

# Geneza fenestralne strukture u karbonatnim sedimentnim stijenama

---

**Dedić, Sara**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:812406>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij geološkog inženjerstva

GENEZA FENESTRALNE STRUKTURE U KARBONATNIM  
SEDIMENTNIM STIJENAMA

Završni rad

Sara Dedić

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/151  
URBROJ: 251-70-14-21-2  
U Zagrebu, 9.9.2021.

**Sara Dedić, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/151, URBROJ: 251-70-14-21-1 od 29.4.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### GENEZA FENESTRALNE STRUKTURE U KARBONATNIM SEDIMENTIM STIJENAMA

Za voditeljicu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof. dr. sc. Dunja Aljinović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica:

(potpis)

Prof. dr. sc. Dunja Aljinović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko  
Ružičić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i  
studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## GENEZA FENESTRALNE STRUKTURE U KARBONATNIM SEDIMENTIM STIJENAMA

SARA DEDIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

U ovom radu je na osnovu literaturnih podataka opisana fenestralna struktura, njeni tipovi i podtipovi koji predstavljaju važne komponente mikrofacijesa koji ukazuju na uvjete taloženja, te obilježja poroznosti i propusnosti karbonatnih stijena. Mikropetrografski su analizirani uzorci iz zbirke Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine RGNf-a koji prikazuju fenestralnu strukturu. Tri uzorka s oznakama Sy-6a, Sy-16b, Sy31 su s istog profila, Brušane (Velebit), u kojem su prisutni mikrokristalasti ranodijagenetski dolomiti gornjopermske starosti. Jedan uzorak je primjer fenestralne građe s lokaliteta Idrija – ID-11F (granica perm-trijas, Slovenija) i jedan predstavlja kredni stromatolit iz Istre. Kao rezultat, uz pomoć literaturnih primjera određena je moguća geneza svakog uzorka stijene, a time i uvjeti taloženja. U uzorku Sy-16b i uzorku krednog stromatolita iz Istre uočena je laminoidna fenestralna struktura koja ukazuje na uvjete taloženja u intertajdalu. Unatoč laminoidnoj fenestralnoj strukturi u uzorku ID-11F, dominantno sferični oblik šupljina ukazuje na mogućnost izlučivanja evaporitnih minerala u zoni supratajdala. Dominantna stromataktis struktura u uzorku Sy-16b upućuje na taloženje u zoni subtajdala. U uzorku Sy-6a prisustvo algi i ostrakoda upućuje na taloženje u uvjetima mirnog, podplimnog okoliša. Iz analiziranih uzoraka dva su moguća taloženja uz prisustvo mikrobijalnih organizama, čime je prikazana veza postanka fenestralne strukture s prisutnošću mikroorganizama u karbonatnim stijenama.

Ključne riječi: fenestre, fenestralna struktura, *birdseyes*, stromataktis, geneza, okoliš taloženja

Završni rad sadrži: 29 stranica, 3 tablice, 17 slika, i 5 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Prof. dr. sc. Dunja Aljinović

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Dunja Aljinović

Izv. prof. dr. sc. Uroš Barudžija

Doc. dr. sc. Duje Smirčić

Datum obrane: 16. rujan 2021.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. FENESTRALNA STRUKTURA .....	2
2.1 Opis fenestralne strukture.....	2
2.2 SPECIFIČNI PODTIPOVI FENESTRALNE STRUKTURE .....	7
2.2.1 Struktura ptičjega oka ( <i>birdseyes</i> ).....	8
2.2.2 Stromataktis struktura ( <i>stromatactis</i> ) .....	11
2.3 „Zebra struktura“ stijene.....	14
2.3.1 Geneza „zebra strukture“ .....	15
2.3 Važnost fenestralne strukture, strukture ptičjega oka i stromatktis strukture pri interpretaciji.....	16
3. MIKROPETROGRAFSKA ANALIZA UZORAKA.....	17
4. ZAKLJUČAK.....	29
5. LITERATURA .....	30

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Mikroskopski prikaz laminoidnih fenestri.....	3
Slika 2.2. Mikroskopski prikaz nepravilnih fenestri.....	3
Slika 2.3. Makroskopski prikaz cjevastih fenestri .....	4
Slika 2.4. Laminoidna fenestralna struktura A tipa .....	5
Slika 2.5. Laminoidna fenestralna struktura LF B-I tipa .....	5
Slika 2.6. Fenestralna struktura LF B-II tipa.....	6
Slika 2.7. Struktura ptičjega oka u laminiranom dolomitnom madstonu.....	9
Slika 2.8. Otvorene pukotine sa značajkama bifurkacije koje sličje strukturi ptičjega oka .....	11
Slika 2.9. Stromataktis struktura u vapnencu .....	12
Slika 2.10. „Zebra struktura“ .....	15
Slika 3.1. Slijed naslaga Brušane Sy.....	18
Slika 3.2. Mikrofotografija uzorka s oznakom Sy-6a.....	20
Slika 3.3. Mikrofotografija uzorka s oznakom Sy-16b.....	22
Slika 3.4. Mikropetrografski izgled uzorka Sy-31.....	24
Slika 3.5. Mikrofotografija uzorka s oznakom Sy-31.....	24
Slika 3.6. Mikrofotografija uzorka s oznakom ID-11F.....	26
Slika 3.7. Mikrofotografija krednog stromatolita iz Istre .....	28

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Razlike između strukture ptičjega oka i stromataktis strukture .....	8
Tablica 2.2. Geneza strukture ptičjega oka .....	10
Tablica 2.3. Geneza stromataktis strukture .....	13

## 1. UVOD

Fenestralna struktura često je vidljiva u karbonatnim stijenama - vapnencima, dolomitičnim vapnencima, dolomitima i kalcitičnim dolomitima. Prepoznaje se po šupljinama koje su veće od međuzrnskih šupljina, a nazivaju se **fenestre**. Fenestre se razlikuju prema obliku, veličini, rasporedu, orijentaciji i ispuni. Različite fenestre predstavljaju različite tipove fenestralne strukture od kojih svaki nastaje na drugačiji način. Tipovi fenestralne strukture predstavljaju važne komponente mikrofacijesa koji ukazuju na uvjete taloženja, te obilježja poroznosti i propusnosti karbonatnih stijena.

Ovaj završni rad sadržava opis fenestralne strukture/građe, njenih tipova, specifičnih podtipova, kao i pretpostavljenu genezu koja se temelji na sastavu stijene i vrsti i sadržaju biote, ali i na strukturnim komponentama s naglaskom na fenestralnu građu. Uz opise su prikazani i interpretirani primjeri fenestralne strukture iz uzoraka karbonatnih sedimentata pohranjenih u zbirci Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine RGNF-a. Sami cilj rada je mikropetrografski promotriti osobine karbonatnih sedimentnih stijena koje sadrže fenestre, opisati ih i, na osnovi proučenih podataka i primjera iz literature, moguće zaključiti o genezi navedene strukture, te prikazati vezu njihova postanka s prisutnošću mikroorganizama u karbonatnim stijenama.



## 2. FENESTRALNA STRUKTURA

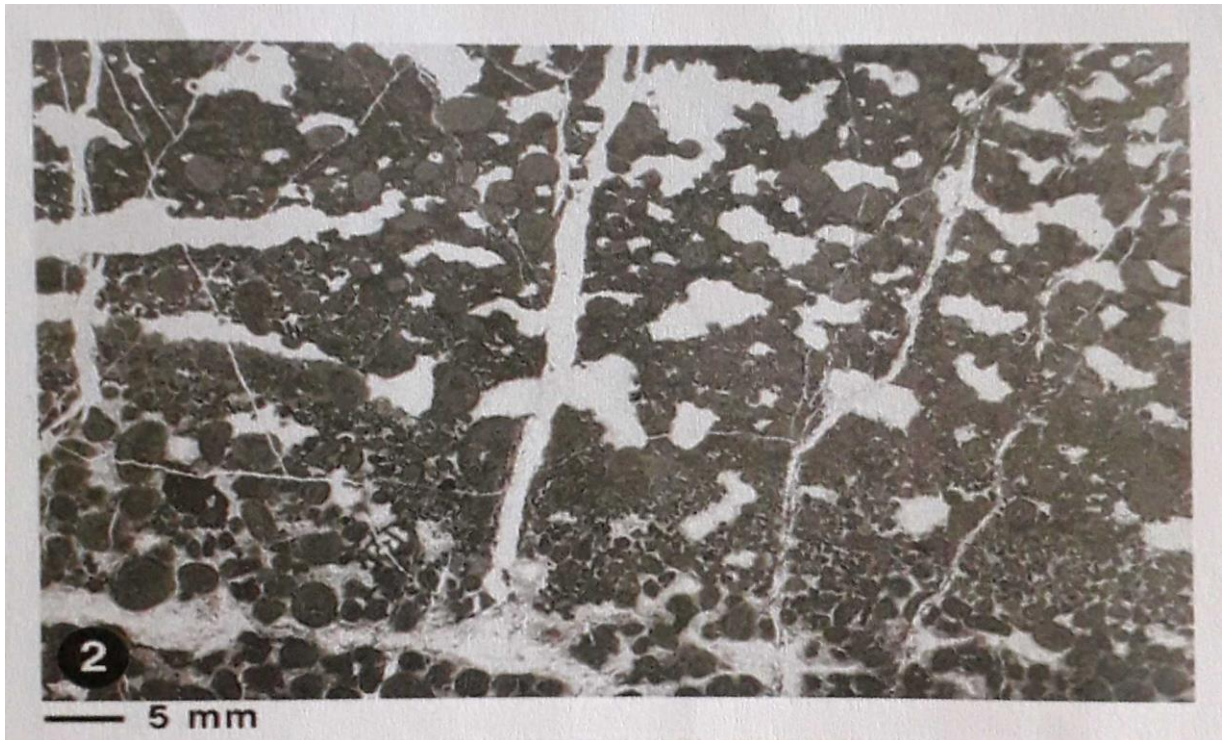
U karbonatne sedimente ubrajaju se stijene koje sadrže više od 50 volumnih postotaka karbonatnih minerala – kalcita ili dolomita, a to su vapnenci, dolomitični vapnenci, dolomiti i kalcitični dolomiti. U njima su često prisutne šupljine koje se najčešće nazivaju **fenestre ili fenestralne šupljine**. One nastaju različitim procesima koji su vezani ili za sam postanak stijene, sastav karbonatnog sedimenta ili njegovu dijagenezu. Za karbonatne stijene u kojima se vide fenestralne šupljine kaže se da imaju **fenestralnu građu** odnosno **fenestralnu strukturu**. Pod pojmom fenestralne strukture podrazumijevaju se dva specifična podtipa strukture: **struktura ptičjega oka** (*birdseyes*) i **stromataktis struktura** (*stromatactis*). Opisi fenestralne strukture, njenih tipova i podtipova, strukture ptičjega oka i stromataktis strukture, te njihova postanka i uvjeta u kojima su nastali preuzeti su iz Flügel (2004).

