

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Zita Brigjević i Petra Belobrk

UTJECAJ POTHLADIVANJA NA NASTANAK STRUKTURA MAGMATSKIH STIJENA
OFIOLITNOG KOMPLEKSA MEDVEDNICE

Zagreb, 2014.

Ovaj rad izrađen je u Mineraloško–petrografskom zavodu Geološkog odsjeka Prirodoslovno–matematičkog fakulteta pod vodstvom prof. dr. sc. Dražena Balena i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2013./2014.

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

ΔT – promjena temperature (stupanj pothlađivanja)

DOZ – Dinaridska ofiolitna zona

i.g.d. – istočne geografske dužine

JZ – jugozapad

KU – Kalnik Unit

Ma – milijun godina/ 10^6 godina (lat. megaannus)

MU – Medvednica Unit

MORB – srednjeoceanski bazalt (eng. Mid–Oceanic Ridge Basalt)

N+ – promatranje mikroskopom sa uključenim analizatorom

N- – promatranje mikroskopom sa isključenim analizatorom

OGK – osnovna geološka karta

PPL – polarizirano svjetlo (eng. plain polarized light)

SI – sjeveroistok

s.g.š. – sjeverna geografska širina

vol. % – volumni udio minerala u stijeni

VZ – Vardarska zona

ZMTZ – Zagorje–srednjetransdanubijska zona (eng. Zagorje–Mid–Transdanubian zone)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Geografski položaj lokaliteta „Jelenje vode“	2
1.2. Geološki smještaj	5
1.3. Pregled dosadašnjih geoloških istraživanja	10
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA	15
3. MATERIJAL I METODE	16
3.1. Laboratorijska priprema uzoraka	16
3.2. Statističke metode	18
4. REZULTATI	21
4.1. Makroskopski opis uzoraka	21
4.2. Mikrofiziografija uzoraka	22
4.2.1. Bazalni hijaloklastit	22
4.2.2. Dijabaz	26
4.2.3. Dijabazni hijaloklastit	27
4.3. Statistička obrada	29
5. RASPRAVA	32
5.1. Strukture i pothlađivanje	32
5.2. Rast i nukleacija sferulita	35
5.3. Slijed magmatskih događaja rekonstruiran na temelju struktura	39
6. ZAKLJUČCI	42
7. ZAHVALE	44
8. POPIS LITERATURE	45
9. SAŽETAK	49
10. SUMMARY	50
11. ŽVOTOPIS	51

1. UVOD

Magmatske stijene sjeverozapadnog dijela Medvednice pripadaju ofiolitnom melanžu, čiji je nastanak povezan sa alpskom evolucijom Dinaridskog dijela Tethysa. U magmatske stijene ofiolitnog melanža Medvednice ubrajamo ultrabazične stijene, gabroidne stijene, dijabaze, spilite, efuzivne odvjete, piroklastične stijene i žilne asocijacije. Dijabaz, međutim, predstavlja stijenu koja je najviše zastupljena.

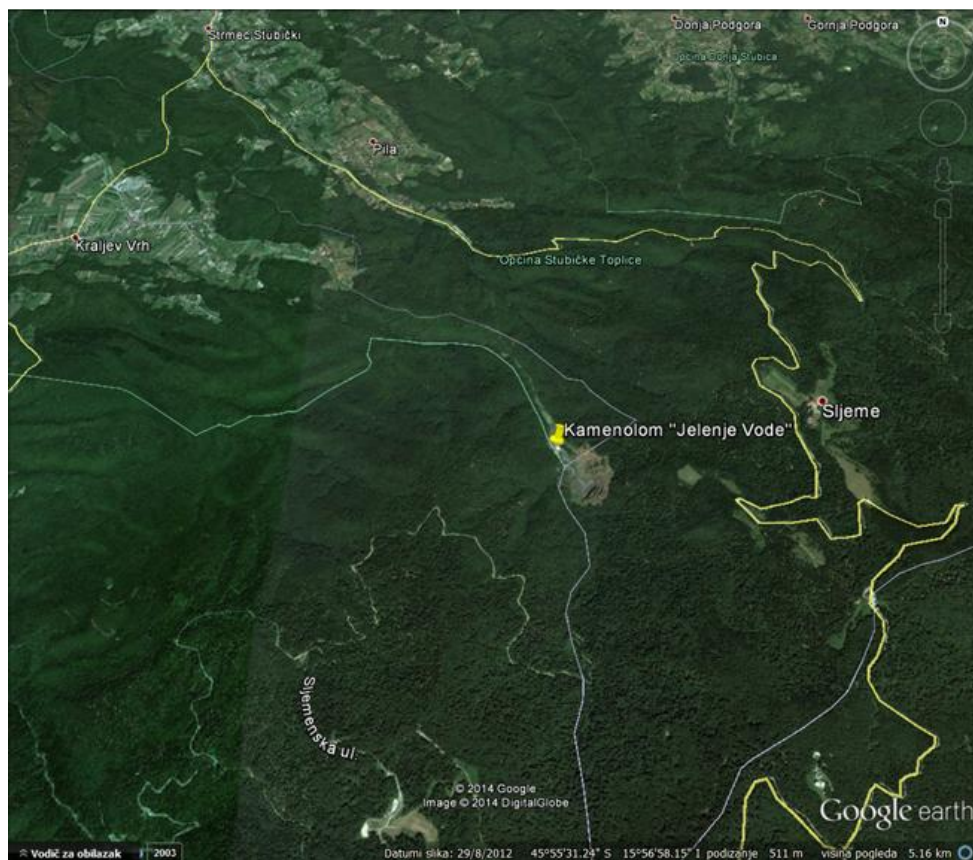
Strukture istraživanih magmatskih stijena sa lokaliteta „Jelenje vode“ (Kraljev Vrh) ukazuju na brzo hlađenje i kristalizaciju, te predstavljaju strukture tipične za žične do efuzivne varijetete izmjenjenih magmatskih stijena (dijabaz, bazalt, spilit). Taj skup neobičnih struktura, poznatih kao variolitska struktura je općenito opisan u radovima hrvatskih geologa koji su proučavali magmatske stijene Medvednice. Detaljnije opise te strukture daju Crnković (1963) te Halamić et al. (1998) za ispitivani lokalitet i šire područje oko njega. Variolitska struktura odnosi se na tip strukture u kojem je razmještaj izduženih i ponekad dendritičnih kristala pravilan, te tvore forme nalik kuglicama koje se nazivaju sferuliti.

Pregledom znanstvene literature može se pretpostaviti da su istraživane stijene nastale složenim magmatskim procesima, a znatan utjecaj na njihov nastanak imao je proces pothlađivanja i intruzija dijabazne žile u bazalte, što je u direktnoj vezi sa razvojem tekstura i struktura na tom lokalitetu.

1.1. Geografski položaj kamenoloma „Jelenje vode“

Medvednica je planina sjeverno od Zagreba. Proteže se u smjeru sjeveroistok–jugozapad, te je sa svojim najvišim vrhom, Sljeme, visoka 1033 m.

Kamenolom „Jelenje Vode“ nalazi se na sjeverozapadnim padinama Medvednice (slika 1.1.), 3 kilometra istočno od mjesta Kraljev Vrh. Geografske koordinate su: 45° 55' 30“ s.g.š. i 15° 57' 16“ i.g.d. Ležište je dio dijabazne grede koja se proteže u pravcu JZ–SI. Dijabaz se može pratiti od Gornje Bistre na JZ dijelu, pa sjeverno od Peščenice prema Hrastovcu i dalje na sjeveroistok, sve do Slanog Potoka. On je okomit na pružanje grede presjecan brojnim potocima, što je rezultat mlađe tektonike. Cjelokupna površina dijabaznog tijela iznosi 11km². Dužina dijabazne grede iznosi 10 km, a širina joj varira od nekoliko desetaka metara do 2 km (Crnković, 1963).



Slika 1.1. Satelitska snimka geografskog položaja kamenoloma „Jelenje Vode“ (Izvor: Google Earth, stanje iz 2012. godine)

U glavnom dijelu kamenoloma (slika 1.2.) jasno se vidi intruzija dijabaznog tijela (slika 1.3.), koja predstavlja jednu od niza intruzija koje su se zbile u ovom djelu Medvednice tijekom razdoblja od gornje jure do donje krede (Šikić et al., 1977).

Duž stijenskih pukotina dolazilo je do niza magmatskih prodora na što nas upućuje vrlo velika promjena u strukturi koja se ne može protumačiti samo kao produkt diferencijacije jedne magmatske mase, jer u dijelovima koji bi trebali predstavljati centralni dio mase nalazimo piroklastične stijene i strukture rubnih facijesa dijabaza, koji su brže hlađeni i „preohlađeni“ (Crnković, 1963).

U kamenolomu se eksploatirao dijabaz koji se upotrebljavao u proizvodnji kamenog agregata za izradu završnih habajućih slojeva asfalta u cestogradnji, te proizvodnju mineralne vune koja se koristi kao izolacijski materijal u građevinarstvu (Kršić, 2010).

Kamenolom je u vlasništvu tvrtke Hidrel, a zatvoren je 2010. godine jer se rudarskim radovima izašlo izvan granica eksploatacijskog polja, te izvan obuhvata radova predviđenih i odobrenih projektom sanacije.



Slika 1.2. Pogled prema jugoistoku na glavni dio kamenoloma. Situacija iz lipnja 2013.



Slika 1.3. Intruzija dijabaznog tijela u jastučaste bazalte. Osoba kao mjerilo je visine 1.80m.

1.2. Geološki smještaj

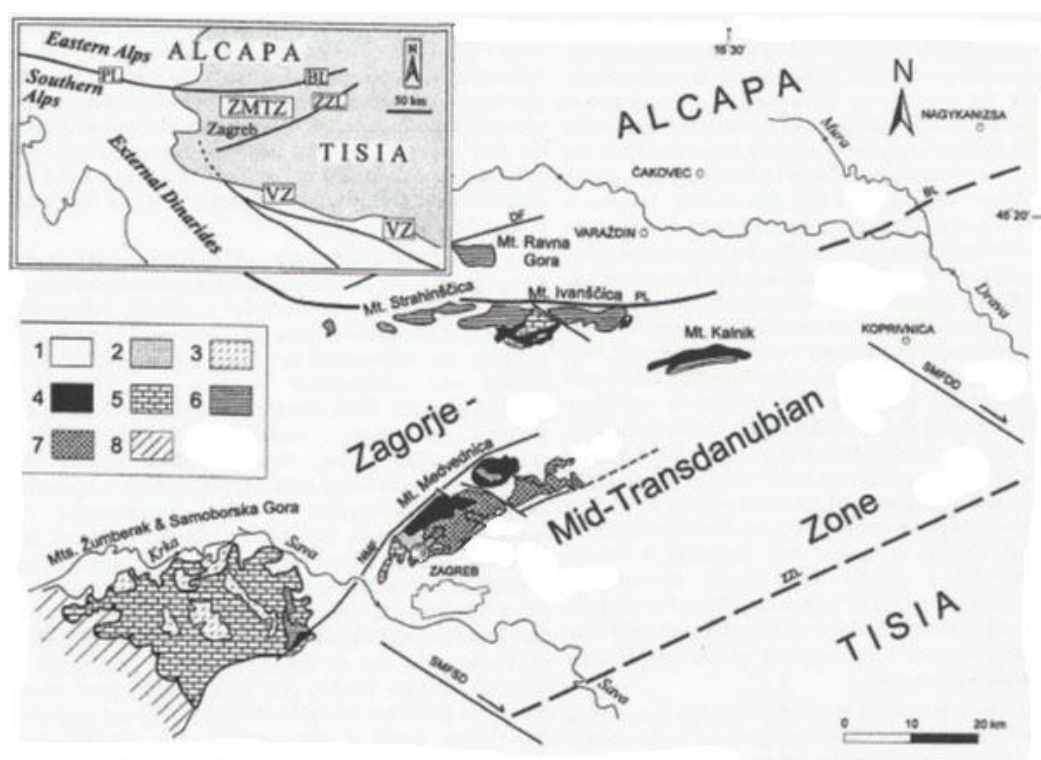
Geologija samog kamenoloma „Jelenje vode“ vezana je za gornjokredne efuzive koji pripadaju vulkanogeno–sedimentnom kompleksu Medvednice, gdje su efuzivi u najvećoj količini spiliti i dijabazi (Šikić et al., 1977). Na slici 1.4. označen je položaj kamenoloma na isječku Osnovne geološke karte, list Zagreb, iz koje se vidi njegovo geološko okruženje.



Slika 1.4. Dio karte preuzet sa Osnovne geološke karte, list Zagreb (Šikić et al., 1977), izvorno mjerilo je 1:100 000, a razmak između linija je 5 km. Žutom strelicom označen je točan položaj kamenoloma unutar tamnoplavog područja koje označava kredne efuzije, koji se na terenu vide kao spiliti i dijabazi. Okolno svjetloplavo područje su kredni sedimenti i sedimentne stijene.

Područje sjeverozapadne Hrvatske, a samim time i Medvednice, mjesto je spajanja triju velikih tektonskih granica. To su: Periadriatski lineament, mjesto kolizije koje odvaja Austroalpinsku jedinicu i južne Alpe; Zagreb–Zemplin linija (Mid–Hungarian line), tj. južna granica Zagorje–srednjetransdanubijske zone koji odvaja dva velika bloka Panonskog bazena (ALCAPA blok i Tisiju) i Vardarska zona, najunutarniji dio Unutrašnjih Dinarida (Pamić et al., 2002).

Medvednica je smještena u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena u sjevernoj Hrvatskoj. Nalazi se na najzapadnijem dijelu granice između istočnih Alpa na sjeveru, južnih Alpa i Dinarida na zapad–jugozapadu i Tisije na istoku. Ta granična zona zove se Zagorska–srednjetransdanubijska zona (ZMTZ), te je omeđena Periadriatskim–Balaton lineamentom na sjever–sjeverozapadu, te Zagreb–Zemplin lineamentom na jug–jugoistoku (slika 1.5.). Granična zona je uglavnom prekrivena neogenskim sedimentima i sedimentnim stijenama Panonskog bazena, osim nekoliko izoliranih izdanaka stijena na području Hrvatske i Mađarske (Tomljenović, 2000).



Slika 1.5. Prikaz geološkog smještaja Alpa, Dinarida i Tisije, te hrvatski dio Zagorje-srednjetransdanubijske zone. Legenda: 1. Neogen i kvartar Panonskog bazena. 2. Gornjokredno-paleocenski fliš. 3. Pelagički vapnenci i kalcitični turbiditi. 4. Ofolitni melanž. 5. Karbonati platforme gornjeg trijasa. 6. Gornjepaleozojski i trijaski klastiti i karbonati. 7. Paleozojsko-trijaski metamorfni kompleks. 8. Vanjski Dinaridi. DF-Donat rasjed. PL-Periadriatski lineament. BL-Balaton linija. NMF-Sjeverni rubni rasjed Medvednice. SMFSD-Južni rubni rasjed Savske depresije. SMFDD-Južni rubni rasjed Dravske depresije. ZZL-Zagreb-Zemplin linija. VZ-Vardarska zona. ZMTZ-Zagorje-srednjetransdanubijska zona. (Preuzeto iz: Tomljenović, 2000).

Na Medvednici se mogu pronaći brojne sedimentne stijene, metamorfne stijene vrlo niskog do niskog stupnja metamorfizma, te sporadično i magmatske i žilne stijene.

Magmatske i sedimentne stijene Medvednice prema jugoistoku su u reversnom kontaktu sa niskometamornim stijenama, dok su prema sjeveroistoku u normalnom tektonskom kontaktu. Prema jugozapadu su odvojene od gornjokredno–paleogenskih sedimenata sustavom rasjeda. Na sjeverozapadnoj strani magmatske stijene diskordantno su prekrivene neogenskim naslagama (Halamić et al., 1998).

Predneogensku jezgru Medvednice izgrađuju četiri jedinice koje potječu iz oceanskih i kontinentalnih izvora, a paleozojske, mezozojske i paleogenske su starosti. Prema Pamić i Tomljenović (1998) te Judik et al. (2004) to su:

1. Paleozojsko–mezozojski (122–110 Ma) metamorfni kompleks koji se sastoji uglavnom od paleozojskih sedimentnih i magmatskih stijena;
2. Jurski ofiolitni melanž;
3. Gornjokredno–paleocenska sedimentna sekvenca;
4. Trijaski klastiti i karbonatne formacije.

Paleozojsko–mezozojski izdanci metamornog kompleksa pojavljuju se u središnjim i sjeveroistočnim djelovima planine. Uglavnom su predstavljeni zelenim škriljancima, metagrauvakama, slejtovima, filitima, mramorima, rekristaliziranim dolomitima, metakonglomeratima i kvarcitima.

Jurski ofiolitni melanž Medvednice nalazi se u jugozapadnom djelu Zagorje–srednjetransdanubijske i unutar Vardarske zone (VZ) Dinarida. Melanž predstavlja najsjeverozapadniji dio Dinaridskih ofiolita, čiji je nastanak povezan sa alpskom evolucijom Dinaridskog dijela Tethysa. Dinaridski ofioliti predstavljaju dio mezozojske oceanske kore. Postoje dvije teorije nastanka, prva uključuje gornjotrijasku do donjojursku oceanizaciju Tethysa nakon koje je slijedila gornjejurska do donje kredna subdukcija, obdukcija i nastanak Dinaridske ofiolitne zone (DOZ)–(Judik et al., 2004). Druga je kredno–donjopaleogenska konačna subdukcija i obdukcija zalučnog bazena, te je na taj način nastala Vardarska zona (Slovenec i Pamić, 2002).

