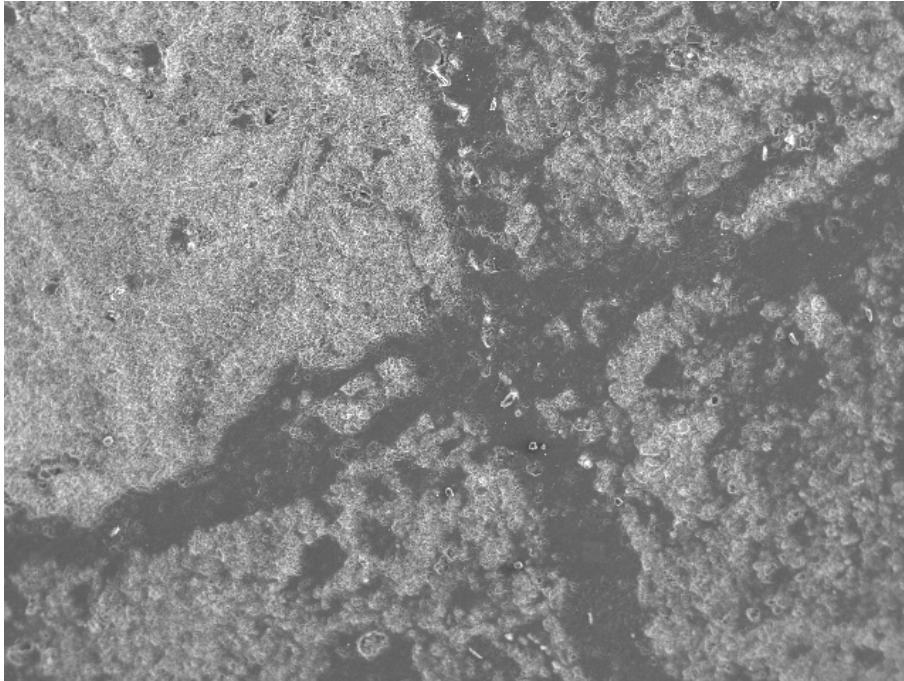
Slika 6.7.1. Izmerjeni spekter v neprepereli žili apnenca Ma2, Martinska jama (različni ordinati).



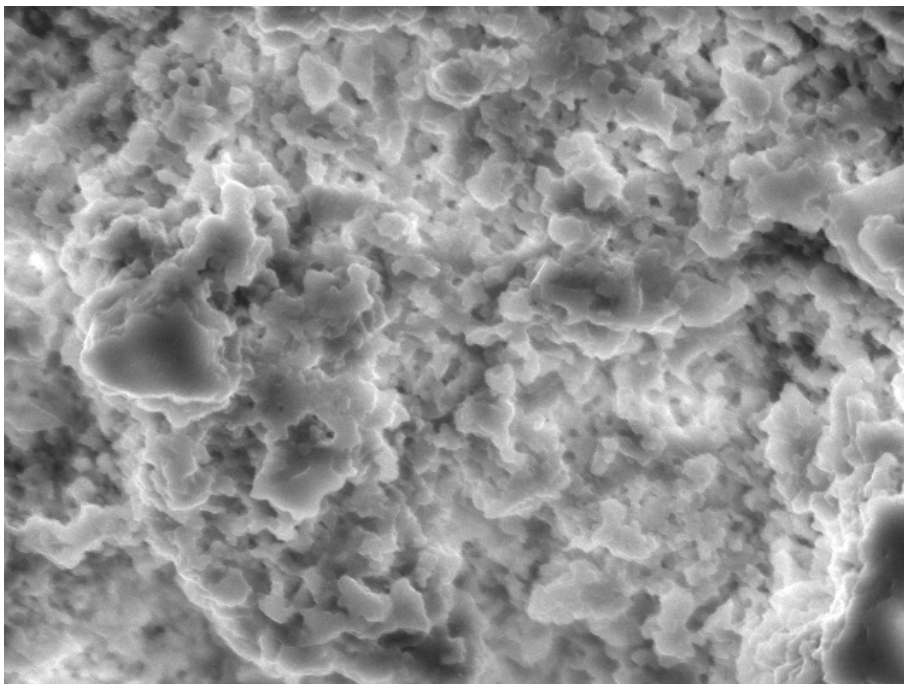
Slika 6.7.2. Izmerjeni spekter v svežem in preperlem delu apnenca Ma2, Martinska jama.

6.7.2.2. Poroznost vzorca Ma2

Posnetki površine vzorcev **Ma2** s sekundarnimi elektroni so bili narejeni s povečavami 80 x, 1000 x in 2000 x. Prepereli deli v tem vzorcu niso enakomerno porazdeljeni; prisotnih je tudi več nepreperelih predelov, ki jih opazimo kot temne lise in (sl. 6.7.5.) podolgovati pasovi. Temna pasova na sliki 6.7.3. sta široka med 120 in 140 μm , porozna zrna so v zgornjem levem polju manjša od 6 μm , medtem ko so v bolj preperelih delih velika tudi do 20 μm .

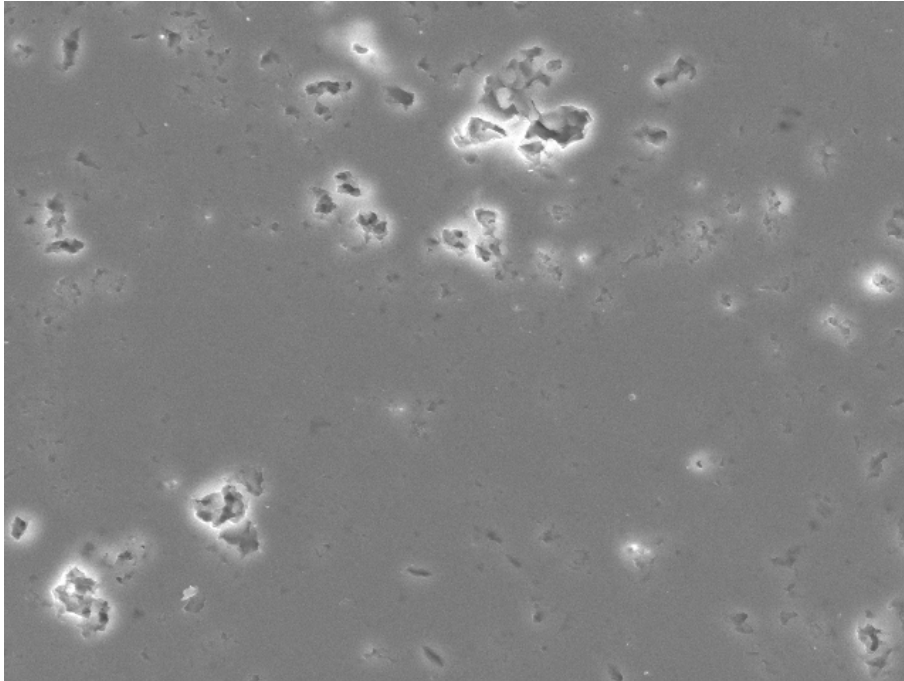


Slika 6.7.3. Sečišče dveh pasov nepreperlega apnenca v preperelem delu vzorca Ma2. (Širina slike ustreza 1,65 mm.)



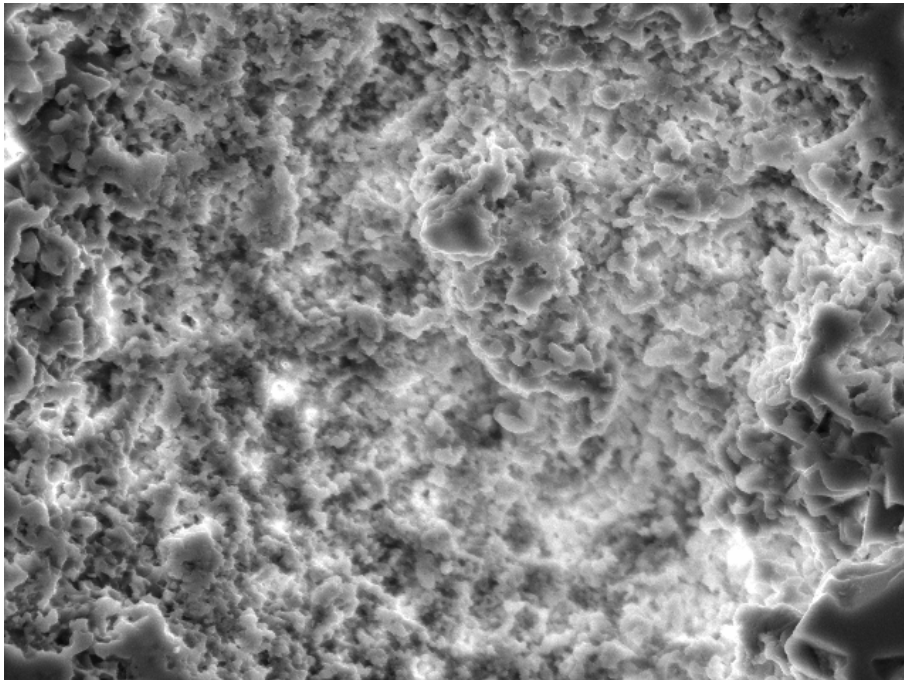
Slika 6.7.4. Prepereli apnenec v vzorcu Ma2. (Širina slike ustreza 66 μm .)

Povečava poroznega dela ob sečišču nepreperelih območij apnenca (sl. 6.7.6.) nam pokaže večja mikroparitna zrna, ki štrlijo iz mikritne osnove, katerih zrna so bolj natopljena.



Slika 6.7.5. Bolj svež del apnenca v vzorcu *Ma2* z nekaj porami. (Širina slike ustreza 132 μm).

V vsem vzorcu *Ma2* ni bilo popolnoma nenačetelega dela, povsod je prisotno že vsaj nekaj por (sl. 6.7.5.). V svežem delu mikritnega apnenca (sl. 6.7.7.) so prisotne majhne in velike pore (od 0,5 μm do 10 μm).



Slika 6.7.6. Prepereli del apnenca v vzorcu *Ma2*. (Širina slike ustreza 132 μm).

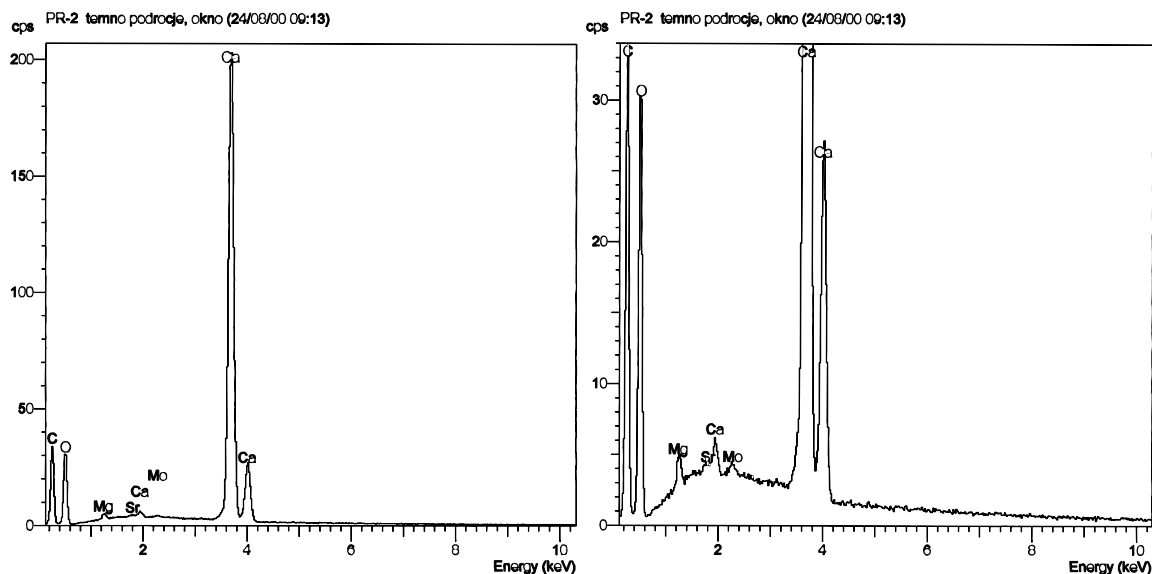
Osnovo v preperelem delu vzorca *Ma2* predstavljajo kalcitna zrna, v povprečju velika okrog 1 μm , vmes so prisotna posamezna večja zrna, velika do 20 μm (sl.6.7.6.).

6.7.2.3. Elementarna sestava svežega in preperelega apnenca iz Jame II na Prevali

V vzorcu *Pr2* je meja med preperelim in nepreperelim delom vzorca očitna, prehod med njima je oster. Nепrepereli *Pr2a*, sveži del vzorca, je temen, poroznosti skoraj ni opaziti. Prepereli del *Pr2c* vzorca je svetel in močno porozen.

Zanimala me je elementarna sestava svežega in preperelega dela apnenca ter možna razlika med njima. Na meji med preperelim in svežim delom vzorca je bil z odbitimi elektroni zaradi reliefa in sestave opazen fazni kontrast.

Kvalitativna analiza svežega (temnega) dela vzorca in preperelega (svetlega) dela vzorca pri povečavi 150 x, v oknih 100 x 100 μm je pokazala prisotnost naslednjih elementov: C, O, Ca, Mg ter v sledovih Mo in Sr. Razlika med obema deloma je v vsebnosti magnezija.



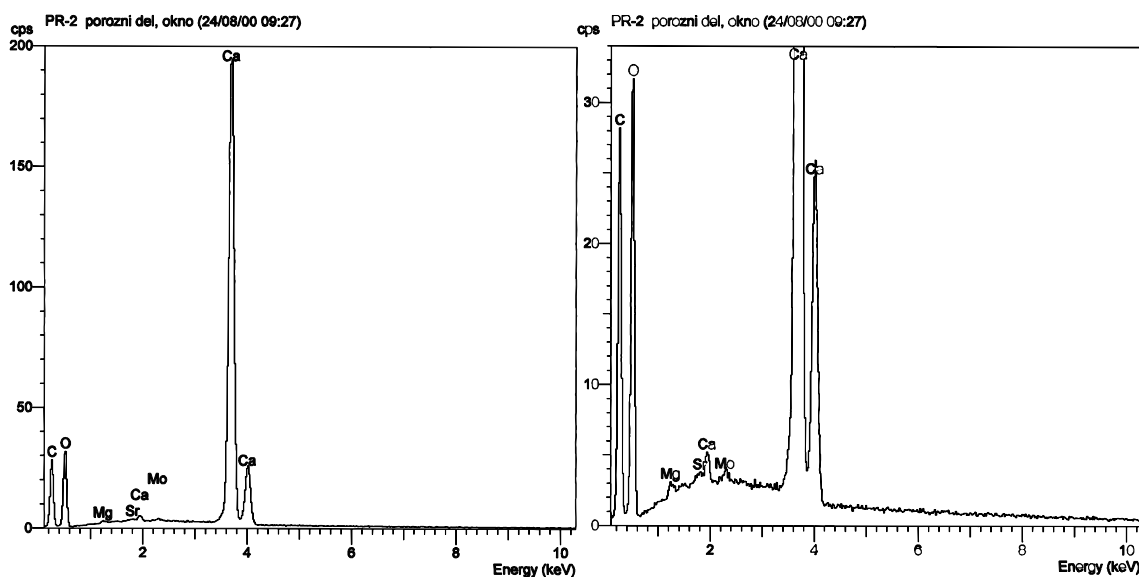
Slika 6.7.7. Izmerjeni spekter elementov v svežem delu apnenca *Pr2* (različni ordinati).

Izvedena je bila semikvantitativna analiza svežega dela apnenca v treh oknih velikosti 100 x 100 μm (sl. 6.7.7). Rezultati analize so na sl. 6.7.8..

Pr2a	št.zadetkov	št.zadetkov	št.zadetkov	št.zadetkov	total %	total %	total %	total %
okno	MgK	SrL	MoL	CaK	MgK	SrL	MoL	CaK
1.	1114	164	847	215847	0,5	0,1	0,4	99
2.	1284	413	799	218802	0,6	0,2	0,4	98,9
3.	1033	195	920	219441	0,5	0,1	0,4	99
povprečje	1143,67	257,333	855,333	218030	0,53333	0,13333	0,4	98,9667

Slika 6.7.8. Semikvantitativna analiza v treh oknih velikosti 100 x 100 μm svežega dela apnenca iz Jame II na Prevali. Merjene so bile vsebnosti Ca, Mg, Mo in Sr.

Izvedena je bila tudi semikvantitativna analiza poroznega dela apnenca v treh oknih velikosti 100 x 100 μm (sl. 6.7.9.). Merjene so bile vsebnosti Ca, Mg, Mo in Sr, rezultati analize so na sl. 6.7.10..

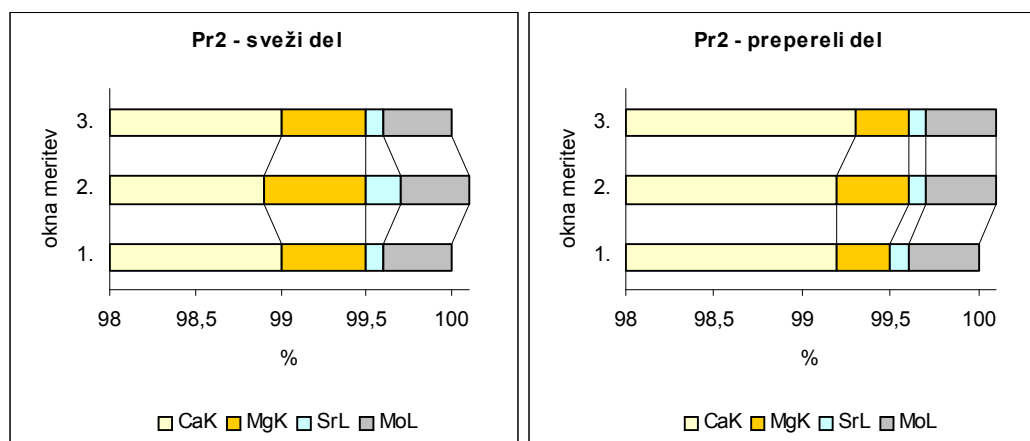


Slika 6.7.9. Izmerjeni spekter elementov v preperem delu apnenca Pr2 (različni ordinati).

Pr2c	št.zadetkov	št.zadetkov	št.zadetkov	št.zadetkov		total %	total %	total %	total %
okno	MgK	SrL	MoL	CaK		MgK	SrL	MoL	CaK
1.	571	153	886	210499		0,3	0,1	0,4	99,2
2.	769	135	779	213343		0,4	0,1	0,4	99,2
3.	652	144	746	210380		0,3	0,1	0,4	99,3
povprečje	664	144	803,667	211407		0,33333	0,1	0,4	99,2333

Slika 6.7.10. Semikvantitativna analiza v treh oknih velikosti 100 x 100 µm preperelega dela apnenca iz Jame II na Prevali. Merjene so bile vsebnosti Ca, Mg, Mo in Sr.

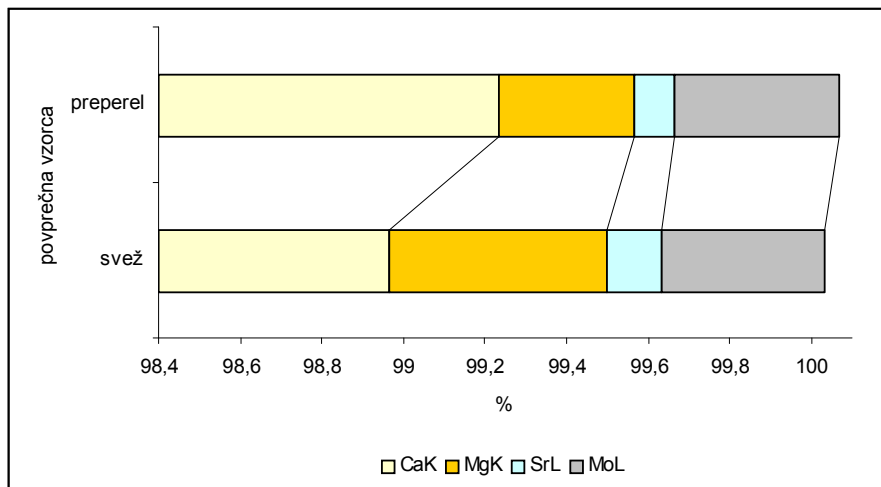
Primerjava rezultatov analiz svežega in preperelega dela pokaže (sl. 6.7.11. in sl. 6.7.12.), da je razlika predvsem v vsebnosti Mg, saj je v preperem delu manjša za 0,2%, malo manjša pa je tudi vsebnost Sr, v povprečju za 0,03%.



Slika 6.7.11. Razlika med vsebnostmi Ca, Mg, Mo in Sr, določena s semikvantitativno analizo v treh oknih svežega in preperelega apnenca iz Jame II na Prevali.

Razlike za ugotavljanje površinske porazdeljenosti Mg v svežem in preperem delu vzorca so premajhne, da bi se razlika opazila (absolutna razlika v težnih % bi morala biti vsaj 5%). V preperem delu vzorca **Pr2** je vsebnost Ca v povprečju večja za 0,26 % kot v

nepreperelem delu. Razlika med povprečnimi vrednostmi Ca, Mg, Mo in Sr iz vseh treh oken svežega in preperlega dela apnenca **Pr2** je na sl. 6.7.12..



Slika 6.7.12. Razlika med povprečnimi vrednostmi Ca, Mg, Mo in Sr določena s semikvantitativno analizo v svežem in preperelem delu apnenca iz Jame II na Prevali.

6.7.2.4. Zaključki iz rezultatov EDS elementarne analize

V obeh vzorcih so bili določeni ogljik, kisik, kalcij, magnezij in stroncij. V svežem delu vzorca **Ma2** so bili prisotni še žveplo, železo in nikelj, v **Pr2** pa molibden. V preperelem delu **Ma2** so bili določeni silicij, aluminij in klor. Elementarna sestava kaže, da oba vzorca gradi kalcit s primesmi.

V obeh vzorcih je

- v preperelem delu manj Mg in Sr; ni tudi Fe in Ni, ki sta bila prisotna v svežem delu vzorca **Ma2**. Pri preperevanju iz kamnine v glavnem odhajajo ioni z nižjim ionskim potencialom (manjši radij iona).

Zaradi velike poroznosti preperlega dela obeh vzorcev, so zrna, katerih vezi so bile med raztapljanjem oslabiljene, iz obrusov izpadala. Zato je bilo lepo videti tudi razporeditev por po vzorcu. Posebno lepo je bil izražen prehod iz svežega v prepereli apnenec v vzorcu **Pr2** (sl. 6.7.12.).

Iz iste slike je tudi razvidno, da

- ne gre za izločanje sekundarnih kalcitnih kristalov na površini raztapljajočega apnenca, ampak za povečanje poroznosti zaradi njegovega preperevanja.
- Preperevanje apnenca v vzorcih **Ma2** in **Pr2** je posledica raztapljanja. Raztapljanje v kamnino prodira po kontaktih med zrnji in ustvarja povezano medzrnsko poroznost. Taka
- poroznost daje prepereli kamnini spužvasto strukturo.

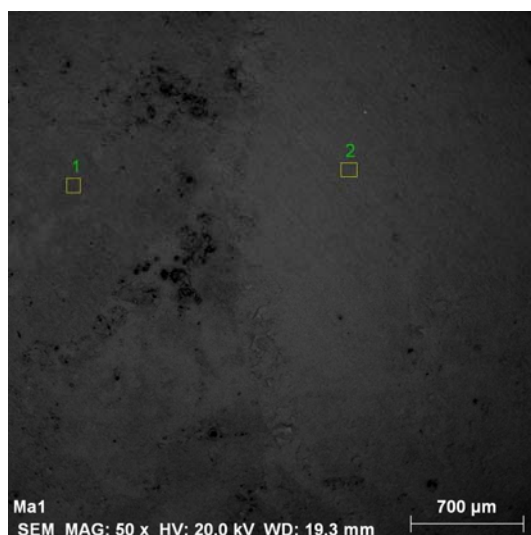
6.7.3. EDS analiza vzorcev na Brukerjevem Quantax AXS mikroanalizatorju

EDS kvalitativna in kvantitativna analiza izbranih oksidov je bila narejena v izbranih točkah na posameznem vzorcu; za analizo je bil izbran manj ali svež ter bolj preperel del vzorca. Rezultati vsebnosti so podani v masnih odstotkih. Analizirala sem pa vzorce:

- **Ma1**- stik med svežim in preperelim delom, počasen prehod, široka cona postopnega prepevanja, Martinska jama;
- **Ma2** – močno preperel del, Martinska jama;
- **Pr2** - oster prehod med svežo in preperelo kamnino, Jama II na Prevali;
- **BJ1** – preperel apnenec, Pečina v Borštu;
- **Kr1** - oster prehod med svežo in preperelo kamnino, jama Krempljak; in
- **Rm** – svež dolomit s preperelim robom; jama Remergrund 2.

6.7.3.1. Elementarna sestava svežega in preperlega apnenca iz Martinske jame

V vzorcu **Ma1** je prehod med preperelim in nepreperelim delom vzorca zvezen. Analiza je bila izvedena v popolnoma preperem delu **Ma1/1** in v manj preperem delu vzorca **Ma1/2** (sl. 6.7.13.).

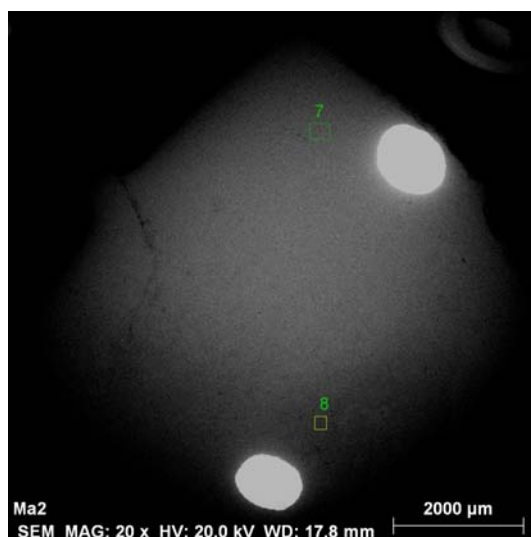


Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
1	42,01	0,08	0,18	0,00	0,00	0,12	0,20	0,32	56,72	0,21	0,15	0,00
2	42,67	0,01	0,15	0,00	0,00	0,00	0,08	0,20	56,67	0,18	0,04	0,00

Slika 6.7.13. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu **Ma1** iz Martinske jame; točka 2 je v manj preperem delu, točka 1 je v bolj preperem delu.

Analiza (sl. 6.7.13.) v **Ma1/1** je pokazala prisotnost CO₂, Na₂O, MgO, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO, FeO in MnO. V preperem delu **Ma1/2** so bili določeni CO₂, Na₂O, MgO, SO₃, K₂O, CaO, FeO in MnO. Razlika vsebnosti je majhna, kar kaže na približno enako stopnjo preperelosti, le da je okrog točke 1 kamnina bolj porozna, zato lahko vsebuje večji delež oksidov, ki izhajajo iz flišnih naplavin, ki so bile v kontaktu s preperelo kamnino ter delež CaO je rahlo povečan.

Vzorec **Ma2** je močno preperel in tudi izbrani točki za analizo sta bili obe v močno preperilem apnencu, točka 7 je bila v zelo preperilem delu (sl. 6.7.14.).



Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
7	37,68	0,13	0,39	0,15	0,00	0,00	0,00	0,60	59,37	0,88	0,78	0,00
8	43,23	0,08	0,40	0,69	0,13	0,00	0,01	0,22	55,02	0,16	0,04	0,00

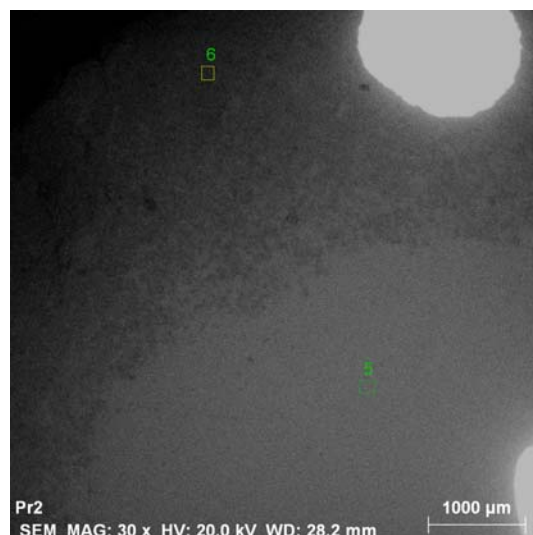
Slika 6.7.14. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu **Ma2** iz Martinske jame; točka 8 je v malo manj preperilem delu, točka 7 je v zelo preperilem delu.

