

# P-T put metamornih stijena amfibolitnog facijesa iz Dinaridske ofiolitne zone

---

**Premužak, Lucija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:681662>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

LUCIJA PREMUŽAK

**P-T PUT METAMORFNIH STIJENA AMFIBOLITNOG FACIJESA IZ  
DINARIDSKE OFIOLITNE ZONE**

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

LUCIJA PREMUŽAK

**P-T PUT METAMORFNIH STIJENA AMFIBOLITNOG FACIJESA IZ DINARIDSKE OFIOLITNE ZONE**

Diplomski rad

predložen Geološkom odsjeku

Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

radi stjecanja akademskog naziva magistre geologije

Zagreb, 2017.

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

## Zahvale

### Veliko hvala...

... **prof.dr.sc. Draženu Balenu** na pomoći pri odabiru teme, na odvajanju poslovnog i privatnog vremena te na savjetima i strpljenju kod mnogih pitanja prilikom izrade ovog rada.

... **doc.dr.sc. Zorici Petrinec** na strpljenju, savjetima i pomoći pri svakom kucanju na vrata.

... **Dejanu Vončini** na pomoći i savjetima u laboratoriju.

... **dipl.iur. Mariji Cindro** na susretljivosti prilikom svake navale na referadu uz mnogobrojna pitanja.

... mojim priljateljima, posebno **Niki, Silviji, Sari i Idi** koje su mi godine studiranja učinile nevjerojatno zabavnima.

... **Karlu i Marti** na uvijek uspješnom odvlačenju pažnje od učenja.

... **roditeljima** na uvijek bezuvjetnoj podršci te na pet bezbrižnih i predivnih studentskih godina.

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geološki odsjek

**P-T PUT METAMORFNIH STIJENA AMFIBOLITNOG FACIJESA IZ DINARIDSKE OFIOLITNE ZONE**

LUCIJA PREMUŽAK

Rad je izrađen na Mineraloško-petrografskom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska.

**Sažetak:** Područje krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva karakterizira geološka složenost i raznovrsnost metamorfnih stijena. P-T put stijena amfibolitnog facijesa s područja okolice Vareša rekonstruiran je na osnovu konstrukcije P-T pseudopresjeka (engl. „pseudosections“), cjelostijenske geokemije, kemijskog sastava minerala i termodinamskih podataka. Evolucijski put stijena metamorfnog đona, odnosno uzoraka D4, D6 i D9, promatran je u okviru kolizijskih i subdukcijskih procesa na rubu mezozojskog Tethysa, odnosno dodirnog područja Europske ploče i Gondwane. Tako su bazaltni protoliti uzoraka D4 i D6, determiniranih kao amfiboliti, smješteni u tektonski okoliš intraoceanske subdukcije uslijed zatvaranja Tethysa. Evolucijski put uzorka D9, determiniranog kao granulit, nešto je drugačiji, odnosno ukazuje na veću dubinu formacije stijene te mu je protolit određen kao peridotit. Krivajski dio masiva potječe od subducirane oceanske kore u intraoceanskoj subdukciji prilikom koje se formirao metamorfni đon. Prilikom kolizije Gondwane i Europske ploče, metamorfni đon je navučen na europski dio te je smješten između krivajskog i konjuškog dijela ultramafitnog masiva.

**Ključne riječi:** Krivaja-Konjuh, metamorfni đon, amfiboliti, P-T pseudopresjek

**Rad sadrži:** VIII + 55 stranica, 31 slika, 7 tablica, 56 literaturnih navoda

**Jezik izvornika:** hrvatski

Rad je pohranjen u Središnjoj geološkoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska.

**Mentor:** prof.dr.sc. Dražen Balen

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

- doc.dr.sc. Zorica Petrinc

- izv.prof.dr.sc. Blanka Cvetko Tešović

**Rad prihvaćen:** 05. svibnja 2017.

## **BASIC DOCUMENTATION CARD**

Master Thesis

University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geology

### **P-T PATH OF AMPHIBOLITE FACIES METAMORPHIC ROCKS OF DINARIC OPHIOLITE ZONE**

LUCIJA PREMUŽAK

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

**Abstract:** The area of Krivaja-Konjuh ultramafic massif is a complex structure and contains interesting metamorphic rocks. P-T path of amphibolite facies metamorphic rocks from Vareš area was reconstructed using pseudosections, whole-rock geochemistry, chemical composition of minerals and thermodynamic results. P-T evolution path of metamorphic sole rocks (samples D4, D6 and D9) was interpreted in the frame of collisional and subduction processes that happened during the closure of Tethys, respectively at collisional point of Gondwana and European plate. Samples D4 and D6 are determined as amphibolites with basalt protolithes which were situated in tectonic environment of intraoceanic subduction. Sample D9, determined as granulite, has a P-T path which indicates deeper point of rock formation. Its protolith is probably peridotite. Krivaja part of ultramafic massif originates from subducted oceanic plate in intraoceanic subduction during which metamorphic sole has formed. Finally, when collision of Gondwana and European plate happened, metamorphic sole was thrust onto European plate and was situated between Krivaja and Konjuh parts of ultramafic massif.

**Key words:** Krivaja-Konjuh, metamorphic sole, amphibolites, P-T pseudosection

**Thesis contains:** VIII + 55 pages, 31 figures, 7 tables, 56 references

**Original in:** Croatian

Thesis deposited in Central geological library, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Croatia.

**Supervisor:** Dražen Balen, PhD, Full Professor

**Reviewers:** - Dražen Balen, PhD, Full Professor

- Zorica Petrinc, PhD, Assistant Professor

- Blanka Cvetko Tešović, PhD, Associate Professor

**Thesis accepted:** May 5, 2017

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	2
3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA .....	4
3.1. Regionalna geotektonika i geografski smještaj.....	4
3.2. Geološka građa proučavanog područja .....	6
4. ANALITIČKE METODE .....	10
4.1. Optičke metode.....	10
4.2. Geokemijske metode .....	10
4.2.1. Metode s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS) .....	10
4.2.2. Analiza elektronskom mikrosondom (EMPA).....	11
4.3. Geotermobarometrija .....	12
5. REZULTATI .....	15
5.1. Mineralna optika .....	15
5.1.1. D4 .....	15
5.1.2. D6 .....	16
5.1.3. D9 .....	17
5.2. Geokemijski rezultati.....	18
5.2.1. Cjelostijenska geokemija.....	18
5.2.2. Mineralna geokemija .....	26
5.3. Termobarometrijski rezultati .....	30
5.3.1. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO .....	30



5.3.2.	Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHT.....	32
5.3.3.	Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO .....	34
5.3.4.	Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHT.....	37
5.3.5.	Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D9 u sustavu MnNCFMASHTO .....	39
5.3.6.	Dijagrami izopleta .....	41
6.	RASPRAVA .....	46
7.	ZAKLJUČAK .....	50
8.	LITERATURA .....	52

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

### Kratice minerala (Whitney & Evans, 2010):

Amp – amfibol

Chl – klorit

Cld – kloritoid

Cpx – klinopiroksen

Crd – cordierit

Crn – korund

Czo – klinozoisit

Ep – epidot

Fsp – feldspat

Fo – forsterit

Gt – granat

Hem – hematit

Ilm – ilmenit

Ky - kijanit

Lws – lawsonit

Mag – magnetit

Opx- ortopiroksen

Qz – kvarc

Rt – rutil

Spl – spinel

Spn – titanit

Spr – safirin

St – staurolit

Tlc – talk

Wmc – paragonit

## 1. UVOD

Područje krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva, jednog od najvećih ofiolitnih kompleksa u Dinaridskoj ofiolitnoj zoni, karakterizira geološka složenost i zanimljiva metamorfna građa. Mnogi radovi, dio kojih je pregledno prikazan u poglavlju 2. *Pregled dosadašnjih istraživanja*, bave se problematikom ovog područja, no isto tako postoji još puno prostora za daljnja istraživanja.

Cilj ovog diplomskog rada je utvrditi P-T evolucijski put metamornih stijena amfibolitnog facijesa iz Dinaridske ofiolitne zone. Provedena su istraživanja na uzorcima amfibolita i granulita iz tzv. metamornog đona krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva u Bosni. Stijene metamornog đona potječu od kumulatnog gabra i peridotita ovog područja (Lugović et al., 2014), a čine ga stijene u rasponu od facijesa zelenih škriljavaca do prijelaza amfibolitskog facijesa u granulitski facijes. P-T evolucijski put stijena će se rekonstruirati na osnovu mikroskopiranja mineralnih zajednica te na osnovu cjelostijenske geokemije, kemijskog sastava minerala i termodinamskih podataka pomoću kojih će se konstruirati pseudopresjeci (engl. „pseudosections“). Ovim metodama pokušat će se utvrditi uvjeti formiranja spomenutih stijena, odredit će se stabilne mineralne parageneze stijena te procijeniti temperature i tlakovi metamornih procesa. Time će se dobiti uvid u razvoj i genezu stijena tog područja u okviru regionalnih geodinamskih procesa koji su se događali u razdoblju kasne jure i rane krede, tj. u okviru kolizijskih i subdukcijskih procesa na rubu mezozojskog Tethysa, odnosno dodirnog područja Europske i Afričke ploče.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Detaljan pregled istraživanja krivajsko-konjuškog područja prije 1977. godine daju Pamić et al. (1977). Uz to, obrađene su petrografija i petrologija krivajsko-konjuškog ofiolitnog kompleksa, kao i osnovne geološke karakteristike područja.

Prve geološke i petrološke podatke o ovom području nalazimo u radovima austrijskih geologa, Mojsisovicz et al. (1880) i John (1880).

Kišpatić (1897) daje vrlo cjeloviti petrološki prikaz stijena ovog kompleksa u svom radu o bosanskoj serpentinitskoj zoni. Navodi kako u ovom području izrazito dominiraju lerzolitni (uz spomen i drugih ultramafitnih stijena), a uz kromitnu rudu spominju se i pirokseniti. Također, određeni su i brojni varijeteti gabra: troktoliti, olivinski gabro, normalni gabro te prijelazne feldspatno-peridotitne stijene. Utvrđeni su i mnogi varijeteti amfibolita i amfibolskih škriljavaca te različite amfibolitsko-eklogitske stijene.

Trubelja (1961) je dao petrografski prikaz peridotita, gabra i dijabaza. Riječ je o istočnom, konjuškom dijelu masiva, a prikaz se temelji na optičkim i kemijskim ispitivanjima. Isti, istočni obod konjuškog masiva obradili su i Ristić et al. (1967). Magnezite tog područja obradili su također Ristić et al. (1965), a detaljnije i Ristić & Mudrinić (1965). Šibenik-Studen & Trubelja (1971) su detaljno ispitali prehnit i thomsonit iz žila koje na istočnim padinama Konjuha sijeku dijabaze.

Što se tiče zapadnog i južnog oboda krivajsko-konjuškog masiva, Pamić & Antić (1964) daju prikaz peridotita i gabra na zapadnom obodu. Sunarić & Olujić (1968) daju podatke o kromitnom ležištu na području Duboštrice, dok detaljne petrološke podatke daje Pamić (1970a). Karamata & Pamić (1960) izlažu detaljne petrološke podatke za gabro, dijabaz i spilit smještene na južnom obodu masiva. Stijene amfibolitskog facijesa s južnog oboda ultramafitskog masiva obrađuju Pamić (1971a), Pamić & Kapeler (1971) (ovdje je riječ o detaljno analiziranim korundskim amfibolitima iz okolice Vijake) te Barić (1969) koji mineraloški opisuje korund iz ovih stijena.

Postoji i nekoliko radova koji se bave petrografijom izvan uskog okvira krivajsko-konjuškog masiva. Đorđević (1957, 1958, 1960) nam iznosi podatke o gabru čija se masa nalazi u gornjem toku rijeke Stavnje, udaljenom desetak kilometara od južnog oboda masiva. Pamić & Karamata (1964) prikazuju albitski granit smješten južno od južnog oboda masiva.

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

Operta et al. (2003) bave se korundskim amfibolitima s krivajsko-konjuškog prostora, a Operta (2004) iznosi i mineraloške i petrografske karakteristike amfibolita iz okolice Vareša.

Šegvić (2010) u svojoj neobjavljenoj doktorskoj disertaciji obrađuje petrološke i geokemijske karakteristike stijena krivajsko-konjuškog ofiolitnog kompleksa te iznosi zaključke o petrogenezi i regionalnoj geodinamici. Stijene metamorfnog đona smjestio je između spinel-lerzolita konjuškog dijela masiva i plagioklas-lerzolita u zapadnom, krivajskom dijelu masiva.

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 prevladavajuće pirospnu 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).

Lugović 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.

### 3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Regionalna geotektonika i geografski smještaj

Dinaridska ofiolitna zona jedna je od pet tektonostratigrafskih jedinica koje razlikujemo u Dinaridima (Pamić et al., 2000): (1) Jadransko-dinaridska karbonatna platforma; (2) karbonatno-klastične formacije pasivnog ruba; (3) formacije ofiolitne zone Dinarida (sl. 1); (4) formacije aktivnog ruba (Vardarska zona); (5) formacije prijelazne alpsko-dinaridske zone. Pruža se od Banovine u Hrvatskoj, preko Bosne i zapadne Srbije, do Kosova na jugoistoku i dalje prema Helenidima (Pamić, 1978), a bila je dio Tethys oceana koji je razdvajao Gondwanu i Euraziju tijekom mezozoika (Hrvatović & Pamić, 2005).

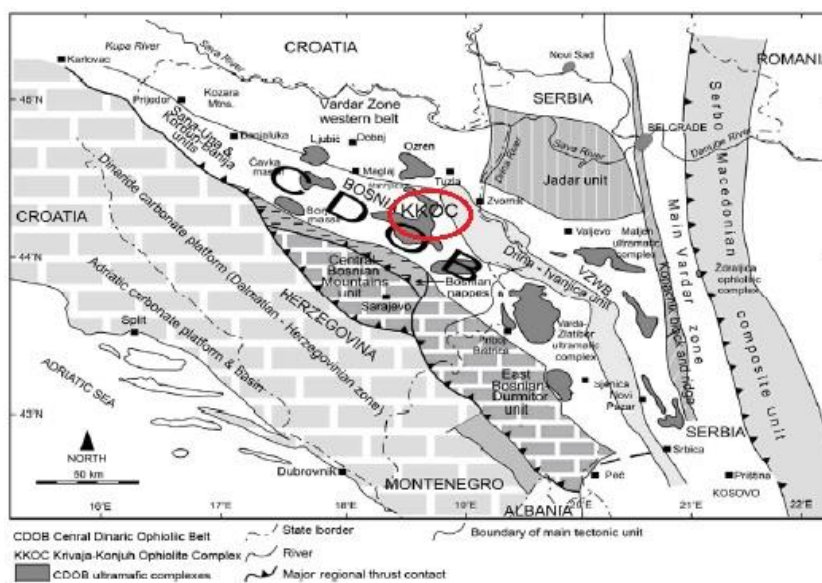


Slika 1. Položaj Dinaridske ofiolitne zone unutar koje se nalazi područje istraživanja. Preuzeto s Google Earth.

Metamorfne stijene amfibolitnog facijesa najviše su raširene na južnom rubu Krivaja-Konjuh ultramafitnog masiva (sl. 2 i 3). Sam masiv jedan je od najvećih kompleksa u Dinaridskoj ofiolitnoj zoni, a smješten je otprilike 100 km sjeverno od Sarajeva. Sastoji se od dva dijela razdvojena rasjedom u pružanju sjeverozapad-jugoistok, a sredinom prolazi rijeka Krivaja koja razdvaja krivajski od konjuškog dijela masiva.



Slika 2. Izdvojeno područje krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva na geografskoj karti Bosne i Hercegovine. Karta preuzeta s [www.bih-x.com/bhinfo/mape](http://www.bih-x.com/bhinfo/mape).



Slika 3. Prikaz položaja krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva (KKOC) unutar Dinaridske ofiolitne zone (CDOB). Prilagođeno prema Robertson et al. (2009).

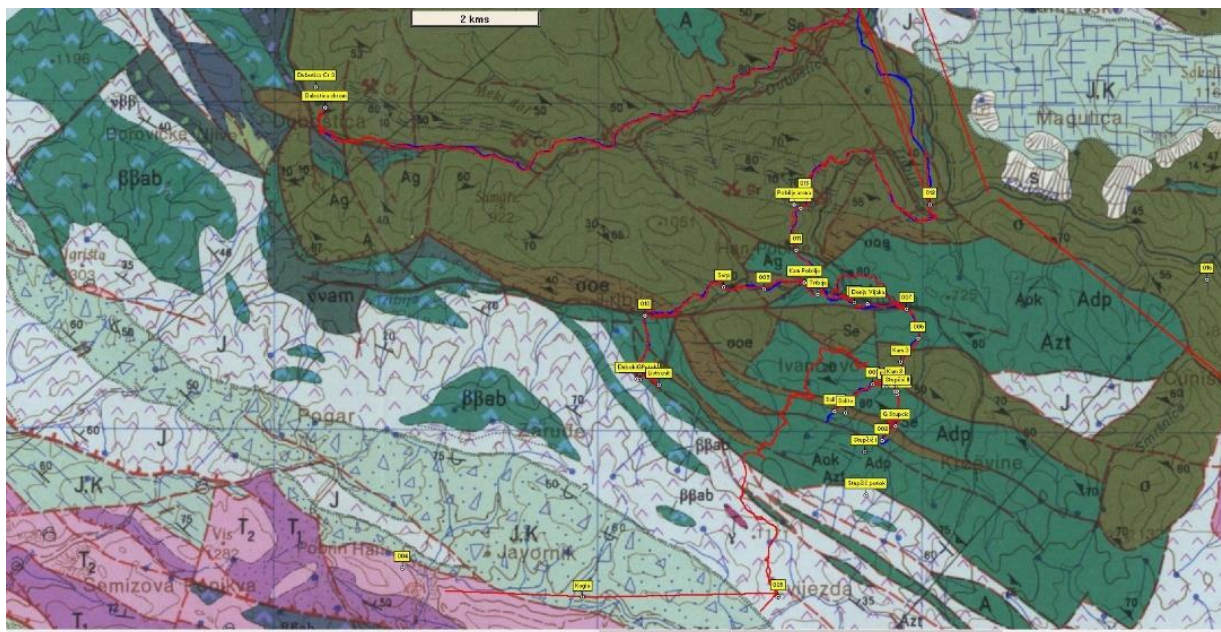
Porijeklo peridotita krivajskog područja povezuje se sa subkontinentalnom litosferom ili sa srednjeoceanskim grebenom (Robertson et al., 2009), a područje Konjuha povezano je sa zalučnim (back-arc) bazenom (Lugović et al., 2006; Pamić et al., 2002). Masiv je dio ofiolitnog melanža koji sadrži bazične i ultrabazične intruzive i vulkanske stijene, vapnence i rožnjake. Dio južnog ruba Krivaje obrubljen je tzv. metamornim đonom koji sadrži metamorfne stijene u rasponu od facijesa zelenih škriljavaca u nižim dijelovima do amfibolitnog i granulitnog facijesa



u području kontakta s peridotitima (Pamić et al., 2002). Kontakt ofiolitnog melanža i metamornog đona opisan je kao tektonski (Operta et al., 2003).