Glavni alpski kolizijsko–kompresijski događaj koje se zbio u eocenu (55–45 Ma), omogućio je uzdizanje Dinarida, te pomicanje Vardarske zone u Dinaridsku ofiolitnu zonu.

Ofiolitni melanž Medvednice predstavlja kaotični kompleks u kojem su primarni sedimenti rijetko sačuvani zbog tektonike. Melanž je okarakteriziran razlomljenim, sitnozrnatom siltoznom matriksom u koji su uklopljeni manji (centimetarski do hektometarski) i veći (kilometarski) fragmenti različitih stijena. Najčešće su to grauvake, metabaziti, čertovi i različiti vapnenci.

Magmatske stijene vezane uz ofiolitni kompleks Medvednice predstavljene su tektonskim i kumulatnim serpentiniziranim peridotitima, gabro–dijabazima i bazaltima, izmjenjenim postmagmatskim procesima u metadijabaze, serpentinite, metagabre i metabazalte (Slovenec i Pamić, 2002).

Melanž se sastoji od dvije jedinice. Jedna je Medvednica (MU), a druga Kalnik (KU). MU se sastoji od metasedimentnih sukcesija starosti od silura do početka karnika. Na njih tektonski naliježu mezozojski metabaziti (zeleni škriljavac)–(Lugović et al., 2007).

Gornjokredno–paleocenske sedimentne jedinice predstavljaju transgresivne sekvence koje diskordantno naliježu na metamorfni kompleks i ofiolitni melanž.

Dijabaz nalazimo na sjevernoj strani Medvednice, gdje se pojavljuje u obliku silova ili dajkova manjeg površinskog rasprostiranja ili kao velika greda koja je manje ili više kontinuirana, s izoliranim dijelovima krednih sedimenata (Crnković, 1963). On je također redovito jače ili slabije hidrotermalno izmijenjen.

Bazalt je efuzivna bazična stijena u čiji mineralni sastav najčešće ulaze plagioklasi, pirokseni, te ponekad podređeno olivini. Ovisno o mediju u kojem dolaze na površinu, imaju različite strukture, no najčešća je porfirna struktura gdje su veća zrna minerala uklopljena u sitnozrnatoj osnovi. Od dijabaza ga razlikujemo upravo po strukturi. Bazalt se najčešće upotrebljava u građevinarstvu, te se od njega proizvodi kamena vuna koja služi kao izvrstan toplinski izolator.

Dijabaz, u užem smislu riječi, opisujemo kao žilnu stijenu kod koje se tipično javlja takozvana ofitska struktura gdje su štapići plagioklasa isprepleteni sa mineralnim zrnima piroksena. Javlja se u vidu manjih tijela nepravilna oblika, no češće silova ili dajkova. U industriji ima najveću vrijednost zbog svoje velike tvrdoće, te se često koristi kao građevni kamen pri asfaltiranju cesta.

Gabro je intruzivni varijetet bazalta. Samim time različita mu je struktura koja je zrnata, a što znači da su mineralna zrna sva približno jednake veličine i osnova je u potpunosti iskristalizirana. Mineralni sastav mu je isti kao mineralni sastav bazalta i dijabaza. Uglavnom se javljaju kao masivna plutonska tijela kumulatnih struktura, za razliku od dijabaza koji se najčešće pojavljuje kao žično tijelo. Osim načina pojavljivanja, također se razlikuje po strukturi od dijabaza.

1.3. Pregled dosadašnjih geoloških istraživanja

Crnković (1963) detaljno opisuje magmatske stijene Medvednice, pa tako i stijene nađene u kamenolomu „Jelenje Vode“, gdje je dijabaz pripisao hipoabisalnim odvjetcima. Klasificirao ga je kao variolitski dijabaz, te andezin–dijabaz, gdje je andezin–dijabaz najrasprostranjeniji i najviše zastupljen varijetet dijabaza. Sastav plagioklasa široko varira od bazičnih do kiselijih andezina, a rjeđe se pojavljuje čak i oligoklas, dakle, prema autoru, prijelaz u oligoklas–dijabaz. Dijabaz je obično gust, kompaktan, sitnozrnast, mjestimice sitnog poligonalnog lučenja ili tanko pločast, tako da nalikuje izljevnim pločama. Obično je sivozelene boje u raznim nijansama, od svjetlijih do tamnijih, a tamo gdje je jače površinski rastrošen, obično je smečkast. Ta je boja uvjetovana jačom limonitizacijom, koja kod pukotina i dublje zahvaća stijenu.

Kod variolitskog dijabaza Crnković (1963) opisuje strukturu kao variolitsku s prijelazima u intersertalnu ili vitrofirsku. Plagioklasi pripadaju andezinu i kiselijem labradoru. Štapićasti do skoro igličasti plagioklasi i pirokseni se uzajamno uklapaju i tvore radijalno zrakaste, lepezaste, snopićaste ili nepravilne agregate, kadikad i agregate u obliku zavjesa. Struktura stijene ukazuje na brzo ohlađivanje i kristalizaciju, kao i rekristalizaciju iz stakla u lepezaste i radijalno trakaste agregate. Takav „preohlađeni“ dijabaz predstavlja prijelazni tip iz gornjih i rubnih nivoa hipoabisalnih stijena i tipična je efuzivna stijena.

Šikić et al. (1979) u tumaču OGK, list Zagreb, dijabaze i spilite kredne starosti opisuju kao najčešće tektonski ukliještene ili da „plivaju kao izolirane sante“ na magmatskim stijenama. Dijabazi još, također, dolaze kao brojne pojave unutar sedimenata, u obliku dajkova, silova i nekova, ili manjih masiva. Tekstura im je najčešće homogena, ali se u rubnim dijelovima nalaze i mandulaste teksture, koje se češće zapažaju kod spilita. Unutar dijabaza, spilita i gabra nalaze se brojne žile i žilice, koje ukazuju na postmagnatsku aktivnost.

Basch (1981; 1983) u tumaču OGK, list Ivanić–Grad, piše da veća masa magmatskih stijena izgrađuje sjeverne padine jugozapadnog dijela Medvednice odakle se, u obliku prividno cjelovite i izdužene grede, pruža na jugozapad. Pojave magmatskih stijena manjih dimenzija nađene su u obliku proboja unutar paleozojskih

parametamorfita jugozapadnog dijela Medvednice. Dijabaze opisuje kao hipoabisalne stijene tamnosive ili tamne, zelenosive boje. Trošenjem postaju sivosmeđi. Tekstura im je masivna ili, ako su raspucani, mrežasta. Struktura je opisana kao ofitska, rjeđe intersertalna. Štapićasti plagioklasi polisintetske građe izgrađuju ofitsku rešetku, a međuprostori su ispunjeni alotriomornim zrnima monoklinskog piroksena, ili rjeđe vulkanskim staklom. Spiliti su stijene različitih nijansi zelene boje koje su, zbog procesa izmjene, najčešće determinirane kao kloritizirani spiliti i rastrošeni spiliti. Struktura im je ofitska, intersertalna i rjeđe variolitska.

Šimunić i Pamić (1989) proučavali su ultramafitne stijene Gornjeg Orešja koje su predstavljene serpentinitima i reliktnim harzburgitima, a koje tvore kariku u lancu ofiolitnih stijena koje se protežu od središnjih dijelova Medvednice preko Kalnika sve do Bilogore. Također, dali su geološko–petrološki prikaz ultramafitnih stijena iz doline Oreščak između Donjeg i Gornjeg Orešja. Te stijene su dijapirski otisnute u tjemene dijelove rasjednute neogenske antiforne. Mogu se korelirati sa ofiolitnim stijenama sjevernih Dinarida koje su također asociirane s gornjokrednim sedimentima.

Halamić i Slovenec (1995) stijene u kamenolomu „Jelenje vode“ opisuju kao bazične efuzivne stijene i to bazalte i metabazalte, koji čine većinu stijena kamenoloma. Ostatak stijena čine bazični hipoabisalni žilni dijabazi. Oni su kataklazirani uz izražene rasjedne zone s kataklastičnim brečama u istočnom dijelu kamenoloma. U najvećem dijelu fronte kamenoloma dominiraju gromadasti metabazalti i metabazalti različitog intenziteta rastrošenosti i nepravilnog lučenja. Strukture bazalta i metabazalta su mikrokristalne, ofitne, rjeđe reliktno–ofitne (uz rasjedne kontakte) i divergentno–zrakaste, te porfirno–ofitne. Na temelju strukturnih i teksturnih karakteristika izdvojeni su slijedeći varijeteti bazalta i metabazalta: ofitni i reliktno–ofitni, divergentno–zrakasti te krupnozrnati dijabaz, kataklazit i kataklastična breča. Odnos bazalta i metabazalta, koji izgrađuju glavnu masu kamenoloma je nejasan, međutim, riječ je o nizu postupnih prijelaza, na što upućuju stupnjevi izmjene, i to bazičnih plagioklasa u albit, te klinopiroksena u klorit. Za spomenute bazalte se pretpostavlja da je riječ o subakvatski izlivenim lavama, koje su bile podvrgnute znatnim postmagmatskim hidrotermalnim izmjenama pod utjecajem morske vode i prešli su u metabazalte uz očuvanje primarne

magmatske strukture i teksture. Starost stijena navode kao gornju kredu, odnosno radiometrijski je određena kao 93,5 milijuna godina (Slovenec, 2003).

Halamić et al. (1998) proučavajući pillow lave na području kamenoloma Orešje kraj Gornje Bistre dolazi do zaključka da struktura bazičnih lava upućuje na njihovu submarinsku ekstruziju, te da okrugli oblici variola ukazuju na njihovo brzo hlađenje.

Ofitska struktura i masivna tekstura u nekim dijelovima masivnih metabazalta ukazuju na polagano hlađenje sa istovremenom kristalizacijom primarnih mineralnih sastojaka, što se najvjerojatnije odvijalo u dubljim djelovima magmatske efuzije. Magmaijske stijene kamenoloma Orešje određene su kao toleitski metabazalti obogaćeni na titanij, koji geokemijski odgovaraju onima nastalim na srednjeoceanskom hrptu (MORB) i predstavljaju obducirani dio najviših djelova trijasko oceanske kore.

Pamić i Tomljenović (1998) dali su detaljnu tektonostratigrafsku podjelu Medvednice, gdje razlikuju: 1) tektonizirani ofiolitni melanž; 2) paleozojsko–trijaski magmatsko–sedimentni kompleks koji je prošao gornjokredni metamorfizam; 3) gornjokredno–paleocenski fliš i 4) trijasko naslage pretežno facijesa karbonatne platforme.

Tomljenović (2000) je dao kratak pregled preneogenskih tektono–stratigrafskih jedinica, te je opisao da su stijene koje su prisutne u sklopu ofiolitnog melanža uglavnom ultrabazične stijene, masivni gabri, masivni dijabazi i pillow bazalti.

Slovenec i Pamić (2002) iznijeli su pregled geodinamskih događaja koji su doveli do današnjeg položaja Medvednice. Dinaridski ofioliti predstavljaju mezozojsku oceansku koru koja se stvarala u periodu od oko 150 milijuna godina. Oni su produkt evolucije koja se zbila u dva koraka. Prvi je da su se stariji ofioliti koji su dio Dinaridske ofiolitne zone, a potječu iz okoliša otvorenog oceana, obducirali tijekom tito–berijas subdukcije. Drugi je korak bilo obduciranje mlađih ofiolita zalučnog bazena u vrijeme kontinentalne kolizije Euroazije i Afrike.

Slovenec (2003) u sklopu svoje doktorske disertacije opisuje petrološke i geokemijske značajke ofiolita Medvednice. Mafitne žilne stijene opisuje kao zastupljene

gabropegmatitima i dijabazima. Dijabazi se pojavljuju samo unutar glavnog vulkanskog tijela Medvednice, te imaju ofitnu, dijabaznozrnatu i intersertalnu strukturu i homogenu teksturu. Mineralni sastav utvrdio je kao slijedeći: neutralni plagioklas (andezin–labrador), uglavnom izmijenjen u albit, klinopiroksen (augit) svjež ili izmijenjen u klorit, epidot, kalcit, a sporadično i uralit.

Judik et al. (2004) su došli do zaključaka da je paleozojsko–mezozojski metamorfni kompleks nastao pod uvjetima srednjih tlakova i visokih temperatura regionalnim metamorfizmom. Nadalje, jurski ofiolitni melanž i gornjokredno–paleocenske sedimentne sekvence su dijagenetski izmjenjene.

Lugović et al. (2007) su odredili da se ultrabazične kumulatne stijene Medvednice sastoje od genetski povezanih kromit–olivin ± ortopiroksen ± klinopiroksen kumulata. Stijene su kristalizirale u plitkoj otvorenoj magmatskoj komori iz volatilima bogate magme. Ultrabazične kumulatne stijene pokazuju toleitski afinitet koji je tipičan za plutonske stijene iz suprasubdukcijskih područja, a koje najvjerojatnije pripadaju predlučnom bazenu. Također upravo te ultrabazične kumulatne stijene povezuju sa stijenama nađenim na području planine Bükk u Mađarskoj.

Slovenec i Lugović (2009) uvidjeli su da su bazične efuzivne stijene često presjecane doleritnim (dijabaznim) dajkovima, a koji su dio ofiolitnog melanža Medvednice. One ukazuju na različitost u njihovom mineralnom sastavu što je posljedica toga da su stijene formirane u različitim vremenskim razdobljima započinjajući sa gornjim anizikom.

Kršić (2010) teksturu pronađenih stijena opisuje kao homogenu, rijetko mandulastu. Boja je zelenosiva u različitim nijansama, ovisno o udjelu i intenzitetu procesa kloritizacije. Akcesorni sastojak je ilmenit, a od sekundarnih sastojaka uz klorit nalazi se kalcit. Utvrdio je da je dijabaz visoke kakvoće, a kameni agregat proizveden od njega zadovoljava najstrože uvjete u cestogradnji.

Slovenec i Lugović (2012) istraživali su bazaltne stijene u okolini Poljanice, nedaleko od samog kamenoloma „Jelenje vode“, te su zaključili da su nastale daleko od utjecaja subdukcije, na srednjeoceanskom hrptu Repno oceana, koji je zapravo istočni

dio Tethysa. Bazalti pokazuju visok udio titanija, što ukazuje na MORB (srednjeoceanski bazalt) afinitet. Prave stijene oceanske MORB litosfere su rijetke, pa je tim više bitno porijeklo ovih stijena, jer se mogu smjestiti u starost srednje jure, odnosno ofiolitnog melanža, kad je Repno ocean bio na vrhuncu širenja.

2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Temeljem pregleda literature i makroskopskom analizom ranije prikupljenih uzoraka, postavljena je hipoteza da je skup fizikalno–kemijskih procesa vezan uz pothlađivanje morao imati značajnog utjecaja na završni izgled struktura efuzivnih stijena s obzirom da su se one prema radovima ranijih autora (npr. Šikić et al., 1979; Basch, 1983; Halamić i Slovenec, 1995; Halamić et al., 1998) izljevale u podmorskom okolišu.

Radom će se nastojati odrediti:

- struktura, tekstura, mineralni sastav;
- utjecaj pothlađivanja na nastanak sferulita;
- prostorni raspored, veličina i međudnos sferulita;
- sukcesivni slijed nastanka mikrostruktura pojedinih mineralnih vrsta (prvenstveno plagioklasa);
- rekonstruirati slijed geoloških događaja, te dati najvjerojatniji model zbivanja tijekom krednih efuzija.

Mikroskopskom analizom pomoću polarizacijskog mikroskopa moguće je brzo i povoljno utvrditi mineralni sastav i mikrostrukturne značajke stijene, te na taj način odrediti slijed magmatskih događaja i procesa koji su i utjecali na same strukturne značajke stijena. Osim određivanja mineralnog sastava i odnosa između pojedinih struktura, primjenom statističkih metoda može se dodatno objasniti proces pothlađivanja i njegova uloga u nastanku određenih struktura u stijeni.

Također, mikroskopskom analizom i interpretacijom dobivenih podataka, rad će nastojati dati odgovore na koji način je došlo do pothlađivanja i kako je ono utjecalo na strukturne značajke stijene, te kakav utjecaj ono ima na nukleaciju i rast kristala.

3. MATERIJAL I METODE

3.1. Laboratorijska priprema uzoraka

Terenskim radom prikupljeni su uzorci koji su pripremljeni za daljnju analizu u laboratoriju Mineraloško–petrografskog zavoda Geološkog odsjeka Prirodoslovno–matematičkog fakulteta u Zagrebu. Za detaljnu analizu odabrana su tri uzorka koji sa svojim strukturnim i petrološkim značajkama najbolje predstavljaju cijeline iz koje su uzeti.

Odabrani uzorci se prvo rotirajućom dijamantnom pilom izrežu na pločice, koje se zatim bruse na prahu 500 kako bi se uklonile sve nepravilnosti, a površina ostala glatkom. Nadalje, uzorak se kanada balzomom ljepi na stakalce, te se ostavlja da se ohladi.