Analiza (sl. 6.7.14.) v **Ma2/7** je pokazala prisotnost CO₂, Na₂O, MgO, Al₂O₃, K₂O, CaO, FeO in MnO. V preperilem delu **Ma2/8** so bili določeni CO₂, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, K₂O, CaO, FeO in MnO. Razlika med obema deloma je taka, da je v bolj preperilem delu manj Al₂O₃, in CO₂ ter malo manj MgO, ni pa nič SiO₂ in SO₃; poveča pa se delež CaO, Na₂O, K₂O, FeO ter MnO. Pomemben je podatek, da se v bolj preperilem delu zviša delež CaO in zniža delež MgO. Ostali oksidi, pa ne vem ali so netopni ostanek ali pa izhajajo iz flišnih naplavin, ki so bile v kontaktu s preperelo kamnino.

6.7.3.2. Elementarna sestava svežega in preperilega apnenca iz Jame II na Prevali

V vzorcu **Pr2** je meja med preperelim in nepreperelim delom vzorca očitna, prehod med njima je oster. Neprepereli sveži del vzorca, je temen, poroznosti skoraj ni opaziti. Prepereli del vzorca je svetel in močno porozen. Analiza je bila izvedena v temnejšem delu (manj preperel) vzorca **Pr2/5** in v popolnoma preperilem delu **Pr2/6** (sl. 6.7.15.).

Analiza (sl. 6.7.15.) v svežega dela **Pr2/5** je pokazala prisotnost CO₂, Na₂O, MgO, K₂O, CaO, FeO in MnO. V preperilem delu **Pr2/6** so bili določeni CO₂, MgO, K₂O, CaO ter malo FeO. Prepereli del je glede na masne deleže vsebovanih oksidov za malenkost čistejši od nepreperilega dela.

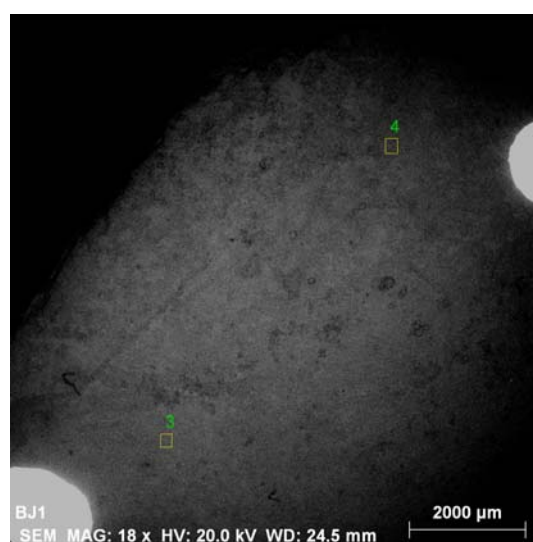


Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
5	40,03	0,02	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	58,95	0,37	0,00	0,00
6	40,88	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	58,69	0,06	0,00	0,00

Slika 6.7.15. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu Ma2 iz Martinske jame; točka 5 je v svežem delu, točka 6 je v preperem delu.

6.7.3.3. Elementarna sestava svežega in preperlega apnenca iz Pečine v Borštu

Vzorec **BJ1** je močno preperel in tudi izbrani točki za analizo sta bili obe v močno preperem apnencu, točka 4 je bila v zelo preperem delu (sl. 6.7.16.).



Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
3	34,17	0,14	0,20	0,10	0,42	0,05	0,10	0,18	64,30	0,22	0,05	0,07
4	38,39	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	59,97	0,66	0,34	0,00

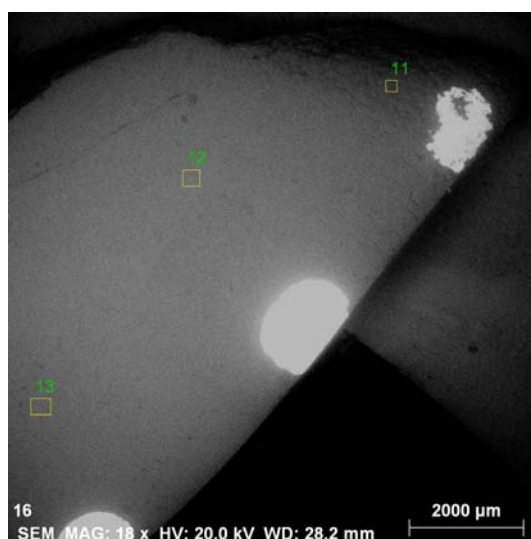
Slika 6.7.16. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu BJ1 iz Pečine v Borštu; točka 3 je v preperem delu, točka 4 je v zelo preperem delu.

Analiza (sl. 6.7.16.) v preperelem **Bj1/3** je pokazala prisotnost CO₂, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO, FeO, MnO in SrO. V zelo preperelem delu **Bj1/4** so bili določeni CO₂, Na₂O, K₂O, CaO, FeO in MnO. Razlika med obema deloma je taka, da je v bolj preperelem delu manj Na₂O, CaO in ni MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, in SrO. Poveča pa se delež CO₂, K₂O, FeO ter MnO. Pomemben je podatek, da se v bolj preperelem delu zniža delež MgO. Ostali oksidi, ki se povečajo ne vem ali so netopni ostanek ali pa izhajajo iz flišnih naplavin, ki so bile v kontaktu s preperelo kamnino; morda pripadajo netopnim ostankom, ker je v preperelem delu manj CaO.

6.7.3.4. Elementarna sestava svežega in preperlega apnenca iz Krempljaka

V vzorcu **Kr1** je meja med preperelim in nepreperelim delom vzorca očitna, prehod med njima je oster. Nprepereli sveži del vzorca, je temen, poroznosti skoraj ni opaziti. Prepereli rob vzorca je svetel in močno porozen. Analiza je bila izvedena v temnejšem delu (manj preperel) vzorca **Kr1/13** in v preperelem delu **Kr1/12** takoj za mejo in v zelo preperelem zunanjem delu vzorca **Kr1/11** (sl. 6.7.17.).

Analiza (sl. 6.7.17.) v nepreperelem **Kr1/13** je pokazala prisotnost CO₂, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, K₂O, CaO, FeO in MnO. V preperelem delu **Kr1/12** so bili določeni CO₂, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, K₂O, CaO in FeO. V preperelem robu **Kr1/11** so bili določeni CO₂, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO in FeO. Razlika med vsemi tremi točkami je, da je v bolj preperelem delu manj Al₂O₃, SiO₂, CaO, FeO in ni MgO, SO₃ in MnO. Delež se v najbolj preperelem delu ne poveča nobenemu oksidu. Pomemben je podatek, da se v najbolj preperelem delu ni več MgO in v preperelem delu je njegov delež nižji kot v svežem.

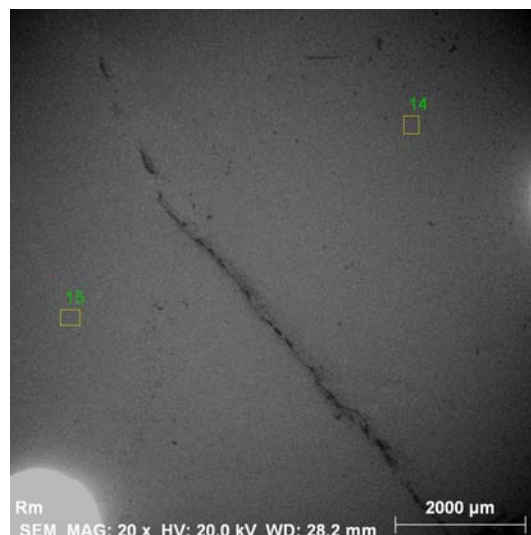


Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
11	82,86	0,00	0,00	2,37	0,24	0,00	0,00	0,19	14,05	0,29	0,00	0,00
12	62,11	0,00	0,22	2,60	0,45	0,00	0,52	0,26	33,42	0,41	0,00	0,00
13	49,88	0,00	0,38	3,01	0,73	0,00	0,07	0,15	44,89	0,74	0,14	0,00

Slika 6.7.17. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu **Kr1** iz Krempljaka; točka 13 je v nepreperelem delu, točka 12 je v preperelem delu in točka 11 je v zelo preperelem robu apnenca.

6.7.3.5. Elementarna sestava svežega in preperlega apnenca iz Remergrunda

V vzorcu **Rm** je meja med preperelim in nepreperelim dolomitom očitna, prehod med njima je dokaj oster. Nепrepereli sveži del vzorca je temnejši, poroznosti skoraj ni opaziti. Prepereli rob vzorca je svetel in močno porozen. Analiza je bila izvedena v nepreperem delu vzorca **Rm/15** in v preperem delu **Rm/14** (sl. 6.7.18.).



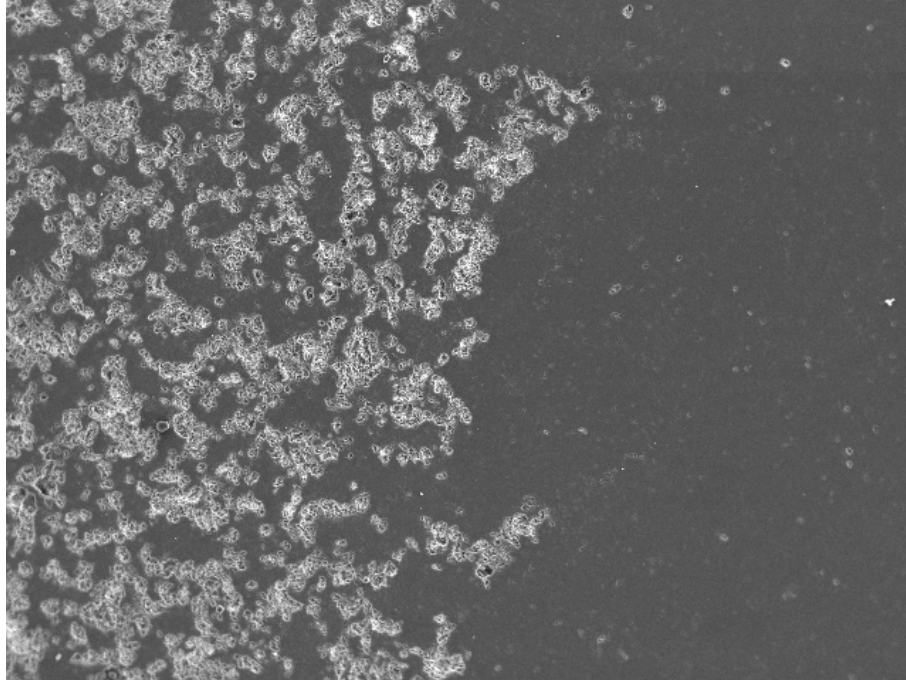
Točka	CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	MnO	SrO
14	50,56	0,07	14,98	0,05	0,23	0,00	0,07	0,28	33,67	0,08	0,02	0,00
15	50,52	0,17	15,04	0,08	0,25	0,07	0,14	0,28	33,25	0,10	0,05	0,06

Slika 6.7.18. Razlika med masnimi deleži (%) oksidov določena s kvantitativno analizo v vzorcu Rm iz Remergrunda II; točka 14 je v preperem delu, točka 15 je v svežem delu.

Analiza (sl. 6.7.18.) v svežem **Rm/15** je pokazala prisotnost CO₂, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO, FeO, MnO in SrO. V preperem delu **Rm/14** so bili določeni CO₂, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, SO₃, K₂O, CaO, FeO ter MnO, ni bilo pa P₂O₅ in SrO. Pomemben je podatek, da se v preperem delu zniža delež MgO.

6.7.4. Poroznost vzorca Pr2 na vrstičnem elektronskem mikroskopu JEOL JSM 5800

Dva obrusa apnenca (*Pr2*) s preperelo cono sta bila narejena na prehodu iz kompaktnega v porozni del. Prehod je dokaj oster. Posnetki površine poliranega vzorca *Pr2* s sekundarnimi elektroni so bili narejeni s povečavami 80 x in 1000 x.



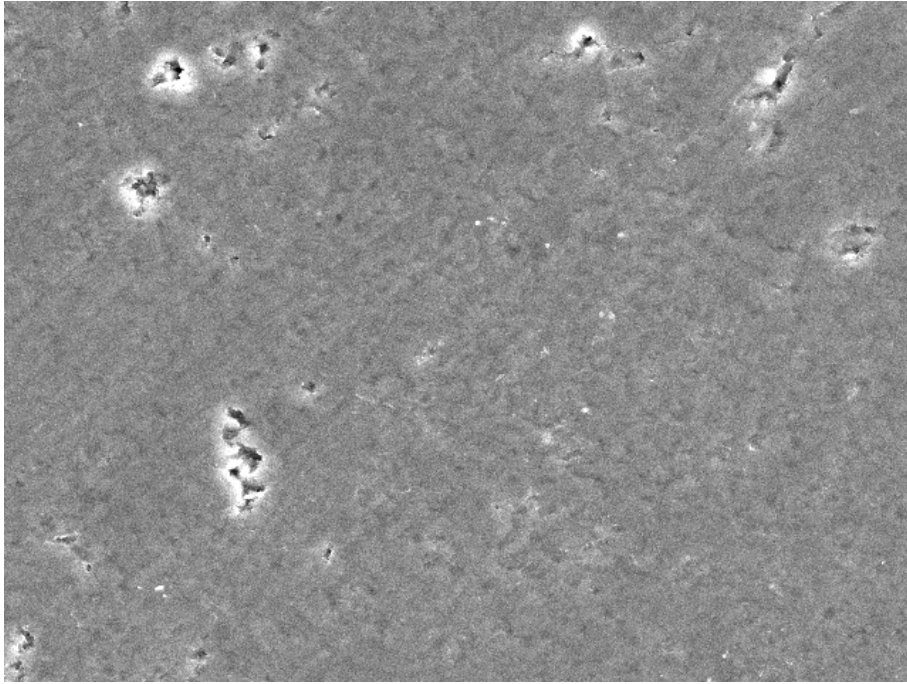
Slika 6.7.19. Meja med svežim in poroznim delom apnenca v vzorcu *Pr2*. (Širina slike ustreza 1,65 mm.)

V obrusu *Pr2* je lepo viden neenakomeren vendar hiter prehod med svežim in preperelim delom vzorca (sl. 6.7.19.). Temnejši del slike predstavlja sveži apnenec, svetli del pa je preperelega.

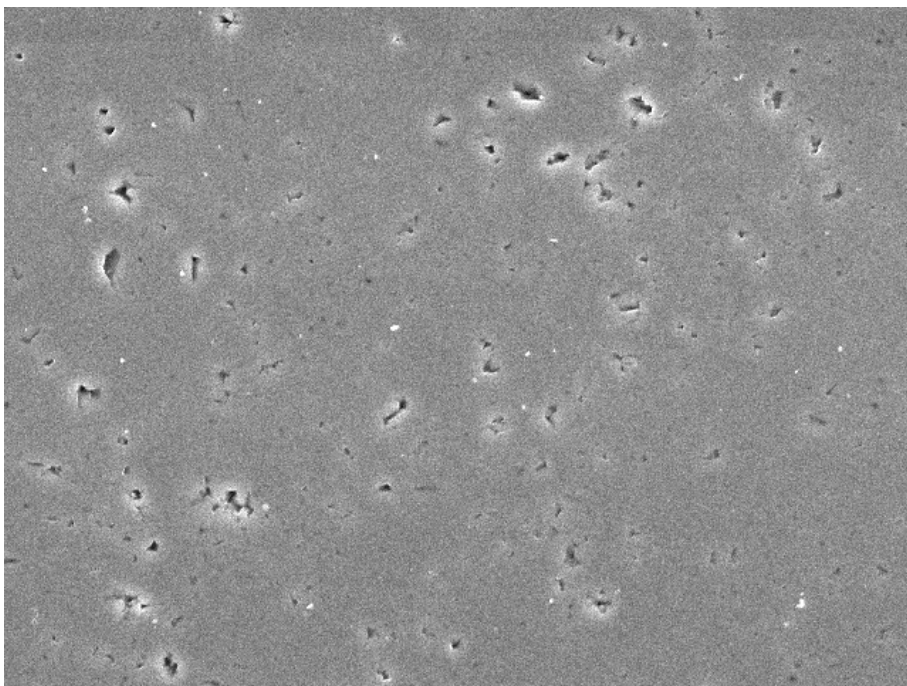
V svežem delu apnenca (sl. 6.7.20.) so zrna zložena kompaktno, prisotne so posamezne pore, ki so velike od 0,5 μm do 3 μm . Opazna je tudi mikrostruktura, ki sledi kontaktom med zrn in je opazna pri povečavi 1000 x. Enaka mikrostruktura je bila v vzorcu *Ma2* opazna šele pri povečavi 3000 x, iz česar sledi, da je apnenec v vzorcu *Ma2* mikrit, v vzorcu *Pr2* pa skoraj popolnoma prekristaljen v mikrosparit.

V področju povečane poroznosti, ob stiku med svežim in poroznim delom apnenca, je poroznost že precej povečana (sl. 6.7.21.). V poroznem delu apnenca so kalcitna zrna v osnovi velika od 1 μm , posamezna večja zrna pa do 8 μm .

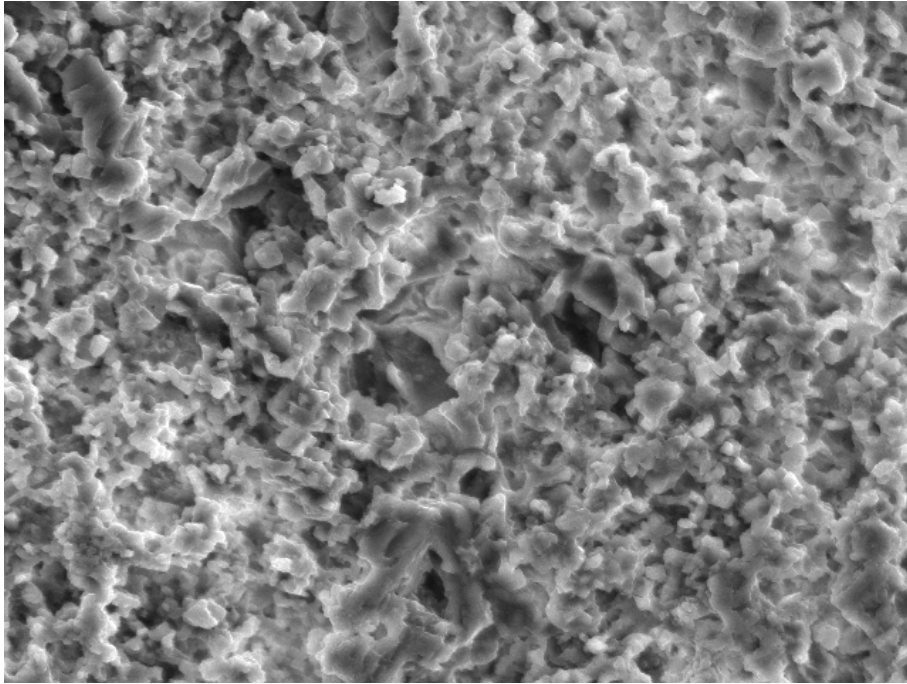
Kalcitna zrna so v preperlem delu vzorca *Pr2* močno natopljena (sl. 6.7.22.).



Slika 6.7.20. Sveži del apnenca v vzorcu Pr2, por je malo, zrna so kompaktno zložena, opazna je neka nedoločljiva struktura, ki sledi stikom med zrni. (Širina slike ustreza 132 μm .)



Slika 6.7.21. Prehod med svežim in poroznim delom apnenca v vzorcu Pr2, por je več, opazna je drobna zrnnavost. (Širina slike ustreza 132 μm .)



Slika 6.7.22. Prepereli del apnenca v vzorcu Pr2, kljub predhodni poliranosti je poroznost velika. (Širina slike ustreza 132 μm .)

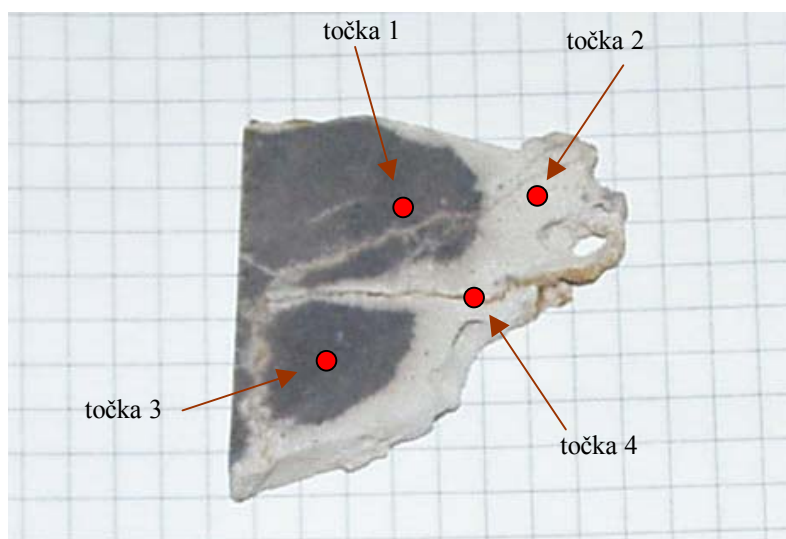
6.8. Analiza s protonskim žarkom

6.8.1. Uvod

V Laboratoriju za analize z ionskim (protonskim) žarkom, IJS, Reaktorski center Podgorica, na Odseku za fiziko nizkih in srednjih energij, so mi izvedli mikroanalizo slednih prvin v vzorcu **Pr1** iz Jame II na Prevali.

Prerez dela vzorca **Pr1**, ki je paleocenski apnenec s preperelim robom, so analizirali v 4 točkah in linijsko na razdalji 2 cm, sl. 6.8.1.. Rezultate analiz podajam v izvirni obliki ($E_p = 2,5$ MeV (energija protonov)).

6.8.2. Točkovna analiza vzorca Pr1



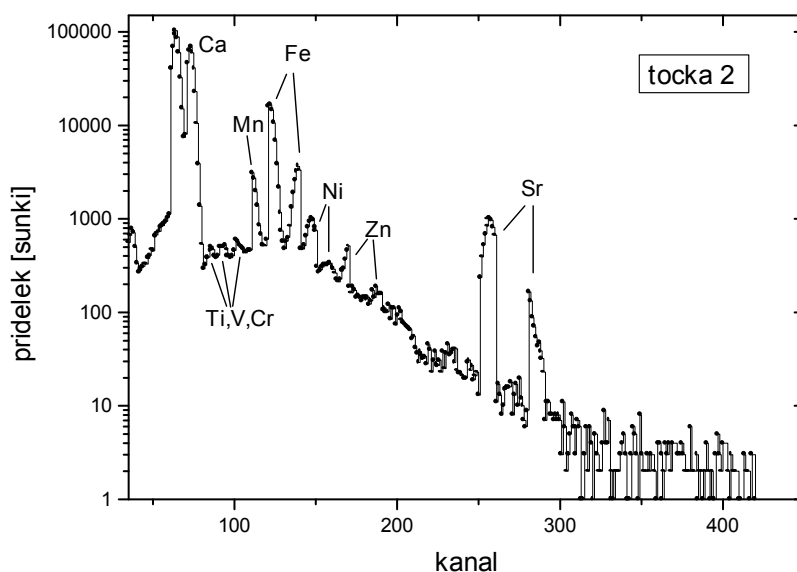
Slika 6.8.1. Prerez vzorca *Pr1* iz Jame II na Prevali, z označenimi točkami merjenja koncentracij slednih prvin s protonskim žarkom.

V vzorcu **Pr1** so izmerjene koncentracije (masni deleži v %) slednih elementov Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Sr, Y, Zr, Pb. Rezultati meritev v izbranih 4 točkah so v preglednici na sl. 6.8.2..

element	točka 1 [%]	točka 2 [%]	točka 3 [%]	točka 4 [%]
Ti	/	$5,3 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
V	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$
Cr	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$
Mn	$2,1 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$
Fe	$9,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-2}$
Ni	$3,8 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Zn	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Sr	$7,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-2}$
Y	$2,3 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$
Zr	/	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$8,2 \times 10^{-4}$
Pb	/	$8,4 \times 10^{-4}$	/	/

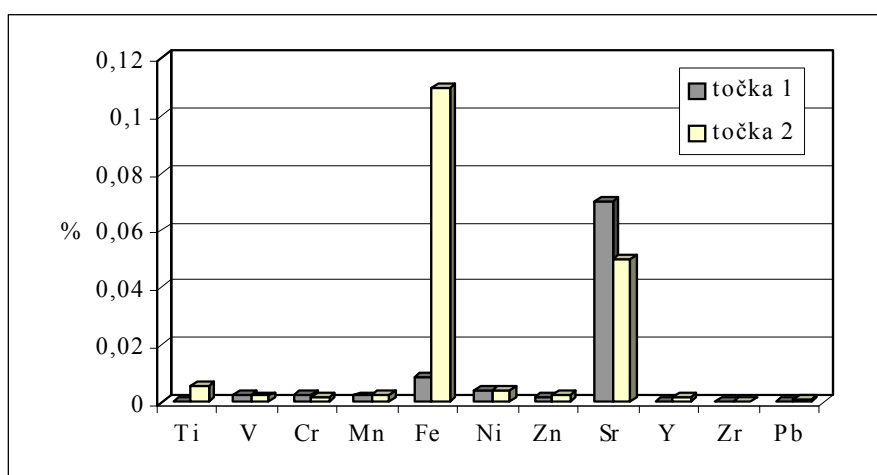
Slika 6.8.2. Koncentracije elementov (masni deleži v %) v 4 točkah vzorca *Pr1*.

Za ilustracijo je na naslednji sliki (6.8.3.), prikazan tudi tipičen izmerjeni spekter. Označene so konice, ki ustrezajo posameznim elementom. Prikazani spekter ustreza meritvi vzorca **Pr1** v točki 2, katere rezultati so podani v tabeli na sl. 6.8.2..



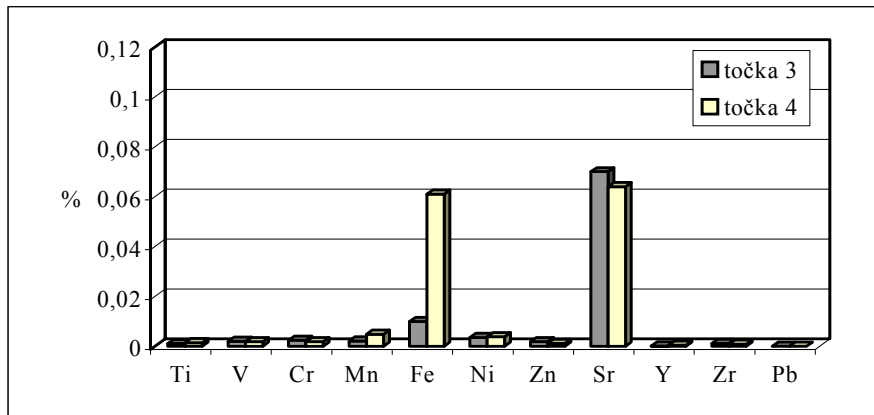
Slika 6.8.3. Izmerjeni spekter elementov v točki 2 vzorca **Pr1**.

Za primerjavo koncentracij slednih elementov v vzorcu **Pr1** sem naredila primerjave med točkama, ki sta si bili v vzorcu najbližji in to v nepreperem ter preperem delu vzorca. Primerjavi prikazujeta sl. 6.8.8. in sl. 6.8.9.. Zanimala me je tudi razlika koncentracij slednih elementov v točkah, ki sta bili merjeni v nepreperem delu vzorca in razlika med točkama v preperem delu vzorca, primerjavi sta prikazani na sl. 6.8.10. in sl. 6.8.11..