### 3.2. Geološka građa proučavanog područja

Proučavani teren, Duboštica - Gornja Vijaka (sl. 4), obuhvaćen je listom Vareš, OGK 1:100 000 (Olujčić et al., 1970). Područje je geološki složeno, a obuhvaća dvije veće geotektonske jedinice: dio Dinaridske ofiolitne zone i dio prijelazne zone paleozojskih škriljavaca i mezozojskih vapnenaca.



Slika 4. Geološka karta područja s označenim točkama uzorkovanja i GPS rutama (isječak iz OGK list Vareš).

Glavne litologije opisane su prema Pamić et al. (1970). Prema navedenim autorima, najstariji sedimenti pripadaju paleozoiku i zastupljeni su na manjem području. Riječ je o uskim zonama unutar trijasko vareske strukture te o zonama na jugozapadnom obodu sarajevsko-zeničkog bazena, a nailazimo na klorit-kvarcno-sericitne škriljavce silura i devona te razne paraškriljavce i metapješčenjake za koje nije točno utvrđeno kojem razdoblju pripadaju.

Stijene trijasko starosti izgrađuju varesku trijasku strukturu s razvijenim donjim i srednjim trijasom, dok su gornjotrijaski vapnenci razvijeni u području jurskih klastičnih i magmatskih stijena. U donjem trijasu nailazimo na pješčenjake i pjeskovite glinence, lapore te dolomitne



vapnence. Za anizik su karakteristični krinoidni i dolomitni vapnenci, dolomiti, vapnenci, pješčenjaci, hematiti i sideriti, a za ladinik vapnenci, dolomitni vapnenci, spiliti, tufovi, glinenci, rožnjaci i vapnenci.

Za razdoblje jure karakteristična je vulkanogeno-sedimentna formacija. Riječ je o 1000 m debelom kompleksu u kojem, pored raznih sedimentnih stijena, nailazimo na ultrabazične masive, amfibolite, efuzivne i intruzivne bazične stijene i, podređeno, neutralne i kisele magmatite. Mogu se razlikovati tri osnovne grupe unutar ove formacije: 1) sedimentne stijene, 2) stijene spilit-dijabaz-gabro-granitne asocijacije i 3) stijene peridotit-amfibolitske asocijacije. Sedimentne stijene su manje zastupljene od magmatskih stijena. Preko vulkanogene formacije transgresivno leže masivni vapnenci (J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>).

- Stijene peridotit-amfibolitske asocijacije predstavljaju jedinstvenu geološku cjelinu, najuočljiviju u amfibolitskom kompleksu Duboštica-Vijaka. Ovdje su ultramafitska tijela često u potpunom konkordantnom odnosu. Peridotiti su najrasprostranjenije magmatske stijene vulkanogeno-sedimentne formacije, a duž obodnih dijelova ultramafitnog masiva zapažaju se i zone kvarc-sericitnog i zelenog škriljavca te metamorfoziranih dijabaz-doleritnih stijena. Unutar ultramafita prema mineralnom sastavu, strukturi i teksturi izdvajaju se grupe: 1) lertzoliti (najčešći), 2) peridotiti s litažom, 3) enstatit duniti i 4) serpentiniti.

Amfiboliti se najčešće pojavljuju kao uske zone oko većih ultramafitnih tijela ili unutar njih samih. Amfibolitski kompleks Duboštica-Vijaka najveći je u ovoj ofiolitnoj zoni u Bosni. Stijene ovog facijesa pokazuju folijaciju, često i lineaciju, a vrlo rijetko su masivne i homogene; tako se izdvajaju masivni amfiboliti i amfibolski škriljavci granoblastične, nematoblastične, fibroblastične i porfiroblastične strukture. Najbitniji minerali svakako su amfiboli (uralit, hornblenda, pargasit i dr.) i plagioklasi (varira u sastavu od anortita do oligoklasa). Dosta su zastupljeni i pirokseni, obično diopsid i omfacit, ponekad i hipersten i enstatit. Čest je i piropom bogati granat, a pojavljuju se i klinozoisit i korund te akcesorni minerali poput titanita, rutila i dr. Uočljiva su obilježja retrogradnog metamorfizma poput razvoja kelifitskog ovoja na granatima, simplektita i prijelaza

bazičnih plagioklasa u kisele. Kod izmjene amfibolita s peridotitima česti su serpentin i klorit. Kemizam ovih stijena dosta je ujednačen te uglavnom odgovara alkalijском bazaltu. Varijeteti amfibolita koji se izdvajaju su: 1) amfiboliti i amfibolski škriljavci, 2) diopsid-amfibolski škriljavci, 3) korund-amfibolski škriljavci, 4) amfibolski škriljavci uže zone u vijačkom kompleksu (oligoklas i zelena hornblenda), 5) granat-amfibolski škriljavac, 6) klinozoisit-amfibolski škriljavac.

Stijene razdoblja titon-donja kreda rasprostranjene su sjeverno i južno od vareške trijaske strukture. Na južnom području razvijene su flišne tvorevine s rožnjačko-karbonatno-klastičnim sedimentima koji uključuju rožnjačko-karbonatno-klastične sedimente, 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.

U razdoblju tercijara zastupljeni su limničko-terestrički sedimenti u okviru sarajevsko-zeničkog ugljenonosnog bazena, a izdvojena su tri polifacijesna kompleksa: oligomiocenski, stariji miocenski i mlađi miocenski te je svaki od njih podijeljen na nekoliko zasebnih litostratigrafskih jedinica.

Kvartar je razvijen u području riječnih dolina. Pretežno je riječ o riječnom šljunku s proslojcima pijeska i, rjeđe, ilovače.

Što se tiče tektonike područja lista Vareš, ono obuhvaća dijelove između Dinaridske ofiolitne zone i zone paleozojskih škriljavaca i mezozojskih vapnenaca. Dominantna struktura u području je vareško-nemilska rasjedna zona koja odvaja dvije već spomenute zone. Ova rasjedna zona sustav je subparalelnih i, najčešće, reversnih rasjeda, a najbolje je uočljiva u trijaskoj zoni Borovica-Vareš-Čevljanovići.

Dinaridsku ofiolitnu zonu čine većinom stijene jurske vulkanogeno-sedimentne formacije, a prisutne su i jursko-kredne klastične tvorevine. Također, u manjoj su mjeri prisutni i trijaski sedimenti. Jurska vulkanogeno-sedimentna formacija jako je tektonizirana pa u nekim dijelovima predstavlja melanž. Unutar ove zone izdvojene su četiri manje jedinice: krivajsko-konjuški ultramafitni masiv, jugozapadni obod krivajsko-konjuškog masiva, pogarsko-ponijerska sinklinala te sjeverno krilo vareške strukture.

Zona paleozojskih škriljavaca i mezozojskih pješčenjaka nalazi se na jugozapadnom i južnom dijelu lista Vareš i čine ju samo sedimentne stijene. Teren je jasno boran, često se susreću izoklinalne i normalne bore, velike borane strukture, a rjeđe i monokline strukture. Izdvajaju se četiri manje jedinice: južno krilo vareške strukture, borani kompleks titon-donja kreda, gornjokredni borani kompleks i sarajevsko-zenički bazen.

## **4. ANALITIČKE METODE**

Na uzorcima su provedene optičke metode, geokemijske metode (analiza cjelostijenskog sastava metodom ICP te analiza sastava minerala elektronskom mikrosomdom) i termobarometrija preko modeliranja stabilnih mineralnih zajednica. Modeliranje stabilnosti mineralnih zajednica napravljeno je pomoću programa Perple\_X (Connolly, 2005).

### **4.1. Optičke metode**

Za provedbu optičkih metoda izrađeni su preparati iz uzoraka stijena D4, D6 i D9 koje je prikupio prof.dr.sc. Dražen Balen 2016. godine.

Iz stijena su ispiljene pločice koje su na predmetna stakalca zaljepljene kanada balzomom. Nakon toga brušenje i poliranje provedeno je na prahovima 90, 260 i 500 te je preparat istanjen na dimenzije 0,02-0,03 mm i pokriven pokrovnim stakalcem. Dalje je analiza obavljena na polarizacijskom mikroskopu na temelju mineraloških i mikrostrukturnih značajki, pod povećanjima 25x i 100x. Kamerom Canon EOS 500D snimljene su mikrofotografije i obrađene programima EOS Utility te AxioVision.

### **4.2. Geokemijske metode**

#### **4.2.1. Metode s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS)**

Na frakciji <0,122 mm usitnjennoj 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. Ova metoda temelji se na masenoj spektrometriji, a svrha joj je kvalitativno i kvantitativno određivanje elemenata nepoznatog uzorka. Cjelostijenska geokemijska analiza provedena je na uzorcima D4, D6 i D9.

Sam uređaj sastoji se od kvarcnih cijevi omotanih radiofrekvencijskom zavojnicom, a unutar kojih se nalazi inducirano magnetsko polje. Prolaskom argona kroz to polje nastaje visokotemperaturna plazma (6000-10 000 °C) u koju se raspršuje uzorak otopine u obliku aerosola. Uvođenjem aerosola u plazmu dolazi do atomizacije i, naposljetku, do ionizacije.

Prilikom izlaska iz plazme, ioni prolaze kroz leće te se tako stvara ionska zraka koja ulazi u maseni spektrometar (kvadrupol). Masenim spektrometrom odvajaju se ioni na temelju mase, koristeći brzu izmjenu istosmjernog i izmjeničnog napona. Ioni točno određenog omjera mase i naboja ostat će stabilni kod zadanog napona i njihov prolaz do detektora je moguć. Ioni drugačijeg omjera postaju nestabilni, skreću s putanje i ne dolaze do detektora. Nakon izlaska iz masenog spektrometra ioni udaraju u aktivnu površinu detektora i pritom se otpuštaju elektroni. Kod svakog sljedećeg udarca oslobađa se sve više elektrona, sve dok se ne stvori mjerljivi signal prema kojemu je moguće odrediti ukupan broj atoma nekog elementa u uzorku (Thomas, 2004).

#### **4.2.2. Analiza elektronskom mikrosondom (EMPA)**

Mineralnu kemijsku analizu elektronskom mikrosondom CAMECA SX100 na uzorcima je napravio prof. dr. sc. Dražen Balen na Institutu za mineralogiju i kristalokemiju, Sveučilište u Stuttgartu (Njemačka). Uvjeti analize uključuju napon od 15 kV, jakost struje od 15 nA te promjer generiranog snopa od ~3 μm. Korišteni standardi su prirodni minerali i čisti oksidi (albit, periklas, korund, wollastonit, ortoklas, rutil, rodonit, fjalit, barit, kromit).

Ovaj način određivanja kemijskog sastava mikronskih područja nekog uzorka je ne-destruktivan. Da bi tako precizna analiza bila moguća, kombinacijom zavojnica i leća fokusira se i smanjuje radijus generiranog snopa elektrona koji se usmjerava na polirani uzorak. Prilikom toga dolazi do emitiranja rendgenskih zraka karakterističnih valnih duljina za svaki pojedini element. Te valne duljine difraktiraju se prolaskom kroz kristal, dolaze do detektora i tamo se na temelju intenziteta zraka i uspoređivanjem valnih duljina određuju koncentracije elemenata (Reed, 2005).

### 4.3. Geotermobarometrija

Da bismo odredili temperature i tlakove pri kojima se postigla kemijska ravnoteža magmatskih ili metamornih stijena, koristi se metoda geotermobarometrije. Za prikaz P-T puta stijena koristi se P-T pseudopresjek, tj. P-T dijagram faznih ravnoteža na kojemu je vidljiv raspon temperatura i tlakova za određeni cjelokupni kemijski sastav stijene. Sam pseudopresjek sastoji se od zasebnih polja od kojih svako sadrži skup faza u ravnoteži pri određenim tlakovima i temperaturama. Linije koje razdvajaju polja ujedno predstavljaju i nestanak, odnosno pojavu određene faze.

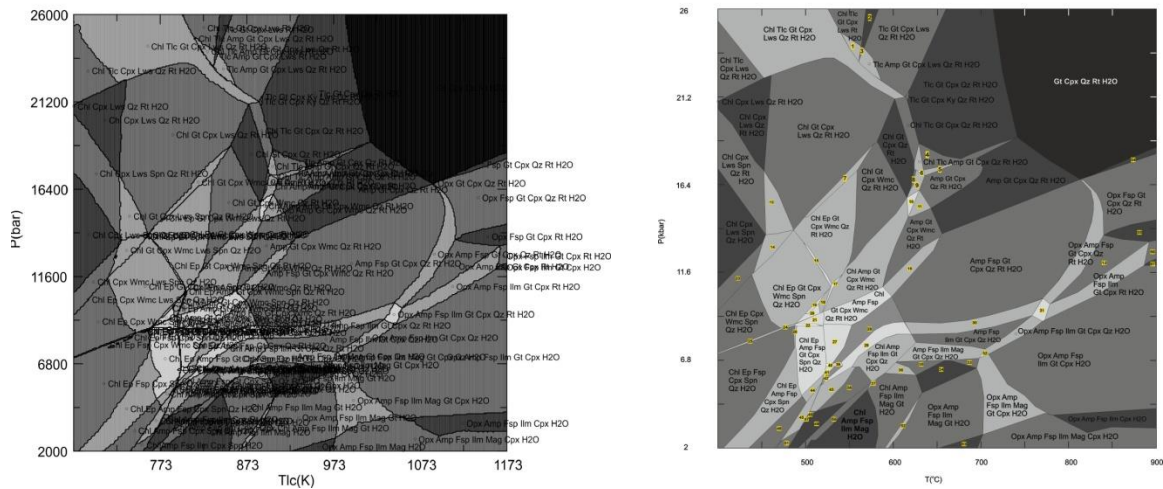
P-T pseudopresjeci izračunati su pomoću programa PERPLE\_X (Connolly & Petrini, 2002; Connolly, 2005; August 2011 verzija preuzeta s internetske stranice <http://www.preplex.ethz.ch/>) za sustave komponenti MnO-Na<sub>2</sub>O-CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> (MnNCFMASHTO) i MnO-Na<sub>2</sub>O-CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub> (MnNCFMAST) u P-T rasponu 2-26 kbar i 400-900 °C. Potprogrami korišteni za termodinamičke izračune i grafičke prikaze su: VERTEX.exe, PSSECT.exe, WERAMI.exe i PSTABLE.exe. Potrebne su i datoteke:

\*ver\*.dat – termodinamička baza podataka (npr. hp02ver.dat)

\*solut\*.dat – termodinamički podaci modela otopine (npr. solution\_model1.dat)

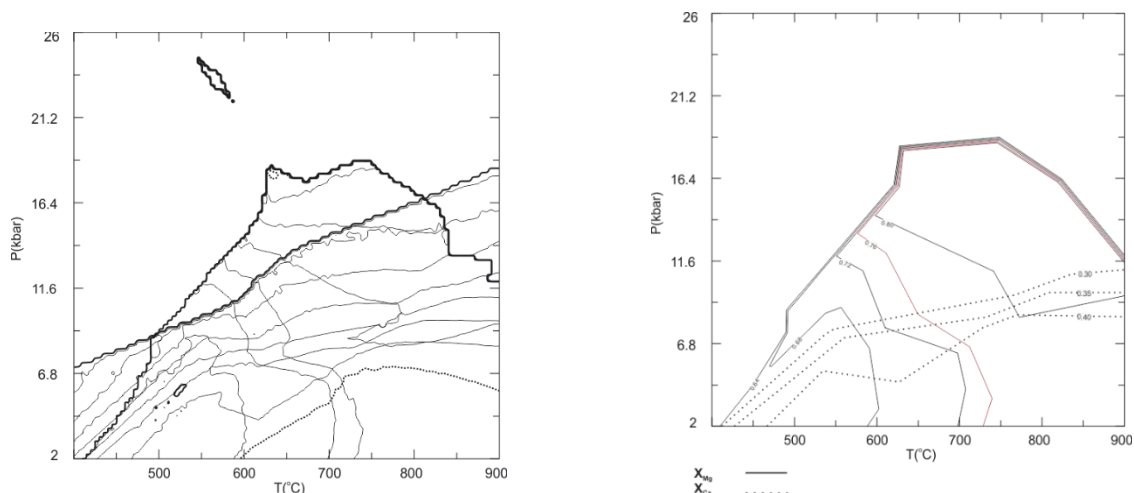
Perplex\_option.dat – datoteka za definiranje parametara.

Pokretanjem potprograma VERTEX (koji koristi \*.dat datoteku) stvaraju se datoteke \*.arf, \*.blk, \*.plt, \*.prn i \*.tof. Potprogram PSSECT zatim stvara PostScript datoteku \*.ps čitljivu programima za grafičku obradu te je moguća konačna konstrukcija dijagrama faznih ravnoteža i njihova obrada u, npr. CorelDraw-u (sl. 5).



Slika 5. Lijevo - originalni pseudopresjek, produkt PSSECT potprograma; desno – pseudopresjek obrađen u CorelDraw-u.

Potprogrami korišteni za prikaz izopleta, tj. linija definiranih jednakim vrijednostima određenog kemijskog sastava, su WERAMI i PSTABLE. Pri pokretanju potprograma WERAMI potrebno je definirati mineralnu fazu, komponente brojnika i nazivnika, njihove molarne vrijednosti i gustoću mreže prema kojoj se interpoliraju izoplete. Pritom se stvara datoteka \*.tab koja je potrebna za potprogram PSTABLE. U PSTABLE-u definiramo raspon i učestalost izopleta te kao konačan rezultat dobivamo PostScript datoteku \*.ps dalje obrađenu u CorelDraw-u. Dijagrami izopleta (sl. 6) konstruirani su za pojedine mineralne faze u uzorcima te za određivanje  $X_{Mg}$  udjela u amfibolu te  $X_{An}$  udjela u plagioklasu.



Slika 6. Lijevo – izoplete kao produkt PSSECT-a; desno – izoplete iscrtane u CorelDraw-u po vlastitoj procjeni gustoće i zaobljenosti.