### 2.1 Opis fenestralne strukture

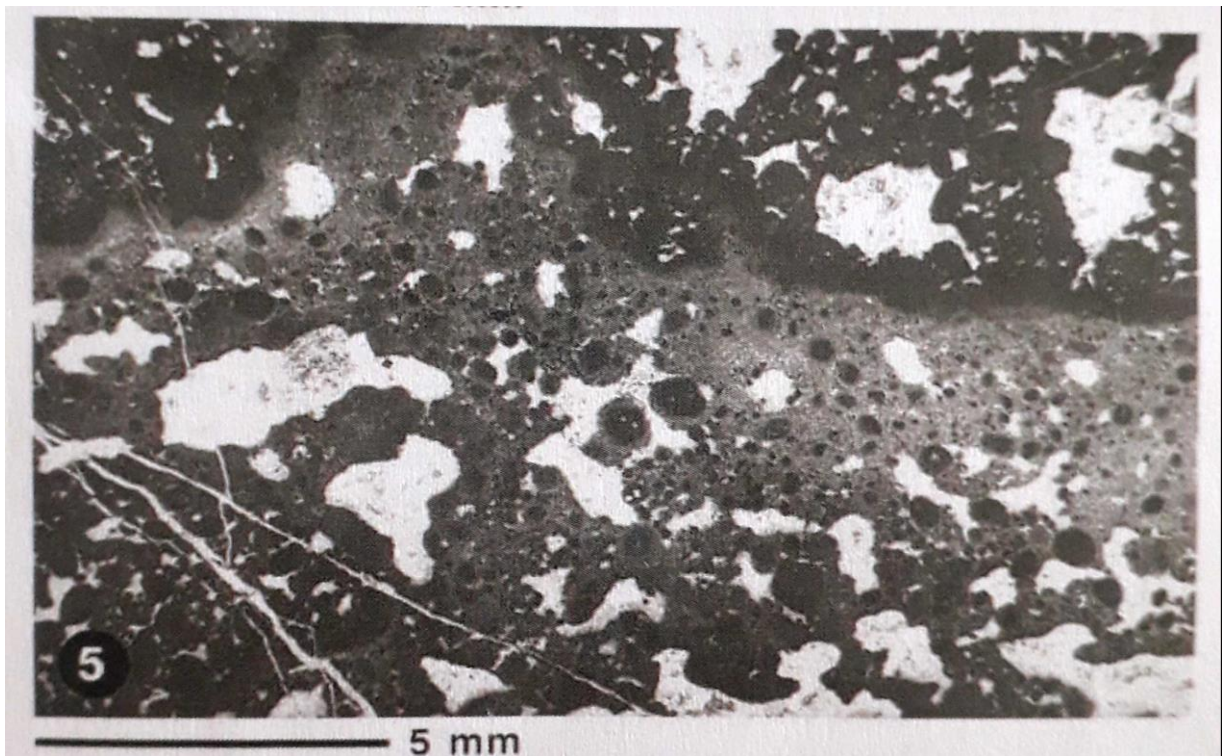
Glavna karakteristika fenestralne strukture jesu šupljine - fenestre, stoga se kod opisa strukture opisuje njihov oblik, veličina, orijentacija i raspored. Prema tim obilježjima razlikuje se nekoliko tipova fenestri koje predstavljaju različite tipove fenestralne strukture.

#### *Fenestre*

Fenestre su šupljine u stijeni, veće od intersticija (međuzrnskih šupljina) kod stijena zrnskog sastava. Podsjećaju na prozore koji se nalaze na tamnim zidovima otkuda i potječe njihov naziv, prema latinskoj riječi za prozor – *fenestra*. Veličine su od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Mogu biti prazne, te djelomično ili potpuno ispunjene unutarnjim sedimentom donesenim s površine, dijagenetskim unutarnjim sedimentom (kristalni silt) ili sparitnim cementom. Fenestre mogu biti raspoređene konkordantno stratifikaciji, ili nepravilno. Obzirom na oblik i orijentaciju razlikuju se četiri tipa fenestri i svaki tip predstavlja po jedan tip fenestralne strukture; **fenestralna struktura s laminoidnim fenestrama** (slika 2.1.), **fenestralna struktura s nepravilnim fenestrama** (slika 2.2.), **fenestralna struktura s cjevastim fenestrama** (slika 2.3.), te **fenestralna struktura sa sferičnim fenestrama**.



Slika 2.1. Mikroskopski prikaz laminoidnih fenestri, preuzeto iz Flügel (2004)



Slika 2.2. Mikroskopski prikaz nepravilnih fenestri, preuzeto iz Flügel (2004)

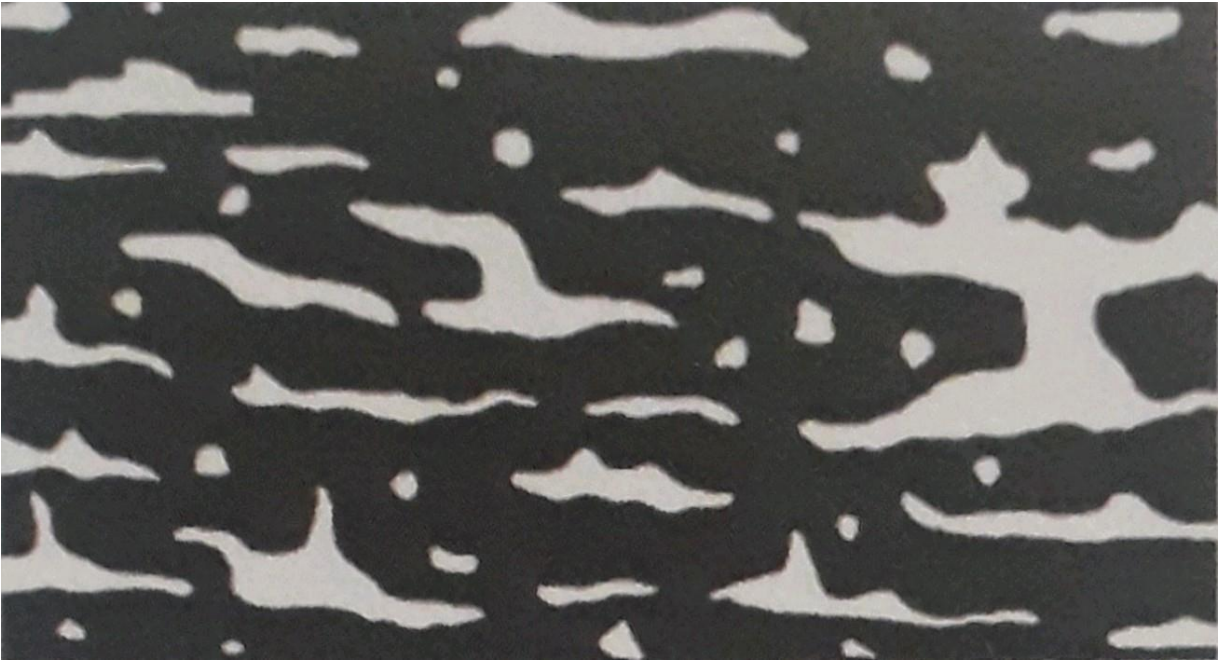


Slika 2.3. Makroskopski prikaz cjevastih fenestri, preuzeto iz USGS (2010)

### *Laminoidne fenestre*

Laminoidne fenestre karakteriziraju izdužene horizontalne šupljine. Često se pojavljuju u intertajdalnom i supratajdalnom vapnenačkom okolišu, no mogu biti prisutne i u drugim okolišima. Laminoidne fenestre obično nastaju uslijed a) vlaženja i sušenja karbonatnog mulja u području supratajdala, b) isušivanja površine cijanobakterijskih muljeva te njihovog stezanja, uvijanja i separacije od susjednog sedimenta i c) truljenja organske tvari uz nastanak plinova koji se kratko zadržavaju u sedimentu, a potom izlaze iz njega.