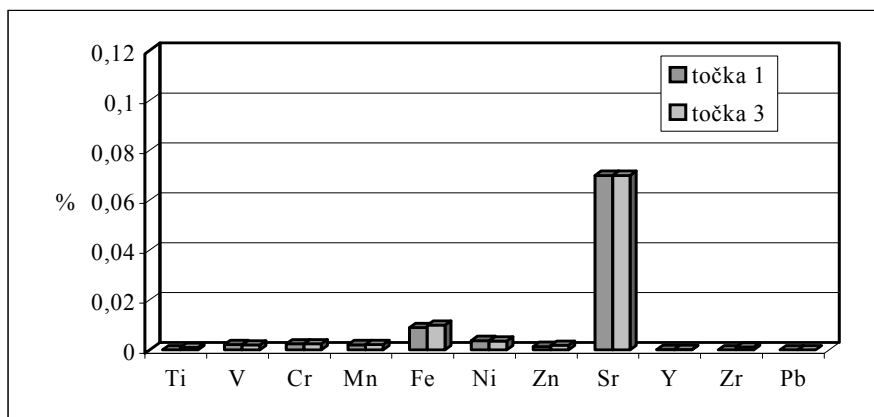
Slika 6.8.4. Primerjava vsebnosti (masni deleži v %) slednih elementov v točkah 1 in 2, najbližji točki iz nepreperlega in preperlega dela vzorca **Pr1**.

Iz slike 6.8.4. je razvidno, da je v preperem delu vzorca (točka 2), znatno povišana vsebnost Fe, glede na točko 1 iz nepreperlega dela vzorca. Povišane so tudi vsebnosti Ti, Zn, Mn, Y in Pb. Nižje vsebnosti so Sr, Cr in V.



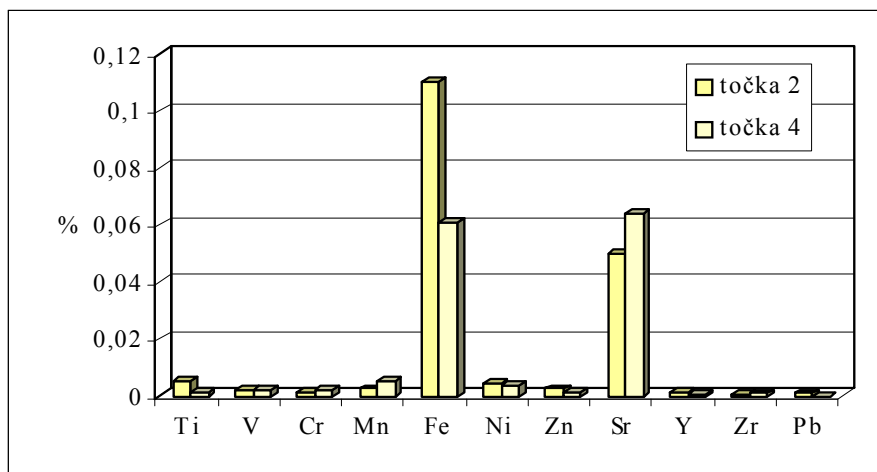
Slika 6.8.5. Primerjava vsebnosti (masni deleži v %) slednih elementov v točkah 3 in 4, najbližji točki iz nepreperlega in preperlega dela vzorca Pr1.

Iz primerjave med deleži slednih elementov v točkah 3 in 4 (sl. 6.8.5.) je razvidno, da je v preperem delu vzorca močno povečan delež Fe, malo višji delež je tudi Mn, Ti, Ni in V. Deleži Sr, Cr, Zn, in Zr so v preperem delu vzorca (točka 4) nižje.



Slika 6.8.6. Primerjava vsebnosti (masni deleži v %) slednih elementov v točkah 1 in 3, iz nepreperlega dela vzorca Pr1.

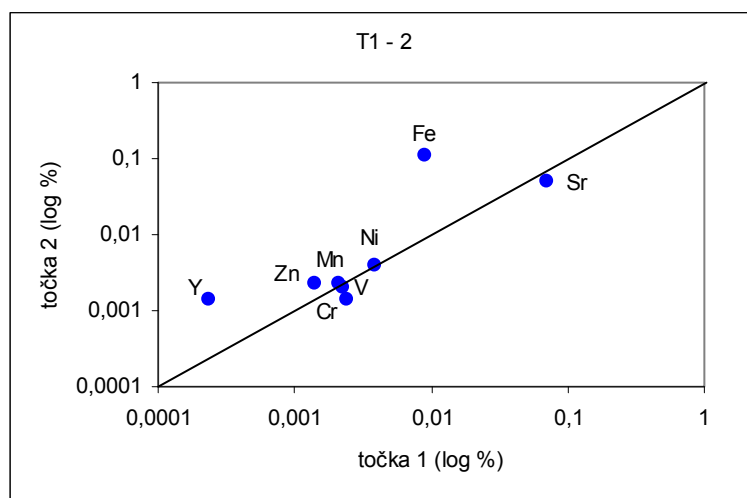
Deleži slednih elementov v točkah 1 in 3 iz nepreperlega dela vzorca se delno razlikujeta, predvsem v vsebnosti Fe, ki je višji v točki 3, višje pa so tudi vsebnosti Ti, Zn ter Zr.



Slika 6.8.7. Primerjava vsebnosti (masni deleži v %) slednih elementov v točkah 2 in 4, iz preperlega dela vzorca Pr1.

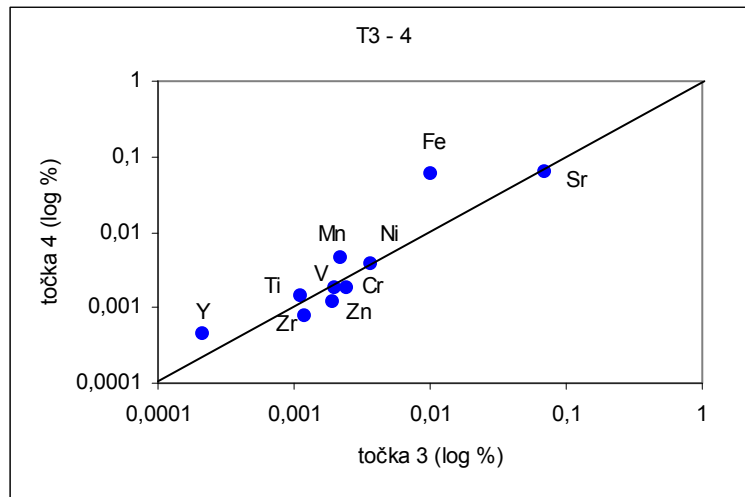
Deleži slednih elementov v točkah 2 in 4 iz preperlega dela vzorca se precej razlikujejo. Največje so razlike v deležih Fe in Sr, opazne so razlike tudi v deležih Ti, Mn, Zn, Cr ter tudi pri vseh ostalih elementih.

Zanimalo me je, ali je opazna razlika v sestavi med nepreperelim in preperelim delom vzorca glede na sledne elemente. Ali torej obstaja razlika med vsebnostmi slednih elementov v točkah 1 in 2 ter točkah 3 in 4 in ali je razlika v sestavi med točkama iz nepreperlega dela vzorca in točkama iz preperlega dela vzorca, to je med točkama 1 in 3 ter 2 in 4.

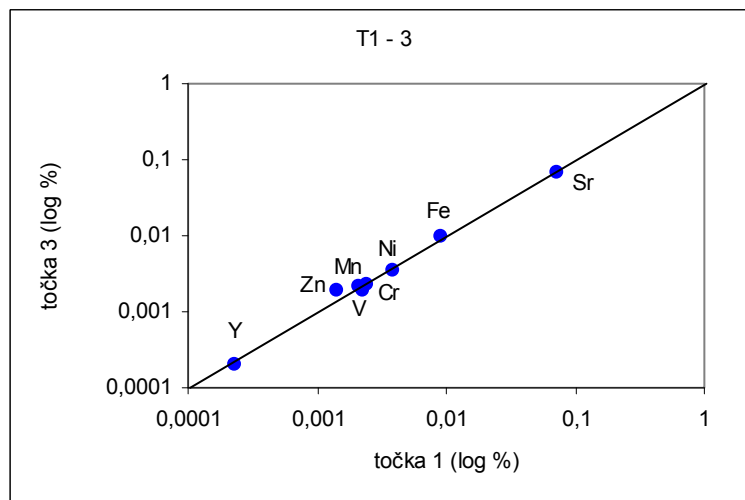


Slika 6.8.8. Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točki 1 (neprepereli del) in točki 2 (prepereli del) vzorca Pr1.

Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točkah 1 in 2 je razvidno iz sl. 6.8.8. in razmerje med točkama 3 in 4 na sl. 6.8.9..

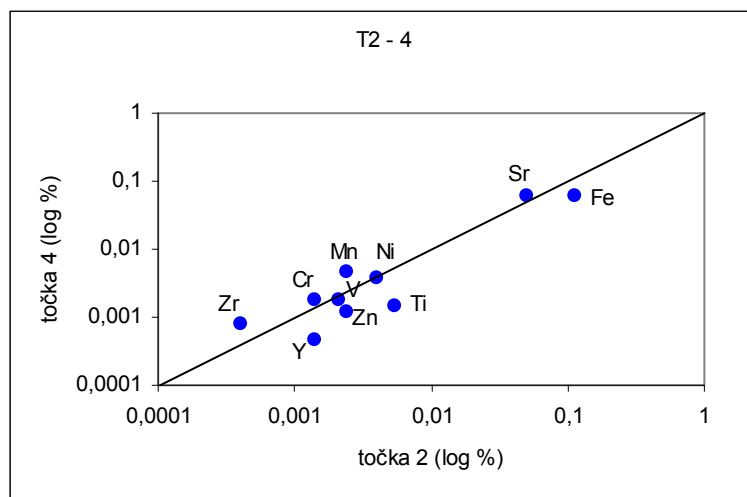


Slika 6.8.9. Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točki 3 (neprepereli del) in točki 4 (prepereli del) vzorca Pr1.



Slika 6.8.10. Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točki 1 in točki 3 (neprepereli del) vzorca Pr1.

Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točkah 1 in 3 je razvidno iz sl. 6.8.10. in razmerje med točkama 2 in 4 iz sl. 6.8.11..

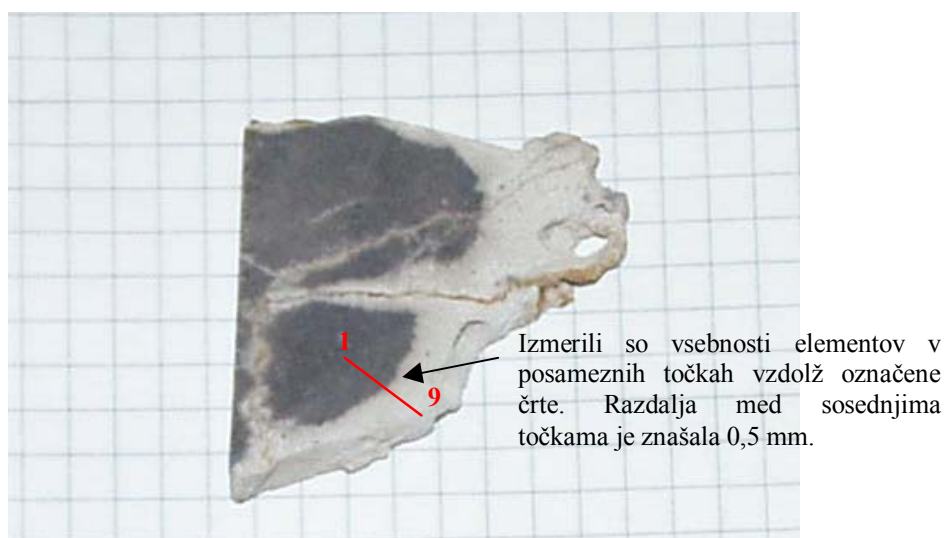


Slika 6.8.11. Razmerje med vsebnostjo slednih elementov v točki 2 in točki 4 (prepereli del) vzorca Pr1.

Iz primerjav vsebnosti slednih elementov v posameznih točkah lahko zaključim, da je razlika med točkama iz nepreperlega in iz preperlega dela vzorca manjša kot pa razlika med točkami iz nepreperlega in preperlega dela. Najboljša pa je korelacija med vsebnostjo slednih elementov v točkah iz nepreperlega dela vzorca (1 in 3).

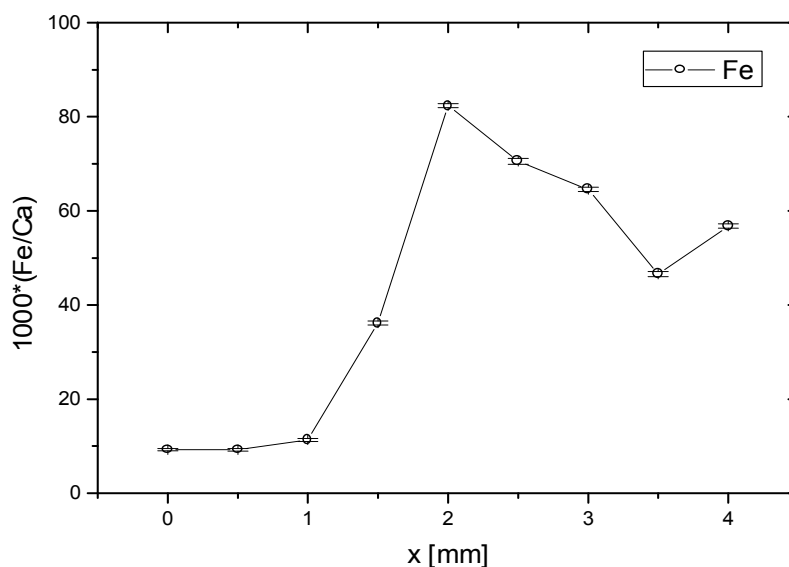
6.8.3. Linijska analiza vzorca Pr1

Na IJS so izvedli tudi meritev porazdelitve deležev slednih elementov vzdolž ravne črte, prečno na mejo med trdnim in preperelim delom vzorca ($E_p = 3,5$ MeV (energija protonov)).



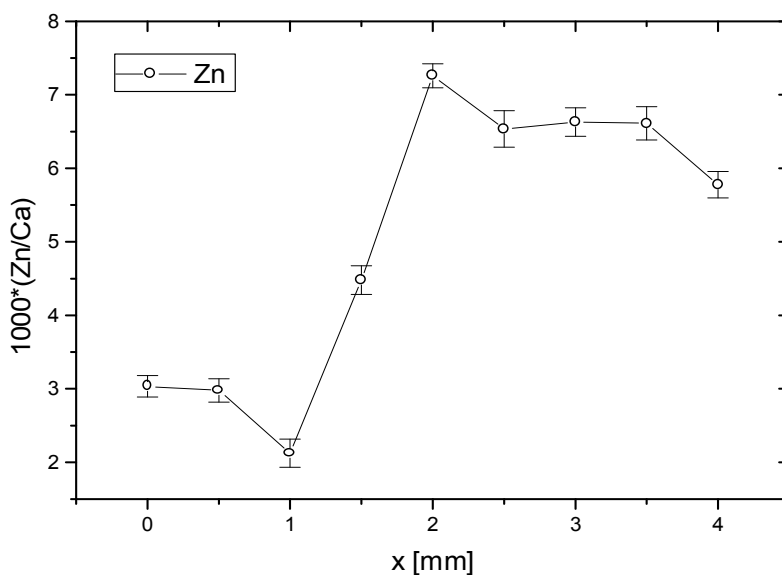
Slika 6.8.12. Položaj linijske meritve pridobitka elementov na meji med nepreperelim in preperelim delom vzorca Pr1. V točki 1 je bil začetek in točki 9 konec meritve.

V rezultatih so prikazani izmerjeni pridobitki karakterističnih črt v spektrih in ne koncentracije (sl. 6.8.12.). Vzdolž označene rdeče črte je razdalja med sosednjima točkama meritev znašala 0,5 mm, pridobitki elementov so bili izmerjeni v 9 točkah.

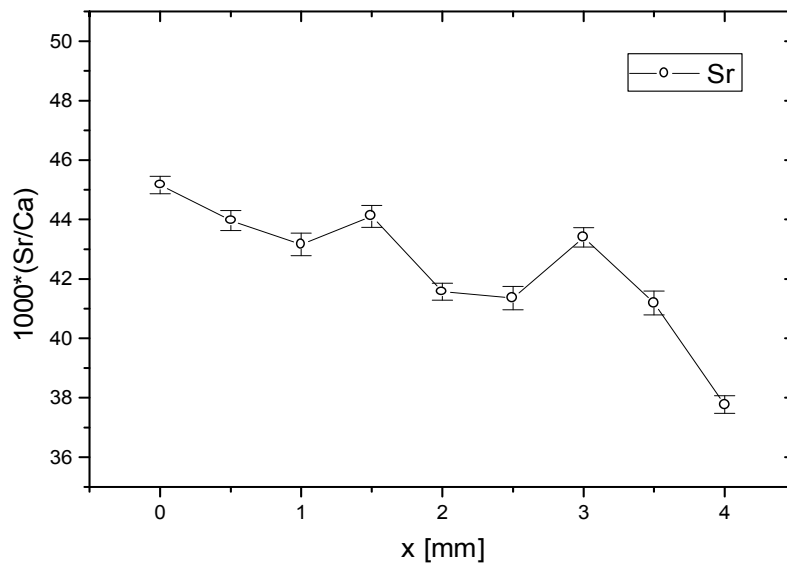


Slika 6.8.13. Meritev pridobitka Fe na meji med nepreperelim in preperelim delom vzorec Pr1, v točki 2 je stik med obema deloma vzorca. Največ Fe je na prehodu med conama.

Rezultati za elemente, katerih porast v odnosu z Ca je bil precejšen, so prikazani v naslednjih dveh slikah. Porast Fe (sl. 6.8.13.), na prehodu iz sveže kamnine v preperel del vzorca je precejšen. Tudi porast deleža Zn je kar močan (sl. 6.8.14.). V splošnem pa je v preperel delu vzorca malo manj Sr (sl. 6.8.15.).



Slika 6.8.14. Meritev pridobitka Zn na meji med nepreperelim in preperelim delom vzorec Pr1, v točki 2 je stik med obema deloma vzorca.



Slika 6.8.15. Meritev pridobitki Sr na meji med nepreperelim in preperelim delom vzorec Pr1, v točki 2 je stik med obema deloma vzorca (prikazani so izmerjeni pridobitki karakterističnih črt v spektrih in ne koncentracije).

6.8.4. Zaključki elementarne analize s protonskim žarkom

V vzorcu je opazen na prehodu med svežim in preperelim delom predvsem dvig deleža železa, cinka in mangana ter rahlo zmanjšanje deleža stroncija in kroma. Delež Fe in Zn najbolj naraste na prehodu iz sveže v preperelo cono.

Ne vem ali so prisotni kakšni minerali, v tako majhnih količinah, da jih nisem s preiskovalnimi metodami zaznala. Vendar je večja verjetnost, da se vsi ti sledni elementi vgrajujejo v kalcitovo kristalno rešetko in glede na ionski radij med preperevanjem iz njega migrirajo ali pa se vanj vgrajujejo.

6.9. Mikrobiološke analize

6.9.1. Uvod

Zanimalo me je, ali v prepereli kamnini v jamah najdemo mikroorganizme in ali imajo kakšno zvezo z raztapljanjem karbonatnih kamnin. Zato so bile mikrobiološke analize preperete kamnine iz Pečine v Borštu in Martinske jame izvedene v tem smislu.

Mikrobiološke analize so bile narejene na našem Inštitutu in na Oddelku za biologijo Biotehniške fakultete v laboratoriju Katedre za molekularno genetiko in mikrobiologijo Univerze v Ljubljani. V nadaljevanju podajam njihove rezultate.

Vzorci iz jam so bili pregledani (MULEC et al. 2002) glede na prisotnost kultivabilne mikrobne flore in to iz različnih mikro-okolij. V jami Pečina v Borštu smo proučevali mikrobno prisotnost v preperem apnencu v Končnem rovu, v jamskem srebru in v jamski ponvici, kjer se, v veliki meri, na površini pojavljajo kalcitni splavi (rafti). V Martinski jami smo vzorčili preperel apnenc in vzorec iz ponvice (sl. 6.9.1.).



Slika 6.9.1. Vzorcevanje preperete kamnine v Martinski jami.

6.9.2. Preperela kamnina

Prvi vzorec za analize je bil odvzet v Pečini v Borštu, na višini 3 metrov od tal, v relativno sušnem obdobju (% vlage ni bil izračunan).

Za poskus izolacije bakterij iz vzorca se je preizkusilo 3 tipe gojišč (glej sliko 6.9.6.):

- gojišče s preperino-PREP (1 % preperete kamnine, 0,1 % kvasnega ekstrakta, 1,5 % agarja),
- King B gojišče in
- 0,1×NA (nutrient agar).

Po 14 dnevni inkubaciji na 10°C so preverili rast bakterijskih kolonij in določili gojišče s preperino kot referenčno gojišče za kvantifikacijo bakterij iz preperine, saj je

številčno največ kolonij zraslo na tem gojišču. Za nadaljnje precepljanje so uporabili gojišče King B (gojišče za fluorescentne pseudomonade).

Kvantifikacija števila bakterij v preperem apnencu je bila izvedena na gojišču PREP (1% preperine, 0,1 % kvasnega ekstrakta, 1,5 % agar). Gojišče je bilo pripravljeno iz istega vzorca preperine, iz katerega so določili skupno število psihrofilnih bakterij. Izmerjen pH v laboratoriju je znašal 8,25. Merjeno je bilo z istim pH-metrom kot na terenu v prepereli kamnini (posebno gelsko konico, ki ne zahteva vodne raztopine za merjenje pH). Iz 0,01915g je zraslo 240 bakterijskih kolonij in nekaj kolonij gljiv (slika 9.6.2.), kar znese 12533 bakterij/g vzorca ali 10^4 bakterij/g.

6.9.3. Svetleče kapljice

V vhodnih predelih jame Pečina v Borštu se pojavlja tako imenovano jamsko srebro, to so srebrno in zlato obarvane vodne kapljice na steni, ki tam nastajajo s kondenzacijo. S stene smo odvzeli vzorec teh kapljic (slika 6.9.2.).



Slika 6.9.2. Vzorčevanje svetlečih kapljic na steni na vhodu v Pečino v Borštu.

Preizkušeno je bilo gojišče za aktinomicete (za 1 liter gojišča 4 g kvasnega ekstrakta, 10 g malt ekstrakta, 4 g glukoze, 20 g agarja, pH 7,3). Kultura se je izkazala za relativno čisto v smeri fluorescentnih pseudomonad, zato smo v nadaljnjih pasajah uporabljali King B gojišče. Vzorec kapljice pod transiluminatorjem (312 nm) ne fluorescira.

6.9.4. Vzorec vode iz jamske ponvice

Posebnost vzorčevanih ponvic je bilo izločanje kalcita na vodni površini (slika 6.9.3.). Kalcit s časom zaradi lastne teže potone ali pa se usede na tla, ko voda izhlapi.



Slika 6.9.3. Vzorčevanje v ponvici v Martinski jami.

Od vseh treh gojišč (a.) gojišče s preperino, (b.) King B ter (c.) 0,1 ×NA, se je za najustreznejše izkazalo gojišče King B, ki so uporabljali za nadaljnje precepljanje.

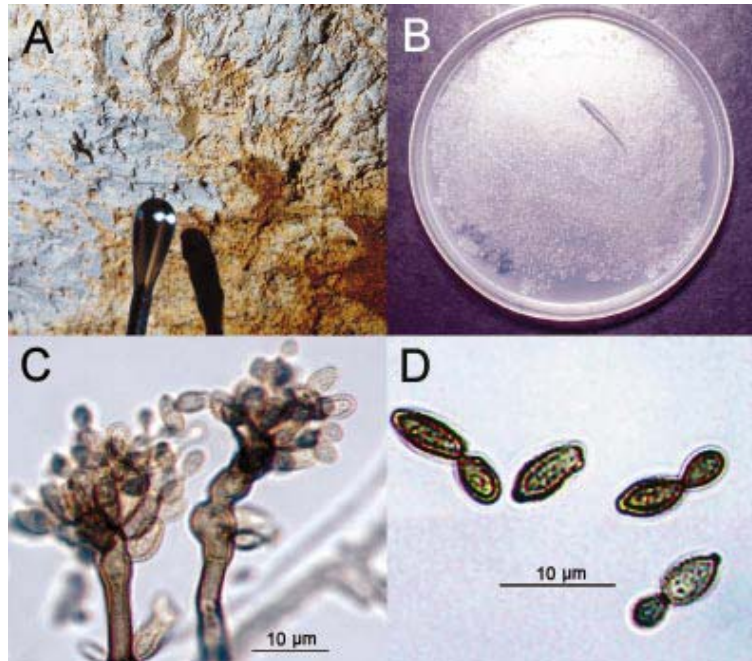
6.9.5. Zaključki iz mikrobioloških raziskav

Pridobljeni podatki o celični viabilnosti so bili, v nekaterih primerih, dopolnjeni še s podatki o mikrobnih identifikaciji in grupiranju mikroorganizmov v skupine (slika 6.9.4.). Kaže, da so fluorescirajoče pseudomonade prevladujoči mikroorganizmi, poleg še nekaterih drugih bakterijskih in glivnih taksonov. V jamski ponvici v Pečini v Borštu so bili dobri pogoji za nastanek in razvoj biofilma.

	HABITAT (mikroniša)		
	JAMSKO SREBRO	PONVICA	PREPERINA APNENCA
GOJIŠČA	ŠTETJE CELIC		
King B		2.5×10^4	4.0×10^5
Preperel medium		1.0×10^4	$1.1 \times 10^6 (1.3 \times 10^3)^*$
0.1×NA (nutrient agar)		1.5×10^4	7.0×10^5
BACTERIJSKE SKUPINE	ŠTEVILO IZOLIRANIH SEVOV		
FLUORESCENTNE PSEUDOMONADE	1	6	5
GRAM NEGATIVNE NEFERMENTATIVNE		6	2
GRAM NEGATIVNE FERMENTATIVNE (violični pigment)		2	
GRAM POZITIVNI KOKI		1	
GRAM POZITIVNE NEPRAVILNE PALIČNE (podobne aktinomycetam <i>Actinomycetes</i>)		4	4

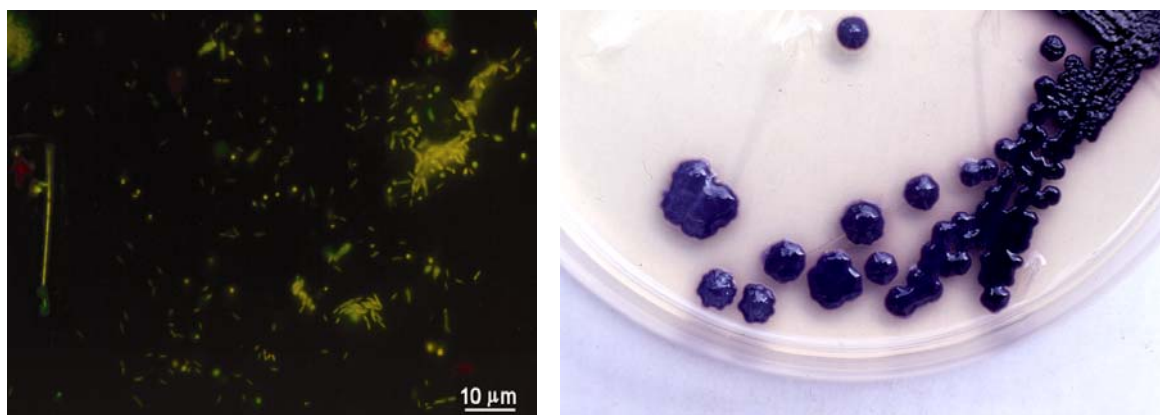
Slika 6.9.4. Štetje mikrobov in njihova diverziteteta v različnih okoljih v Pečini v Borštu; *- vzorec iz Martinske jame (po MULEC et al. 2002).

