# Granatski amfiboliti kao indikatori uvjeta metamorfizma u krivajsko-konjuškom ultramafitnom masivu

**Matić, Marko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:148020

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

MARKO MATIĆ

# GRANATSKI AMFIBOLITI KAO INDIKATORI UVJETA METAMORFIZMA U KRIVAJSKO-KONJUŠKOM ULTRAMAFITNOM MASIVU

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

MARKO MATIĆ

# GRANATSKI AMFIBOLITI KAO INDIKATORI UVJETA METAMORFIZMA U KRIVAJSKO-KONJUŠKOM ULTRAMAFITNOM MASIVU

Diplomski rad

Predložen Geološkom odsjeku

Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

radi stjecanja akademskog naziva magistra geologije

Zagreb, 2018.

Ovaj diplomski rad napravljen je na Mineraloško-petrografskom zavodu pod vodstvom prof.dr.sc. Dražena Balena, u sklopu diplomskog studija geologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Rad je potpomognut sredstvima istraživačkog projekta HRZZ IP-2014-09-9541.

# ZAHVALE

**Veliko hvala…**

**…Prof.dr.sc. Draženu Balenu** na odabiru teme, ustupljenim kemijskim analizama na strpljivosti, susretljivosti, optimizmu te odvajanju svog privatnog i poslovnog vremena,

**…Doc.dr.sc Zorici Petrinec** na savjetima i susretljivosti kad god je to bilo potrebno

**...Dejanu Vončini** na pomoći i savjetima pri izradi u labaratoriju

**…svim mojim kolegama i kolegicama** koji su me ovih pet godina, uveseljavali i bodrili te ih tako učinili nezaboravnima

**…roditeljima** koji su mi kao najveća podrška osigurali najljepših pet godina života

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet Diplomski rad

Geološki odsjek

**GRANATSKI AMFIBOLITI KAO INDIKATORI METAMORFNIH UVJETA U KRIVAJSKO KONJUŠKOM ULTRAMAFITNOM MASIVU**

Marko Matić

Rad je izrađen: Mineraloško-petrografski zavod, PMF, Zagreb, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska.

**Sažetak**: Jugoistočno područje Krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva karakteriziraju zone metamorfnih stijena uključujući i stijene amfibolitnog metamorfnog facijesa. Istraživani granatski amfiboliti s područja Duboštice i Tribije pokazuju raznolikost u strukutrno-teksturnim karakteristikama. P–T putevi metamorfizma uzoraka napravljeni su uz pomoću cijelostijenske geokemije, geokemije minerala granata, rendgenskim mapiranjem granata te računalnim modeliranjem uz pomoć Perple_X-a. P–T putevi svih uzoraka odgovaraju clockwise modelu koji indiciraju retrogradne uvjete metamorfizma. Uzorci iz Tribije pokazuju varijabilnost u P–T uvjetima formiranja stijena. Jedan od njih je je dao uvjete formiranja jezgre granata pri tlaku od 21,25 kbar i temperaturi 1050°C karakteristično za P–T raspon granulitnog facijesa, dok su za rub determinirani tlakovi od 10,5 kbar i temperatura 840°C. Drugi uzorak iz Tribije daje uvjete formiranja jezgre pri 4 kbara i 575°C, a onaj iz Duboštice formiranje jezgre pri 4 kbara i 550°C. Uzorak iz Tribije s većim uvjetima formiranja nastao je dublje a protolit mu je bazalt N–MORBA, dok su ostala dva nastala iz bazalta plićih oceanskih područja. Sve stijene pripadaju intraoceanskom subdukcijskom okolišu.

**Ključne riječi:** granati, izoplete, rendgensko mapiranje, retrogradni metamorfizam, KKOC

**Rad sadrži**: VI+59 stranica, 40 slika, 7 tablica, 67 literaturnih navoda

**Jezik izvornika:** hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska

**Mentor:** prof. dr. sc. Dražen Balen

**Ocjenjivači:** prof. dr. sc. Dražen Balen

izv. prof. dr. sc. Blanka Cvetko Tešović

doc. dr. sc. Zorica Petrinec

Rad prihvaćen: 6. prosinca 2018 g.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb Master

Thesis Faculty of Science Master Thesis

Department of Geology

# GARNET BEARING AMPHIBOLITES AS INDICATORS OF METAMORFIC CONDITIONS IN KRIVAJA-KONJUH ULTRAMAFITIC MASSIF

**Marko Matić**

Thesis completed at the Department of Minerology and Petrology, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Croatia.

**Abstract:** In the South-eastern part of Krivaja-Konjuh ultramfic masiff exist zones of metamorfic rocks which contain variates of amphibolites. Investigated amphibolites from Duboštica and Tribija show structural and textural petrografic variabilities. P–T paths of samples were reconstructed using whole rock composition, cemical composition of garnets, X-ray mapping of garnets, and thermodynamic and graphic results made by Perple_X. All of samples contain P–T results of isopleths of garnets that show clockwise model. That indicates retrograde conditions of metamorphism. One of the samples from Tribija shows heigher P–T conditions of garnets. It includes forming of garnet's core, implying, pressure of 21,25 kbar and temperature of 1050°C, while its rim includes pressure about 10,5 kbar and temperature about 840°C. It can suggest deeper origin of that sample which can belong to granulitic facies. Its protolith is basalt of N-MORB. Other sample from Tribija gave P-T conditions of forming garnet's core. Calculated pressure is 4 kbar and temperature of 575°C, as similar as, sample from Duboštica which includes P–T conditions of 4 kbar and 550°C. They were derived of basalt from shallower oceanic areas. All of samples belong to intraoceanic subduction environment.

**Key words:** garnet, isopleths, X-ray mapping, retrograde metamorphism, KKOC

**Thesis contains**: VI+59 pages, 40 figures, 7 tables, 67 references

**Original in**: Croatian

Thesis deposit in the Central geological library, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Croatia.

**Supervisor:** Dražen Balen, PhD, full professor

**Reviewers:** Dražen Balen, PhD, full professor

Blanka Cvetko Tešović, PhD, associate professor

Zorica Petrinec, PhD, assistant professor

Thesis accepted: 6th of December 2018

# Sadržaj

**1. UVOD ..... 1**
1.1. Opće značajke granata ..... 2
1.2. Geološka važnost granata ..... 4
**2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA ..... 6**
2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja ..... 6
2.2. Geotektonski i geografski položaj KKOC-A ..... 9
2.3. Geološka građa istraživanog područja ..... 12
**3. METODE RADA ..... 15**
3.1. Metoda izrade izbrusaka ..... 15
3.2 Elektronska mikrosonda (EPMA) ..... 16
3.3 ICP-MS (Induktivno spregnuta plazma s masenim spektroskopom) ..... 16
3.4. PERPLE_X ..... 17
**4. REZULTATI ..... 19**
4.1 Položaji izdanaka i makroskopski opis stijena ..... 19
4.2 Mineralna optika ..... 22
4.2.1. Mikrofotografije uzoraka ..... 25
**4.3 Geokemijski sastav stijena i minerala ..... 30**
4.3.1 Cijelostijenski geokemijski sastav ..... 30
4.3.2. Mineralna geokemija granata ..... 38
4.3.2.1. Kemijske rendgenske mape granata ..... 41
4.3.2.2. Geotermobarometrijski rezultati granata ..... 46
**5. DISKUSIJA ..... 50**
**6. ZAKLJUČAK ..... 54**
**7. LITERATURA ..... 56**

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Kratice minerala (Whitney et al., 2010) :

**Amp** amfibol

**Bt** biotit

**Grt** granat

**Pl** plagioklas

**Cpx** klinopiroksen

**Qtz** kvarc

**Ttn** titanit

**Opq** opáki minerali

**BSE** back scatter electrons (povratno raspršeni elektroni)

**EPMA** ElectroProbe Micro Analyser (elektronska mikrosonda)

**GBM** grain boundary migration

**HREE** heavy rare Earth elements

**ICP-MS** Inductively coupled mass spectrometry ( induktivno spregnuta plazma- maseni spektrometar)

**KKOC** Krivajsko-konjuški ultramafitni masiv

**OGK** osnovna geološka karta

**ppm** part per million

**ppb** part per billion

**N+** uključen analizator

**N-** isključen analizator

# 1. UVOD

Zbog svoje geotektonske egzotičnosti i složenosti, područje Krivajsko-konjuškog masiva Bosne je geolozima, kao područje rada, oduvijek bilo zanimljivo. Navedeno područje pripada "metamorfnom" đonu ofiolitnog kompleksa Bosne. Detaljniji petrološki i tektonski uvid prikazan je u poglavlju *2. Pregled dosadašnjih istraživanja.* Mnogi znanstvenici su se bavili geološkom problematikom ovog složenog područja, no postoje još brojna otvorena pitanja.

Kao predmet istraživanja ovog diplomskog rada uzete su stijene iz doline "Ravne Rijeke" pored Duboštice i "Dubokog potoka" nedaleko od Tribije koje su kasnije naknadno petrografsko-kemijski analizirane. Stijene pripadaju amfibolitnom facijesu, metamorfnom facijesu kojeg karakteriziraju srednje do visoke temperature 500–700°C i tlakovi 400–1000 MPa. U bazičnim stijenama je prepoznatljiv po mineralnoj paragenezi hornblenda+neutralni do bazični plagioklas . Cilj ovog rada je utvrditi petrografske i mikrotektonske karakteristike stijena pomoću polarizacijskog mikroskopa. Na temelju cijelostijenskog kemijskog sastava, kemijskog sastava minerala te kemijskih rendgenskih mapa granata rekonstruirat će se P–T uvjeti metamorfizma. Na temelju geokemijskih podataka će se utvrditi smještaj stijena u određeni geotektonski okoliš te regionalne geodinamske okvire.

## 1.1. Opće značajke granata

Granati pripadaju skupini nezosilikata čija je struktura sastavljena od izoliranih $[SiO_4]^{-4}$ tetraedara. Kristaliziraju u holoedriji kubičnog sustava. Opća kemijska formula im je $A_3B_2Si_3O_{12}$ gdje na prvu poziciju (A) u strukturi dolaze kationi: $Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}$, dok na drugu poziciju (B) dolaze trovalenti kationi: $Fe^{3+}, Al^{3+}, Zr^{3+}, Ti^{3+}, Cr^{3+}$ . Tradicionalno, granati se dijele u dvije grupe: grupu ugrandita i grupu piralspita sa svojim krajnjim članovima (Tablica 1).

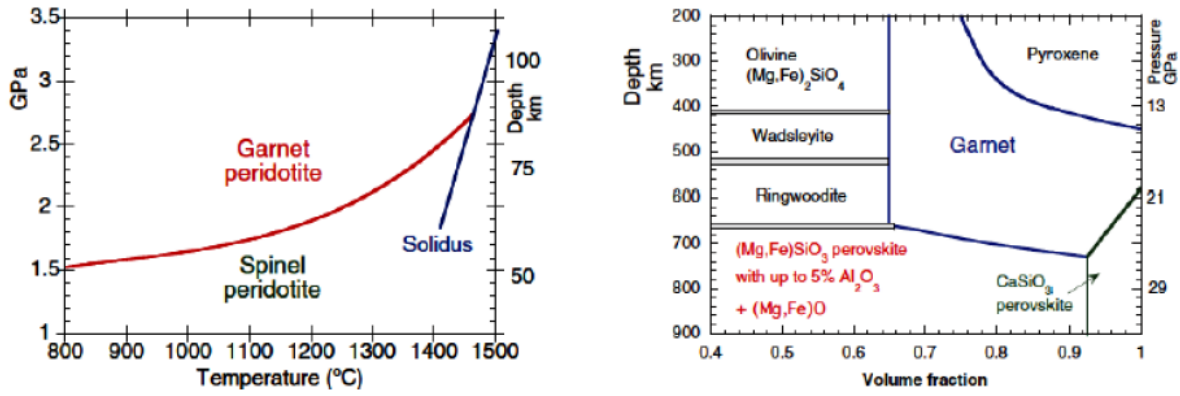
Tablica 1. Podjela granata na grupe sa značajnim krajnjim članovima

| Piralspiti | | Ugranditi | |
|---|---|---|---|
| pirop | $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ | grossular | $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ |
| almandin | $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ | andradit | $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ |
| spessartin | $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ | uvarovit | $Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$ |

Iako su granati općenito vrlo rezistentni minerali, u uvjetima retrogradne metamorfoze mogu prijeći u klorit ili se oko granata stvara kelifitski ovoj (sačinjavaju ga produkti izmjene kao npr. biotit, amfibol, rutil, feldspati i sl.). Kao rezultat njegovog velikog koordinacijskog broja granati imaju veliku gustoću, nisku kompresibilnost te povećanje stabilnosti s povećanjem tlaka. Za posljedicu stijene s velikim udjelom granata imaju veće seizmičke brzine i gustoće, u odnosu na niskotlačne stijene koje ne sadrže granate, te se koriste u pokušaju ograničavanja sastava donje kore, gornjeg plašta i tranzicijske zone (Wood, 2013). Mnogi granati koje vidimo na površini su najčešće derivirani iz metamorfnih stijena te s mogu javiti u širokom spektru metamorfizma (regionalni, kontaktni, subdukcijski...). Formiraju se u stijenama koje su dovoljno bogate na Al, $Fe^{3+}$, Cr. Uvjeti formiranja granata podrazumijevaju temperature veće od 400°C i tlakove veće od 0,4 GPa (Cadick & Kohn, 2013), iako su zabilježeni slučajevi nastajanja Ca-Mn bogatih granata na temperaturama nižim od 300°C i 0,1–0,2 GPa (Ménez et al., 2012), te eksperimentalnog nastajanja spessartinskog granata kristaliziranog iz magme na atmosferskom tlaku (Van Haren & Woensdregt, 2001). U Zemljinoj kori granati mogu doći kao konstituenti u rasponu uvjeta od facijesa zelenih škriljavaca do facijesa visokotemperaturnih granulita i visokotlačnih eklogita, te opstati u geotektonskim okolišima u uvjetima najvrućijih orogeneza ( > 1000°C; Harley, 1998) i najdubljih subdukcijskih okoliša kao što je polje stabilnosti dijamanta, tlakova većih od 4 GPa (Schert & O' Brien, 2013). Granati mogu nastati kao posljedica parcijalnog taljenja na visokim metamorfnim temperaturama te kao izdvojena magmatska faza nastala iz silicijem bogatih stijena i peraluminoznih granita kao rezultat taljenja aluminijem bogatih sedimentnih stijena (Clemens &

Wall, 1981). Granati se mogu javiti i u stijenama kontaktnog metamorfizma npr. skarnovima (D' Errico et al., 2012) i hidrotermalnim sistemima (Ménez et al., 2012).

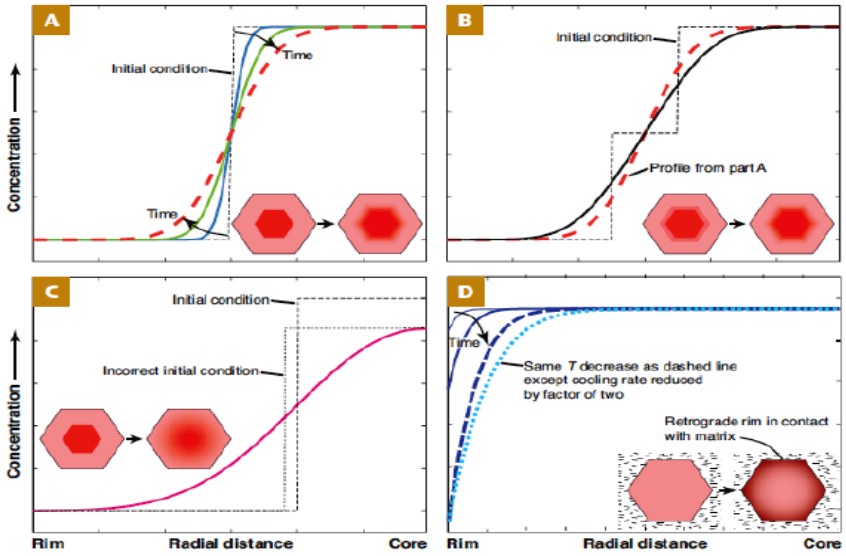
Granati su jedni od najzastupljenijih minerala u gornjem plaštu, gdje se ponašaju kao "skladište" aluminija. Ringwood (1962) tvrdi da u plaštu sastavljenom od peridotita (75%) i bazalta (25%) (tzv. pirolit) granat postaje stabilan na račun raspada spinela pri tlaku >2.8 GPa (> 85km), a nestaje iz peridotitne zajednice transformacijom u perovskit iznad 670 km (slika 1). U plaštu se granati ponašaju kompatibilno te je u njihovu strukturu moguć ulazak kationa HREE-ova i itrija, kao što su moguće i zamjene elemenata poput silicija na B poziciju u strukturi i natrija na A poziciju u strukturi što dovodi do obagaćenja na Si i osiromašenje na Al te formiranje krajnje faze poznatije kao majorit. Ulazak nekih kationa u strukturu kao što je $Fe^{3+}$ su pod kontrolom fugaciteta kisika ($f(O_2)$; Wood et al., 2013).




Slika 1. Polja stabilnosti granatskog peridotita i spinelskog peridotita kao i omjeri minerala sadržanih u peridotitu s obzirom na promjenu dubine (prema Robinson et al., 1998., Ringwood, 1991).

## 1.2. Geološka važnost granata

Grupa granata igra jednu od ključnih uloga u rekonstrukciji geneze metamorfnih stijena. Zbog relativno sporog rasta i rezistentnosti, u odnosu na druge minerale, koji je najviše kontroliran difuzijskim procesima i percipitacijom reaktanata na površinu granata, nastaju zonalni granati pomoću kojih se može rekonstruirati evolucija puta stijene tj. rekonstrukcija kemijskih zbivanja od jezgre prema rubu (Ague et al., 2013). Kemijske reakcije i izmjene elemenata s mineralima u ravnoteži osnova su za P–T determinaciju. Eksperimentalno kalibrirane reakcije između krajnjih članova minerala ponajviše su korištene kao geotermometri i geobarometri. Reakcije kationske izmjene, koje najčešće obuhvaćaju Mg izmjene između silikata, pogodni su geotermometri, dok su reakcije izmjene mase (*mass-transfer reactions*) zbog različitog koordinacijskog broja izmjenjujućih kationa i time promjene volumena najbolji geobarometri (Will, 1998). Prisutnost mineralnih uklopaka u granatima i njihova raspucalost, pod kontrolom intrakristaline difuzije, mogu dati informacije o događajima i vremenu tektanometamorfnih procesa (Baxter et al., 2013), brzini i karakteru metamorfizma (progradni, retrogradni …) (slika 2) ukoliko ranije informacije nisu izbrisane (overprint) te podvrgnute kemijskim izmjenama, uzrokovane ulaskom fluida, kontaminacijom s drugim stijenama i sl. Također, položaj granata u odnosu na matrkis stijene te produkti alteracije i precipitacije na njihovom kontaktu mogu dati informacije o karakteru smicanja stijene iako do njegove deformacije može doći samo na visokim temperaturama. Granati mogu poslužiti kao dobri geokronometri ukoliko sadrže REE-ove i Y. Sm-Nd i Lu-Hf izotopni sistemi uzimaju se kao najefikasniji kronometri s preciznošću boljom od ± 1 mil. god. koja se može primijeniti i na jako malim uzorcima datiranjem koncentričnih zona rasta kristala (tzv. *tree ring* kronologija; Baxter et al., 2013; Ague et al, 2013). Iako je, generalno, granat bezvodan mineral igra značajnu ulogu u cirkulaciji zemljine vode i cirkulaciji drugih volatila. U plaštu, granat je skladište značajnog udjela vode oko 0,1% mol (Mookherjee & Karato, 2010). U kori voda dolazi kao hidroksilna skupina ulazeći u tetraedrijski položaj u strukturi granata, smanjuje simetriju i mijenja tako izotopna svojstva granata u anizotropna (Grew et al., 2013).




Slika 2. Modeliranje tijeka difuzije tijekom retrogradnog rasta, odnosno relaksacije sustava tijekom uzdizanja (preuzeto iz Auge et al., 2013).

# 2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja obuhvaća jugoistočni dio Krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva (KKOC) tzv. područje "metamorfnog đona", složene geotektonske građe gdje su najzastupljenije zone metamorfnih stijena ponajviše stijene u P–T rasponu amfibolitnog facijesa (korundski amfiboliti, granatski amfiboliti i sl.) koje su u ovom radu istraživane s područja Duboštice i Tribije.

## 2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Prva istraživanja i petrografski opis na području Krivajko-konjuškog masiva (KKOC) vezana su za ležišta i pojave kromita uz peridotite obrađene od strane austrijskih geologa Mojsisovicz et al. (1880).

Prva sveobuhvatna geološka istraživanja na području Krivajsko-konjuškog masiva započela su početkom početkom 19. stoljeća kada hrvatski znanstvenik Mijo Kišpatić (1897, 1902) piše o serpentinitskoj zoni Bosne. Prvi opisuje magmatske stijene ofiolitnog kompleksa u okolici Vareša, Tribije i Duboštice. Smatra da su peridotiti i amfiboliti jednistvena cijelina te ih klasificira kao kristalaste škriljavce arhajske starosti. Navodi kako se kromiti pojavljuju s piroksenitima. Također, na tom području utvrđuje razne varijatete gabra (troktoliti, olivinski gabro, normalni gabro), feldspadsko-peridotitne stijene i dr.

Đorđević (1957, 1958, 1960) daje detaljan petrografski opis gabra u dolini rijeke Stavnje sjeverno od Vareša. Dijabaze, spilite i gabre u okolici Tribije istražuje Karamata i Pamić (1960) i iznose podatke o kontaktnometamorfnim promjenama na okolnim sedimentima.

Što se tiče istočnog oboda KKOC-a, o peridotitima, spilitima i dijabazima piše Trubelja (1961) te daje petrološki uvid zasnovan na optičkim i kemijskim metodama. Magnezite tog područja obradili su Ristić et al. (1965) te detaljnije Ristić & Trubelja (1965). Šibenik-Studen & Trubelja (1971) su detaljno ispitali prehnit i thomsonit iz žila koje, na istočnim padinama Konjuha, sijeku dijabaze.

Pamić (1963b, 1964) iznosi mišljenje da su peridotiti duž dubokih rasjeda utisnuti u vidu čvrstih tijela najverovatnije u gornjoj juri, a Pamić & Antić (1964) daju podatke o peridotitima i gabru na zapadnom obodu Krivajsko-konjuškog masiva. Karamata & Pamić (1970) iznose svoja razmatranja o genezi ultramafitnih peridotita bazirajući se na podatke obuhvaćene listom Vareš. Pamić & Kapeler (1970) navode petrološke informacije o korundskim amfibolitima na području

Vijake, a Barić (1969) iznosi mineraloške značajke tih korunda. Stijene amfibolitnog facijesa na poodručju Duboštice i Vijake detaljnije opisuje Pamić (1970 a) te Pamić & Karamata (1971). Pamić (1970) daje petrološke karakteristike kromita s područja Duboštice dok Sunarić & Olujić (1968) osnovne ekonomsko-geološke karakterisitike tih ležišta.

Tumači osnovne geološke karte za listove Vareš, Vlasenica i Zavidovići također nam daju podatke o petrološkim značajkama stijena ovog područja. List Zavidovići obuhvaća sjeverozapadne dijelove masiva, a list Vareš središnji i južni dio masiva (Pamić, 1967 & 1970). List Vlasenica obuhvaća istočni dio masiva (Đorđević & Pamić, 1972).

Brđanović & Operta (2000, 2001) u elaboratima, klasificiraju i kategoriziraju te naglašavaju rezerve i važnost amfibolita, spilita i vapnenaca kao građevnog kamena u okolici Vareša.

Operta et al. (2003) bave se mineraloško-petrografskim karakteristika kornudskih amfibolita s područja Vijake, Operta (2004) iznosi mineraloške i petrografske karakteristike amfibolita iz okolice Vareša.

Šegvić (2010) u svojoj doktorskoj disertaciji daje nove mineraloške, petrografske, kemijske i genetske informacije o stijenama ultramafitnog Krivajsko-konjuškog kompleksa, smještava ih te intrpertira u okviru regionalnih geodinamskih procesa. Veliku pozornost u svojoj disertaciji pridaje amfibolitima koje kategorizira ovisno o prisutnim mineralnim paragenezama.