Odabrani neidealni modeli čvrstih otopina potrebnih za račun su: GITrTsPg za amfibol (glaukofan, tremolit, tschermakit, pargasit; White et al., 2003; Wei & Powel, 2003; Connolly, 2005), Chl(HP) za klorit, mctd za kloritoid, Omph(HP) za klinopiroksen, Gt(HP) za granat (Holland & Powell, 1998). Mica(M) odabrani je model za paragonit (margarit-muskovit-paragonit; Massonne & Willner 2008; Massone, 2010). Idealni modeli čvrstih otopina korišteni su za ilmenit (IlGkPy, krajnji članovi ilmenit, geikelit i pirofanit) i sudoit (sud(M), Fe-Mg sudoit, vrsta klorita). Što se tiče viših tlakova i temperatura, hCrd odabrani je model za cordierit, St(HP) za staurolit i Opx(HP) za ortopiroksen. MtUl(A) korišten je za Mg spinel (Andersen & Lindsley, 1988).



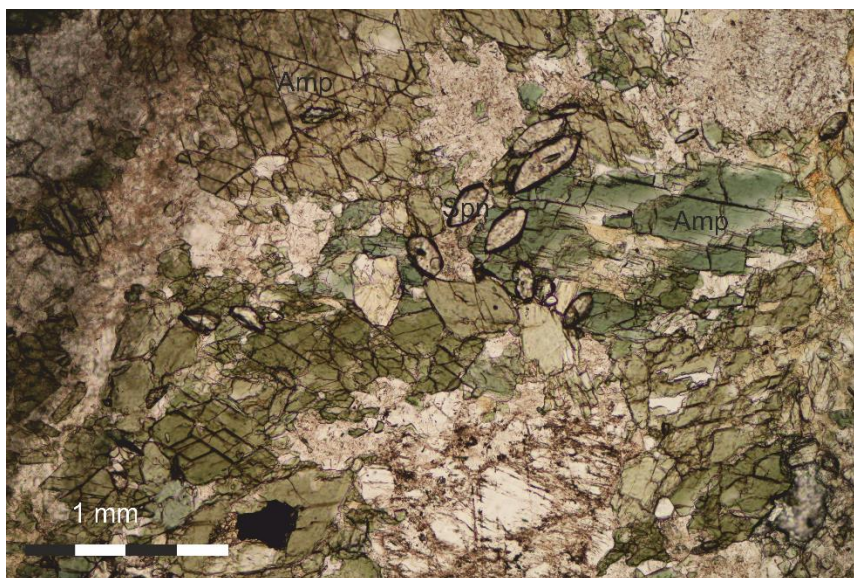
## 5. REZULTATI

### 5.1. Mineralna optika

#### 5.1.1. D4

Kod D4 uzorka (sl. 7) vidljiva su mineralna zrna amfibola, plagioklasa i piroksena (ortopiroksen je podređeno zastupljen u odnosu na klinopiroksen). Volumni udjeli procijenjeni su na 45% amfibola, 45% plagioklasa i 10% piroksena. Akcesorno se javlja i titanit.

Amfiboli imaju izraženi pleokroizam u tamnozelenoj i svijetlozelenoj boji te ponegdje imaju uklopljena zrna titanita. Kalavost je dobro vidljiva, i jedan sustav, i dva u poprečnom presjeku, a zrna su najčešće hipidiomorfna do idiomorfna. Pirokseni su puno svjetliji i nemaju izraženi pleokroizam. Kao i kod amfibola, kalavost je dobro uočljiva, a zrna su većinom hipidiomorfna. Veliki dio plagioklasa je alteriran, no zastupljena su i hipidiomorfna do idiomorfna zrna. Mineralna zrna titanita pojavljuju se kao uklopci u amfibolima što ukazuje na to da su starija od amfibola. S obzirom na mineraloške karakteristike, ovaj uzorak određen je kao amfibolit.

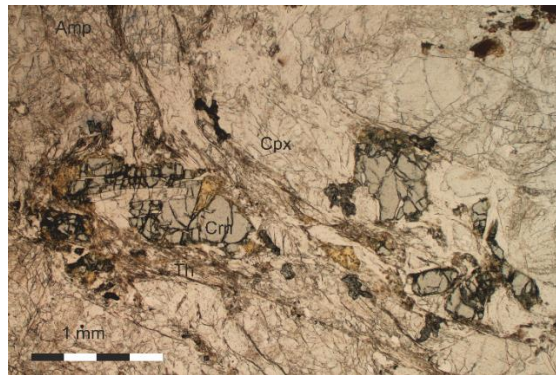


Slika 7. Mikrofotografija uzorka D4 (N-), amfibolit. Amp – amfibol, Spn – titanit.

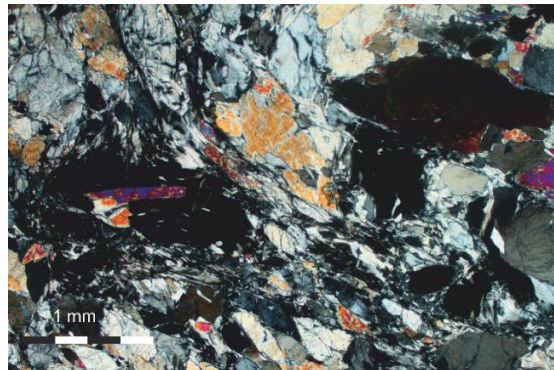
### 5.1.2. D6

U uzorku D6 (sl. 8-9) volumi udio amfibola procijenjen je na 65%, plagioklasa na 20%, a piroksena na 10%. Mineralna zrna korunda vidljiva su oko zrna amfibola ili kao uklopici u istom, a akcesorno se pojavljuje i spinel.

Iako kod amfibola pleokroizam nije izražen jako kao u uzorku D4, lijepo je vidljiv dvostruki sustav kalavosti u poprečnom presjeku, a zrna su hipidiomorfna do idiomorfna. Udio piroksena u odnosu na amfibole je podređen, a opaženi su klinopirokseni te, u nešto manjoj mjeri, ortopirokseni. Gotovo sav plagioklas je alteriran u thomsonit te je uočljiv kao alotriomorfna masa između zrna ostalih minerala. U rubu oko zrna spinela vidljiv je safirin što ukazuje na to da je mlađi od spinela. S obzirom na mineraloške karakteristike, ovaj uzorak određen je kao amfibolit.



Slika 8. Mikrofotografija uzorka D6, amfibolit (N-). Amp – amfibol, Cpx – klinopiroksen, Crn – korund.



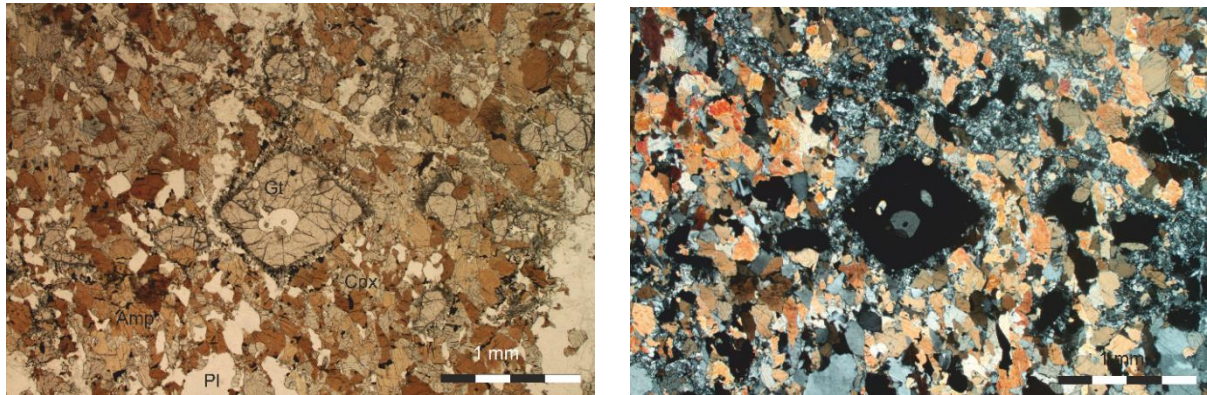
Slika 9. Mikrofotografija uzorka D6, amfibolit. N+



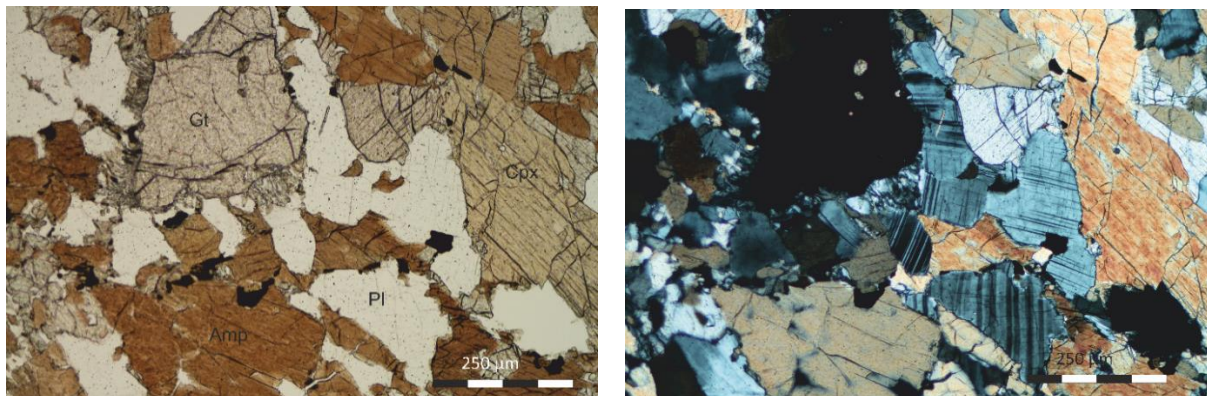
### 5.1.3. D9

U uzorku D9 (sl. 10-11) oko 60% volumena zauzimaju amfiboli i pirokseni, volumen plagioklasa procijenjen je na 35%, a u 5% volumena pojavljuju se granati.

Mineralna zrna amfibola imaju izraziti pleokroizam u tamnosmeđoj i svijetlosmeđoj boji. Kalavost je, kao i u prethodnim uzorcima, lijepo vidljiva, a zrna su hipidiomorfna do idiomorfna. Kod piroksena nije vidljiv pleokroizam, puno su svjetliji te je većinski zastupljen klinopiroksen. Kod plagioklasa je riječ većinom o hipidiomorfnim zrnima, a dio ih je alteriran i vidljiv u formi sinozrnatih nakupina. Mineralna zrna granata razvijena su s dobro vidljivim „čupavim“ rubom koji se sastoji pretežno od plagioklasa. S obzirom na mineraloške karakteristike, uzorak je određen kao granulit.



Slika 10. Mikrofotografija uzorka D9, granulit. Lijevo N-, desno N+. Gt – granat, Cpx – klinopiroksen, Amp – amfibol, Pl – plagioklas.



Slika 11. Mikrofotografija uzorka D9, granulit. Lijevo N-, desno N+. Gt – granat, Cpx – klinopiroksen, Amp – amfibol, Pl – plagioklas.

## 5.2. Geokemijski rezultati

### 5.2.1. Cjelostijenska geokemija

Geokemijska analiza cjelokupnog sastava stijene (metoda ICP-MS) dala je podatke o glavnim elementima u stijeni te o elementima u tragovima (Tablica 1). Geokemijske podatke za Perple\_X bilo je potrebno prilagoditi te su takvi priloženi u Tablici 2 (svo željezo je preračunato u FeO, odračunati je P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a time i dio Ca vezanog u apatitu, udio vode određen je na 6 tež.%, a suma je pritom  $\Sigma 100$ ).

Tablica 1. Geokemijski rezultati cjelokupnog sastava stijene za uzorke D4, D6 i D9.

	D4	D6	D9	D.L.*
<b>wt (%)</b>				
SiO <sub>2</sub>	47,68	39,65	44,94	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,58	21,91	14,26	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,06	5,80	13,75	0,04
MgO	8,34	16,82	9,92	0,01
CaO	10,01	9,72	11,83	0,01
Na <sub>2</sub> O	3,04	1,25	2,05	0,01
K <sub>2</sub> O	0,32	0,14	0,04	0,01
TiO <sub>2</sub>	1,49	0,06	1,40	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	<0,01	0,09	0,01
MnO	0,14	0,06	0,23	0,01
LOI	3,00	4,10	1,20	
$\Sigma$	99,76	99,70	99,73	
<b>(ppm)</b>				
Ag	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
As	<0,5	<0,5	0,6	0,5
Au	4,2	3,6	7,6	0,5
Ba	16,0	27,0	3,0	1
Be	<1	<1	<1	1
Bi	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Cd	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Co	47,5	75,7	48,9	0,2
Cr	100	700	200	20
Cs	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Cu	4,5	13,6	66,3	0,1
Ga	14,5	13,8	15,3	0,5

	D4	D6	D9	D.L.
<b>Hf</b>	2,8	0,1	1,8	0,1
<b>Hg</b>	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
<b>Mo</b>	0,2	<0,1	<0,1	0,1
<b>Nb</b>	4,4	0,5	1,9	0,1
<b>Ni</b>	61	791	76	20
<b>Pb</b>	0,4	1,1	0,8	0,1
<b>Rb</b>	2,0	2,0	<0,1	0,1
<b>Sb</b>	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
<b>Sc</b>	44	6	50	1
<b>Se</b>	<0,5	<0,5	<0,5	0,5
<b>Sn</b>	<1	<1	<1	1
<b>Sr</b>	129,2	33,3	76,0	0,5
<b>Ta</b>	0,3	<0,1	0,1	0,1
<b>Th</b>	0,4	<0,2	<0,2	0,2
<b>Tl</b>	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
<b>U</b>	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
<b>V</b>	359	40	389	8
<b>W</b>	<0,5	<0,5	<0,5	0,5
<b>Y</b>	34,8	2,5	34,6	0,1
<b>Zn</b>	9	34	35	1
<b>Zr</b>	91,3	2,5	56,4	0,1
<b>La</b>	5,8	0,2	2,0	0,1
<b>Ce</b>	13,3	0,6	7,6	0,1
<b>Pr</b>	2,03	0,04	1,36	0,02
<b>Nd</b>	10,5	0,3	8,4	0,3
<b>Sm</b>	3,52	0,13	3,00	0,05
<b>Eu</b>	1,19	0,06	1,05	0,02
<b>Gd</b>	4,83	0,23	4,34	0,05
<b>Tb</b>	0,89	0,05	0,78	0,01
<b>Dy</b>	6,20	0,36	5,57	0,05
<b>Ho</b>	1,25	0,10	1,22	0,02
<b>Er</b>	3,68	0,25	3,70	0,03
<b>Tm</b>	0,52	0,03	0,55	0,01
<b>Yb</b>	3,44	0,21	3,44	0,05
<b>Lu</b>	0,48	0,03	0,54	0,01
<b>ΣREE</b>	57,63	2,59	43,55	

\*D.L. = granica detekcije metode

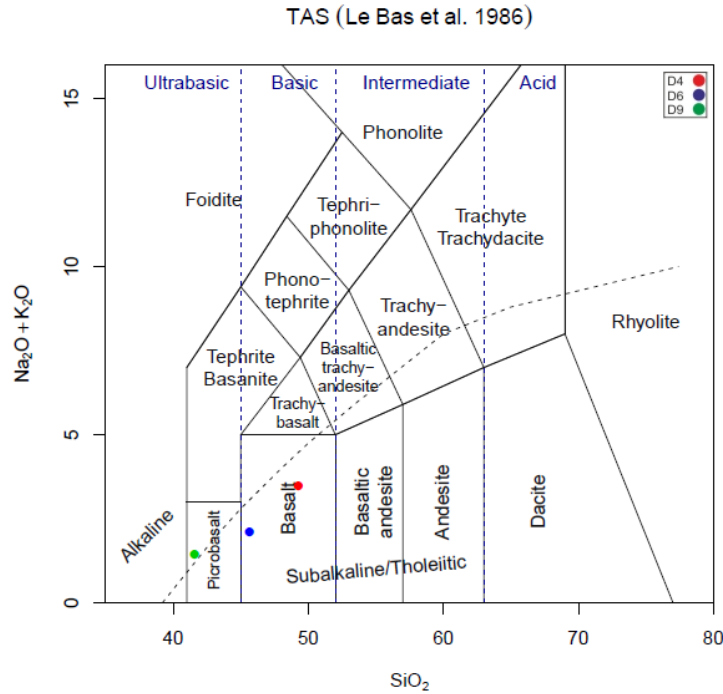
Tablica 2. Geokemijski podaci o makroelementima, prilagođeni za Perple\_X.

Podaci pripremljeni za Perple_X					
	D4	D4 (sve FeO*)	D6	D6 (sve FeO)	D9
<b>wt (%)</b>					
<b>SiO<sub>2</sub></b>	47,085	47,140	39,337	39,361	43,583
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,471	1,473	0,060	0,060	1,358
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,398	14,415	21,737	21,750	13,829
<b>FeO</b>	9,831	9,842	5,179	5,182	12,002
<b>O<sub>2</sub></b>	0,109	0,000	0,057	0,000	0,000
<b>MnO</b>	0,138	0,138	0,060	0,060	0,223
<b>MgO</b>	8,236	8,246	16,687	16,697	9,620
<b>CaO</b>	9,729	9,740	9,643	9,649	11,358
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,002	3,006	1,240	1,241	1,988
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039
<b>H<sub>2</sub>O**</b>	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
<b>Σ</b>	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

\*sve Feo – podaci za analizu u sustavu komponenata MnNCFMASHT

\*\*H<sub>2</sub>O – hipotetska voda potrebna za zasićenje sustava pri termodinamskom računu

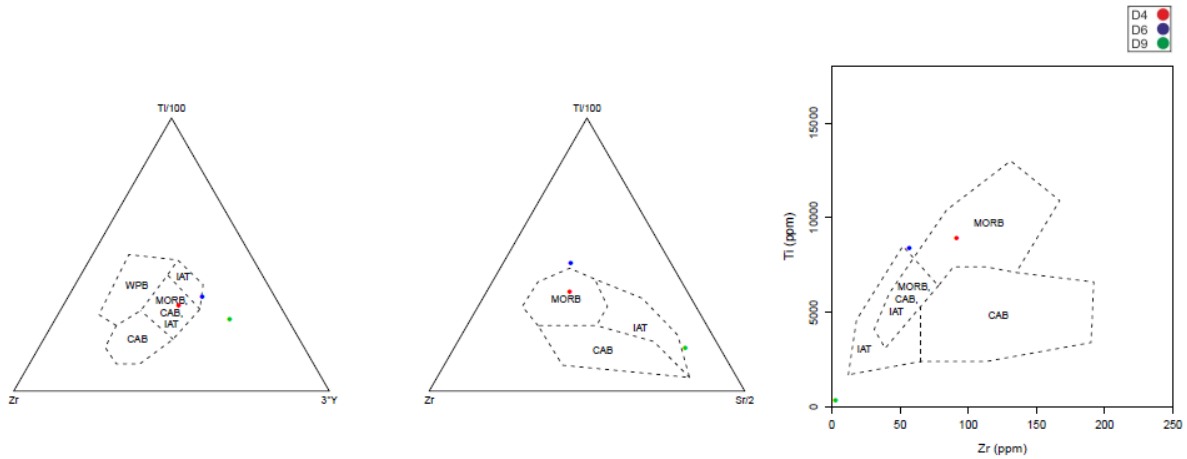
Klasifikacijski dijagrami napravljeni su u GCDkit-u, v. 4.1 (Janoušek et al., 2016) na temelju podataka za cjelokupnu geokemiju stijena. Na TAS dijagramu (sl. 12) (Le Bas et al., 1986) vidi se da sastav stijena pada u polje bazalta za uzorke D4 i D6 te u polje pikrobazalta za uzorak D9, a oba polja karakterizira nizak udio sadržaja ukupnih alkalijskih oksida (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O). Naše analize razlikuju se od kemizma stijena opisanog u poglavlju 3.2. *Geološka građa proučavanog područja* gdje je opisano da sastav odgovara alkalijskom bazaltu.