Z vzorčenjem preperlega apnenca (Pečina v Borštu) je bila dokazana relativno visoka mikrobnost (1,1×10⁶ CFU/ml), ter vrstna pestrost izolatov (slika 6.9.5.). Izolate smo uvrstili v različne skupine na podlagi mikromorfoloških lastnosti, biokemijskih lastnosti ter molekularno-bioloških testov. Tako smo iz preperlega apnenca izolirali in določili glivo, ki spada v skupino *Cladosporium herbarum*.



Slika 6.9.5. Preperel apnenec iz Pečine v Borštu. B: Bakterije izolirane iz preperlega apnenca na Prep agar medium. C: Mikromorfologija glive *Cladosporium herbarum*, conidiophores. D: *C. herbarum* conidia (iz MULEC et al. 2002).

V jami Pečina v Borštu smo vzorčili tudi vodo iz ponvice, na površini katere se odlaga kalcit v obliki kalcitnih ploščic. V tem mikrookolju je bila dokazana največja mikrobnost (slika 6.9.6.), z nekoliko nižjim skupnim številom kultivabilnih mikroorganizmov (2,5×10⁴ CFU/ml) v primerjavi z mikrookoljem preperlega apnenca. Izločanje kalcita v ponvici je morebiti povezano s prisotnostjo mikroorganizmov, saj so tudi pogoji za nastanek biofilma ustrezni.



Slika 6.9.6. A: Fluorescentno mikroskopiranje biofilma iz jamske ponvice po barvanju z »acridine orange«. Opazni različni celični morfotipi (paličice and koki). B: Vijolično pigmentirane bakterije iz ponvice pripadajo rodu *Chromobacter* (iz MULEC et al. 2002).

V Martinski jami, smo vzorčili preperel apnenec in določili $1,3 \times 10^3$ CFU/ml, kar je manj v primerjavi s podobnim vzorcem iz jame Pečina v Borštu. Zanimivo je, da ni bilo mikrobne rasti v primeru, ko smo vzorec preperlega apnenca iz Martinske jame nanegli na gojišče, pripravljeno iz preperlega apnenca iz jame Pečina v Borštu. To kaže, da je mikroflora preperlega apnenca Martinske jame zelo prilagojena na specifično okolje.

Iz opravljenih mikrobioloških analiz lahko sklepamo na dokaj številno prisotnost mikroorganizmov na prepereli kamnini. Kulture iz preperete kamnine so drugačne od tistih, ki živijo v jamskih ponvicah in svetlečih kapljicah. Na stopnji že končanih raziskav še ne moremo potrditi povezave med prisotnostjo mikroorganizmov in raztapljanjem apnenecv na stenah Končnega rova Pečine v Borštu.

Zaključim naj z dejstvom, da so mikroorganizmi, ki živijo v jamskih pogojih izjemni tudi za bakterije, saj je v jami celo leto le 10^0 °C. V preperlem apnencu, v ponvicah in svetlečih kapljicah v isti jami žive različni mikroorganizmi, ki pa so aerobni.

- Okolje preperlega apnenca v danih primerih mikroorganizmom za rast ustreza. Ne vemo pa še ali mikroorganizmi pospešujejo ali celo pogojujejo raztapljanje apnenca ali pa samo živijo od produktov raztapljanja, ali zavetju por.

Apnenec se v jamskih rovih tako ali tako že raztaplja z dotokom agresivne vode, ne poznamo pa vpliva mikroorganizmov na raztapljanje v konkretnem primeru. To vprašanje ostaja odprto za nadaljnje raziskave.

6.10. Diskusija o rezultatih opravljenih analiz in zaključki

Iz optičnih analiz je razvidno, da gre v opisanih primerih za preperevanje apnenecv in dolomitov in ne za sekundarno izločanje mineralov na stenah jamskih rovov.

Globina preperete cone je odvisna od mineralne sestave in strukture karbonatne kamnine v posameznih vzorcih.

V preperlem delu opazamo najprej delno razbarvanje, z nadaljnjim raztapljanjem pa popolno razbarvanje ter močno povečanje poroznosti. Poroznost je v prepereli coni apnenca medzrnska in pore so med seboj povezane, kar daje prepereli kamnini spužvasto/mozaično strukturo.

Pri poznodiagenetskem dolomitu je površina zaradi selektivnega raztapljanja manjših zrn in na kontaktih med zrnji močno hrapava. Debelina preperete cone je različna, močno preperel dolomit je v primerjavi s svežim dolomitom ponavadi bolj rjavo obarvan. Razlog je povišana koncentracija Fe, ker Fe lahko v dolomitu nadomešča Mg.

Iz kemičnih analiz je razvidno, da se med preperevanjem iz apnenca izlužujejo predvsem Mg, Sr in U, večino ostalih z analizami določeni elementi, so v preperlem delu prisotni v enakem ali celo povišanem deležu.

Izgubo Sr in Na med preperevanjem dolomita je ugotovilo več avtorjev (glej AL-AASAM & PACKARD 2000), kar razlagajo z bližanjem bolj stabilni in urejeni kristalni rešetki.

PANAHI et al. (2000) razlagajo obnašanje posameznih prvin in njihovih oksidov med preperevanjem. Pomembni so predvsem dejavniki v okolju in njihove kemične lastnosti. Al_2O_3 , TiO_2 in SiO_2 so v območjih nižjih pH netopne komponente in se bodo izločale v okolju s pH med 4 in 9. Natrij bo med preperevanjem odnešen iz kamnine in bo ostal v času preperevanja v raztopini zaradi nizkega ionskega potenciala. Tudi kalij se bo obnašal enako, le da bo prisoten v raztopini v manjšem obsegu. Tudi P_2O_5 se med preperevanjem ponavadi izgublja. Skupna vsebnost železa (kot Fe_2O_3) ponavadi naraste, kar je odvisno od pogojev. Isti avtorji opazajo občutno zmanjšanje vsebnosti Mg med preperevanjem in slednje razlagajo

z njegovim nizkim ionskim potencialom. Mg ostane v raztopini, razen v primerih, ko se obarja kot sestavni del glinenih mineralov. Tudi Sr se med preperevanje izgublja iz kamnin.

Izluževanje urana pri raztapljanju apnenca in njegovo ponovno obarjanje v jamskem prostoru, v sigi, uporabljamo za absolutno datiranje časa njenega nastanka z U/Th metodo (GASCOYNE et al. 1978). Še zlasti, ker je torij zaradi zelo nizke topnosti skoraj ves izključen iz podzemeljskega kroženja vode in s tem iz možnosti obarjanja iz nje. V morskem okolju se U so-obarja s CaCO_3 in tvori karbonatne sedimente, ki vsebujejo 2 - 4 ppm U in manj kot 0,1 ppm Th. Pri preperevanju sedimentnih kamnin je U spet mobilen in vstopa v podzemeljski vodni cikel. V področjih z apnencem se lahko pojavi sekundarni krog obarjanja, ko voda pri dotoku v prazen prostor izgublja CO_2 in nastaja siga. V tej vodi in novo nastalem kalcitu, sigi, se začne diferenciacija ^{238}U in ^{234}U . To kemijsko v običajnih razmerah ni mogoče, vendar proces v jamskem okolju le poteka, ker ^{234}U zasede mesta v kristalni mreži kalcita, ki je bila poškodovana z radioaktivnim žarčenjem pri razpadu ^{238}U .

Na osnovi mineraloških analiz z metodo rentgenske difrakcije svežih in preperelih delov vzorcev apnenca in dolomita je razvidno, da gre za precej čiste karbonatne kamnine z malo netopnega ostanka. Glede na rezultate ugotavljam:

- Ni bistvenih razlik v mineralni sestavi svežega in preperlega dela apnencev in dolomitov.
- Stopnja urejenosti kristalne rešetke v bolj preperelih delih dolomita je nižja.
- Med preperevanjem se karbonatna kamnina čisti; večkrat je v preperelem delu manj netopnih primesi kot v topnem.

Iz apnenca in dolomita migrirajo tudi glinenci in glineni minerali, verjetno kot koloidi (morda je to vzrok za razbarvanje).

Iz prvih **analiz mikroorganizmov** lahko rečemo le, da mikroorganizmi so prisotni v prepereli kamnini ne vemo pa še, ali tam samo živijo ali pa s svojim delovanjem pospešujejo raztapljanje karbonatnih kamnin.

7. RAZMERJE MED AVTOHTONO KEMIJSKO IN MEHANSKO EROZIJO PRI NASTAJANJU KRAŠKIH ROVOV NA PRIMERU VELIKE LEDENE JAME V PARADANI

Odgovor na vprašanje iz uvoda »do kdaj in do katere stopnje se kamnina raztaplja, da potem prevlada mehansko odnašanje delcev«, torej,

- kakšno je razmerje med deležem kemijske in mehanske erozije v odvisnosti od strukture kamnine pri nastajanju kraških rogov, bom skušala podati v tem poglavju.

7.1. Glavni geološki elementi v Veliki ledeni jami v Paradani, kat. št. 742

Veliko ledeno jamo sem vzela za vzorčen primer ugotavljanja razmerja med avtohtono kemijsko in mehansko erozijo pri nastajanju kraških rogov. V jami najdemo akumulacije karbonatnih klastičnih sedimentov v dnu stopnjastih brezen ter različno korodirane stene rogov v povezavi z litološkimi značilnostmi kamnine.

Na primeru te jame tako lahko povežemo sestavo klastičnih sedimentov s procesi kemične in mehanske erozije sten jamskih rogov v odvisnosti od litoloških lastnosti apnencev in dolomitov, v katerih je jama izoblikovana.

7.1.1. Lega jame in geologija okolice

Velika ledena jama v Paradani, imenovana tudi Velika ledenica ali pa na kratko Paradana. Vhod v jamo je v dnu večje depresije na nadmorski višini 1135 m ($y = 5410\ 830$, $x = 5094\ 490$) severno od glavnega grebena Trnovskega gozda in severozahodno od Velikega Goljaka. V vhodnem delu se led zadržuje vse leto, njegova količina in višina pa se s časom spreminjata.



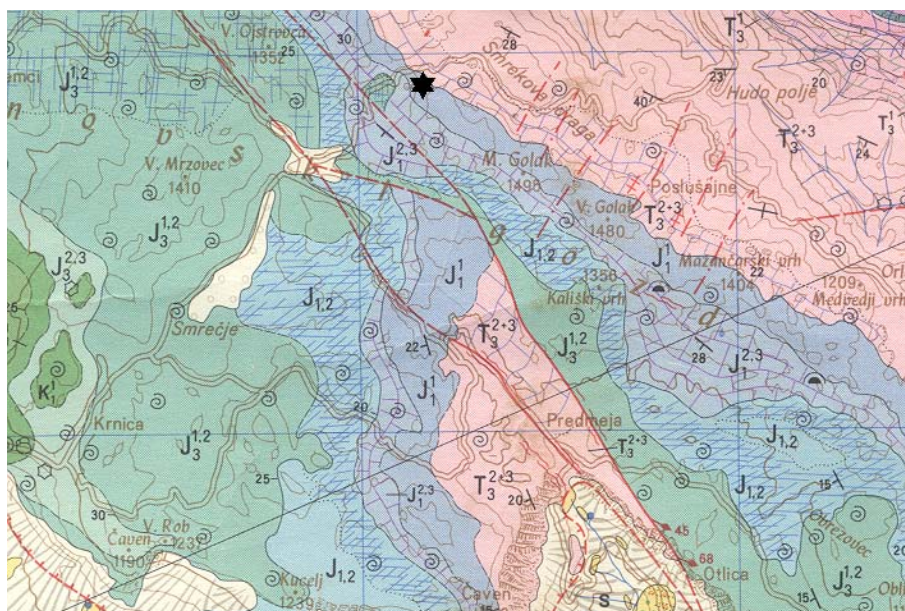
Slika 7.1.1. Led v vhodnem delu Velike ledene jame v Paradani.

Trnovski gozd je kraška planota, ki ga sestavljajo triasne, jurske in kredne karbonatne kamnine, ki so narinjene na eocenski fliš. Narinjeni masiv je bil kasneje razlomljen s prelomi

v dinarski smeri (PLACER & ČAR 1974) ter s sekundarnimi razpokami, ki tvorijo razpoklinske cone. Vzporedne razpoke si sledijo v razdalji od nekaj centimetrov do nekaj metrov in imajo največkrat splošno smer sever – jug. Po Osnovni geološki karti 1 : 100000, list Gorica (BUSER et al. 1968), leži vhod v jamo v belih spodnjekurskih apnencih z vložki dolomita (sl. 7.1.1). Generalno plasti vpadajo proti JZ. Kamnina je v okolici jame svetlo do temno siva, v depresiji pred vhodom v jamo je v apnencih nekaj dolomitnih plasti (MIHEVC & GAMS 1979).

7.1.2. Speleomorfološke značilnosti jamskih rogov in najpomembnejši geološki elementi

Jamo so sistematično začeli raziskovati člani jamarskega društva Logatec (MIHEVC & GAMS 1979). Jama je bila do leta 1996 globoka 385 m, trenutno pa je globoka že čez 850 m (ERKER 2013). S svojo globino je daleč najgloblja jama na Trnovskem gozdu. Jama sedaj odvaja padavinsko vodo z ožjega območja. Za vhodom v dnu večje kraške depresije sledijo tri velike dvorane, nato pa več nizov brezen. Brezna so med seboj povezana s kratkimi odseki aktivnih in fosilnih rogov (MIHEVC & GAMS 1979). MIHEVC (1995) deli brezna v jami glede na njihovo genezo v tri skupine: stopnjasta brezna, brezna v razpoklinski coni in neodvisna brezna.



Slika 7.1.1. Označena lega vhoda Velike ledenice v Paradani in geološka situacija po OGK Gorica (iz BUSER et al. 1968).

Jamski rovi sledijo različnim geološkim strukturam; vpadu plasti in prelomnim ter razpoklinskim conam. Splošni geološki opis jame povzemam po MIHEVCu in GAMSu (1979). V vhodnem delu jame so rovi razviti v plasteh apnenca in dolomitiziranega apnenca, ki vpadajo v smeri 218/50. V vrhnjem delu jame se med plastmi pojavljajo ob lezikah vložki tankoplastovitih apnencev in dolomitov, ki so različni po barvi in zrnivosti. Plastovitost apnenca in dolomitiziranega apnenca sledimo v Starem rovu, v zgornjem delu jame do Stometrce in pod Glisto v Stopnjah. Ponekod se med plastmi nahajajo tankoskladovite temnosive in zelenkaste skrilave kamnine. V Novi dvorani se menjavajo plasti dolomita in dolomitiziranega apnenca. V Stometrci, Mačjem kraju in v spodnjem delu Starega rova je kamnina tektonsko tako pretrta, da plastovitosti ni opaziti. V jami zasledimo različne tektonske cone, ki vplivajo na oblikovanost rogov ali pa jih samo prečijo. Veliko ledeno jamo na primer prečka prelom v smeri proti SV pod kotom 45° . Strop Male ledene dvorane sledi prelomu, njeno dno pa vpadu plasti. Pod Krožnim rovom rov sledi leziki ter prelomni ploskvi

itd.. V jami je več prelomov v dinarski smeri in smeri V – Z, močno je pa izražena tudi razpoklinska cona v smeri S – J v srednjem delu jame (MIHEVC 1995).

7.1.3. Lega glavnih litoloških členov v jami

Za svoje potrebe sem jamo kartirala litološko in tektonsko ter glavne geološke strukturne elemente vrisala na načrt, ki ga je izdelal JD Logatec v merilu 1 : 500 (Kataster jam IZRK ZRC SAZU). V jami sem bila pozorna predvsem na različne strukturne elemente, vpad plasti, tektonske cone, ki sem jih po ČARJU (1982) delila na prelomne cone, razpoklinske cone in porušene cone, določevala pa sem tudi izrazitejšje meje med litološkimi členi. Zanimala me je površina sten jamskih rovov in preperelost kamnine. Sledi opis najpomembnejših litoloških členov in strukturnih elementov v posameznih točkah. Lega glavnih geoloških elementov in lega vzorcev je prikazana na sl. 7.1.2.. Sledi podrobnejši opis geoloških parametrov ob poligonskih točkah.

Točka 11; prehod med Veliko ledeno dvorano in Malo ledeno dvorano sledi prelomu v dinarski smeri.

Točka 16 - Mala Ledena dvorana; plasti vpadajo proti JZ, 220/40. Glavni prelom poteka v smeri N-S, manjši pa ima vpad 130/90. V dnu dvorane so podorni bloki. Stena ob vhodu v pasažo je iz dolomitiziranega apnenca z izsušitvenimi porami, ki jih zapolnjujejo kalcitni kristali. Po površini je kamnina preperela, iz nje štrlijo kalcitne žile. Zaradi svoje teksture in selektivne korozije kamnina daje vtis napolitank. Vzorec **LPI** je dolomitiziran apnenec iz te dvorane.

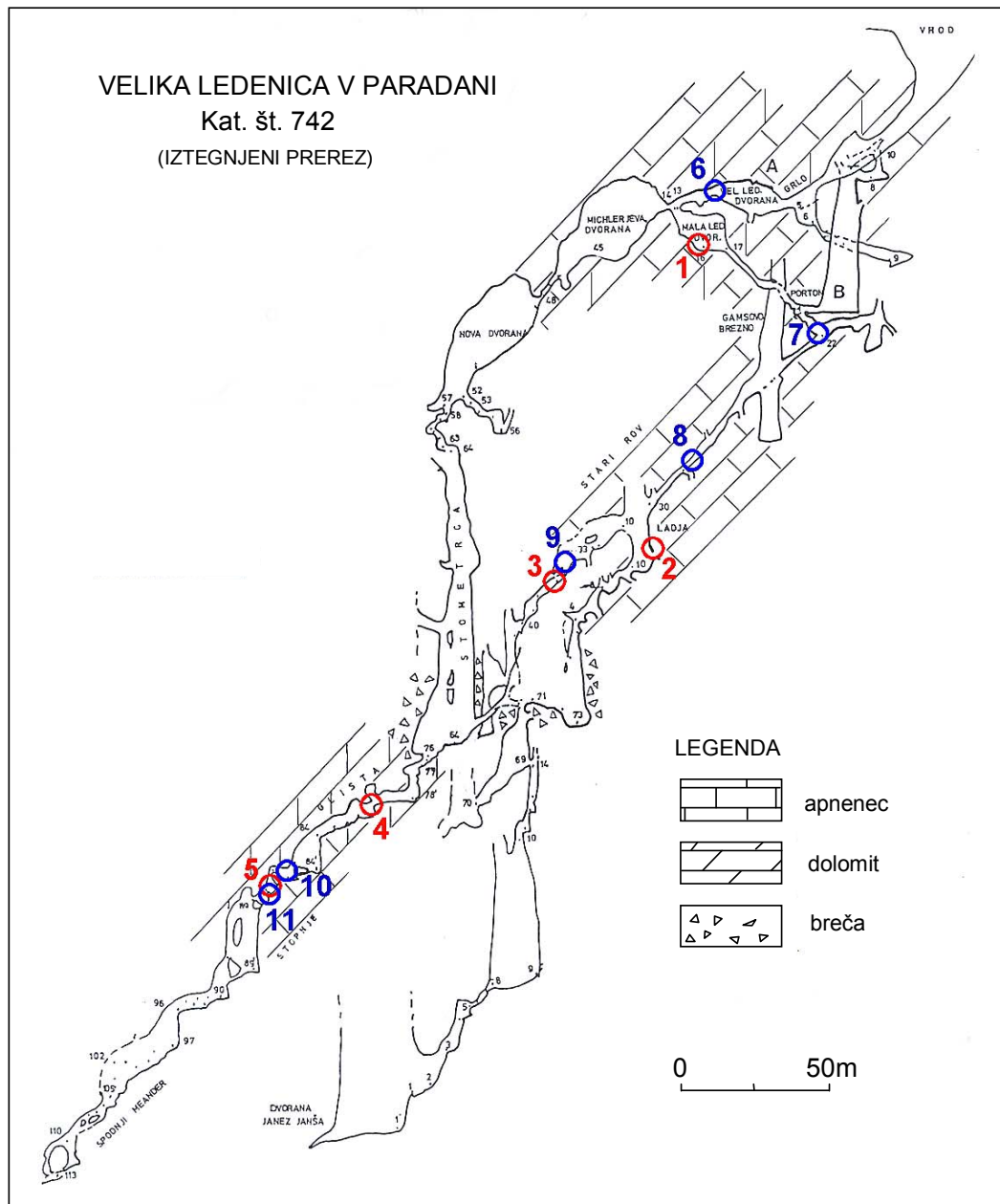
Točka 20' - Stari rov, kjer ga seka Gamsovo brezno. Plasti vpadajo proti JZ pod kotom 40°. V breznu je več vzporednih razpok z vpadom 130/90, smer preloma je tudi vzporedna smeri Starega rova.

Točka 10' - Pod Ladijskim kljunom (pod točko 30). Pod stopnjo so plasti biomikritnega apnenca, v katerem so intraklasti zelene kamnine veliki do nekaj mm. Plasti vpadajo 220/40. Opazni so medplastni premiki, raze so v smeri v smeri 130 – 310, torej po smeri vpada plasti. Med plastmi je v lezikah opaziti mehko skrilavo zeleno kamnino. Fosili štrlijo iz osnove zaradi selektivne korozije. Mikritni apnenec s kalcitnimi zapolnitvami in svetlozelenimi klasti na površini je vzorec **LP2**, svetlozeleni klasti s površine mikritnega apnenca so vzorec **LP3** in iz lezike med plastmi apnenca je vzorec temnozeleno kamnine **LP4**. Površina mikritnega apnenca je skoraj gladka, ven štrlijo beli kalcitni kristali in svetlo zeleni klasti. Erozijska pa močnejše izjeda temnozeleno skrilavo plasti po lezikah, ki so mehke, tako da ponekod po njihovi eroziji ostajajo izdolbene niše.

Točka 3' – Vrh stopnje nad točko 73; na vrhu te 35 m stopnje se kamnina spremeni. Do tu so plasti apnenca in dolomita lepo izražene, od tu naprej pa je kamnina najprej temnejša in nato brečasta. Temnejša kamnina ima vpad plasti 240/40, rov pa prečka prelom z vpadom 80/50. Stena stopnje je brečasta, breča pa ni tektonska, čeprav je kamnina močno pretrta, ker so v breči klasti temnejšega in zelo svetlega apnenca. Svetli kosi so močnejše korodirani.

Točka 69 - Dvorana pri vhodu v brezna proti Dvorani Janeza Janše. Dvorana v dnu prej opisane stopnje je razpotegnjena ob razpoklinski coni v smeri S – J in je vzporedna z dvorano in razpoklinsko cono v dnu Stometree. Brezno, ki je nadaljevanje proti Dvorani Janeza Janše je ozko (elipsasto) ob prelomu S - J, z vpadom 80/90. Nadaljevanje proti Stometrci pa je skozi manjšo odprtino ob prelomu V- Z. Kamnina v stenah dvorane je debeloplastovita sedimentacijska breča s posameznimi klasti, ki so veliki do 30 cm. Posamezni kosi so korodirani na različne načine. Vpad plasti je 220/40. Kamnina pa je tudi močno tektonsko pretrta zaradi prelomov v smeri V – Z in močne razpoklinske cone v smeri S – J.

Točka 76 - Dno Stometrce; po dnu tega brezna so podorni bloki iz breče. Stene brezna so v dnu, kjer se še vidi, vse iz breče. Glavni prelom, ob katerem je izoblikovana Stometrca, ima vpad 240/90(80), ki rahlo povija, v stenah sta opazna še dva vzporedna preloma. Manjši prečni prelom ima vpad 180/90 (smer V-Z). V delu dvorane, ki vodi nazaj proti točki 69, je najizrazitejša razpoklinska cona v smeri S - J (z vpadom 80/80). Plasti se tu ne vidi, stene so brečaste. Podorni bloki so iz breče, v njej sem opazila tudi kose temnejšega apnenca z litotisi. V nadaljevanju izpod Stometrce v Stopnje je kamnina spet plastovita.



Slika 7.1.2. Glavni geološki elementi v rovih Velike ledene jame v Paradani in lega vzorcev. Lega vzorcev kamnin: 1 – LP1; 2 – LP2, LP3, LP4; 3 – LP5; 4 – LP6, LP7; 5 – LP8, LP9. Lega vzorcev klastičnih sedimentov: 6 – LPs1; 7 – LPs2; 8 – LPs3; 9 – LPs4; 10 – LPs5, LPs6; 11 – LPs7 (načrt po podatkih iz katastra IZRK ZRC SAZU).

Točka 78 – Glista se imenuje pasaža v začetku Stopenj. Meander je tu zelo ozek, iz zrnate kamnine štrlijo kalcitne kopicke, ki močno otežujejo gibanje skozi pasažo. Glista poteka ob prelomu N-S (vpad 80/90), v točki 78 rov obrne po prelomu v smeri V – Z (vpad 180/90).

Točka 79 – najožji del Gliste; plasti vpadajo 230/50, kamnina je zrnat dolomit **LP6**. Rov preči prelom v smeri V – Z (z vpadom 190/70), ki tu rahlo povija.

Točka 80 - brezno v Glisti; v vrhu stopnje prelom z vpadom 350/75 (skoraj V - Z) prečka steno, v kateri je lepo izražen stik med dvema litološkima členoma. Sedimentacijska breča leži na zrnatem dolomitu **LP7**, katerega plasti imajo vpad 230/40. V breči so posamezni klasti veliki do 20 cm. Površina dolomita je zrnata in njegova zrna močno odpadajo. V dnu meandra se nahaja svetel in precej porozen peščenjak.

Točka 84 - pasaža za Glisto, pred prvim breznom v Stopnjah. Na vrhu prvega brezna se v Stopnjah spremeni tip kamnine, seka jo močna razpoklinska (prelomna?) cona širine 1 m, kjer je kamnina laminirana, smer vpada plasti je 230/50. Rov sledi v tem delu prelomu z vpadom 300/90 (prečnodinarska smer).

Točka 86 – Stopnje; plasti imajo v tem delu vpad 240/40, prelom, ki poteka na severni strani aktivnega vodnega curka, pa posamezne plasti zamika med seboj za 20 cm. Prelom ima vpad 350/80 ter rahlo povija (generalna smer je V – Z). Voda stoji na prostoru 1 m x 1 m. Ostali prostor je sedaj suh, ker voda vrezuje meander, ki vodi proti naslednjemu breznu, v nekdanji izravnana tla in oblikuje novo brezno. Tam, kjer voda sedaj nima več erozijskega vpliva, so peščene sipine cementirane in nastaja slabo konsolidiran peščenjak. Pod curkom, ki priteče čez stopnjo, se nabirajo do 1cm veliki prodniki, največ jih je velikih okrog 0,5 cm in so različnih barv, od bele, sive do črne in zelene.

Točka 88 – Stopnje; točka 88 je v dnu 8 m brezna. Jama tu poteka v smeri plasti, ki imajo smer vpada 230/40. Prelom, ki poteka po levi strani rova ima vpad 350/85(90) - v bistvu poteka v smeri V - Z. Pod navpično steno, čez katero teče voda v curku, je ravno dno široko 4,5 m in dolgo 5 m. Nasproti curku se v dnu nadaljuje okrog 20 cm širok meander, ki vodi proti naslednjemu breznu v Stopnjah. Pod vodnim curkom je stena sveže korodirana, medtem ko je na nasprotni strani, nad meandrom, na steni koralasta siga in so stene manj sveže izprane. V dnu, na sredini, je voda globoka nekaj cm in v njej je nekaj recentnega peska. Na levi in desni strani dna brezna je sipina drobnozrnatega belega peska, v katerem se nahajajo manjši črni in zeleni glinasti klasti. Peščena sipina je široka do 90 cm na najširšem srednjem delu in globoka do 15 cm. Zrna so ostroroba in zaradi transporta še niso zaobljena. Pesek sem zasledila po poličkah do višine 1m.

Stena brezna, čez katerega teče vodni curek, je korodirana. V steni je svetlosivi mikritni apnenec, z zeleno kamnino po lezikah. Površina mikritnega apnenca je zaradi korozije gladka. V dnu jugozahodne stene rova se nahaja zrnat dolomit s kalcitnimi kopicami, vzorec **LP8**. Zrna na površini so s kamnino povezana zelo slabo, saj gre raztapljanje po stikih med zrn. Razrahljana dolomitna zrna voda ob nalivih lahko odplakne s sten.