Obzirom na raspored i oblik laminoidnih fenestri razlikujemo LF-A tip tj. laminoidnu fenestralnu strukturu A tipa (slika 2.4.), koju karakteriziraju različite laminoidne fenestre, te LF-B, laminoidnu fenestralnu strukturu B tipa koju karakteriziraju nepravilne laminoidne fenestre. Tip B je podijeljen na LF B-I (slika 2.5.) i LF B-II (slika 2.6.), koji se razlikuju prema količini vapnenačkih zrna. LF B-I sadrži manju količinu vapnenačkih zrna, a šupljine se nalaze u mikritu, dok LF B-II sadrži više vapnenačkih zrna te se šupljine nalaze u zrnima



Slika 2.4. Laminoidna fenestralna struktura A tipa, LF-A, preuzeto iz Flügel (2004)



*Slika 2.5. Laminoidna fenestralna struktura LF B-I tipa, preuzeto iz Flügel (2004)*



Slika 2.6. Fenestralna struktura LF B-II tipa, preuzeto iz Flügel (2004)

### *Geneza fenestralne strukture*

Geneza fenestralne strukture ovisi o obliku fenestri. Različiti tipovi fenestri nastaju na različite načine. Oblik i orijentacija fenestri odražavaju njihovo porijeklo.

Laminoidne fenestre su poligenetskog porijekla, a nastaju na tri načina: vlaženjem te isušivanjem karbonatnog mulja u supratajdalnim uvjetima, isušivanjem površine cijanobakterijskih podloga zbog čega se ona nabora, ili izlaskom plina tijekom propadanja (truljenja) organske tvari. Pojavljuju se u recentnim intertajdalnim i supratajdalnim okolišima, ali također i u raznim podvodnim marinskim i nemarinskim okolišima.

Cjevaste fenestre nastaju u recentnim intertajdalnim i plitkim subtajdalnim okolišima kao jame ili rupe od korijenja biljaka. Drugi način nastanka je izlaskom mjehurića plina nastalih biogenim procesima u sedimentu.

Sferične fenestre nastaju od mjehurića plina ili zraka koji su zarobljeni tijekom taloženja sedimenta ili propadanjem organskog materijala nakon taloženja. Tzv. *keystone* šupljine su

karakterističan tip sferičnih milimetarskih do centimetarskih šupljina koje su veće od šupljina koje odgovaraju strukturi ptičjega oka, a nastaju zarobljavanjem mjehurića zraka tijekom taloženja u zoni zapljuskivanja (*swash zone*) na plažama.

Neppravilne fenestre nastaju isušivanjem, od zaostalih mjehurića plina, kao ispuna kalupa evapornitnih minerala, kopanjem organizama, zatrpavanjem cijanobakterijskih prevlaka, zamjenom zrna, ispiranjem karbonatnog mulja i deformacijom fenestri pravilnog oblika.

## 2.2 SPECIFIČNI PODTIPOVI FENESTRALNE STRUKTURE

Uz laminoidne, sferične, nepravilne i cjevaste fenestre, postoje i dva vrlo značajna tipa fenestri određenog oblika, veličine, ispunje, orijentacije i geometrije. One tvore dva podtipa fenestralne strukture: **strukturu ptičjega oka** (*birdseyes*) i **stromataktis struktura** (*stromatactis*).

Struktura ptičjega oka označava nepravilno raspoređene, milimetarske šupljine, nastale dominantno u supratajdalnim i intertajdalnim okolišima, dok stromataktis struktura označava veće šupljine, centimetarskih dimenzija, koje obično nastaju u subtajdalnim okolišima. Detaljni prikaz razlike podtipova fenestralne strukture nalazi se u tablici 2.1. (Flügel, 2004.)

Postoji i rijedak podtip fenestralne strukture koji se u literaturu spominje zasebno pod nazivom „zebra struktura“.

Tablica 2.1. Razlike između strukture ptičjega oka i stromataktis strukture, preuzeto iz Flügel (2004)

	Stromataktis struktura	Struktura ptičjega oka
Oblik	Ravna baza, prstolik i nazubljen vrh	Kružan, ovalan, nepravilan
Ispuna	Karbonatni mulj na dnu (često planaran/ravan) i/ili sparit u gornjem dijelu	Sparikalcit ili evaporitni minerali
Orijentacija	Subhorizontalna ili nepravilna	Nepravilna ili paralelna slojnoj plohi
Geometrija	Mreža koja se sastoji od međusobno povezanih ili izoliranih pojedinačnih šupljina	Pojedinačne, izolirane šupljine
Veličina	Nekoliko mm do desetke cm; Veće od šupljina ptičjega oka	Nekoliko mm

### 2.2.1 Struktura ptičjega oka (*birdseyes*)

Struktura ptičjega oka (*birdseyes*) odnosi se na poseban tip nepravilno raspoređenih milimetarskih šupljina u karbonatnim stijenama. Oblik šupljina je kuglast, s promjerom 1-3mm, ili planaran, s visinom 1-3mm, i širinom od nekoliko milimetara. Pojavljuju se kao pojedinačne šupljine, a ispunjene su sparikalcitom. Na Sunčevoj svjetlosti sparikalcit unutar šupljina svjetluca te podsjeća na ptičje oči, otkuda i potječe naziv strukture. Prikaz strukture ptičjega oka, s nepravilno raspoređenim kružnim i planarnim šupljinama, u laminiranom dolomitnom madstonu prikazan je slikom 2.7.

Termini koji su dijelom sinonimi vapnencima sa strukturom ptičjega oka i sadrže sparitom ispunjene šupljine su *dismikrit*, koji označava mikritni vapnenac s manje od 1% vapnenačkih zrna, ali sadrži mnogo šupljina u obliku ptičjega oka, te tzv. *loferit* (Flügel, 2004). Prema Tišljar (2001.) *loferit* je naziv za vapnenac ispresijecan porama koje su ispunjene sparitom, a nastale su uslijed stezanja. *Loferiti*, odnosno „loferski ciklusi“ označavaju cikluse oplićavanja naviše. Međutim, struktura ptičjega oka, kao i stromataktis struktura, odnose se više na određene oblike i geometriju šupljina, dok se termin *loferit* može koristiti za karbonatnu stijenu koja obiluje fenestrama različitog tipa, a nastala je u plitkom, peritajdalnom okolišu (Flügel, 2004).



Slika 2.7. Struktura ptičjega oka u laminiranom dolomitnom madstonu, preuzeto iz Flügel (2004)



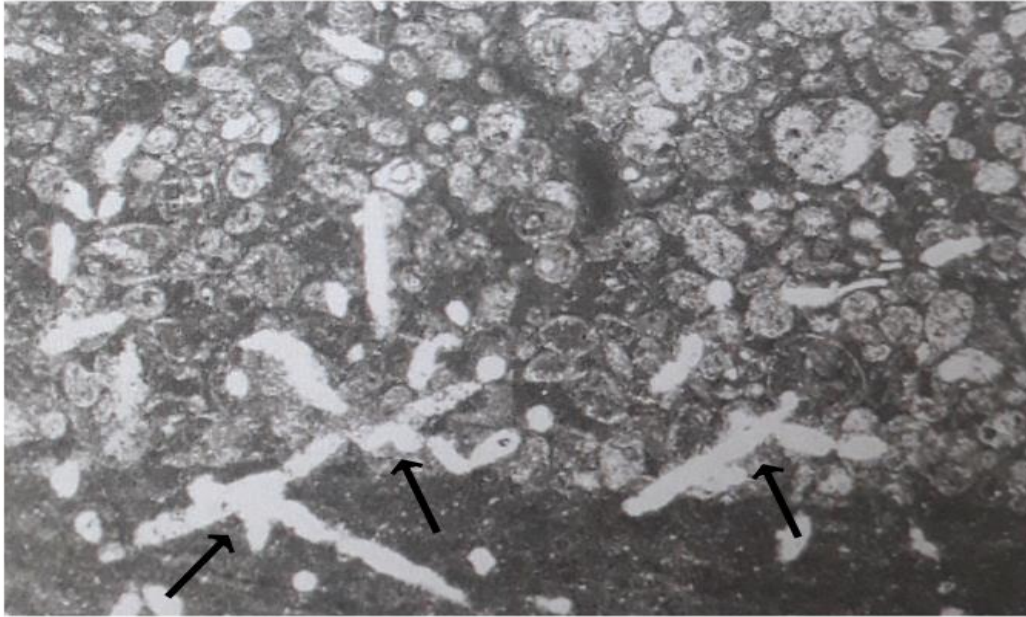
## *Geneza strukture ptičjega oka*

Struktura ptičjega oka pojavljuje se u karbonatnim stijenama od prekambrija pa do danas. Nastaje u supratajdalnim, ponekad i intertajdalnim okolišima, a često je povezana s algalnim i mikrobijalnim podlogama. Postoji devet modela kojima se objašnjava geneza strukture ptičjega oka, a prikazani su u tablici 2.2. Četiri modela označavaju nastanak strukture izravnim ili neizravnim organskim djelovanjem, a ostalih pet označava nastanak anorganskim putem. Kod modela a), b), e), i f) šupljine se nalaze u konkordantnom položaju u odnosu na ravninu stratifikacije, dok su kod ostalih modela šupljine nepravilno raspoređene.