Slika 12. TAS klasifikacijski dijagram (Le Bas et al., 1986). Uzorci amfibolita D4 i D6 padaju u polje bazalta, dok granulit D9 pada u polje pikrobazalta.

Informacije o geotektonskom smještaju protolita ovih metamornih stijena na temelju diskriminacijskih dijagrama s nekompatibilnim elementima u tragovima dobivene su Pearce & Cann (1973) tektonskom klasifikacijom bazalta (sl. 13). Uzorak D4 tako pada u polje MORB (*Mid Ocean Ridge Basalt*), a uzorak D6 na diskriminacijskom dijagramu Zr-Ti-Y i Ti-Zr pada oko polja IAT (*Islandic Arc Tholeiites*) dok je na dijagramu Zr-Ti-Sr blizu polja MORB. Uzorak D9 nalazi se izvan klasifikacijskih polja.

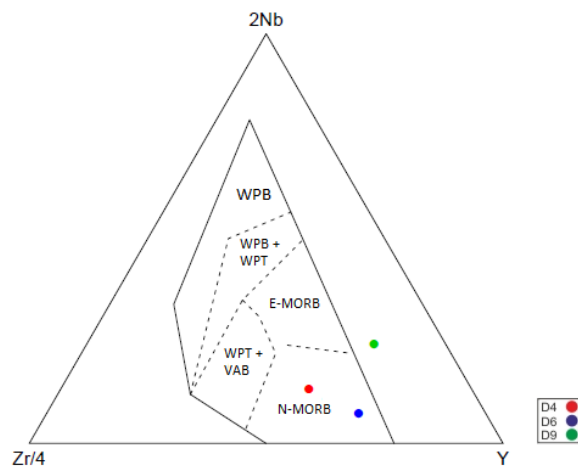
Basalt tectonic discrimination – Pearce and Cann (1973)



Slika 13. Tektonska klasifikacija bazalta (Pearce & Cann, 1973). WPB – *Within Plate Basalts*, CAB – *Continental Arc Basalts*, IAT – *Island Arc Tholeiites*, MORB – *Mid Ocean Ridge Basalt*. Granulit D9 pada izvan polja klasifikacija. Amfibolit D4 na sva tri dijagrama pada u polje MORB, a amfibolit D6 pada u blizinu polja IAT.

Na Zr-Nb-Y dijagramu (Meschede, 1986) (sl. 14) uzorci D4 i D6 padaju u polje N-MORB dok je uzorak D9, kao i u prethodnom slučaju, izvan polja klasifikacije.

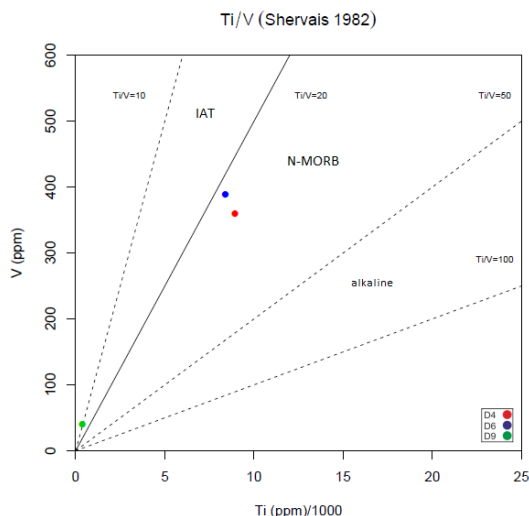
Zr/4 – 2Nb – Y (Meschede 1986)



Slika 14. Zr-Nb-Y diskriminacijski dijagram (Meschede, 1986). WPB – *Within Plate Basalts*, WPT – *Within Plate Tholeiites*, VAB – *Volcanic Arc Basalts*, E-MORB – *Enriched MORB*, N-MORB – *Normal MORB*. Granulit D9 pada izvan polja klasifikacije. Amfiboliti D4 i D6 padaju u polje MORB.

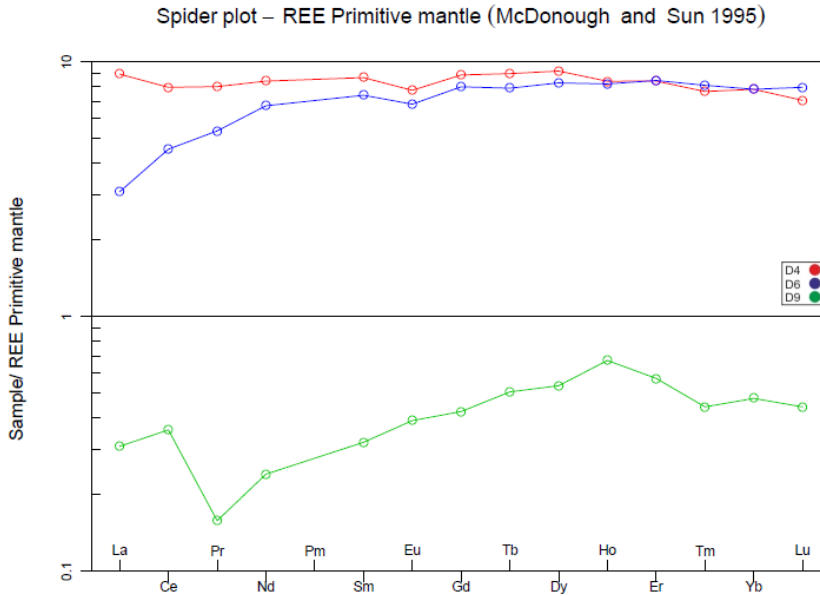


Dijagram V-Ti (Shervais, 1982) (sl. 15) ponovo uzorke D4 i D6 smješta u N-MORB polje dok je uzorak D9 na rubu IAT polja.



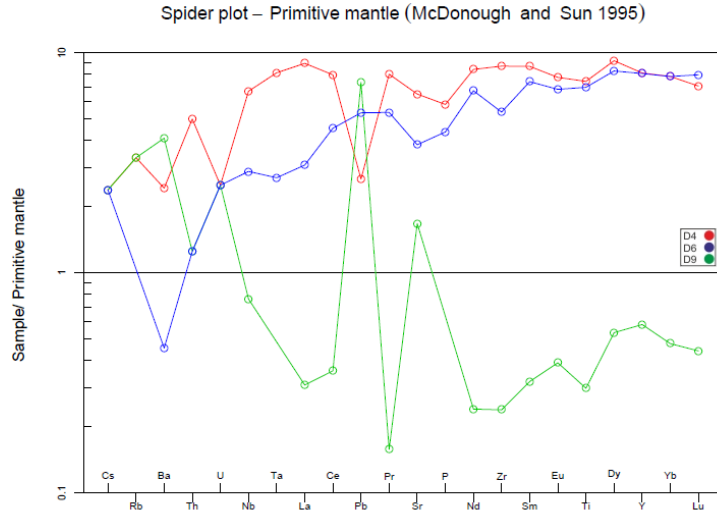
Slika 15. Ti-V diskriminacijski dijagram (Shervais, 1986). IAT – *Island Arc Tholeiites*, N-MORB – *Normal MORB*. Amfiboliti D4 i D6 padaju u N-MORB polje, a granulit D9 pada na rub IAT polja.

Normalizacija elemenata iz skupine lantanida (REE) (sl. 16) napravljena je na temelju standarda primitivnog plašta (Primitive mantle, McDonough & Sun, 1995). Na dijagramu je vidljivo da uzorak D9 jako odudara od uzoraka D4 i D6 te su mu sve vrijednosti niže od vrijednosti primitivnog plašta na koji je normalizacija provedena. U istom uzorku izrazita je praseodimijeva negativna anomalija. Uzorci D4 i D6 ponašaju se vrlo slično i sve vrijednosti su više od vrijednosti primitivnog plašta za otprilike jedan red veličine.



Slika 16. Normalizacija elemenata iz grupe lantanida (REE) na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995).

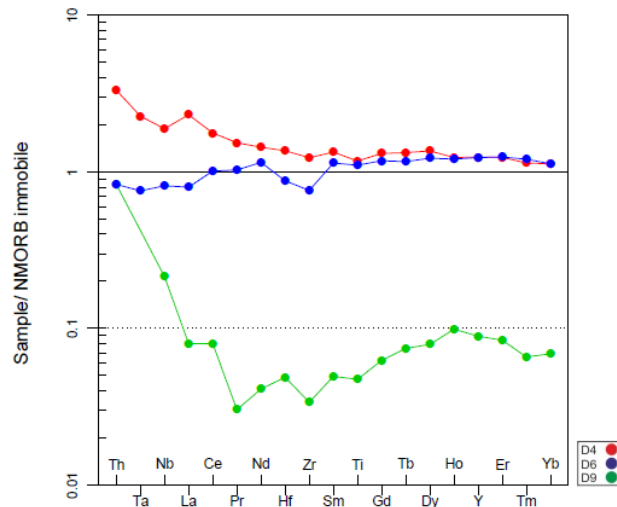
Na dijagramu elemenata normaliziranih na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995) (sl. 17) ponovo je vidljiva razlika između uzorka D9 i preostala dva. Izuzev Cs, Rb, Ba, Pb i Sr, sve vrijednosti su niže od vrijednosti primitivnog plašta. Najveću pozitivnu anomaliju za uzorak D9 ima olovo, što ukazuje na subdukciju, dok uzorak D4 ovdje ima negativnu anomaliju. Vrlo je izrazita praseodimijeva negativna anomalija kod D9 dok je kod uzoraka D4 i D6 ona pozitivna. Barij kod uzoraka D4 i D6 ima negativnu anomaliju, što ukazuje na frakcionaciju feldspata, a za uzorak D9 ona je pozitivna. Izrazita je razlika i kod lantana koji kod D9 ima izrazitu negativnu anomaliju.



Slika 17. Normalizacija elemenata u tragovima na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995).

Normalizacija uzoraka na N-MORB (Sun & McDonough 1989 in Pearce 2014) pokazuje podudaranje uzoraka D4 i D6, tj. bliske vrijednosti tih uzoraka k vrijednostima N-MORB-a, dok uzorak D9 ponovo jako odudara (sl. 18). To odgovara smještaju uzoraka D4 i D6 u polja N-MORB-a na sl. 14 i 15.

Spider plot – NMORB immobile (Sun & McDonough 1989 in Pearce 2014)



Slika 18. Normalizacija uzoraka na NMORB (Sun & McDonough 1989 in Pearce 2014).

### 5.2.2. Mineralna geokemija

Mineralna geokemija utvrđena je elektronskom mikroskopom na uzorcima D4 i D6 za amfibol i plagioklas čiji su podaci potrebni za izračun  $X_{Mg}$  i  $X_{An}$  komponenata u Perple\_X-u. Kemijski sastav amfibola prikazan je u Tablici 3 za uzorak D4, a sastav plagioklasa za isti uzorak u Tablici 4. Kemijski sastav tih minerala za uzorak D6 prikazan je u tablicama 5 i 6. Kako je sav plagioklas u uzorku D6 alteriran te je prešao u thomsonit,  $X_{An}$  komponenta je izračunata prema *Mineral Formulae Recalculation* (Bradley, Colledge & Perkins, preuzeto s [http://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/mineralformulaerecalculation.html](http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/mineralformulaerecalculation.html)). Na taj način je, uz pretpostavljeni izokemijski karakter metamorfizma, procijenjen sastav izvornog metamorfnog plagioklasa.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava amfibolskih zrna za uzorak D4. Koncentracije glavnih elemenata, zapisanih u formi oksida, izražene su u težinskim postotcima (tež. %), dok je broj kationa normaliziran prema broju atoma kisika u strukturnoj formuli minerala.

<b>Amfibol</b>				
	<b>D4-am3</b>	<b>D4-am5</b>	<b>D4-am6</b>	<b>D4-am7</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	45,22	44,10	43,10	43,35
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,57	0,71	0,70	0,66
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	9,32	10,72	11,13	10,60
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	7,38	6,65	8,92	6,91
<b>FeO</b>	9,86	10,66	9,30	10,76
<b>MnO</b>	0,33	0,27	0,27	0,22
<b>MgO</b>	11,82	11,02	10,97	10,92
<b>CaO</b>	11,42	11,53	11,19	11,27
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,77	1,69	1,98	2,11
<b>Ka<sub>2</sub>O</b>	0,12	0,18	0,17	0,17
<b>BaO</b>	0,00	0,06	0,00	0,03
<b>H<sub>2</sub>O</b>	2,04	2,03	2,03	2,01
<b>Σ</b>	99,83	99,60	99,76	99,00
<b>Si</b>	6,656	6,526	6,380	6,477
<b>Al<sup>IV</sup></b>	1,344	1,474	1,620	1,523
<b>Ti</b>	0,063	0,079	0,078	0,074
<b>Al<sup>VI</sup></b>	0,272	0,396	0,322	0,344

	D4-am3	D4-am5	D4-am6	D4-am7
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,817	0,740	0,993	0,777
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	1,213	1,319	1,151	1,345
<b>Mn</b>	0,041	0,034	0,034	0,027
<b>Mg</b>	2,593	2,432	2,422	2,432
<b>Ca</b>	1,801	1,828	1,774	1,804
<b>Na</b>	0,504	0,484	0,567	0,611
<b>K</b>	0,022	0,034	0,032	0,031
<b>Ba</b>	0,000	0,004	0,000	0,002
<b>H</b>	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>*X<sub>Mg</sub></b>	0,681	0,648	0,678	0,644

$$*X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe)$$

Tablica 4. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava zrna plagioklasa za uzorak D4. Koncentracije glavnih elemenata, zapisanih u formi oksida, izražene su u težinskim postotcima (tež. %), dok je broj kationa normaliziran prema broju atoma kisika u strukturnoj formuli minerala.

<b>Plagioklas</b>				
	<b>D4-pl2</b>	<b>D4-pl3</b>	<b>D4-pl4</b>	<b>D4-pl5</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	58,18	57,30	58,71	60,28
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,00	0,01	0,00	0,01
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	25,52	26,59	26,29	24,29
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,20	0,13	0,34	0,26
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,02	0,01	0,02	0,00
<b>MgO</b>	0,03	0,01	0,02	0,02
<b>CaO</b>	7,72	8,42	7,72	6,08
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	7,41	6,86	7,07	8,23
<b>Ka<sub>2</sub>O</b>	0,05	0,04	0,06	0,06
<b>BaO</b>	0,03	0,00	0,01	0,00
<b>Σ</b>	99,17	99,38	100,25	99,22
<b>Si</b>	2,626	2,583	2,616	2,704
<b>Al</b>	1,357	1,413	1,381	1,284
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,007	0,004	0,011	0,009
<b>Mn<sup>3+</sup></b>	0,001	0,000	0,001	0,000
<b>Ba</b>	0,001	0,000	0,000	0,000
<b>Ca</b>	0,373	0,407	0,368	0,292
<b>Na</b>	0,648	0,599	0,611	0,716
<b>K</b>	0,003	0,002	0,004	0,003
<b>*X<sub>An</sub></b>	0,364	0,403	0,375	0,289

$$*X_{An} = Ca / (Ca + K + Na)$$

Tablica 5. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava amfibolskih zrna za uzorak D6. Koncentracije glavnih elemenata, zapisanih u formi oksida, izražene su u težinskim postotcima (tež. %), dok je broj kationa normaliziran prema broju atoma kisika u strukturnoj formuli minerala.

<b>Amfibol</b>			
	<b>D6-am15</b>	<b>D6-am16</b>	<b>D6-am21</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	45,13	45,51	45,41
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,08	0,09	0,10
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	17,61	17,33	17,06
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,00	0,00	0,00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,63	4,78	4,93
<b>FeO</b>	0,00	0,00	0,00
<b>MnO</b>	0,03	0,06	0,02
<b>MgO</b>	16,56	16,77	16,80
<b>CaO</b>	11,89	11,94	11,92
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,71	1,59	1,68
<b>Ka<sub>2</sub>O</b>	0,20	0,19	0,20
<b>H<sub>2</sub>O</b>	2,17	2,18	2,18
<b>Σ</b>	100,00	100,44	100,30
<b>Si</b>	6,233	6,251	6,257
<b>Al<sup>IV</sup></b>	1,767	1,749	1,743
<b>Ti</b>	0,008	0,009	0,010
<b>Al<sup>VI</sup></b>	1,099	1,056	1,027
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,481	0,494	0,511
<b>Mn</b>	0,003	0,007	0,002
<b>Mg</b>	3,409	3,433	3,450
<b>Ca</b>	1,759	1,757	1,760
<b>Na</b>	0,459	0,423	0,449
<b>K</b>	0,035	0,034	0,036
<b>H</b>	2,000	2,000	2,000
<b>*X<sub>Mg</sub></b>	1,000	1,000	1,000

\*X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe)

Tablica 6. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava zrna plagioklasa (thomsonit) za uzorak D6. Koncentracije glavnih elemenata, zapisanih u formi oksida, izražene su u težinskim postotcima (tež. %). Broj kationa dobiven je prema *Mineral Formulae Recalculation*.