Zrna se nabirajo v obliki peska in melja v dnu brezna. Iz površine stene pa štrlijo do 2 cm velike kalcitne kopicke, ki kažejo na selektivno raztapljanje ter na to, da voda mehansko erodira lahko samo s korozijo razrahljane delčke. Takoj nad dolomitom je v isti stopnji mikritni apnenec, katerega površina je gladka, ker se vsa zrna enakomerno in naenkrat raztapljajo. Na drugi strani rova je kamnina malo drugačna, še vedno zrnata po površini, vendar brez večjih kalcitnih kristalov, vzorec **LP9**.

7.2. Tipi kamnin, način preperevanja, oblikovanje njihove površine in nastanek klastičnih sedimentov

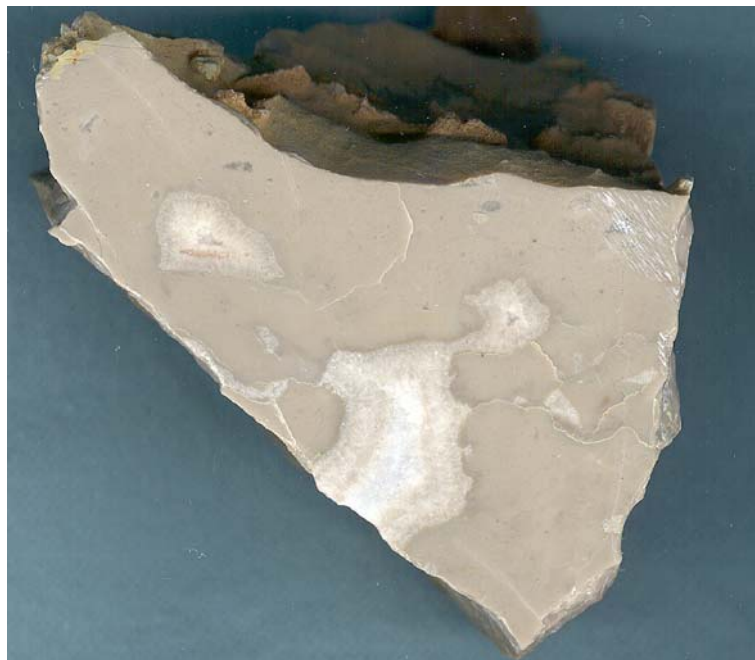
Lege vzorcev kamnin sem opisala že pri geološkem opisu jame. V tem delu opisujem preperelost površine vzorcev, njihove makroskopske in mikroskopske lastnosti ter mineralno sestavo.

7.2.1. Vzorci kamnin

V Mali ledeni dvorani sem vzela vzorec dolomitiziranega apnenca **LP1** (sl. 7.2.1.). Zaradi selektivne korozije iz površine štrlijo kalcitne zapolnitve izsušitvenih razpok in votlinic, ki dajejo kamnini videz napolitank. Površina kamnine je prepereła in rahlo hrapava.



Slika 7.2.1. Prerez vzorca LP1, laminiran dolomitizirani apnenec z izsušitvenimi razpokami in votlinicami, prekrit z rjavo sigo. (Širina prereza je 9 cm).



Slika 7.2.2. Prerez vzorca LP2 iz Velike ledene jame v Paradani. Na spodnji strani iz površine štrlijo zeleni glineni klasti, v prerezu se lepo vidijo tudi kalcitne zapolnitve korozijskih votlinic. (Širina prereza je 6 cm.)

Pod Ladijskim kljunom sem iz stene vzela tri vzorce **LP2**, **LP3** in **LP4**. Vzorec **LP2** (sl. 7.2.2.) je svetlorjav mikritni apnenec s kalcitnimi kopicami in svetlozelenimi klasti. Površina vzorca je selektivno razjedena, zato iz njene površine štrlijo beli kalcitni kristali in zeleni klasti.

Vzorec **LP3** je svetlozelena plast okrog mikritnega apnenca in je enaka klastom v apnencu. Vzorec **LP4** je temnozeleno skrilava glinasta kamnina iz lezike med plastmi apnenca v isti steni rova.

Steno Starega rova pri točki 35 prekriva tanka plast sige, pod katero je kamnina preperela več centimetrov globoko. Bela preperina je vzorec **LP5**. Voda se v tem delu jame ne pretaka več, tako da je nastala preperina ostala na steni. Kamnina je najverjetneje preperela ob stiku z rjavo ilovico, ki jo najdemo po tleh Starega rova, in ki ga je nekoč tudi zapolnjevala.



Slika 7.2.3. Preperele stene v dnu Starega rova kjer je bil odvzet vzorec LP5; Velika ledena jama v Paradani (foto A. Mihevc).



Slika 7.2.4. Prerez vzorca LP6, zrnat dolomit ima močno preperel rob in hrapavo površino. (Širina prereza je 5 cm.)

Vzorec **LP6** (sl. 7.2.4.) je siv dolomit iz Gliste pri točki 79. Zunanji del dolomita je močno preperel in porozen. Zato je njegova površina zelo hrapava in popolnoma razbarvana. Iz površine štrlijo posamezna zrna rombične oblike.

Pod prvo stopnjo za Glisto, pri točki 80, sem vzela vzorec močno preperelega zrnatega dolomita **LP7** (sl. 7.2.5.), katerega površina je tudi precej hrapava.



Slika 7.2.5. Prerez vzorca LP7, močno preperel zrnati dolomit. (Širina prereza je 5 cm.)



Slika 7.2.6. Prerez vzorca LP8, zrnati dolomit s kalcitnimi zaplnitvami razpok. Dolomit je močno porozen. (Širina prereza je 4 cm.)

Iz stene manjše stopnje v Stopnjah sem pri točki analizirala vzorca **LP8** in **LP9**. Vzorec **LP8** je zrnati dolomit (slika 7.2.6.) s polami kristalnega kalcita, ki štrlijo iz površine stene. Površina vzorca je močno hrapava, peskasta, zrna odpadajo, odnaša jih predvsem tam, kjer čez steno teče voda.

Na stranski steni, čez katero voda ne teče, sem vzela vzorec **LP9** (sl. 7.2.7.). Vzorec je prekrstaljen, dolomitiziran apnenec brez večjih kalcitnih kristalov. Kamnina je precej preperela tudi v globino, po površini pa je prekrita s tanko plastjo sige.

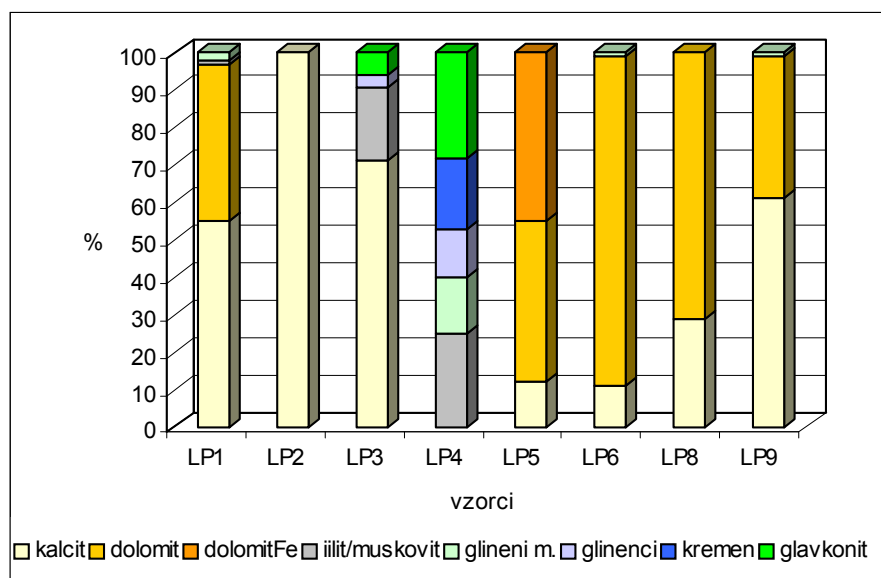


Slika 7.2.7. Prerez vzorca LP9, prekristaljeni dolomitizirani apnenec, ki je po robovih precej preperel. (Širina prereza je 6 cm.)

7.2.2. Mineralna sestava in notranja struktura kamnin

Mineralno sestavo vzorcev kamnin sem določila z metodo rentgenske difrakcije. Prikazana je na sl. 7.2.8.. Količina mineralov je v diagramu relativna, delež je izračunan glede na jakost njihovih glavnih odbojev. Strukturo vzorcev sem analizirala v mikroskopskih zbruskih pod presevnim mikroskopom.

V vzorcu dolomitiziranega apnenca **LP1** s 55 % prevladuje kalcit. Po količini sledi dolomit 42 %, glinenih mineralov je samo 2% in minerala iz illit/muskovitove skupine je 1 %. Stopnja urejenosti kristalne rešetke dolomita je zelo nizka, samo 0,24, kar kaže na zgodnjediagenetsko dolomitizacijo. Dolomitizirani apnenec je mikriten z izrazito fenestralno in razpoklinsko poroznostjo. Zapolnitev votlinic je geopetalna, v spodnjem delu je mikritni cement, v zgornjem pa zapolnitev z velikimi kalcitnimi kristali. Razpoke so kalcitizirane, njihova orientacija ni usmerjena. Površina vzorca je enakomerno preperela do 2 mm globoko.



Slika 7.2.8. Mineralna sestava vzorcev kamnin.

Vzorec apnenca s kalcitom **LP2** sestavlja samo kalcit. Apnenec je biomikrit z velikimi votlinicami (paleokraškega nastanka), ki so zapolnjene z radialnim vlaknatim mozaičnim cementom. Površina vzorca je enakomerno preperela do milimeter v notranjost, ker pa je raztapljanje mikrita enakomerno iz površine vzorca ne štrlijo posamezna zrna.

V svetlozelenih klastih vzorca **LP3** je 71 % kalcita, 20 % minerala iz illit/muskovitove skupine, 6 % glavkonita in 3 % glinencev. V temnozeleni skrilavi kamnini iz lezike, vzorec **LP4**, je 28 % glavkonita, 25 % minerala iz illit/muskovitove skupine, 19 % kremen, 15 % ostalih glinenih mineralov in 13 % glinencev.

Bela preperina (vzorec **LP5**) vsebuje 45 % ankerita, 43 % dolomita in 12 % kalcita. Odboj v difraktogramu pripada ankeritu. Mogoče pa je tudi, da je v delu dolomita bil del Mg nadomeščen z Fe.

Dolomit iz Gliste, vzorec **LP6**, vsebuje 88 % dolomita, 11 % kalcita in 1 % glinenih mineralov. Stopnja urejenosti dolomitove kristalne rešetke je 0,58. Dolomit je dolosparit. Sestavljajo ga veliki kristali dolomita, ki so že precej prepereli. Prisotna je geopetalna zapolnitev votlinic ter kalcitizirane razpoke. Precejšna je tudi medzrnska poroznost. Iz preperete površine štrlijo posamezna izpostavljena dolomitna zrna.

V steni stopnje pri točki 88, vzorec **LP8** vsebuje 71 % dolomita in 29 % kalcita. Vzorec **LP 9** pa vsebuje 61 % kalcita, 38 % dolomita in 1 % glinenih mineralov. Stopnja urejenosti kristalne rešetke dolomita je 0,65. V mikritni osnovi rastejo veliki dolomitni kristali rombične oblike. Votlinice in nekatere razpoke so zapolnjene z mozaičnim kalcitnim cementom. Ostale razpoke so odprte in ob njih je kamnina precej preperela. Tudi sama površina vzorca je preperela do več mm globoko. Opazno je tudi selektivno raztapljanje, saj se mikritni del kamnine raztaplja hitreje kot dolomitni kristali, ki zato štrlijo iz površine vzorca.

7.2.3. Lega in sestava klastičnih sedimentov

V jami najdemo po starosti, obliki in mineralni sestavi različne klastične sedimente. Ostanke starejših zapolnitev so porozni peščenjak na steni Velike ledene dvorane, akumulacija temnordeče glin v Krožnem rovu in ostanke starejše rjave ilovice v Starem rovu (MIHEVC & GAMS 1979). V dnu brezen v Stopnjah pa se nahajajo recentni in malo starejši karbonatni peski (ZUPAN & MIHEVC 1988).

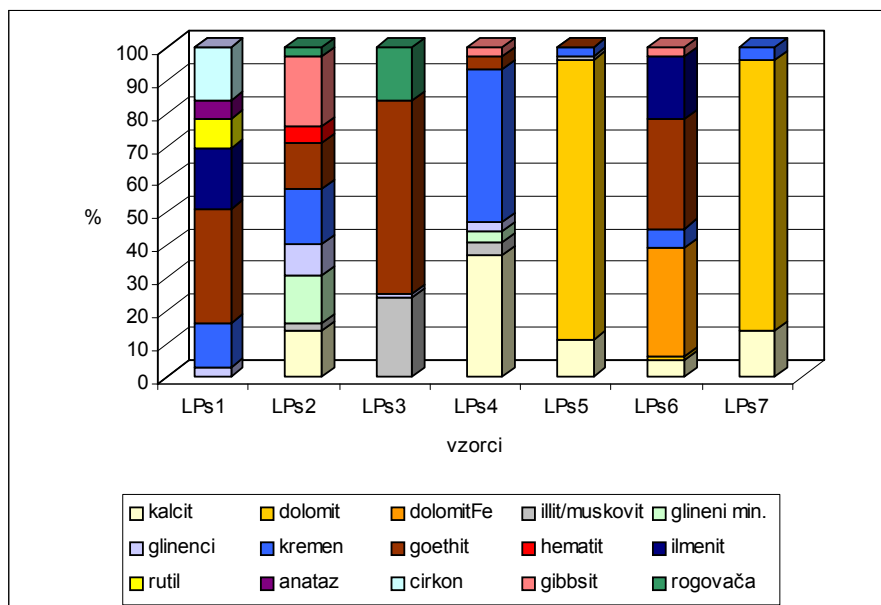
Vzorci klastičnih sedimentov, ki sem jim z metodo rentgenske difrakcije določila mineralno sestavo so **LPs1, LPs2, LPs3, LPs4, LPs5, LPs6 in LPs7**. Rezultati analize so predstavljeni na sl. 7.2.9..

Vzorec **LPs1** je peščenjak, katerega ostanke so zalepljeni na steno Velike ledene dvorane. Vzorec vsebuje največ kremen in kalcita. Vezivo med mineralnimi zrni v peščenjaku je kalcitno. Težka frakcija vsebuje 35 % goethita, 18 % ilmenita, 16 % cirkona, 9 % rutila, 6 % anataza, (ostalo so bili lahki minerali, ki se niso dobro ločili).

Vzorec rdeče ilovice **LPs2** pomešane s karbonatnim gruščem iz Krožnega rova vsebuje 21 % gibbsita, 17 % kremen, 15 % glinenih mineralov, 14 % goethita, 14 % kalcita, 9 % glinencev, 5 % hematita, 3 % rogovače in 2 % minerala illit/muskovitove skupine.

Rjava ilovica iz Starega rova med Gamsovim breznom in Ladijskim kljunom je vzorec **LPs3**. Vzorec vsebuje 59 % goethita, 24 % minerala illit/muskovitove skupine, 16 % rogovače, 1 % glinencev in kremen v sledovih.

Rjava ilovica iz pasaže s konca Starega rova pri točki 34 je vzorec **LPs4**. Ilovica vsebuje 46 % kremen, 37 % kalcita, 4 minerala illit/muskovitove skupine, 4 % goethita, 3 % glinenih mineralov, 3 % glinencev in 3 % gibbsita.



Slika 7.2.9. Mineralna sestava klastičnih sedimentov iz Velike ledene jame v Paradani.

V Stopnjah pri točki 86 leži ob straneh rova rahlo vezan pesek. Zrna sem ločila na lahko frakcijo, vzorec **LPs5**, in na težko frakcijo, vzorec **LPs6**. Vzorec **LPs5** vsebuje 85 % dolomita, 11 % kalcita, 3 % kremenca, 1 % minerala illit/muskovitove skupine in v sledovih glinence in goethit. Vzorec **LPs6** pa vsebuje 33 % goethita, 33 % dolomita z visoko vsebnostjo Fe, 19 % ilmenita, 3 % gibbsita (ostalo so bili slabo ločeni minerali lahke frakcije). Ta peščenjak vsebuje zrna, ki so bila erodirana s sten jamskih rovov, dolomit z visoko vsebnostjo Fe, dolomit in kalcit ter mineralna zrna iz starejših klastičnih sedimentov, ki jih voda prenaša po jami. Velika je prisotnost dolomita z visoko vsebnostjo Fe, kar pa ni nič čudnega, saj visoko Fe dolomit (že skoraj ankeritov odboj) najdemo v prepereli kamnini v spodnjem delu Starega rova.

Recentni pesek v Stopnjah pri točki 88, vzorec **LPs7**, vsebuje 82 % dolomita, 14 % kalcita in 4 % kremenca. S svojo sestavo ta pesek kaže na nastanek s spiranjem štrlečih dolomitnih zrn iz površine dolomitnih sten jamskih rovov.

Da se karbonatna zrna res kopičijo v obliki klastičnih sedimentov, potrjuje mineralna sestava tega peska in melja, ki se nabirajo v dnu brezen v Stopnjah.

7.3. Diskusija in zaključki

V jami sem zasledila več različnih tipov apnenca in dolomita, ki preperevajo na različne načine. Način preperevanja je odvisen od litoloških razlik v kamnin, predvsem pa je v tesni povezavi z strukturo kamnine. Od strukture je odvisna tudi hrapavost njihove površine. Hrapavost kamnine, to je štrljenje delčkov kamnine iz površine, pa je osnova za nastajanje avtohtonega karbonatnega melja in peska. Nastajanje dolomitnega melja razlaga že ZOGVIĆ (1966). V primeru dovolj hrapave površine voda lahko izpostavljen delce trga s stene. Sila vode (F_v) na izpostavljen zrn mora biti večja kot je sila (F_z), ki veže zrn v kamnino, da se zrn odtrga s površine kamnine (F_v je odvisna od hitrosti vode in površine zrna; F_z pa je sorazmerna z adhezijo zrna, ki je odvisna od velikosti in površine stika zrna z osnovo). Sledi, da se mineralna zrna, katerih kontakti so bili načeti z raztapljanjem ali izpostavljeni s selektivnim raztapljanjem odtrgajo lažje, kot pa zrna iz sveže, nepreperle kamnine. Voda odtrgana zrna odnaša in kopiči, ko ji upade transportna moč, to je, ko vodi in sedimentu pade

hitrost pod kritično (glej sl. 3.3.1.). To se dogaja v Veliki ledeni jami pod stopnjami, kjer se na izravnanim dnu ob steni nabirajo sprani karbonatni delci.

- Poudarim naj, da ne gre za mehansko erozijo z alohtonim materialom, ampak izključno za odnašanje izpostavljenih delcev.

V jami ločim naslednje tipe kamnine, na katere korozija različno deluje in katerih površina je različno hrapava:

- mikritni apnenec z gladko površino;
- delno prekrstaljeni mikritni apnenec s kalcitnimi kristali in zelenimi glinastimi intraklasti z na prekrstaljenih delih rahlo hrapavo površino (iz površine pa močno štrlijo večji kristali in intraklasti);
- dolomitizirani apnenec z rahlo hrapavo površino;
- zrnati dolomit s kristalnimi kopicami z močno hrapavo površino, (iz katere štrlijo še večji kalcitni kristali); in
- zrnati dolomit, z enakomerno hrapavo površino.

Za nastanek avtohtonega karbonatnega melja in peska so primerne vse opisane kamnine razen mikritnega apnenca, katerega površina se enakomerno raztaplja.

Razmerje med avtohtono kemijsko in mehansko erozijo pri nastajanju kraških rogov tako pogojuje predvsem struktura kamnine, pa tudi, da teče voda preko izpostavljenih zrn dovolj hitro, da jih odtrga s površine.

Spiranje je posebno izrazit in dominanten pojav po nalivih, ko voda v slapu pada čez brezna in površino stene mehansko erodira. V primeru, ko voda teče čez stopnje počasneje in v manjših količinah, je voda v stiku s kamnino dalj časa in z njo lahko reagira. To pomeni, da jo raztaplja do vzpostavitve ravnotežja.

Način raztapljanja je odvisen od mineralne sestave in strukture karbonatne kamnine. Primer različnega načina raztapljanja imamo na primer v Stopnjah pri točki 88, kjer ista voda korodira različne tipe karbonatne kamnine, njihova površina pa je zaradi različne mineralne sestave in strukture različno razjedena. Površina mikritnega apnenca je gladka, površina zrnatega dolomita pa je močno hrapava.

V dnu stopnje pri točki 88 se ob stenah brezna nabirajo karbonatna zrna. Zato sem želela ugotoviti, koliko zrn se nabere v določenem časovnem obdobju. V dno smo pritrdili plastično posodo – lovilec peska, ki je bil ob naslednjem pregledu prazen. Vendar poizkus monitoringa ni uspel predvsem zaradi tehničnih težav. Točka 88 je namreč globoko v jami, za zelo ozko in tehnično zahtevno ožino.

Površino kamnine na stenah jamskih rogov oblikuje najprej korozija, ki selektivno raztaplja kamnine. V primerih iz Velike ledene jame v Paradani iz mikritnega apnenca štrlijo kalcitne kopicke, podobno kot tudi iz zrnatega dolomita. Posamezna zrna v dolomitu izstopajo iz površine, ker se najprej raztapljajo kontakti med zrn in manjša zrna. Nazadnje pa oblikuje površino kamnine še tekoča voda, ki mehansko trga s korozijo izpostavljene delčke in jih odnaša.

8. DISKUSIJA IN ZAKLJUČKI O PREPEREVANJU KARBONATNIH KAMNIN V JAMAH

Takoj na začetku raziskav sem se znašla pred problemom izbora preiskovalnih metod, saj sem zašla na bolj malo raziskano področje nepopolnega raztapljanja karbonatnih kamnin. Tako sem naredila veliko število različnih analiz, da bi čimbolj spoznala, kaj se dogaja med preperevanjem apnencev in dolomitov. Število analiz pa ni bilo zadostno, da bi razpolagala s statistično primernim vzorcem in da bi lahko rezultate ovrednotila s statističnimi metodami.

8.1. Pregled rezultatov analiz

Med terenskimi raziskavami sem spoznala, da so tanjše preperele cone matične kamnine na stenah jamskih rogov pogost pojav, ki se odraža kot hrapavost skalne površine. Debelejše cone preperele matične kamnine so redkejše, zlasti na večjih površinah.

Preperele cone so rezultat nepopolnega raztapljanja karbonatne kamnine. Že na pogled so najbolj preperele stene rogov:

- ki jih zamaka prenikajoča voda,
- ki so v stiku z naplavinami,
- ki so izpostavljene kondenzni koroziji.

JAMA	N.M.V. VHODA	STAROST	VRSTA	FOLK	STIK S SEDIMEN.	VLAŽNOST KAMNINE	IZM.GLOBINA PREPERELE C.
Pečina v Borštu	566 m	K_2^2	apn.	biomikrit	da	da	do 7,1 cm
Martinska jama	565 m	${}_1K_2^{1,2}$	apn.	biopelintramikrit	da	da	do 4,5 cm
Krempljak	492 m	$K_{1,2}$	apn.	mikrit	domneven	da	do 3 cm
Jama II na Prevali	467 m	Pc_1/Pc_2	apn.	rekristaliz. biopelmikrit	domneven	ne	do 4 cm
Turkova jama	640 m	T_3^{2+3}	dol.	dolosparit	ne/da	da/ne	do 4 cm
Polina peč	570 m	K_1^{1-3}	apn.	biomikrit	domneven	ne	do 2 cm
Remergrund II	490 m	T_3^{2+3}	dol.	dolosparit	ne	da	do 0,5 cm
Spodmol na Ždroclah	1389 m	K	apn./dol.		ne	da	do 4 cm
Velika led. v Paradani	1135 m	J_1	apn./dol.	biointra-mikrit/dolosparit	ne	da	do 3 cm
Renejevo brezno	2260 m	T_3^{2+3}	dol.	dolosparit	ne	da	do 5 cm

Slika 8.1.1. Pregled izbranih različnih karbonatnih kamnin v katerih se nahajajo debele preperele cone.

Med preperevanjem se kamnina najprej rahlo razbarva, z nadaljevanjem preperevanja se razbarvanost stopnjuje, kar vodi do popolne razbarvanosti.

S selektivnim raztapljanjem posameznih delov postaja kompaktna karbonatna kamnina vse bolj porozna in to ne samo ob razpokah, ampak tudi ob različnih strukturah, kar povzroča mozaično poroznost.

Iz analiz prerezov, zbruskov in obrusov je tudi razvidno, da ne gre za izločanje sekundarnih mineralov na površini raztapljajoče se karbonatne kamnine, ampak za povečanje poroznosti.

Mineralna sestava svežega in preperelega dela karbonatne kamnine se ne razlikuje bistveno, netopnega ostanka je včasih več v preperem delu, drugič v svežem delu. V preperem delu so, z nekaj izjemami, glavni kalcitovi in dolomitovi odboji višji in s preperevanjem se dolomitu zniža stopnja urejenosti kristalne rešetke.

Iz rezultatov kemičnih analiz je razvidno, da se v prepereli coni karbonatne kamnine količina Mg, Sr, Au in U (ostalih elementov v posameznih primerih) dosledno zmanjša. Torej se med preperevanjem izgublja.

V preperem delu je organskega ogljika enkrat več, drugič manj, tako da svežim delom karbonatne kamnine barve očitno ne daje.

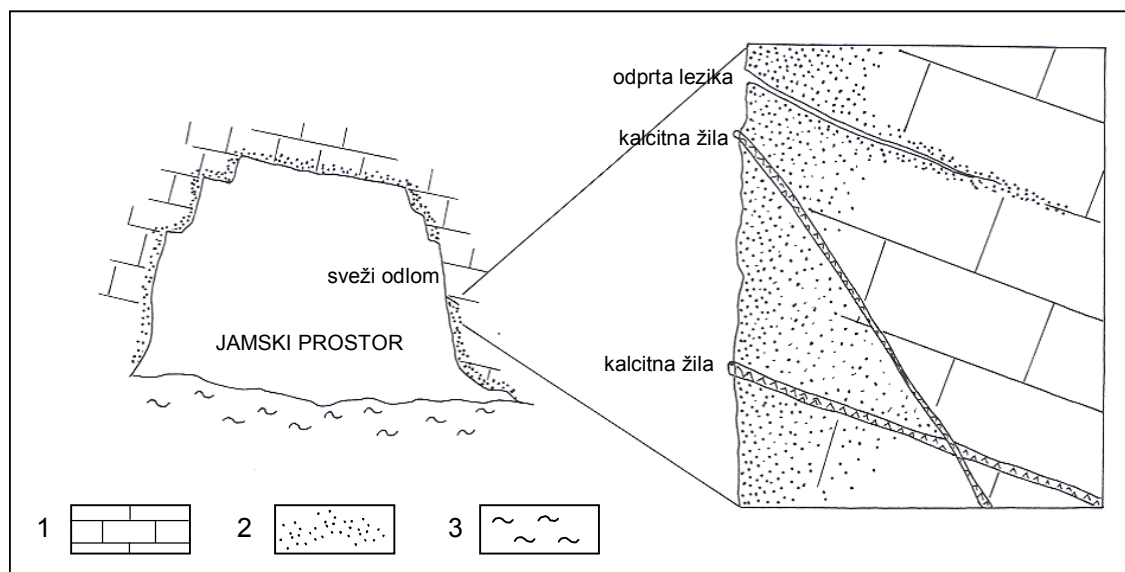
Mikroorganizmi so prisotni v preperem apnencu, ne poznamo pa še njihove vloge ali raztapljanje pospešujejo ali celo pogojujejo.

V razpredelnici na sl. 8.1.1. podajam pregled različnih tipov karbonatnih kamnin, v katerih so značilne debele preperle cone in sem jih jaz izbrala za proučevanje.