Tablica 2.2. Geneza strukture ptičjega oka, preuzeto iz Flügel (2004)

<p>GENEZA STRUKTURE PTIČJEGA OKA</p> <p>Izravnim ili neizravnim organskim djelovanjem</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) sparitom ispunjen međuprostor unutar i između algalnih i mikrobijalnih taloga</li><li>b) šupljine koje imaju algalnu potporu i uvećane su povlačenjem plimne vode</li><li>c) šupljine nastale zakopavanjem organizama</li><li>d) mjehurići plina nastali propadanjem organskih tkiva organizama</li></ul> <p>Anorganskim putem</p> <ul style="list-style-type: none"><li>e) desikacijske pukotine nastale u plimnim zonama uslijed stezanja</li><li>f) inkluzije zraka nastale izlaganjem subaerskim uvjetima</li><li>g) otapanjem anhidritnih kristala</li><li>h) kasnodijagenetskom rekristalizacijom</li><li>i) različitim ponašanjem kapilarnog i nekapilarnog sedimenta</li></ul>
---

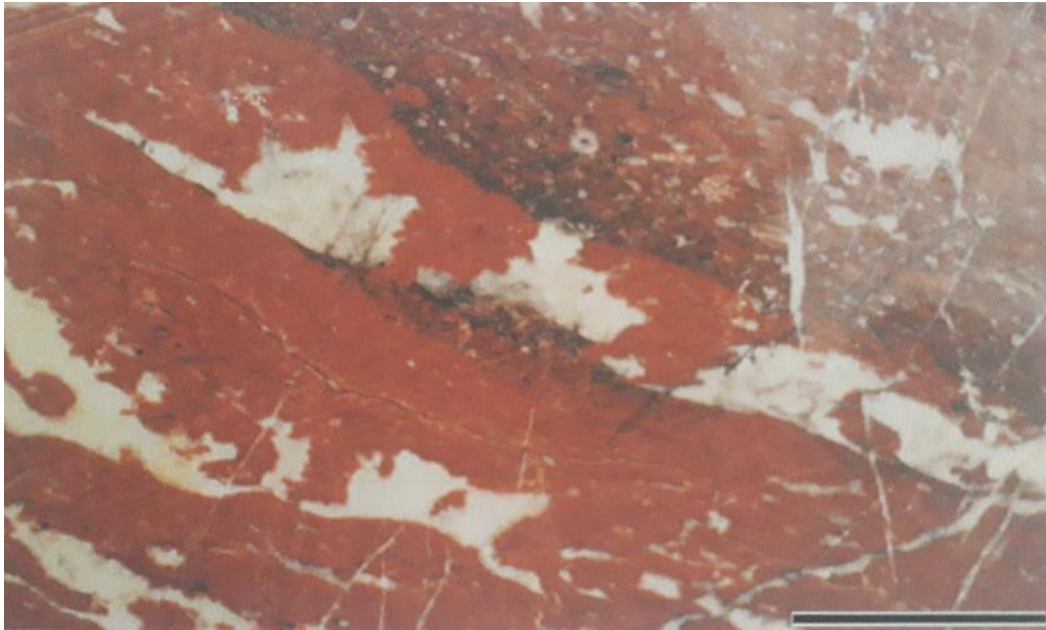
Termin strukture ptičjega oka često se pogrešno koristi i za slične pojave kao što su vertikalne do subvertikalne šupljine ispunjene kalcitom nastale od korijenja biljaka. Takve su šupljine karakterizirane bifurkacijom, a prikazane su na slici 2.8. Ovakve šupljine bi trebalo razlikovati od pravih šupljina sa strukturom ptičjega oka i nazivati ih pseudo-šupljinama ptičjega oka. Termin struktura ptičjega oka mora biti ograničen na milimetarske šupljine, kružnog oblika i sparitne ispune koje se koncentriraju u peritajdalnom okolišu.



Slika 2.8. Otvorene pukotine sa značajkama bifurkacije koje sličje strukturi ptičjega oka, ali to nisu, preuzeto iz Flügel (2004)

### 2.2.2 Stromataktis struktura (*stromatactis*)

Šupljine koje se prepoznaju kao stromataktis struktura (*stromatactis*) imaju ravan donji rub, te prstasti ili nazubljeni gornji rub šupljine (slika 2.9.). Uz donji rub se obično nalazi akumulirani sitnozrnasti mikrit koji ponekad sadrži mikrofosile, peloidalni mikrit ili laminirani mikrit s veličinom kristalića koji odgovaraju siltu (tzv. kristalni silt), dok ispuna ostatka šupljine do nepravilnog „stropa“ predstavlja cement prve generacije - vlaknasti kalcit, koji je praćen druznim sparitom. Stromataktis šupljine mogu biti pojedinačne, ili se pojavljuju kao mreža povezanih šupljina. Mreža sparitom ispunjenih stromataktis šupljina se može pružati i do nekoliko metara po slojnim ravninama. Također, šupljine mogu biti neravnomjerno raspodijeljene, ili se pojavljivati kao slojevi u izmjeni s proslojcima/laminama mikritnog vapnenca (Tucker, 2008). Stromataktis je prvi put opisan u gornjokrednim muljnim humcima u Belgiji, te protumačen kao pojava rekristaliziranih fosila. Nakon toga uslijedile su brojne rasprave, te postoji mnogo teorija o postanku ove strukture (Flügel, 2004). Prema Tuckeru (2008), prevladava mišljenje da nastaje kao posljedica truljenja mekog tkiva spužvi, ali vjerojatno se radi o kombinaciji više procesa.



Slika 2.9. Stromataktis struktura u vapnencu, mjerilo je 5cm, preuzeto iz Flügel (2004)

### *Geneza stromataktis strukture*

Porijeklo stromataktis strukture izazvalo je brojne rasprave i nagađanja, a problemi kod objašnjenja porijekla ove strukture su oblik šupljina, način na koji su formirane, te mehanizam ispunjevanja šupljina. Generalno, stromataktis struktura nastaje u subtajdalnim okolišima. Primarna je zadaća utvrditi je li stromataktis struktura produkt tafonomskih procesa, odnosno propadanja mekih tkiva organizama ili nastaje uslijed fizičkih i kemijskih procesa, kao što su otapanje, unutarnja erozija i ispiranje internog sedimenta (*winnowing*). U tablici 2.3. nalazi se popis svih 27 do danas razmotrenih mogućnosti nastanka stromataktis strukture, koje su uglavnom srodne. Međutim, danas su u razmatranju dva modela nastanka; model po kojem stromataktis struktura nastaje raspadanjem tkiva spužvi, te mikrobijalni model. Oba podrazumijevaju dominantno organsko porijeklo, a glavno pitanje je uloga spužvi naspram mikroba u formiranju sustava šupljina. Drugim riječima model spužvi naglašava ulogu spužvi u nastanku stromataktis strukture, dok mikrobijalni model naglašava ulogu mikroba. Model spužvi je osmišljen za stromataktis strukturu crvenih muljnih humaka (*mud mounds*), kambrijske do devonske starosti, nastalih u uvjetima dubljeg dijela šelfa. Utemeljen je na pojavi stromataktis šupljina zajedno s peloidalnim reliktima spužvi, te izobilju spikula spužvi u vapnencima sa stromataktis

strukturu. Kriteriji utvrđivanja mikrobijalnog porijekla stromataktis strukture su pojava strukture u prostranim slojevima koji se protežu do 100m<sup>2</sup>, pojava stromataktisa i kriptalgalne strukture usporedno, pojava nekadašnjih isprepletenih sustava šupljina, digitacija struktura prema vrhu, asocijacija s peloidalnom strukturu, te mali broj relikta strukture cijanobakterija.

Tablica 2.3. Geneza stromataktis strukture, preuzeto iz Flügel (2004)

**ORGANSKO PORIJEKLO:**

1. Rekristalizirani fosili
2. Mineralizirani, nefosilizirajući organizam
3. Šupljine formirane nakon propadanja različitih mekih tkiva organizama u sedimentu
4. Mreža bušotina organizama kao što je *Callianasa*
5. Utjecaj različitih organizama koji se ubušavaju
6. Neskeletne alge
7. Tromboliti, mikrobijalno porijeklo
8. Dijagenetski CaCO<sub>3</sub>, zamjena velikih mikrobijalnih tvorevina
9. Ispiranje sedimenta između mikrobijalne podloge na morskom dnu
10. Cementacija šupljina nastalih nakon propadanja mikrobijalnih podloga
11. Propadanje materijala unutar organskog tkiva mikrobijalnog porijekla
12. Parcijalna cementacija šupljina nastalih propadanjem nelitificiranog tkiva spužvi
13. Ranodijegenetska marinska cementacija sustava šupljina nastalih odstranjivanjem necementiranog materijala nastalog propadanjem tkiva spužvi ili mikrobijalnog taloga
14. Rekristalizirani briozoi
15. Očuvanje sedimenta uslijed briozojskih prevlaka (*shelting of bryozoan sheets*)
16. Djelatnost korijenja biljka

**ANORGANSKO PORIJEKLO:**

17. Primarne šupljine i/ili šupljine otapanja
18. Šupljine nastale gubitkom vode i kompakcijom tiksotropnog mulja
19. Šupljine nastale između slojeva rano cementirane kore na dnu mora; diferencijalna cementacija peloidalnog madstona u uzastopne, usko razmaknute tvrde kore (*hardgrounds*)
20. Puzanje i spužvanje djelomično cementiranog mulja niz obronke muljnih humaka (*mound flanks*)
21. Podpovršinska erozija cijanobakterijskih šupljina rasta na djelomično litificiranoj padini
22. Proširenje već postojećih šupljina u nekonsolidiranom bioklastičnom vapnenačkom mulju uzrokovano unutarnjom erozijom i preradom
23. Slom različito vezanog i litificiranog sedimenta uzrokovano epizodama potresa
24. Subaersko otapanje koje rezultira formiranjem šupljina naknadno ispunjenih karbonatnim siltom i sedimentom
25. Rekristalizirani manji dijelovi („zakrpe“) vapnenačkog mulja
26. Otapanje pod pritiskom povezano s metamorfizmom niskog stupnja
27. Stvaranje sustava šupljina hidrotermalnim izdizanjem