<b>Thomsonit</b>			
	<b>D6-px23</b>	<b>D6-px24</b>	<b>D6-px25</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37,6551	38,1021	38,3836
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,0000	0,0103	0,0000
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	31,4992	31,2123	32,2249
<b>FeO</b>	0,0828	0,0508	0,0000
<b>MnO</b>	0,0454	0,0000	0,0136
<b>MgO</b>	0,0000	0,0181	0,0362
<b>CaO</b>	12,9563	12,7411	12,0778
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,7239	3,7265	3,3481
<b>Ka<sub>2</sub>O</b>	0,0000	0,0091	0,0060
<b>BaO</b>	0,0196	0,0000	0,0000
<b>H<sub>2</sub>O</b>	14,0176	14,1288	13,9088
<b>Σ</b>	100,0000	99,9990	99,9990
<b>Si</b>	1,961	1,988	2,002
<b>Ti</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Al</b>	1,934	1,919	1,981
<b>Cr</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0,004	0,002	0,00
<b>Mn</b>	0,002	0,000	0,001
<b>Mg</b>	0,000	0,002	0,003
<b>Ca</b>	0,723	0,712	0,675
<b>Ba</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Na</b>	0,376	0,377	0,339
<b>K</b>	0,000	0,001	0,000
<b>X<sub>An</sub></b>	0,658	0,654	0,666

\* $X_{An} = Ca / (Ca + K + Na)$

### 5.3. Termobarometrijski rezultati

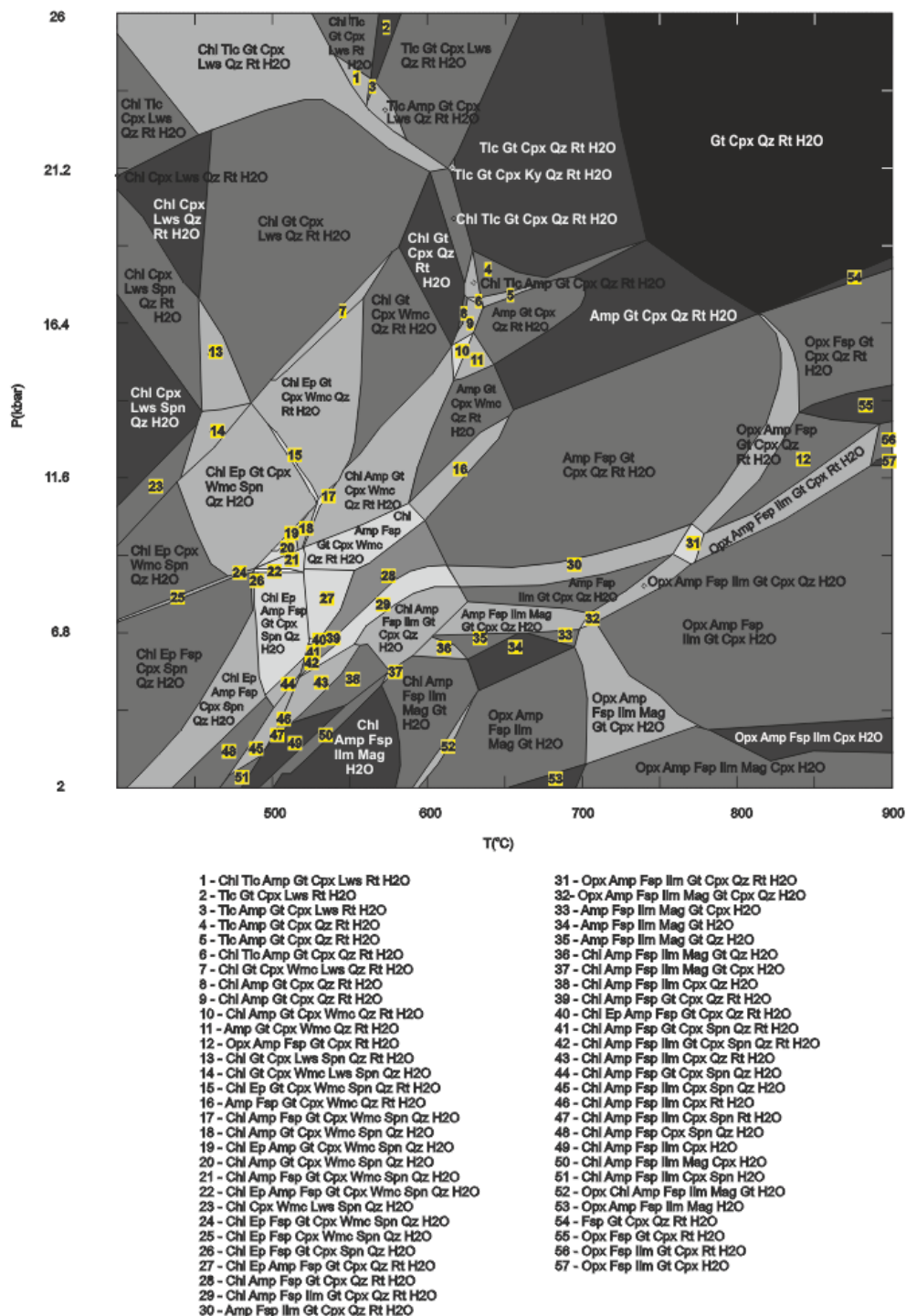
Geotermobarometrijska analiza napravljena je na tri uzorka, D4, D6 i D9 te su konstruirani P-T pseudopresjeci (sl. 19-23) i izoplete u P-T rasponu 2-26 kbar i 400-900°C (sustav komponenti MnNCFMASHTO i MnNCFMASHT). Faze dobivene u pseudopresjecima konstruiranim na temelju koncentracija glavnih elemenata (+ 6 tež.% H<sub>2</sub>O) su: amfibol, epidot, feldspat, forsterit, granat, ilmenit, kijanit, klinopiroksen, klinozoisit, klorit, kloritoid, cordierit, korund, kvarc, lawsonit, ortopiroksen, paragonit, rutil, safirin, titanit, spinel, staurolit, talk i H<sub>2</sub>O. Svako polje u pseudopresjeku ima određeni broj stupnjeva slobode koji je prikazan nijansom sive boje. Polja s najvećim brojem stupnjeva slobode su najtamnije nijanse, a polja s najmanjim brojem stupnjeva slobode su najsvjetlije nijanse. Najniže varijantno polje (ono s najmanjim brojem stupnjeva slobode) sadrži 10 faza za uzorke D4 i D6 te 9 faza za uzorak D9. Najviše varijantno polje sadrži 5 faza za uzorke D4 i D9 te 6 faza za uzorak D6.

#### 5.3.1. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO

- 1) Amfibol je prisutan u temperaturnom rasponu od 410° do 900°C uz porast tlaka do 24,5 kbar do temperature 546°C, nakon čega je zabilježen pad tlaka.
- 2) Na klorit nailazimo na temperaturama nižim od 640°C, u cijelom tlačnom rasponu.
- 3) Feldspat se pojavljuje pri temperaturama 400-900° uz porast tlaka od 2 do 17,5 kbar.
- 4) Klinopiroksen je prisutan u cijelom temperaturnom i tlačnom rasponu, osim na nižim tlakovima (2 do 6,8 kbar) pri temperaturi između 500° i 690°C.
- 5) Ortopiroksen je vezan uz temperature iznad 590°C i proporcionalno rastući tlak do 17,9 kbar.
- 6) Granat je većinski prisutan na višem tlačnom području, izuzev malog temperaturnog raspona 580-650°C gdje se tlačni uvjeti spuštaju do 2 kbar.
- 7) Pojava ilmenita vezana je za temperature iznad 465°C, a proporcionalno raste i tlak do 13 kbar.
- 8) Rutil je većinom prisutan na tlakovima iznad 9 kbar; na malom području 500-600°C se tlačni uvjeti spuštaju do 3,5 kbar.
- 9) Titanit je prisutan u uskom području 400-526°C, pri čemu tlak opada od 20,4 prema 2 kbar uz porast temperature.



D4 amfibolit ACME analiza MnNCFMASHTO

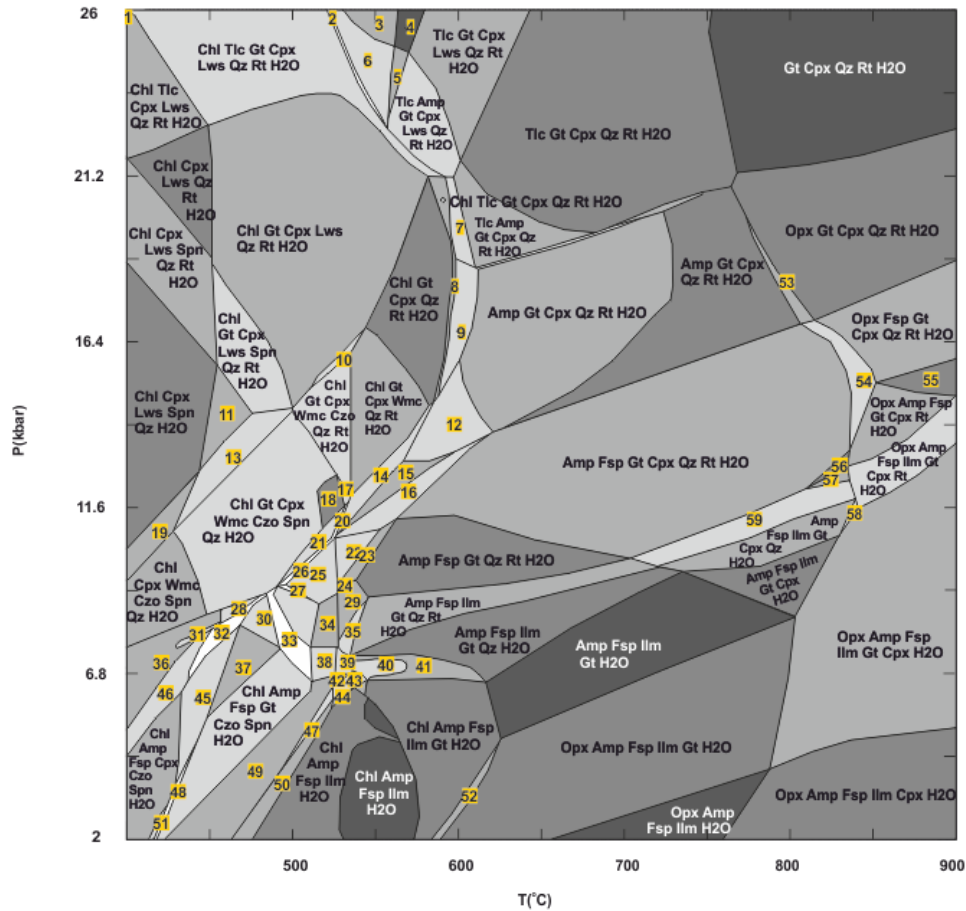


Slika 19. P-T pseudopresjek za uzorak amfibolita D4 u sustavu MnNCFMASHTO.

### 5.3.2. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHT

Razlike u odnosu na analizu sa sustavom komponenti MnNCFMASHTO nisu jako velike. Neka polja su proširena, a neka smanjena u odnosu na prethodnu analizu. Tako je maksimalni tlak na kojem nailazimo na amfibol nešto niži od prethodnog slučaja, ~21,2 kbar pri temperaturi od 760°C. Kod klorita je situacija vrlo slična, izuzev izraženijeg pada temperature uz pad tlaka od 16,4 prema 6,8 kbara nakon čega slijedi nagli porast temperature do 630°C. Klinopiroksen se ovdje ne pojavljuje na nešto širem području koje obuhvaća temperature 400-760°C uz tlakove do 11 kbar. Ortopiroksen je pri najvišim temperaturama prisutan na nešto višem tlaku; tlačni uvjeti iznad 750°C rastu do 22,5 kbar. Kod granata i ilmenita su razlike također vrlo male; granat nije prisutan na najnižim temperaturama, a maksimalni tlak na kojem je prisutan ilmenit je nešto viši pri najvišim temperaturama (15 kbar). Za razliku od prethodne analize u kojoj se rutil pojavljuje i na tlaku od 3,5 kbar, ovdje je minimalni tlak 6,8 kbar. Uvjeti u kojima se pojavljuje titanit su jednaki. Za razliku od prethodne analize za isti uzorak, ovdje nije prisutan magnetit.

D4 amfibolit ACME analiza MnNCFMASHT (all Fe as FeO)



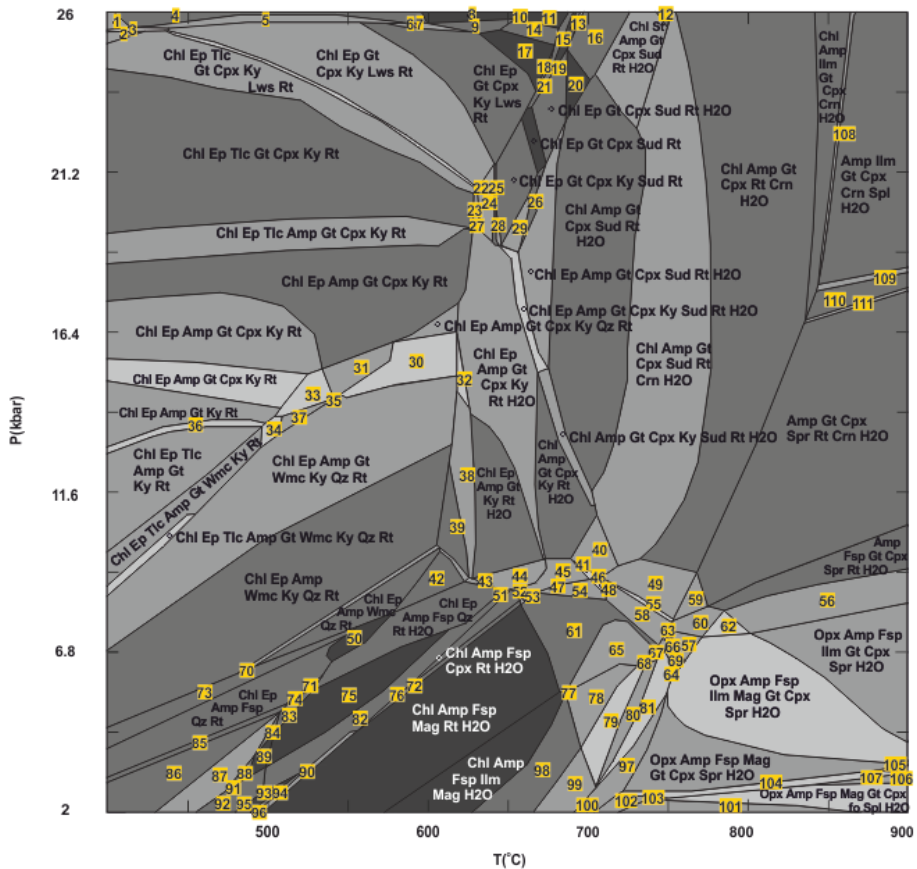
- |                                        |                                        |
|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 - Chl Tic Amp Cpx Lws Qz Rt H2O      | 32 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Czo Spn Qz H2O |
| 2 - Chl Tic Amp Gt Cpx Lws Qz Rt H2O   | 33 - Chl Amp Fsp Gt Czo Spn Qz H2O     |
| 3 - Chl Tic Gt Cpx Lws Rt H2O          | 34 - Chl Amp Fsp Gt Spn Qz H2O         |
| 4 - Tic Gt Cpx Lws Rt H2O              | 35 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Qz Rt H2O      |
| 5 - Tic Amp Gt Cpx Lws Rt H2O          | 36 - Chl Fsp Cpx Czo Spn Qz H2O        |
| 6 - Chl Tic Amp Gt Cpx Lws Rt H2O      | 37 - Chl Amp Fsp Gt Czo Spn H2O        |
| 7 - Chl Tic Amp Gt Cpx Qz Rt H2O       | 38 - Chl Amp Fsp Gt Spn Qz H2O         |
| 8 - Chl Amp Gt Cpx Qz Rt H2O           | 39 - Chl Amp Fsp Gt Qz Rt H2O          |
| 9 - Chl Amp Gt Cpx Qz Rt H2O           | 40 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Qz H2O         |
| 10 - Chl Gt Cpx Wmc Lws Qz Rt H2O      | 41 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Qz H2O         |
| 11 - Chl Gt Cpx Lws Spn Qz H2O         | 42 - Chl Amp Fsp Gt Rt H2O             |
| 12 - Amp Gt Cpx Wmc Qz Rt H2O          | 43 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Rt H2O         |
| 13 - Chl Gt Cpx Wmc Lws Spn Qz H2O     | 44 - Chl Amp Fsp Ilm Rt H2O            |
| 14 - Chl Amp Gt Cpx Wmc Qz Rt H2O      | 45 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Czo Spn H2O    |
| 15 - Amp Gt Cpx Wmc Qz Rt H2O          | 46 - Chl Amp Fsp Cpx Czo Spn Qz H2O    |
| 16 - Amp Fsp Gt Cpx Wmc Qz Rt H2O      | 47 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Spn H2O        |
| 17 - Chl Gt Cpx Wmc Spn Qz Rt H2O      | 48 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Czo Spn H2O    |
| 18 - Chl Gt Cpx Wmc Spn Qz H2O         | 49 - Chl Amp Fsp Gt Spn H2O            |
| 19 - Chl Cpx Wmc Lws Spn Qz H2O        | 50 - Chl Amp Fsp Ilm Spn H2O           |
| 20 - Chl Amp Gt Cpx Wmc Spn Qz Rt H2O  | 51 - Chl Amp Fsp Cpx Czo Spn H2O       |
| 21 - Chl Amp Gt Cpx Wmc Spn Qz H2O     | 52 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Gt H2O        |
| 22 - Amp Fsp Gt Wmc Spn Qz Rt H2O      | 53 - Opx Amp Gt Cpx Qz Rt H2O          |
| 23 - Amp Fsp Gt Wmc Qz Rt H2O          | 54 - Opx Amp Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O      |
| 24 - Chl Amp Fsp Gt Wmc Qz Rt H2O      | 55 - Opx Fsp Gt Cpx Rt H2O             |
| 25 - Chl Amp Fsp Gt Wmc Spn Qz H2O     | 56 - Amp Fsp Gt Cpx Rt H2O             |
| 26 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Wmc Spn Qz H2O | 57 - Amp Fsp Ilm Gt Cpx Rt H2O         |
| 27 - Chl Amp Fsp Gt Wmc Czo Spn Qz H2O | 58 - Opx Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz H2O     |
| 28 - Chl Fsp Gt Cpx Czo Spn Qz H2O     | 59 - Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz Rt H2O      |
| 29 - Chl Amp Fsp Gt Qz Rt H2O          |                                        |
| 30 - Chl Amp Fsp Gt Czo Spn Qz H2O     |                                        |
| 31 - Chl Fsp Cpx Cpx Czo Spn Qz H2O    |                                        |

Slika 20. P-T pseudopresjek za uzorak amfibolita D4 (svo željezo kao FeO) u sustavu MnNCFMASHT.