O mineralima iz grupe granata prisutnima u amfibolitima Krivajsko-konjuškog masiva piše se u Operta et al. (2011). Riječ je o velikoj varijaciji kemijskog sastava granata, uz prevladavajuću piropsku i almandinsku komponentu. Promjene u sastavu pojedinih zrna granata pripisane su promjenama uvjeta metamorfizma u vrijeme rasta minerala, a interpretirane su kao retrogradni metamorfizam i brzo hlađenje. O mineralima iz grupe klorita u istom amfibolitnom facijesu pišu Operta et al. (2012).

Faul et al. (2014) bave se ranim subkontinentalnim riftovanjem i ocean-kontinet prijelaznom zonom Dinarida i Vardarske zone, a dokaze nalaze upravo u Krivajsko-konjuškom masivu.

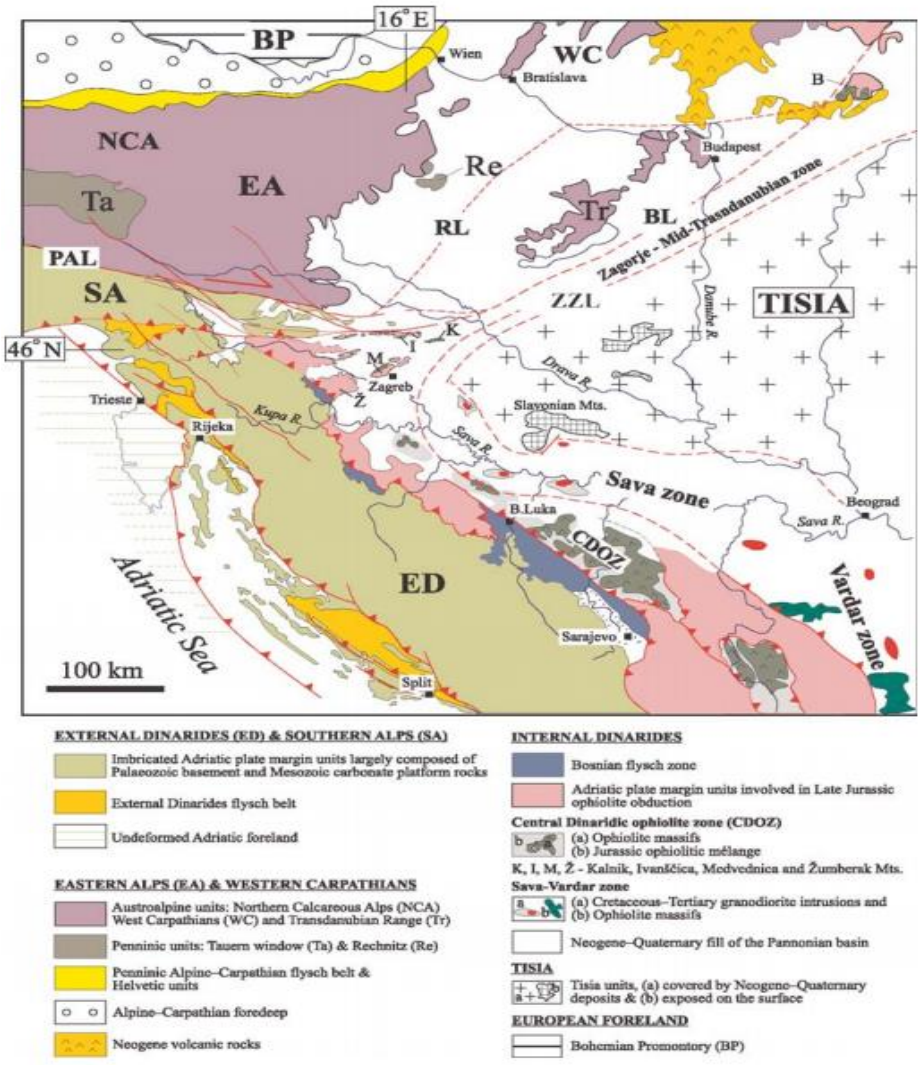
Balen & Massone (2016) pišu o P–T evolucijskom putu amfibolita iz Dinaridske ofiolitne zone u Bosni u okviru geodinamskih procesa kasne jure i rane krede na tom području.

Hodžić & Djedović (2016) raspravljaju o magnezitima u istočnom dijelu Krivajsko-konjuškog masiva.

Premužak (2017) u svom diplomskom radu predlaže model intraocenske subdukcije odgovoran za koliziju i zatvaranje Tetysa na temelju P–T metamorfnih puteva korundskih amfibolita i granulita iz područja "metamorfnog đona" Krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva.

## 2.2. Geotektonski i geografski položaj KKOC-A

Prema Pamiću (1982) Dinaridi su definirani s nekoliko geotektonskih cijelina (slika 3) koje obuhvaćaju: 1) Alpsko-dinaridsku karbonatnu platformu koja većim dijelom pripada vanjskim dinaridima, 2) karbonatno-klastičnu formaciju pasivnog kontinentalnog ruba tzv. Bosanski fliš, 3) Melanž ofiolitne dinaridske zone (DOZ) uključujući radiolaritnu formaciju i 4) sedimentne, magmatske i metamorfne stijene, Tethyskog aktivnog kontinentalnog ruba tzv. Sava-Vardar (SVZ) zona (slika 4).

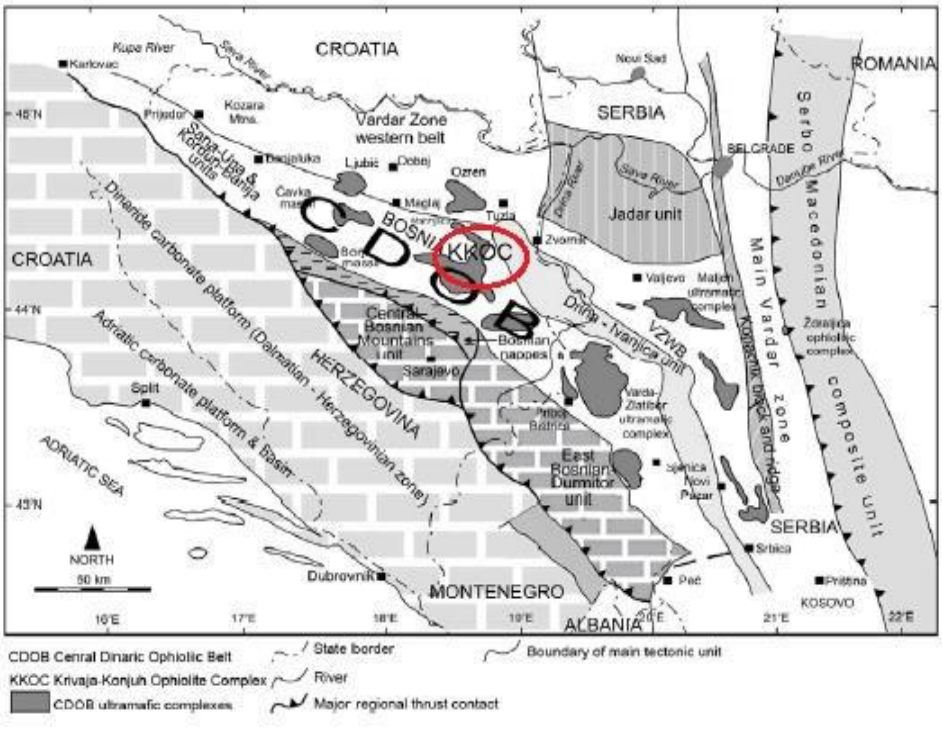



Slika 3. Karta s podjelom geotektonskih jedinica Dinarida (preuzeto iz Tomljenović et al., 2002)

Tako područje KKOC-a pripada središnjem dijelu bosanskog ofiolitnog kompleksa (CDOZ; Slika 4) kojeg krakterizira nekoliko geotektonskih jedinica: 1) Radiolaritna formacija kasnojurske do ranokredne starosti, 2) Olisostromni ofiolitni melanž s egzotičnim vapnencima srednjotrijaske do

ranojurske starosti, 3) Ofioliti uključeni u melanž predstavljeni s peridotitima, posredno gabrima, dijabazima, bazaltima i amfibolitima (185-180 mil. god; Pamić, 1982).

Geološku građu tog područja površinom najviše zauzimaju ultramafitne (peridotiti, lercoliti i dr.) stijene 500–650 $km^2$ , asocirane sa raznim varijatetima magmatskih stijena i metamorfnih stijena od kojih dominantno dolaze amfiboliti. Amfibolite karakterizira različitost u kemijskom sastavu s najvećim udjelom piropske komponente. Oni čine uže ili šire pojaseve oko ultramafitnih stijena, te ih u nekim dijelovima nadmašuju površinom, a najviše su rasprostranjenji na potezu Duboštica-Vijaka. Sve te stijene pripadaju jurskom ofiolitnom melanžu s grauvaknim pješčenjacima i slejtovima. Krivajsko-konjuški kompleks zajedno s ofiolitnim melanžom pokriva površinu od oko 1000 $km^2$. Preko ofiolitnog melanža sinklinalno leži Pogar formacija titansko-kredne starosti dok preko peridotita KKOC-a na području Sokoline transgresivno naliježu gornjojurski vapnenci. To sugerira da ja starost ofiolitnog melanža pala između srednje i gornje jure. Filiti i kvarc-sericitni škriljavci uočeni su na južnom obodu KKOC-a u okolici Duboštice te istočnom kraju planine Konjuh oko Miljevice, koji izgledom podsjećaju na paleozojske formacije. Može se pretpostaviti da su metamorfozirani iz grauvaknih pješčenjaka i siltova jurskog ofiolitnog melanža (Pamić, 1977).




Slika 4. Prilagođena karta (preuzeto iz Robertson et al. 2009) prikazuje pripadnost zaokruženog KKOC-a (Krivaja-Konjuh ophiolitic belt) CDOB-u (Central Dinaritic Ophiolitic belt).

Geografski, Krivajsko-konjuški kompleks ima približno pružanje ZSZ-IJI te se proteže od doline rijeke Bosne na zapadu do Sarajevsko-tuzlanske ceste na istoku. Na sjeveru i sjeverozapadu graniči s Ozren planinom dok se s južne strane proteže do Vareša i graniči s Ravan planinom i Zvijezdom. Kroz centralni dio ofiolitnog kompleksa protječe rijeka Krivaja dijeleći ga tako u dva bloka, pa je po njoj i susjednoj planini Konjuh dobio ime (slika 5).




Slika 5. Izdvojeno područje Kriavjsko-konjuškog masiva na karti Bosne i Hercegovine (preuzeto s www.bih-x.com/bhinfo/mape).

## 2.3. Geološka građa istraživanog područja

Područje istraživanja obuhvaćeno je osnovnom geološkom kartom, list Vareš 1:100 000 (Pamić et al., 1970), a karakterizira ga složena geotektonska građa. Područje lista Vareš može se podijeliti na dvije geotektonske cijeline: dio centralne ofiolitne zone (sjeveroistočni dio) i prijelazna zona paleozojskih škriljavaca i mezozojskih vapnenaca (jugozapadno područje lista). One su odvojene velikom vareško-nemilskom rasjednom zonom koja se interpretira kao regionalni reversni rasjed koji pada ka SI i I. Najlakše se uočava u rasjednoj zoni Borovica-Vareš-Čevljanovići. Jursko-vulkanogenu formaciju kao dio centralne ofiolitne zone karakterizira izrazita tektonska poremećenost pa u pojedinim dijelovima predstavlja melanžnu tvorevinu. U terenima koji su manje poremećeni, sedimenti ove formacije i preko nje transgresivna Pogarska serija padaju ka SSI, a Pogarska serija gradi prevrnutu sinklinalu iz čega se može zaključiti da se radi o izoklinalnom boranju. Unutar centralne ofiolitne zone mogu se definirati 4 geotektonske jedinice: Krivajsko-konjuški masiv, jugozapadni obod Krivajsko-konjuškog masiva, Pogarko-ponijerska sinklinala i sjeverno krilo Vareške strukture (Pamić et al., 1970).

Nalazišta najstarijih stijena kartiranog područja pripadaju paleozojskim sedimentima koji se podređeno javljaju kao uske zone u vareškoj trijaskoj strukturi. Unutar te strukture javljaju se i zone kvarcnih i glinenih škriljavaca s metapješčenjacima i liditima također paleozojske starosti.

Početkom alpskog-magmatskog ciklusa područje Vareša se nalazi pod morem, te se predpostavlja da je sedimentacijski bazen bio izdiferenciran na južni i sjeverni dio.

Donji trijas južnog razvoja bio je obilježen sedimentacijom pješčenjaka, glinenaca i vapnenaca. U aniziku dolazi do formiranja sedrastih dolomitnih vapnenaca, hematita, siderita i brečastih vapnenaca. U ladiniku dolazi do promjene u režimu sedimentacije, povećane vulkanske i hidrotermalne aktivnosti što za posljedicu ima formiranje spilita i tufova, te ležišta olova cinka i žive. Ponegdje se pronalaze alteracije glinenaca, rožnjaka i vapnenaca. Sjeverni dio bazena obilježen je sedimentacijom u mirnijim uvjetima. Za donji i srednji trijas značajan je kontinuirani vapnenački razvoj sa karakterističnim makro i mikrofosilnim zapisom. Gornji trijas je obilježen emerzijom.

Tijekom jure dolazi do povećane magmatske, hidrotermalne i tektonske aktivnosti, što za posljedicu ima produbljavanje i diferenciranje bazena formirajući novu sedimentno-vulkanogenu formaciju. Unutar nje se mogu razlikovati 3 stijenske asocijacije: 1) sedimentne stijene, 2) stijene-spiliti-dijabaz-gabro-granitne asocijacije, 3) stijene peridotitsko-amfibolske asocijacije.

Unutar sedimentne asocijacije najzastupljeniji su klastiti (pješčenjaci, glinenci i breče), rožnjaci i vapnenci. One su podređeno raspoređene u odnosu na magmatske stijene.

Stijene amfibolit-peridotitne asocijacije smatraju se velikom jedinstvenom cijelinom, u kojoj su najvećim postotkom zastupljeni peridotiti što ih čini najrasprostranjenijim magmatskim stijenama jurske vulkanogeno-sedimentne formacije. U velikom amfibolitskom kompleksu vrlo se često nalaze veća i manja ultramafitna tijela u potpunom konkordantnom odnosu. S druge strane u tim ultramafitnim ulošcima susrećemo zone amfibolitskih škriljavaca s postepenim prijelazima.

Prema mineralnom sastavu te strukturno-teksturnim karakteristikama unutar ultramafita se mogu izdvojiti: 1) lerzoliti, 2) peridotiti s litažom, 3) enstatit duniti, 4) serpentiniti.

Amfibolitske stijene se najčešće pojavljuju u vidu uskih zona oko većih ultramafitnih tijela. Najveći takav kompleks nalazi se na južnom obodu Krivajsko–konjuškog masiva, na potezu Duboštica–Vijaka. Mineralna asocijacija amfibolita je vrlo složena. Kao glavni minerali najčešće dolaze amfiboli ( hornblenda, pargasit i dr.), plagioklasi (anortit-oligoklas) i pirokseni (diopsid, omfacit, enstatit). Posredno se pojavljuju granati, korundi, klinozoisit te titanit, dok su od akcesornih najzastupljeniji cirkoni, apatit i ópaki (metalni) minerali. Glavni minerali su često deformirani (undulozna potamnjenja, izvijene trase kalavosti). Često se mogu vidjeti i efekti retrogradnog metamorfizma što se očituje u promjeni sastava plagioklasa, prisustvu kelifitskog ili simpletitskog ovoja. Stijene amfibolitskog facijesa tog područja se mogu podijeliti na: 1) amfibolite i amfibolske škriljavce, 2) kornud amfibolske škriljavce, 4) granat amfibolske škriljavce i 5) klinozoisit amfibolske škriljavce.

Razdoblje titon-donja kreda obuhvaćaju stijene južno i sjeverno od Vareške trijaske strukture. Na južnom području razvijene su flišne tvorevine s rožnjačko-karbonatno-klastičnim sedimentima koje najviše uključuju, laporovito-mikritne sedimente i pješčane sedimente. Na sjevernom području naslage nemaju fliške karakteristike, a izdvojene su sljedeće jedinice: Pogarska serija (konglobreče, pješčenjaci i breče), masivni vapnenci, rožnjaci, lapori, laporoviti mikriti i kalkareniti.

Na gornju kredu nailazimo na jugoistočnom dijelu flišne zone Banja Luka - Sarajevo, a pretežno je riječ o vapnencima i vapnenačkim brečama. Zastupljeni su i kalkareniti, areniti, kalkruditi, laporoviti mikriti i lapori.

Tercijar je predstavljen limničko-terestričkim sedimentima u okviru Sarajevsko-zeničkog ugljenosnog bazena. Tu se mogu izdvojiti tri polifacijesa: oligomiocenski, stariji miocenski i mlađi miocenski od kojih je svaki podijeljen na nekoliko litostratigrafskih jedinica.

Tvorevine kvartara se nalaze uz riječne doline karakterizirane pojavom šljunka, pijeska te rjeđe ilovače (Pamić et al., 1970).

# 3. METODE RADA

Za izradu ovog diplmskog rada korišteno je nekoliko analitičkih metoda koje uključuju:

1) izrada mikroskopsih izbrusaka

2) geokemija minerala napravljena elektronskom mikrosondom (EPMA)

3) cijelostijenski kemijski sastav dobiven ICP-MS-om (Induktivno spregnuta plazma s masenim spektroskopom)

4) računalni program Perple_X za izračun termodinamskih podataka

## 3.1. Metoda izrade izbrusaka

Za potrebe ovog diplomskog rada izrađeno je 11 neorijetniranih makroskopkih izbrusaka nazvanih DB1-DB7 koji su poslužili u mikropetrografskoj intepretaciji. Ti izbrusci su rađeni u labaratoriju Mineraloško-petrografskog zavoda. Drugi dio uzoraka prisutan je pod nazivima D05, D06, D34, D38 i D42. Uzorci D34 i D38 su orijentirani, okomiti na lineaciju, dok su DB, D05, D06 i D34 neorijentirani. Svi D preparati napravljeni su za EPMA na Institutu za kristalokemiju Univerzität Stuttgart. U ovom radu D05 i D06 služili su isključivo za mikropetrografsku interpretaciju, a D34, D38 i D42 uz mikropetrografiju, i mineralnu geokemiju te cijelostijensku geokemiju.

Prilikom izrade preparata za DB uzorke ponavljao se isti postupak. Od izbrušenih stijena napravljene su pločice debljine nekoliko milimetara zaljepljene na predmetno stakalce, pripremljene za daljnje brušenje. Takve pločice stanjene su na debljinu manju od milimetar pomoću praha od "90" na tzv. gramofonu. Nakon toga uz pomoć praha od "240" pa zatim "500", ručno, stanjenja do željene debljine od 0,02-0,03 mm. Takav izbrusak je zatim pokriven pokrovnim stakalcem iz kojeg je istisnut sav zrak te očišćen od viška kanada balzama, i spreman za mikroskopiranje.

Mikrofotografije izbrusaka dobivene su kamerom Canon EOS 500D pod povećanjem od 25x i 100x te obrađene programima EOS Utility te AxioVision.

## 3.2 Elektronska mikrosonda (EPMA)

Analiza elektronskom mikrosondom (EPMA) je destruktivna tehnika za kemijsku analizu krutih uzoraka male površine, u kojoj su rendgenske zrake pobuđene fokusiranim snopom elektrona. Spektar rendgenskih zraka sadrži karakteristične linije za svaki element; stoga se kvalitativna analiza provodi uspoređivanjem takvih dobivenih linija s njihovim valnim duljinama (energija fotona). Kvalitativna odredba tj. koncentracija prisutnih elemenata dobiva se na temelju usporedbe njihovih intenziteta sa s onima koje emitiraju standardizirani uzorci. Difraktirano zračenje analizira se posebnim spektrometrima, ponajviše pomoću WDS (valno disperzivnog spektrometra), a opremljen je u pravilu još s EDS (energetski disperzivnim spektrometrom), detektorom za BSE (povratno raspršene elektrone), SE (sekundarne elektrone) i CL (katodoluminiscenciju) detektorima.

Analiza je pogodna za zonirane minerale, minerale s ovojima i alteracijama, testiranje homogenosti te kemijske varijabilnosti. Analizira elemente od Be do U (Reed, 2005).

Analizu mikrosondom Cameca SX-100 napravio je prof.dr.sc. Balen na Institutu za mineralogiju i kristalokemiju Sveučilišta u Stuttgartu, te su uz njih napravljene BSE mikrofotografije i rendgenske kemijske mape za D34, D38 i D42 uzorke.

## 3.3 ICP-MS (Induktivno spregnuta plazma s masenim spektroskopom)

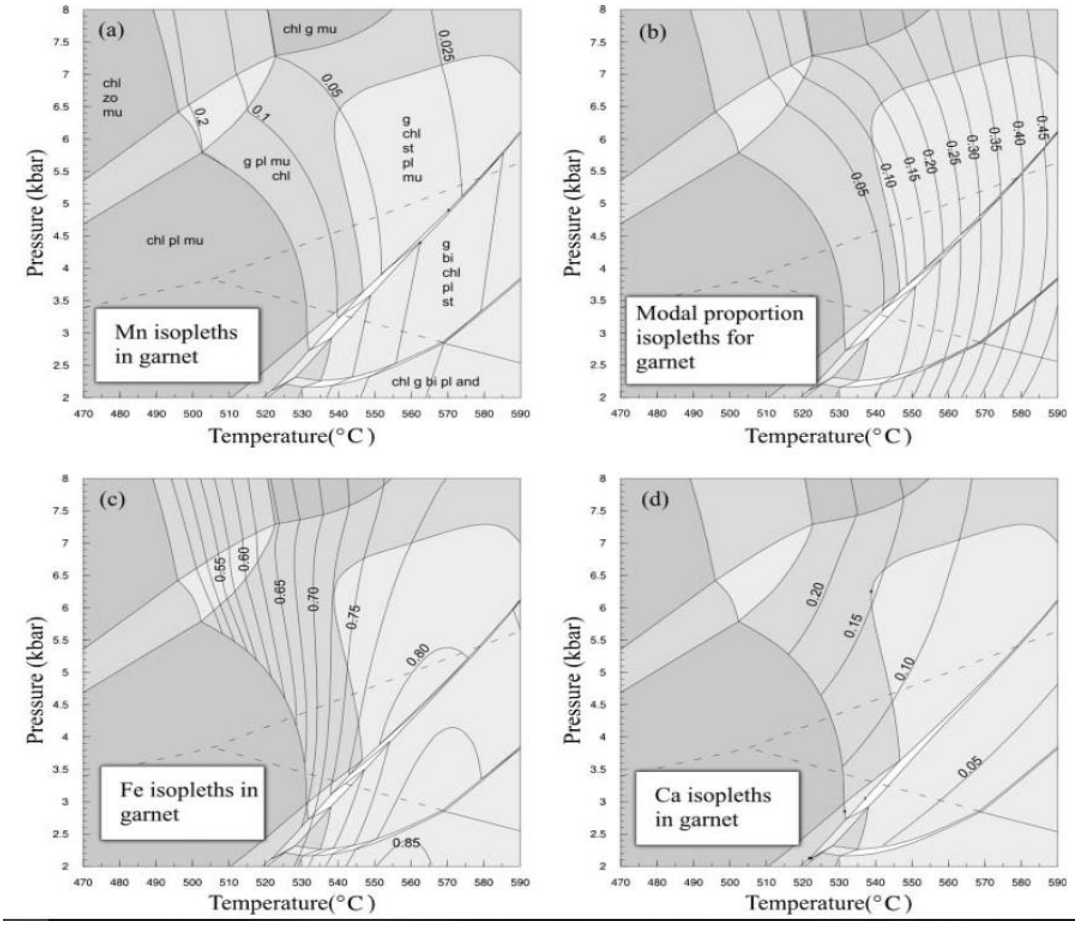
ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) je analitička tehnika koja se koristi za determinaciju elemenata. Ona kombinira visoko temperaturni ICP izvor s masenim spektrometrom. ICP izvor pretvara atome elemenata uzorka u ione. Oni se potom razdvajaju te ih detektira maseni spektrometar. Uzorak se u ICP plazmu uvodi kao aerosol, bilo usisavanjem tekućine ili otopljenog čvrstog uzorka u raspršivač, ili pomoću lasera koji direktno pretvara čvrste uzorke u aerosol. Aerosolu se potom ukloni otapalo i elementi aerosola se ioniziraju. Ioni zatim odlaze do masenog sprektrometra gdje se razdvajaju na temelju odnosa mase i naboja. Optička spektroskopija podijeljena je na AAS (atomic absorption spectroscopy) i AES (atomic emission spectroscopy). AES je instrumentalna tehnika koja se koristi za kvalitativnu detekciju kemijskih elemenata, a zasniva se na pobuđivanju iona i atoma, pomoću ICP-a, koji emitiraju elektromagnetsko zračenje karakterističnih valnih duljina za pojedini element. To je plamena tehnika s temperaturom plamena 6000-10000 K. AAS je spektroanalitički postupak za kvantitativno određivanje kemijskih elemenata pomoću apsorpcije optičkog zračenja (svjetlosti)

slobodnim atomima u plinovitom stanju. Atomska apsorpcijska spektroskopija temelji se na apsorpciji svjetlosti slobodnim metalnim ionima. (Wolf, 2005).