### *Paleookoliš stromataktis strukture*

Stromataktis struktura u devonu je česta u vapnencima *mudstone*-tipa te *wackestone*-tipa muljnih humaka nastalih u dubljim dijelovima šelfa, a pojavljuju se i u uvjetima plićeg šelfa. Stratigrafski mlađi tip je u asocijaciji sa spužvama i mikrobima, a stariji s trilobitima i brahiopodima. Humci iz paleozoika i donjeg mezozoika, te grebeni i padine platforme iz mezozoika označavaju uvjete subtajdala u kojima je opisana stromataktis struktura. Humci koji sadrže obilje stromataktis formi potječu iz nekoliko različitih okoliša mirnih voda: a) ispod osnovice valova, b) u blizini osnovice vala olujnoga vremena, c) između osnovice valova lijepa vremena i olujna vremena, te d) ispod osnovice valova olujnoga vremena. Općenito, stromataktis struktura najčešće nastaje ispod fotičke zone, gdje je velika količina vapnenačkih algi.

### **2.3 „Zebra struktura“ stijene**

U skupinu šupljina sličnih strukturi ptičjega oka ili stromataktis strukturi može se ubrojiti i tzv. „zebra struktura“. Ovaj tip strukture je karakterističan u peritajdalnim karbonatnim stijenama, najčešće iz ciklotemi loferita,. „Zebra struktura“ karbonatne stijene izgledom podsjeća na slojevitostromataktis strukturu. „Zebra struktura“ može biti mikroskopskih do decimetarskih, ili čak metarskih dimenzija. Sadrži cementnu ispunu ili ispunu koja je kombinacija cementa i unutarnjeg sedimenta. Izgled ove strukture, koja podsjeća na zebrine pruge, rezultat je ispreplitanja mikritnog vapnenca koji je crne boje, s kalcitnim laminama/slojevima bijele boje (slika 2.10.).



Slika 2.10. „Zebra struktura“,mjerilo je 1cm, preuzeto iz Flügel (2004)

### 2.3.1 Geneza „zebra strukture“

Nastanak „zebra strukture“ nije u potpunosti jasan. Postoji nekoliko razmotrenih načina nastanka: propadanje tiksotropnog karbonatnog gela, litificirana kora ispresijecana laminama/slojevima nastalim djelovanjem vjetra, cementom ispunjene šupljine, superpozicija mikrobijalnih podloga, ili dilatacija i deformacija mekog sedimenta s propadanjem. Neki autori smatraju da je „zebra struktura“ varijacija stromataktis strukture, ali ona se treba razmatrati kao zasebna struktura.

## **2.3 Važnost fenestralne strukture, strukture ptičjega oka i stromatktis strukture pri interpretaciji**

Šupljikave strukture odnosno fenestralna struktura se pri interpretaciji povezuje s uvjetima paleookoliša i relativnom razinom mora, dijagenezom i svojstvima rezervoarskih stijena:

### *Indikacija paleookoliša*

Struktura ptičjega oka i laminoidna fenestralna struktura nastaju u plitkomorskim supratajdalnim i intertajdalnim okolišima. Međutim, struktura ptičjega oka nije strogo vezana za marinske okoliše. Ona nastaje i u jezerskim karbonatnim stijenama, te eolijanitima u kojima se fenestre nastale olujama pojavljuju visoko iznad razine morske vode. Stromataktis struktura ukazuje na duboke subtajdalne okoliše, a može nastati i u intertajdalnim okolišima.

### *Dijageneza i rezervoarski potencijal*

Fenestralna poroznost je prisutna u suprtajdalnim madstonima i bajndstonima u kojima dominira mulj. Primarna fenestralna poroznost može biti visoka - do 65%. Propusnost također može biti visoka, osobito u vapnencima koji pokazuju strukturu ptičjega oka u kojima se dolomitizacijom povećava propusnost. Naime, dolomitizacija omogućuje povezivanje pora dolomitnog matriksa, i fenestralnih šupljina.

### *Industrijska primjena vapnenaca koji pokazuju fenestralnu strukturu*

Vapnenci iz devonskih grebena u Belgiji i Francuskoj koji pokazuju stromataktis strukturu se koriste kao dekorativni kamen za izradu umjetničkih djela.

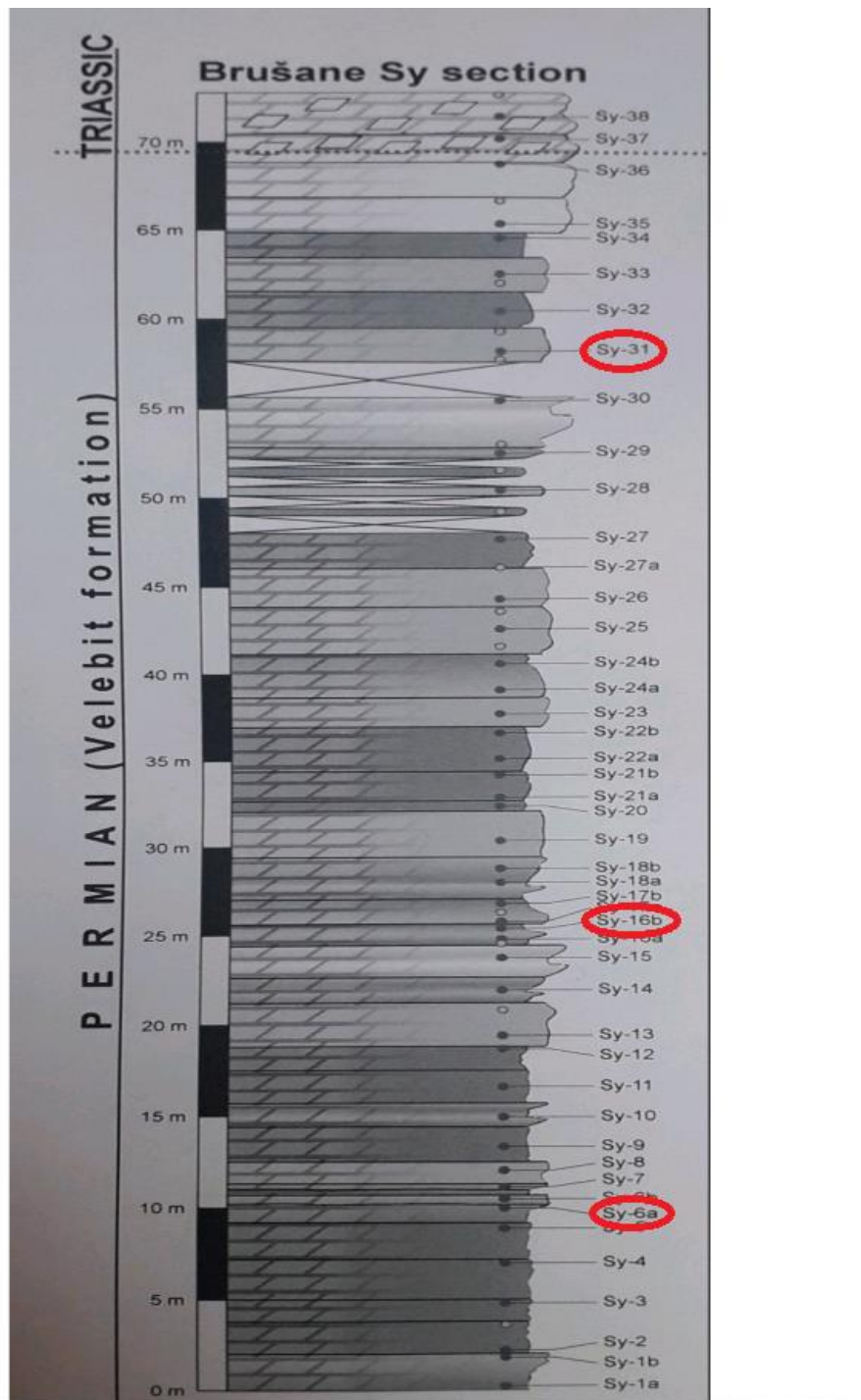
### **3. MIKROPETROGRAFSKA ANALIZA UZORAKA**

Mikropetrografski je analizirano pet uzoraka karbonatnih stijena s fenestralnom građom, koje su različite starosti. Od toga su tri s istog profila, (Brušane Sy na Velebitu; uzorci Sy-6a, Sy-16b i Sy-31), jedan uzorak je primjer fenestralne građe s lokaliteta Idrija – ID-11F (granica perm-trijas, Slovenija) i jedan predstavlja kredni stromatolit iz Istre.

#### *Profil Brušane Sy (Velebit)*

Slijed naslaga Brušane Sy debljine je 70m. U slijedu su prisutni mikrokristalasti ranodijagenetski dolomiti gornjopermske i donjotrijaske starosti. Slijed je prikazan slikom 3.1. te je vidljivo da je uzeto 40ak uzoraka od kojih su označena tri izabrana za ilustraciju fenestralne strukture.