Slijedeći korak je pomoću rotirajuće ploče i praha 90, te 240 stanjiti preparat na veličinu 0.02 do 0.03 mm, no kako je vrlo teško postići tu debljinu pomoću rotirajuće ploče, najčešće se pristupa ručnom brušenju na finijim prahovima, onima 500 i 2000. Kada se postigne odgovarajuća debljina, preparat se pokriva pokrovnim stakalcem, te se kreće sa analizom pod polarizacijskim mikroskopom.

Polarizacijski mikroskop se koristi za određivanje mineralnog sastava, te struktura, tekstura i mikrotektonskih osobina promatrane stijene. Njegovi osnovni dijelovi su: izvor svjetlosti, iris zaslon, kondenzor, pomični stolić, objektiv, otvor za umetanje akcesornih pločica, analizator, Amici–Bertrandova leća, okular.

Svjetlost prolazi kroz polarizator gdje se polarizira, tj. vibrira samo u jednom smjeru (jednoj ravnini), te nastavlja tako do stolića sa preparatom. Zatim prolazi kroz objektiv, analizator (ukoliko je uključen), te naposljetku i kroz okular.

Ovisno je li kondenzor uključen ili ne, opažanja provodimo u ortoskopskim uvjetima (gdje snop paralelnih zraka svjetlosti na preparat padaju pod pravim kutem) ili u konoskopskim uvjetima (snop konvergirane svjetlosti).

Stoga, u ortoskopskim uvjetima bez uključenog analizatora promatramo oblik i veličinu mineralnih zrna, zatim postojanje pukotina, kalavosti, reljef, postojanje

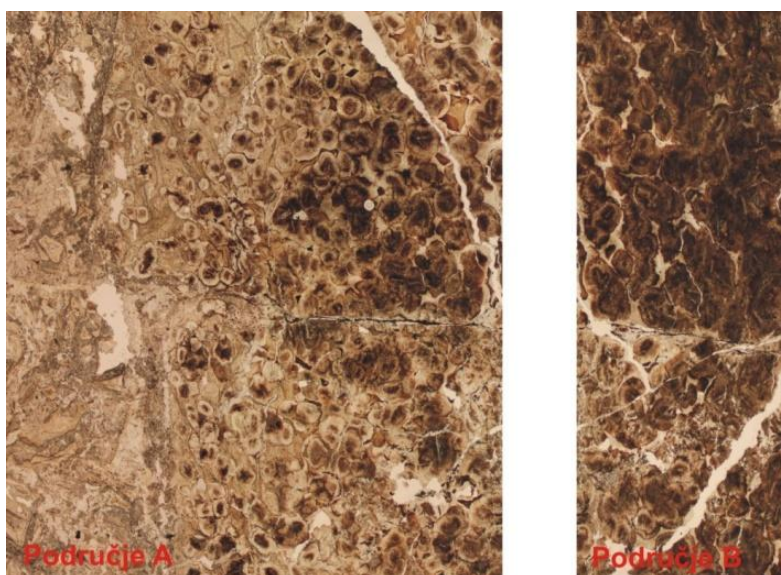
pseudoapsorpcije, vlastitu boju mineralnog zrna, te postojanje pleokroizma. Sa uključenim analizatorom, sa druge strane, razlikujemo optički izotropne od anizotropnih minerala, interferencijske boje, dvolom, potamnjenja, optički karakter izduženja, sraslace.

Fotografije mikroskopskih uzoraka snimljene su digitalnom kamerom proizvođača Cannon koja je postavljena na mikroskop proizvođača Zeiss. Fotografije su snimane u ortoskopskim uvjetima, sa i bez uključenog analizatora, a daljnja obrada fotografija provedena je u programu AxioVision 4.8 (tvrtke Carl Zeiss Microimaging).

3.2. Statističke metode

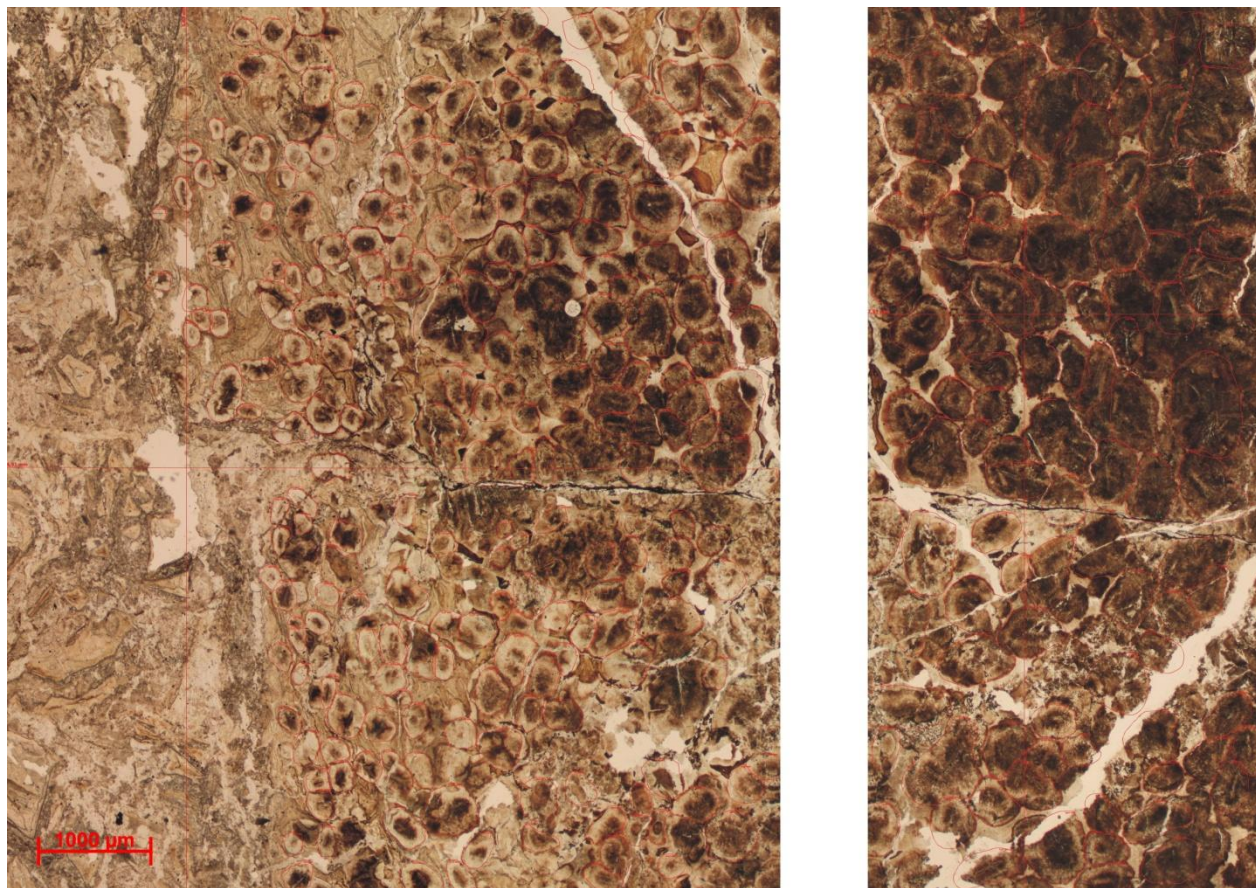
Kako bi se doznalo više o razlozima nukleacije i rastu sferulita pri pothlađivanju, primjenjene su statističke metode na reprezentativnom uzorku. Kako su sferuliti najzastupljeniji u bazaltnom hijaloklastitu, za analizu je uzet jedan od presjeka napravljenih iz tog uzorka. Pretpostavljeno je, s obzirom na mikroskopski izgled izbruska, da pothlađivanje dolazi iz jednog smjera i tako utječe na nastanak sferulita na pravilan i predvidljiv način.

Glavna ideja u takvom pristupu je bila izmjeriti površinu svakog sferulita u mikroskopskom preparatu, tako da bude zahvaćen što veći broj sferulita, na što manje ispucanom dijelu stijene, kako bi rezultati bili što pouzdaniji i vezani samo za genetske procese nastanka sferulita. Mjerenje je izvedeno na način da su digitalnom kamerom u mikroskopskom preparatu, pomoću polarizacijskog mikroskopa, snimljene dvadeset i tri fotografije, koje su potom spojene u jednu. S obzirom na to da je na mjestima bilo pukotina, te ispucanih područja, za analizu je uzet središnji dio slike, koji je zatim odrezan i podijeljen na dva dijela (slika 3.1.), da bi se pokazala razlika između sferulita iz vanjskog i unutrašnjeg dijela stijene.



Slika 3.1. Dva statistički obrađena područja, područje A je vanjski, a B unutrašnji dio stijene. PPL, N-

Obje slike su potom obrađene u programu AxioVision 4.8 (tvrtke Carl Zeiss Microimaging), na način da su se pomoću Wacom grafičkog tableta ručnom obradom zaokružili svi sferuliti na slikama, te je program izračunao njihovu površinu (slika 3.2.).



Slika 3.2. Sferuliti su mjereni tako da su zaokruživani (crveno na slikama), te je program AxioVision automatski izračunao površinu svakog sferulita. Površina slika je određena tako što su izmjerene dužina i širina svake slike posebno. PPL N-

Tablica, koja je bila produkt mjerenja, prenesena je u tablični kalkulator Excel, gdje su podaci dalje obrađeni na način da su uklonjeni nepotrebni podaci koje je program AxioVision 4.8 ponudio, te su oblikovani u tablicu za lakše rukovanje i obradu.

Podaci su zatim uneseni u program za statističku obradu Past (<http://folk.uio.no/ohammer/past/>), gdje se relativno brzo došlo do osnovnih podataka o uzorcima, uključujući i razne grafikone, koji mogu biti vrlo indikativni pri donošenju zaključaka. Također je izmjerena i površina svake slike, kako bi se došlo do informacije o ukupnoj zastupljenosti sferulita na slikama.

Od statističkih parametara korišteni su oni osnovni, koji su davali najviše informacija o uzorku: aritmetička sredina, standardna devijacija, te koeficijenti asimetrije, zaobljenosti i varijacije.

Standardna devijacija opisuje prosječno odstupanje od prosjeka i ona je mjera raspršenosti, u ovom slučaju, podataka o veličini sferulita u istraživanim uzorcima.

Koeficijenti asimetrije i zaobljenosti ukazuju na izgled grafikona, odnosno na njegovu asimetričnost i zaobljenost. Iz koeficijenta asimetrije se može vidjeti kako su podaci raspoređeni oko aritmetičke sredine, a ukoliko se maksimum grafikona poklapa sa aritmetičkom sredinom, znači da su podaci normalno raspoređeni. Ukoliko je maksimum grafikona lijevo od aritmetičke sredine, riječ je o pozitivno asimetričnom rasporedu, a ukoliko je maksimum desno od aritmetičke sredine, radi se o negativno raspoređenim vrijednostima.

Koeficijent zaobljenosti govori o zaobljenosti vrha grafikona. Zaobljenost grafikona može biti normalna, zaobljenija od normalne i vrh grafikona može biti spušteniji od normalnog. Takav izgled je posljedica veličina sferulita i zastupljenosti tih veličina u promatranim uzorcima.

Koeficijent varijacije daje sliku o tome koliko podaci variraju među sobom, odnosno, kolika je razlika između pojedinih dobivenih podataka.

Svi rezultati statističke obrade prikazani su tablično i grafički u poglavlju 4.3.

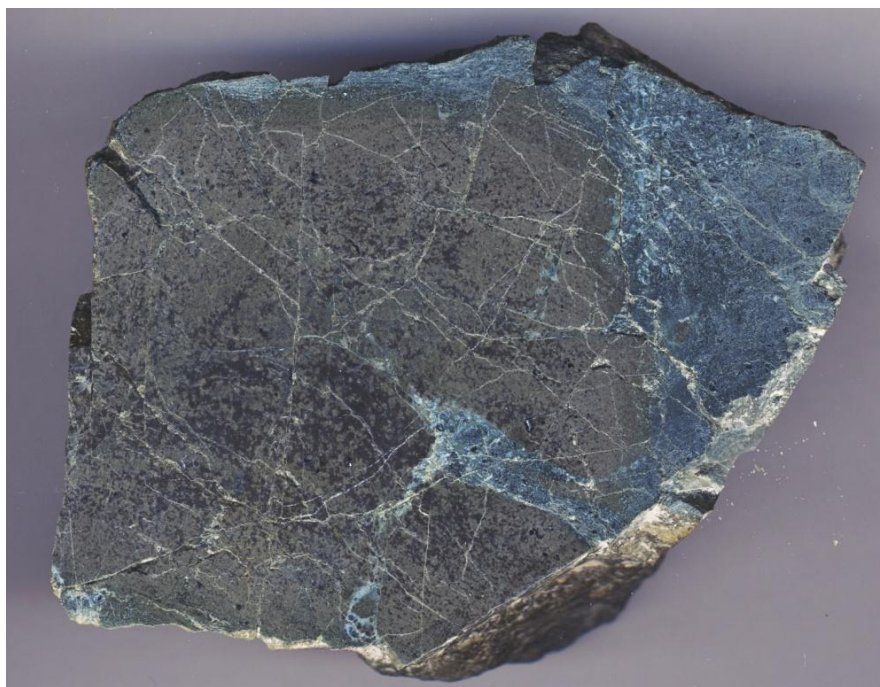
4. REZULTATI

4.1. MAKROSKOPSKI OPIS UZORAKA

Makroskopskim pregledom utvrđeno je da su sva tri uzorka relativno slična, ukoliko se ne uzme u obzir svježi presjek. Tamni minerali su izmjenjeni u zeleni sjajni mineral sa izraženom kalavosti, koji je određen kao klorit. Bazaltni hijaloklastit je nešto manje izmjenjen od druga dva uzorka, te pokazuje tamnu boju i masivnu teksturu.

Ipak, na svježim presjecima se vidi razlika između uzoraka.

Bazaltni hijaloklastit (slika 4.1.) sadrži eliptične crvene fragmente u sebi, između kojih se nalazi sivi matriks. Strukture makroskopski nisu vidljive, ali ako se pogleda pomoću terenske lupe, u fragmentima se mogu vidjeti crne točkice nejednakih veličina, koje su makroskopski pripisane izmjenama. U dijelovima stijene tvore i velike nakupine, pa su cijela područja crvenih fragmenata tamnija. U matriksu se naziru ostaci makroskopski neprepoznatljivog materijala, što čini matriks nejednake boje i strukture. Cijeli je uzorak dosta oštećen i ispucan, što je uzrokovalo probleme pri izradi preparata.



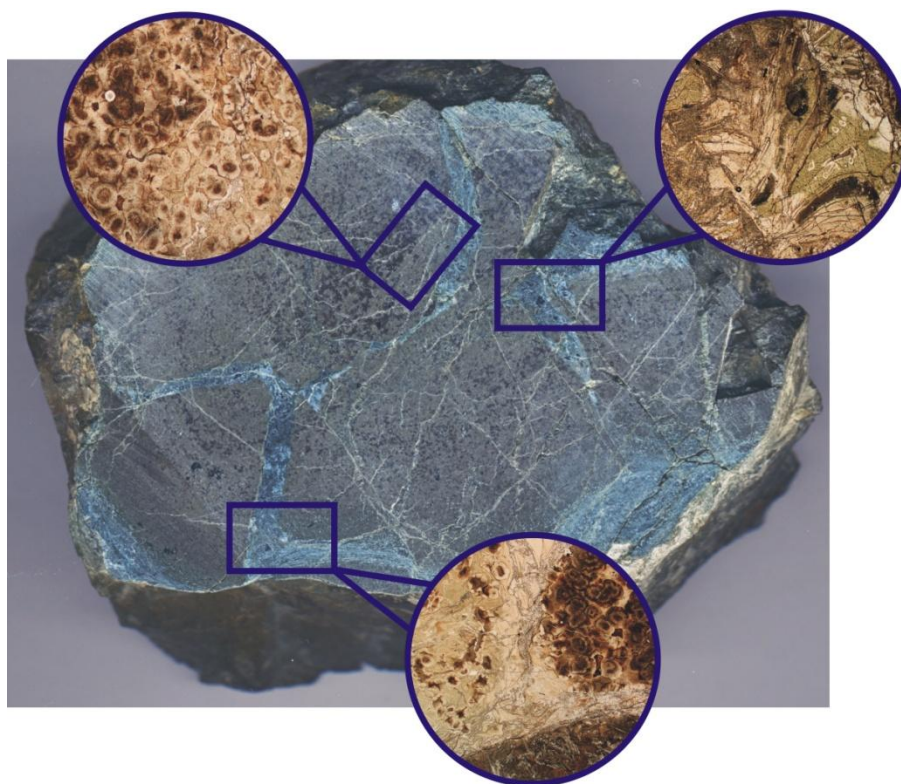
Slika 4.1. Makroskopski prikaz bazaltnog hijaloklastita sa izraženom sferulitnom strukturom (u crvenim dijelovima) i prisutnom fluidalnom strukturom (u sivozelenim dijelovima). Širina slike je 20 cm.

Dijabaz i dijabazni hijaloklastit su makroskopski gotovo identični. Oba su, kao što je već spomenuto, izmjenjeni površinski, a na svježim presjecima se vidi ofitska struktura, odnosno štapićasta zrna plagioklasa unutar sitnozrnatog matriksa od melanokraskih minerala, koje nije moguće odrediti, ali s obzirom na izmjene u klorit na površini, može se indirektno zaključiti da je riječ o klinopiroksenu.