Na frakciji <0,122 mm usitnjenoj iz 100 g homogeniziranog uzorka napravljena je kemijska analiza cjelokupnog stijenskog sastava pomoću induktivno spregnute plazme (ICP) u laboratoriju ACME Analytical Laboratories Ltd., Vancouver (Kanada). Analitička točnost kontrolirana je korištenjem referentnih materijala STD DS10, STD OREAS45EA i STD SO-18 čiji je sastav usporediv s ovdje proučavanim stijenama. Referentni materijali su certificirani analizom CANMET Certified Reference Materials. U radu se ICP-MS koristio se kako bi se odredili elementi u tragovima u uzorku (uključujući REE-ove), dok su se uz pomoć ICP-ES determinirali glavni elementi i nekolicina elemenata u tragovima.

## 3.4. PERPLE_X

Perple_X (Connolly, 1990) računalni je paket koji omogućava provedbu geotermobarometrijskog (termodinamičkog) modeliranja kroz niz izračuna. Paket se sastoji od nekoliko specijaliziranih potprograma: (1) BUILD (kojim se zadaju osnovne varijable kao što su: komponente sustava, raspon tlakova i temperatura, cijelokupni sastav stijene i faze); (2) VERTEX (koji na temelju izlazne datoteke BUILD-a radi detaljne izračune za uvjete odgovarajućih faznih ravnoteža); (3) PSSECT (zadnji u nizu potprograma za izradu P–T pseudopresjeka, kreira pseudopresjek u PostScript datoteci kao temelj za daljnju obradu pomoću nekog od grafičkih softwarea); (4) WERAMI (u kojem se odabire mineralna faza za koju se želi izračunati promjena kemijskog sastava u ovisnosti o promjeni P–T uvjeta); (5) PSTABLE (na temelju izlazne datoteke WERAMI-a kreira PostScript datoteku s prikazom izopleta za odabrani mineral, tj. linija koje odgovaraju određenom kemijskom sastavu mineralne faze) (slika 6).

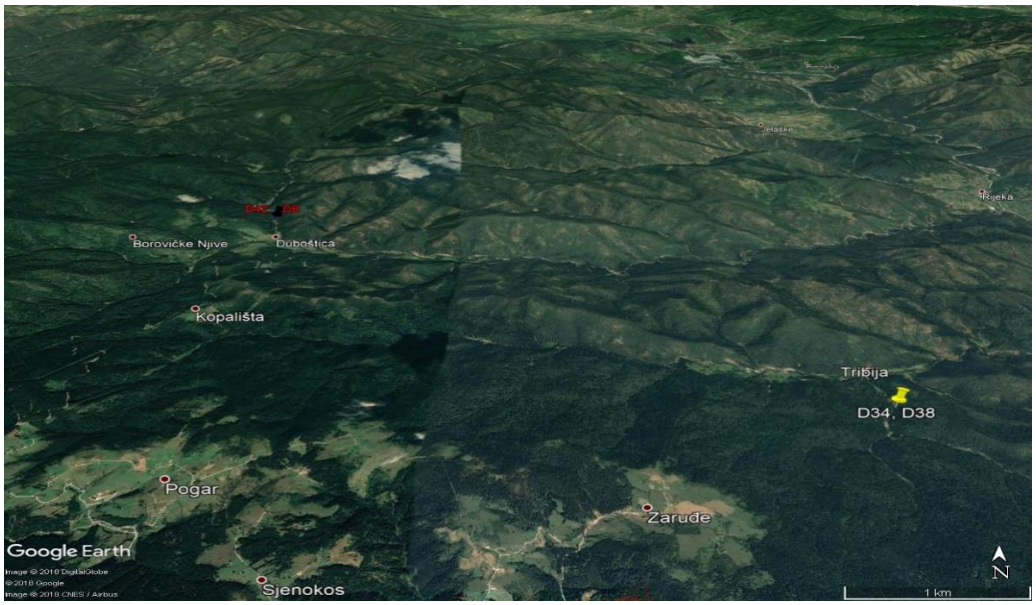



Slika 6. P-T pseudopresjeci, te definirane izoplete za pojedine granatske komponente dobivene Perple_X-om (preuzeto iz Evans, 2004).

# 4. REZULTATI

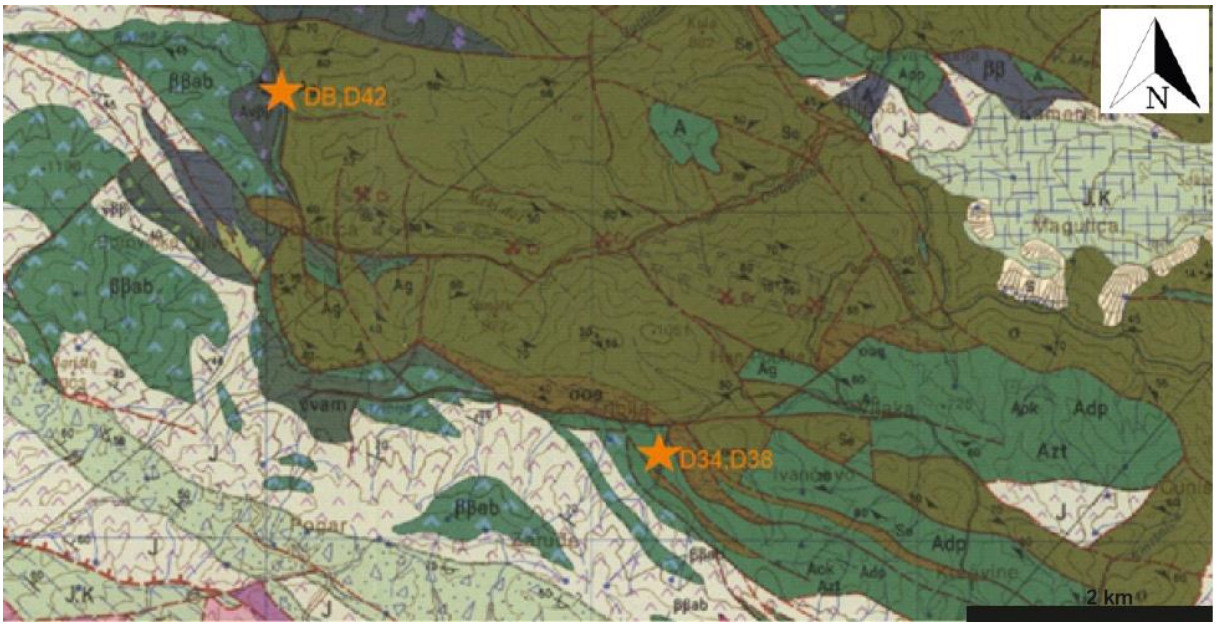
## 4.1 Položaji izdanaka i makroskopski opis stijena

Za potrebe ovog diplomskog rada uzeti su uzorci s dva lokaliteta. Geografske koordinate za izdanke s kojih su uzeti uzorci D42 i DB iznose N 44.24657 E 18.31303, dok za uzorke D34 i 38 iznose N 44.21062 E 18.38445. Njihov geografski položaj prikazan je na *Google Earth* karti (slika 7). Zračna udaljenost između proučavanih lokaliteta je cca. 2,5 km. Uzorci DB i D42 uzeti su 500 m sjeverno od sela Duboštica, dok su za D34 i D38 uzeti 500 m jugoistočno od sela Tribija.




Slika 7. Geografski položaj izdanaka istraživanih stijena. Karta napravljena *Google Earth* programom.

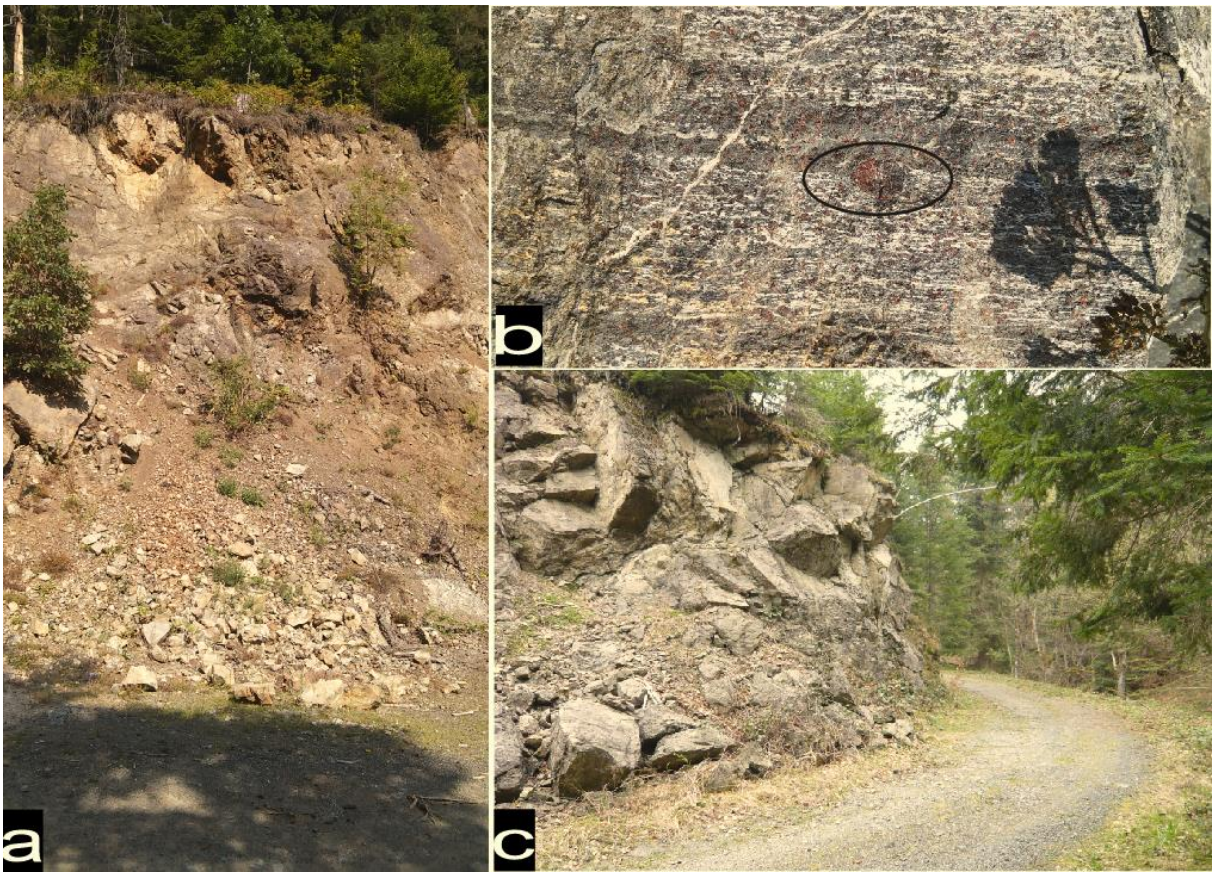
Odgovorajući položaji izdanaka za istraživane uzorke prikazani su i na OGK list Vareš 1:100 000 narančastom zvjezdicom (Olujić et al., 1970; slika 8). Na geološkoj karti se može primjetiti da se lokacija za DB i D42 nalazi ,u uskoj zoni, u kontaktu s amfibol-dolerit-dijabaznim magmatskim stijenama (Aυββ), spilitima (ββab) i serpentinitma (Se). Istraživani DB i D42 su na karti klasificirani kao grantski amfiboliti (Ag). Lokacija za uzorke D34 i D38 nalaze se u zoni između enstit dunita (σom), a prema karti su klasificirani kao amfibolski škriljavci (Aok).




Slika 8. Isječak iz OGK, List Vareš 1:100000 ( Olujić et al., 1970) s pripadajućim lokacijama istraživanja označene narančastim zvjezdicama.

DB i D42 uzorci su prikupljeni iz malog kamenoloma (pozajmišta) koji se nalazi uz makadamsku cestu koju prati korito Ravne rijeke. Izdanak je jasno vidljiv (slika 9a). Izdanak izgleda kao mali kamenolom s vrlo fragmentiranim blokovima stijena. Na blokovima stijena se mogu vidjeti svježa crvena mineralna zrna milimetarskih do centimatrskih veličina koja se nalaze u melankokratskim i leukokratskim mineralnim vrpcama različitih debljina. Vrpce ponegdje obavijaju veća zrna tvoreći sigmoidalne forme oko granata koje mogu biti korisne u intepretaciji karaktera smicanja (slika 9b).

D34 i D38 su prikupljeni nedaleko od sela Tribije uz sporednu makadamsku cestu koju paralelno prati Duboki potok (slika 9c). Izdanak je lako uočljiv iako je više zarastao vegetacijom u odnosu na DB i D42 uzorke. Radi se o masivnim kompaktnim blokovima tvrdih stijena, malo fragmentiranih u podnožju. Stijene su naizgled zeleno do smeđe boje, na svježem prijelomu tamne s uočljivim crvenim zrnima granata.




Slika 9. **a)** Pozajmište uz korito Ravne rijeke, nedaleko od Duboštice s kojeg su prikupljeni DB i D42 granatski amfiboliti. **b)** Makroskopski izgled DB i D42 amfibolita. Vidljive su izmjene melanokratskih i leukokratskih vrpci s vidljivom preferiranom orijentacijom. U elipsi; granati su vidljivo različitih veličina, veći raspucali te pokuzuju sigma tip klasta; **c)** Izdanak iz korita Dubokog potoka nedaleko od Tribije s kojeg su prikupljeni D34 i D38 uzorci. Karakteriziraju ga masivni kompaktni blokovi djelomično obrasli vegetacijom.

## 4.2 Mineralna optika

Mikroskopski izbrusci DB1–DB7 pokazuju granoblastičnu strukturu i škriljavu teksturu (slika 10). Svi DB uzorci imaju sličan ili jednak procijenjeni modalni sastav: 35%vol. amfibola, 30% vol. granata, 15% vol. klinopiroksena, 15% vol. kvarca i 5% vol. opakih minerala (slika 11). D05, 06, 34, 38 i 42 su obzirom na strukturno–teksturne mineraloške karakteristike podijeljeni u dvije grupe. D05,06 i 42 uzorci pokazuju granoblastičnu strukturu i škriljavu teksturu analogno DB uzorcima. S druge strane D34 i 38 izbrusci pokazuju kataklastičnu do heteroblastičnu strukturu te škriljavu teksturu gdje su uzorci brušeni okomito na lineaciju. D05, 06 i 42 uzorci pokazuju isti mineralni faze kao i DB uzorci uz to da se u D05, 06 i 42 uzorcima javlja titanit, plagioklas i opáki minerali u većim postocima, a manjim udjelom granatske komponente, pa je prema tome za D granoblastične uzorke procijenjen sljedeći modalni sastav: 30% vol. amfibola, 20% vol. granata, 15% vol. plagioklasa, 20% vol. klinopiroksena, 10% vol. kvarca, 5% vol. titanita i opákih minerala. D34 i D38 izbrusci pokazuju drugačiju petrografsku sliku u odnosu na druge izbruske jer ga čine temperaturno i tlačno deformirane melanokratske domene filosilikata u kojima "plivaju" kataklazirani ili nekataklazirani granati, uzorke, te ponegdje alterirani amfiboli što može upućivati na velike P-T promjene kroz koje je stijena prošla, definirajući ih tako kao stijene koje su nastale u smičnoj zoni (slika 12). Plagioklasi i kvarc se nalaze podređeno u odnosu na granoblastične uzorke.

**Amfiboli** su predstavljeni alotriomorfnim zrnima sa smeđim i zelenim pleokroizmom. Najčešće dolaze u kontakt s granatima i piroksenima gdje su im zrna manja u odnosu na spomenute faze. Nerijetko se nađu kao uklopci u zrnima granata ili prodiru u njih formirajući alotriomorfne oblike. Kalavost je jasno vidljiva na većim zrnima. U D05, 06 i 42 zrna su sačuvanija i svježija, a u D34 i D38 sitnozrnata i raspucala gdje su podređeni u odnosu na granoblastične uzorke. Mjereni kutevi maksimalnog kosog potamnjenja amfibola u uzorcima dali su raspon 18-25°, čime su određene kao hornblende. Amfiboli ulaze u sastav reakcijskih rubova granata u DB uzorcima. Čine ih agregati igličastog i vlaknastog habitusa, interferirajući u bojama 2. i 3. reda, ponegdje je ona prekrivena vlastitom bojom. Rijetko su vidljiva zrna koja su obuhvaćena izmjenama u klorit.

**Klinopiroksene** karakteriziraju rezistentna hipidiomorfna i alotriomorfna izdužena zrna gdje se vidi jedan sustav kalavosti, često raspucali, a nalaze se u kontaktu s amfibolima, plagioklasima i granatima. Rijetko se nađu idiomorfna poprečna zrna s jasnim sustavima kalavosti pod kutem od 90°. Mjereni kutevi kosog potamnjenja piroksena na desetak zrna dali se raspon 30-54° , te je

determiniran kao diopsid. Na većim zrnima vidljive su sraslačke lamele na D05, 06 i 42 izbruscima (slika 13) dok u DB uzorcima nisu uočene. U D05, 06 i 42 uzorcima vidljiva su i undulozna potamnjenja živih interferencijskih boja 2. i 3. reda. Ulaze u sastav formiranja ovoja uz amfibole, a dolaze u vidu sitnih ameboidalnih alotriomorfnih formi.

**Filosilikati** su zastupljeni jedino u D34 i D38 uzorcima iz smične zone. Čine ih melanokratske vrpce "utisnute" ili blago borane u kontaktu s granatima i ópakim mineralima. S obzirom na interferencijsku boju i pleokroizam u smeđoj boji oni su determiniran kao biotit.

**Plagioklase** čine hipidiomorfna i idiomorfna zrna većinom u kontaktu s granatima i kvarcom. Uz kvarc čine leukokratski dio stijene. Većina zrna je alterirana što se očituje u izostajanju polisinteskih sraslačkih lamela. Nerijetko se mogu primjetiti nagrižena zrna. Ponegdje se mogu naći kao uklopci u granatima.Veliki udio plagioklasa pokazuje polisintetske deformacijske sraslace koje su u razvoju ili su se već razvili, a koji se naručito mogu lijepo uočiti u D05, 06 i 42 izbruscima (slika 14). Oblik i debljina lamela varira, te se može govoriti o podvrgnutosti stijene velikim tlakovima. Rijetka izdužena idiomorfna zrna s polisintetskim sraslačkim lamela prisutna te pogodna za mjerenja kuta iz zone simetrijskog potamnjenja nalaze se u DB5 izbrusku kod kojeg su oni determinirani kao oligoklas (slika 15).

**Kvarc** se najčešće nalazi u kontaktu s plagioklasima tvoreći leukokratski dio, te se može pronaći uz rubove. Ponegdje se mogu pronaći zrna s višim interferencijskim bojama zbog deblje izbrušenih dijelova preparata. Hipidiomorfnih i idiomorfnih su oblika osobito u melanokratskim dijelovima kada je u stijeni uspostavljena statička rekristalizacija, a kutovi između zrna kvarca i plagioklasa iznose 120°. U DB2 uzorcima rijetko se mogu se naći relikti dinamičke rekristalizacije: bulging ("triple junction"), undulozno potamnjenje, zadiranja minerala i šivane strukture u leukokratskom dijelu (slika 16), sve dok se nije dogodila redukcija zrnskih graničnih područja i uspostavljanje statičke kristalizacije. Zastupljeniji su u uzorcima s granoblastičnom strukturom.

**Granati** su hipidiomorfna zrna najčešće okruglastog ili elipsastog oblika u D05, 06 i 42 te DB uzorcima dok su u D34 i D38 rompskog oblika te većinom ispucali. Zrna granata su u promjeru puno većih dimenzija u odnosu na bilo koju drugu prisutnu mineralnu fazu. Naješće dolaze u kontakt sa amfibolima, kvarcom i plagioklasima (mogu upućivati na kristalizaciju iz taljevine; slika 17). Zbog svojih veličina često uklapaju alotriomorfna zrna plagioklasa, amfibola, piroksena, a u D05, 06 i 42 zrna titanita (slika 18). U DB izbruscima veća zrna su izgubljena te egzistiraju

manja zrna u granoblastičnom matriksu. Kod D34 i 38 uzoraka zrna su fragmentirana pod utjecajem stresa, dok u melanokratskom filosilikatnom dijelu se uočavaju i rotirana zrna. U izbruscima postoji nekolicina zrna koje su uhvaćene procesima alteracije. Takva zrna su alterirana prolaskom sekundarne žile ili prodiranjem druge mineralne faze kroz granat (slika 19 i 20). U analiziranim mikroskopskim izbruscima granati su podijeljeni u dvije grupe s obzirom na prisustvo reakcijskog ruba, na one koji ih posjeduju, i one koje ih ne posjeduju. Reakcijski rubovi su prisutni u svim DB izbruscima, i D05,06 i 42 izbuscima. U D34 i 38 izbruscima se nalaze samo oni granati koji nemaju reakcijske rubove (slika 21). Takvi rubovi su najšešće "čupavi" (slika 22) ili "zaobljeni" (slika 23), a pod analizatorom interferiraju u crnoj, svjetlosmeđoj, ili zelenkastoj boji višeg reda. Reakcijski rubovi pokazuju različitu simetriju i sastav. U DB, D05, D06 i D42 uzorcima nalaze se kontinuirani rubovi te rubovi uz pojedine dijelove zrna. Često se mogu vidjeti kontaktu s leukokratskim fazama. Mineralni sastav tih ovoja u DB uzorcima čine: klinopirokseni, amfiboli, plagioklasi te opáki minerali, dok je on u D05, 06 i 42 uzorcima pokazuje jednostavniji mineralni sastav koji uključuje plagioklase i opáke minerale.

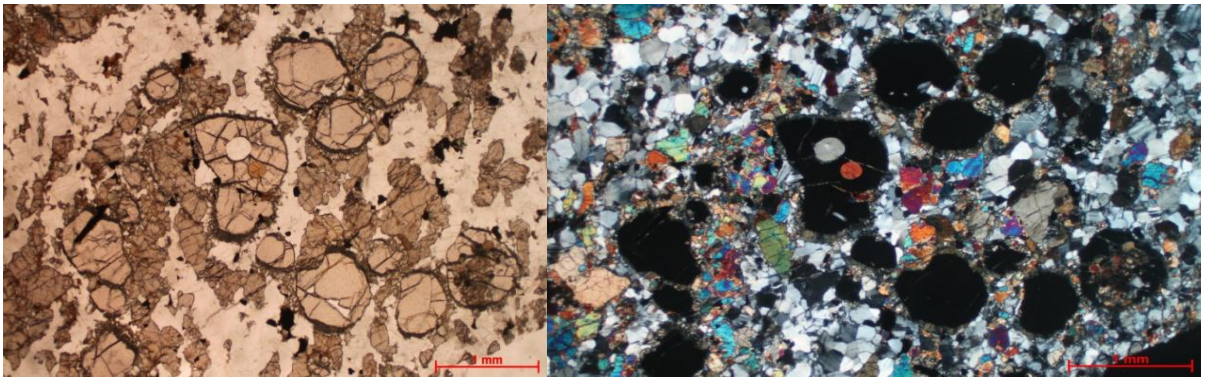
**Titanit** se javlja kao akcesoran mineral u D05, 06 i 42 uzorcima. Čine ga alotriomorfna ovalna zrna najčešće uklopljena i raspršena u granatima.