### 5.3.3. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO

- 1) Pri tlakovima ispod 19,5 kbar amfibol je prisutan do temperature oko 650°C, a nakon toga prisutan je i na višim tlakovima.
- 2) Kod feldspata je slična situacija kao u prethodnom uzorku; prisutan je u cijelom temperaturnom rasponu, ispod 10,5 kbar pri najvišim, a ispod 5 kbar pri najnižim temperaturama.
- 3) Klinopiroksen je vezan pretežno uz visoki tlak, iako je i na nižim tlakovima prisutan, no iznad 700°C. Pojavljuje se i u vrlo uskom području gdje se od ~650°C i 19 kbar temperatura spušta prema 500°C u pri najnižim tlakovima.
- 4) Ortopiroksen se pojavljuje na temperaturama većim od 670°C, uz porast tlaka do 9 kbar.
- 5) Granat je prisutan na većini područja, no nema ga u uvjetima ispod 7 kbar i 700°C.
- 6) Klorit je vezan za temperature ispod 860°.
- 7) Ilmenit se pojavljuje na tlakovima iznad 16,4 kbar uz temperature iznad 850°C. Prisutan je, međutim, i na nižim tlakovima, ispod 8 kbar, a iznad 570°C.
- 8) Rutil nije prisutan na najvišim tlakovima i temperaturama, isto kao ni u vrlo niskim P-T uvjetima.
- 9) Titanit je vezan uz P-T uvjete ispod 4,9 kbar i ispod 500°C.
- 10) Safirin se pojavljuje na temperaturama iznad 700°C, no ne na tlakovima iznad 18,2 kbar.
- 11) Korund se pojavljuje na tlakovima iznad 7 kbar i na temperaturama iznad 700°C.
- 12) Mg spinel je prisutan pri temperaturama iznad 470°C, uz tlak koji do 750°C raste do 9,5 kbar, a nakon toga opada s porastom temperature.

D6 amfibolit ACME analiza MnNCFMASHTO



- |                                      |                                           |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 - Chl Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt        | 29 - Chl Ep Amp Gt Cpx Ky Sud Rt          |
| 2 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt     | 30 - Chl Ep Amp Gt Cpx Wmc Ky Qz Rt       |
| 3 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt     | 31 - Chl Ep Amp Gt Cpx Wmc Ky Rt          |
| 4 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt            | 32 - Chl Ep Amp Gt Cpx Ky Qz Rt H2O       |
| 5 - Chl Ep Gt Cpx Ky Cld Lws Rt      | 33 - Chl Ep Amp Gt Cpx Wmc Ky Rt          |
| 6 - Chl Ep Gt Cpx Ky Cld Lws Rt      | 34 - Chl Ep Tlc Amp Gt Wmc Ky Rt          |
| 7 - Chl Gt Cpx Ky Cld Lws Rt         | 35 - Chl Ep Amp Gt Wmc Ky Qz Rt           |
| 8 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt            | 36 - Chl Ep Tlc Amp Gt Ky Rt              |
| 9 - Chl Ep Gt Cpx Ky Cld Lws Rt      | 37 - Chl Ep Amp Gt Wmc Ky Rt              |
| 10 - Chl St Gt Cpx Ky Cld Lws Rt     | 38 - Chl Ep Amp Gt Ky Qz Rt H2O           |
| 11 - Chl St Gt Cpx Lws Rt            | 39 - Chl Ep Amp Ky Qz Rt H2O              |
| 12 - Chl St Amp Gt Cpx Rt H2O        | 40 - Chl Amp Gt Cpx Ky Rt Crn H2O         |
| 13 - Chl St Gt Cpx Lws Sud Rt H2O    | 41 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Ky Rt Crn H2O     |
| 14 - Chl St Gt Cpx Ky Lws Rt         | 42 - Chl Ep Amp Wmc Qz Rt H2O             |
| 15 - Chl St Gt Cpx Lws Sud Rt        | 43 - Chl Ep Amp Fsp Ky Qz Rt H2O          |
| 16 - Chl St Gt Cpx Sud Rt H2O        | 44 - Chl Ep Amp Fsp Gt Ky Qz Rt H2O       |
| 17 - Chl Gt Cpx Ky Lws Rt            | 45 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Ky Rt H2O         |
| 18 - Chl Gt Cpx Ky Lws Sud Rt        | 46 - Chl Amp Fsp Mag Gt Cpx Ky Rt Crn H2O |
| 19 - Chl Ep Gt Cpx Lws Sud Rt H2O    | 47 - Chl Amp Fsp Mag Gt Cpx Ky Rt H2O     |
| 20 - Chl Gt Cpx Sud Rt H2O           | 48 - Chl Amp Fsp Mag Gt Ky Rt Crn H2O     |
| 21 - Chl Ep Gt Cpx Lws Sud Rt        | 49 - Chl Amp Mag Gt Cpx Rt Crn H2O        |
| 22 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Ky Lws Rt     | 50 - Chl Ep Amp Fsp Qz Rt                 |
| 23 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Ky Rt H2O     | 51 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Qz Rt H2O         |
| 24 - Chl Ep Gt Cpx Ky Rt H2O         | 52 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Rt H2O            |
| 25 - Chl Ep Gt Cpx Ky Sud Rt H2O     | 53 - Chl Amp Fsp Mag Gt Cpx Rt H2O        |
| 26 - Chl Ep Amp Gt Cpx Sud Rt        | 54 - Chl Amp Fsp Mag Gt Ky Rt H2O         |
| 27 - Chl Ep Tlc Amp Gt Cpx Ky Rt H2O | 55 - Chl Amp Fsp Mag Gt Cpx Rt Crn H2O    |
| 28 - Chl Ep Gt Cpx Ky Rt H2O         | 56 - Opx Amp Fsp Gt Cpx Spr Rt H2O        |
|                                      | 57 - Amp Fsp Ilm Mag Gt Cpx Spr H2O       |
|                                      | 58 - Chl Amp Fsp Mag Gt Rt Crn H2O        |
|                                      | 59 - Amp Mag Gt Cpx Spr Rt Crn H2O        |
|                                      | 60 - Amp Fsp Mag Gt Cpx Spr Rt H2O        |

Slika 21. P-T pseudopresjek za uzorak amfibolita D6 u sustavu MnNCFMASHTO.

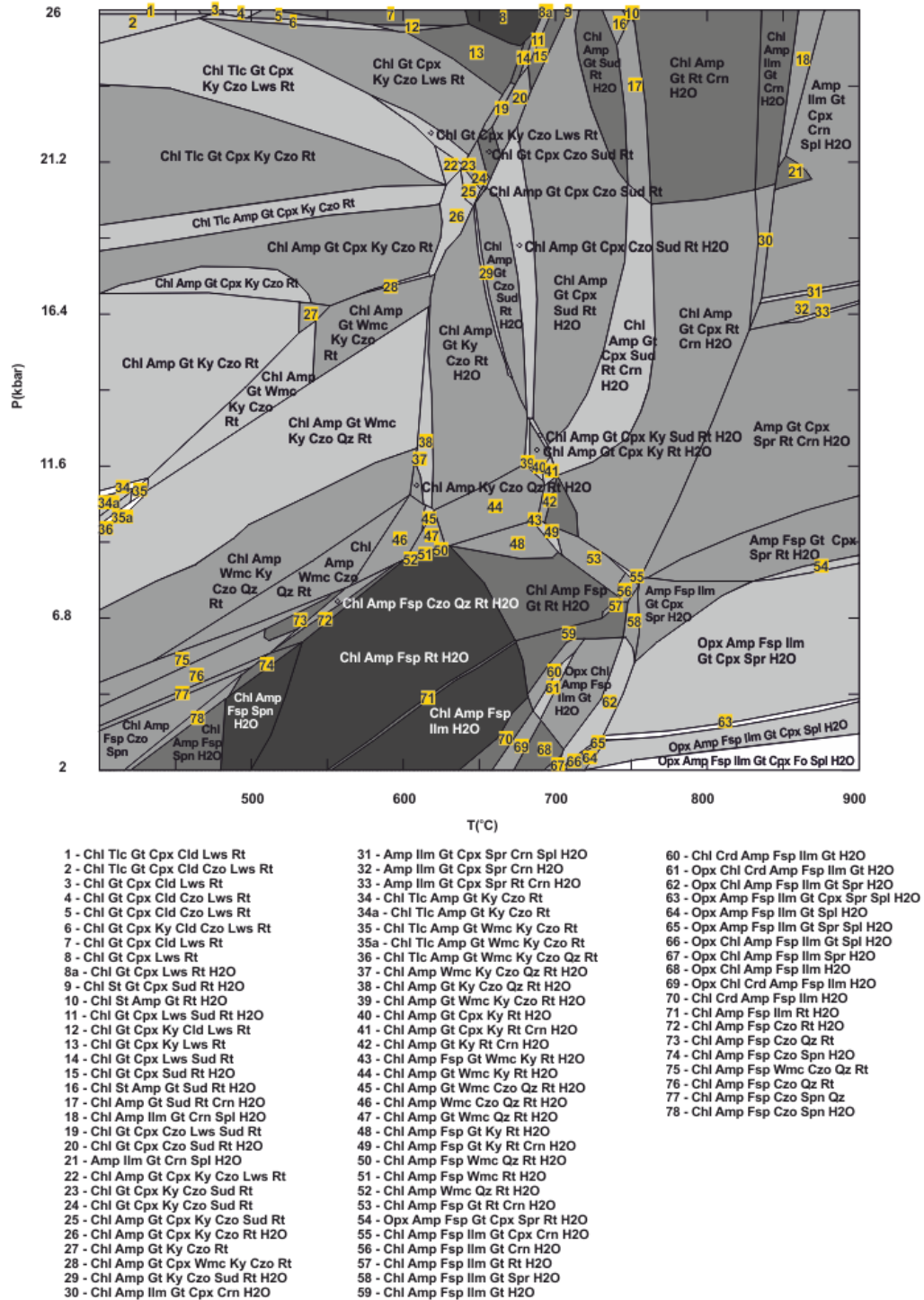
- 61 - Chl Amp Fsp Mag Gt Rt H2O
- 62 - Opx Amp Fsp Mag Gt Cpx Spr Rt H2O
- 63 - Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt Spr Rt H2O  
- Chl Amp Fsp Mag Gt Spr Rt H2O
- 64 - Opx Amp Fsp Ilm Mag Gt Spr H2O
- 65 - Chl Crd Amp Fsp Mag Gt Rt H2O
- 66 - Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt Spr H2O
- 67 - Opx Chl Amp Fsp Mag Gt Spr Rt H2O
- 68 - Opx Chl Crd Amp Fsp Mag Gt Rt H2O  
- Opx Chl Amp Fsp Mag Gt Rt H2O
- 69 - Amp Fsp Ilm Mag Gt Spr H2O
- 70 - Chl Ep Amp Fsp Wmc Ky Qz Rt
- 71 - Chl Ep Amp Fsp Qz Rt H2O
- 72 - Chl Amp Fsp Mag Cpx Rt H2O
- 73 - Chl Ep Amp Fsp Wmc Qz Rt
- 74 - Chl Ep Amp Fsp Rt
- 75 - Chl Ep Amp Fsp Rt H2O
- 76 - Chl Ep Amp Fsp Mag Cpx Rt H2O
- 77 - Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt Rt H2O  
- Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O
- 78 - Chl Crd Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O
- 79 - Opx Chl Crd Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O
- 80 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O
- 81 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt Spr H2O
- 82 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Rt H2O
- 83 - Chl Ep Amp Fsp Rt H2O
- 84 - Chl Ep Amp Fsp Spn H2O  
- Chl Ep Amp Fsp Spn Rt H2O
- 85 - Chl Ep Amp Fsp Rt+
- 86 - Chl Ep Amp Fsp Spn
- 87 - Chl Ep Amp Fsp Spn H2O
- 88 - Chl Ep Amp Fsp Spn H2O
- 89 - Chl Ep Amp Fsp Spn H2O
- 90 - Chl Amp Fsp Mag Cpx Rt Hem H2O  
- Chl Amp Fsp Mag Rt Hem H2O
- 91 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Spn H2O
- 92 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Spn H2O
- 93 - Chl Amp Fsp Cpx Spn Rt H2O
- 94 - Chl Amp Fsp Cpx Rt Hem H2O
- 95 - Chl Amp Fsp Cpx Spn H2O
- 96 - Chl Amp Fsp Cpx Spn Rt Hem H2O  
- Chl Amp Fsp Cpx Spn Hem H2O
- 97 - Opx Chl Amp Fsp Mag Gt Spr H2O
- 98 - Chl Crd Amp Fsp Ilm Mag H2O
- 99 - Opx Chl Crd Amp Fsp Ilm Mag H2O
- 100 - Opx Chl Amp Fsp Mag Spr H2O  
- Opx Chl Amp Fsp Ilm Mag Spr H2O
- 101 - Opx Amp Fsp Mag Gt fo Spl H2O
- 102 - Opx Amp Fsp Mag Gt Spr Spl H2O
- 103 - Opx Amp Fsp Mag Gt Spl H2O
- 104 - Opx Amp Fsp Mag Gt Cpx Spr Spl H2O
- 105 - Opx Amp Fsp Ilm Mag Gt Cpx Spr Spl H2O
- 106 - Opx Amp Fsp Ilm Mag Gt Cpx Spl H2O
- 107 - Opx Amp Fsp Mag Gt Cpx Spl H2O
- 108 - Chl Amp Ilm Gt Cpx Crn Spl H2O
- 109 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Crn Spl H2O
- 110 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Crn H2O
- 111 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Rt Crn H2O

#### **5.3.4. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHT**

Kao i kod uzorka D4, i ovdje su razlike MnNCFMASHT analize u odnosu na MnNCFMASHTO analizu male. Uvjeti u kojima se pojavljuje amfibol su nepromijenjeni. Razlike su minimalne i kod uvjeta pri kojima su prisutni klorit i korund. Klinopiroksen se, međutim, ne pojavljuje u uskom području gdje se u prethodnoj analizi od 650°C i 19 kbar temperatura spušta prema 500°C pri najnižim tlakovima. Ostali P-T uvjeti za pojavu klinopiroksena su gotovo identični. Kod feldspata, granata i ilmenita također nema bitnih razlika, dok je kod ortopiroksena maksimalni tlak nešto manji, otprilike 7,3 kbar. Rutil se pojavljuje u gotovo identičim uvjetima. Kod safirina je maksimalni tlak malo manji, otprilike 17 kbar, a kod titanita viši, oko 6 kbar. Najveća razlika između ove dvije analize kod D6 uzorka je što u MnNCFMASHT analizi nema pojave magnetita.



D6 amfibolit ACME analiza MnNCFMASHT (all Fe as FeO)



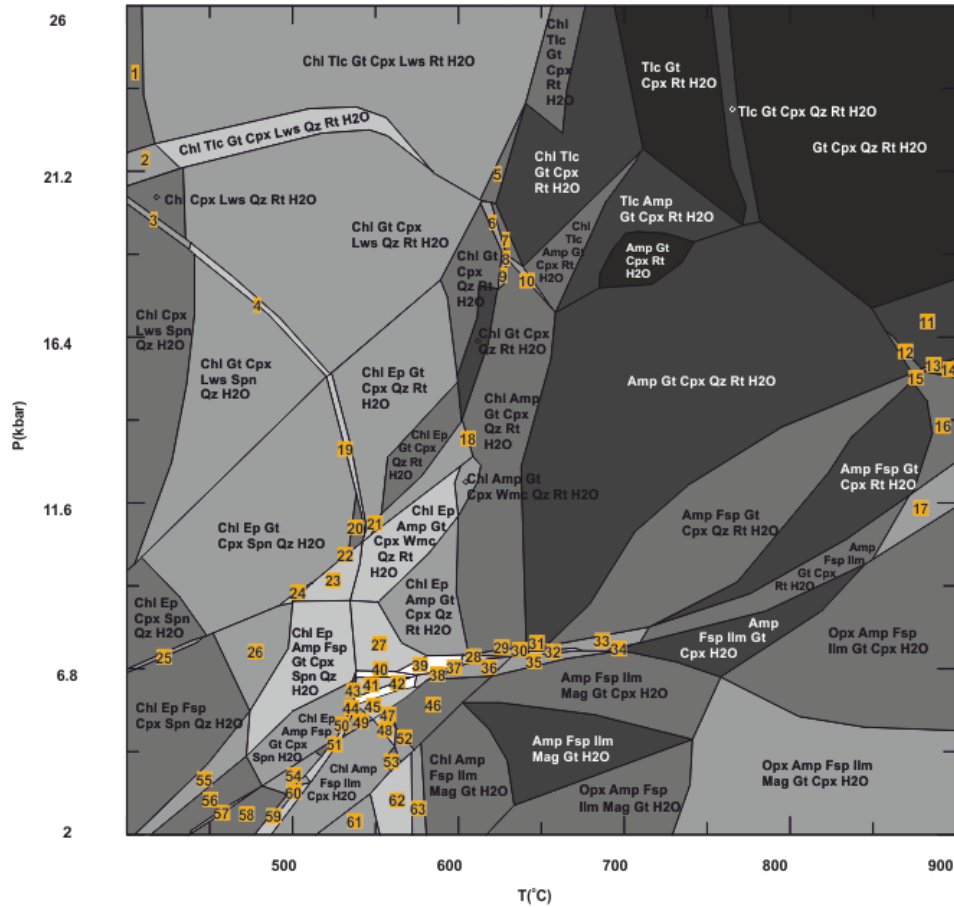
Slika 22. P-T pseudopresjek za uzorak amfibolita D6 (svo željezo kao FeO) u sustavu MnNCFMASHT.



### 5.3.5. Opis polja stabilnosti minerala za uzorak D9 u sustavu MnNCFMASHTO

- 1) Amfibol je prisutan u temperaturnom rasponu od 410° do 900°C. Porast tlaka do 21,5 kbar je vidljiv do temperature od 710°C, a nakon toga tlačni uvjeti padaju do 14 kbar.
- 2) Feldspat se pojavljuje u sličnim P-T uvjetima kao i u prethodna dva uzorka – prisutan je u cijelom temperaturnom rasponu, do 6,8 kbar pri najnižim, a do 15 kbar pri najvišim temperaturama.
- 3) Granat je prisutan na većini područja izuzev najnižih temperatura pri visokim tlakovima te na temperaturi nižoj od 550°C uz tlak niži od 10 kbar.
- 4) Klinopiroksen se ne pojavljuje u malom P-T području gdje su temperature između 500° i 700°C, a tlak ispod 4,4 kbar.
- 5) Ortopiroksen je prisutan na temperaturama višim od 620°C, uz rastući tlak do 18,2 kbar.
- 6) Ilmenit se pojavljuje na temperaturama iznad 450°C, uz porast tlaka do 13 kbar.
- 7) Rutil je većinom prisutan na tlakovima iznad 11,6 kbar, no u području pada temperature prema 600°C i tlak pada do 6,8 kbar. Na temperaturama ispod 600°C prisutan je na znatno višim tlakovima.
- 8) Titanit se pojavljuje na uskom području s temperaturama do 530°C i tlakom do 20 kbar.
- 9) Klorit je prisutan u cijelom tlačnom području, a na temperaturama do 720°C.