4.2. MIKROFIZIOGRAFIJA UZORAKA

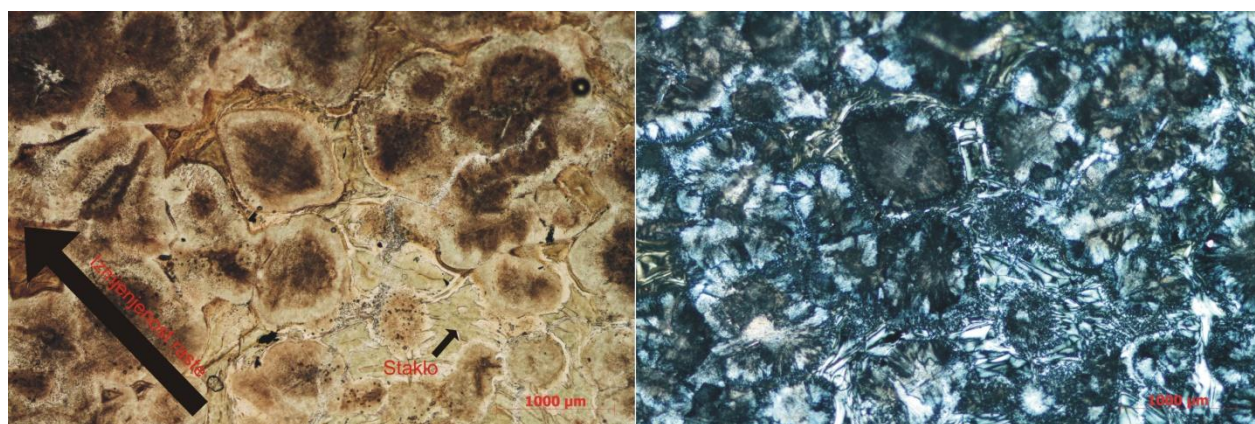
4.2.1. Bazaltni hijaloklastit

Makroskopska podijeljenost stijene na crvene i sive dijelove vidljiva je i u mikroskopskom preparatu. Sivim dijelovima dominira fluidalna struktura, dok je za tamnije dijelove karakteristična sferulitna struktura. Za promjenu u boji na crvenim dijelovima makroskopski, odgovorne su izmjene na sferulitnim područjima vidljive mikroskopski (slika 4.2.).



Slika 4.2. Usporedba mikroskopskog i makroskopskog izgleda uzorka, s naglaskom na raznolikost struktura, prikazanim na povećanim dijelovima. U donjem krugu vide se kontakti između različitih dijelova stijene, dok se u gornjim krugovima vide sferulitna (lijevo) i fluidalna struktura (desno). Krugovi sa izdvojenim slikama preparata: PPL, N-.

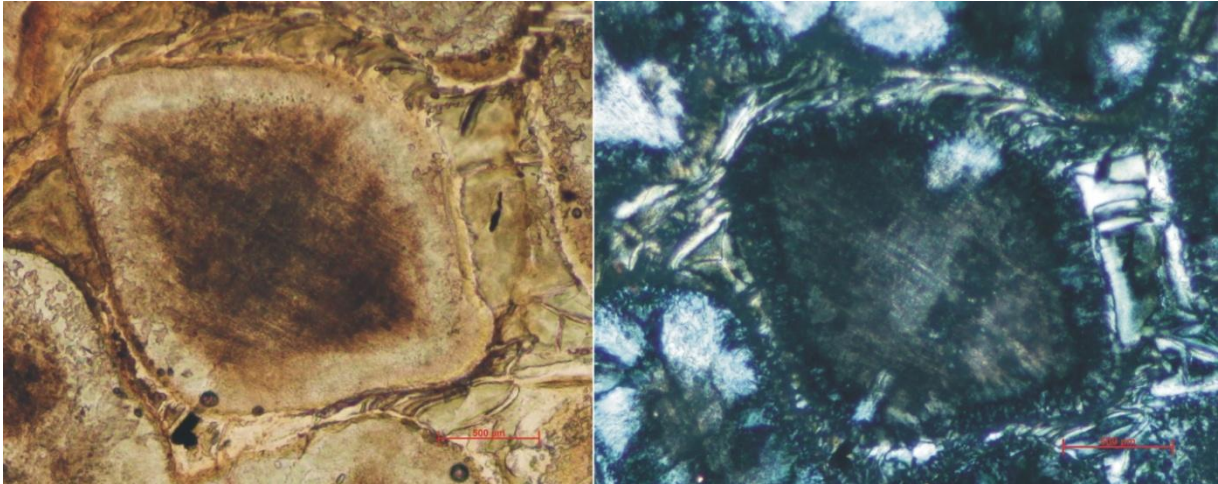
U preparatu od mineralnih vrsta dominiraju devitrificirani sferuliti (~50% vol.), koji su po sastavu plagioklasi i staklo (nedevidirificirani dijelovi). Oko njih se nalazi smeđi matriks (~20% vol.), kojeg nije moguće odrediti mikroskopski. Sferuliti su uglavnom izmjenjeni od jezgre prema rubu, s tim da su sve izmjenjeniji, što su više udaljeni od stakla, koje je određeno kao ostatak taljevine (~30% vol.). Na izmjenjenim dijelovima se vide samo radijalno zrakaste nakupine materijala, ali ne i cijeli sferuliti (slika 4.3.). Oko sferulita se mogu naći pojedini dendritični i skeletalni kristali, ali većinom u tamnijim (izmjenjenijim) dijelovima. Kao što je slučaj i sa ostalim izmjenama minerala u preparatima, ni ovdje nije moguće točno reći u koji mineral su izmjenjene jezgre sferulita.



Slika 4.3. Sferuliti okruženi staklom u preparatima i izmjenjeni iznutra prema van. Na lijevoj slici je strelicom označen smjer u kojem sferuliti bivaju više izmjenjeni. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

S obzirom da je rub sferulita relativno očuvan, vidljiva je radijalna zrakastost i drukčija orijentiranost plagioklasa u njima (slika 4.4.). Ti plagioklasi nastali su procesom devitrifikacije – izmjene stakla u plagioklase, odnosno kristaliničnu tvar. Taj proces je čest u vulkanskim staklima, jer je staklo samo po sebi metastabilno kao amorfna tvar, te teži organiziranju u kristaliničnu strukturu.

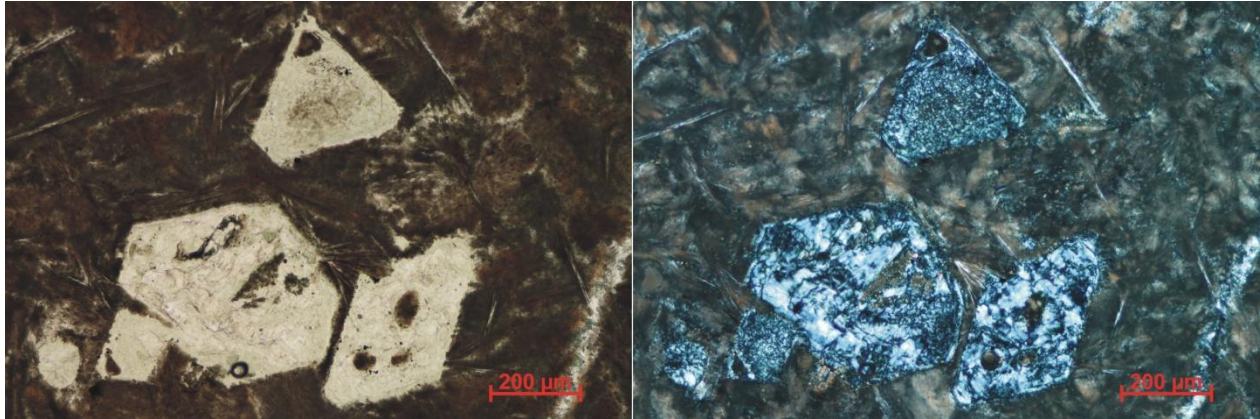
Staklo, koje okružuje područja sferulita, ima izrazito fluidalnu strukturu i žuto–zelene je boje.



Slika 4.4. Uvećani prikaz sferulita i okolnog stakla, koje je ostatak taljevine iz koje su nastali sferuliti, a ima fluidalnu strukturu. Na slici desno se vidi izmjena u plagioklase uz rub sferulita, dok sredinom prevladava (na obje slike) neodređena izmjena minerala. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

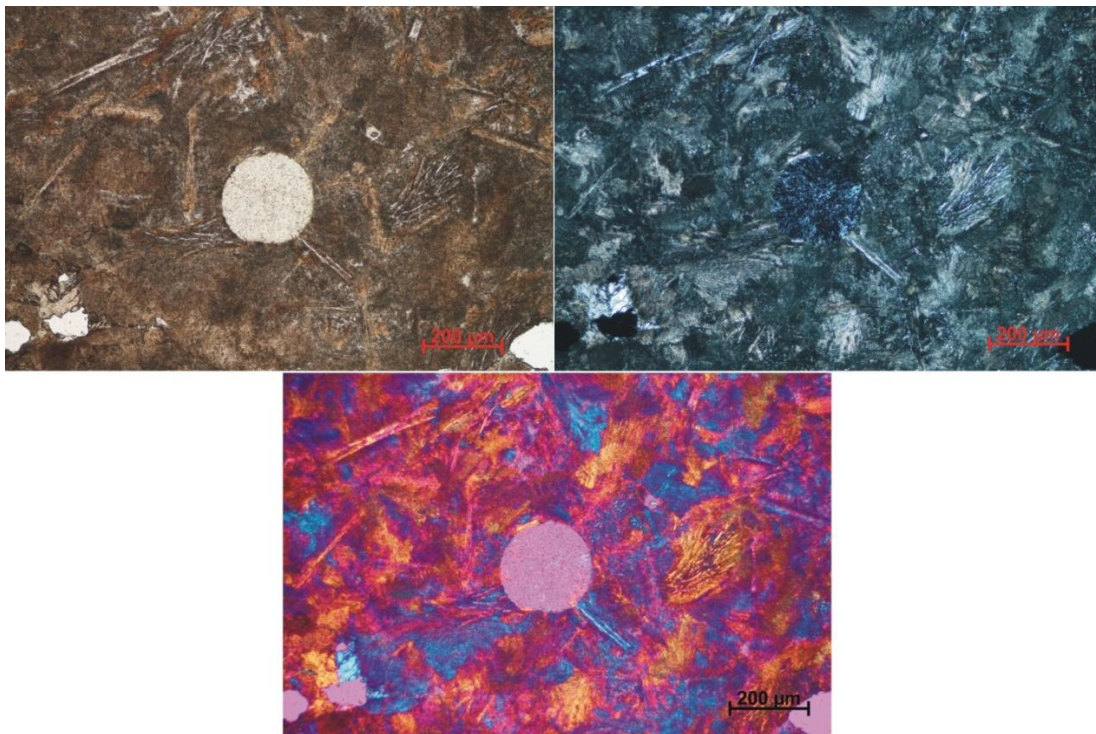
Još jedna zanimljivost u ovim preparatima su zelenkasti idiomorfni oblici. S obzirom na njihovu boju, raznolikost i način pojavljivanja, može se zaključiti da je riječ o pseudomorfnim oblicima koji sadrže mineral iddingsit. To je mineral koji je lamelarne strukture, u kojoj se izmjenjuju smektit i klorit, a redovno sadrži i goethit (Brown i Stephen, 1959 citirano prema Wilshire, 1958). Često prati bazalte, kao izmjena olivina (Brown i Stephen, 1959 citirano prema Winchell, 1951), što objašnjava njegovo pojavljivanje u bazaltnom dijelu hijaloklastita. Iako nije moguće reći točno po kojim mineralima se pseudomorfoza dogodila, najvjerojatnije je riječ o plagioklasima u barem jednom slučaju (trokutasti presjek). Većina ih sadrži uklopke okolnog materijala, što ukazuje na to da su nastali neposredno nakon kristalizacije okolnih sferulita (slika 4.5.).

Osim idiomorfnih oblika, u preparatima se nalaze i okrugle forme, potpuno drukčije od sferulita koji ih okružuju. Količinski ih ima vrlo malo, ne više od četiri zrna po preparatu. Navedene okrugle forme su, kao i idiomorfni oblici u potpunosti amorfni, sa razlikom u tome da okrugle forme nisu gotovo uopće izmjenjene, te ne sadrže uklopke, a njihova homogenost dolazi do izražaja i sa uključenim analizatorom (slika 4.6.).



Slika 4.5. Različiti euhedralni oblici (pseudoforme) ispunjeni iddingsitom sa uklopcima okolnog materijala. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

Stijena se zbog svojih struktura i različitih domena koje sadrži klasificira kao bazaltni hijaloklastit, odnosno stijena koja u sebi sadrži većinom, ali ne i sve, bazaltne fragmente, koji su spojeni hijalinskim (staklastim) matriksom.

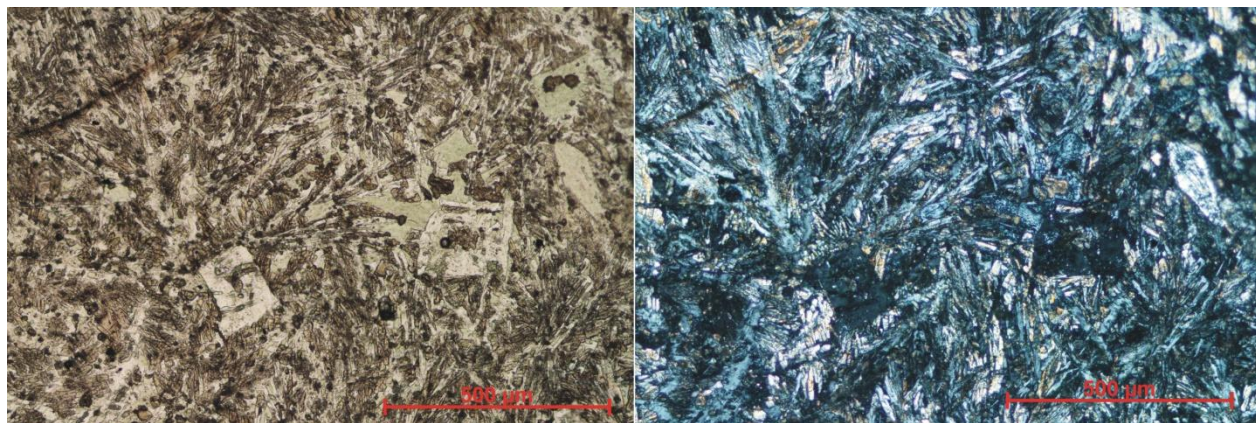


Slika 4.6. Prikaz okrugl forme koji se razlikuje od ostalih sferulita u preparatu, a sa kompenzatorom (gipsni listić, $\lambda = 532 \text{ nm}$) je ružičast, što ukazuje na to da je potpuno amorfan. PPL N- (gore lijevo), PPL N+ (gore desno), PPL N+ c+ (dolje).

4.2.2. Dijabaz

Struktura ovog uzorka znatno se razlikuje od bazalnog hijaloklastita, iako su po mineralnom sastavu slični. Ovdje također prevladavaju plagioklasi (~50% vol.), dok je matriks sačinjen od piroksena (~40% vol.) i stakla (~10% vol.), pa se može reći da je struktura ofitska. Ovo je najhomogeniji uzorak, jer je ista struktura podjednako zastupljena u cijelom preparatu.

Razlikuju se tri vrste plagioklasa (slika 4.7.). Prvi je dendritičan i najviše zastupljen u preparatu, dok je drugi gotovo euhedralan, iako ponešto izmjenjen. Treći je skeletalni ili izduženi plagioklas, čija su zrna često međusobno ukrštena.



Slika 4.7. Mikroskopske slike preparata u kojoj su vidljive navedene vrste plagioklasa s naglaskom na tabularne kristale (u središtu vidnog polja). PPL, N- (lijevo), PPL N+ (desno).

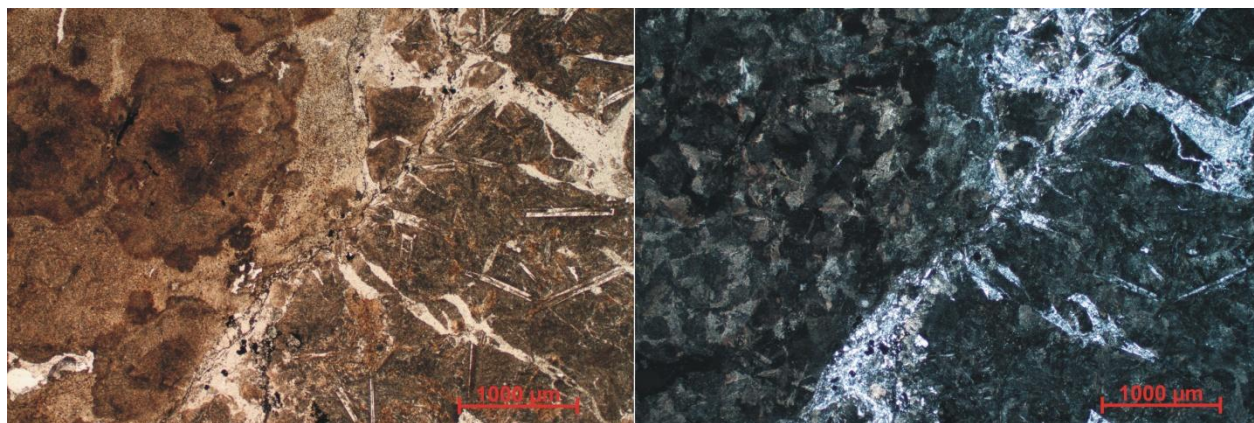
Pirokseni su žuto–smeđe boje, a sa analizatorom žute do sive interferencijske boje 1. reda. Ipak, nije moguće pobliže odrediti o kojem se piroksenu radi, najviše zbog toga što su izrazito sitni, ali i zbog izmjenjenosti.