**Opáke minerale** karakteriziraju alotriomorfna zrna koja su često sistematično formirana uz reakcijske rubove granata ili rijetko uklopljena u granate. Veća i češća zrna su vidljiva u u D34 i D38 gdje su u ravnomjernom kontaktu s ostalim mineralnim fazama.

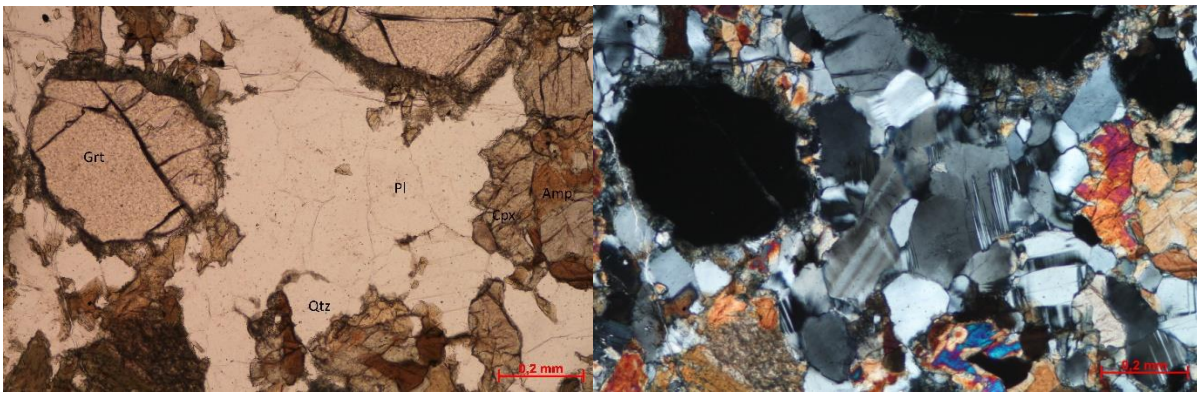
S obzirom na opisane mikropetrografske karakteristike pojedinih mineralnih faza uzorci DB, D05, D06, D42 i D34 su klasificirani kao granatski amfiboliti, a D38 kao granulit.

Napomena: Mikrofotografije uzoraka bit će prikazane u idućem podpoglavlju *Mikrofotografije uzoraka.*

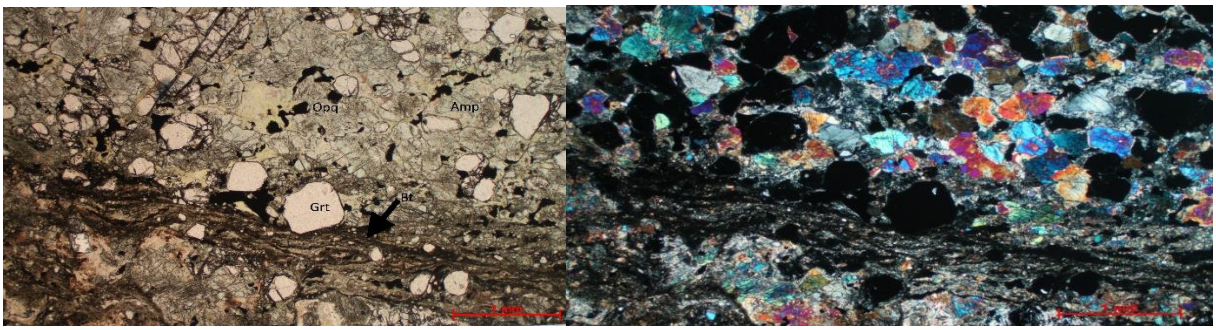
### 4.2.1. Mikrofotografije uzoraka



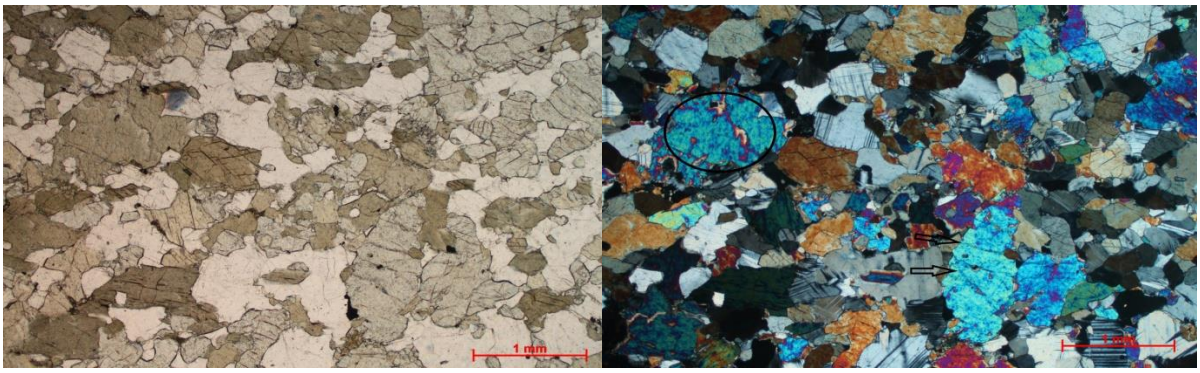
Slika 10. Mikrofotografija uzorka DB6. Na slici vidljiva prisutna granoblastična struktura i škriljava tekstura. Lijevo N(-) , desno N(+).



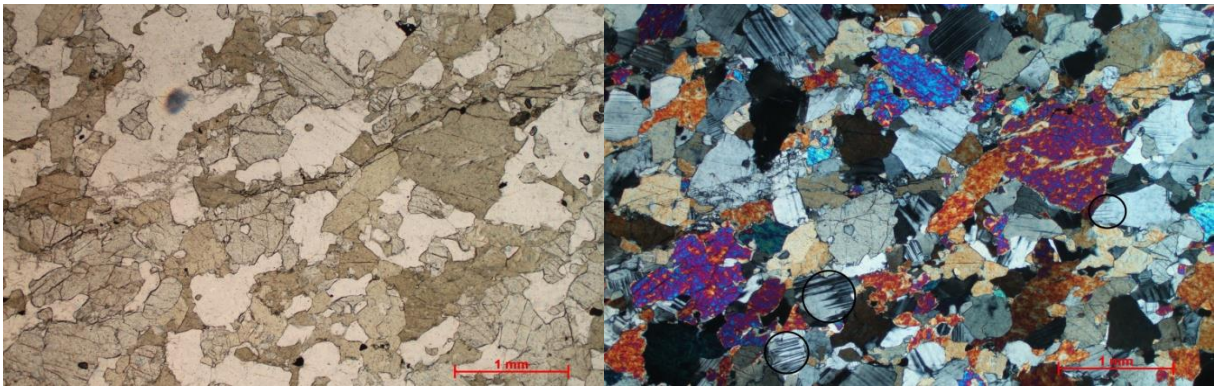

Slika 11. Mikrofotografija uzorka DB5. Na slici lijevo su označene glavne mineralne faze uzoraka Grt (granat), Pl (plagioklas), Qtz ( kvarc), Cpx (klinopiroksen), Amp (amfibol). Lijevo (N-), desno (N+).



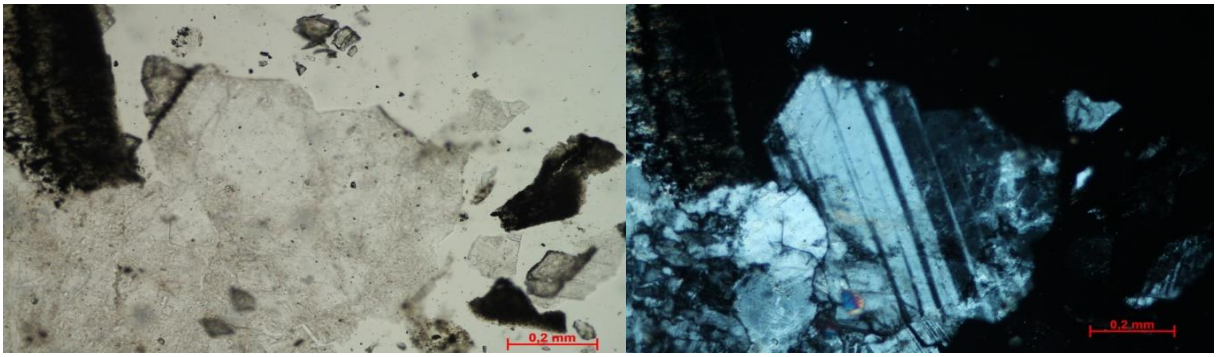

Slika 12. Mikrofotografija uzorka D38. Vidljiva kataklastična struktura, škriljavost i preferirana orijentacija s naznačenim mineralnim fazama: Grt (granat), Amp (amfiboli), Opq (opáki minerali) i Bt (biotit u vidu boranih vrpci) . Lijevo N(-) i desno N(+).



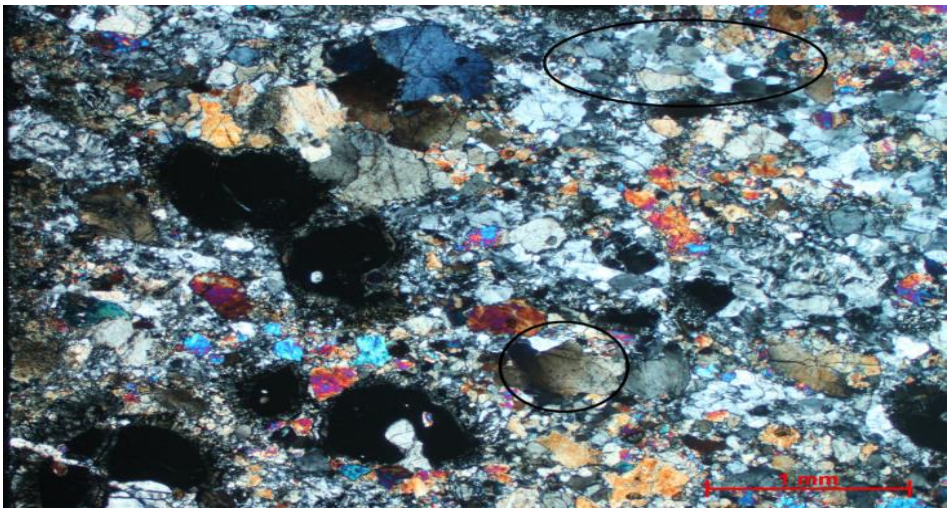

Slika 13. Mikrofotografija uzorka D05. Desno elipsom je označeno undulozno potamnjenje, a strelicama sraslačke lamele klinopiroksena. Lijevo N(-) , desnoN(+).



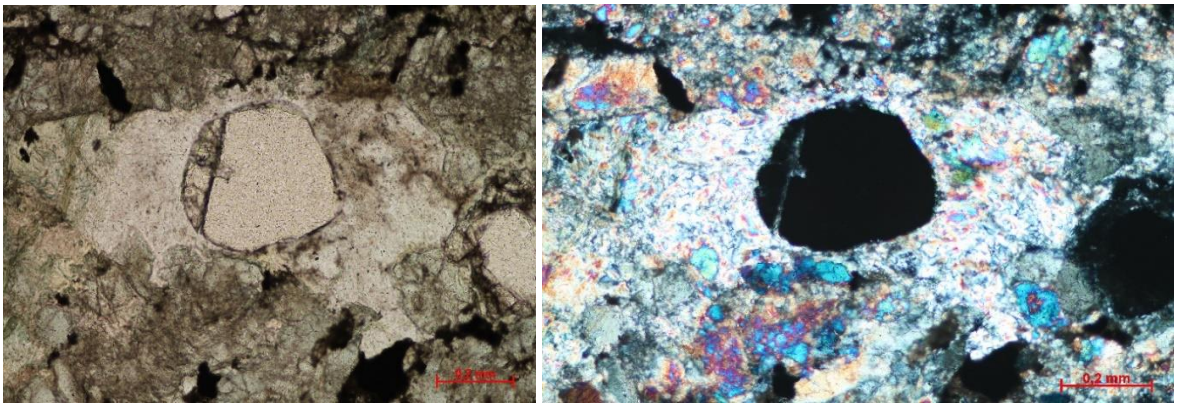

Slika 14. Mikrofotografija uzorka D05. Na desnoj sliki elipsama su označene deformacijski sraslaci plagioklasa različite debljine i oblika. Lijevo N(-),desno N(+).



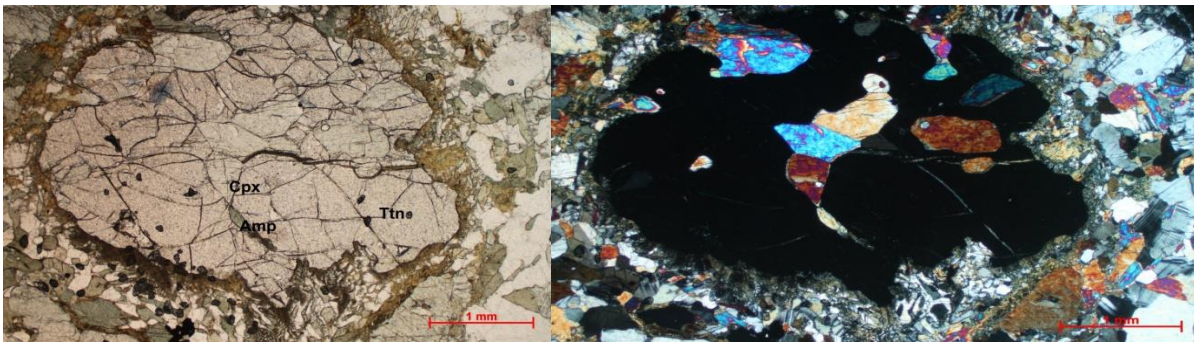

Slika 15. Mikrofotografija uzorka DB5. Idiomorfno zrno plagioklasa sa jasno vidljivim polisintetskim sraslačkim lamelama. Lijevo N(-) i desno N(+).



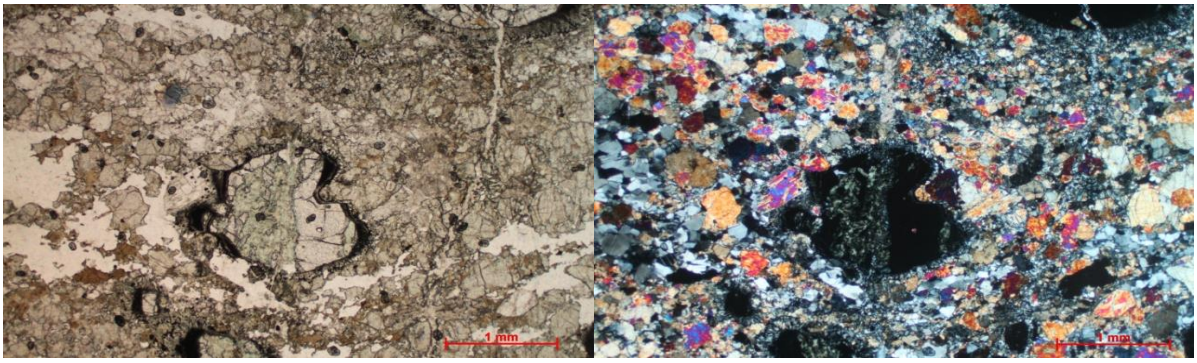

Slika 16. Mikrofotografija uzorka D42. Elipsom su označi tragovi dinamičke rekristalizacije kvarca i plagioklasa. Mogu se uočiti undulozna potamnjenja, GBM (grain boundary migration) formacije. N(+).



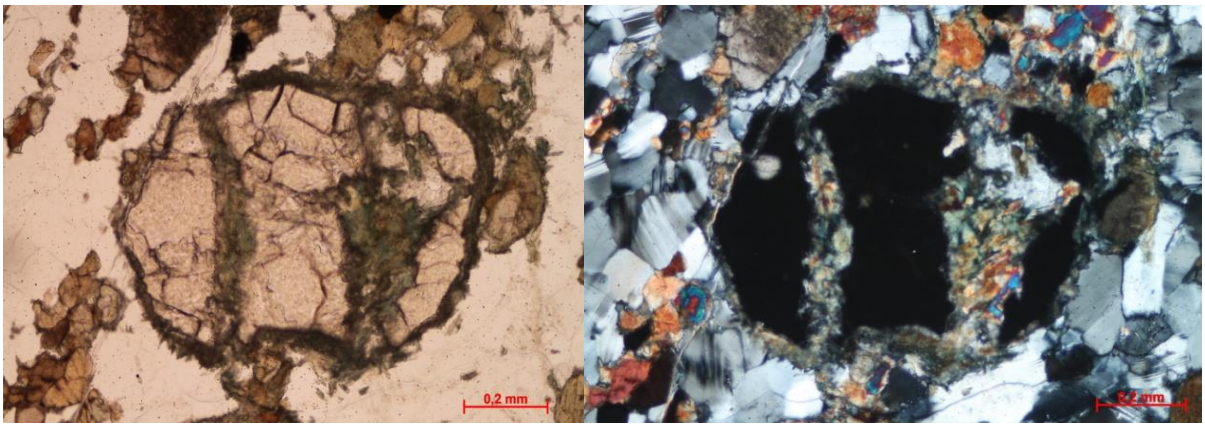

Slika 17. Mikrofotografija uzorka D38. Zrno granata u melanokratskom dijelu matriksa; može upućivati na kristalizaciju granata iz džepića taljevine. Lijevo N(-), desno (N+).



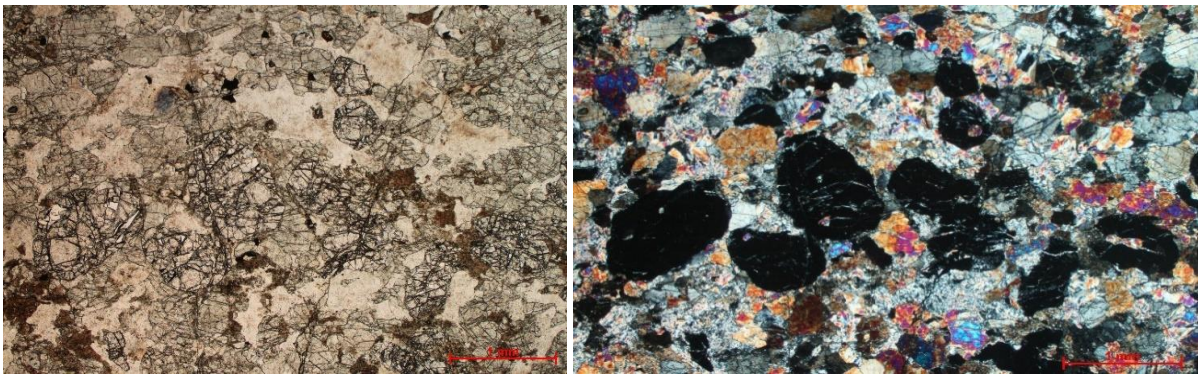

Slika 18. Mikrofotografija uzorka D05. Na lijevoj slici ozančene su mineralne faze koje su kao uklopci prisutni u granatu; klinopiroksen (Cpx), amfibol (Amp) i titanit (Ttn). Lijevo N(-) i desno N(+).



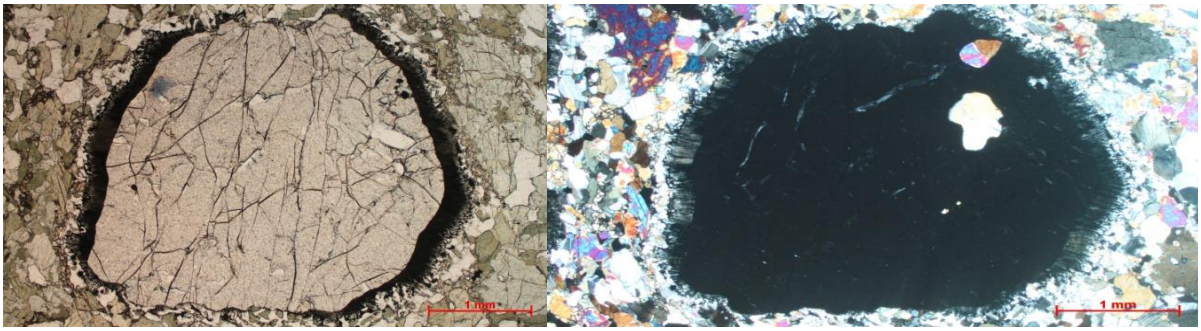

Slika 19. Mikrofotografija uzorka D42. Na slici se može vidjeti prodiranje sekundarne žile kroz granat mjenjajući mu tako kemijski sastav što se vidi u promjeni vlasite boje kao i potamnjenja. Lijevo N(-), desno N(+).



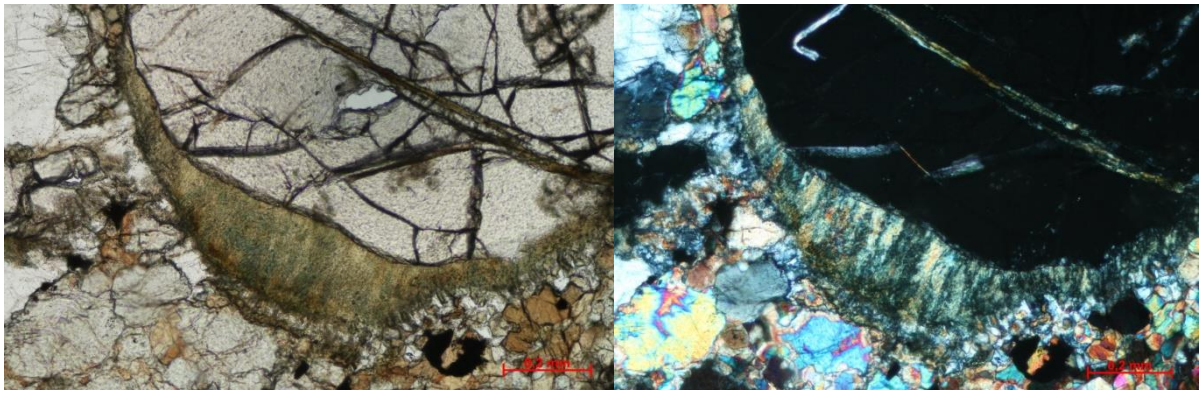

Slika 20. Mikrofotografija uzorka DB6. Crvoliko prodiranje drugih mineralnih faza uzrokovalo je alteraciju granata. Lijevo N(+) , desno N(-).



Slika 21. Mikrofotografija uzorka D34. Kataklazirani granati bez reakcijskih rubova. Lijevo N(-), desno N(+).



Slika 22. Mikrofotografija uzorka D05. U sredini veliko hipidiomorfno zrno granata sa čupavim reakcijskim rubom kojeg čine opáki minerali. Lijevo(N-), desno (N+).



Slika 23. Mikrofotografija uzorka DB2. Vidljiv obrubljeni reakcijski rub složenog mineralnog sastava. N(+) i N(-).

## 4.3 Geokemijski sastav stijena i minerala

### 4.3.1 Cijelostijenski geokemijski sastav

Geokemijska analiza cijelokupnog sastava stijene obavljena je metodom ICP-MS kojom su dobivene koncentracije glavnih elemenata izraženih u težinskim postocima (wt %), te koncentracije elemenata u tragovima izražene u ppm-a (part per million) i ppb-a (part per billion). Dobiveni rezultati cijelostijenskog sastava prikazani su u Tablici 2. Cijelostijenski kemijski sastav je poslužio kao ulazni podatak za računalni program Perple_X. Podatke za Perple_X bilo je potrebno prilagoditi tako što je svo željezo preračunato u FeO, $P_2O_5$ je odračunat čime je smanjena i količina Ca koji se veže u njega. Udio vode je preračunat na 6%wt tako da je ukupna suma ∑100 %. Prilagođeni kemijski sastav potreban za Perple_X prikazan je u Tablici 3.