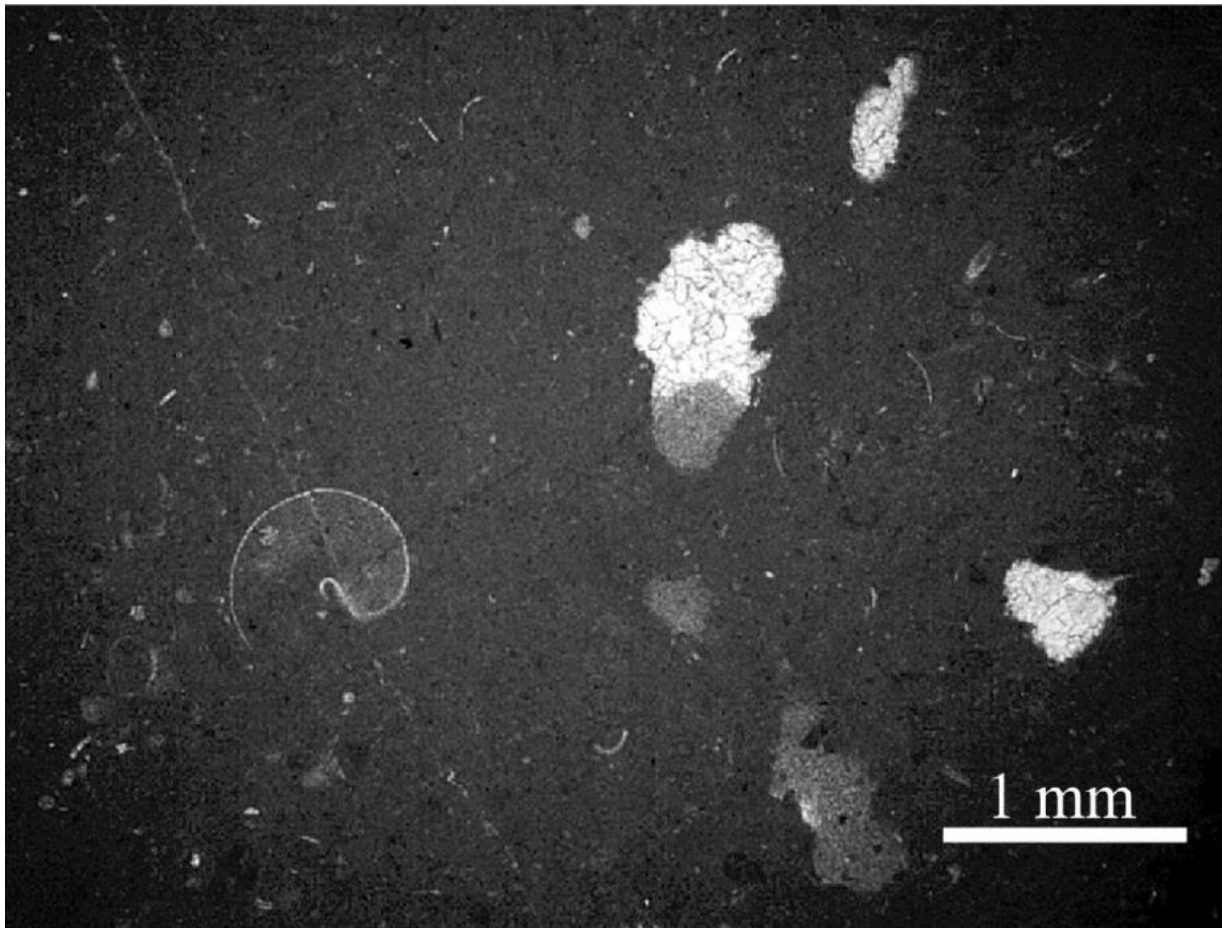


Slika 3.1. Slijed naslaga Brušane Sy, preuzeto iz Jazvac (2017)

### *Uzorak s oznakom Sy-6a*

U mikropetrografskom uzorku, čija je mikrofotografija prikazana slikom 3.2., vidi se potpuno očuvana struktura primarnog vapnenca, te mikrokristalasta struktura dolomita. U gustom dolomikritu se nalaze fosilni ostaci ostrakoda, zelenih algi, te gastropoda, stoga se radilo o mikritu s fosilima koji je sada dolomikrit s fosilima. Šupljine vidljive u uzorku su nasumično raspoređene, dominantno sferične do nepravilne. Međusobno su izolirane, te postoji oštra granica između šupljina i gustog mikrita. Ispuna šupljina je dolomitna, a može se uočiti i geopetalna ispuna gdje se u donjem dijelu nalazi kristalni silt, a u gornjem krupniji prozirni kristali dolomita.

S obzirom na prisustvo homogenog mikrita primarna stijena (vapnenac) taložila se u mirnom, zaštićenom taložnom okolišu. Prisustvo algi ukazuje na taloženje u fotičkoj zoni, a prisustvo algi i ostrakoda na taloženje u uvjetima mirnog, plimnog, moguće i podplimnog okoliša. U takvim plitkim peritajdalnim okolišima moglo je doći do primarne dolomitizacije i postanka dolomikrita. Unatoč prisutnosti kristalnog silta koji ukazuje na mogućnost nastanka šupljina otapanjem, a obzirom da su fenestre dominantno sferične i da su prisutni fosilni ostaci, prema Flugel (2004), može se zaključiti da su šupljine nastale od mjehurića plina ili zraka koji su zarobljeni tijekom taloženja sedimenta ili propadanjem organskog materijala nakon taloženja.

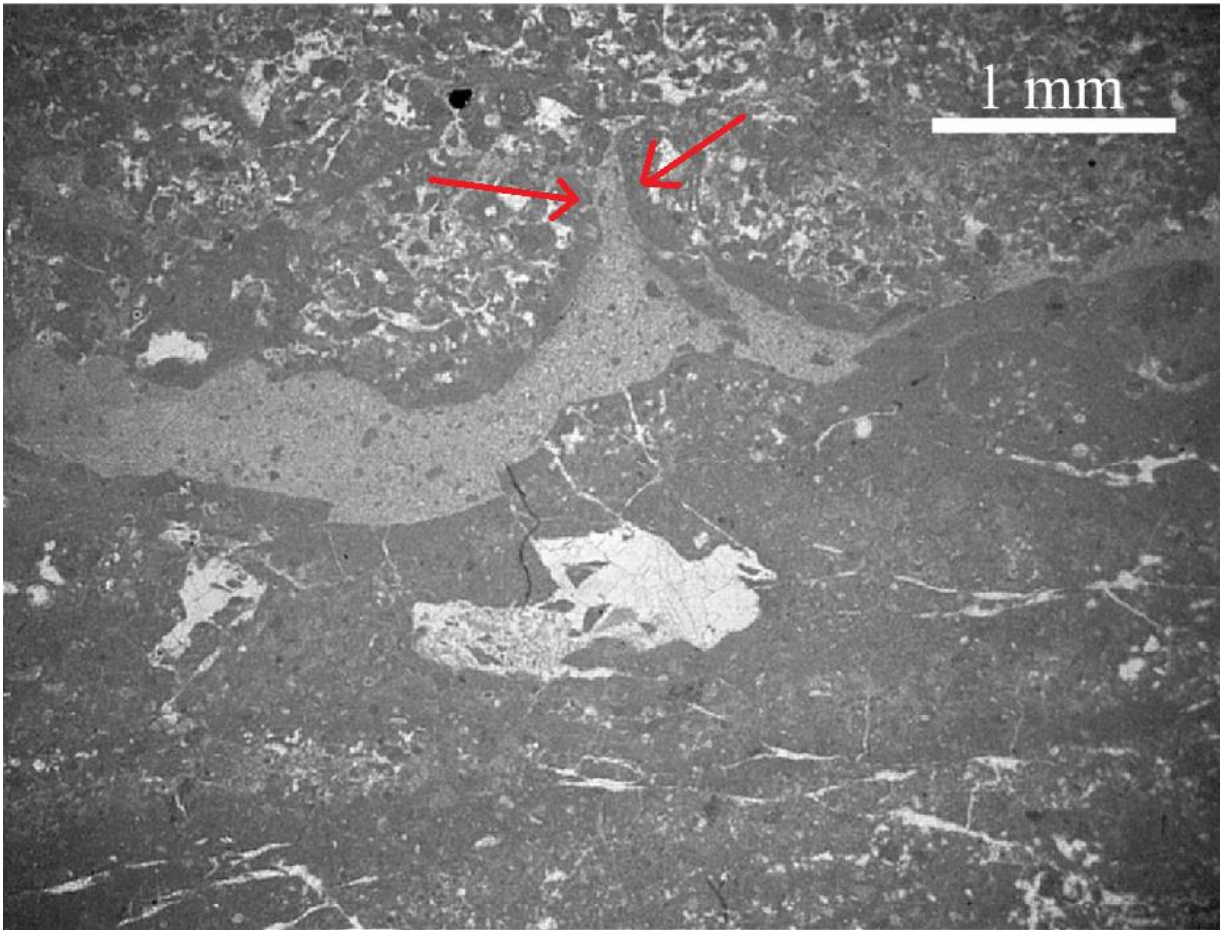


Slika 3.2. Mikrofotografija uzorka s oznakom Sy-6a prikazuje fenestralne šupljine u dolomikritu s fosilima

### *Uzorak s oznakom Sy-16b*

U mikropreparatu s oznakom Sy-16b (slika 3.3.) vidi se laminacija koja se sastoji od dolomikritnih lamina i lamina koje po sastavu odgovaraju dolointrasparitu/dolopelsparitu. Dolomikritne lamine su tanke i vrlo često razlomljene. Ponegdje se može uočiti i povijanje lamina prema gore, odnosno „te-pee struktura“. U zrnskim laminama je prisutno i nešto biodetritusa, te šupljine koje su orijentirane duž lamina. Šupljine su ovalne, horizontalno izdužene. Ispunjene su krupnim kristalima dolomita, a ponegdje se vidi i kristalni silt. Oblik šupljina je nepravilan do kuglast, što odgovara laminoidnoj fenestralnoj strukturi A tipa koja se sastoji od fenestri različitih oblika.