Kroz cijeli preparat su vidljiva zrna opákog minerala, kojeg nije moguće odrediti u ovom preparatu, jer su premala. Ipak, s obzirom na ostale uzorke, može se zaključiti da je riječ o piritu, koji je kristalizirao kao sekundarni mineral.

Stijena se klasificira kao dijabaz, zbog svoje homogene ofitske strukture, koja je vidljiva u cijelom preparatu, te mineralnom sastavu, koji je karakterističan za dijabaz.

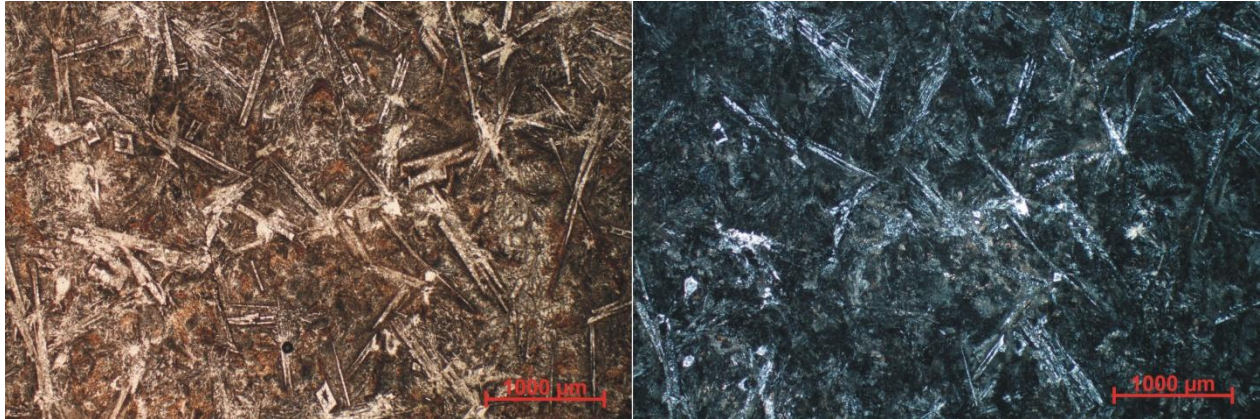
4.2.3. Dijabazni hijaloklastit

U ovom uzorku se mogu naći tri različite strukture. Dominantna je ofitska, kao i kod dijabaza, ali fluidalna struktura okružuje takva područja kroz cijeli uzorak. Na nekim preparatima se može primjetiti čak i sferulitna struktura, ali ona je uglavnom ograničena na rubove i razlikuje se u odnosu na onu kod bazalnog hijaloklastita po količini sferulita i njihovoj izmjenjenosti. S obzirom na takvu količinu raznih struktura, mogu se promatrati kontakti između njih (slika 4.8.). Upravo na tim kontaktima se nalazi sitnozrnati matriks koji se najbolje vidi sa uključenim analizatorom (slika 4.8., desno), visokih interferencijskih boja.



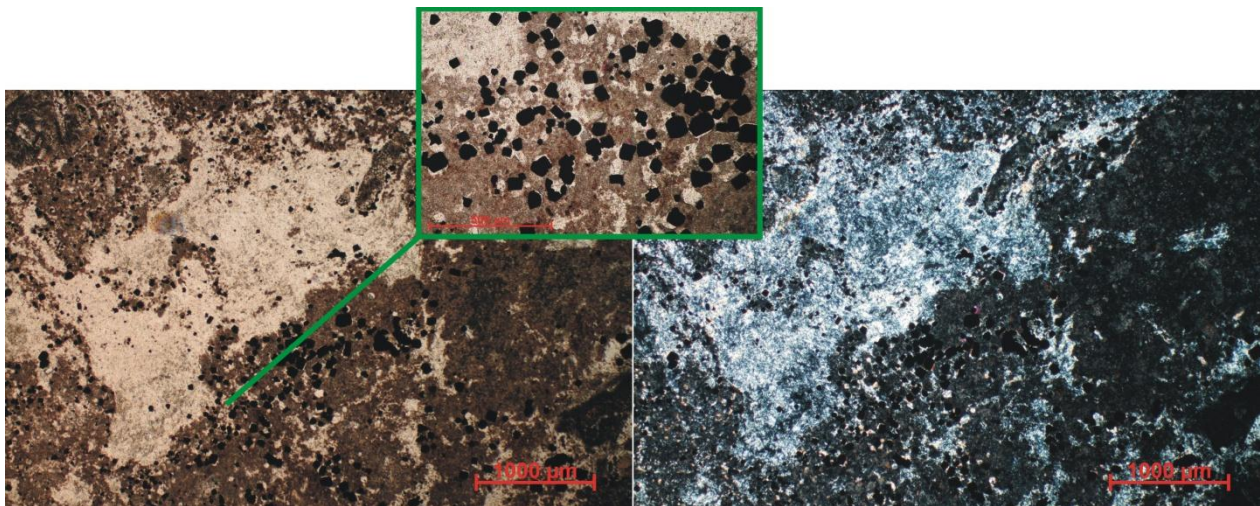
Slika 4.8. Dvije različite strukture u stijeni i kontakt između njih, na kojem prevladava sitnozrnata tvar sa visokim interferencijskim bojama. Sferuliti su iznimno izmjenjeni i veći u odnosu na bazalni hijaloklastit. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

Najzastupljeniji mineral je opet plagioklas (~50% vol.), dok međuprostor zauzima tamni matriks i staklo, čije količine variraju između preparata. Tamni matriks je teško odrediv, ali je najvjerojatnije riječ o piroksenu, kojeg je moguće odrediti po analogiji sa dijabazom. Mogu se opaziti četiri različite vrste plagioklasa, s tim da su sferuliti, kao što je već prije spomenuto, u rubnim dijelovima i nisu povezani sa druge tri vrste. Najzastupljeniji su dendritični i izduženi (slika 4.9.), a u odnosu na dijabaz, ima i više euhedralnih plagioklasa, čije izmjene, kao i u dijabazu, počinju od središnjeg dijela kristala (slika 4.7.).



Slika 4.9. Na slici se vide različiti habitusi plagioklasa u preparatu. Prevladavaju štapičasti plagioklasi, te je vidljiv i poneki tabularni kristal. Dendritični plagioklasi su uglavnom između navedene druge dvije vrste. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

U cijelom preparatu su vidljive razne izmjene minerala, koje su u pravilu praćene sa euhedralnim zrnima pirita kvadratnog i trokutastog presjeka (slika 4.10.). Zbog nemogućnosti pobliže mikroskopske odredbe tih sekundarnih minerala, nije sigurno o kakvim je izmjenama riječ.



Slika 4.10. Prikaz izmjena u preparatima, koje prate i sekundarni euhedralni kristali pirita, koji se mogu pobliže vidjeti u izdvojenom području. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

Stijena se može klasificirati kao dijabazni hijaloklastit, jer sadrži veliku većinu dijabaznih fragmenata, uz pokoju bazaltni (sferulitni) fragment, spojene staklastim matriksom.

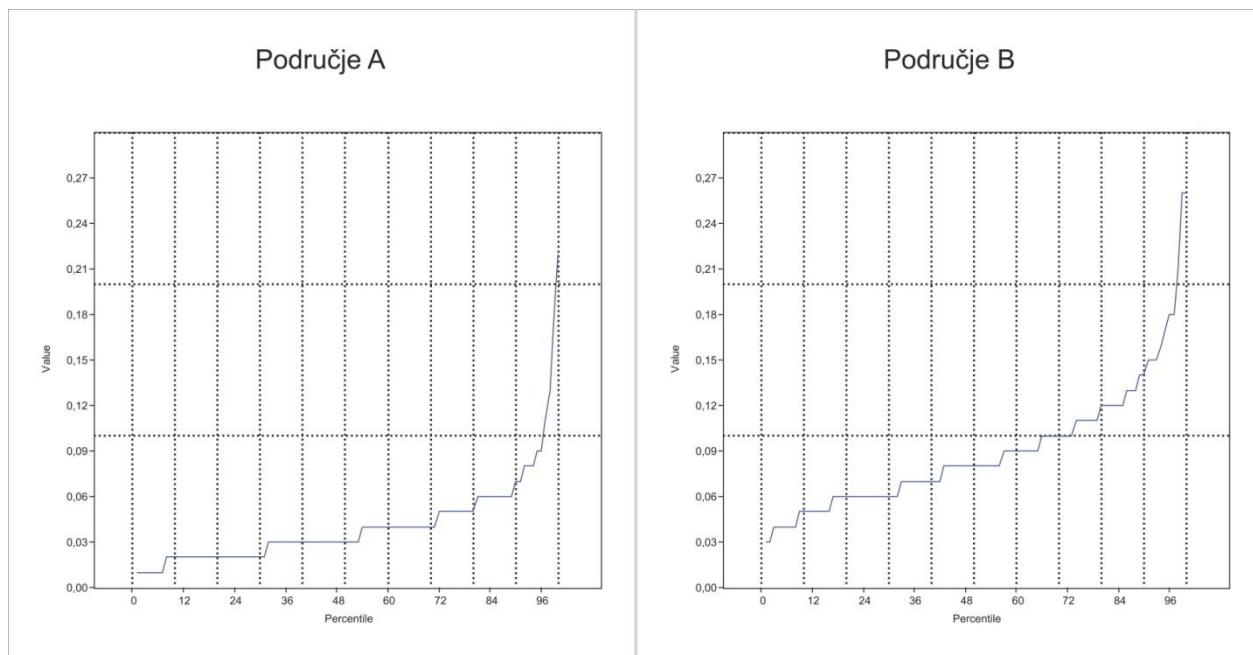
4.3. STATISTIČKA OBRADA

Statističkom obradom podataka kvantificirane su određene vrijednosti vezane uz dimenzije zrna, te su napravljeni grafikoni, koji numerički opisuju raspored sferulita i njihov odnos prema vanjskim utjecajima odgovornima za njihov nastanak. Iz Tablice 1 se vidi razlika u dva područja, prikazana na slici 3.1.

Tablica 1
Osnovni statistički podaci dobiveni za obrađena područja

	Područje A	Područje B
N (broj sferulita na slici)	218	103
Zbroj površina sferulita (mm ²)	8,650	9,090
Aritmetička sredina površina sferulita (mm ²)	0,039	0,088
Standardna devijacija	0,027	0,039
Medijan	0,030	0,080
Koeficijent asimetrije	2,766	1,452
Koeficijent zaobljenosti	12,058	3,258
Koeficijent varijacije	69,763	44,608
Površina slike (dijela preparata) (mm ²)	27,643	14, 131
Prekrivenost sferulitima (%)	31,29	64,32

Iz aritmetičke sredine vidi se razlika u veličini sferulita, koja je jasno izražena i preko percentila, što se najbolje vidi na slici 4.11. Na području A dolazi do naglog porasta veličina oko 96. percentila, dok je taj skok manje izražen na području B, jer je riječ o većim sferulitima, koji su bolje raspoređeni. Razlika u srednjoj veličini sferulita između dva područja je vidljiva i iz visine grafikona na slici 4.11., jer područje B sadrži generalno veće sferulite.

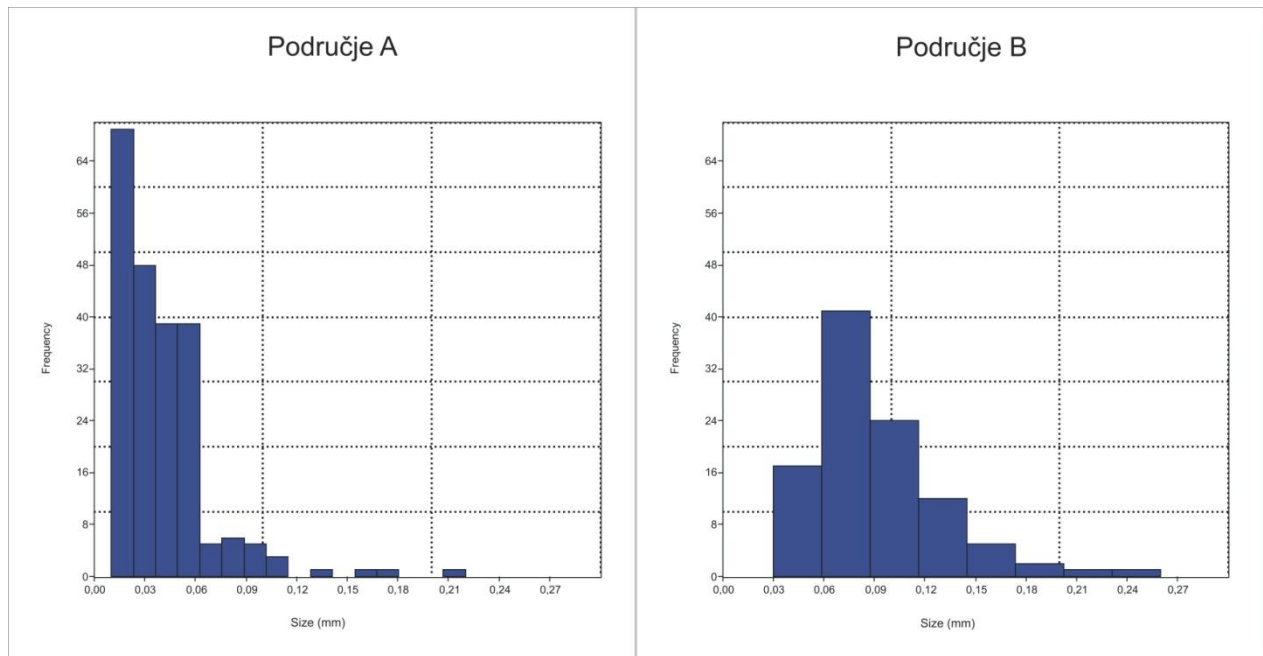


Slika 4.11. Grafikoni koji pokazuju percentile u odnosu na veličinu sferulita, iz kojih se može vidjeti povećana zastupljenost većih sferulita u području B, u odnosu na područje A.

Distribucija podataka opisana je najbolje koeficijentima zaobljenosti i varijacije, gdje je uočljiva znatna razlika između podataka. Iako su oba područja pozitivno asimetrično raspoređena, što se vidi i iz tablice 1, gdje je koeficijent asimetrije različit od 0, kod područja A je ta asimetrija puno jače izražena, što ukazuje na to da veličine sferulita nisu jednako raspoređene u odnosu na srednju vrijednost, već prevladavaju manji sferuliti.

Razlika je velika i kod koeficijenta zaobljenosti, koji je kod područja A gotovo četiri puta veći (tablica 1), što uzrokuje to da je grafikon područja B znatno „spušteniji“ (slika 4.12.), jer su podaci o veličinama sličniji nego za područje A.

Histogrami (slika 4.12.) pokazuju različit odnos površine (mm^2) i broja sferulita na područjima A i B. Histogram za područje A pokazuje znatno veći broj manjih sferulita od područja B, kod kojeg prevladavaju sferuliti relativno srednje veličine. Još jedna izrazita razlika između njih je to što se na histogramu područja B vidi znatno pravilnija raspodjela veličina, što nije slučaj za područje A. Sve to potvrđuje i koeficijent varijacije, koji je izrazito velik za područje A, što ukazuje na veću varijabilnost između veličine sferulita.



Slika 4.12. Histogrami dobiveni za oba ispitana područja. Raspodjeljenost veličina sferulita i njihovih količina je znatno različita, te se vidi da u području A prevladavaju manji sferuliti.

Kako bi se odredila i pokrivenost površine sferulitima, izmjerena je površina svake slike i podijeljena sa zbrojem ukupne površine sferulita. Tako je dobiveno da je područje B prekriveno sferulitima za više od 30% u odnosu na područje A, kao što se i vidi iz podataka u tablici 1. Taj podatak će biti vrlo bitan u kasnijoj raspravi, kao potvrda povezanosti pothlađivanja i blizine njegovog izvora sa difuzijom i rastom sferulita u istraživanim uzorcima.