Tablica 2. Rezlultati cijelostijenskog kemijskog sastava za uzorke D34, D38 i D42.

| **Analit** | **Unit*** | **D.L.*** | **D34** | **D38** | **D42** |
|---|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | 0,01 | 45,01 | 42,54 | 46,89 |
| **$Al_2O_3$** | % | 0,01 | 13,35 | 12,49 | 16,78 |
| **$Fe_2O_3$** | % | 0,04 | 8,9 | 13,81 | 8,54 |
| **MgO** | % | 0,01 | 9,27 | 9,65 | 8,83 |
| **CaO** | % | 0,01 | 19,19 | 16,36 | 11,77 |
| **$Na_2O$** | % | 0,01 | 0,84 | 0,32 | 3,14 |
| **$K_2O$** | % | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 |
| **$TiO_2$** | % | 0,01 | 0,82 | 1,67 | 0,6 |
| **$P_2O_5$** | % | 0,01 | <0.01 | 0,11 | <0.01 |
| **MnO** | % | 0,01 | 0,12 | 0,27 | 0,13 |
| **$Cr_2O_3$** | % | 0,002 | 0,018 | 0,017 | 0,037 |
| **LOI** | % | | 2,2 | 2,5 | 3 |
| **∑** | **%** | | **99,78** | **99,74** | **99,79** |
| **Ag** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **As** | PPM | 0,5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 |
| **Au** | PPB | 0,5 | 2,3 | 1,2 | 2,4 |
| **Ba** | PPM | 1 | 3 | 6 | 4 |
| **Be** | PPM | 1 | <1 | <1 | <1 |
| **Bi** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **Cd** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **Co** | PPM | 0,2 | 39,7 | 47,7 | 36,9 |
| **Cs** | PPM | 0,1 | <0.1 | 0,1 | <0.1 |
| **Cu** | PPM | 0,1 | 23,6 | 6,2 | 31,5 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ga** | PPM | 0,5 | 13,7 | 13,5 | 13,7 |
| **Hf** | PPM | 0,1 | 0,7 | 2 | 0,5 |
| **Hg** | PPM | 0,01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| **Mo** | PPM | 0,1 | 0,1 | 0,2 | <0.1 |
| **Nb** | PPM | 0,1 | 0,4 | 3 | <0.1 |
| **Ni** | PPM | 20 | 86 | 67 | 96 |
| **Pb** | PPM | 0,1 | 0,8 | 1,5 | 1,1 |
| **Rb** | PPM | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 0,2 |
| **Sb** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **Sc** | PPM | 1 | 46 | 52 | 36 |
| **Se** | PPM | 0,5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 |
| **Sn** | PPM | 1 | <1 | <1 | <1 |
| **Sr** | PPM | 0,5 | 18,1 | 16 | 177,8 |
| **Ta** | PPM | 0,1 | <0.1 | 0,2 | <0.1 |
| **Th** | PPM | 0,2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 |
| **Tl** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **U** | PPM | 0,1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **V** | PPM | 8 | 310 | 413 | 221 |
| **Y** | PPM | 0,1 | 15,1 | 37,8 | 12,1 |
| **W** | PPM | 0,5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 |
| **Zn** | PPM | 1 | 15 | 26 | 19 |
| **Zr** | PPM | 0,1 | 18,3 | 69,6 | 15,4 |
| **La** | PPM | 0,1 | 0,6 | 2,9 | 0,9 |
| **Ce** | PPM | 0,1 | 3,4 | 10,3 | 2,9 |
| **Pr** | PPM | 0,02 | 0,67 | 1,74 | 0,5 |
| **Nd** | PPM | 0,3 | 4,1 | 9,9 | 2,9 |
| **Sm** | PPM | 0,05 | 1,58 | 3,53 | 1,12 |
| **Eu** | PPM | 0,02 | 0,78 | 1,09 | 0,57 |
| **Gd** | PPM | 0,05 | 2,39 | 5,32 | 1,74 |
| **Tb** | PPM | 0,01 | 0,43 | 0,95 | 0,31 |
| **Dy** | PPM | 0,05 | 2,85 | 6,4 | 2,09 |
| **Ho** | PPM | 0,02 | 0,61 | 1,35 | 0,46 |
| **Er** | PPM | 0,03 | 1,67 | 4,12 | 1,3 |
| **Tm** | PPM | 0,01 | 0,24 | 0,6 | 0,19 |
| **Yb** | PPM | 0,05 | 1,48 | 3,96 | 1,17 |
| **Lu** | PPM | 0,01 | 0,21 | 0,61 | 0,19 |
| **∑ REE** | | | **21,01** | **52,77** | **16,34** |

D.L*= granica detekcija analita, Unit*=mjerna jedinica za udio pojedinog analita

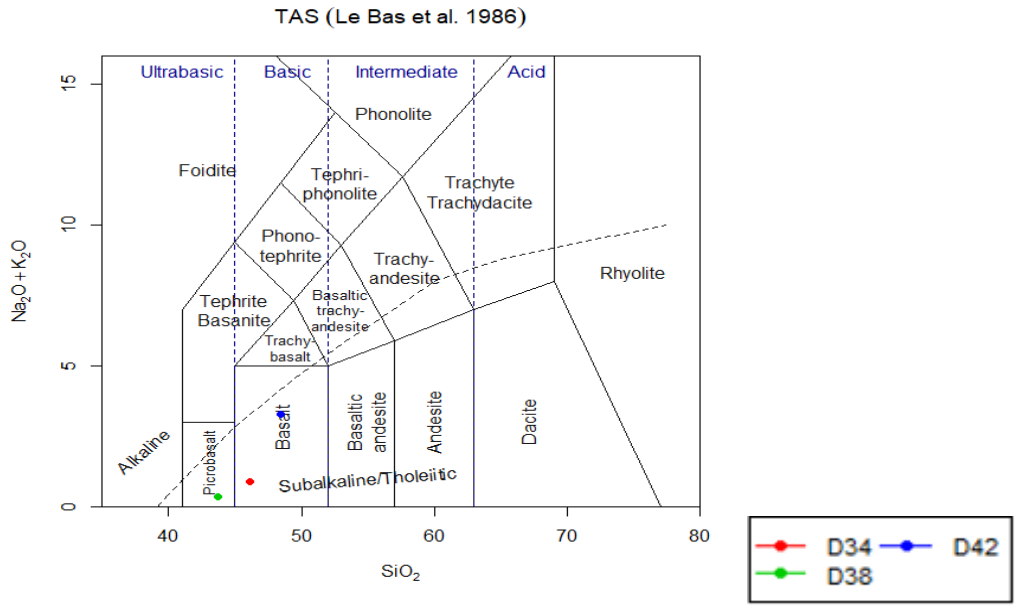
Tablica 3. Termodinamski podaci preračunati za Perple_X

| **Perple_X** | **D34** | **D38** | **D42** |
|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | 43,759 | 41,774 | 45,962 |
| **$TiO_2$** | 0,797 | 1,640 | 0,588 |
| **$Al_2O_3$** | 12,979 | 12,265 | 16,448 |
| **FeO*** | 7,788 | 12,206 | 7,535 |
| **$O_2$** | 0,086 | 0,135 | 0,084 |
| **MnO** | 0,117 | 0,265 | 0,127 |
| **MgO** | 9,012 | 9,476 | 8,655 |
| **CaO** | 18,644 | 15,923 | 11,524 |
| **$Na_2O$** | 0,817 | 0,314 | 3,078 |
| **$K_2O$** | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| **$H_2O$*** | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| **$CO_2$** | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| ∑ | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

FeO*= svo željezo preračunato za sustav MnNCFMASHTO,

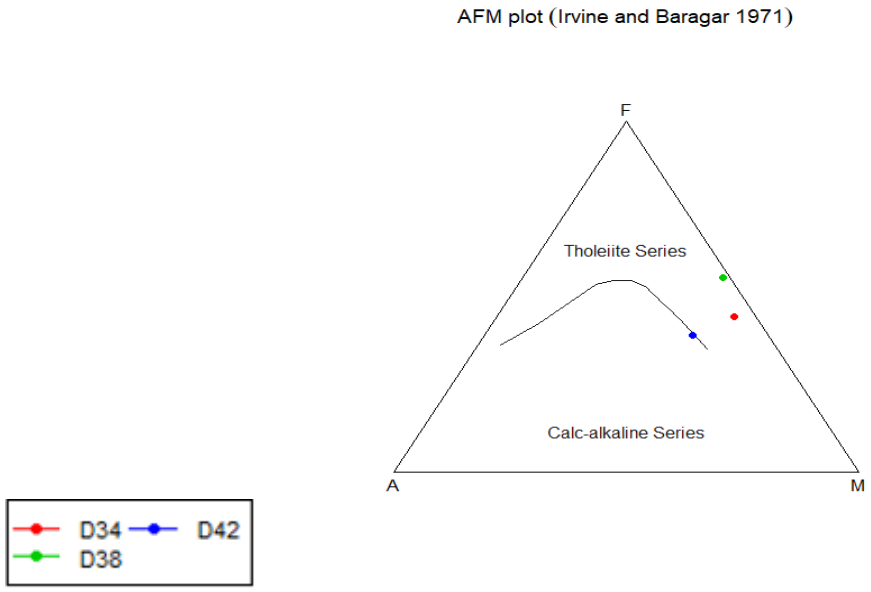
H2O*=hipotetska voda potrebna za zasićenje sustava

Na temelju cijelokupnog kemijskog sastava napravljeni su klasifikacijski, geotektonski i spider dijagrami u GCDkit programu verzija 5.0 (Janoušek et al., 2016). Prvi korišteni klasifikacijski dijagram je TAS koji se može koristiti za vulkanite i plutonite , a u obzir uzima omjere glavnih elemenata tako da se na osi ordinata nalazi suma $N_2O+K_2O$, a na osi apscisa $SiO_2$. Na TAS dijagramu (La Bas et al., 1986) sastav stijena za uzorke D34 i D42 pada u polje bazalta, dok uzorak D38 pada u polje pikrobazalta. Iz dijagrama se može uočiti da stijene karakterizira nizak udio ukupnih alkalija ($N_2O+K_2O$). Također se može primjetiti da svi uzorci pripadaju subalkalnoj ili toleitnoj seriji (slika 24).



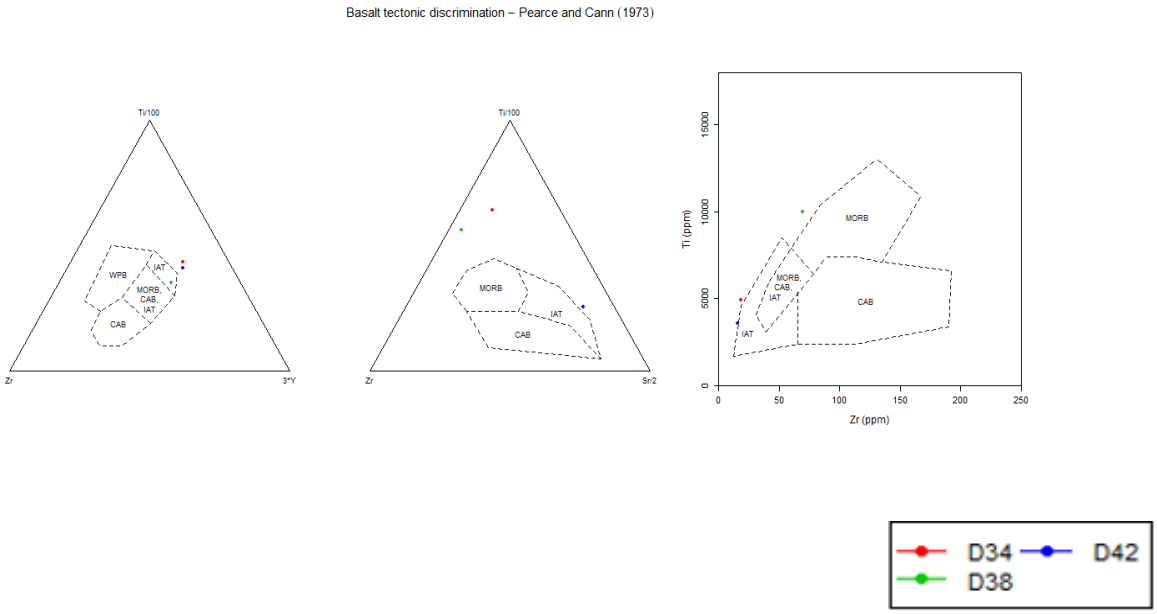

Slika 24. TAS dijagram (La Bas et al., 1986). D34 i D42 amfiboliti padaju u polje bazalta, a D38 u polje pikrobazalta.

Za diskrimanciju odnosno pripadnost toleitnoj ili subalkalnoj seriji korišten je trokomponentni AFM dijagram (Irvine & Baragar, 1971). U vrhovima trokuta tog dijagrama se nalaze: $Al_2O_3$ (A), FeO kao ukupno željezo (F), MgO (M). Na AFM dijagramu (slika 25) D34 i D38 se projeciraju u polje toleitne serije dok D42 uzorak pada na granicu subalkalne i toleitne serije.



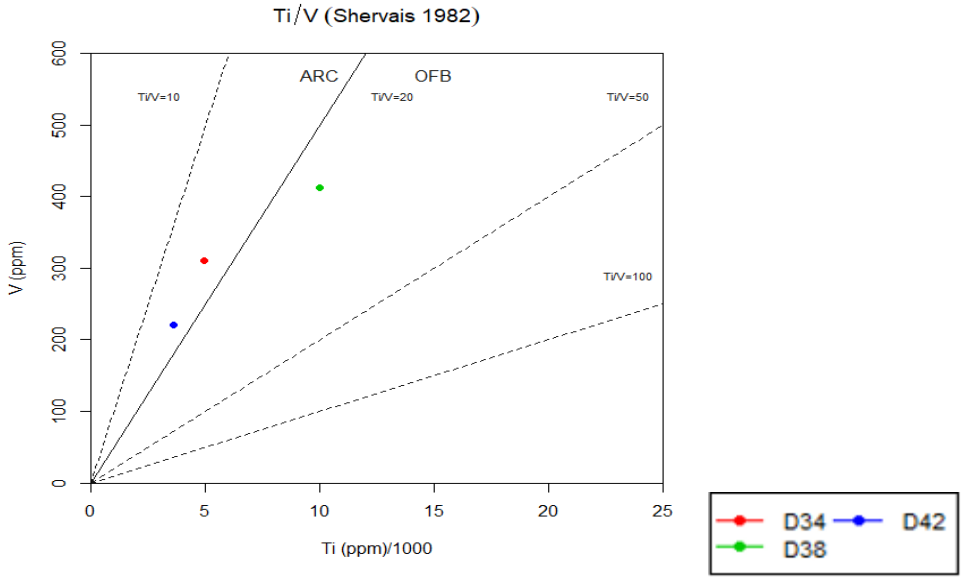

Slika 25. AFM dijagram (Irvin and Baragar,1971). D34 i D38 projeciraju u toleitnu seriju, a D42 u kalcijsko-alkalijsku seriju.

Gotektonski položaj bazatnih protolita dijelom je determiniran na bazaltnim tektonskim dijagramima (Pearce & Cann, 1973) zasnovanim na nekompatibilnim elementima u tragovima. Može se primjetiti da jedino uzorak D38 na dijagramu Zr-Ti/100-3*Y pada u polje toleitnog otočnog luka (IAT). Na temelju ovih dijagrama uzorci D34 i D42 padaju blizu polja IAT što se osobito vidi na Ti–Zr dijagramu (Slika 26) .



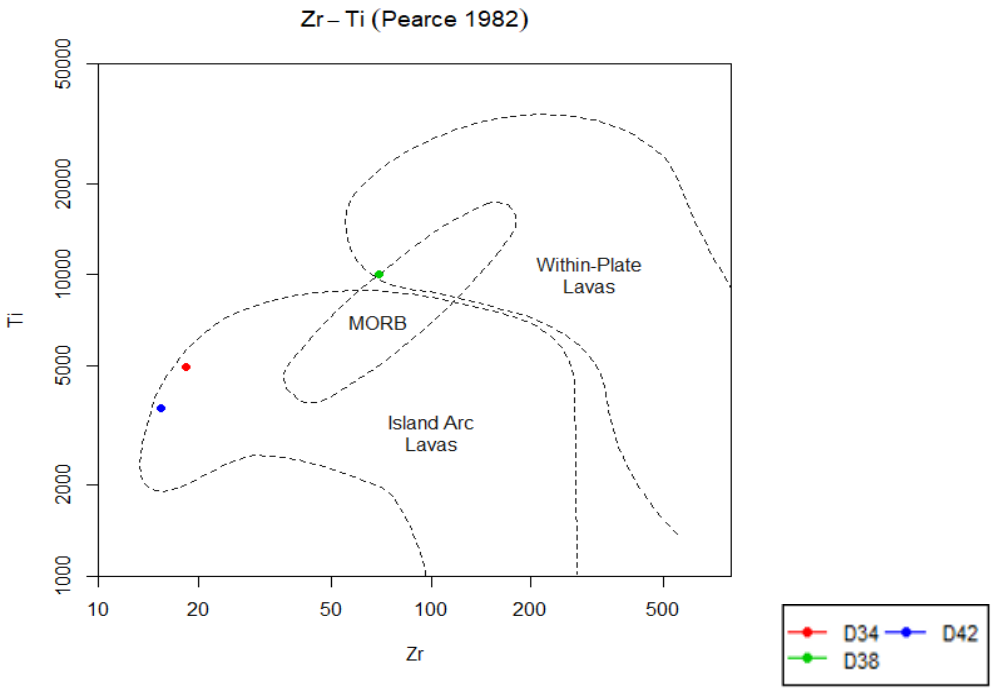

Slika 26. Tektonska klasifikacija bazalta (Pearce & Cann, 1973). WPB – Within Plate Basalts, CAB – Continental Arc Basalts, IAT – Island Arc Tholeiites, MORB – Mid Ocean Ridge Basalt. D38 uzorak pada u IAT područje, dok ostali uzorci padaju izvan geotektonskih polja.

Diskriminacijski dijagram za bazalte Ti/V (Shervais, 1982) determinirao je njihov geotektonski položaj (slika 27) tako što se D38 uzorak projecira u polje ARC (arc island basalt), dok se uzorci D34 i D38 projeciraju u OFB polje (Ocean Floor Basalt; MORB).




Slika 27. Ti/V geotektonski diskriminacijski dijagram (Shervais, 1982). D38 uzorak pokazuje pripadnost OFB (Ocean floor basalt; MORB) polju, dok se uzorci D34 i D42 projeciraju u ARC (island arc basalt) polju.

Zr-Ti diskrimancijski dijagram (Pearce, 1982) potvrđuje smeštaj bazaltnih protolita kao i u Shervaisovom dijagramu što se može vidjeti na slici 28. D38 projecira se u rubno područje MORB-a, a D34 i D42 u polje bazalta otočnih područja.

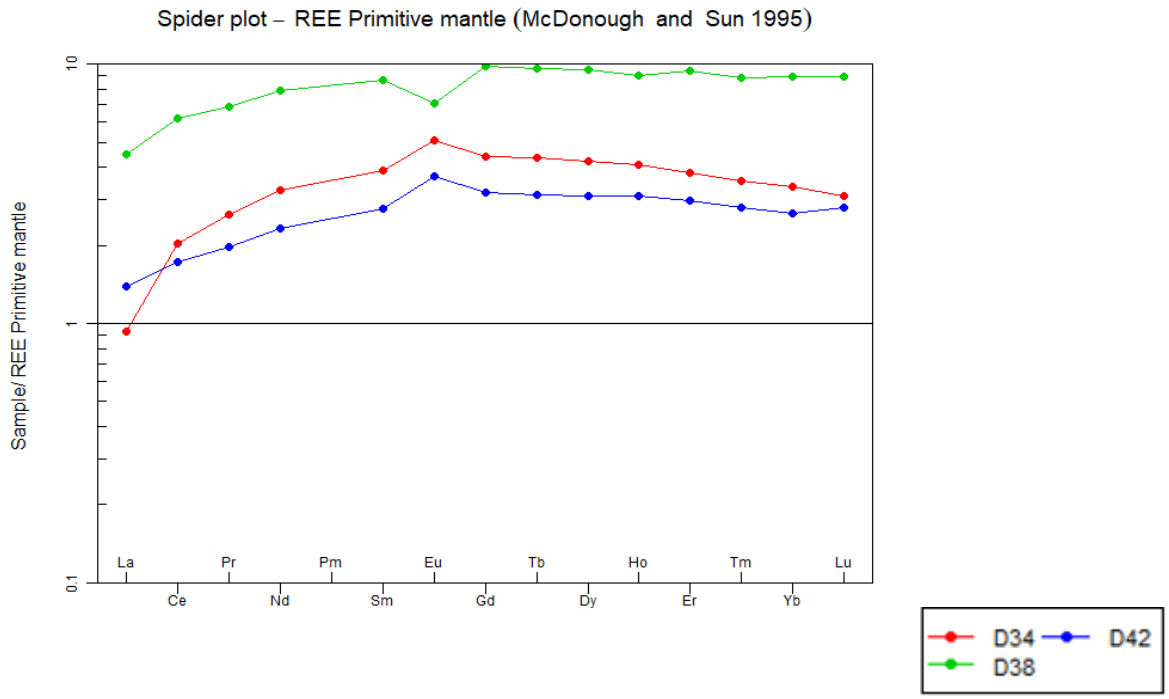



Slika 28. Zr-Ti diskrimancijski dijagram (Pearce, 1982). D38 uzorak smješten je u rubno područje MORB-a. D34 i D42 uzorci padaju u polje *Island Arc Lavas.*

Model koncentracija elemenata u tragovima može bit vrlo različit za magamatske stijene. Ovi modeli mogu biti korišteni za razlikovanje izvorišnih područja različitih magmi, za rješavanje magmatskog frakcioniranja ili mješanja magme . Kako bi dale osnove za usporedbe vrijednosti individualnih sijena moraju biti normalizirane na neki refentni geokemijski sustav. Dva najčešće korištena sustava su primitivni plašt te prvobitni sastav Zemlje na osnovu hodnritnih meteorita. Spider dijagrami normalizirana količina elemenata je prikazana vertikalno, dok je odabir elemenata prikazan horizontalno. Red ovih elemenata obično prati kompatibilnost ili atomski broj elemenata, a je uređen tako da lagano daje rastući obrazac za normalizirane količine elemenata u bazaltima srednjooceanskog hrpta (MORB).

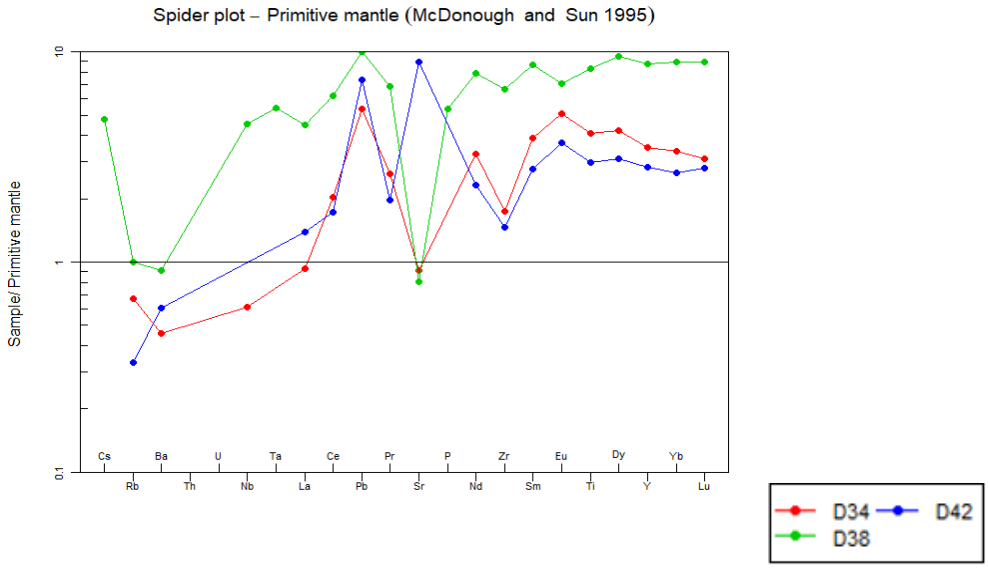
Normalizacija elemenata iz skupine lantanida (REE) napravljena je na standardu primitivnog plašta (McDonough & Sun, 1995). Na dijagramu (slika 29) se može uočiti kako su vrijednosti REE-ova za D34 i D42 neznatno veće u odnosu na vrijednost plašta, te nisu značajno frakcionirani. Sve tri stijene pokazuju slične trendove s tim da uzorak D38 pokazuje negativnu

europijevu anomaliju, a D34 i D38 pozitivnu. Može se također primjetiti kako je vrijednost La kod D34 uzorka nešto niža u odnosu na vrijednost primitivnog plašta.