S obzirom na raspucanost dolomikritnih lamina i „te-pee strukturu“ stijena je primarno bila taložena u plimnim uvjetima. Tu se događala i dolomitizacija u ranodijagenetskim uvjetima. Dolomikritne lamine su izrazito tanke pa se može zaključiti da su u primarnom taloženju sudjelovale cijanobakterije/mikrobijalni organizmi. Također, i raspored šupljina duž lamina, odnosno laminoidna građa ukazuje na moguće mikrobijalno porijeklo odnosno nastanak uslijed truljenja mikroorganizama, ali nije isključena niti mogućnost da su šupljine nastale tijekom isušivanja, otapanja i ranodijagenetske dolomitizacije. Laminoidni tip fenestralnih šupljina kao i ostali parametri ukazuju na taloženje i dijagenezu u intertajdalu.

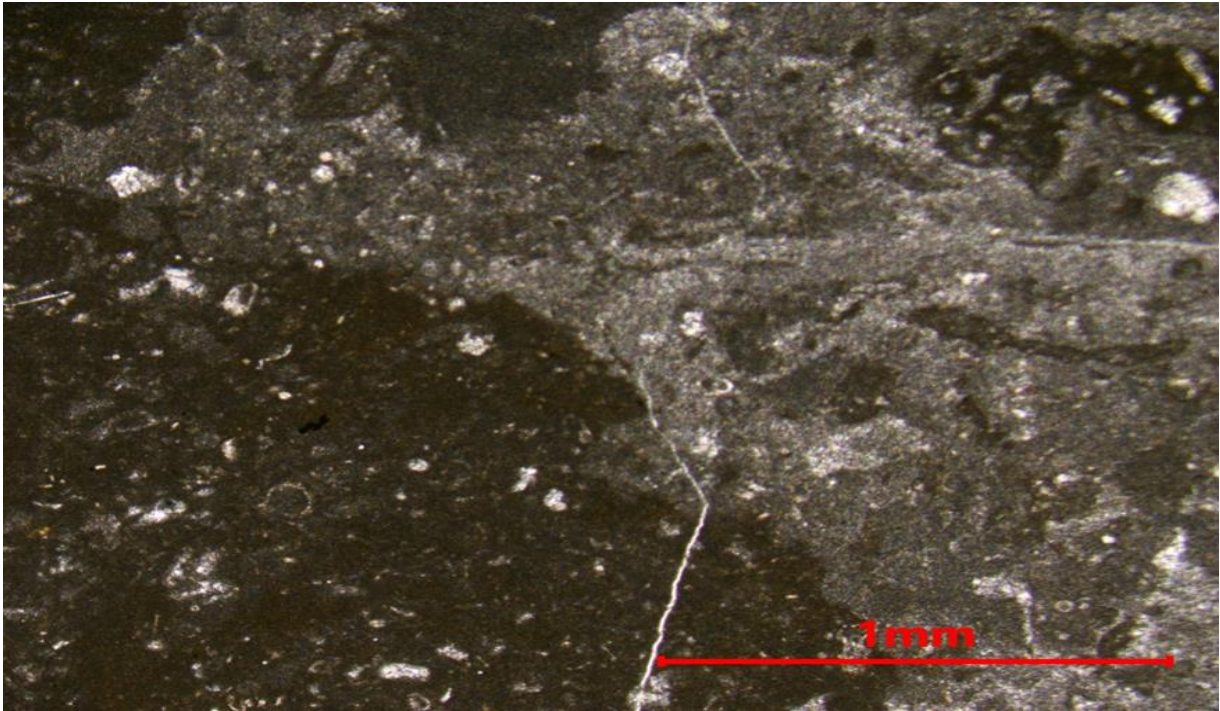


Slika 3.3. Mikrofotografija uzorka s oznakom Sy-16b prikazuje laminaciju s dolomikritnim i dolointrasparitnim laminama koje sadrže fenestre. Strelice pokazuju povijanje dolomikritnih lamina, odnosno “te-pee strukturu”

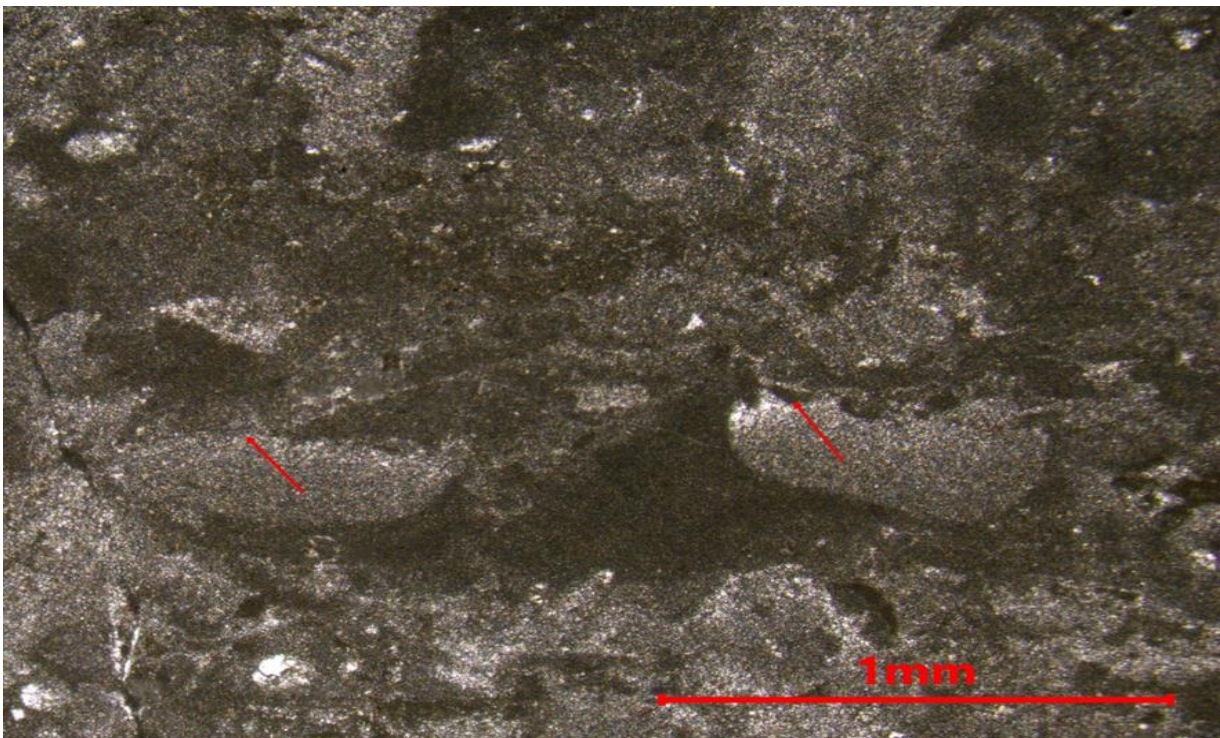
### *Uzorak s oznakom Sy-31*

Mikropetrografski preparat s oznakom Sy-31 odgovara mikrokristalastom ranodijagenetskom dolomitu. U stijeni se jasno prepoznaje proces primarne dolomitizacije, ali veličina kristalića neznatno varira. Mogu se uočiti dijelovi sasvim mikrokristalaste strukture koji bi po sastavu odgovarali biomikritu/mikritu s fosilima (slika 3.4.). Također, u stijeni je prisutno vrlo mnogo fenestralnih šupljina. One se prepoznaju po ispuni nešto krupnijim kristalićima dolomita. Po izduženom obliku ovih šupljina može se reći da se radi o laminoidnoj fenestralnoj strukturi, ali među njima se međutim mogu raspoznati neke šupljine koje imaju oštru donju stranu i nazubljeni „strop“ (slika 3.5.). Prema tim osobinama šupljine bi odgovarale stromataktis strukturi.

Na taloženje u mirnom i plitkom okolišu ukazuje biomikrit odnosno mikrit s fosilima kao primarna stijena, a na dolomitizaciju u plitkom okolišu ukazuje mikrokristalasta struktura. Prisutnost izduženih fenestri i općenito laminoidna fenestralna struktura ukazuje na plimnu i plitku podplimnu zonu taloženja, ali s obzirom na prisustvo stromataktis strukture i uz najprihvaćeniju pretpostavku da ona nastaje raspadanjem tkiva spužvi, može se zaključiti da su upravo spužve bile prisutne tijekom taloženja. Taj podatak upućuje na taloženje u plitkoj podplimnoj zoni/zoni subtajdala.