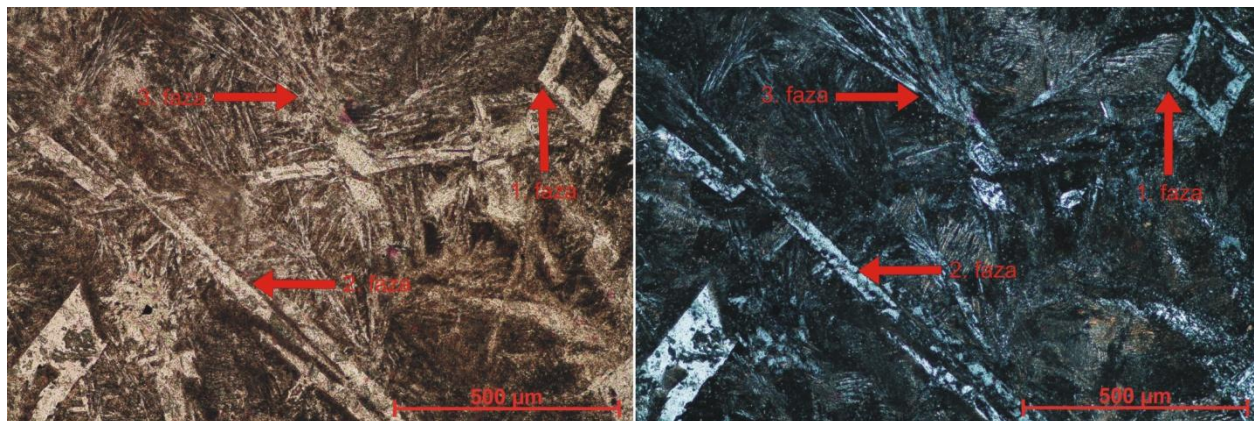
5. RASPRAVA

5.1. Strukture i pothlađivanje

Glavnim uzrokom raznolikosti strukture i habitusa minerala, pogotovo plagioklasa, smatra se proces pothlađivanja (engl. undercooling/supercooling). Prema definiciji Candela (1997), undercooling ili pothlađivanje je razlika između temperature na kojoj je taljevina saturirana u odnosu na mineral i temperature na kojoj dolazi do nukleacije i rasta minerala. Isti autor navodi i promjene i evoluciju struktura u odnosu na stupanj pothlađivanja. Tako se u bazičnoj taljevini, jednako kao i u uzorcima istraživanim u ovom radu, razlikuju dijabazna struktura, vezana za srednji stupanj pothlađivanja i bazaltna struktura vezana za visoki stupanj pothlađivanja. Gabroidna struktura koju navodi autor, karakteristična za niski stupanj pothlađivanja, nije pronađena na lokalitetu.

U obrađenim uzorcima, može se primjetiti napredovanje pothlađivanja u četiri faze, kao što su to opisali i Muncill i Lasaga (1987) nakon provedene eksperimentalne metode na kristalima plagioklasa u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Navedene temperature nisu u potpunosti realne, jer nisu dobivene laboratorijskom obradom istraživanih uzoraka, ali su ipak iskorištene, jer su autori u svom članku provodili eksperimente na plagioklasima sa različitom zastupljenosti anortitne komponente. S obzirom na to da su nakon provedenih istraživanja dobili podjednake rezultate i zaključili da sastav plagioklasa (misleći pritom najviše na udio anortitne komponente) ne utječe na pothlađivanje i sam rast kristala i nukleaciju, te temperature mogu biti uzete kao relevantne, jer se može pretpostaviti da odstupanja u realnom sustavu ne bi bila toliko velika da utječu na točnost.

Prva faza pothlađivanja se po tim autorima odvija na temperaturi koja je za 40 stupnjeva niža od ravnotežne, odnosno $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$, te se stvaraju tabularni kristali, odnosno pravilna, euhedralna kristalna zrna. Takva se pojava može opaziti u mikroskopskim preparatima dijabaza, ali su zrna brojnija u dijabaznom hijaloklastitu. Većinom su to pravokutni ili rombični presjeci plagioklasa (slika 5.1.).



Slika 5.1. Prikaz prve tri faze pothlađivanja u mikroskopskom preparatu uzorka dijabaznog hijaloklastita. U prvoj fazi nastaju tabularni, u drugoj skeletalni, a u trećoj dendritični kristali. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

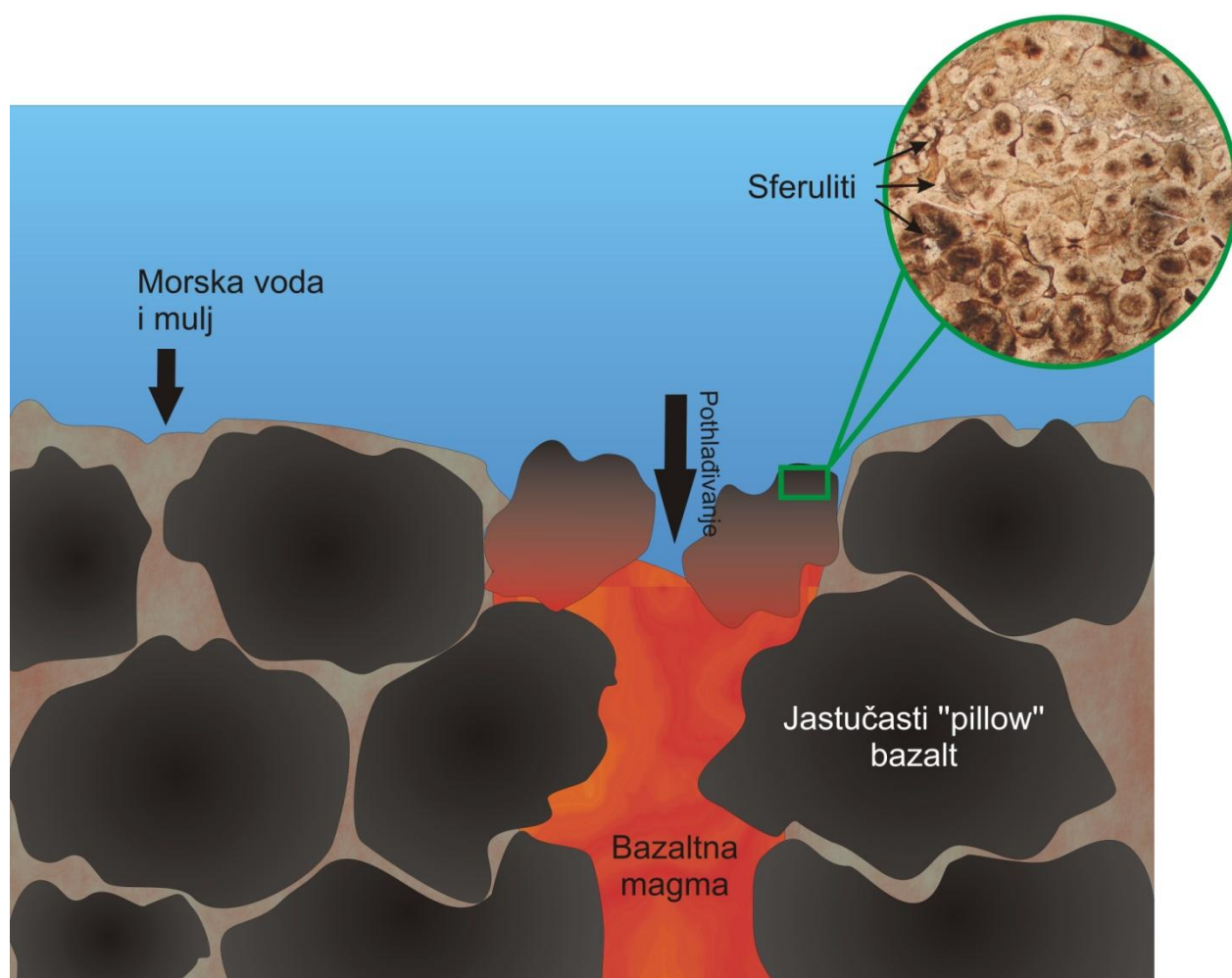
Drugu fazu obilježava $\Delta T = 40\text{--}60^\circ\text{C}$ i nastanak skeletalnih (izduženih) kristala. Takvi habitusi nađeni su u sva tri uzorka, ali najčešći su u dijabaznom hijaloklastitu (slika 5.1.). Kod njih se također mogu uočiti izmjene, ali nešto manje nego kod tabularnih kristala.

Za treću fazu karakteristični su dendritični kristali plagioklasa, koji nastaju na $\Delta T = 60\text{--}80^\circ\text{C}$. Takvi kristali također su zastupljeni u svim preparatima, ali ipak prevladavaju u dijabazu i dijabaznom hijaloklastitu (slika 5.1.), dok se u bazaltnom hijaloklastitu nalaze u izmjenjenijim dijelovima, između sferulita, u puno manjim količinama, nego u druga dva uzorka.

Četvrta faza je ona u kojoj nastaju radijalni oblici, odnosno sferuliti. Da bi takva faza uopće nastala, potrebno je naglo spuštanje temperature za oko 80°C . Takvi oblici nalaze se najviše u bazaltnom hijaloklastitu, ali se mogu opaziti i na nekim preparatima napravljenima iz dijabaznog hijaloklastita. Oni su posebno zanimljivi, jer se po njihovom rasporedu i veličini može zaključiti o smjeru pothlađivanja, povišenju temperature i relativnim brzinama hlađenja.

Mogući uzroci pothlađivanja su eksolucija volatila ili miješanje magme, ili kombinacija oba događaja (Hort, 1998). U ovom slučaju, s obzirom na to da su uzorci dio gornjeg dijela krednog ofiolitnog kompleksa Medvednice, jednom kad je došlo do kontakta bazaltne magme i morske vode i mulja, nastupilo je naglo pothlađivanje,

stvarajući sferulite (slika 5.2.). U izdvojenom krugu nalazi se slika preparata koji je okrenut onako kako se smatra da je bio i njegov realan položaj pri kristalizaciji. Tako su manji sferuliti bili bliži kontaktu s vodom, dok su veći i izmjenjeniji sferuliti bili u unutrašnjosti stijene. Statističkom obradom je takav položaj u originalnoj stijeni i potvrđen. U izmjenjenijim unutrašnjim dijelovima sferulitnih domena hijaloklastičnog bazalta, u nekim se preparatima mogu uočiti poneki skeletalni i dendritični kristali plagioklasa, koji su najvjerojatnije ostaci nižih faza pothlađivanja, ali sama činjenica da ih je toliko malo, u odnosu na dijabazne domene i sam dijabaz, ukazuje na znatno veći stupanj pothlađivanja kod jastučastih bazalta kada se uspoređi sa dijabazom.

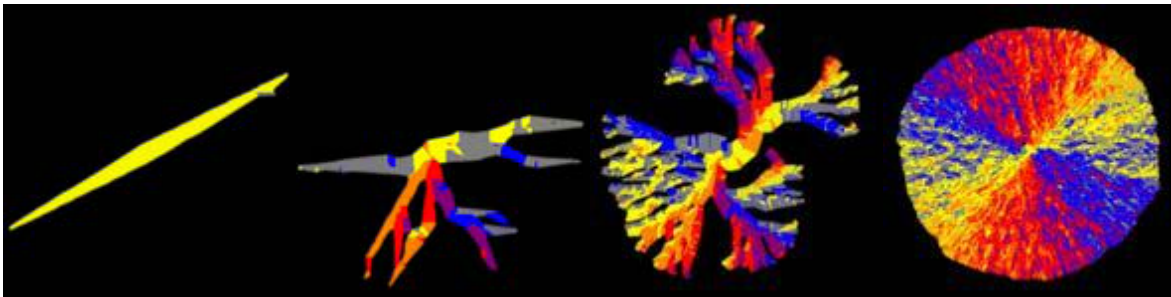


Slika 5.2. Nastanak pillow bazalta i mikroskopski prikaz sferulita koji nastaju kao posljedica pothlađivanja. Smatra se da je morska voda, pa i mulj glavni uzrok pothlađivanja, kao što je prikazao i na slici. Slika u krugu: PPL N-.

5.2. Rast i nukleacija sferulita

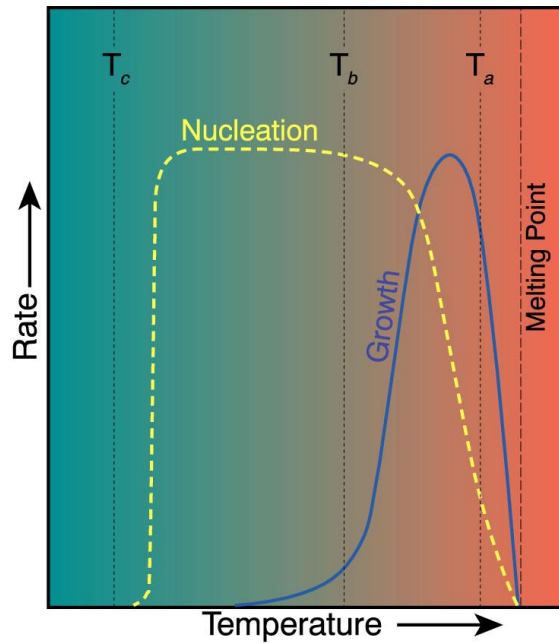
Watkins et al. (2009) smatraju da na rast kristala najviše utječe difuzija, te da brzina rasta sferulita pada sa porastom veličine sferulita, kao posljedica te difuzije, odnosno da do pada brzine rasta sferulita dolazi zbog lokalnog smanjenja koncentracije materijala u taljevini oko kristala u nastanku. To bi objasnilo zašto se brzina rasta povećava sa pothlađivanjem ispod likvidusa, prelazi preko maksimuma i na kraju opada sa daljnjim pothlađivanjem, kao što su to opisali Muncill i Lasaga (1987).

Što se tiče samog rasta sferulita, oni nastaju iz faze dendritičnih kristala, koja i sama nastaje u uvjetima daleko od ravnotežnog stanja, u uvjetima supersaturacije, gdje je prva faza skeletni (izduženi) kristal (Gránásy et al., 2005)–(slika 5.3.).



Slika 5.3. Prikazan je nastanak sferulita od skeletnog kristala, preko dendritičnog oblika. Različito obojani dijelovi označavaju različitu orijentiranost kristala u njemu. Realno stanje u istraživanim uzorcima ovog rada se nešto razlikuje jer su plagioklasi nastali devitrifikacijom iz vulkanskog stakla. Preuzeto iz Gránásy et al. (2005).

Da bi kristal uopće mogao rasti, potrebna je jezgra (nukleus). Nukleacija kristala je funkcija povezana sa stupnjem pothlađivanja, odnosno ΔT . Vjerojatnost nukleacije je relativno mala na nižim temperaturama, te i sporije napreduje, dok je na visokim temperaturama nukleacija brža i češća, ali i dalje rijetka (Swanson et al., 1989). Tako se na slici 5.4. vidi da rast nukleacijskih jezgara napreduje sa spuštanjem temperature, jednako kao i rast kristala. Unatoč tome, u jednom trenutku dolazi do naglog pada brzine rasta kristala, dok broj nukleacijskih jezgara nastavlja rasti jednakom brzinom. Kao što je već prije spomenuto, to je posljedica difuzije oko kristala, koja napreduje sve dok sav okolni materijal ne bude potrošen.



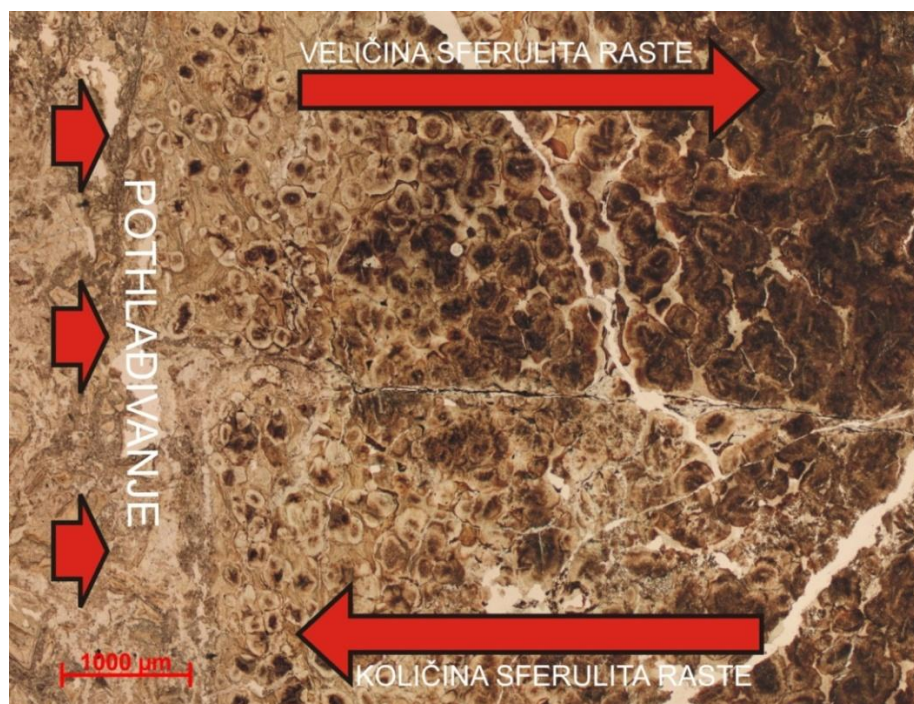
Slika 5.4. Odnos promjene temperature pri pothlađivanju i rasta kristala i količine nukleacijskih jezgara. Slika preuzeta iz Winter (2001). Rate = stupanj (nukleacije ili rasta), growth = rast, nucleation = nukleacija – nastanak jezgri, melting point = talište.