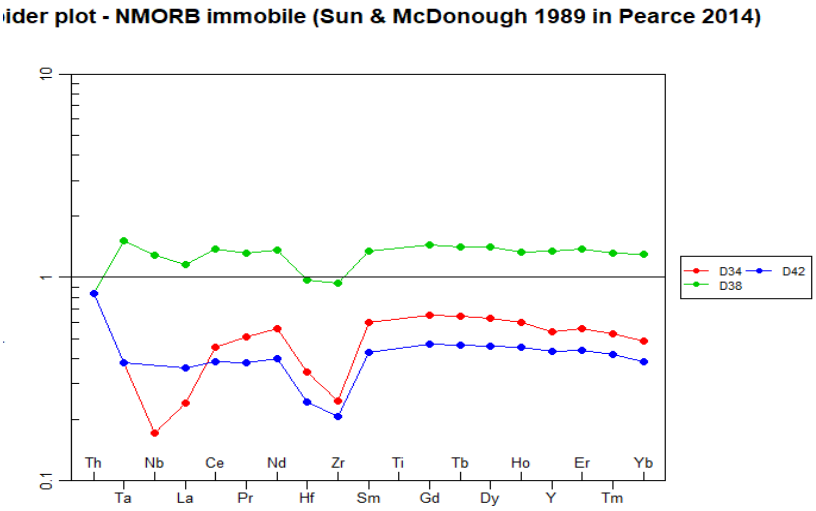

Slika 29. Normalizirani elementi iz skupine lantanida (REE) na referentnu vrijednost primitivnog plašta (McDonaugh & Sun, 1995).

Normalizacija elemenata u tragovima na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995) na spider dijagramu (slika 30) je generalno pokazala veće koncentracije elemenata u tragovima u odnosu na primitivni plašt. Vidljive su znatno veće koncentracije Pb kod sva tri uzorka. Također može se uočiti negativna stroncijeva anomalija kod uzoraka D34 i D38 te da su te vrijednosti približno iste vrijednostima primitivnog plašta, dok D42 ima pozitvnu stroncijevu anomaliju. Uz Sr kod D38 uzorka približne vrijednosti primitivnog plašta imaju i Rb i Ba, dok su kod D34 uzorka vrijednosti Rb, Ba i Nb nešto niže u odnosu na plašt, kod D42 uzorka Rb i Ba.




Slika 30. Normalizirane vrijednosti elemenata u tragovima na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995).

Normalizacija imobilnih elemenata na N-MORB (Normal Ocean Ridge Basalt) pokazala je (slika 31) sistematičan trend za uzorak D38 čije su vrijednosti približno jednake vrijednostim MORBA, što potvrđuje geotektonski smještaj bazaltnog protolita MORBU determiniran i geotektonskim dijagramima, dok D34 i D42 pokazuju jednake trendove s negativnom cirkonijevom anomalijom nešto nižim vrijednostima u odnosu na N-MORB.




Slika 31. Normalizacija imobilnih elemenata na NMORB (Sun &McDonough 1989 in Pearce 2014).

### 4.3.2. Mineralna geokemija granata

Mineralna geokemija obuhvatila je analizu glavnih mineralnih faza u D34, D38 i D42 stijenama uključujući amfibole, piroksene, plagioklase, ilmenit i granate, obavljene elektronskom mikrosondom (EPMA) u Njemačkoj pod vodstvom prof.dr.sc. Balena. U ovom poglavlju sav će se naglasak dati na geokemijsku interpretaciju zrna granata proučavajući kemijski sastav njegovih kationa te kemijski sastav njegovih reakcijskih rubova koji su jedino prisutni u D42, D38 i D42 uzorku. Uz geokemijski sastav napravljene su i *kemijske rendgenske mape* za granatske komponente: almandinsku (alm), grossularsku (grs), piropsku (prp) i spessartinsku (sps). Kemijskim mapa bit će interpretirane koncentracije pojedinih komponenti od jezgre prema rubu. Na taj način će se pokušati utvrditi relativne P–T uvjete metamorfizma. Sirovi podaci kemijskih analiza granata dobiveni elektronskom mikrosondom morali su se naknadno preračunati na kationske jedinice, a preračunate su uz pomoć računalnog programa *CalcMin* (Brandelik, 2009). Kemijske analize zrna granata prikazane za uzorke D34, D38 i D42 prikazane u tablicama 4, 5 i 6. U svim uzorcima kationi su preračunati na 24 atoma kisika s izraženim molarnim udjelima glavnih komponenata.

Tablica 4. Kemijska analiza granata D34 uzorka izražena u težinskim udjelima (%). Kationi preračunati na 24 atoma kisika s molarnim udjelima glavnih komponenata.

| **D 34** | Gt1 core | Gt2 zone | Gt3 zone | Gt4 rim | Gt5 rim | Gt201 core | Gt202 zone | Gt203 rim | Gt204 rim |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #7 | #8 | #9 | #10 |
| $SiO_2$ | 39,18 | 39,30 | 39,55 | 39,24 | 39,06 | 39,42 | 39,50 | 39,50 | 38,83 |
| $TiO_2$ | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,06 |
| $Al_2O_3$ | 22,10 | 22,06 | 22,23 | 22,05 | 21,97 | 22,03 | 22,23 | 21,90 | 21,92 |
| $Cr_2O_3$ | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,03 | 0,01 |
| $Fe_2O_3$ | 1,42 | 1,35 | 1,00 | 0,93 | 1,35 | 1,10 | 1,15 | 1,29 | 1,40 |
| FeO | 18,39 | 18,39 | 18,62 | 19,40 | 18,77 | 18,47 | 18,74 | 18,91 | 18,61 |
| MnO | 0,32 | 0,39 | 0,36 | 0,54 | 0,45 | 0,46 | 0,44 | 0,48 | 0,44 |
| MgO | 12,23 | 12,05 | 12,03 | 11,14 | 11,61 | 11,97 | 12,09 | 11,55 | 11,79 |
| CaO | 6,36 | 6,44 | 6,22 | 6,34 | 6,56 | 6,13 | 6,16 | 6,32 | 6,36 |
| $Na_2O$ | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| ∑ | **100,17** | **100,12** | **100,15** | **99,77** | **99,92** | **99,74** | **100,44** | **100,05** | **99,42** |
| Si | 5,773 | 5,811 | 5,863 | 5,874 | 5,794 | 5,874 | 5,829 | 5,894 | 5,777 |
| Ti | 0,013 | 0,011 | 0,011 | 0,009 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,007 |
| Al | 3,838 | 3,844 | 3,883 | 3,890 | 3,841 | 3,868 | 3,866 | 3,851 | 3,842 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,007 | 0,004 | 0,001 |
| $Fe^{3+}$ | 0,157 | 0,150 | 0,111 | 0,104 | 0,150 | 0,123 | 0,128 | 0,145 | 0,157 |
| $Fe^{2+}$ | 2,266 | 2,274 | 2,308 | 2,428 | 2,329 | 2,302 | 2,312 | 2,360 | 2,315 |
| Mg | 2,686 | 2,656 | 2,658 | 2,486 | 2,567 | 2,659 | 2,660 | 2,569 | 2,614 |
| Ca | 1,004 | 1,020 | 0,988 | 1,017 | 1,042 | 0,978 | 0,974 | 1,010 | 1,013 |
| Mn | 0,040 | 0,049 | 0,046 | 0,069 | 0,056 | 0,058 | 0,055 | 0,060 | 0,056 |
| Na | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,002 |
| **components** | | | | | | | | | |
| grs | 0,167 | 0,170 | 0,165 | 0,169 | 0,174 | 0,163 | 0,162 | 0,168 | 0,169 |
| prp | 0,448 | 0,443 | 0,443 | 0,414 | 0,428 | 0,443 | 0,443 | 0,428 | 0,436 |
| alm | 0,378 | 0,379 | 0,385 | 0,405 | 0,388 | 0,384 | 0,385 | 0,393 | 0,386 |
| sps | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,009 | 0,010 | 0,009 | 0,010 | 0,009 |

Tablica 5. Kemijska analiza granata D38 uzorka izražena u težinskim udjelima (%). Kationi preračunati na 24 atoma kisika s molarnim udjelima glavnih komponenata.

| **D38** | Gt5core | Gt6 | Gt7 | Gt8 | Gt9rim | Gt10rim | Gt11rim | Gt12rim | Gt201core | Gt202 | Gt203rim | Gt204rim |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | #15 | #16 | #17 | #18 | #19 | #20 | #21 | #22 | #23 | #24 | #25 | #26 |
| $SiO_2$ | 38,06 | 38,05 | 38,12 | 38,02 | 37,89 | 38,39 | 38,57 | 38,34 | 38,40 | 38,57 | 38,49 | 38,02 |
| $TiO_2$ | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,05 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,07 |
| $Al_2O_3$ | 21,17 | 21,30 | 21,46 | 20,90 | 21,09 | 21,63 | 21,07 | 21,25 | 21,37 | 21,36 | 21,20 | 21,28 |
| $Cr_2O_3$ | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| $Fe_2O_3$ | 1,76 | 1,75 | 1,52 | 2,02 | 1,69 | 1,23 | 1,82 | 1,52 | 1,58 | 1,71 | 1,96 | 1,70 |
| FeO | 21,10 | 21,45 | 21,43 | 21,33 | 21,63 | 22,49 | 22,02 | 22,34 | 22,08 | 22,31 | 22,29 | 22,54 |
| MnO | 0,73 | 0,73 | 0,76 | 0,77 | 0,81 | 0,79 | 0,83 | 0,88 | 0,70 | 0,74 | 0,79 | 0,71 |
| MgO | 9,09 | 9,03 | 9,10 | 8,84 | 8,87 | 8,78 | 8,79 | 8,82 | 9,32 | 9,36 | 9,26 | 9,10 |
| CaO | 7,10 | 7,10 | 7,02 | 7,03 | 6,72 | 6,61 | 6,61 | 6,26 | 6,18 | 6,04 | 6,08 | 6,10 |
| $Na_2O$ | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 |
| ∑ | **99,14** | **99,54** | **99,57** | **99,06** | **98,82** | **100,06** | **99,86** | **99,50** | **99,73** | **100,17** | **100,23** | **99,52** |
| Si | 5,791 | 5,759 | 5,762 | 5,812 | 5,798 | 5,809 | 5,884 | 5,852 | 5,822 | 5,828 | 5,814 | 5,768 |
| Ti | 0,011 | 0,013 | 0,012 | 0,012 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,006 | 0,010 | 0,009 | 0,010 | 0,007 |
| Al | 3,797 | 3,800 | 3,823 | 3,766 | 3,804 | 3,857 | 3,788 | 3,823 | 3,819 | 3,805 | 3,773 | 3,804 |
| Cr | 0,002 | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,004 | 0,002 |
| $Fe^{3+}$ | 0,202 | 0,199 | 0,173 | 0,233 | 0,195 | 0,140 | 0,209 | 0,174 | 0,180 | 0,194 | 0,222 | 0,194 |
| $Fe^{2+}$ | 2,685 | 2,716 | 2,709 | 2,727 | 2,768 | 2,846 | 2,809 | 2,852 | 2,800 | 2,819 | 2,816 | 2,859 |
| Mg | 2,061 | 2,039 | 2,051 | 2,015 | 2,023 | 1,980 | 2,000 | 2,006 | 2,106 | 2,109 | 2,086 | 2,058 |
| Ca | 1,158 | 1,152 | 1,136 | 1,151 | 1,102 | 1,071 | 1,080 | 1,023 | 1,005 | 0,977 | 0,984 | 0,991 |
| Mn | 0,095 | 0,094 | 0,097 | 0,100 | 0,104 | 0,102 | 0,107 | 0,113 | 0,090 | 0,095 | 0,101 | 0,091 |
| Na | 0,001 | 0,000 | 0,008 | 0,007 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,013 | 0,000 |
| **components** | | | | | | | | | | | | |
| grs | 0,193 | 0,192 | 0,189 | 0,192 | 0,184 | 0,178 | 0,180 | 0,171 | 0,167 | 0,163 | 0,164 | 0,165 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| prp | 0,344 | 0,340 | 0,342 | 0,336 | 0,337 | 0,330 | 0,333 | 0,334 | 0,351 | 0,351 | 0,348 | 0,343 |
| alm | 0,448 | 0,453 | 0,451 | 0,455 | 0,461 | 0,474 | 0,468 | 0,475 | 0,467 | 0,470 | 0,469 | 0,477 |
| sps | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,018 | 0,019 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,015 |

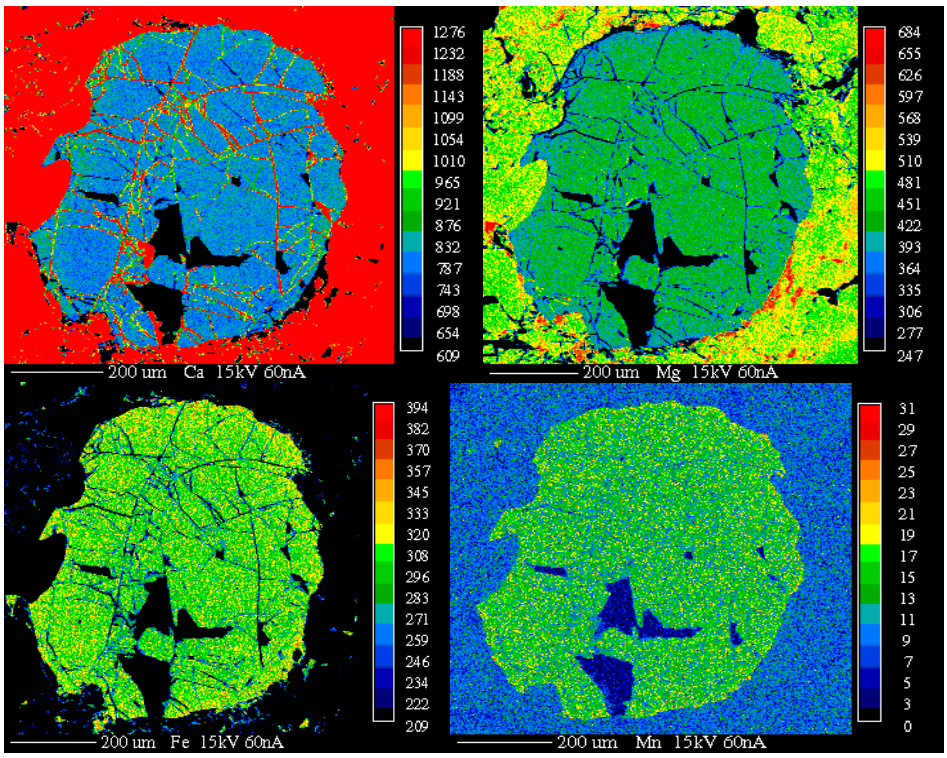
Tablica 6. Kemijska analiza granata D42 uzorka izražena u težinskim udjelima (%). Kationi preračunati na 24 atoma kisika s molarnim udjelima glavnih komponenata.

| **D42** | Gt1core | Gt2rim | Gt3rim | Gt20zone | Gt21rim |
|---|---|---|---|---|---|
| X | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 |
| $SiO_2$ | 37,37 | 38,64 | 38,51 | 39,11 | 39,20 |
| $TiO_2$ | 0,21 | 0,10 | 0,08 | 0,11 | 0,10 |
| $Al_2O_3$ | 19,83 | 22,05 | 21,76 | 21,74 | 21,89 |
| $Cr_2O_3$ | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,12 | 0,09 |
| $Fe_2O_3$ | 3,24 | 1,18 | 1,39 | 1,49 | 1,45 |
| FeO | 14,64 | 16,79 | 16,20 | 16,42 | 16,65 |
| MnO | 0,04 | 0,42 | 0,48 | 0,42 | 0,42 |
| MgO | 11,62 | 11,36 | 11,32 | 11,43 | 11,12 |
| CaO | 8,30 | 8,38 | 8,64 | 8,50 | 8,93 |
| $Na_2O$ | 0,15 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| $\sum$ | **95,45** | **98,95** | **98,44** | **99,36** | **99,85** |
| Si | 5,782 | 5,747 | 5,761 | 5,829 | 5,817 |
| Ti | 0,024 | 0,011 | 0,009 | 0,013 | 0,011 |
| Al | 3,617 | 3,865 | 3,837 | 3,819 | 3,828 |
| Cr | 0,006 | 0,003 | 0,006 | 0,014 | 0,010 |
| $Fe^{3+}$ | 0,377 | 0,132 | 0,157 | 0,167 | 0,162 |
| $Fe^{2+}$ | 1,894 | 2,089 | 2,026 | 2,047 | 2,066 |
| Mg | 2,681 | 2,518 | 2,524 | 2,540 | 2,460 |
| Ca | 1,376 | 1,335 | 1,386 | 1,357 | 1,420 |
| Mn | 0,006 | 0,053 | 0,060 | 0,053 | 0,053 |
| Na | 0,044 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,001 |
| **components** | | | | | |
| grs | 0,229 | 0,222 | 0,231 | 0,226 | 0,237 |
| prp | 0,447 | 0,420 | 0,421 | 0,423 | 0,410 |
| alm | 0,316 | 0,348 | 0,338 | 0,341 | 0,344 |
| sps | 0,001 | 0,009 | 0,010 | 0,009 | 0,009 |

### 4.3.2.1. Kemijske rendgenske mape granata

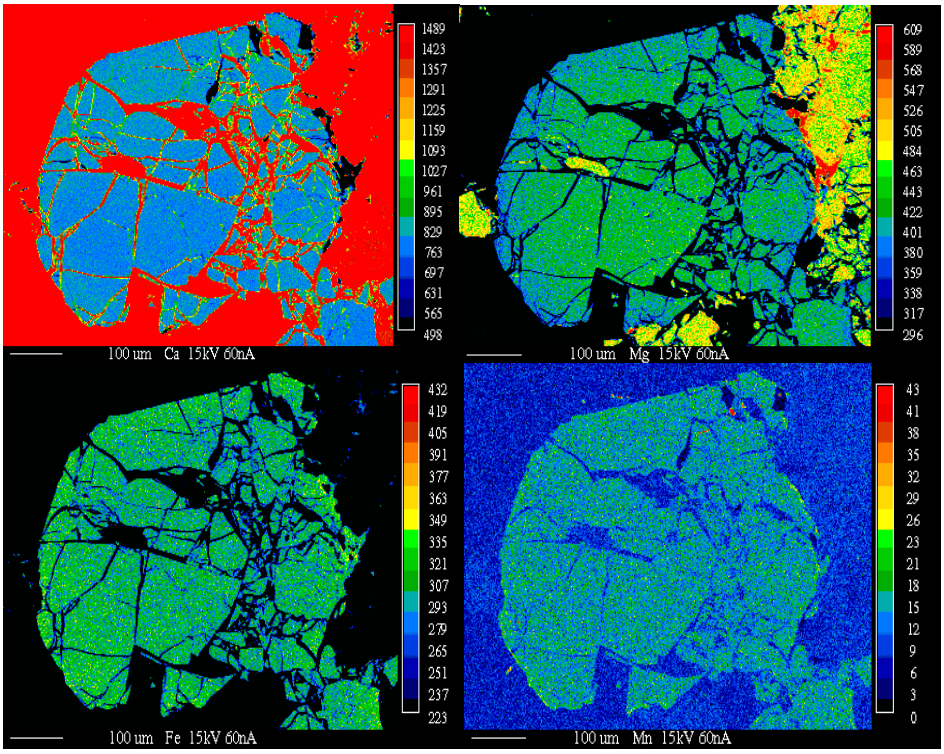
Kemijske rendgenske mape dale su uvid u unutarnju građu granata i eventualne relativne P-T promjene kroz koje je stijena prošla na temelju promjena unutar zrna granata i odnosu koncentracija pojedine granatske komponente od jegre prema rubu. Pomoću zrna na kojima se vidjela značajnija promjena u odnosu koncentracija pojedine komponente mogli su se intepretirati karakteri metamorfizma za odabrane uzorke. Za svaki uzorak napravljene su rendgenske mape na almandinsku (Fe), piropsku (Mg), grossularsku (Ca) i spessartinsku (Mn) komponentu.

Za uzorak D34 Gt1 može se primjetiti homogenizacija niskih koncentracija grossularske komponente. Vidljiva je velika varijabilnost između zrna granata i okolnog matrkisa. Za razliku od njega piropska komponenta pokazuje veće obogaćenje jezgre u odnosu na rub što se može povezati sa retrogradnim uvjetom rasta i padom temperature. Almandinska komponenta ne pokazuje značajna odstupanja i varijabilnost te se može primjetiti obogaćenje u odnosu na matriks. Spessartinska komponenta pokazuje najmanje koncentracije u granatu u odnosu na ostale (slika 32).



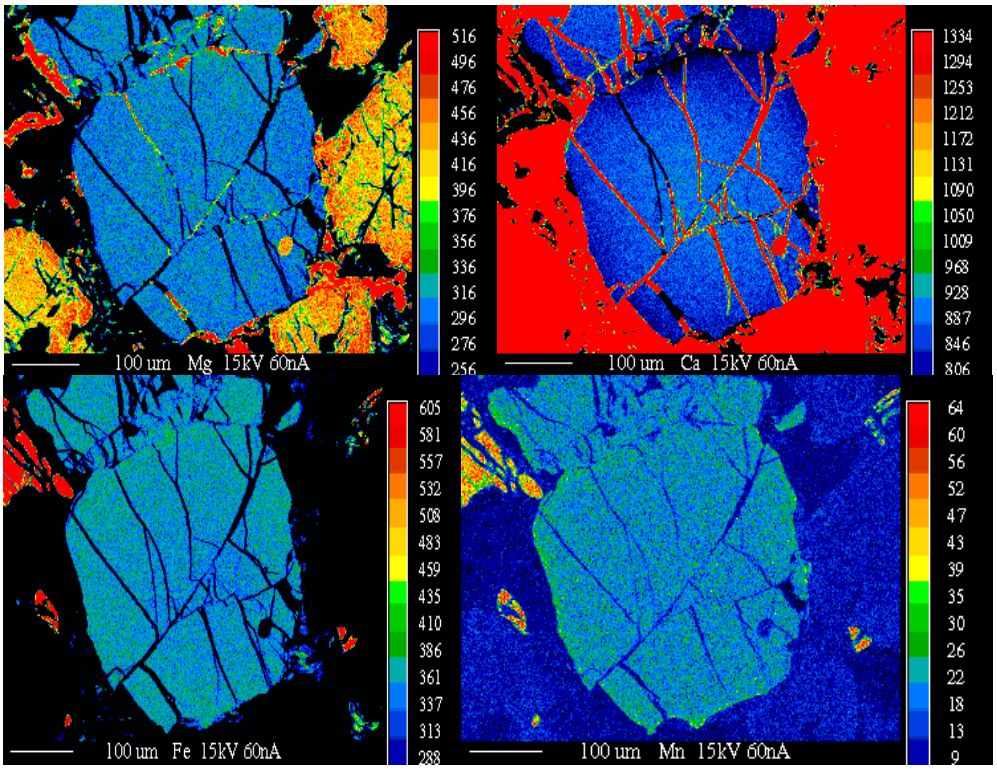

Slika 32. Kemijska mapa za D34 Gt1. Homogenizacija Ca, Fe i Mn komponente, te varijabilnost koncentracije Mg komponente jezgre i ruba.

Kemijska mapa za D34 Gt2 zrno pokazala je slično ponašanje u odnosu na predhodno. Koncentracije grosularske komponente kao i u prvom su izrazito niskih vrijednosti u odnosu na visoke koncentracije. Piropska komponenta također pokazuje veće koncentracije u jezgri te postupno smanjivanje prema rubu što se može promatrati kao smanjenje temperature prilikom kristalizacije ruba. Fe komponenta pokazuje donekle drugačije ponašanje, te povaćanje koncentracije od jezgre prema rubu. Za mangan su ponovo krakteristične male koncentracije s tim da se na pojedinim regijama rubova može utvrditi povećanje koncentracija u odnosu na jezgru (slika 33).