8.2. Diskusija

Najpomembnejši dejavnik, ki oblikuje preperle cone kamnin, je raztapljanje. Nemoteno se lahko odvija, če imamo na razpolago stalen dotok sveže vode, ki dovaja agresivno vodo in odnaša ione raztopljene kamnine. Običajno je preperevanje karbonatnih kamnin pogojeno z raztapljanjem (CARSON & KIRKBY 1972; SUMMERFIELD 1991), to je s prehajanjem kamnine v raztopino, medtem, ko raztopina odteče brez težav.

Ko pride agresivna voda v stik s kalcitovim kristalom, se njegova površina nabije negativno. Nastane dvojna ionska plast, debela nekaj 100 nanometrov. Na površini zrna je negativno nabita plast (presežek karbonatnih ionov), zunaj pa je pozitivno nabita plast (na primer vodikovih ionov), ki jih privlači negativno nabita plast. Posledica je, da se pH v okolici zrn zniža, kar poveča raztapljanje kalcita. Molekularna difuzija odreja hitrost raztapljanja kamnine v vodi in odnaša ione stran od meje zrn.



Slika 8.2.1. Shematski prikaz preperle stene jamskega rova. Preperevanje v kamnino prodira selektivno, hitreje je ob odprtih razpokah in zaustavlja se napr. ob kalcitnih žilah. Ob svežem odlomu kamnina ni preperela. Legenda: 1 – apnenec, 2 – preperina, 3 – naplavina.

Vsekakor se v tu opisanih primerih kamnina ne raztaplja samo na površini, frontalno in ne pušča za seboj gladkih površin jamskih sten (v drobnem hrapave, vendar je meja jasna) kot se dogaja na stiku s tekočo vodo, kjer je stik med vodo in kamnino zadosti dolg, da kemično reagirata. V obravnavanih primerih raztapljanje prodira v globino ne samo po večjih odprtih razpokah, ampak tudi po drobnih mikrorazpokah in porah (sl. 8.2.1.). Najprej se raztapljajo manjša zrna in kontakti med zrnji. Raztapljanje sledi tudi napakam na površini in v zrnih ter mikrostrukturam in sedaj zakritim primarnim strukturam v kamnini, ki niso opazne pod presevnim mikroskopom.

Raztapljanje je izrazito selektivno. Raztopijo se manjša zrna in stiki med zrnji. Selektivna korozija se v tu opisanih primerih ne odvija samo na površini kamnine, kot je običajno, ampak prodira tudi v kamnino samo. Večje kristale ter posamezna območja v mikritu pa pušča neraztopljene (sl. 8.2.1. in 8.2.2.). Ti neraztopljeni ostanki gradijo porozni kamninski skelet. Pore se med raztapljanjem večajo in so vse bolj medsebojno povezane, tako da agresivna voda prodira vse lažje in vse dlje v notranjost kamnine.

Kamninski skelet postaja vedno bolj porozen, prodirajoča agresivna raztopina pa pušča za sabo vedno bolj preperete ostanke matične kamnine. Kamninski skelet se ne raztopi, bodisi zato, ker se proces raztapljanja odvija globlje v kamnini, bodisi, ker je bil ustavljen (ni dotoka nove agresivne vode ali pa se raztopina prenasiti). S časom preperijo tudi bolj odporni deli karbonatne kamnine. Kalcitne žile in odlomki školjk, ki štrlijo iz površine preperete kamnine postanejo porozni in mehki.



Slika 8.2.2. Preperela stena jamskega rova pod naplavino. Preperovanje v kamnino prodira selektivno, debelejši kristali (napr. kalcitne žile) se raztapljajo počasneje; Postojnska jama.

Z nadaljnjim raztapljanjem postaja kamnina poroznejša in krhkejša, dokler se njena struktura popolnoma ne sesuje. Napredujoče raztapljanje namreč vse bolj ločuje posamezne delce. Nastaneta karbonatni melj in glina (odvisno od strukture kamnine: sparit in mikrosparit – melj, mikrit – glina), ki pa ostajata še vedno na steni rova. Kamnina obenem postane tudi manj odporna na mehanske dejavnike, na primer proti mehanski eroziji vode. Že najmanjši vodni tok lahko prenaša z raztapljanjem osamele delce po steni navzdol in oblikuje kapnikom podobne oblike iz melja (ŠUŠTERŠIČ & MIŠIČ 1996; GABROVŠEK 2000).

Za klastične sedimentne kamnine je SKABERNE (1980) napisal, da kemijsko prepevajo in se drobe v odvisnosti od njihove strukture. Podobno sem opazila tudi pri apnencih in dolomitih, še zlasti kadar raztapljanje po robovih mineralnih zrn oslabi mehansko povezanost kamnine. Da se apnenci s sparitno in mikrosparitno strukturo začnejo raztapljati po robovih zrn in po napakah na kristalni površini, je v svoji magistrski nalogi ugotovila tudi JARC (2000). Pri kemijskem prepevanju klastičnih sedimentnih kamnin nastajajo predvsem zrnca velikosti glin. V apnencih in dolomitih pa se ta najmanjša zrnca navadno raztopijo, razen v primerih, ki so tu opisani, ko se raztapljanje prej ustavi.

Poroznost v apnencih se v danih primerih povečuje, saj se raztapljajo zrna kalcita, ki so manj odporna na raztapljanje. Raztopijo se zrna, ki so manjša in tista, ki vsebujejo večje število napak na kristalnih ploskvah. Nestabilna so tudi zrna, katerih notranja struktura je manj urejena zaradi prisotnosti Mg ionov v njihovi kristalni mreži. Mg ioni so zaradi manjšega ionskega potenciala (manjši radij) bolj mobilni in med raztapljanjem najprej zapustijo svoja mesta v kristalni mreži, s tem pa še oslabijo notranjo strukturo in povečajo nagnjenost do raztapljanja.

Poudarim naj, da se poroznost v tu opisanih primerih ne povečuje zaradi mobilizacije bolj topnih mineralov iz karbonatne kamnine WORTHINGTON (1991), LOWE & GUNN (1997). Enako tudi ni povezana z nastajanjem sulfatov (z oksidacijo sulfidov – pirit), ki povečujejo raztapljanje karbonatov.

Debele preperle cone v mojih primerih niso v stiku z večjo količino vode, niti s stalnim vodnim tokom. Značilno je, da debelejše plasti preperle kamnine najdemo največkrat na stenah, ki so bile v preteklosti, ali pa so še sedaj v stiku z drobnozrnatimi naplavinami (sl. 8.2.3.). Z mineraloškim raziskavami klastičnih alohtonih naplavin pa sem ugotovila, da le te s preperelo kamnino kemično ne reagirajo, prispevajo pa vlago, potrebno za raztapljanje. Ne vemo pa, ali so naplavljeni sedimenti morda vsebovali minerale, ki bi kemično reagirali s kamnino v steni rova in jih zato sedaj ni več. Vendar mineralna sestava preperle cone in naplavine na stiku med njima na to ne kaže.



Slika 8.2.3. Preperela stena jamskega rova z ostanke naplavine, ki je nekoč zapolnjevala rov; Narracorte cave, Južna Avstralija.

Debelejšje plasti preperle kamnine lahko nastanejo tudi v primeru, ko prenikajoča voda mezi po steni rova in kamnino mozaično raztaplja. V obeh primerih, pod naplavino in kadar voda mezi po steni, vlečejo v globino vodo kapilarne sile po povezanih porah in

razpokah. Enako se dogaja, kadar imamo opravka s kondenzno vlago. Pretok vode v vseh teh primerih ni velik, v resnici gre bolj za vlago. Ta vlaga pa je sposobna raztapljati.

Zato se mi je zdel izraz korozivna vlaga, ki ga uporabljata DAVIS & MOSCH (1988) pri opisovanju natapljanja (jedkanja) površine glinastih prodnikov v Colorado Cave s korozivno vlago zelo primeren. Korozivna vlaga je v njenih primerih kondenzna ali vadozna (mezeča voda). Obe vrsti vlage sta pogojeni s klimatskimi dejavniki v jami in na površju. V primerih, ki sem jih podrobneje obdelovala, kondenzne vlage in tudi pogojev za njen nastanek nisem zaznala (debele cone preperela kamnine so največkrat v zatišnih delih jam). Vlažnost preperelih sten se je med letom močno spreminjala. Včasih so bile stene popolnoma mokre (izmerila sem do 39,7 % vode v porah, glej poglavje 5.4.3.), naslednjič pa so bile popolnoma suhe (ob vrtnanju se je prašilo iz stene). Nihanje vlage je čez leto očitno, tako v povezavi s padavinami kot s hitrostjo prenikanja po steni navzdol. Prodiranje vlage v prepereli del stene je zelo hitro (preizkus navlaženja, glej poglavje 6.2.9.). Zaustavi se samo ob večjih kalcitnih žilah, nekaj časa pa potrebuje tudi za prehod čez odprte in delno zaglinjene (velikost delcev) razpoke.

Iz terenskih opazovanj, analiz prerezov in močenja preperlega apnenca sklepam, da pretakanje vode v primeru debelih preperelih con na stenah rovov pogojuje kapilarnost, ki je hitrejša od molekularne difuzije. Domnevam, da se v primeru, ko se dotok ali odtok vode ustavi in se raztopina v povezanih porah nasiti ali posuši, kamnina neha raztapljati.

Nastanek mozaične poroznosti (spužvaste kamninske strukture) skušam razložiti s podobnim modelom, kot ga je za nastajanje poroznosti v rendzini na apnencu uporabil TRUDGILL (1985). V modelu prikazuje, kako z dotokom sveže agresivne vode pH v sistemu močno pade in sproži raztapljanje. V nadaljevanju trajanja mokre faze pH raste, nato se tla posušijo in procesi se ustavijo. Z novim dežjem se proces obnovi.

Podobno nihanje vrednosti pH sem zasledila med meritvami v vlažni kamnini. Vrednosti pH, izmerjene v vlažni kamnini, so bile v večini primerov nad 8. To pomeni, da se kamnina v tistem trenutku ni več raztapljala, ampak je bila voda v porah nasičena. V primeru, da ostane nasičena voda v porah, jo naslednji pritok vode ali vlage (po padavinah zaradi povečanega hidrostatičnega tlaka) iztisne iz por.

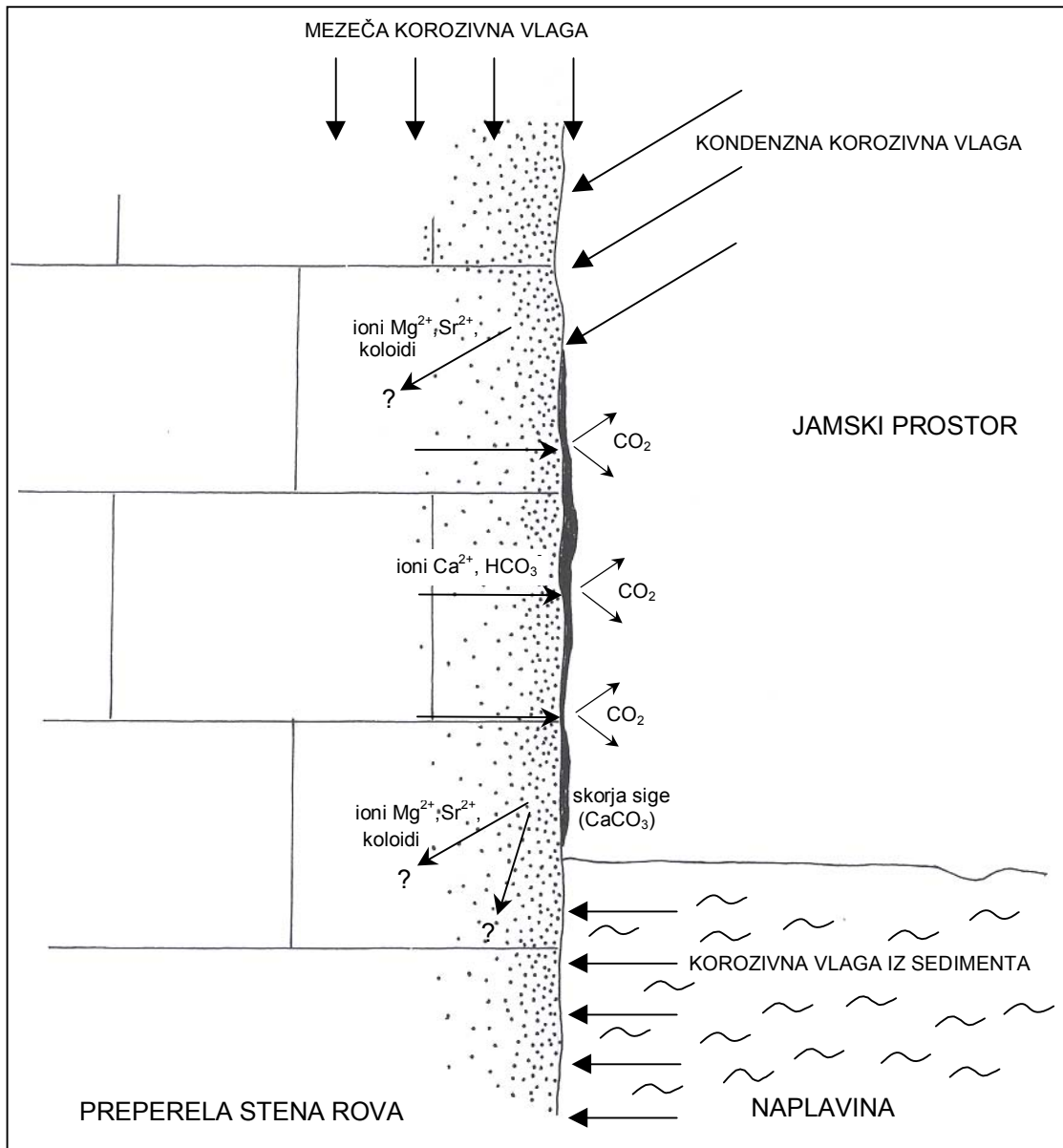
Nekaj podobnega se dogaja tudi v prenikajočih vodnih curkih (KOGOVŠEK 1986) med naraščanjem in upadanjem pretoka v vodnem valu. Pri naraščanju pretoka karbonatna trdota močno naraste, saj dotekajoča voda najprej iz razpok in por iztisne zastalo nasičeno vodo. Nasičeno vodo v porah zamenja agresivna voda, ki takoj začne reagirati s kamnino in se po določenem času spet nasiti.

Iz opazovanj sklepam, da v primerih, ko se stena posuši, prodira nova vlaga, ko je spet na voljo, v kamnino še hitreje, ker so pore prazne. Nadalje predvidevam, da se hitro odvija tudi raztapljanje in vodi v porah se spet zniža agresivnost, raztopina se nasiti in pH naraste. Ob vsakem ponovnem vodnem valu voda uporabi za pretakanje pore nastale ob prejšnjem dogodku. Morda jih še malo razširi, glavna fronta raztapljanja pa se z vsakim novim vodnim valom pomakne globlje v kamnino. Agresivna voda se tako ob stiku s karbonatnimi delci v poroznem skeletu zelo hitro nasiti, ostane je samo del, ki je še sposoben reagirati z kamnino.

Nepopolno raztapljanje apnenca se najverjetneje dogaja v vadozni coni. V freatični coni (stalno zaliti) bi vodni tok zrna odnesel s stene - če ne prej, ko bi se umikal, ali pa bi se melj s stene kar razpustil. Vodni tok bi tudi sproti odnašal ione in raztapljanje bi šlo v globino počasi, ker bi delovalo frontalno. Obstaja pa možnost, da se nepopolno raztapljanje dogaja, vendar zaradi sprotnega odnašanja delcev tega ne opazimo.

Mehanizem nastanka poroznega skeleta skušam razložiti z naslednjo hipotezo. Pore in povezave med njimi (manjši kanali) se večajo in voda se skozi pretaka hitro, z njihovimi stenami niti ne reagira (ne raztaplja več), ampak raztaplja v »čelu«, ki je že globlje v kamnini (sl. 8.2.4.). Predvideni mehanizem se ciklično ponavlja in kamnina je vedno bolj porozna in

preperela v globino. To je tudi možen odgovor na vprašanje, zakaj se kamnina ne raztopi do konca.



Slika 8.2.4. Shematski prikaz modela cikličnega raztapljanja. Na kamnino v ponavljajočih ciklih delujejo mezeča in kondenzna vlaga ter vlaga iz naplavine. Kamnina prepereva v globino, raztopljeni ioni in koloidi migrirajo iz kamnine; na prepereli karbonatni kamnini se izloča tanka skorja sige.

V primeru, da bi agresivna raztopina na preperelo kamnino delovala dovolj časa, ali da bi bila količina vode večja, bi se tudi ta raztopila do konca.

Še vedno pa ni popolnoma jasno, kam migrirajo raztopljeni ioni v tu opisanih primerih. Posebno, ko preperele kamnine, ki je v stiku z naplavino, ne prekriva plast sige.

V primerih, ko ima preperela kamnina neposreden stik z jamskim prostorom, se na njeni površini skoraj vedno izloči tanka kalcitna plast. Nasičena vlaga ob sušenju kamnine v jamski steni izhaja iz njenih por, ali pa jo iztiska proti površini preperle kamnine nova dotekajoča voda.



Slika 8.2.5. Mehka preperina je prekrita s plastjo rdeče sige; Pečina v Borštu.

V obeh primerih se v tej izhajajoči nasičeni vodi na stiku z jamskim zrakom spremeni parcialni tlak CO_2 in se izloča tanka plast sige (sl. 8.2.5.), lahko pa kalcit kristali tudi v porah preperle cone (sl. 8.2.6.). Takrat se v prepereli coni poroznost zmanjša na račun sekundarno izločenih kalcitnih kristalov. To prepereli kamnini delno povrne mehansko trdnost.

Plast sige, ki pokriva preperle cone karbonatnih kamnin, je največkrat obarvana rjavordeče. V njej se nabirajo tako netopni ostanki kamnine, kot tudi delčki gline, ki jo prenikajoča voda infiltrira s površja, oziroma jih na stene rova nanesejo poplave. Pri večjih kalcitnih kristalih največkrat lahko opazimo, da rastejo pravokotno na steno rova.



Slika 8.2.6. Bela mehka preperina je delno prekrita z rdečo sigo, v sivem delu pa so zrasli novi kalcitni kristali in je na otip spet trda; Pečina v Borštu.

Tanka plast sige, ki se izloči čez preperelo kamnino v nadaljevanju različnih speleotanskih procesov (v smislu ŠUŠTERŠIČ, 1999a), lahko ščiti pred mehanskim odnašanjem razrahljanih delčkov s stene. Plast sige se lahko raztopi v primerih, ko čez njo teče agresivna voda.

Da pojavljanje preperel cone v mojih primerih nima povezave z zmrzovanjem lahko utemeljim z dejstvom, da so zlasti debele preperel cone karbonatne kamnine prisotne največkrat globoko v jami, predvsem v sedaj zatišnih legah, kjer nimajo nobene povezave z vdorom hladnega zraka. Kamnina, ki prepereva zaradi zmrzovanja v vhodnih delih jam in v delih jam, kjer je led, je lahko po površini navidezno podobna, a mehanizmi preperevanja so popolnoma drugačni (razganjanje kristalov z ledom).

Podobna preperela površina na karbonatni kamnini lahko nastaja tudi pri raztapljanju s kondenzno korozijo, vendar se v večini primerov čez njo izloči tanka drobnozrnata kalcitna prevleka ali kalcitni oprh, ni pa nujno. Če bi šlo v vseh tu obravnavanih primerih za izločanje sekundarnih mineralov (skorje ali oprha) na površini stene jamskega rova iz kondenzne vode, bi bila meja med kamnino in sekundarno izločenimi minerali ostra in ne bi bilo nujno v povezavi z naraščajočo poroznostjo v kamnini.

Velikokrat niso preperel samo stene jamskih rogov, ampak tudi sigove tvorbe, ki na isti način razpadajo v globino. Vendar tako nastalega »jamskega mleka« na stenah in sigi ne smemo zamenjevati z jamskim mlekom, ki nastaja z obarjanjem aragonita in kalcita, največkrat v prisotnosti mikroorganizmov.

Kako karbonatno kamnino odnese z mesta njenega nastanka je, odvisno od njenih lastnosti, kot tudi od lastnosti vode, ki je v stiku z njo. Voda lahko erodira kamnino mehansko in kemijsko. Razmerje med obema vrstama erozije pa je odvisno od mnogih lokalnih dejavnikov. Kadar je na primer kamnina tektonsko porušena, voda drobir lažje topi in ga tudi hitreje mehansko odplakne, kadar pa kamnina tektonsko ni porušena, na raztapljanje močnejše vpliva njena mineralna sestava ter struktura. Raztapljanje takrat načne robove zrn in napake na površini zrn.

Ali pa ta proces poteče do konca ali ne, je odvisno od mnogih dejavnikov. Kemijski proces kamnino lahko samo načne, ostalo pa opravi vodna erozija.

Preperevanje (raztapljanje) kamnine se v jamskem rovu lahko ustavi, prepereli del karbonatne kamnine pa ostane na primarnem mestu zato, ker ni v stiku s tekočo vodo, ki bi natopljene delce sproti trgala s stene rova in jih odnašala.

Raztapljanje za seboj ne pušča le debele preperel cone, ampak tudi hrapavo površino stene jamskega rova. V globino manj debela preperela cona, vendar z močno izraženo hrapavo skalno površino, je pogosta na prekristaljenih apnencih, dolomitiziranih apnencih ter dolomitih.

Če pride taka hrapava površina v stik z aktivnim vodnim tokom, ta izpostavljene delce sproti spira s stene, jih odnaša in akumulira v jamskih naplavinah. Karbonatni delci se lahko odlagajo sami ali pa se mešajo z alohtonimi naplavinami. Tako se lahko naplavina, ki ima izvor v nekarbonatnih kamninah obogati z karbonatnimi delci tudi do 70 %. Lahko pa nastajajo tudi skoraj čisti avtohtoni karbonatni melji in gline, ki se v velikih količinah nabirajo v jamskih rovih kot klastični sedimenti.

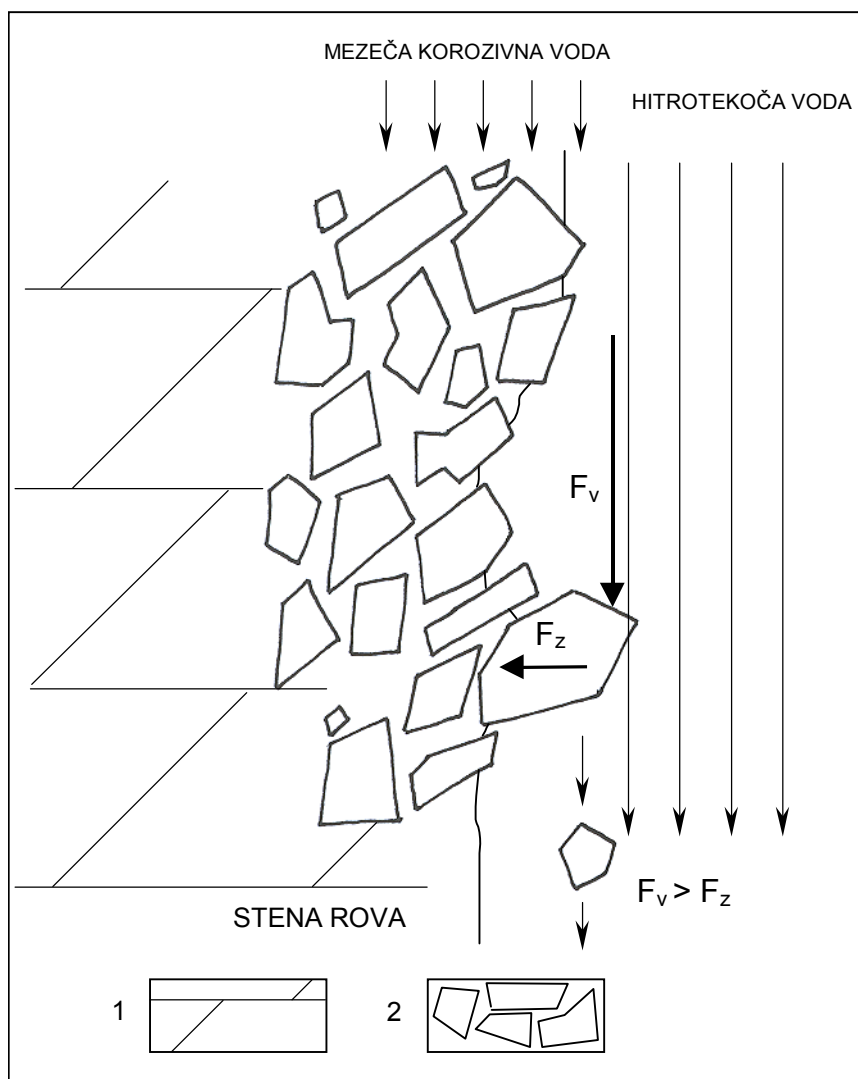
Nastajanje avtohtonega karbonatnega melja in gline je seveda odvisno od različnih lokalnih dejavnikov, od primernosti kamnine za način selektivnega ali mozaičnega raztapljanja ter s tem načetost površine stene rova, do močnejšega dotoka vode, ki po nalivih spira brezna ali zaradi visokih vod (poplav), ki spirajo stene jamskih rogov. Tam, kjer se voda skozi rove pretaka dovolj hitro, z raztapljanjem načete dele kamnine odtrga od stene.

Naj poudarim, da ne gre za abrazijo s kremenovimi prodniki v smislu GAMSA (1959a) in NEWSONA (1971a), ampak za mehansko erozijo z dovolj hitro tekočo vodo v vadozni ali freatični coni.

Voda, ki počasi teče ali mezi čez stene, lažje vzpostavlja kontakt s kamnino in jo raztaplja do vzpostavitve ravnotežja med njima. Voda, ki priteče v preperelo kamnino raztaplja tisto, kar še ostane od prejšnjega cikla. Agresivna voda raztaplja in ko prodira v kamnino se hitro nasiti, tako da do konca odprtih por, prodre samo še majhen del agresivne vode. Kaj pa se dogaja na stiku karbonatnih zrn in vode lahko samo predvidevam, saj je to že problem kristalofizike.

Voda, ki pa hitro teče mimo sten jamskih rovov, z izpostavljenno kamnino minimalno kemično reagira, reagira samo njen laminarno adhezivno vezani film. Hitro tekoča voda s svojo silo razbije laminarno plast in zato lahko tudi hitreje raztaplja, lahko pa le trga s površine stene izpostavljena zrna.

Kako so zrna izpostavljena in koliko jih je, pa je odvisno od karbonatne kamnine, ki s svojo strukturo pogojuje selektivno raztapljanje in s tem nastanek bolj ali manj hrapave površine.



Slika 8.2.7. Shematski prikaz modela priprave karbonatne kamnine na spiranje izpostavljenih zrn s tekočo vodo. Hrapavost preperete površine stene rova je pogojena s strukturo kamnine, to je s selektivno korozijo. Spiranje zrn pa je mogoče, če je sila tekoče vode večja od sile, ki veže zrna v kamnino. Legenda: 1 – zrnat dolomit, 2 – s korozijo izpostavljena zrna, F_v – sila tekoče vode, F_z – sile zrna, ki ga vežejo v kamnino.

Shematski prikaz modela priprave karbonatne kamnine na spiranje izpostavljenih zrn s tekočo vodo je predstavljen na sl. 8.2.7.. Iz okolja štrleča zrna, katerih vezi so oslabiljene z raztapljanjem, so izpostavljena in primerna, da jih voda (po nalivu) odplakne s stene in odnese naprej po jami. Sile tekoče vode (F_v), ki delujejo na izpostavljena zrna, morajo biti večje od sil (F_z), ki vežejo mineralno zrno v kamnino. (F_v je odvisna od hitrosti vode in površine zrna na katero deluje; F_z pa je sorazmerna z adhezijo zrna, ki je odvisna od velikosti in površine stika zrna z osnovo). Sledi, da se mineralna zrna, katerih kontakti so bili načeti z raztapljanjem ali izpostavljeni s selektivnim raztapljanjem lažje odtrgajo, kot pa zrna iz sveže, nepreperle kamnine.