D9 Donji Supcic II ACME analiza MnNCFMASHTO



- |                                       |                                        |
|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 - Chl Tic Cpx Lws Rt H2O            | 33 - Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz Rt H2O      |
| 2 - Chl Tic Cpx Lws Qz Rt H2O         | 34 - Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz H2O         |
| 3 - Chl Cpx Lws Spn Qz Rt H2O         | 35 - Amp Fsp Ilm Mag Gt Cpx Qz H2O     |
| 4 - Chl Gt Cpx Lws Spn Qz Rt H2O      | 36 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz H2O     |
| 5 - Chl Tic Gt Cpx Lws Rt H2O         | 37 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz Rt H2O  |
| 6 - Chl Tic Gt Cpx Qz Rt H2O          | 38 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx Rt H2O     |
| 7 - Chl Tic Gt Cpx Qz Rt H2O          | 39 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Gt Cpx Qz H2O  |
| 8 - Chl Tic Amp Gt Cpx Qz Rt H2O      | 40 - Chl Ep Amp Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O   |
| 9 - Chl Amp Gt Cpx Qz Rt H2O          | 41 - Chl Ep Amp Fsp Gt Cpx Rt H2O      |
| 10 - Chl Tic Amp Gt Cpx Qz Rt H2O     | 42 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Gt Cpx Rt H2O  |
| 11 - Opx Gt Cpx Qz Rt H2O             | 43 - Chl Ep Amp Fsp Gt Cpx Spn Rt H2O  |
| 12 - Opx Amp Gt Cpx Qz Rt H2O         | 44 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Gt Cpx Spn H2O |
| 13 - Opx Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O         | 45 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Gt Cpx H2O     |
| 14 - Opx Fsp Gt Cpx Rt H2O            | 46 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx H2O        |
| 15 - Opx Amp Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O     | 47 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx H2O        |
| 16 - Opx Amp Fsp Gt Cpx Rt H2O        | 48 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx H2O        |
| 17 - Opx Amp Fsp Ilm Gt Cpx Rt H2O    | 49 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Cpx H2O        |
| 18 - Chl Ep Amp Gt Cpx Qz Rt H2O      | 50 - Chl Ep Amp Fsp Ilm Cpx Spn H2O    |
| 19 - Chl Ep Gt Cpx Spn Qz Rt H2O      | 51 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx Spn H2O    |
| 20 - Chl Ep Gt Cpx Spn Qz Rt H2O      | 52 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx H2O        |
| 21 - Chl Ep Amp Gt Cpx Qz Rt H2O      | 53 - Chl Amp Fsp Ilm Cpx H2O           |
| 22 - Chl Ep Amp Gt Cpx Spn Qz H2O     | 54 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Spn H2O        |
| 23 - Chl Ep Amp Gt Cpx Wmc Spn Qz H2O | 55 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Spn Qz H2O     |
| 24 - Chl Ep Gt Cpx Wmc Spn Qz H2O     | 56 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Spn H2O        |
| 25 - Chl Ep Fsp Cpx Spn Qz H2O        | 57 - Chl Ep Amp Fsp Cpx Spn H2O        |
| 26 - Chl Ep Fsp Gt Cpx Spn Qz H2O     | 58 - Chl Amp Fsp Cpx Spn H2O           |
| 27 - Chl Ep Amp Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O  | 59 - Chl Amp Fsp Cpx Spn H2O           |
| 28 - Chl Amp Fsp Gt Cpx Qz Rt H2O     | 60 - Chl Amp Fsp Ilm Cpx Spn H2O       |
| 29 - Chl Amp Ilm Gt Cpx Qz Rt H2O     | 61 - Chl Amp Fsp Ilm Mag H2O           |
| 30 - Amp Ilm Mag Gt Cpx Qz Rt H2O     | 62 - Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O        |
| 31 - Amp Ilm Gt Cpx Qz Rt H2O         | 63 - Chl Amp Fsp Ilm Mag Gt H2O        |
| 32 - Amp Fsp Ilm Mag Gt Cpx Qz Rt H2O |                                        |

Slika 23. P-T pseudopresjek za uzorak granulita D9 u sustavu MnNCFMASHTO.

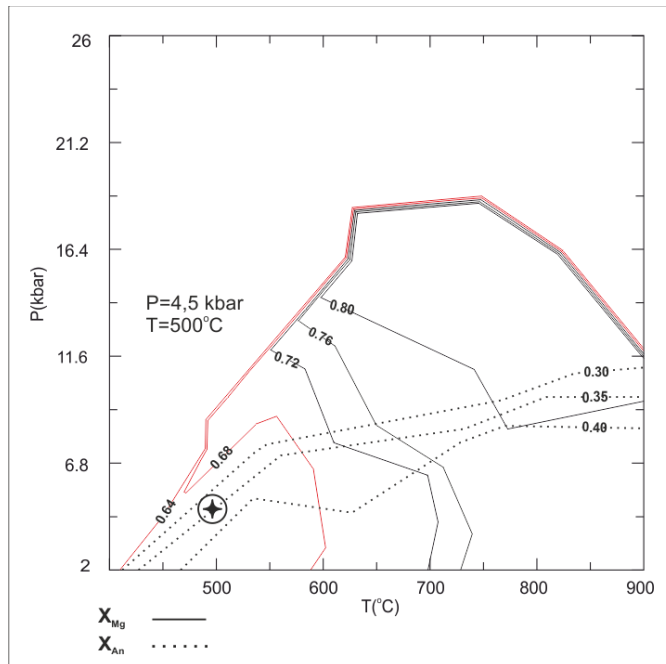
### 5.3.6. Dijagrami izopleta

U Perple\_X-u konstruirani su i dijagrami izopleta s udjelom magnezijske komponente u amfibolu ( $X_{Mg}$ ) i anortitne komponente u plagioklasu ( $X_{An}$ ) za uzorke D4 i D6 (sl. 24-25). Raspon vrijednosti izopleta prikazan je u Tablici 7.

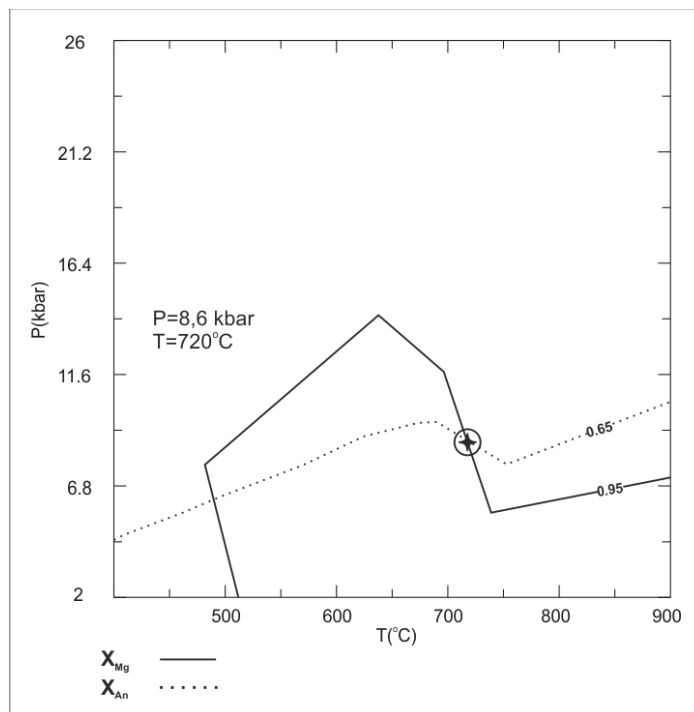
Tablica 7. Raspon vrijednosti izopleta dobivenih Perple\_X-om.

	D4		D6	
	$X_{Mg}$	$X_{An}$	$X_{Mg}$	$X_{An}$
<b>min</b>	0,64	0,05	0	0,05
<b>max</b>	0,92	0,45	0,90	0,90

U uzorku D4 udio Mg u amfibolu raste s porastom temperature i tlaka, dok udio anortitne komponente u plagioklasu raste s opadanjem tlaka i porastom temperature. U uzorku D6 udio Mg u amfibolu raste s opadanjem tlaka i porastom temperature, dok je situacija s anortitnom komponentom u plagioklasu ista kao i u prethodnom uzorku – njen udio raste s opadanjem tlaka i porastom temperature. Od dobivenih izopleta za oba uzorka, na dijagramima su istaknute izoplete sastava dobivenih mineralnom geokemijom, a sjecište  $X_{Mg}$  i  $X_{An}$  izopleta (ili područje koje zatvaraju) predstavlja moguće P-T uvjete nastanka stijena. Za uzorak D4 (sl. 24) temperatura se kreće iznad 650°C, a tlak ispod 11 kbar, dok su kod D6 uzorka (sl. 25) uvjeti ~720°C i ~8,6 kbar.



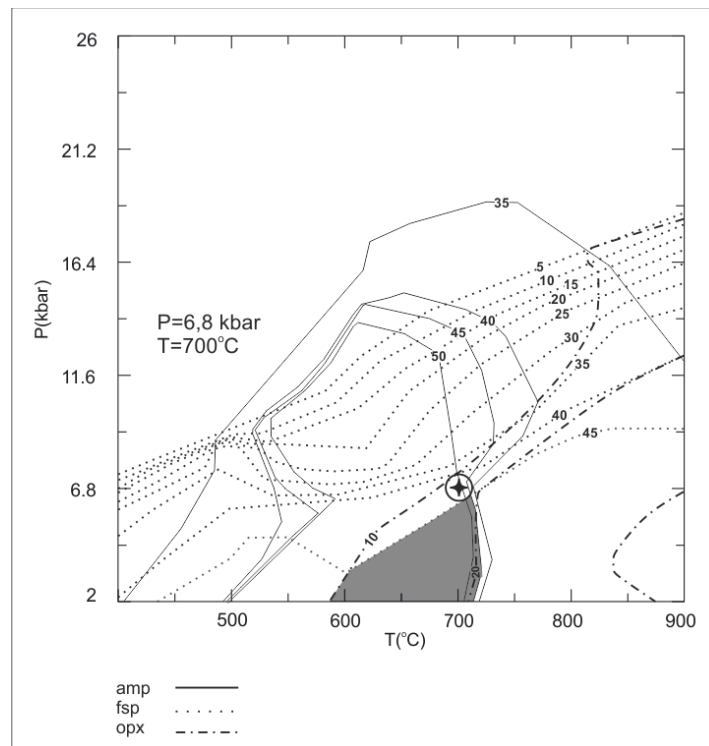
Slika 24. Prikaz polja stabilnosti izopleta s udjelom Mg u amfibolu i anortitne komponente u plagioklasu za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO.



Slika 25. Prikaz polja stabilnosti izopleta s udjelom Mg u amfibolu i anortitne komponente u plagioklasu za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO.

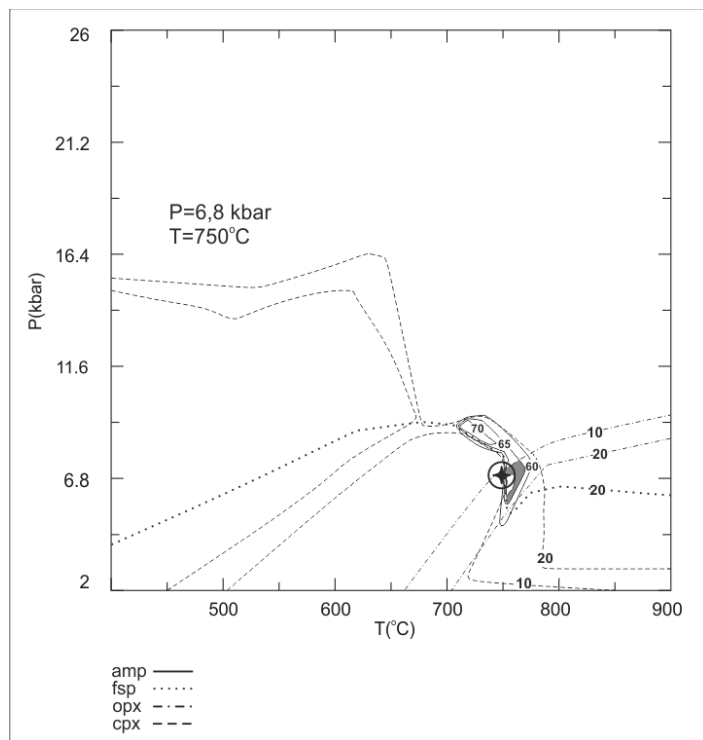
Radi bolje preglednosti, konstruirane su izoplete kojima se omeđilo područje pojave pojedinih minerala (sl. 26-28); zapravo je riječ o izomodama (*isomodes*), linijama s istim vol% minerala. Preklapanjem područja koja sadrže amfibol, plagioklas i piroksene u uzorcima D4 i D6, te područja koja sadrže korund, safirin i Mg spinel u uzorku D6 također su istaknuta polja čiji P-T uvjeti potencijalno odgovaraju nastanku stijene. Dobivene su temperature 700-790°C te tlakovi 6,8-8 kbar.

Za uzorak D4 (sl. 26) omeđeno je područje 585-715°C te 2-6,5 kbar. Točka je u dijagramu stavljena na mjesto približnog presjecišta izomoda s udjelom minerala u uzorku koji je procijenjen prilikom mikroskopiranja preparata. U ovom slučaju P-T vrijednosti su 700°C i 6,8 kbar.



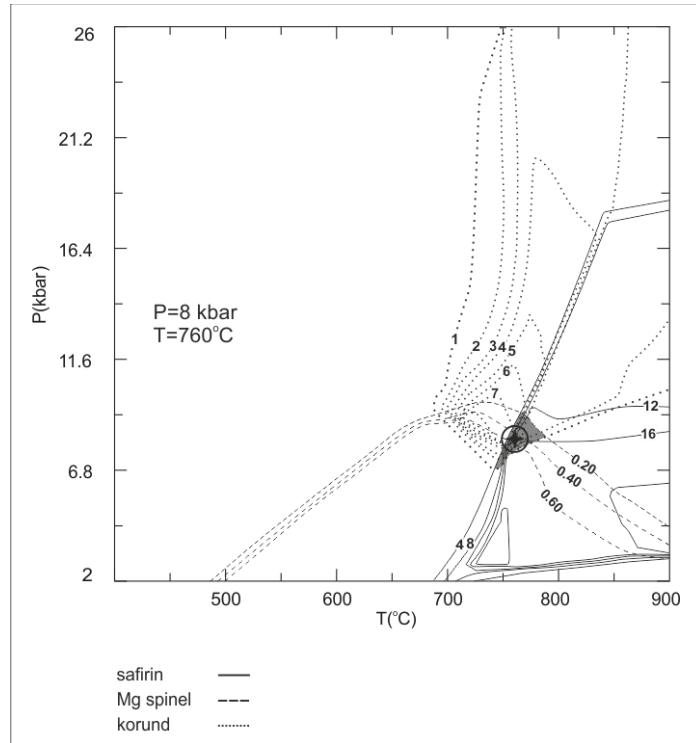
Slika 26. Prikaz polja stabilnosti izopleta koje omeđuju područja pojave amfibola (amp), plagioklasa (fsp) i ortopiroksena (opx) za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO.

Za uzorak D6 (sl. 27), omeđeno je područje 750-770°C te ~5,6-7,5 kbar. Točka je, kao i u prethodnom uzorku, na temelju približnog presjecišta odabranih izomoda, smještena na P-T vrijednosti 750°C i 6,8 kbar.



Slika 27. Prikaz polja stabilnosti izopleta koje omeđuju područja pojave amfibola (amp), plagioklasa (fsp), ortopiroksena (opx) i klinopiroksena (cpx) za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO.

Za isti uzorak, D6, omeđeno je i područje koje zatvaraju izomode safirina, Mg spinela i korunda (sl. 28). Područje obuhvaća temperature u rasponu 740-790°C i tlakove 6,8-9,2 kbar. Točka je smještena na otprilike 760°C i 8 kbar.



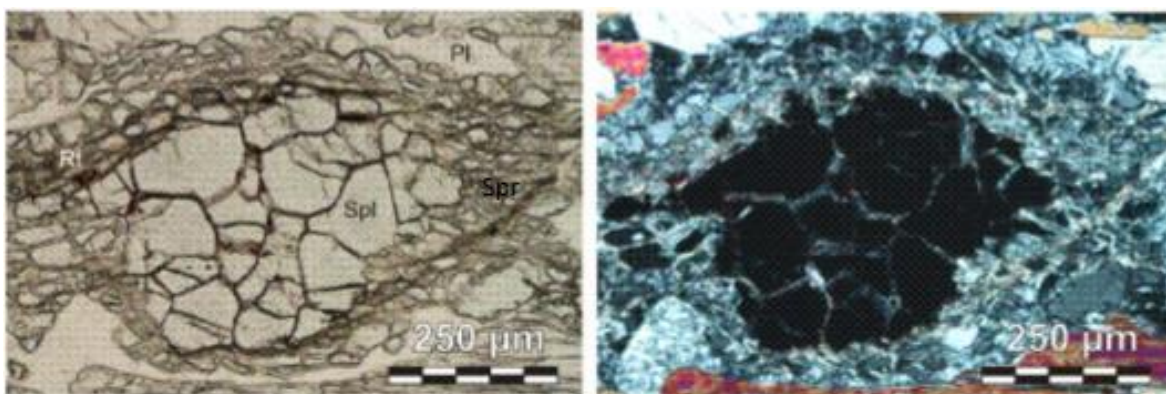
Slika 28. Prikaz polja stabilnosti izopleta koje omeđuju područja pojave safirina, Mg spinela i korunda za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO.

## 6. RASPRAVA

S obzirom na mineraloške karakteristike, klasifikacijske dijagrame te napravljene pseudopresjeke u P-T rasponu 400-900°C i 2-26 kbar, uzorci D4 i D6 mogu se odrediti kao amfiboliti bazaltnog protolita, a uzorak D9 kao granulit.