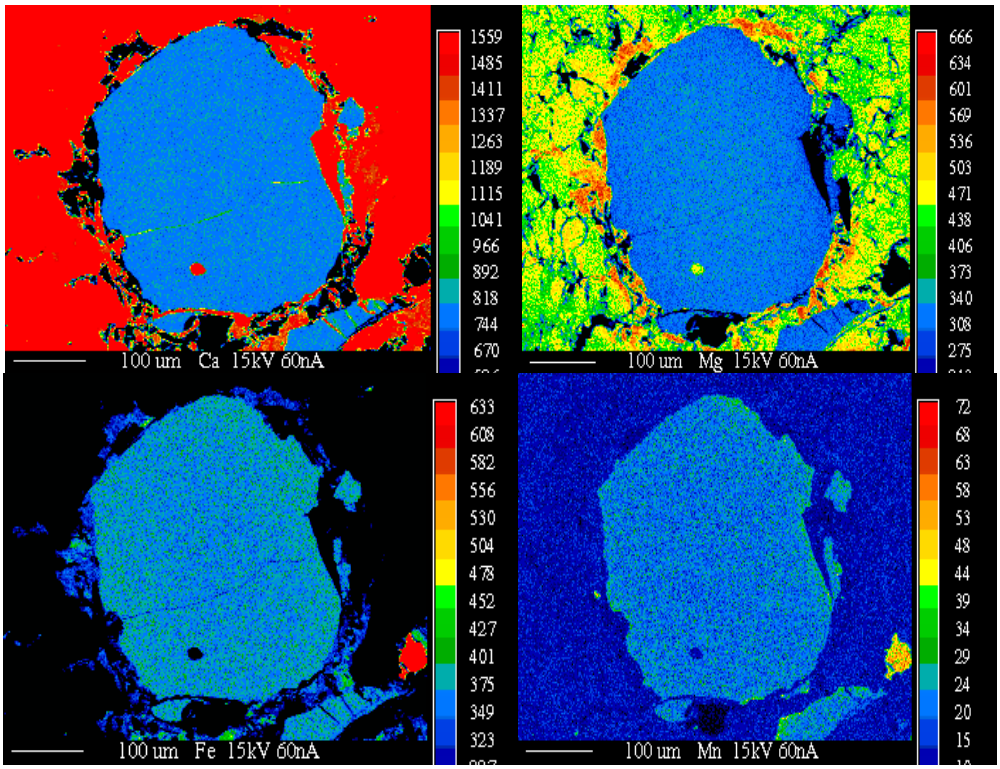

Slika 33. Kemijska mapa za D34 Gt2. Vidljive temepraturne promjene pri rastu granata na temelju Mg komponente.

D38 Gt1 kemijska mapa pokazuje da su koncentracije Mg niže u odnosu na matriks i uklopaka s blagim povećanjem u pojedinim regijama ruba, što može ukazivati na povećanje temperature prilikom kristalizacije ruba. Grossularsku komponentu karakterizira smanjenje od jezge prema rubu što ukazuje na pad tlakova prilikom zadnje faze rasta granata. Obogaćenje Fe i Mn komponente dolazi od jezgre prema rubu (slika 34).



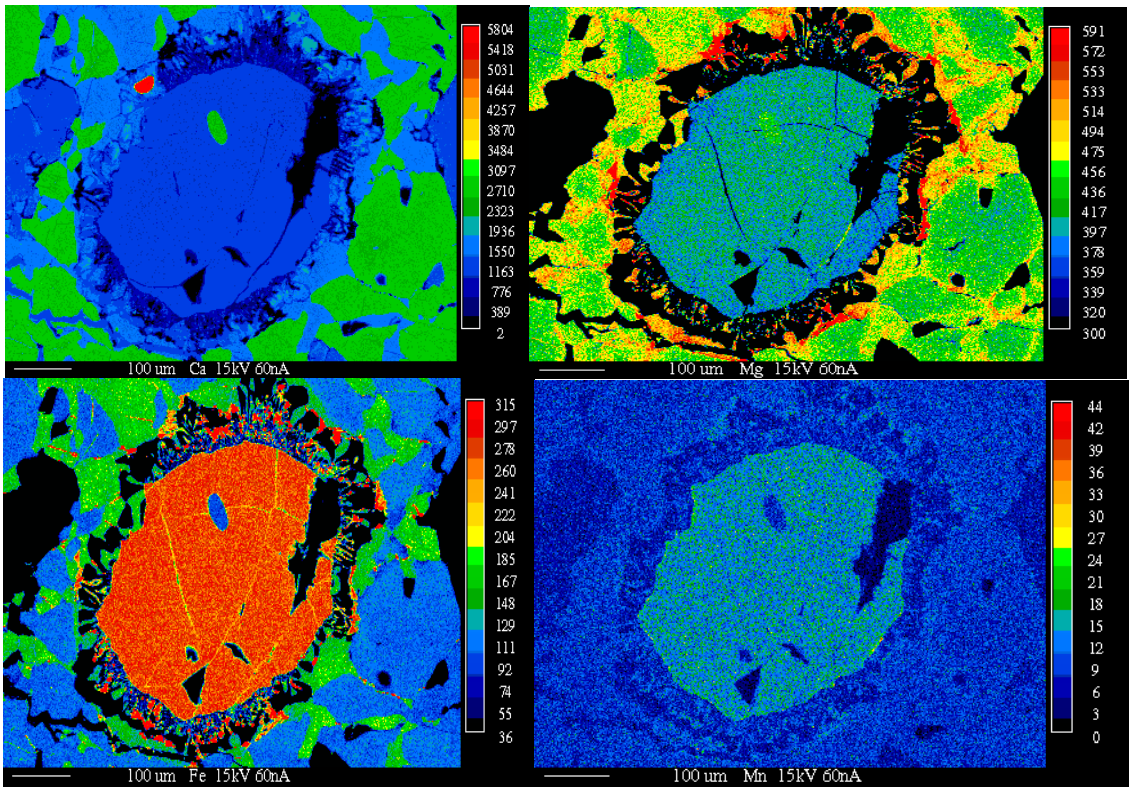

Slika 34. Kemijska mapa za D38 Gt1. Blago smanjenje grossularske komponente od jezgre prema rubu, i blago obogaćivanje Mg, Fe i Mn.

Analizom rendgenske mape za Gt2 D38 uzorka, utvrđena je prisutnost donekle razvijenog reakcijskog ruba oko granata koji može predstavljati drugu kemijsku izmjenu s matriksom ili retrogradne uvjete rasta. Na slici 35. može se vidjeti homogenizacija zrna za grossularsku, piropsku i almandinsku komponentu. Reakcijski rub siromašniji je na Ca, a bogatiji na Mg u odnosu na jezgru čemu može predhoditi njegov nastanak uz povećanje temperature i smanjenje tlaka. Reakcijski rub je siromašniji na Fe u odnosu na jezgru, pa se može pretpostaviti da je došlo do izmjene Mg i $Fe^{2+}$ kationa kako bi se postigla kemijska ravnoteža. Spesartinska komponenta pokazuje blago obogaćenje na nekim dijelovima ruba.




Slika 35. Kemijska rengdenska mapa D38 Gt2 uzorka. Primjećuje se reakcijski rub koji se očituje u promjeni koncentracije u odnosu na jezgru granata.

Kemijska redngenska mapa D42 Gt1 također je pokazala prisustvo reakcijskog oblika u razvijenijem obliku u odnosu na kemijsku mapu za D38. Za razliku od nje na temelju boja za koncentracije reakcijski ovoj D42 uzorka ne pokazuje uniforman sastav nego je riječ o dvije ili više mineralnih faza. Grossularska komponenta zrna pokazuje homogeniziranost koncentracija, a u odnosu na uklopke koji pokazuje zamjetno osiromašenje. Fe homogenizaciju od jezgre prema rubu dok Mn komponenta na određenim regijama ruba pokazuje obogaćenje što ukazuje na hlađenje sustava. Mg komponenta pokazuje smanjenje koncentracije od jezgre prema rubu što također sugerira na pad temperature i hlađenje sustava (slika 36).




Slika 36. Kemijska rendgenska mapa za D42 Gt1. Ca i Mg pokazuju homogeno obogaćenje kroz zrno, dok udio Mg pada pada prema rubu, a Mn raste.

### 4.3.2.2. Geotermobarometrijski rezultati granata

Geotermobarometrijski rezultati dobiveni su kombinacijom podataka cijelostijenskog sastava, geokemijom minerala granata, te računalnim programom Perple_X za izračun svih podataka kojim će se pokušati intepretirati P-T faze metamorfizma granata na temelju zrna granata za uzorke D34, D38 i D42. Ulazni podaci pripremljeni za Perple_X zasnovani su na cijelostijenskoj geokemiji glavnih mineralnih faza prilagođenoj na ∑100%, a već su prikazani u *Tablici 3.* u poglavlju o cijelostijenskoj geokemiji. Stoga, zadan je jedan takav ulazan sustav komponenti u koji su uključeni $MnO$-$N_2O$-$CaO$-$FeO$-$MgO$-$Al_2O_3$-$SiO_2$-$H_2O$-$TiO_2$ (MnNCFMASHTO sustav), u P–T rasponu od 2–26 kbar i 400°–900°. Za računske i grafičke izlazne termodinamske podatke korišteni su potprogrami: VERTEX.exe, WERAMI.exe i PSTABLE.exe.

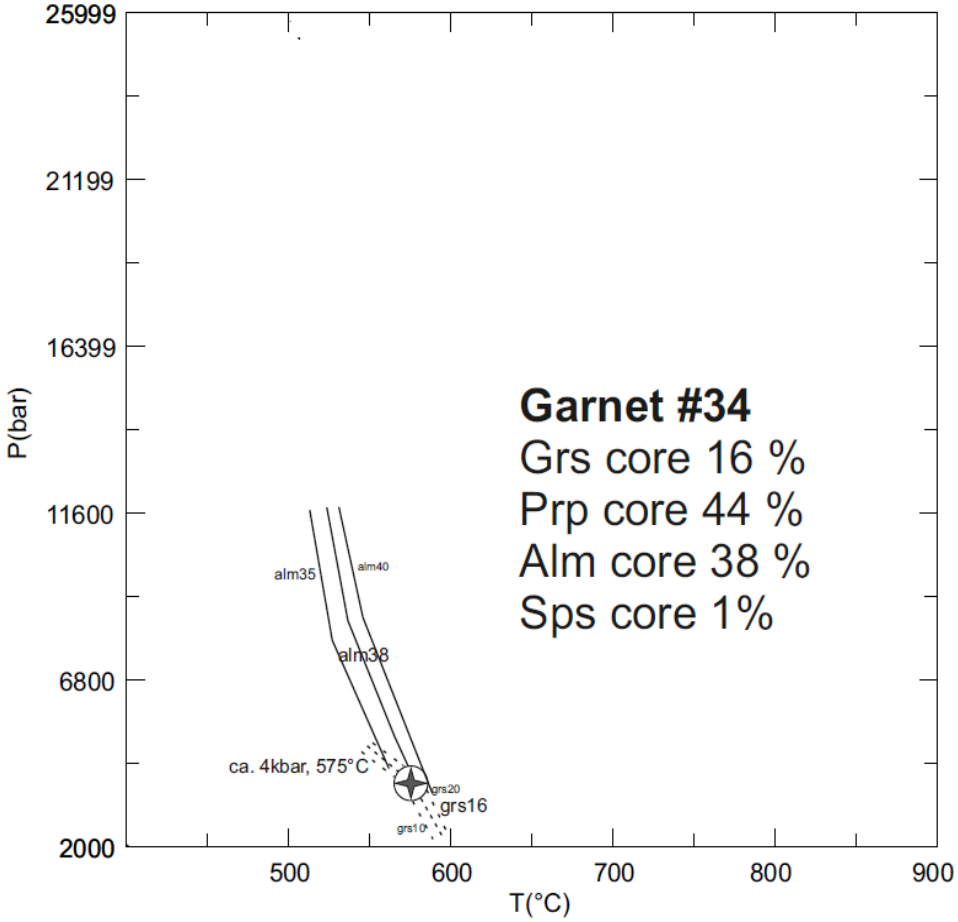
Izlazni podaci Perplexa (pod funkcijom podprograma VERAMI i PSTABLE) dali su P–T presjeke sa poljima stabilnosti granata i rasporedom izopleta za sve zadane granatske komponente (prp, alm, grs i sps) uzoraka D34, D38 i D42. Raspored izolinija za svaku komponentu uzorka ima karakteristično najveću i najmanju vrijednost. Najveća vrijednost obilježena je debelom sivom isprekidanom crtom, dok je najmanja obilježena punom crnom crtom. Područje ispod crte koja predstavlja najmanju vrijednost komponente označava polje u kojem granat nije stabilna faza. Raspored izolinija definiran je konstantnom razlikom između dvije vrijednosti. Raspon vrijednosti izopleta (linije istog kemijskog sastava) granata za uzorke D34, D38 i D42 prikazane su u Tablici 7. Izoplete spessartinske komponente zbog svojih vrlo malih molarnih udjela u uzorcima nisu uzimane u obzir.

Tablica 7. Raspon vrijednosti izopleta granatskih komponenti za D34, D38 i D42 uzorke.

| molarne vrijednosti izopleta | D34 | | | D38 | | | D42 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Granatske komp. | Xalm | Xprp | Xgrs | Xalm | Xprp | Xgrs | Xalm | Xprp | Xgrs |
| min | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,10 | 0,18 | 0,10 | 0,15 | 0,00 | 0,00 |
| max | 0,50 | 0,40 | 0,80 | 0,55 | 0,37 | 0,60 | 0,55 | 0,50 | 0,50 |

Vrijednosti udjela pojedinih komponenti jezgre i ruba dobivenih EPMA analizom za uzorke D34, D38 i D42 odgovaraju jednoj od vrijednosti izopleta koje su konturirane u grafičkom podprogramu PSTABLE za svaku pojedinu komponentu. U grafičkom programu *Coreldraw-u v.7* se obavilo "preklapanje" svake pojedine komponente jednog uzorka s njihovim predhodno konturiranim vrijednostima čime su se dobila tri nova P-T presjeka izopleta za granate; 1) D34, 2) D38 i 3) D42.

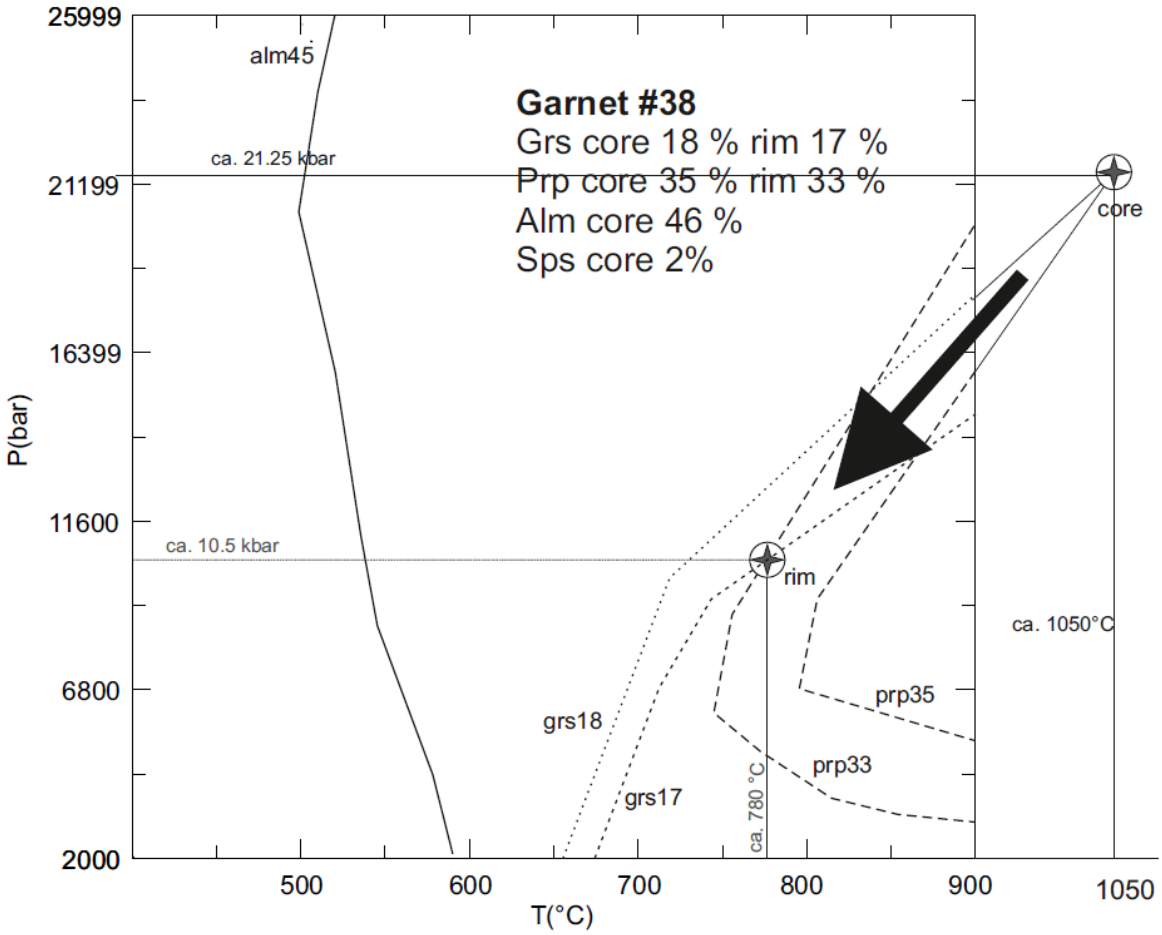
1) P-T presjek izopleta za jezgru D34 granata dao je sjecište almandinske i grossularske komponente te formiranje jezgre pri temperaturi ~575°C i tlaku od ~ 4kbar (slika 37). P-T uvjeti formiranja jezgre odgovaraju P-T rasponima amfibolitnog metamorfnog facijesa.




Slika 37. P-T presjek izopleta almandinske i grossularske komponente za jezgru D34 granata.

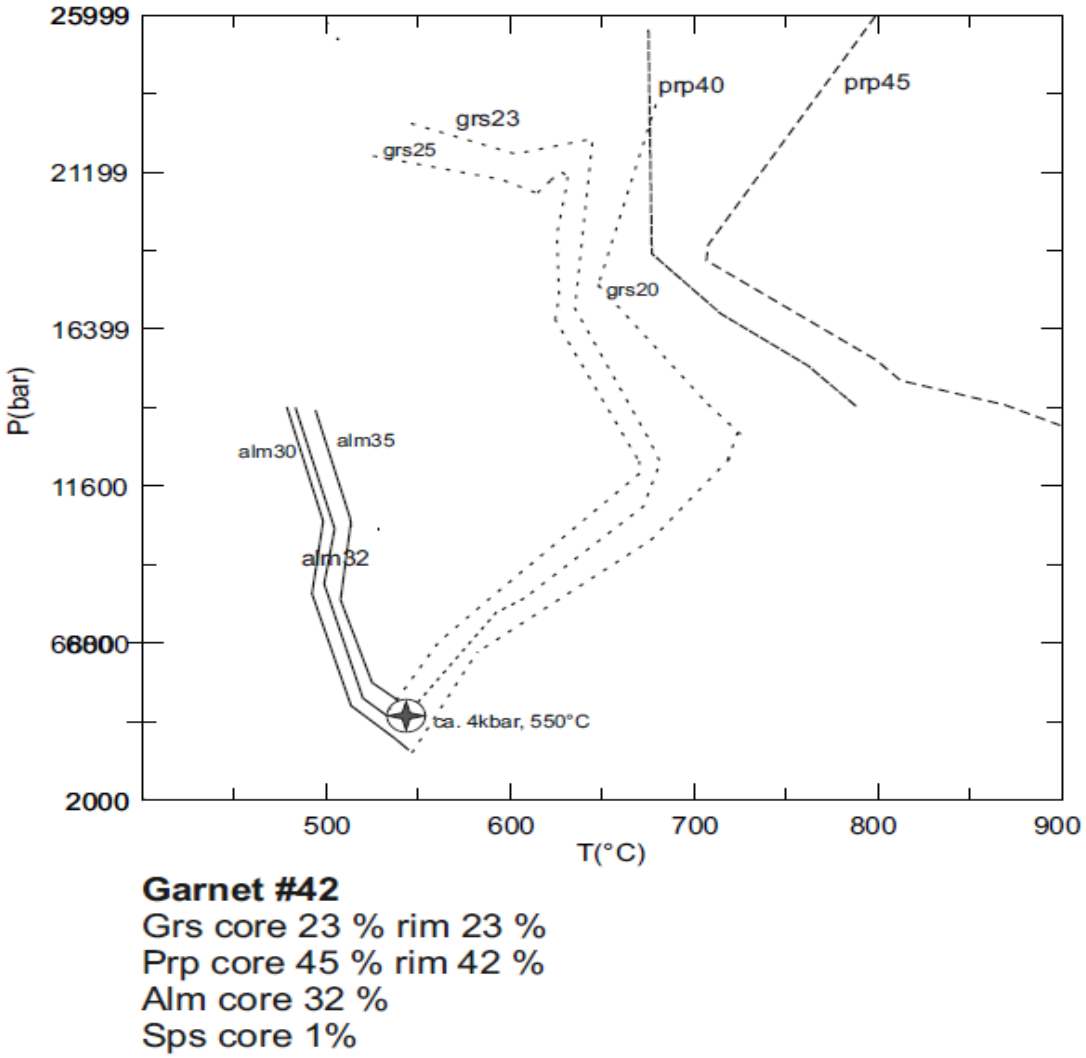
2) P-T presjek izopleta za formiranje ruba D38 granata sjecištem almandinske i piropske komponente dao je temeprature ~780°C i tlakove ~10,5 kbara. P–T uvjeti formiranja ruba i pretpostavljene jezgre odgovaraju P-T rasponu u eklogitno-granulitnom facijesu.

**Napomena**: Izoplete za 35% prp i 18% grs čije se sjecište nalazi izvan presjeka izopleta na temperaturama ~1050°C i tlakovima ~21,25 kbar odgovaralo bi P–T uvjetima formiranja jezgre granata. Tako bi se mogao rekonstruirati P–T metamorfni put od jezgre prema rubu označen strelicom (slika 38).




Slika 38. P–T presjek izopleta grossularske i piropske komponente za rub i jezgru D38 granata

3) P–T presjekom izopleta D42 jezgre granata dobiveni su P–T uvjeti formiranja stijene pri tlakovima od ~ 4 kbar i temperaturama ~ 550°C (slika 39).




Slika 39. P–T presjek izopleta grossularske i almandinske komponente za D42 granate.

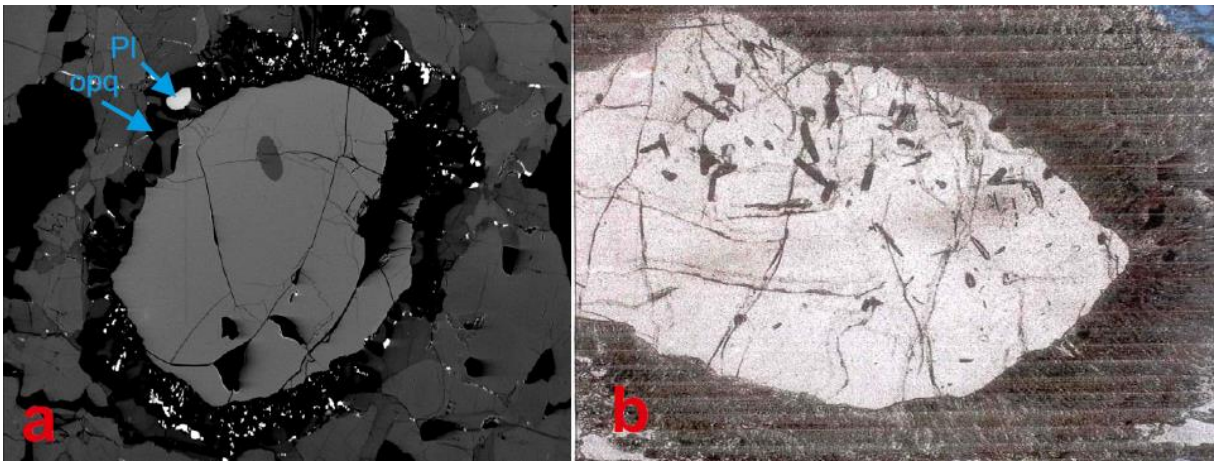
# 5. DISKUSIJA

S obzirom na mineraloške karakteristike, klasifikacijske dijagrame te napravljene presjeke pomoću izopleta u P-T rasponu 400–900°C i 2–26 kbar, uzorci DB, D42 i D34 mogu se odrediti kao amfiboliti bazaltnog protolita, a uzorak D38 kao granulit.