Za vsak delec obstaja kritična hitrost, ko je še zmožen gibanja, to je kritična hitrost erozije (BRIGGS 1977). V tu opisanih primerih mora bi hitrost vode večja od kritične hitrosti, da delce lahko odtrga s stene. Ko vodi pade hitrost in transportna moč, se karbonatni klasti usedajo kot samostojni klastični sedimenti ali pa pomešani z alohtonimi naplavinami.

Zaščita pred nadaljnjim odnašanjem natopljene kamnine (njenih klastov) je pomembna za ohranitev preperelih con na stenah jamskega rova. Debele preperle cone ostanejo na mestu nastanka v primerih, če:

- ni stika s hitro tekočo vodo,
- so zaščitene s plastjo sige in
- so zaščitene kako drugače (v stiku z drobnozrnatimi jamskimi sedimenti).

Na razmerje med avtohtono kemijsko in mehansko erozijo karbonatne kamnine v jamskih rovih poleg hitrosti tekoče vode odločilno vpliva tudi njena struktura. Struktura vpliva na začetek in potek raztapljanja. Iz poznodiagenetskega dolomita med preperevanjem nastaja dolomitni melj (ZOGOVIĆ 1966). Površina stene rova izoblikovanega v dolomitu je hrapava in iz nje štrlijo velika zrna, ki so primerna za nastanek avtohtonih karbonatnih meljev. Iz drobnozrnatih mikritnih apnencev se nabira karbonatna glina, katere zrna pa so tako majhna, da se v večini primerov zelo hitro raztopijo. Raztapljanje sledi notranjim strukturam v kamnini, za sabo v posebnih pogojih pušča mozaično poroznost - močno porozno in preperelo kamnino, ki jo zadosti hitro tekoča voda tudi mehansko erodira. Bolj ko je kamnina kemično preperela, lažje voda trga njene delce.

Razmerje med kemijsko in mehansko erozijo ima vpliv na genezo jamskih rovov, skozi katere se voda pretaka dovolj hitro, da lahko trga z selektivno korozijo izpostavljena zrna. Kjer pa je korozija dovolj močna, da deluje frontalno (ploskovno), stene tako zglaadi, da ni hrapava. Takrat voda ne more spirati delcev, ker ji ni, ampak se skozi rove samo pretaka ali pa izbija delce s stene s svojim tovorom.

Ali je nastajanje preperelih con v karbonatni kamnini na stenah jamskih rovov pomemben dejavnik ali pa je samo ena od posebnosti pri oblikovanju kraških rovov, še ne moremo trditi, saj načeto kamnino voda lahko sproti odplavi.

Iz v razpravi opisanih primerov lahko izluščimo dva tipa preperevanja kamnine na stenah jamskih rovov (vmes obstajajo mešani tipi):

- debele preperle cone in
- tanke preperle cone, ki se odražajo predvsem v hrapavosti površine stene.

Iz opazovanj sklepam, da sta odvisna predvsem od strukture karbonatne kamnine in pogoja, da je kamnina vsaj v občasnem stiku s tekočo vodo.

Vsekakor sem potrdila, da je cona melja in gline na jamskih stenah iz preperle matične kamnine in ne sekundarno izločenih mineralov in da so s takim razpadanjem izpostavljena zrna, izvor avtohtonih klastičnih sedimentov.

Načeta ali popolnoma preperela cona karbonatne kamnine je lahko globoka od nekaj milimetrov do več centimetrov in se lahko oblikuje v različnih apnencih in dolomitih.

V globino preperevajo apnenci, dolomiti ter dolomitizirani apnenci, ne glede na geologijo in lego glede na stik s sedimentom in zračno cirkulacijo. Debele preperle cone

matične kamnine pa predvsem najdemo v sedaj zatišnih delih jamskih rovov v stiku z jamskimi naplavinami.

Iz terenskih opazovanj je razvidno, da so v primerih, ko je preperela kamnina v stiku s hitro tekočo vodo, preperela cone samo nekaj milimetske, ker voda z raztapljanjem razrahljane delce sproti odnaša.

8.3. Zaključki

Odgovori na v uvodu zastavljena vprašanja so:

- Cone karbonatnega melja ali gline in bele porozne kamnine na stenah jamskih rovov so produkt preperavanja in ne izločanja sekundarnih mineralov.
- Raztapljanje prodira v kamnino po različnih strukturah, kot so: razpoke, primarna poroznost, mikrostrukture (nepravilnosti kristalov) in z mikritizacijo ali neomorfizmom zakrite primarne strukture, ki so lahko tudi ovira širjenju raztapljanja.
- Tako apnenec kot dolomit se med preperevanjem čistita; izlužujejo se Mg, Sr in U, tako kot med zgodnjo diagenozo, struktura kamnine pa obenem postaja vedno bolj porozna – gobasta.
- Ob stiku s hitro tekočo vodo, voda s površine kamnine trga izpostavljene delčke in jih odnaša (če voda čez izpostavljene delčke ne teče zadosti hitro ali so zaščiteni pred odplavljanjem, ostanejo na mestu in jih, korozivna vlaga dalje ne raztaplja).
- Razmerje med korozijo in mehansko erozijo karbonatne kamnine v steni jamskega rova je bolj pomembno za oblikovanje hrapavosti in različnih skalnih oblik na stenah kot pa za samo rast rova.
- Mikroorganizmi so prisotni, ne vemo pa še ali sodelujejo pri preperevanju.

Poleg odgovorov na vprašanja sem iz opazovanj ugotovila še da:

- Korozivno vlago v porozno kamnino vlečejo kapilarne sile.
- Selektivno raztapljanje ustvarja hrapavost površine in spužvasto strukturo preperela kamnine, ki je lahko globoka več centimetrov.
- Avtohtoni karbonatni klastični sedimenti nastanejo s spiranjem izpostavljenih zrn selektivno natopljene površine jamskih sten.

In predpostavila, da:

- se pore in povezave med njimi večajo, voda se skozi pretaka tako hitro, da z zrn v njihovih stenah ne reagira, ampak raztaplja samo v »čelu«, ki je že globlje v kamnini; mehanizem deluje ciklično v povezavi z nihanjem korozivne vlage (potrben eksperiment za potrditev).

S poznavanjem sestave preperelih con karbonatnih kamnin in dogajanja v kamnini med raztapljanjem ter načinom nastajanja avtohtonih karbonatnih klastičnih sedimentov opozarjam na še eno od številnih posebnosti krasa, na katero moramo biti pozorni pri razlaganju speleogenetskih procesov in oblikovanja kraških rovov. Na mnogo vprašanj, ki so se odprla med mojimi raziskavami, pa bo še potrebno najti odgovore.

Izkazalo se je, da razpadanje apnenca ni vedno pogojeno s preperevanjem, ampak je v primerih, ko voda spira s sten jamskih rovov in odnaša izpostavljene karbonatne delce, omejeno s transportom.

9. LITERATURA

- ACTLABS, 2000: Litho geochemistry. Internet, <http://www.actlabs.com>.
- AL-AASM, I.S. & PACKARD, J.J., 2000: Stabilization of early-formed dolomite: a tale of divergence from two Mississippian dolomites. *Sedimentary Geology*, 131, 97 – 108, Amsterdam.
- ALLEN, J. R. L., 1985: *Principles of Physical Sedimentology*. George Allen & Unwin, 272 pp, London.
- ATKINS, P. W., 1995: *Physical Chemistry*. Oxford University Press, 1031 pp, Oxford.
- ATTEIA, O., 1997: Nature and transport of natural colloids in a karstic aquifer. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Vol.2, 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, 125 - 128, La Chaux-de-Fonds.
- AUDRA, P., 1995: Signification des remplissages des karsts de montagne. *Karstologia* n^o25, 13 – 20, s.l.
- AUDRA, P., 2000: Le karst haut alpin du Kanin (Alpes juliennes, Slovenie-Italie). *Karstologia* n^o35, 27 – 38.
- AUDRA, P., BINI, A., GABROVSEK, F., HÄUSELMANN, P., HOBLEA, F., JEANNIN, P.-Y., KUNAVER, J., MONBARON, M., ŠUSTERSIC, 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, 153–68.
- BATHURST, R. G. C., 1975: *Carbonate Sediments and Their Diagenesis*. Second enlarged edition, Elsevier, 658 pp, Amsterdam.
- BAUMANN, J., BUHMANN, D., DREYBRODT, W. & SCHULZ, H. D., 1985: Calcite dissolution kinetics in porous media. *Chemical Geology*, 53, 219 – 228, Amsterdam.
- BENNETT, P.C., HIEBERT, F.K. & ROBERTS ROGERS, J., 2000: Microbial control of mineral-groundwater equilibria: Macroscale to microscale. *Hydrogeology Journal*, 8, No.1, 47 – 62, Berlin.
- BISSETT, A., NEU, T. R. & DE BEER, D., 2011: Dissolution of Calcite in the Twilight Zone: Bacterial Control of Dissolution of Sinking Planktonic Carbonates. *PLoS ONE*, 6, 11/1.
- BLATT, H., MIDDLETON, G., MURRAY, R., 1972: *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice-Hall, Inc., 634 pp, New Jersey.
- BÖGLI, A., 1965: The role of Corrosion by Mixed Water in Cave Forming. *Problems of the Speleological research. Proceedings of the International Speleological Conference held in Brno June 29 – July 4, 1964*, 125 - 131, Prague.
- BÖGLI, A., 1978: *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Springer Verlag XIII, 292 pp Berlin, etc..
- BÖGLI, A., 1980: *Karst Hydrology and physical Speleology*. Springer Verlag, 284 pp, Berlin.
- BORG, R.J. & DIENES, G.J., 1992: *The Physical Chemistry of Solids*. Academic Press, INC., 584 pp, San Diego etc..
- BOSÁK, P., 1996: The evolution of karst and caves in the Koněprusy region (Bohemian Karst, Czech Republic) and paleohydrologic model. *Acta carsologica*, 25, 57 – 67, Ljubljana.
- BRENČIČ, M., 1993: Rušni procesi v jamah – primer jame Košelevc na Ljubljanskem vrhu. *Naše jame*, 35/2, 25 – 31, Ljubljana.

- BRETZ, J. H., 1942: Vadose and phreatic features of limestone caverns. *The Journal of Geology*, V.1, N.6/1, 675 - 811, Chicago.
- BRIGGS, D., 1977: *Sediments. Sources and methods in geography*. Butterworths, 190 pp, London, etc..
- BUHMANN, D. & DREYBRODT, W., 1985a: The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 1. Open System. *Chemical geology*, 48, 189 – 211, Amsterdam.
- BUHMANN, D. & DREYBRODT, W., 1985b: The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 2. Closed System. *Chemical geology*, 53, 109 – 124, Amsterdam.
- BUHMANN, D. & DREYBRODT, W., 1987: Calcite dissolution kinetics in the system H₂O - CO₂ - CaCO₃ with participation of foreign ions. *Chemical geology*, 64, 89 – 102, Amsterdam.
- BUKOVEC, J., ŠUŠNJAR, M., POLJAK, M. & ČAKALO, M., 1983: Osnovna geološka karta SFRJ, list Črnomelj, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd.
- BURGER, D., 1989: Dolomite weathering and micromorphology of paleosoils in the Franconian Jura. *Catena Supplement* 15, 261 – 267, Cremlingen.
- BUSENBERG, E. & PLUMMER, N. L., 1982: The kinetics of dissolution of dolomite in CO₂ - H₂O systems at 1.5 to 65⁰C and 0 to 1 atm pCO₂. *American Journal of Science*, 282, 45 – 78, s.l..
- BUSER, S., GRAD, K. & PLENIČAR, M., 1967: Osnovna geološka karta SFRJ, list Postojna, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd.
- BUSER, S., PAVLOVEC, R. & PLENIČAR, M., 1968: Osnovna geološka karta SFRJ, list Gorica, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd.
- CARSON, M. A. & KIRKBY, M. J., 1972: *Hillslope form and process*. Cambridge University Press, 475 pp, Cambridge.
- CASTANIER, S., LE METAYER-LEVEREL, G. & PERTHUISOT, J.P., 1999: Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiologist point of view. *Sedimentary Geology*, 126, 9 – 23, Amsterdam.
- CIGNA, A. & FORTI, P., 1986: The speleogenetic role of air flow caused by convection. *International Journal of Speleology*, 15, 41 – 52, s.l..
- COLMAN, S.M. & DETHIER, D.P., 1986: *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*. Academic Press, 603 pp, Orlando, London.
- CUCCCI, F., FORTI, F. & FINOCCHIARO, F., 1987: Carbonate surface solution in the classical karst. *International Journal of Speleology*, 16, 125 – 138, Trieste.
- CUCCCI, F., FORTI, F. & MARINETTI, E., 1996: Surface degradation of carbonate rocks in the karst of Trieste (Classical Karst, Italy). *Karren Landforms*, 41 – 51, Palma de Mallorca.
- ČAR, J. & JANEŽ, J., 1992: Strukturnogeološke in hidrogeološke razmere izvirov Možnice. *Acta carsologica*, 21, 77 – 96, Ljubljana.
- ČAR, J., 1982: Geološka zgradba požiralnega obrobja Planinskega polja. *Acta carsologica*, 10(1981), 75 – 103, Ljubljana.
- DAVIS, G. D. & MOSCH, C., 1988: Pebble indentations: A New Speleogen from a Colorado Cave. *Bulletin of the national speleological society*, 50, 17 – 20, Huntsville.

- DAVIS, K. J., NEALSON, K. H. & LÜTTGE, A., 2007: Calcite and dolomite dissolution rates in the context of microbe-mineral surface interactions. *Geobiology*, vol. 5, no. 2, 191–205.
- DEER, W. A. F. R. S., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J., 1967: *An Introduction of the Rock-forming Minerals*. Longmans, 473 – 503, London etc..
- DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W., 1990: *Physical and Chemical Hydrology*. John Wiley & Sons, 824 pp, New York.
- DREISS, S. J., 1984: Effects of lithology on solution development in carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 70, 295 – 308, Amsterdam.
- DREVER, J. I., 1988: *The Geochemistry of Natural Waters*. Second edition, Prentice Hall, 437 pp, New Jersey.
- DREYBRODT, W., BUHMAN, D., 1991: A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion. *Chemical Geology*, 90, 107 – 122, Amsterdam.
- DREYBRODT, W., & GABROVŠEK, F., 2000: Dynamics of the Evolution of Single Karst Conduits. V: *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 184 – 193, Huntsville.
- DREYBRODT, W., GABROVŠEK, F. & PERNE, M., 2005: Condensation corrosion: A theoretical approach. *Acta carsologica*, 34/2, 317-348.
- DREYBRODT, W., LAUCKNER, J., ZAIHUA, L., SVENSSON, U. & BUHMAN, D., 1996: The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 18, 3375 – 3381, New York.
- DREYBRODT, W., & SIEMERS, J., 2000: Cave Evolution on Two-Dimensional Networks of Primary Fractures in Limestone. V: *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 201 – 211, Huntsville.
- DREYBRODT, W., ZAIHUA, L., 1997: Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ solutions in turbulent flow, The role of the diffusion boundary layer and the slow reaction $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 61, No. 14, 2879 – 2889, New York.
- DREYBRODT, W., 1980: Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems. *Chemical Geology*, 29, 89 - 104, Amsterdam.
- DREYBRODT, W., 1981: Mixing Corrosion in $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ systems and its role in the karstification of limestone areas. *Chemical Geology*, 32, 221 - 236, Amsterdam.
- DREYBRODT, W., 1988: *Processes in karst Systems*. Springer-Verlag, 288 pp, Berlin, Heidelberg.
- DREYBRODT, W., 1992: Dynamics of karstification: A model applied to hydraulic structures in karst terranes. *Applied Hydrogeology*, vol.1, no.2, 20 – 32, s.l..
- DREYBRODT, W., 1996: Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models. *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 9, 2923 – 2935, s.l..
- DUBLYANSKY, V. N., & DUBLYANSKY, Y. V., 2000: The role of Condensation in Karst Hydrogeology and Speleogenesis. V: *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*,

- uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 100 – 112, Huntsville.
- DUNHAM, R. J., 1962: Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists, Mem. 1, 108 – 121, s.l.
- EISENLOHR, L., MADRY, B. & DREYBRODT, W., 1997: Changes in the dissolution kinetics of limestone by intrinsic inhibitors adsorbing to the surface. Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Vol.2, 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, 81 – 84, La Chaux-de-Fonds.
- EISENLOHR, L., METEVA, K., GABROVŠEK, F. & DREYBRODT, W., 1999: The inhibiting action of intrinsic impurities in natural calcium carbonate minerals to their dissolution kinetics in aqueous H₂O- CO₂ solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 63, No. 7/8, 989 – 1002, New York.
- FARRANT, A. R. & SMART, P. L., 2011: Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. *Geomorphology* 134, 79 – 93.
- FITZPATRICK, E. A., 1984: *Micromorphology of soils*. Chapman and Hall, 433 pp, London, New York.
- FLOREA, L.J., NOE-STINSON, C.L., BREWER, J., FOWLER, R., KEARNS, B.J. & GRECO, A.M., 2011: Iron oxide and calcite associated with *Leptothrix* sp. biofilms within an estavelle in the upper Floridan aquifer. *International Journal of Speleology*, 40/2, 205 – 219.
- FOLK, R. L., 1962: Spectral subdivision of limestone types. American Association of Petroleum Geologists, Mem. 1, 62 – 84, s.l.
- FORD, D. C. & EWERS, R. O., 1978: The development of limestone cave systems in the dimension of length and depth. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 11, 1783 – 1798, Hamilton.
- FORD, D.C., LAURITZEN, SE. & EWERS, R., 2000: Hardware and Software Modeling of Initial Conduit Development in Karst Rocks. V: *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 175 – 183, Huntsville.
- FORD, D. C. & WILLIAMS, P. W., 1989: *Karst Geomorphology and Hydrology*. 601 pp, UnwinHyman, London.
- FORD, D. C. & WILLIAMS, P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, 562 pp., Chichester.
- FORD, D. C., 1988: Characteristic of Dissolutional Cave System in Carbonate Rocks. *Paleokarst*, 25 – 57, Springer – Verlag, New York.
- FORTI, P., 1996: Erosion rate, crystal size and exokarst microforms. V: *Karren Landforms*, Uredniki: Fornós, J. & Ginés, A., Universitat de les Illes Balears, 261 – 276, Palma de Mallorca.
- FÜCHTBAUER, H., 1974: *Sediments and Sedimentary Rocks 1. Sedimentary Petrology, Part II*, Nägele u. Obermiller, 464 pp, Stuttgart.
- ERKER, M., 2013: Paradana; novice. <http://www.jdl.si/>
- GABROVŠEK, F. & OTONIČAR, B., 2010: Kras na Kaninskih podih [Ekskurzija E3]. V: Košir, A. (ur.), Horvat, A. (ur.), Zupan Hajna, N. (ur.), Otoničar, B. (ur.); 3. Slovenski geološki kongres, Bovec, 16.-18. september 2010. *Povzetki in ekskurzije*. Postojna: Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa; Ljubljana: Paleontološki inštitut Ivana Rakovca, 99 – 106.
- GABROVŠEK, F., & PINTAR, G., 1993: Vandima. *Naše jame* 35/2, 17 – 20, Ljubljana.

- GABROVŠEK, F. & STEPIŠNIK, U., 2011: On the formation of collapse dolines : a modelling perspective. *Geomorphology (Amst.)*, 134/1–2, 23 – 31.
- GABROVŠEK, F., 1997: Two of the world's deepest shafts on Kaninski podi plateau in western Julian Alps, Slovenia. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*, 4, 33 – 36, La Chaux-de-Fonds.
- GABROVŠEK, F., 2000: Evolution of Early Karst Aquifers: From simple principles to complex models. Založba ZRC, 150 pp, Ljubljana.
- GABROVŠEK, F., 2007: On denudation rates in Karst. *Acta carsologica*, 36/1, 7 – 14.
- GAMS, I., 1959a: O legi in nastanku najdaljših jam na Slovenskem. *Naše jame*, 1/1, 4 – 10, Ljubljana.
- GAMS, I., 1959b: Poskus s ploščicami v Podpeški jami. *Naše jame*, 1/2, 76 – 77, Ljubljana.
- GAMS, I., 1962: Meritve korozijske intenziteta v Sloveniji in njihov pomen za geomorfologijo. *Geografski vestnik*, 34, 3 – 20, Ljubljana.
- GAMS, I., 1965: Types of Accelerated Corrosion. Problems of the Speleological research. *Proceedings of the International Speleological Conference held in Brno June 29 – July 4, 1964*, 133 - 139, Prague.
- GAMS, I., 1971: Podtalne kraške oblike. *Geografski vestnik*, 43, 27 – 45, Ljubljana.
- GAMS, I., 1973: Slovenska kraška terminologija. XX + 76 pp, Ljubljana.
- GAMS, I., 1974: Kras. Slovenska matica, 359 pp, Ljubljana.
- GAMS, I., 1980: Poglavitni dejavniki kemične erozije na krasu po svetu. *Geografski vestnik*, 52, 3 – 15, Ljubljana.
- GAMS, I., 1985: Mednarodne primerjalne meritve površinske korozije s pomočjo standardnih apneniških tablet. *Razprave IV. Razreda SAZU, Zbornik Ivana Rakovca*, 26, 361–386, Ljubljana.
- GAMS, I., 1995: Die Rolle der beschleunigten Korrosion bei der Entstehung von Durchbruchstälern. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 137. Jg. (Jahresband), 105 – 114, Wien.
- GAMS, I., 1996: Meritve korozije v jamah s pomočjo apnenčevih ploščic. *Naše jame*, 38, 101 – 104, Ljubljana.
- GAMS, I., 1997: Climatic and lithological influence on the cave depth development. *Acta carsologica* 26/2, 321 – 336, Ljubljana.
- GAMS, I., 1998: Chemical denudation as a geomorphic process. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, vol. 21, 19 – 22, Torino.
- GAMS, I., 2003: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Založba ZRC, 516 str., Ljubljana.
- GARRELS, R. M., 1960: *Mineral Equilibria, at low temperature and pressure*. Harper & Brothers Publishers, 254 pp, New York.
- GARRELS, R.M. & CHRIST, C.L., 1965: *Solutions, minerals and equilibria*. Harper & Row, 450 pp, New York.
- GASCOYNE, M., SCHWARZ, H.P., & FORD, D.C., 1978: Uranium Series Dating and Stable Isotope Studies of Speleothems: Part I. Theory and techniques. *British Cave Research Association*, 5, 2, 91 – 111, s.l.
- GAUTEILIER, M., OELKERS, E.H. & SCHOTT, J., 1999: An Experimental study of dolomite dissolution rates as a function of pH from –0,5 to 5 and temperature from 25 to 80⁰C. *Chemical Geology*, 157, 13 – 26, Amsterdam.

- GILLIESON, D., 1997: Caves: Processes, Development and Management. Blackwell, XI, 324 pp, Oxford, etc..
- GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T. & DREYBRODT, W. (uredniki), 2009: Karst rock features: karren sculpturing. ZRC Publishing, pp. 561.
- GODDARD, E.N., TRASK, P.D., DE FORD, R.K., ROVE, O.N., SINGEWALD J.T. & OVERBECK, R.M., 1970: Rock-color Chart. The Geological Society of America, Boulder.
- GOLDSHMIT, J.R. & GRAF, D.L., 1958: Relation between lattice constants and composition of Ca – Mg carbonates. *American Mineralogist*, 43, 84 – 101, Washington.
- GOSPODARIČ, R., 1974: Fluvialni sedimenti v Križni jami. *Acta carsologica*, 6, 327 – 366, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1976: Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem. *Acta carsologica*, 7, 5 – 139, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1983: O geologiji in speleogenezi Škocjanskih jam. *Geološki zbornik*, 4, 163 – 172, Ljubljana.
- GOSPODARIČ, R., 1986: O geološkem razvoju klasičnega krasa. *Acta carsologica*, 14/15(1985–86), 19 – 29, Ljubljana.
- GOUDIE, A., ATKINSON, B.W., GREGORY, K.J., SIMMONS, I.G., STODDART, D.R. & SUGDEN, D., 1994: The Encyclopedic Dictionary of Physical Geography. Second Edition, Blackwell, 1 – 611, Oxford.
- GREGORIČ, V., 1969: Nastanek tal na triadnih dolomitih. *Geologija*, 12, 201- 230, Ljubljana.
- GUNN, J., 1986: Solute processes and karst landforms. V: Solute processes, urednik: Trudgill, S.T., Wiley, 363 – 437, Chichester.
- HERAK, M., 1972: Karst of Yugoslavia. Karst. Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. Elsevier Publishing Co., 25 – 83, Amsterdam.
- HERMAN, J. S. & WHITE, W. B., 1985: Dissolution kinetics of dolomite, Effects of lithology and fluid flow velocity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2017 – 2026, Great Britain.
- HILL, C.A., 1987: Geology of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico and Texas. Bulletin 117, New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources, 150 pp, Socorro.
- HILL, C A. & FORTI, P., 1997: Cave Minerals of the World. Second edition. National Speleological Society, Inc., 463 pp, Huntsville.
- HOSE, L. D., PALMER, A. N., PALMER, M. V., NOTRTHUP, D. E., BOSTON, P. J. & DUCHENE, H. R., 2000: Microbiology and geochemistry in a hydrogen-sulphide-rich karst environment. *Chemical geology*, 169, 399 - 423, Amsterdam.
- JACOBSON, D., WU, A. & WU, L., 2009: Microbial dissolution of calcite at T = 28 °C and ambient pCO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 73, 2314 – 2331.
- JARC, S., 1996: Toplotne lastnosti naravnega kamna v Sloveniji. 90 pp, Ljubljana. (Diplomsko delo, Knjižnica NTF, Oddelek za geologijo).
- JARC, S., 2000: Vrednotenje kemične in mineralne sestave apnencev kot naravnega kamna. 88 pp, Ljubljana. (Magistrsko delo, Knjižnica NTF, Oddelek za geologijo).
- JONES, B., 1994: Diagenetic processes associated with plant roots and microorganisms in karst terrains of the Cayman Islands, British West Indies. V: Diagenesis, IV. Developments in Sedimentology 51, uredniki: Wolf, K.H. & Chilingarian, G.V., Elsevier, 425 – 475, Amsterdam.