Prema Brandeis i Jaupart (1987), postoje dvije vrste nukleacije: heterogena i homogena. Heterogena nukleacija se događa tako da čvrsta površina dolazi u kontakt sa tekućinom/taljevinom, pri čemu se ubrzava nastanak jezgre kritične veličine, dok se homogena nukleacija odvija bez uplitanja stranog materijala, kad se prikupi dovoljna količina atoma koji zajedno stvore jezgru. Smatra se da je heterogena nukleacija važna pri manjim temperaturama pothlađivanja (Brandeis i Jaupart, 1987 citirano prema Chalmers, 1977). Vrlo je vjerojatno da se upravo heterogena nukleacija odvijala u istraživanim uzorcima, u trenutku kada je materijal došao u kontakt s morskom vodom.

Ipak, da bi se otkrila točna povijest hlađenja, potrebno je znati koliki je broj nukleacijskih jezgara postojao prije početka pothlađivanja, za što je potrebno znati što se točno događalo sa magmom prije erupcije (Faure et al., 2003). Takvi podaci često nisu dostupni, pa se zato do podataka o temperaturama pothlađivanja i njihovim utjecajima na strukture najviše doznaje putem eksperimentalne petrologije.

S obzirom na to da su uzorci u ovom radu realni i cilj istraživanja je doznati kako su se ponašale stijene pri pothlađivanju na ovom lokalitetu, napravljena je statistička obrada podataka, kako bi se dokazala već objašnjena veza između pothlađivanja i

nukleacije i rasta. Ta je pojava vidljiva, ne samo u mikroskopskim preparatima, nego i u rezultatima dobivene statistike (tablica 1, slika 4.10., slika 4.11.). Kako pothlađivanje na slici 5.5. dolazi s lijeva, temperatura prvo pada na toj strani, time ne ostavljajući vremena za kristalizaciju, ali i potpunu difuziju. Tako se na lijevoj strani slike mogu vidjeti manji sferuliti, koji nisu uspjeli potrošiti sav okolni materijal, te se taj materijal nalazi skrtnut oko njih, sa izraženom fluidalnom strukturom. Sličan je izgled mikroskopskih preparata zabilježio i Ewart (1971) u riolitima na Novom Zelandu.



Slika 5.5. Utjecaj pothlađivanja na izgled preparata. Ukoliko izvor pothlađivanja dolazi s lijeva, veličina sferulita će rasti prema desnoj strani, dok će količina sferulita rasti prema izvoru pothlađivanja. PPL N-.

Sferuliti na desnoj strani su bili izloženi uvjetno rečeno manjem pothlađivanju, odnosno, trebalo je nešto više vremena dok se temperatura nije spustila i u unutrašnjem dijelu na istu razinu. Tako se u mikroskopskim preparatima ne vidi ostatak nepotrošene taljevine, upravo zato što su sferuliti potrošili sav okolni materijal potreban za svoj rast. Statistika pokazuje posljedice toga u obliku veće prekrivenosti površine sferulitima, u odnosu na prvi dio, što znači da su imali više vremena za rast. Velika količina njih se sastoji od dva ili više manjih sferulita, koji su u to vrijeme ostali bez mjesta za rast, pa su se spojili u jedan veliki. Ipak, mogu se prepoznati jezgre nekadašnjih sferulita iz kojih se može zaključiti da je došlo do spajanja. Razlika u veličinama između dva obrađena

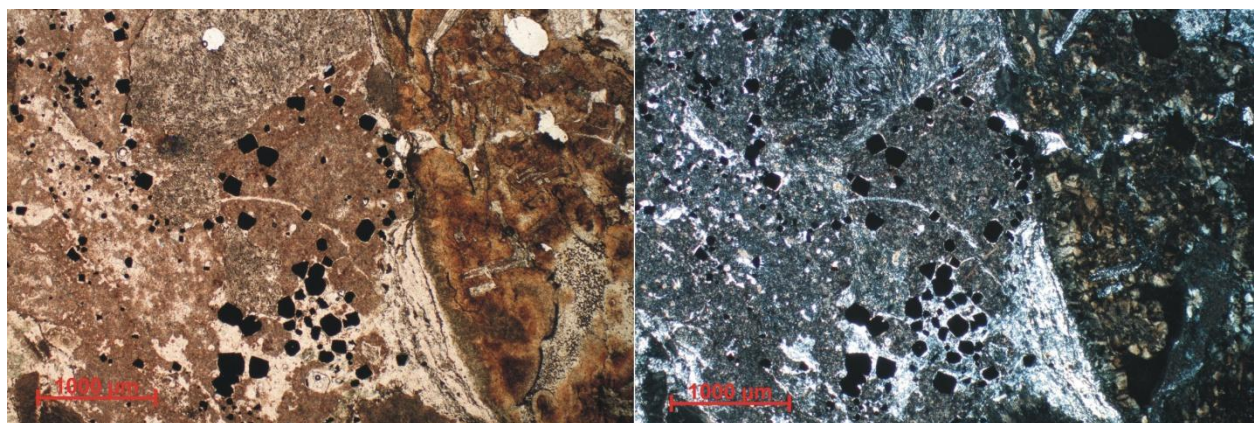
područja se jasno vidi na histogramima (slika 4.11.). Iz tih se histograma vidi i pravilnija raspodjela veličina kod desnog područja na slici 3.1. (područja B), koja je također posljedica dužeg vremena kristalizacije. Viša temperatura u području A uzrokovala je većinom manje veličine sferulita, ali ipak se uspjelo „potkrasti“ nekoliko iznimki, koje su narasle nešto veće, pa samim time utječu i na dobivene rezultate statistike. Zato dolazi do većih odstupanja područja A u koeficijentu asimetrije, zaobljenosti i koeficijentu varijacije, kao što je vidljivo i na histogramima (slika 4.11.). Usprkos tome, statistika je dala očekivane rezultate, koji su u skladu sa hipotezom i koji potvrđuju to da su veličina i nukleacija povezani sa stupnjem pothlađivanja i direktno ovisni o udaljenosti od izvora tog pothlađivanja (u ovom slučaju morske vode).

Amorfne okrugle forme u bazaltnom hijaloklastitu nisu sferuliti, usprkos tome što su staklasti i sferični. To najviše potvrđuje činjenica da ih nema puno, odnosno da se rijetko pojavljuju u uzorcima, te to da gotovo uopće nisu izmjenjeni. Edwards (1938) je u svom radu opisao upravo takve amorfne forme, koje su posljedica efuzije, a nastaju povezane sa iddingsitom. Riječ je o staklenim globulama koje se sastoje od željeznog oksida. Takve pojave su česte u bazaltima, a nastaju tijekom ili nakon efuzije magme, što ovisi o temperaturi magme i obogaćenju magme na željezo. Najbitnije za nastanak iddingsita je to da se magma diferencira na taj način da nastane konačni fluid bogat na željezo. Ukoliko se magma dovoljno ohladila prije efuzije, neće ostati dovoljno željeznih oksida u preostalim volatilima da bi se formirao iddingsit, pa zato ne nastaju ni željezne staklene globule. Takav opis nastanka tih formi se poklapa s onime što je do sada poznato o uzorcima i brzom hlađenju, te rasvjetljava i dio geneze bazalta koji se odvijao nakon što su nastale sferulitne strukture, kao posljedica pothlađivanja.

5.3. Slijed magmatskih događaja rekonstruiran na temelju struktura

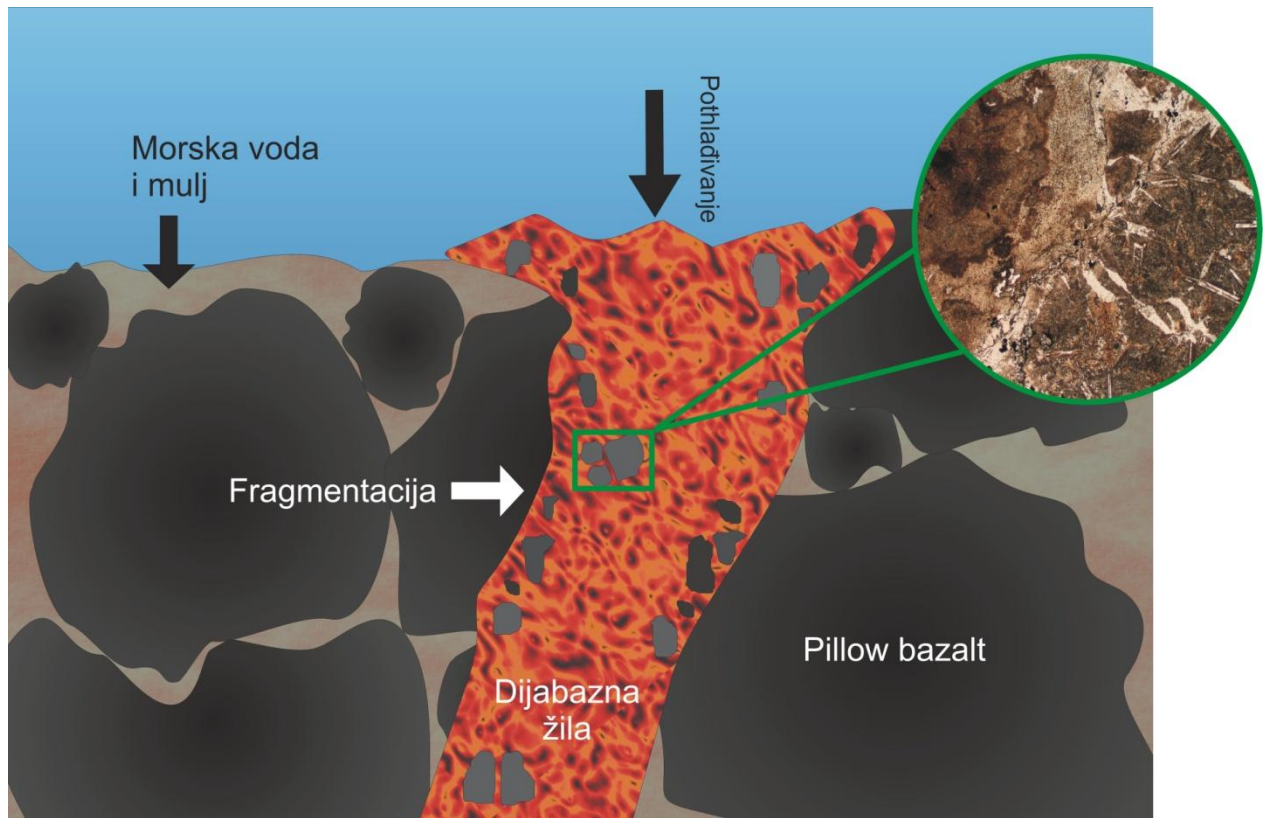
Usprkos tome što se u uzorcima nalaze sve četiri faze pothlađivanja, one nisu nastale jednim kontinuiranim procesom. Jedan od pokazatelja je to što se u preparatima u kojima se nalaze prve tri faze pothlađivanja ne nalazi i sferulitna u istim domenama.

U onim preparatima u kojima se sferulitna struktura nalazi uz prve tri faze, riječ je o komadu stijene koji je fizički odvojen od ostatka preparata (slika 5.6.). Problem koji će biti objašnjen u ovom potpoglavlju je kako je došlo do takvog rasporeda.



Slika 5.6. Kontakt sferulitne domene i ostatka stijene u dijabaznom hijaloklastitu je relativno pravilan, što ukazuje na to da taljevina vidljiva na slici između dvije domene nije ona iz koje su nastali sferuliti. Također se jako lijepo vide i izmjene (smeđe područje) praćene euhedralnim kristalima pirita. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

Razlozi takvog mikroskopskog izgleda su vidljivi i na terenu, a vezani su za intruziju dijabaza (slika 5.7.). Prodiranja žila nisu mirni procesi, a s obzirom da dolazi do probijanja magme na površinu kroz ranije dijelom skrutnute ili potpuno ohlađene stijene (koje su u ovom slučaju jastučasti bazalti oceanske kore), nastupa fragmentacija tih okolnih stijena. Ta fragmentacija ima značajnu ulogu u nastajanju novih stijena.

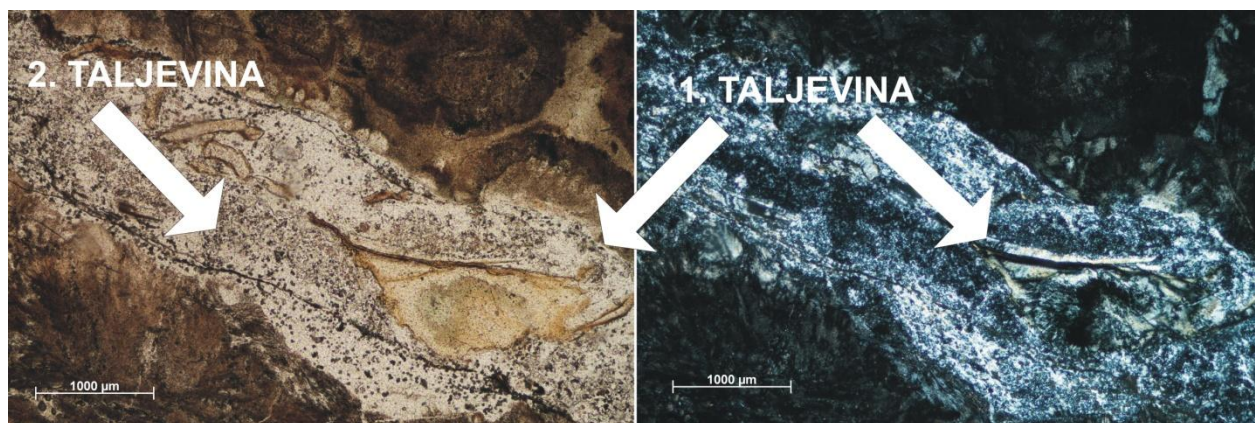


Slika 5.7. Prikazana je intruzija dijabazne žile koja uzrokuje fragmentiranje okolnih stijena, dok dijabazna magma spaja fragmente bazalta i dijabaza u novi produkt – bazaltni ili dijabazni hijaloklastit (u izdvojenom krugu). Slika u krugu: PPL N-.

Još jedan od bitnih procesa vezanih za intruziju je pothlađivanje. Ono nastaje na isti način, kao što je prethodno opisano kod jastučastih bazalta, uz neke razlike. Posljedice ovog pothlađivanja nisu sferuliti kao u prvom slučaju, već prve tri faze pothlađivanja, odnosno tabularni kristali, skeletni (izduženi) kristali i dendritične kristalne forme (slika 5.1.). Razlog tome je najvjerojatnije nešto manja viskoznost magme nego u prvom slučaju, što pogoduje razvoju kristala, ali ne i amorfnih formi, zbog manje razvijene nukleacije, a povećane difuzije koja pozitivno utječe na rast kristala. Upravo ovim procesom nastala je ofitska struktura vidljiva makroskopski na uzorcima dijabaza.

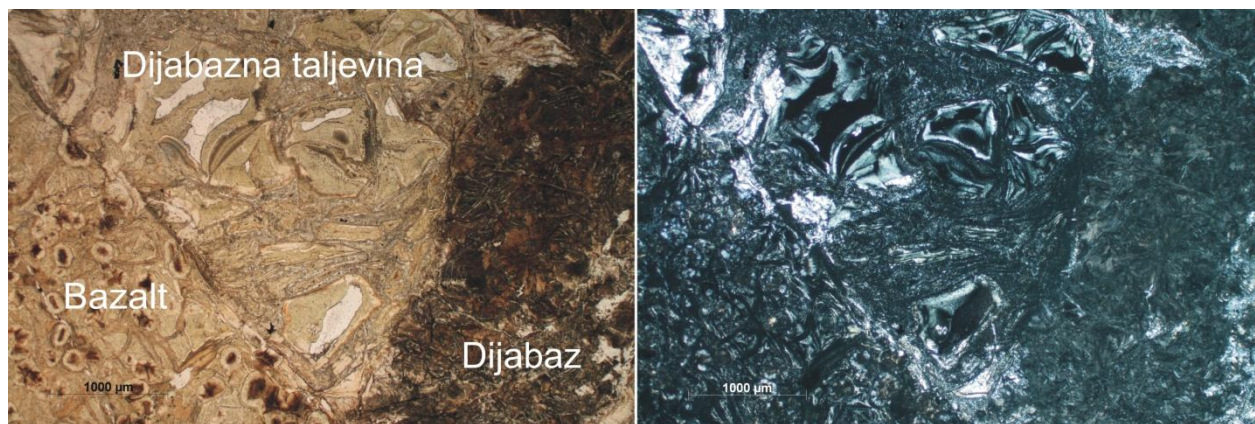
Ipak, tu svojevrsna „evolucija“ terena ne staje. Iako su i dijabaz i jastučasti bazalti zastupljeni na terenu, završni produkt svih procesa su bazaltni i dijabazni hijaloklastiti, koji se ne mogu okarakterizirati niti kao dijabazi, niti kao jastučasti bazalti. Već prije spomenuta činjenica da sferulitna (bazaltna) područja izgledaju potpuno odvojeno od ostatka preparata ukazuje na to da nisu nastali zajedno, odnosno istovremeno, kao što

je objašnjeno i skicama (slika 5.1., slika 5.7.). Dijabazni hijaloklastit i bazalni hijaloklastit su stijene koje imaju fragmente bazalta i dijabaza, te je sve spojeno staklenom tvari koja predstavlja taljevinu. Ta taljevina uklapa u sebe komade prve bazaltne taljevine (slika 5.8.), iz koje su nastali sferuliti, time dokazujući da su postojale dvije magme različitog porijekla, koje su stvorile stijenu koja se naziva bazalni ili dijabazni hijaloklastit, ovisno o volumnoj zastupljenosti pojedinih struktura/domena u konačnoj stijeni.