Mineralna petrografija odrađena na uzorcima u koritu Ravne Rijeke pored Duboštice (DB, D34) i koritu Dubokog potoka nedaleko od Tribije (D05, D06, D34, D38) pokazale su različitosti u strukturno-teksturnim karakteristikama. DB, D05, D06 i D42 uzorci karekterizira granoblastična struktura i slabije izražena škriljavost, dok je ona kod D34 i D38 uzoraka puno izraženija što se osobito može uočiti u melanokratskim boranim filosilikatnim domenama. Struktura im je kataklastična do nematoblastična s visokim stupnjem ispucalosti zrna što ukazuje na poveću tektonsku aktivnost u tom području . U DB, D05, D06 i D42 uzorcima nerijetko su primjećeni polisintetski sraslaci plagioklasa, izvijene trase kalavosti plagioklasa, oznake dinamičke rekristalizacije kvarca, reakcijski rubovi oko granata. Pamić et al. (1970) takve pojave pripisuju se uvjetima retrogradnog metamorfizma.

Mineralna geokemija granata dobivena je elektonskom mikrosondom za uzorke D34, D38, D42. Sastav granata jezgre i ruba varira u sljedećim postocima: 16-23% mol. grs, 34-46% mol. prp, 37-46% mol. alm, 1-2% mol. sps komponente, s tim da se opaža trend malog smanjenja grs, prp komonente, te malog povećanja alm i sps komponente od jezgre prema rubu. Operta et al., (2011) za granat-diopsid amfibolite dobiva slične vrijednosti almandinske komponente ~44,6%, te nešto niže vrijednosti grossularske komponente ~8,9%, slične vrijednosti dobivene su i za grt-pl-plx amfibolite te pl-grt amfibolite. Također, navodi da Ca-Mg-Fe-Mn odnos u granatima od jezgre prema rubu determinira retrogradne uvjete rasta.

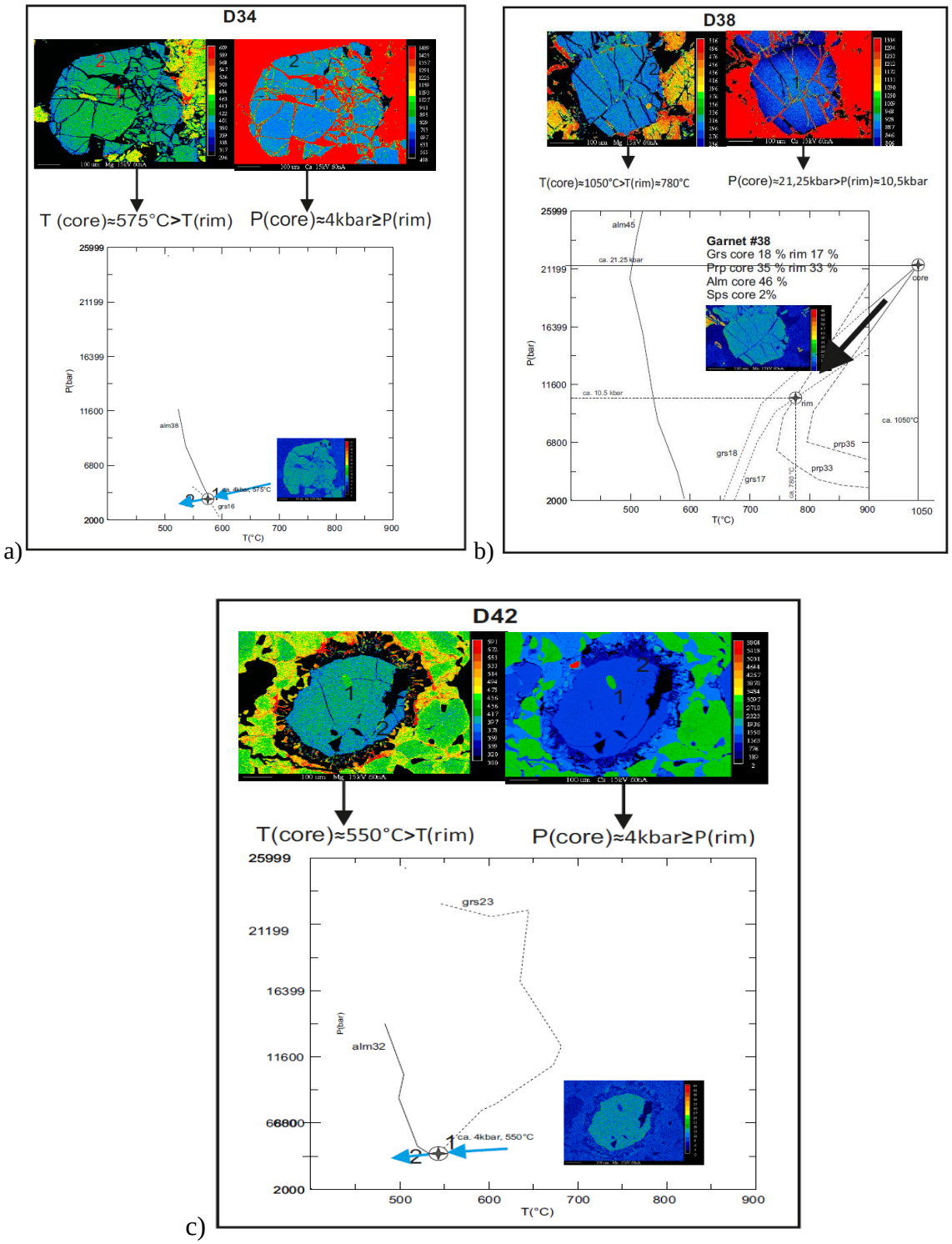
Reakcijski rubovi oko granata primjećeni su potpuno razvijeni u stijena iz korita Ravne rijeke dok su BSE mikrofotografije potvrdile njihovu prisutnost i u D38 uzorku iz korita Dubokog potoka. Razlikuju se prema obliku ravnih i zaobljenih te različitom polimineralnom sastavu koje prema mikropetrografskom opisu čine: amfiboli, klinopirokseni, plagioklasi i opáki minerali (slika 40a). Operta et al. (2011) navodi kako se radi o kelifitskim i simpletitskim ovojima kompleksnog mineralnog sastav kojeg čine: klorit, amfibol, klinopiroksen, ortopiroksen, rutil, magnetit, pirit, spinel i plagioklas (slika 40b).




Slika 40. **a)** BSE mikrofotografija D42 uzorka. Oko zrna granata prisutan kelifitski ovoj kojeg čine plagioklasi (Pl) i opáki minerali (Opq). **b)** Zrno granata s čupavim kelifitskim ovojem složenog mineralnog sastava. Preuzeto i prilagođeno iz Operta et al. (2011).

Geotermobarometrijskim analizama i termodinamskim podacima dobivenih pomoću Perple_X-a u MnNCFMASHTO sustavu i kombinacijom dobivenih rendgenskih kemijskih mapa utvrđeni su relativni odnosi P-T uvjeta formiranja jezgre i ruba granata za D34, D38 i D42 uzorke. Presjeci izopleta D34 i D42 granatskih komponenti pokazali su bliske P-T vrijednosti formiranja jezgre. Za D34 P-T uvjeti podrazumjevaju tlakove od 4kbar i temeprature od 575°C, dok su za D42 dobiveni uvjeti jezgre tlakova 4 kbar i nešto nižih temperautra oko 550°C. Za D38 uzorak dobiveni su P-T uvjeti formiranja jezgre i ruba koje se uvelike razlikuju od ostala dva. Temperaturno-tlačni uvjeti jezgre podrazumijevaju pretpostavljene tlakove od 21,25 kbar i temperature od oko 1050°C., dok je formiranje ruba determinirano pri tlakovima od 10,5 kbar i temperatura od 780°C. Rendgensko mapiranje je za sva tri uzorka determiniralo relativne uvjete kristalizacije u odnosu na jezgru na temelju Ca, Mg, Fe i Mn komponente.

Na slikama 41. a, b i c može s utvrditi relativan odnos kristalizacije jezgre i ruba s njihovom interpretacijom u P-T prostoru. Može se uočiti da se za sva tri uzorka generalno Ca komponenta smanjuje od jezgre (1) ,prema rubovima (2), kao i Mg što reflektira da se kristalizacija rubova odvijala na nešto nižim ili jednakim tlakovima i nižim temperaturama u odnosu na jezgru formirajući tako *clockwise* (strelice) modele koji sugeriraju retrogradne uvjete metamorfizma stijene što se za sva tri uzorka potvrđuje i porastom Mn komponente od jezgre prema rubu (kemijske mape u P-T prostoru).




Slika 41. Shematizirani modeli P-T formiranja zrna granata uz presjeke izopleta i kemijske rendgenske mape, upućuju na *clockwise* modele P-T metamorfnih puteva a) za D34, b) D38 c) D42.

Klasifikacijski i geotektonski diskrimancijski dijagrami prema Shervaisu, (1982) te Pearceu, (1982) određuju pripadnost granatskih amfibolita D34 i D42 bazaltnim protolita plićih područja, dok D38 granulit pripada N–MORBU, čija je pripadnost utvrđena i spider dijagramom na imobilne elemente ( Sun & McDonough 1989 in Pearce 2014). Visoke koncentracije olova ukazale su na stvaranje stijena u području subdukcije. Na osnovu P-T uvjeta granata vidljivo je dublje formiranje D38 uzoraka u odnosu na D34 i D42 uz veći geotermalni gradijent pa bi D38 granulit mogao biti deriviran iz protolita gornjeg plašta kojeg Premužak (2017) determinira kao peridotit, a granati s obzirom na uklapanje amp, cpx,ttn, pl zadnja faza u kristalizaciji stijene. U konačnici stijene iz Tribije i Duboštice pokazuju dva različita geološka "settinga",a smještaj istraživanih stijena bi se mogao pripisati intraoceanskom subdukcijskom okolišu, što na predloženom modelu, napravljenim pseudopresjecima, i *clockwise* P–T putevima za stijene amfibolitnog facijesa "metamorfnog đona" potvrđuje i Premužak (2017), navodeći, da je prilikom kolizije s Europskom pločom, "metamorfni đon" navučen na europski dio, a prije toga moguće čak i odvojen od tonuće ploče koja je nakon kolizije djelomično subducirana.

# 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu rekonstruiran je i interpretiran P-T evolucijski put stijena iz jugoistočnog dijela Krivajsko-konjuškog ultrmafitnog masiva. Uzorci su prikupljeni na području Duboštice i Tribije u Bosni, a u ovom radu obuhvaćaju šest uzorka: DB, D05, D06, D34, D38 i D42. Nakon optičkih metoda provedenih na uzorcima, cjelostijenske geokemijske analize, mineralne geokemije uzoraka te konstrukcije P-T presjeka izopleta za granate za D34, D38 i D42, doneseni su sljedeći zaključci:

- Na temelju mineroloških i petrografskih karakterisitika DB (na temelju mikropetrografske sličnosti s D42 uzorkom), D05, D06, D34, i D42 klasificirani su kao granatski amfiboliti, a D38 kao granulit.
- Na temelju strukturno-teksturnih obilježja opaženih polarizacijskim mirkoskopom podjeljeni su u dvije grupe; 1) granoblastična struktura i škriljava tekstura- DB, D05, D06 i D42 uzorci, 2) kataklastična struktura i škriljava tekstura- D34 i D38 uzorci, smične zone
- Klasifikacijski dijagrami utemeljeni na cijelostijenskoj geokemiji potvrdili su pripadnost D34 i D42 bazaltnim protolitima oceanskog područja, dok uzorak D38 pripada N-MORBU.
- Analiza u Perplex-u i dobiveni pseudopresjeci na temelju izopleta za zrna granata uzoraka D34, D38 i D42 u MnNCFMASHTO sustavu, uz pomoć rendgenskog mapiranja dali su sličnosti P-T uvjetima formiranja granata za D34 i D42 uzorke u području amfibolitnog facijesa dok D38 uzorak pokazuje uvjete formiranje jezgre prema rubu od uvjeta granulitnog facijesa prema amfibolitnom.
- Konstruirani P-T metamorfni putevi za sva tri uzorka na temelju geotermobarometrije i rendgenskog mapiranja odgovaraju *clockwise* modelu što ukazuje na retrogradne uvjete metamorizma koji su potvrđeni i mikropetrografskim značajkama pojedine faze: prisustvo kelifitskog ovoja oko granata, izvijene trase kalavosti, oznake dinamičke rekristalizacije kvarca, deformacijski sraslaci plagioklasa za DB i D42 uzorke.
- Formiranje D34 i D42 granatskih amfibolita odvija se pliće, a D38 granulita dublje u intraoceanskom subdukcijskom geotektonskom okolišu.

- Prisutnost uklopaka amfibola, klinopiroksena, titanita i plagioklasa sugerira da su granati najmlađa faza pri kristalizaciji stijene, a česta prisutnost granata u leukokratskim domenama kvarca i plagioklasa uvjetuje formiranju granata iz džepića taljevine.

# 7. LITERATURA


Ague, J.J., Carlson, W.D. (2013): Metamorphism as Garnet Sees It: The Kinetics of Nucleation and Growth, Equilibration, and Diffusional Relaxation. Elements, 9, 439–445.

Balen, D., Massone, H.-J. (2016): A P-T path for amphibolites from the metamorphic sole of the Dinaride ophiolite zone in Bosnia. 2016 AGU Fall Meeting, V33D-3145, V33D: New Insights on Igneous and Metamorphic Processes from Nontraditional Thermobarometers and Geospeedometers, San Francisco, USA, 12. –16. 12. 2016.

Baxter, E.F., Scherer, E.E. (2013): Garnet Geochronology: Timekeeper of Tectonometamorphic Processes. Elements, 9, 433– 438.

Brandelik, A. (2009): CALCMIN- an EXCEL ™ Visual Basic application for calculating mineral structural formulae from electron microprobe analyses. Computer & Geosciences, 35, 1540-1551.10.1016/j. cageo.2008.09.011.

Barić, Lj. (1969): Korund aus der Umgebung des Dorfes Vijaka in Zentralbosnian. Min. Petr. Mus. Univ. Zagreb, Mitt., 2, 1.

Brđanović, M., Operta., M. (2000): Elaborat o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi tehničkog kamena amfibolita na ležištu Stupčić II kod Vareša.

Brđanović, M., Operta., M., Kulenović E. (2001): Elaborat o klasifikaciji i kategorizaciji i proračunu rezervi krečnjaka na ležištu "Kota" kod Vareša.

Caddick, M. J., Kohn, M. J. (2013): Garnet: Witness to the Evolution of Destructive Plate Boundaries. Elements, Vol 9, No. 6, 427– 433.

Clemens, J.D., Wall, V.J. (1981): Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas. Canadian Mineralogist, 19, 111–131.

Connolly, J. A. D. (1990): Multivariable phase diagrams; an algorithm based on generalized thermodynamics. American Journal of Science, 290, 666–718.

D'Errico et al., (2012): A detailed record of shallow hydrothermal fluid flow in the Sierra Nevada magmatic arc from low-δ18O skarn garnets. Geology , 40, 763–766.

Đorđević, D., Pamić, J. (1972): Petrološki izvještaj za osnovnu geološku kartu list Vlasenica. 1:100 000. Fond str. dok. Institut za geološka istraživanja Sarajevo.

Đorđević, P. (1957): Bazični eruptivi okoline Vareša (Bosna). Zbornik radova Geološko-rudarskog fakulteta, 5, 39–44.

Đorđević, P. (1958): Amfiboli i pirokseni iz gabrovske mase u potoku Stavnja kod Vareša. Ibid., 6, 115–119.

Đorđević, P. (1960): Gabrovska masa Stavnje kod Vareša. Simp. Prob. Alp. Inic.magm., 4, 3–11.

Evans, T.P. (2004): A method for calculating effective bulk composition modification due to crystal fractionation in garnet-bearing schist: implications for isopleth thermobarometry. Journal metamorphic Geology, 22, 547–557.

Faul, U.H., Garapić, G., Lugović, B. (2014): Subcontinental rift initiation and ocean-continent transitional setting of the Dinarides and Vardar zone: Evidence from the Krivaja-Konjuh Massif, Bosnia and Herzegovina. Lithos, 202–203:283–299.

Grew E.S., Locock AJ., Mills S.J., Galuskina I.O., Galuskin E.V., Hålenius, U. (2013): Nomenclature of the garnet supergroup. American Mineralogist ,98, 785–810.

Harley, S.L. (1998): On the occurrence and characterization of ultrahigh temperature crustal metamorphism. Geological Society Special Publication ,138, 81–107.

Hodžić, N., Djedović, M. (2016): Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu rezervi magnezita ležišta Konjuh. Rudar d.o.o. Tuzla.

Janoušek, V., Moyen, J.F., Martin, H., Erban, V., Farrow, C. (2016): Geochemical modelling of igneous processes - principles and recipes in R language. Bringig the power of R to a geochemical community. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp 1–346. doi: 10.1007/978-3-662-46792-3.

John, C. (1880): Ũber kristallinische Gesteine Bosniens. Anhang der Grundlinien etc. Jahrb. geol. Reichsan. Wien.

Karamata, S., Pamić, J. (1960): Gabrovi, dijabazi i spiliti područja Tribije. Ibid., 3, 1–17.

Kišpatić, M. (1897): Kristalinsko kamenje serpentinske zone u Bosni. Rad JAZU, 133, 95–231.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986): A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27, 745–750.

McDonough, W.F., Sun, S.S. (1995): The composition of the Earth. Chemical Geology,120, 223–253.

Ménez, B., Pasini, V., Brunelli, D. (2012): Life in the hydrated suboceanic mantle. Nature Geoscience, 5, 133–137.

Meschede, M. (1986): A method of discriminatin between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chemical Geology, 56, 207–218.

Mookherjee, M., Karato, S. (2010): Solubility of water in pyrope-rich garnet at high pressures and temperature. Geophysical Research Letters 37, L03310.

Mojsisovicz, E., Tietze, E., Bittner, A. (1880): Grundlinien der Geologie von Bosnien und der Herzegowina. Jahrb. geol. Reichsan. Wien.

Olujić, J., Pamić, J., Pamić, O., Milojević, R., Veljković, D., Kapeler, I. (1970): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Vareš L 34–121. Geološki zavod Sarajevo, Savezni geološki zavod, Beograd.

Operta, M. (2004): Mineraloške i petrografske karakteristike amfibolita iz okolice Vareša. PhD thesis. Univ. Tuzla (Bosnia and Herzegovina), 243 p.

Operta, M., Hyseni, S., Balen, D., Salihović, S., Durmishaj, B. (2011): Garnet group minerals from the amphibolite facies metamorphic rocks of Krivaja-Konjuh ultramafic massif in Bosnia and Herzegovina. ARPN Journal of Engineering and Aplied Sciences, Vol. 6, No. 7, 20–28. ISSN 1819–6608.

Operta, M., Hyseni, S., Salihović, S. (2012): Chlorite group minerals from the amphibolite facies metamorphic rocks of Krivaja-Konjuh ultramafic massif in Bosnia and Herzegovina. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 7, No. 6, 685–690. ISSN 1819–6608.

Operta, M., Pamić, J., Balen, D., Tropper, P. (2003): Corundum-bearing amphibolites from the metamorphic basement of the Krivaja-Konjuh ultramafic massif (Dinaride ophiolite zone, Bosnia). Mineralogy and Petrology ,77, 287–295.

Pamić, J. (1967): Petrološki izvještaj za osnovnu geološku kartu list Zavidovići, 1:100 000. Fond str. dok. Inst. geol. istr. Sarajevo.

Pamić, J. (1970): Petrološki izvještaj za osnovnu geološku kartu list Vareš, 1:100 000. Fond str. dok. Inst. geol. istr. Sarajevo.

Pamić, J. (1970a): Osnovne petrološke karakteristike kromitskog područja Duboštice u Bosni. Geološki glasnik, 14, 148–153.

Pamić, J. (1971a): Amphibolites associated with the large Krivaja-Konjuh ultramafic massif (Yugoslavia). Bull. Scientiff. A, 16, 3–4.

Pamić, J. (1978): Krivajsko-konjuški kompleks. Geologija BiH, knj. IV, "Geoinžinjerig"-Sarajevo, 99–135.

Pamić, J., Antić, R. (1964): Anklave peridotitskih stijena u gabroidnom kompleksu Gostovićke rijeke kod Zavidovića. Geološki glasnik, 9, 5–14, Sarajevo.

Pamić, J., Gušić, I., Jelaska, V. (2000): Alpinske tektonostratigrafske jedinice Dinarida i njihova geodinamska evolucija. 2. Hrvatski geološki kongres, Zbornik radova, 1, 15–22, Cavtat-Dubrovnik.

Pamić, J., Kapeler, I. (1971): Korundski amfiboliti na južnom obodu krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva. Geol. an. Balk. poluost., 35, 399–408.

Pamić, J., Pamić, O., Olujić, J., Milojević, R., Veljković, D., Kapeler, I. (1970): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Vareš (L 34-133). 7–68, Savezni geološki zavod, Beograd.

Pamić, J., Sunarić-Pamić, O., Olujić, J., Antić, R. (1997): Petrografija i petrologija krivajsko-konjuškog ofiolitnog kompleksa i njegove osnovne geološke karakteristike. Acta geologica, 9/3, 135 str., Zagreb.

Pamić, J. (1982): Some geological problems of the Dinaride ophiolites and their associations. Earth Evol. Sci., 2, 30–35 str.

Pamić, J., Tomljenović, B., Balen, D. (2002): Geodynamic and petrogenetic evolution of Alpine ophiolites from the central and NW Dinarides: an overview. Lithos 65, 113–142.

Pearce, J.A. (2014): Immobile element fingerprinting of ophiolites. Elements, 10, 101–108.

Pearce, J.A., Cann, J., R. (1973): Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 19, 290–300.

Premužak, L. (2017): P-T put metamorfnih stijena amfibolitnog facijesa iz Dinaridske ofiolitne zone. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu.

Reed, S.J.B. (2005): Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. 2nd edition, xiii + 192. Cambridge, New York, Melbourne.

Robinson J.A.C., Wood B.J. (1998): The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. Earth and Planetary Science Letters, 164, 277–284.

Ristić, P., Likar, J. (1967): Magmatizam i geohemizam planine Konjuh. Ibid., 3–4, 3–17.

Ristić, P., Mudrinić, Č. (1965): Raspodjela mikroelemenata u J i JZ dijelu planine Konjuh sa posebnim osvrtom na nikal. Arh. za tehn., 3 (1), 1–7.

Ristić, P., Panić, R. (1965): Magneziti Konjuha. Ibid., 3, 2–3.

Schertl, H-P., O'Brien, P.J. (2013): Continental crust at mantle depths: Key minerals and microstructures. Elements, 9, 261–266.

Shervais, J.W. (1982): Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth and Planetary Science Letters, 59, 101–118.

Sun, S.S., McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special Publication , 42, 313–345.

Sunarić, O., Olujić, J. (1968): Osnovne geološke karakteristike ležišta kromita Duboštice. Geološki glasnik, 12, 261–271.

Šegvić, B. (2010): Doktorska disertacija: Petrologic and geochemical characteristics of the Krivaja-Konjuh ophiolite complex (NE Bosnia and Herzegovina) - petrogenesis and regional geodynamic implications. University of Heidelberg, Germany.

Šibenik-Studen, M., Trubelja, F. (1971): Nalazište tomsonita i prenita kod sela Kovačića na istočnim padinama Konjuh planine. Glas. Zem. Muz. U BiH, 10, 29–38.

Thomas, R. (2004): Practical guide to ICP-MS. Marcel Dekker Inc., New York, USA.

Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E., Márton, P. (2002): Tectonic evolution of the notrthwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia, Geological Society, London, Special Publications, 298, 145–167.

Trubelja, F. (1961): Magmatske stijene jugoistočnog dijela planine Konjuh (Bosna). Geološki glasnik, 5, 241–262.

Whitney, D.I., Evans, B.W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 185–187.

Will, T. M. (1998): Phase Equilibria in Metamorphic Rocks. Thermodynamic Background and Petrological Applications. Springer, 309 str.

Wood, B.J, Kiseeva, E.S. & Matzen, A.K. (2013) : Garnet in the Earth´s mantle. Elements, 9, 421–426.

Van Haren, J.L.M., Woensdregt, C.F. (2001): Melt growth of spessartine ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$). Journal of Crystal Growth, 226, 107–110.