- JURJOVEC, J., 1989: Laboratorijsko ugotavljanje sprememb kemične sestave vode pri kroženju skozi prikamnino (Primer anizijskega in skitskega dolomita iz rudnika lignita Velenje. 33 pp, 56 prilog, Ljubljana. (Diplomsko delo, Knjižnica NTF, Oddelek za geologijo).
- JURKOVŠEK, B., 1986: Osnovna geološka karta SFRJ, list Beljak in Ponteba, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- JURKOVŠEK, B., TOMAN, M., OGORELEC, B., ŠRIBAR, L., DROBNE, K., POLJAK, M. & ŠRIBAR, LJ., 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote. Kredne in paleogenske karbonatne kamnine, 1 , 50000. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 143 pp, 1 karta v prilogi, Ljubljana.
- KADLEC, J., 1999: Reconstruction of the Cenozoic sedimentary processes in cave systems of the northern part of the Moravian Karst. 149 pp, Praga. (Doktorat, Knjižnica Inštituta za geologijo Češke akademije znanosti).
- KAUFMANN, O., BINI, A., TOGNINI, P. & QUINIF, Y., 1999: Etude Microscopique d'une latérite de type fantôme de roche. Karst 99 : colloque européen : des paysages du karst au géosystème karstique : dynamiques, structures et enregistrement karstiques, (Etudes de géographie physique, supplément, 28), 129 – 133, Aix-en-Provence.
- KLEIN, C., HURLBUT, C., 1993: Manual of Mineralogy, after J. D. Dana. 21st edition, John Wiley & Sons, Inc. 403 – 418, New York etc..
- KLIMCHOUK, A., 2000: Dissolution and Conversions of Gypsum and Anhydrite. V: Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 427 – 429, Huntsville.
- KOČEVAR, H., 1995: Nastanek tal na ladinijskih apnencih na področju Mežice. 177 pp, Ljubljana. (Doktorat, Knjižnica NTF, Oddelek za geologijo).
- KOGOVSĚK, J. & HABIĀ, P., 1981: Preuĉevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. Acta carsologica, 9 (1980), 129 – 148, Ljubljana.
- KOGOVSĚK, J. & ZUPAN, N., 1992: Prenos trdnih delcev pri vertikalni cirkulaciji v krasu. Naše jame, 34, 13 – 19, Ljubljana.
- KOGOVSĚK, J., 1986: Korozija pri vertikalnem prenikanju vode. Acta carsologica, 14–15 (1985-1986), 117 – 126, Ljubljana.
- KOGOVSĚK, J., 1994: Prenikajoĉa voda v jamah Primorskega krasa. Annales 4/94, Anali Koprškega primorja in bližnjih pokrajin, series historia naturalis, 4, 149 – 154, Koper.
- KORTNIK, J. & ŠUŠTERŠIĀ, F., 2000: Modelling the stability of a very large cave room. Acta carsologica, 29, 2, 149-160.
- KRAMAR, S., MLADENVIĀ, A., PRISTACZ, H. & MIRTIĀ, B., 2011: Propadanje ĉrnega apnenca z Derenovega griĉa na objektih kulturne dedišĉine (Ljubljana, Slovenija). Acta carsologica, 40/3, 483-495.
- KRANJC, A., 1989: Recent fluvial cave sediments, their origin and role in speleogenesis. Dela IV. razreda SAZU, 27, 167 pp, Ljubljana.
- KRANJC, V., JARC, S. & MIRTIĀ, B., 2000: Mikrotrdota nekaterih slovenskih apnencev. Materiali in tehnologije, 34, štv.1–2, 65 – 68, Ljubljana.
- KRKLEC, K., 2011: Corrosion of carbonate rocks and genesis of relief on Vis Island – correlation with selected coastal localities. PhD thesis. Faculty of Science, University of Zagreb, 200pp.
- KRKLEC, K., MARJANAC, T. & PERICA, D., 2013: Analiza "standardnih" apnenĉastih ploščic iz Lipiškega kamnoloma z barvanjem karbonatov in slikamnjem z vrstičnim

- elektronskim mikroskopom v okviru študije korozije na otoku Vis, Hrvaška. *Acta carsologica*, 42/1, 135–142.
- KUNAVER, J., 1983: Geomorfološki razvoj Kaninskega pogorja s posebnim ozirom na glaciokraške pojave. *Geografski zbornik*, 22 (1982), 196 – 341, Ljubljana.
- LAPTEV, F. F., 1939: Aggressive action of water on carbonate rocks, gypsum, and concrete. Moscow – Leningrad, GONTI, v.1, 120 pp, Moskva.
- LAURITZEN, S.-E. & LUNDBERG, Y., 2000: Solutional and Erosional Morphology. V: *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, uredniki: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 408 – 426, Huntsville.
- LAURITZEN, S.-E., 1990: Autogenic and allogenic denudation in carbonate karst by the multiple basin method: an example from Svartisen, North Norway. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 157 – 167, Chichester.
- LIMA-DE-FARIA, J., 1994: *Structural Mineralogy, An Introduction*. Solid Earth Sciences Library, Vol. 7, Kluwer Academic Publishers, 346 pp, Dordrecht etc..
- LIPPMANN, F., 1973: *Sedimentary Carbonate Minerals*. Springer-Verlag, 288 pp, Berlin, Heidelberg, New York.
- LOWE, D. J. & WALTHAM, T. 1995: *A Dictionary of Karst and Caves*. BCRA Cave Studies Series, No. 6, 40 pp, London.
- LOWE, D. J. & GUNN, J., 1997: Carbonate speleogenesis: An inception horizon hypothesis. *Acta carsologica*, 26/2, 457 – 481, Ljubljana.
- MAIRE, R., 1980: Les fondements de la karstologie physique. *Spelunca, Spécial N^o3*, 56, s.l..
- MANCA, P., 1998: Aspetti geomorfologici e geodrologici dell'Abisso "Led Zeppelin" (Gruppo del Monte Canin, Alpi Giulie occidentali). *Ipogea, Rivista di Carsismo e Speleologia*, Vol.2 (1997), 129 – 139, Trieste.
- MANOJLOVIĆ, P., 1992: Hemijska korozija kao geomorfološki proces – teorijski, analitički i metodološki aspekt. *Prirod. Matem.Fak. Geogr.Fak.*, 112 pp, Beograd.
- MARIĆ, L., 1964: Terra rossa u karstu Jugoslavije. *Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti*, 58 pp, Zagreb.
- MIHEVC, A. & GAMS, I., 1979: Nova odkritja v Veliki ledenici v Paradani (kat.št.742). *Naše jame*, 20, 7 – 20, Ljubljana.
- MIHEVC, A. & ZUPAN HAJNA, N., 1996: Clastic sediments from dolines and caves found during the construction of the motorway near Divača, on the Classical Karst. *Acta carsologica*, 25, 170-191.
- MIHEVC, A., 1991a: Morfološke značilnosti ponornega kontaktnega krasa, izbrani primeri s slovenskega krasa. 206 pp, Postojna. (Magistrsko delo, Knjižnica IZRK ZRC SAZU).
- MIHEVC, A., 1991b: Ravni stropi, inicialni in stropni kanali ter stropne anastomoze na primerih jam Piskovica in Brlog na Rimskem. *Naše jame*, 33, 19 – 27, Ljubljana.
- MIHEVC, A., 1993: Micrometric Measurements of the Corrosion Rate on the Cave Wall Inscription in the Swalet Cave in Odolina (Slovenia). *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 29(1992), 93 – 96, Liège.
- MIHEVC, A., 1994: Morfološke značilnosti Matarskega podolja. *Annales* 4, 163 – 168, Koper.
- MIHEVC, A., 1995: The Morphology of shafts on the Trnovski gozd plateau in west Slovenia. *Transactions of the British Cave Research Association, Cave and Karst Science*, Vol.21, No.2, 67 – 69.
- MIHEVC, A., 1996a, Some preliminary results of micrometric measurements in Škocjanske caves, Slovenia. *Kras i speleologia*, 17, 66 – 71, Katowice.

- MIHEVC, A., 1996b: Nenavadni poljšji sledovi iz nekaterih jam na Notranjskem in Primorskem. *Naše jame*, 38, 92 – 100, Ljubljana.
- MIHEVC, A., 1996c: Brezstropa jama pri Povirju. *Naše jame*, 38, 65 – 75, Ljubljana.
- MIHEVC, A., 1998: Izvor in pomen kamenja pod vhodnim breznom Jame na Prevali II. *Naše jame*, 40, 111 – 117, Ljubljana.
- MIHEVC, A., 1999: Speleogeneza matičnega krasa. 150 pp, Postojna. (Doktorat, Knjižnica IZRK ZRC SAZU).
- MIHEVC, A., 2001: Speleogeneza Divaškega krasa. Zbirka ZRC, 27, 180 pp., Ljubljana.
- MIHEVC, A., 2007: The age of Karst relief in west Slovenia. *Acta carsologica*, 36/1, 35 – 44.
- MIHEVC, A., 2009: Cryoturbation of the sediments at the cave entrances : case studies from Skednena jama, Potočka zijalka and Bestažovca Cave. V: STEGUWEIT, Leif (ur.). Hugo Obermaier Society for Quaternary Research and Archaeology of the Stone Age, 51st Annual Meeting in Ljubljana, 14th-18th of April, 2009. [Erlangen]: Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 2.
- MIHEVC, A., 2012: The influence of the ice caves on climate of carst depressions - case of low altitude permafrost at Smrekova draga, Trnovski gozd, Slovenia. V: TURRI, Stefano (ur.). Volume of abstracts. Milano: Università degli studi di Milano, 32-33.
- MOREL, S., 1989: Rekordna jugoslovanska globina. *Planinski vestnik*, 89, 430 – 433, Ljubljana.
- MORRIS, P. H. & WILLIAMS, D. J., 1999: A worldwide Correlation for Exponential Bed Particle Size Variation in Subaerial Aqueous Flows. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24 / No 9., 835 – 847, Chichester etc..
- MORSE, J. W., MACKENZIE, F. T., 1990: Geochemistry of Sedimentary Carbonates. *Developments in Sedimentology* 48, Elsevier, 707 pp, Amsterdam etc..
- MULEC, J., ZALAR, P., ZUPAN HAJNA, N. & RUPNIK, M., 2002: Screening for culturable microorganisms from cave environments (Slovenia). *Acta carsologica*, 31/2, 177 – 187.
- NAGODE, M., 1993: Ogljed jame do globine 1000 m. Dopolnilni zapisnik v Katastru jam JZS in IZRK pod kat. št. 6040.
- NEWSON, M. D., 1971a: The Role of Abrasion in Cavern Development. *Trans. Cave Research Group of Great Britain*. Vol.13, No.2., 101 – 107, s.l..
- NEWSON, M. D., 1971b: A model of subterranean limestone erosion in the British Isles based on hydrology. *s.n.m.*, 55 – 65, s.l..
- NEWSON, M. D., 1972: Merits of a hydrogeological bias to karst erosion studies. *Trans. Cave Research Group of Great Britain*. Vol.14, No.2., 118 – 124, s.l..
- NORTHUP, D.E., REYSENBACH, A-L., 1997: Microorganisms and Speleothems. In Hill, C. & Forti, P., *Cave Minerals of the World*. Second edition. National Speleological Society, Inc., 261 – 266, Huntsville.
- NOVAK, D. & ROGELJ, J., 1993: Hidrogeološke raziskave zaledja izvira Šumetac ob Kolpi. *Geologija*, 35 (1992), 319 – 328, Ljubljana.
- OGORELEC, B. & ROTHE, P., 1993: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalks und Hauptdolomits in Sud-West-Slowenien. *Geologija*, 35 (1992), 81 – 181, Ljubljana.
- OLLIER, C. D., 1984: *Weathering. Geomorphology texts*. Longman, 270 pp, London, New York.

- PALMER, A. N., 1981: Geology of Wind Cave. Wind Cave National Park, South Dakota: Hot Springs, South Dakota. Wind Cave Natl. Hist. Assoc., 44 pp.
- PALMER, A. N., 1982: Geomorphic interpretation of karst features. Ground water as a Geomorphic Agent. 173 – 209, R. G. La Fleur.
- PALMER, A. N., 1991: Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of American Bulletin, 103, 1 – 21, s.l..
- PALMER, A. N., 1995: Geochemical Models for the Origin of Macroscopic Solution Porosity in Carbonate Rocks. V: Unconformities and Porosity in Carbonate Strata, uredniki: Budd, D.A., Saller, A.H. & Harris, P.M.. The American Association of Petroleum Geologist, 77 - 101, Tulsa.
- PALMER, A. N., 2007: Cave Geology. Cave Books, Dayton, OH., pp 454.
- PALMER, A. N., 2011: Distinction between epigenic and hypogenic maze caves. Geomorphology (Amst.), 134/1–2, 9 – 22.
- PALMER, M. V. & PALMER, A. N., 2012: Petrographic and isotopic evidence for late-stage processes in sulfuric acid caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico, USA. International Journal of Speleology, 41, 231 – 250.
- PANAHI, A., YOUNG, G. M. & RAINBIRD, R. H., 2000: Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Quebec, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 64, No. 13, 2199 – 2220, New York.
- PAVUZA, R., 1993: Observation on the corrosion potential in alpine caves. Bulletin de la Société géographique de Liège, 29, 67 – 71, Liège.
- PERRY, C.T., 1998: Grain susceptibility to the effects of microboring: implications for the preservation of skeletal carbonates. Sedimentology, 45, 39 – 51, s.l..
- PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E. & SIEVER, R., 1972: Sand and Sandstone. Springer-Verlag, 618 pp, Berlin etc..
- PEZDIČ, J., 1999: Izotopi in geokemijski procesi. Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geologijo. 269 pp, Ljubljana.
- PEZDIČ, J., ŠUŠTERŠIČ, F. & MIŠIČ, M., 1998: On the role of clay-carbonate reactions in speleo-inception; A contribution to the understanding of the earliest stage of karst channel formation. Acta carsologica 27/1, 187 – 200, Ljubljana.
- PICKNET, R. G., 1972: The pH of calcite solutions with and without magnesium carbonate present, and the implications concerning rejuvenated aggressiveness. Trans. Cave Research Group of Great Britain, Karst Denudation, Vol.14, No2, 141 – 150, s.l..
- PICKNET, R. G., 1977: Rejuvenation of aggressiveness in calcium carbonate solutions by means of magnesium carbonate. Proceedings of the 7th International Speleological Congress Sheffield, England, September, 1977. 346 – 348, s.l..
- PINGITORE, N. E. JR., FRETZDORFF, S. B., SEITZ, B. P., ESTRADA, L. Y., BORREGO, P. M., CRAFT, G. M., LOVE, K. M., 1993: Dissolution kinetics of CaCO₃ in common laboratory solvents. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 63, No.4, SEP, 641 – 645, s.l..
- PLACER, L. & ČAR, J., 1974: Problem podzemeljske razvodnice Trnovskega gozda, Križne gore in Črnovrške planote. Acta carsologica, 6, 81 – 93, Ljubljana.
- PLENIČAR, M., POLŠAK, A. & ŠIKIČ, D., 1969: Osnovna geološka karta SFRJ, list Trst, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod, Beograd.

- PLUMMER, N. L. & WIGLEY, T. M. L., 1976: The dissolution of calcite in CO₂ saturated solutions at 25⁰C and 1 atmosphere total pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 191 – 202, New York.
- PLUMMER, L., WIGLEY, T. & PARKHURST, D., 1978: The dissolution of calcite in CO₂-water systems at 50C to 600C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *American Journal of Science*, 278, 179 – 216, s.l.
- PLUMMER, N. L. & BUSENBERG, E., 1982: The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂ - H₂O solutions between 0 and 90⁰C, and an evolution of the aqueous model for the system CaCO₃ - CO₂ - H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 1011 – 1040, New York.
- PRELOVŠEK, M., 2012: The dynamics of the present-day speleogenetic processes in the stream caves of Slovenia, (*Carsologica*, 15). Ljubljana: Založba ZRC, 152 pp.
- PROVENCIO, P. & POLYAK, V.J., 2001: Iron oxide-rich filaments: Possible fossil bacteria in Lechuguilla Cave, New Mexico. *Geomicrobiology Journal*, Vol. 18, Issue 3897, 297 – 309.
- PURSER, B.H., TUCKER, M.E. & ZENGER, D.H. (uredniki), 1994: Dolomites. A Volume in Honour of Dolomieu. IAS Special Publication, Part 21, Blackwell Science Ltd., 464 pp, Oxford.
- RAUCH, H. W. & WHITE, W. B., 1970: Lithologic Controls on the Development of Solution Porosity in Carbonate Aquifers. *Water Resources Research*, 6 (4), 1175 – 1192, Pennsylvania.
- REDDY, M. M. & PLUMMER, N. L. & BUSENBERG, E., 1981: Crystal growth of calcite from calcium bicarbonate solutions at constant pCO₂ and 25⁰C, a test of a calcite dissolution model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 1281 – 1289, New York.
- RENAULT, P., 1968a: Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse: les actions mécaniques à l'échelle du massif. *Annales de Spéléologie*, Centre National de la Recherche Scientifique, 22, 209 – 267, Paris.
- RENAULT, P., 1968b: Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse (Troisième partie). *Annales de Spéléologie*, Centre National de la Recherche Scientifique, 23, 3, 530 - 596, Moulis.
- SAVIC, D. & DOZET, S., 1984: Osnovna geološka karta SFRJ, list Delnice, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- SCHOLLE, P.A., BEBOUT, D. G. & MOORE, C. H., (edit.) 1983: Carbonate depositional environments. The American Association of Petroleum Geologist, 708 pp, Tulsa.
- SHERMAN, L. A. & BARAK, P., 2000: Solubility and Dissolution Kinetics of Dolomite in Ca–Mg–HCO₃/CO₃ Solutions at 25⁰C and 0.1 MPa Carbon Dioxide. *Soil Science Society of America Journal*, 64/6, 1959-1968.
- SHOPOV, Y. Y. & GEORGIEV, L. N., 1989: Quantitative theory of the solubility of the carbonate rocks in dependence of the physico-chemical and climatic conditions. *Expedition Annual of the University of Sofia "Kliment Ohridsky"*, 5A, 9 - 16, Sofia.
- SJOBERG, L. E. & RICKARD, D. T., 1984: Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62⁰C at pH 2,7 to 8,4 in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 485 – 493, New York.
- SKABERNE, D., 1980: Predlog klasifikacije in nomenklature klastičnih sedimentnih kamnin. 1.del, Predlog granulometrijske klasifikacije in nomenklature. *Rudarsko metalurški zbornik*, 27, 1, 21 – 46, Ljubljana.

- SKOBE, S. & MIRTIC, B., 2005: Vpliv mineralne sestave in structure na obstojnost apnencev kot naravnega kamna. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 52/4, 697 – 709.
- SLABE, T. & PRELOVŠEK, M., 2013: Rock features and morphogenesis in epigenic caves. V: Shroder, J. F. (ur.). *Treatise on geomorphology*. 1st ed. San Diego: Academic Press: Elsevier, vol. 6, 172 – 185.
- SLABE, T., 1988: Kondenzna korozija na skalnem obodu Komarjevega rova v Dimnicah. *Acta carsologica*, 17, 79 – 92, Ljubljana.
- SLABE, T., 1992: Jamski skalni relief kot odsev speleogenetskih dogajanj v izbranih predelih slovenskega krasa. 243 pp, Postojna. (Doktorat, Knjižnica IZRK ZRC SAZU).
- SLABE, T., 1995: Cave Rocky Relief. Zbirka ZRC SAZU, 10, 128 pp, Ljubljana.
- SLABE, T., 1999: Subcutaneous rock forms. *Acta carsologica*, 28/2, 255 – 271, Ljubljana.
- SMITH, D. I., GREENWAY, M. A., MOSES, C. & SPATE, A. P., 1995: Limestone weathering in Eastern Australia. Part 1: Erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 451 – 463, Chichester.
- STERFLINGER, K. & KRUMBEIN, W. E., 1997: Dematiaceous Fungi as a Major Agent for Biopitting on Mediterranean Marbles and Limestones. *Geomicrobiology Journal*, 14, 219 – 230, London etc..
- SULU-GAMBARI, F., 2011: Bacterially-induced dissolution of calcite: the role of bacteria in limestone weathering. Department of Earth & Planetary Science, McGillm, Master Thesis, 96 pp.
- SUMMERFIELD, M. A., 1991: *Global geomorphology, an introduction to the study of landforms*. John Wiley & Sons, 537 pp, New York.
- SUNDBERG, Å., 1956: The river Klarälven; A study of fluvial processes. *Geograf. Ann.*, 38, 125-316.
- SVENSSON, U. & DREYBRODT, W., 1992: Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO₂-water systems approaching calcite equilibrium. *Chemical Geology*, 90, 129 – 145, Amsterdam.
- SWEETING, M. M., 1968: Some Variations in the Types of limestones and their relation to cave Formation. *Proceedings of the 4th International Congress of Speleology*, 3, 227 – 232, Ljubljana.
- SWEETING, M. M., 1972: *Karst Landforms*. Macmillan, 362 pp, London.
- ŠEBELA, S., 1997: Development of cave passages according to geological structure; Example from Jama pod Pečno rebrijo, Slovenia. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*, 2, 113 – 116, La Chaux-de-Fonds.
- ŠEBELA, S., 1998: Tektonska zgradba sistema Postojnskih jam. Založba ZRC SAZU, 18, 112 pp, Ljubljana.
- ŠIKIĆ, D., PLENIČAR, M. & ŠPARICA, M., 1972: Osnovna geološka karta SFRJ, list Ilirska Bistrica, 1 : 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd.
- ŠUŠTERŠIČ, F. & MIŠIČ, M., 1996: Some minerals from Najdena jama. *Acta carsologica* 25, 291 – 305, Ljubljana.
- ŠUŠTERŠIČ, F., 1991: S čim naj se ukvarja speleologija. *Naše jame*, 33, 73 – 85, Ljubljana.
- ŠUŠTERŠIČ, F., 1999a: Vertical zonation of the speleogenetic space. *Acta carsologica*, 28/2, 187 – 201, Ljubljana.
- ŠUŠTERŠIČ, F., 1999b: Svidretova pečina. *Naše jame*, 41, 22 -40, Ljubljana.
- TARHULE-LIPS, R. F. A. & FORD, D. C., 1998: Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and Isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies*, 60, 84 – 95.

- THRAILKILL, J., 1968: Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves. Geol. Soc. Am. Bull., 79, 19 – 46, Alexandria, Virginia.
- TIŠLJAR, J., 1976: Ranodijagenetska i kasnodijagenetska dolomitizacija i dedolomitizacija u krednim karbonatnim sedimentima zapadne i južne Istre (Hrvatska, Jugoslavija). Geološki vjesnik, 29, 287 – 321, Zagreb.
- TRUDGILL, S. T., 1985: Limestone Geomorphology. Longman, 196 pp, London in New York.
- TRUDGILL, S. T. (urednik), 1986: Solute Processes. Landscape Systems, A series in Geomorphology, John Wiley & Sons, 512 pp, Chichester etc..
- TRUDGILL, S. T. & VILES, H. A., 1998: Field and laboratory approaches to limestone weathering. Quarterly journal of Engineering Geology, 31, 333 – 341, Oxford.
- TUCKER, M. E., WRIGHT, V. P., 1990: Carbonate Sedimentology. Blackwell Scientific Publications, XIII + 482 pp, Oxford etc..
- VALVASOR, J. W., 1689: Die Ehre des Hertzogthums Crain. III. Buch. Laibach.
- VERGARI, A. & QUINIF, Y., 1997: Les paleokarst du Hainaut. Geodinamica Acta, 10-4, 175 – 187, Paris.
- VERGARI, A., 1998: Nouveau regard sur la spéléogénèse: le “pseudo-endokarst” du Tournaisis (Hainaut, Belgique). Karstologia n^o31, 12 – 18, s.l..
- VILES, H., 1987: A quantitative scanning electron microscope study of evidence for lichen weathering of limestone, Mendip Hills, Somerset. Earth surface processes and landforms, 12, 467 – 473, s.l..
- WHITE, E. L. & WHITE, W. B., 1969: Processes of cavern breakdown. Bulletin of the national speleological society, 31/6, 83 – 96, Huntsville.
- WHITE, E. L. & WHITE, W. B., 1997: Mechanics of cave breakdown: relative importance of shear strength and fracture toughness. Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, 2, str. 155, La Chaux-de-Fonds.
- WHITE, E. L. & WHITE, W. B., 2000: Breakdown Morphology. V Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, urednici: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., National Speleological Society, 427 – 429, Huntsville.
- WHITE, I. D., MOTTERSHEAD, D. N. & HARRISON, S. J., 1994: Environmental Systems. An introductory text. Chapman & Hall, Second Edition, 616 pp, London etc..
- WILLIAMS, P. W. & DOWLING, R. K., 1979: Solution of marble in the karst of the Pikikiruna Range, northwest Nelson, New Zeland. Earth Surface Processes, 4, 15 – 36, Chichester etc..
- WILSON, J. L., 1975: Carbonate Facies in Geological History. Springer-Verlag, 471 pp, Berlin.
- WOLF, K. H. & CHILINGARIAN, G.V. (Uredniki), 1994: Diagenesis, IV. Developments in Sedimentology 51. Elsevier, 529 pp, Amsterdam, London, New York, Tokyo.
- WORTHINGTON, S. R. H., 1991: Karst Hydrogeology of Canadian Rocky Mountains. XVII+ 227 pp, Hamilton. (Doktorat, McMaster University Hamilton).
- XU, M., SULLIVAN, K., VANNESS, G., KNAUSS, K. G. & HIGGINS, S. R., 2013: Dissolution kinetics and mechanisms at dolomite-water interfaces: effects of electrolyte specific ionic strength. Environmental Science & Technology, 47/1, 110 – 118.
- YEE, N., FEIN, J. B. & DAUGHNEY, C. J., 2000: Experimental study of the pH, ionic strength, and reversibility behavior of bacteria-mineral adsorption. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64, No.4, 609 – 617, New York.

- ZOGOVIĆ, D., 1966: Hidrogeološka uloga dolomitita u dinarskom karstu. Vesnik, Inženjerska geologija i hidrogeologija, ser. B, knj. 6, 5 – 112, Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Beograd.
- ZUPAN, N. & MIHEVC, A., 1988: Izvor in mineraloška analiza sedimentov v Veliki ledenici v Paradani. Speleobih, 10. kongres speleologa Jugoslavije, 17 – 24, Sarajevo.
- ZUPAN, N., 1990: Izvor in mineralna sestava jamskih peskov in ilovic. 102 pp, Postojna. (Magistrsko delo, Knjižnica NTF, Oddelek za geologijo).
- ZUPAN HAJNA, N., 1995: Primerjava mineralne sestave mehanskih jamskih sedimentov iz Škocjanskih jam, Labodnice, Prevale II in Mejam. Annales 7/95, Anali za istrske in mediteranske študije, series historia naturalis, 2, 117 – 120, Koper.
- ZUPAN HAJNA, N., 1997a: Mineral composition of clastic material in fault zones and open fissures in karst rocks, examples from SW Slovenia. Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, 2, 33 – 36, La Chaux-de-Fonds.
- ZUPAN HAJNA, N., 1997b: Karst depressions with precipiced walls on the southern slope of Snežnik Mountain, Slovenia. Acta carsologica, 26/2, 397 – 407, Ljubljana.
- ZUPAN HAJNA, N., 1998a: Mineral composition of clastic cave sediments and determination of their origin. Kras i speleologia, T. 9 (XVIII), 169 – 178, Katowice.
- ZUPAN HAJNA, N., 1998b: Clastic sediments from karst of Southeast Yunnan and Northwest Guizhou. V: South China Karst I, Založba ZRC, 213 – 223, Ljubljana.
- ZUPAN HAJNA, N., 2001: Weathering of cave walls in Martinska Jama, SW Slovenia. V: Speleology in the third millenium: sustainable development of karst environments : proceedings. Brasilia: [s. n.], el. optični disk (CD ROM).
- ZUPAN HAJNA, N., 2002: Chemical weathering of limestones and dolomites in a cave environment. V: GABROVŠEK, Franci (ur.). Evolution of karst: from prekarst to cessation, (Carsologica, [1]). Postojna: Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU; Ljubljana: Založba ZRC, 347 – 356.
- ZUPAN HAJNA, N., 2002: Origin of fine-grained carbonate clasts in cave sediments = Izvor drobnozrnatih karbonatnih klastov v jamskih sedimentih. Acta carsoogica, 31/2, 115 – 137.
- ZUPAN HAJNA, N., 2003a: Incomplete solution: weathering of cave walls and the production, transport and deposition of carbonate fines. Založba ZRC, pp 167.
- ZUPAN HAJNA, N., 2003b: Relation between autochthonous chemical and mechanical erosion during karst caves development. V: Le karst de la craie en Normandie, Colloque et excursions, 10-11-12 Septembre 2003. Rouen: [Université], 32.
- ZUPAN HAJNA, N., 2003c: Chemical weathering of limestones and dolomites. Speleogenes. evol. karst aquifers (Online), 1/3, 1– 6; <http://www.speleogenesis.info/archive/publication>.
- ZUPAN HAJNA, N., 2005: Weathering of cave walls in Krempljak, SW Slovenia. Kras Speleol., 11(20), 203 – 210.

10. PRILOGA

V prilogi so rentgenogrami posneti z metodo rentgenske difrakcije; odboji so označeni s simboli mineralov katerim pripadajo.

LEGENDA:

Minerali

- Ca – kalcit
- D – dolomit
- K - kremen
- IL/Mu – minerali illit/muskovitove skupine
- GM – ostali glineni minerali
- GL – glinenci

Jame iz katerih so analizirani vzorci:

- Čh – Jama Čehi II
- Čr – Črnelsko brezno
- Re – Renejevo brezno
- BJ – Pečina v Borštu
- Ma – Martinska jama
- Kr – Krempļjak
- Pr – Jama II na Prevali
- TJ – Turkova jama
- Rm – Remergrund II
- ŽD – Spodmol pri Ždrocli III
- LP – Velika ledena jama v Paradani

Oznaka ob vzorcu pomeni:

- a – sveža kamnina, b – načeta kamnina, c – preperela kamnina
- 0 - naplavina