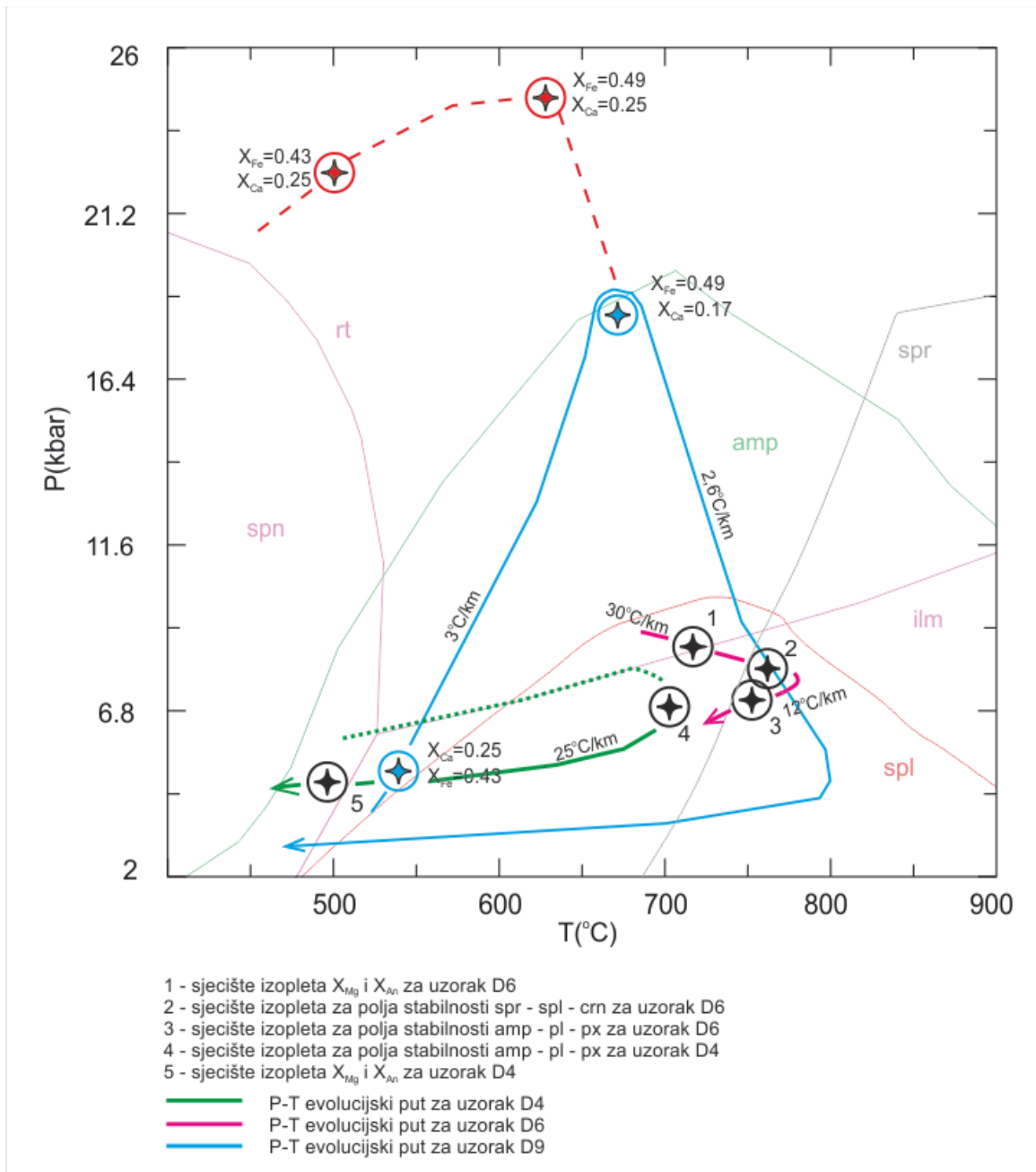
Modeliranje fazne ravnoteže pokazalo je da nema drastičnih razlika između analiza u MnNCFMASHTO i MnNCFMASHT sustavima. One se svode na vrlo male promjene polja stabilnosti pojedinih minerala, odnosno na nestanak minerala koji trebaju Fe<sup>3+</sup> pri MnNCFMASHT analizi (npr. magnetit).

P-T evolucijski put konstruiran je za sva tri uzorka (sl. 30), no za uzorak D9 on je preuzet iz Balen & Massone (2016). Prilikom mikroskopiranja uočeno je da su u uzorku D4 mineralna zrna titanita uklopljena u zrna amfibola, što je važno za konstrukciju P-T puta koji se, s obzirom na to, kreće iz polja stabilnosti titanita prema polju stabilnosti amfibola. Isto tako, u uzorku D6 safirin se uočava oko zrna spinela (sl. 29), što ukazuje na to da je mlađi te se P-T put konstruira iz polja stabilnosti spinela prema polju stabilnosti safirina. P-T evolucijski put za uzorak D9 rekonstruiran je na temelju granata iz uzorka. Točnije, točke oko kojih je P-T put iscrtan odgovaraju sjecištima izopleta s udjelom Mg, Fe i Ca u jezgri, odnosno na rubu mineralnih zrna granata.



Slika 29. Mikrofotografija uzorka D6. Zrno spinela oko kojeg je vidljiv safirin.  
Rt – rutil, Spl – spinel, Spr – safirin, Pl – plagioklas. Lijevo N-, desno N+.





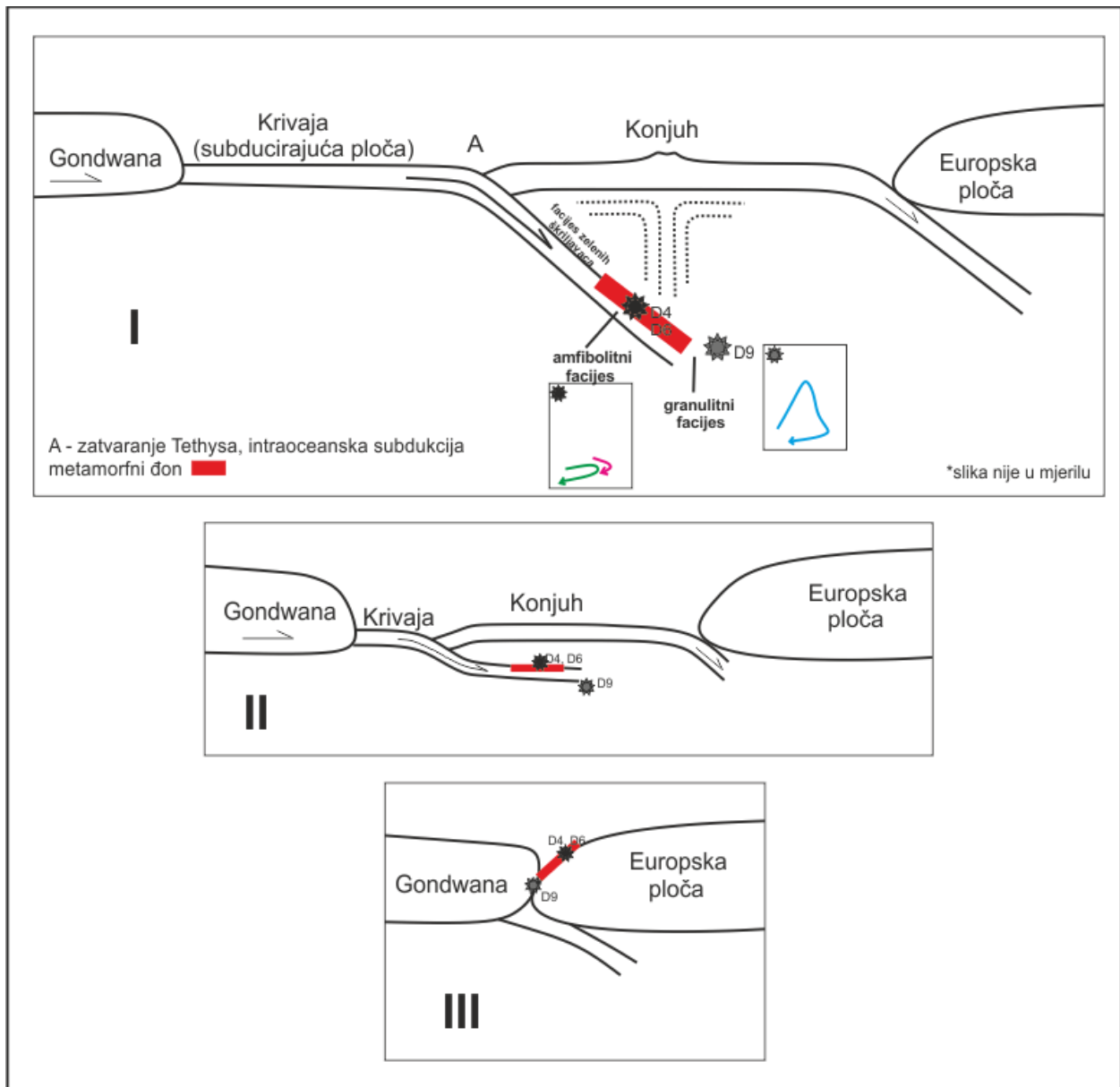
Slika 30. Dijagram P-T evolucijskih puteva za uzorke amfibolita D4, D6 i uzorak granulita D9.

Kao što se vidi iz priloženog dijagrama (sl. 30), konstruirani P-T evolucijski putevi za sva tri uzorka odgovaraju *clockwise* modelu, pri čemu se maksimalne temperature i tlakovi za uzorke D4 i D6 kreću između 700 i 800 °C te 6,8 i 9,2 kbar. P-T evolucijski put za uzorak D4 prati porast tlaka i temperature od prijelaznog područja facijesa zelenih škriljavaca, kroz amfibolitni facijes

pa do prijelaza u granulitni gdje tad, uz gradijent  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , padaju temperatura i tlak. Kod uzorka D6 riječ je o prijelazu iz amfibolitnog u granulitni facijes pri porastu temperature  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  te povratak u amfibolitni facijes uz pad tlaka pri gradijentu  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Za uzorak D9, gdje je također riječ o *clockwise* modelu, put je konstruiran u nešto višim temperaturnim uvjetima te pri znatno višim tlakovima. Tlak u maksimumu doseže uvjete eklogitnog facijesa, no zatim se vraća u uvjete granulitnog i amfibolitnog facijesa, prvo uz pad tlaka i porast temperature, a potom i uz pad temperature. Taj P-T put ukazuje na veću dubinu nastanka stijene u odnosu na D4 i D6 koji su se formirali pliće. Drastični porast tlaka kod uzorka D9 ukazuje na drugačiji smještaj protolita ovog uzorka od protolita preostala dva uzorka. Kako klasifikacijski dijagrami Pearce & Cann (1973), Meschede (1986) i Shervais (1982) uzorke D4 i D6 smještaju u polja MORB, odnosno N-MORB, a i normalizacijski dijagram (sl. 18) pokazuje kako su odstupanja od vrijednosti MORB-a mala, najvjerojatniji tektonski okoliš nastanka ovih bazaltnih protolita je područje intraoceanske subdukcije, odnosno zatvaranje Tethysa do kojeg je došlo prije kolizije s Europskom pločom. S druge strane, kod uzorka D9 kao protolit možemo pretpostaviti peridotit koji se nalazio na većim dubinama od već spomenutih bazaltnih protolita te je pri visokim tlakovima na  $\sim 40\text{ km}$  dubine prešao u granulit.

Na sl. 31 prikazan je model intraoceanske subdukcije koji bi odgovarao istraživanom području. Prema predloženom modelu, krivajski dio ultramafitnog masiva potječe od subducirajuće oceanske ploče koja je sa sobom donijela bazaltne protolite za amfibolite metamorfnog đona, formiranog na dubini nešto većoj od  $10\text{ km}$ . Uzorak D9, kao što je već spomenuto, formirao se u području granulitnog facijesa, na većim dubinama od amfibolita metamorfnog đona, a protolit su mu peridotiti plašta. Daljnjim napredovanjem subdukcije dolazi do smanjenja kuta poniranja ploče te se subducirajuća ploča počinje ravnati, a volumen plaštnog klina smanjivati. Prilikom kolizije s Europskom pločom, metamorfni đon navučen je na europski dio, a prije toga moguće čak i odvojen od tonuće ploče koja je nakon kolizije djelomično subducirana. Model intraoceanske subdukcije tog tipa predlažu van Hinsbergen et al. (2015). U fazi navlačenja i nastajanja ofiolitnog kompleksa, stijene metamorfnog đona, a time i amfiboliti kojima pripadaju uzorci D4 i D6, navučene su iznad stijena granulitnog facijesa kojima pripada uzorak D9. Stijene metamorfnog đona smještene su između krivajskog i

konjuškog dijela masiva s obzirom na to da je konjuški dio navučen na Europsku ploču prije navlačenja metamorfnog đona.



Slika 31. Predloženi model intraoceanske subdukcije odgovorne za nastanak istraživanih stijena do koje je došlo prilikom zatvaranja Tethysa.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu rekonstruiran je i interpretiran P-T evolucijski put stijena metamornog đona iz Dinaridske ofiolitne zone. Uzorci su prikupljeni na području Duboštrice i Gornje Vijake u Bosni, a u ovom radu obuhvaćena su tri uzorka: D4, D6 i D9. Nakon optičkih metoda provedenih na uzorcima, cjelostijenske geokemijske analize, mineralne geokemije uzoraka te konstrukcije P-T pseudopresjeka, doneseni su sljedeći zaključci:

- Na temelju mineraloških i petroloških karakteristika, uzorci D4 i D6 determinirani su kao amfiboliti, a uzorak D9 kao granulit.
- Pomoću klasifikacijskih dijagrama zaključeno je da uzorci amfibolita (D4 i D6) imaju bazaltne protolite. Pretpostavljeni protolit uzorka D9 je plaštni peridotit.
- Analize u programu PERPLE\_X napravljene su za sustave komponenti MnNCFMASHTO i MnNCFMASHT. Na konstruiranim P-T pseudopresjecima nisu vidljive drastične razlike između ta dva sustava niti za jedan od modeliranih uzoraka. One se očituju u vrlo malim promjenama polja stabilnosti minerala te u nestanku mineralnih faza koje za formaciju trebaju  $Fe^{3+}$ .
- Konstruirani P-T evolucijski putevi za sva tri uzorka odgovaraju *clockwise* modelu. Kod konstrukcije puta za uzorak amfibolita D4, a koji prolazi kroz točke određene presjecištima odabranih izopleta, u obzir je uzet mikrostrukturni položaj uklopaka titanita u amfibolu koji ukazuju na to da su stariji od amfibola koji ih uklapaju. Uzimajući u obzir ovo opažanje, P-T put za amfibolit D4 kreće se iz polja stabilnosti titanita prema polju stabilnosti amfibola, dalje prateći odabrane točke. Za uzorak amfibolita D6, uz točke također određene presjecištima odabranih izopleta, u obzir je uzet mikrostrukturni položaj safirina opaženog oko mineralnih zrna spinela. To ukazuje na kretanje P-T puta iz polja stabilnosti spinela prema polju stabilnosti safirina. P-T evolucijski put za uzorak granulita D9 preuzet je iz Balen & Massone (2016).
- Sva tri prikazana *clockwise* modela pokazuju prvotni porast temperature, a potom pad temperature uz istovremeni pad tlaka. Kod uzorka granulita D9 modelirani maksimalni tlačni uvjeti su puno viši od preostala dva uzorka te dosežu tlakove eklogitnog facijesa.

- Formacija stijena metamorfnog đona promatrana je u okviru kolizijskih i subdukcijskih procesa na rubu mezozojskog Tethysa. Na temelju modeliranih P-T puteva, krivajski dio ultramafitnog masiva može se pripisati subducirajućoj ploči pri intraoceanskoj subdukciji koja se javila uslijed zatvaranja Tethysa. Bazaltni protoliti za amfibolite metamorfnog đona formirane na dubini ~10 km potječu od subducirajuće ploče. Granulit kojemu pripada uzorak D9, a potječe od peridotita plašta, formiran je na većim dubinama.
- Daljnjim napredovanjem zatvaranja Tethysa i približavanja Gondwane Europskoj ploči, smanjen je kut subdukcije subducirajuće ploče, a time i volumen plaštnog klina. Prilikom kolizije, amfiboliti metamorfnog đona navučeni su na Europsku ploču iznad stijena granulitnog facijesa koje su smještene bliže kontaktu dviju ploča.

## 8. LITERATURA

- Andersen, D. J., Lindsley, D. H. (1988): Internally consistent solution models for Fe-Mg-Mn-Ti oxides. *American Mineralogist* 73, 714-726.
- 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.
- Barić, Lj. (1969): Korund aus der Umgebung des Dorfes Vijaka in Zentralbosnien. *Min. Petr. Mus. Univ. Zagreb, Mitt.*, 2,1.
- Connolly, J.A.D. (2005): Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters* 236, 524-541.
- 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.
- 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.
- Holland, T.J.B., Powell, R. (1998): An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 309-343.
- Hrvatović, H., Pamić, J. (2005): Principal thrust-nappe structures of the Dinarides. *Acta Geologica Hungarica* 48, 133-151.
- 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): *Über 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.

- Lugović, B., Šegvić, B., Babajić, E., Trubelja, F. (2006): Evidence of short-living intraoceanic subduction in the Central Dinarides, Konjuh ophiolite complex (Bosnia-Herzegovina). International Symposium on Mesozoic Ophiolite Belts of the Northern Part of the Balkan Peninsula, pp. 72-75 (Vol. Belgrade, Serbia).
- Massone, H.-J. (2010): Phase relations and dehydration behaviour of clacareous sediments at very-low to low grade metamorphic conditions. *Periodico di Mineralogia* 79 (2), 21-43.
- Massone, H.-J., Willner, A.P. (2008): Dehydration behavior of metapelites and midocean ridge basalt at very-low to low grade metamorphic conditions. *European Journal of Mineralogy* 20, 867-879.
- McDonough, W.F., Sun, S.S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- 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.
- 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 Duboštica 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 Gostovičke 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 p., Zagreb.
- 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.
- Reed, S.J.B. (2005): Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. 2nd edition, xiii + 192. Cambridge, New York, Melbourne.
- 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.
- Robertson, A., Karamata, S., Šarić, K. (2009): Overview of ophiolites and related units in the late paleozoic-early cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region. Lithos 108, 1-36.
- 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 Dubošćice. 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.
- Trubelja, F. (1961): Magmatske stijene jugoistočnog dijela planine Konjuh (Bosna). Geološki glasnik, 5, 241-262.
- van Hinsbergen, D.J.J., Peters, K., Maffione, M., Spakman, W., Guilmette, C., Thieulot, C., Plümer, O.P., Gürer, D., Brouwer, F.M., Aldanmaz, E., Kaymakci, N. (2015): Dynamics of intra-oceanic subduction initiation: 2. Supra-subduction zone ophiolite formation and metamorphic sole exhumation in context of absolute plate motions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, doi: 10.1002/2015GC005745.
- Wei, C.J., Powell, R. (2003): Phase relations in high-pressure metapelites in the system KFMASH (K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) with application to natural rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145, 301-315.
- White, R.W., Powell, R., Phillips, G.N. (2003): A mineral equilibria study of the hydrothermal alteration in mafic greenschist facies rocks at Kalgoorlie, Eastern Australia. *Journal of Metamorphic Geology* 21, 455-468.
- Whitney, D.L., Evans, B.W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.