Slika 3.4. Mikropetrografski izgled uzorka Sy-31. Uzorak odgovara mikrokristalastom ranodijagenetskom dolomitu. U stijeni se jasno prepoznaje proces primarne dolomitizacije pri čemu veličina kristalića varira: mogu se uočiti dijelovi sasvim mikrokristalaste strukture



Slika 3.5. Mikrografija uzorka s oznakom Sy-31 prikazuje stromataktis šupljine koje imaju oštro dno i nazubljeni „strop“

### *Uzorak s oznakom ID-11F*

U mikropetrografskoj analizi uzorka s oznakom ID-11F (slika 3.6.) vidi se vertikalna izmjena dominantno kalcitnih/vapnenačkih lamina i lamina koje su dominantno dolomitne. Dolomitne lamine prepoznaju se po prisutnosti krupnih prozirnih kristalića dolomita, ali i po ispunjivosti šupljina dolomitom. S obzirom na orijentaciju radi se o laminoidnoj fenestralnoj građi A tipa prema Flügelu (2004), ali fenestralne šupljine po obliku nisu izdužene nego sferične/ovalne.

Općenito, laminoidna fenestralna struktura vapnenaca ukazuje na taloženje u intertajdalnoj zoni uz prisustvo cijanobakterija. Međutim prema Flügelu (2004), laminoidne fenestre mogu nastati na tri načina: vlaženjem te isušivanjem karbonatnog mulja u supratajdalnim uvjetima, isušivanjem površine cijanobakterijskih podloga zbog čega se ona nabora ili izlaskom plina tijekom propadanja (truljenja) organske tvari. Unatoč laminoidnoj fenestralnoj strukturi A tipa koja može ukazivati na taloženje u plimnoj zoni, dominantno sferični oblik šupljina ipak ukazuje na mogućnost izlučivanja evaporitnih minerala u zoni supratajdala. Moguće je pretpostaviti da su se evaporitni minerali tijekom dijageneze otopili, a u fenestrama, nastalim otapanjem, izlučio se krupnokristalasti dolomit.



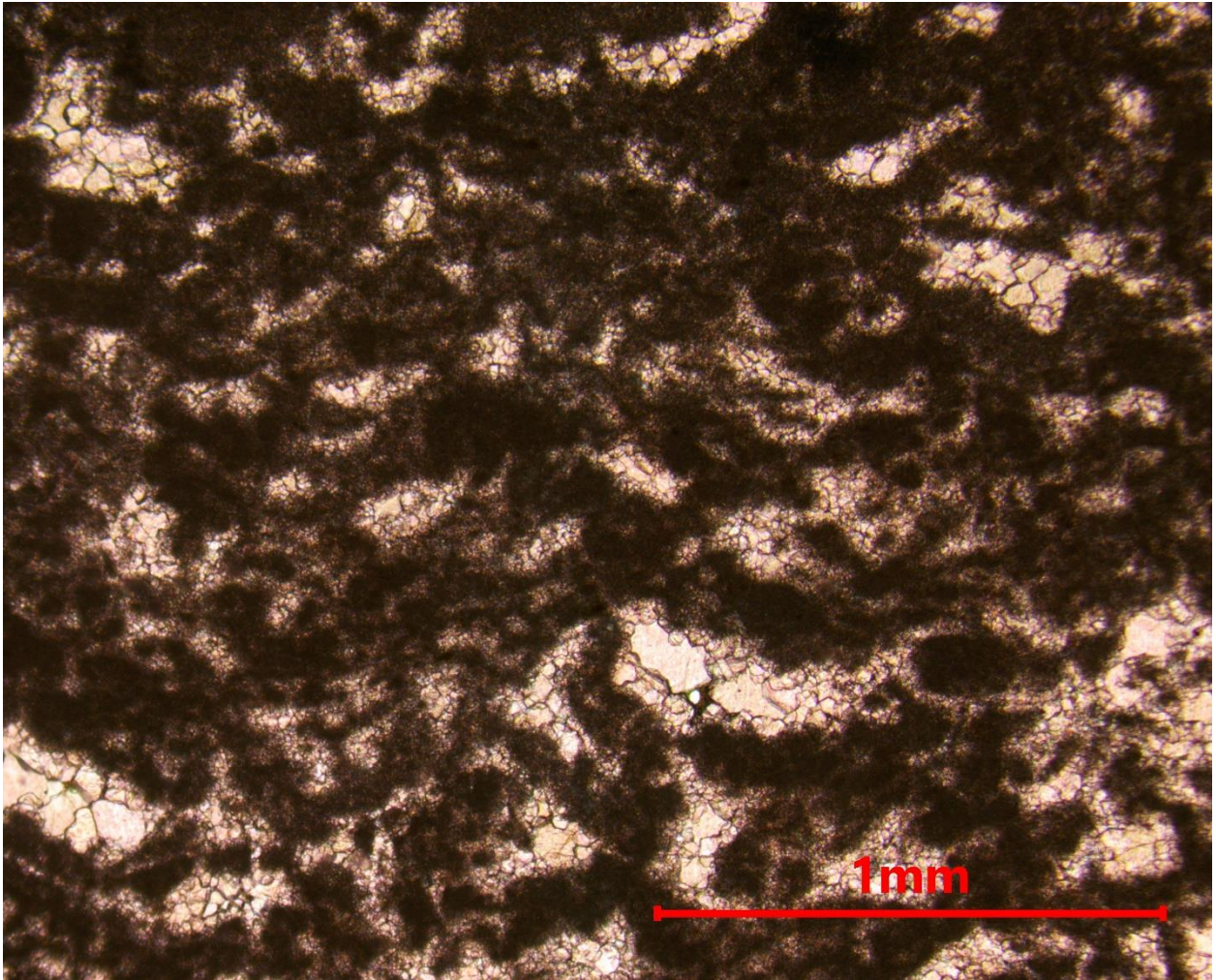


Slika 3.6. Mikrofotografija uzorka s oznakom ID-11F prikazuje vertikalnu izmjenu vapnenačkih i dolomitnih lamina

### *Kredni stromatolit iz Istre*

U mikropetrografskom preparatu krednog stromatolita (slika 3.7.) vidi se laminirana struktura primarnog vapnenca u čijem sastavu dominiraju peleti. U čitavoj stijeni prisutne su dominantno lećaste fenestre ispunjene sparikalцитom. Njihova prisutnost u građi ovog vapnenca je znatna. Fenestre su međusobno povezane i pružaju se duž lamina te struktura odgovara laminoidnom A tipu. S obzirom na sparikalцитnu ispunu, ovaj tip fenestralne građe odgovara podtipu strukture ptičjeg oka.

Taloženje ovog vapnenca ukazuje na uvjete taloženja u intertajdalju. Prema Tišljar (2001), njihovo taloženje se veže za prisustvo cijanobakterija te su najčešće opisani kao stromatoliti.



*Slika 3.7. Mikrofotografija krednog stromatolita iz Istre prikazuje mnoštvo lećastih fenestri koje po tipu odgovaraju strukturi ptičjega oka*

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je razmotrena fenestralna struktura, njezini tipovi i specifični podtipovi, kao i njihova geneza. Također je mikropetrografski analizirano pet uzoraka iz zbirke Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine RGNF-a koji pokazuju fenestralnu strukturu. Tri uzorka su s istoga profila, (Brušane Sy, Velebit; uzorci Sy-6a, Sy-16b i Sy-31), jedan uzorak je primjer fenestralne građe s lokaliteta Idrija – ID-11F (granica perm-trijas, Slovenija) i jedan predstavlja kredni stromatolit iz Istre. Na osnovu literaturnih podataka i primjera fenestralne strukture utvrđena je geneza ovih uzoraka. Prema Flügelu (2004), može se zaključiti da su šupljine u uzorku s oznakom Sy-6a nastale od mjehurića plina ili zraka koji su zarobljeni tijekom taloženja sedimenta ili propadanjem organskog materijala nakon taloženja u uvjetima mirnog, plimnog, moguće i podplimnog okoliša. Građa uzorka s oznakom Sy-16b ukazuje na moguće mikrobijalno porijeklo, ali nije isključeno da su šupljine nastale tijekom isušivanja, otapanja i ranodijagenetske dolomitizacije. Stijena je primarno bila taložena u plimnim uvjetima. S obzirom na prisustvo stromataktis strukture u uzorku s oznakom Sy31 i uz najprihvaćeniju pretpostavku da ona nastaje raspadanjem tkiva spužvi, može se zaključiti da su upravo spužve bile prisutne tijekom taloženja. U uzorku s oznakom ID-11F unatoč laminoj fenestralnoj strukturi A tipa koja može ukazivati na taloženje u plimnoj zoni, dominantno sferični oblik šupljina ipak ukazuje na mogućnost izlučivanja evaporitnih minerala u zoni supratajdala. Evaporitni minerali su se tijekom dijageneze otopili, a u fenestrama, nastalim otapanjem, izlučio se krupnokristalasti dolomit. Taloženje uzorka krednog stromatolita se veže za prisustvo cijanobakterija. Iz analiziranih uzoraka dva su moguće taložena uz prisustvo mikrobijalnih organizama čime je prikazana veza postanka fenestralne strukture s prisutnošću mikroorganizama u karbonatnim stijenama.

## 5. LITERATURA

FLÜGEL, E., 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks – Analysis, Interpretation and Application*. Berlin: Springer, str. 190-198.

TIŠLJAR, J. 2001. *Sedimentologija karbonata i evaporita*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja, str. 45., 197.

TUCKER, M. 2008. *Petrologija sedimenata: Uvod u postanak sedimentnih stijena*. Samobor: AZP Grafis, str.

JAZVAC, I. 2017 *Facijesna i kemostratigrafska definicija granice perm-trijas na Velebitu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, diplomski rad, str. 40*

Elektronički izvori:

2010. *New Providence Island, The Bahamas*. <https://www.usgs.gov/media/images/new-providence-island-bahamas-0> (6.9.2021.)