Slika 5.8. Dijelovi stijene koju ukazuju na postojanje dvije različite taljevine, od kojih je jedna uklopila drugu. Starija taljevina je bazaltna, dok je mlađa dijabazna, vezana za intruziju. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

Na slici 5.9. vidi se i kako se ponašaju granice između domena u kojima prevladavaju bazalt, dijabazno staklo/taljevina i dijabaz. Granica između bazalta i taljevine je oštra, što upućuje na to da je komad mehanički umetnut u sustav, dok je dijabaz nastao iz te taljevine, što je vidljivo po neravnom i zakrivljenom kontaktu.



Slika 5.9. Granice između bazalta i dijabaza u bazaltnom hijaloklastitu, koji sadrži i dijelove dijabaza nastalih iz prisutne dijabazne taljevine, kao što to pokazuje i neravan kontakt između te dvije domene na slici. PPL N- (lijevo), PPL N+ (desno).

6. ZAKLJUČCI

Stijene koje izdanjuju u kamenolomu „Jelenje vode“ mogu se okarakterizirati kao bazaltni hijaloklastiti, dijabazi i dijabazni hijaloklastiti, ovisno o količini pojedine domene u svakoj od stijena. Stijene pripadaju vršnoj zoni ofiolitnog kompleksa Medvednice, na čiji je mikroskopski izgled najviše utjecao upravo njihov direktan kontakt sa morskom vodom i vlažnim muljem.

Postanak tih stijena je izuzetno kompleksan i sadrži nekoliko faza..

Prva faza uključuje nastanak jastučastih bazalta za koje je vezana pojava pothlađivanja. Nakon statistički obrađenih podataka, jasno je da je sferulitna struktura najzanimljivija posljedica tog procesa. Iz te strukture rekonstruirani su rast i nukleacija kristala, te proces difuzije koji je za njih odgovoran. Konačni zaključak bi bio da sa udaljavanjem od izvora pothlađivanja raste i veličina sferulita, te se mogu pronaći i poneki iskristalizirani ostaci prvih faza pothlađivanja. Što je dio stijene bliži izvoru pothlađivanja, to je količina sferulita veća, a sami sferuliti manji, zbog brzog hlađenja i nemogućnosti spajanja više sferulita. Pritom oko najbrže ohlađenih sferulita ostaju ostaci taljevine iz koje su nastali, sa izrazito fluidalnom strukturom. Pri kraju nastanka bazalta dolazi do diferencijacije magme, te zbog brzog hlađenja pritom nastaje fluid obogaćen na željezo, iz kojeg nastaje mineral iddingsit, u obliku pseudomorfoza, praćen željezovitim staklenim globulama.

Drugom fazom nastanka stijena dominira intruzija dijabazne žile. Najvažniji proces pritom je fragmentacija postojećih jastučastih bazalta. Ti fragmenti bazalta, u kombinaciji sa postojećim skrutnutim dijelovima dijabaza, tvore hijaloklastite, koje je zajedno spojila bazalna taljevina. Fragmenti dijabaza su i sami nastali u kontaktu sa morskom vodom, te je također došlo do pothlađivanja, ali u njihovom slučaju nastaju samo prve tri faze, odnosno: tabularni, skeletalni (izduženi) i dendritični kristali plagioklasa. Ovisno o količini dijabaznih, odnosno bazaltnih fragmenata, konačna stijena se naziva dijabazni ili bazaltni hijaloklastit.

Opisani procesi su po definiciji procesi spilitizacije, odnosno izmjene bazalta u kontaktu sa morskom vodom. Iz njih se vidi potpuni slijed događaja koji su utjecali na stijenu od njenog nastanka pa do današnjeg izgleda.

Usprkos potvrđenoj i objašnjenoj genezi stijena, i dalje postoje neka otvorena pitanja. Nije bilo moguće odrediti točan mineralni sastav zbog izmjenjenosti minerala i male veličine zrna, stoga bi u budućnosti najvažnije bilo odrediti sastav plagioklasa i vrstu piroksena. Za to bi bila odgovarajuća buduća istraživanja u bolje opremljenim laboratorijima ili još detaljnija mikrofiziografija, pazeći prilikom terenskog rada, koliko se može, da budu uzeti najsvježiji mogući uzorci.

7. ZAHVALE

Zahvaljujemo:

- prof. dr. sc. Draženu Balenu na mentorstvu i izuzetnom strpljenju koje nam je ukazao prilikom izrade rada. Također zahvaljujemo na svim savjetima, konzultacijama i primjedbama, koje su nam pomogle da ovaj rad dobije svoj konačni oblik,
- dr. sc. Zorici Petrinec na pomoći pri izradi fotografija – mikroskopskih i makroskopskih, te svoj tehničkoj podršci vezanoj za analize, kao i na strpljenju i savjetima pri izradi skica i nalaženju literature,
- prof. dr. sc. Darku Tibljašu na pomoći i sugestijama prilikom identifikacije minerala iddingsita,
- tehničaru Deanu Vončini na pomoći pri izradi mikroskopskih preparata,
- dr. sc. Željki Žigovečki–Gobac za pomoć pri nalaženju literature,
- svim ostalim djelatnicima Geološkog odsjeka PMF–a, koji su pridonijeli izradi ovog rada.

8. POPIS LITERATURE

- Basch, O. (1981): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Ivanić Grad L 33–81. Institut za geol. istr. Zagreb, Sav. geol. zavod, Beograd.
- Basch, O. (1983): Tumač za list Ivanić Grad L 33–81. Inst. za geol. istraživanja Zagreb, Savez. geol. zavod, 1–66, Beograd.
- Brandeis, G. i Jaupart, C. (1987): The kinetics of nucleation and crystal growth and scaling laws for magmatic crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96, 24–34.
- Brown, G. i Stephen, I. (1959): A structural study of iddingsite from New South Wales, Australia. *The American Mineralogist*, 44, 251–260.
- Candela, P.A. (1997): A Review of Shallow, Ore-related Granites: Textures, Volatiles, and Ore Metals. *Journal of Petrology*, 38/12, 1619–1633.
- Chalmers, B. (1977): Principles of solidification. Florida, Krieger Publishing Company. (citat preuzet iz Brandeis i Jaupart, 1987)
- Crnković, B. (1963): Petrografija i petrogeneza magmatita sjeverne strane Medvednice. *Geološki vjesnik*, 16, 63–159.
- Edwards, A. B. (1938): The Formation of Iddingsite. *American Mineralogist*, 23, 227–281.
- Ewart, A. (1971): Chemical changes accompanying spherulitic crystallization in rhyolitic lavas, Central Volcanic Region, New Zealand. *Mineralogical Magazine*, 38, 424–434.
- Faure, F., Troillard, G., Nicollet, C. i Mantel, J. – M. (2003): A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, 251–263.
- Gránásy, L., Pusztai, T., Tegze, G., Warren, J. A. i Douglas, J. F. (2005): Growth and form of spherulites. *Physical Review E*, 72, 011605.

- Halamić, J. i Slovenec, D. (1995): Bazične i sedimentne stijene kamenoloma Jelenja voda. U: Šikić, K. (ed.): Geološki vodič Medvednice, 134–137, Zagreb.
- Halamić, J., Slovenec, D. i Kolar–Jurkovšek, T. (1998): Triassic Pelagic Limestones in Pillow Lavas in the Orešje Quarry near Gornja Bistra, Medvednica Mt. (Northwest Croatia). *Geologia Croatica*, 51/1, 33–45.
- Hort, M. (1998): Abrupt Change in Magma Liquidus Temperature, because of Volatile Loss or Magma Mixing: Effects on Nucleation, Crystal Growth and Thermal History of the magma. *Journal of Petrology*, 39/5, 1063–1076.
- Judik, K., Arkai, P., Horvath, P., Dobosi, G., Tibljaš, D., Balen, D., Tomljenović, B. i Pamić, J., (2004): Diagenesis and low–temperature metamorphism of Mt. Medvednica, Croatia: Mineral assemblages and phyllosilicate characteristics. *Acta Geologica Hungarica*, 47/2–3, 151–174.
- Kršić, B. (2010): Eksploatacija dijabaza na eksploatacijskom polju „Jelenje Vode“. Završni rad, 1–18, RGNF.
- Lugović, B., Slovenec, D., Halamić, J. i Altherr, R. (2007): Petrology, geochemistry and tectonic significance of Mesozoic ultramafic rocks from the Zagorje–Mid–Transdanubian Zone in Croatia. *Geologica Carpathica*, 58, 6, 511–530.
- Muncill, G. E. i Lasaga, A.C. (1987): Crystal–growth kinetics of plagioclase in igneous systems: One–atmosphere experiments and application of a simplified growth model. *American Mineralogist*, 72, 299–311.
- Pamić, J. i Tomljenović, B. (1998): Basic geological data on the Croatian part of the Mid–Transdanubian Zone as exemplified by Mt. Medvednica located along the Zagreb–Zemlen Fault Zone. *Acta Geologica Hungarica*, 41 (4), 389–400.
- Pamić, J., Tomljenović, B. i Balen, D. (2002): Geodynamic and petrogenetic evolution of Alpine ophiolites from the central and NW Dinarides: an overview. *Lithos*, 65, 113–142.

- Slovenec, D. (2003): Petrologija i geokemija ofiolitnih stijena Medvednice. Doktorska disertacija, Prirodoslovno–matematički fakultet, 180 str., 112 slika, 13 priloga, Zagreb.
- Slovenec, D. i Pamić, J. (2002): Geology of the Vardar Zone ophiolites of the Medvednica Mountain area located along the Zagreb–Zemlin line (NW Croatia). *Geologica Carpathica*, 53/1, 53–59.
- Slovenec, D. i Lugović, B. (2009): Geochemistry and tectono–magmatic affinity of mafic extrusive and dyke rocks from the ophiolite melange of the SW Zagorje–Mid–Transdanubian Zone (Mt. Medvednica, Croatia). *Ofioliti*, 34 (1), 63–80.
- Slovenec, D. i Lugović, B. (2012): Evidence of the spreading culmination in the eastern Tethyan Repno oceanic domain, assessed by the petrology and geochemistry of N–MORB extrusive rocks from the Mt. Medvednica ophiolite mélange (NW Croatia). *Geologia Croatica*, 65/3, 435–446.
- Šikić, K., Basch, O. i Šimunić, A. (1977): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Zagreb L 38–80. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Šikić, K., Basch, O. i Šimunić, A. (1979): Tumač Osnovne geološke karte, list Zagreb 1:100 000. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, 1–75, Beograd.
- Šimunić, A. i Pamić, J. (1989): Ultramafitne stijene kod Gornjeg Orešja na sjeveroistočnim obroncima Medvednice. *Geološki vjesnik*, 42, 93–101.
- Swanson, S. E., Nancy, M. T., Westrich, H. R. i Eichelberger, J.C. (1989): Crystallization history of Obsidian Dome, Inyo Domes, California. *Bulletin of Volcanology*, 51, 161–176.
- Tomljenović, B. (2000): Zagorje–Mid–Transdanubian Zone. *Vijesti Hrvatskog geološkog društva*, 37/2, 27–33.
- Watkins, J., Manga, M., Hunber, C. i Martin, M. (2009): Diffusion – controlled spherulite growth in obsidian inferred from H₂O concentration profiles. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157/2, 163–172.

Wilshire, H. G. (1958): Alteration of olivine and orthopyroxene in basic lavas and shallow intrusions. *American mineralogist*, 43, 120–147. (citat preuzet iz Brown i Stephen, 1959)

Winchell, A. N. (1951): *Elements of Optical Mineralogy*. pt. 2., 507. (citat preuzet iz Brown i Stephen, 1959)

Winter, J. D. (2001): *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, 699 str., Upper Saddle River, New Jersey.

9. SAŽETAK

Zita Brigljević i Petra Belobrk

UTJECAJ POTHLAĐIVANJA NA NASTANAK STRUKTURA MAGMATSKIH STIJENA OFIOLITNOG KOMPLEKSA MEDVEDNICE

Kamenolom „Jelenje vode“ nalazi se na sjeverozapadnim obroncima Medvednice. Stijene u kamenolomu pripadaju vršnom dijelu ofiolitnog kompleksa. Po terenskoj klasifikaciji, istraživane stijene mogu biti opisane kao bazalti i dijabazi. Cilj rada je opisati stijene i njihovu genezu i objasniti sve procese koji su utjecali na nastanak karakterističnih struktura koje se u njima nalaze. Mikrofiziografskom analizom i statističkom obradom podataka koji su njome prikupljeni određene su strukture i teksture, te faktori koji su utjecali na njihov nastanak. U mikroskopskim preparatima se razlikuju sferulitna, ofitska i fluidalna struktura, koje su karakteristične za pojedine domene u stijenama. Te stijene su analizom određene kao dijabaz, dijabazni hijaloklastit i bazalni hijaloklastit, ovisno o zastupljenosti pojedine strukturne domene. Promatranjem kontakata između različitih domena u hijaloklastitima i ostalih značajki stijene, uključujući i željezovite staklene globule, rekonstruiran je točan slijed događaja koji stvaraju strukture unutar stijena na ovom lokalitetu. Glavnu ulogu u njihovom nastanku ima proces pothlađivanja, koji se odvija u četiri faze. U prvoj fazi nastaju tabularni kristali, u drugoj skeletalni, u trećoj dendritični i u četvrtoj sferuliti. Iz rasporeda i veličine sferulita statistički je objašnjen utjecaj morske vode na nastanak bazaltnih i dijabaznih stijena sa navedenim strukturama kao poslijedicama. Uz pothlađivanje, značajan utjecaj na izgled, ne samo mikroskopskih preparata, već i cijelog terena, imala je dijabazna intruzija. Takav događaj uzrokuje fragmentiranje okolnih stijena i nastanak bazaltnih i dijabaznih hijaloklastita, koji su konačni produkt.

Ključne riječi: strukture, bazalt, pothlađivanje, sferuliti, hijaloklastit

10. SUMMARY

Zita Brigljević & Petra Belobrk

THE EFFECTS OF UNDERCOOLING ON THE EVOLUTION OF IGNEOUS ROCKS TEXTURAL VARIETIES FROM MEDVEDNICA OPHIOLITE COMPLEX

„Jelenje vode“ quarry is situated on the northwestern flanks of Mount Medvednica. The rocks in the quarry pertain to the upper part of the ophiolite complex. Using field classification, examined rocks can be described as basalt and dolerite. The aim of this paper is to describe the rocks and their genesis, and explain all the processes which influenced the occurrence of the characteristic textures found within those rocks. Textures and structures, as well as the main factors influencing their genesis, were determined by microanalysis and statistical processing of thus collected data. Spherulitic, ophitic and fluidal textures, which are characteristic for particular domains within the rocks, can be discerned in thin sections. Those rocks were determined as dolerite, doleritic hyaloclastite and basaltic hyaloclastite, depending on the amount of a certain domain. Through the study of contacts between the different domains within the hyaloclastites, and other rock features, including the glassy iron globules, the exact sequence of structure forming events has been reconstructed in these rocks at this location. The main role in their genesis belongs to the undercooling process, which occurs in four phases. First phase produces tabular crystals, second one skeletal, third dendritic, and the fourth one creates spherulites. The influence of the sea water on the occurrence of the basalt and dolerite with mentioned textures was explained using statistical approach to solve the spherulite sizes and arrangement. Along with the undercooling, the dolerite intrusion had a considerable influence, not only on appearance of the rocks in thin sections, but also on that whole part of the quarry. That kind of an event causes fragmentation of surrounding rock and genesis of basaltic and doleritic hyaloclastite, which were the final product.

Key words: textures, basalt, undercooling, spherulites, hyaloclastite

11. ŽIVOTOPIS

Zita Brigljević

Rođena je u Sisku, 19. 8. 1990. godine, gdje završava Gimnaziju Sisak 2009. godine, te upisuje preddiplomski studij geologije na Prirodoslovno–matematičkom fakultetu. Godine 2012. stječe naziv prvostupnika geologije i nastavlja obrazovanje na diplomskom studiju geologije, smjer mineralogija i petrologija. Trenutno je studentica 2. godine diplomskog studija. Dobitnica je pohvalnica Fakultetskog vijeća PMF–a za izvrstan uspjeh na preddiplomskom i diplomskom studiju. U slobodno vrijeme bavi se učenjem stranih jezika i streličarstvom, kao članica Zagrebačkog streličarskog kluba.

Petra Belobrk

Rođena u Zagrebu, 18. 07. 1989. godine, gdje završava osnovnu školu, te 2004. upisuje VII gimnaziju u Zagrebu. 2009. godine upisuje preddiplomski studij geologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu koji završava 2012. godine i stječe naziv prvostupnika geologije (univ.bacc.geol.), te iste godine upisuje diplomski studij geologije, smjer mineralogija i petrologija. Trenutno je studentica diplomskog studija sa prosjekom ocjena 4.5. Također, članica je kluba hokeja na ledu „Grič“ i Hrvatske ženske reprezentacije u hokeju na ledu, te članica Hrvatske studentske udruge eSTUDENT.