P-T put metamorfnih 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:681662

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Diplomski rad

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 Petrinec

- 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 determinated as amphibolites with basalt protolithes which were situated in tectonic environment of intraoceanic subduction. Sample D9, determinated 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 Petrinec, 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 metamorfnih stijena amfibolitnog facijesa iz Dinaridske ofiolitne zone. Provedena su istraživanja na uzorcima amfibolita i granulita iz tzv. metamorfnog đona krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva u Bosni. Stijene metamorfnog 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 metamorfnih 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 lerzoliti (uz spomen i drugih ultramafitnih stijena), a uz kromitnu rudu spominju se i piroksenitи. 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 Duboštice, 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 piropnu 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

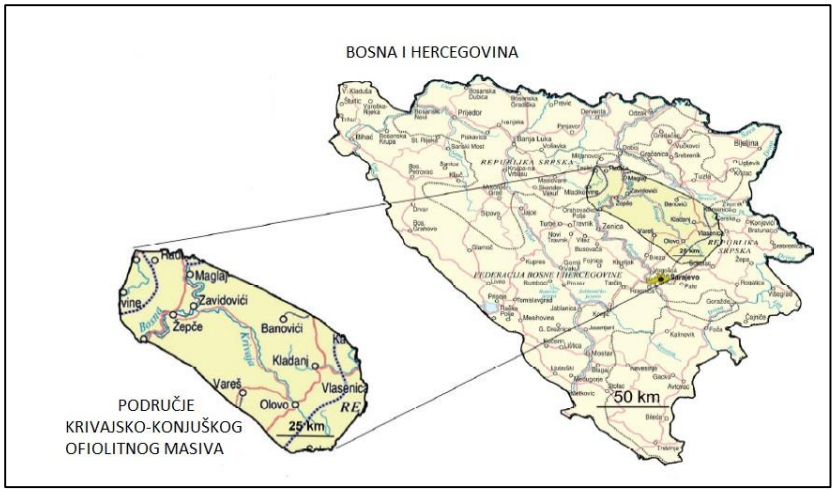
3.1. Regionalna geotektonika i geografski smještaj

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).

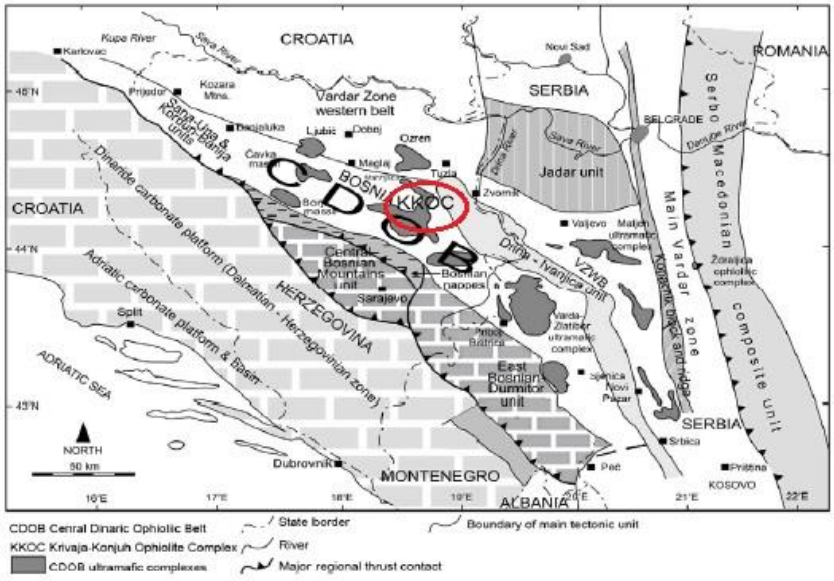


Slika 1. Položaj Dinaridske ofiolitne zone unutar koje se nalazi područje istraživanja. Preuzeto s Google Earth.

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.



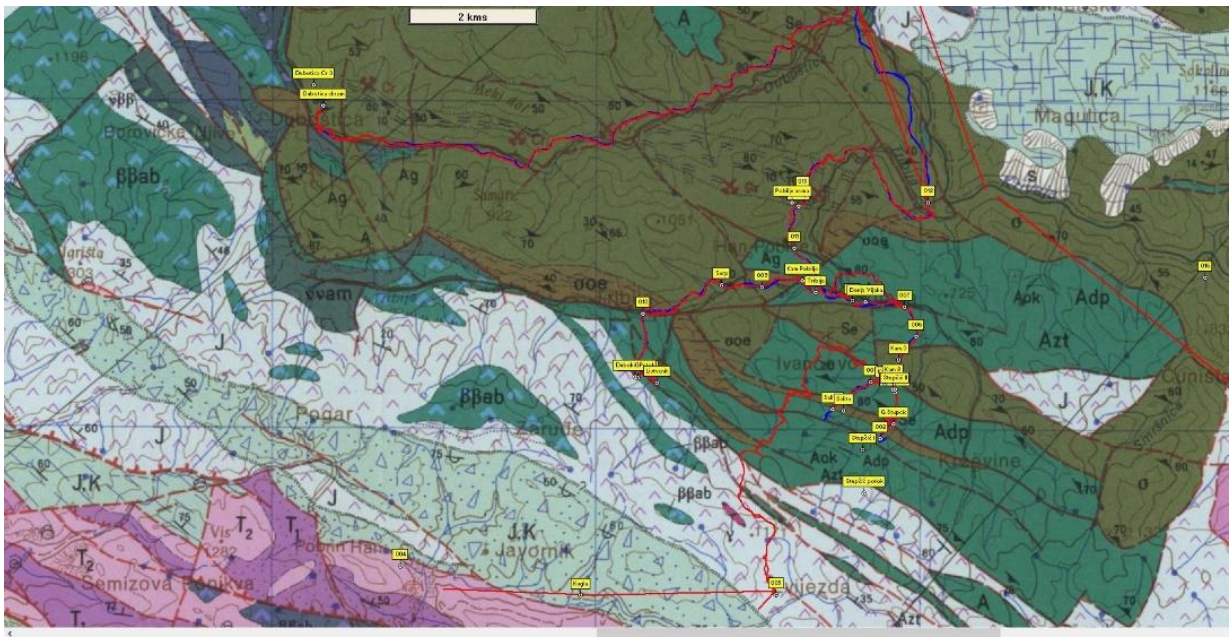
Slika 3. Prikaz položaja krivajsko-konjuškog ultramafitnog masiva (KKOC) unutar Dinaridske ofiolitne zone (CDOB). Prilagođeno prema *Robertson et al. (2009).*

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. metamorfnim 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 metamorfnog 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 (Olujić 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 trijaske vareške 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 trijaske starosti izgrađuju varešku 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_3-K_1).

- 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) lerzoliti (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 alkalijskom 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 mikrosondom) 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 balzamom. 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 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. 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 ^{o}C) u koju se raspršuje uzorak otopine u obliku aerosola. Uvođenjem aerosola u plazmu dolazi do atomizacije i, naposlijetku, 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, fajalit, barit, kromit).

Ovaj način određivanja kemijskog sastava mikronskih područja nekog uzorka je ne-destruktivan. Da bi tako precizna analiza bila moguća, kobinacijom 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 metamorfnih 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.

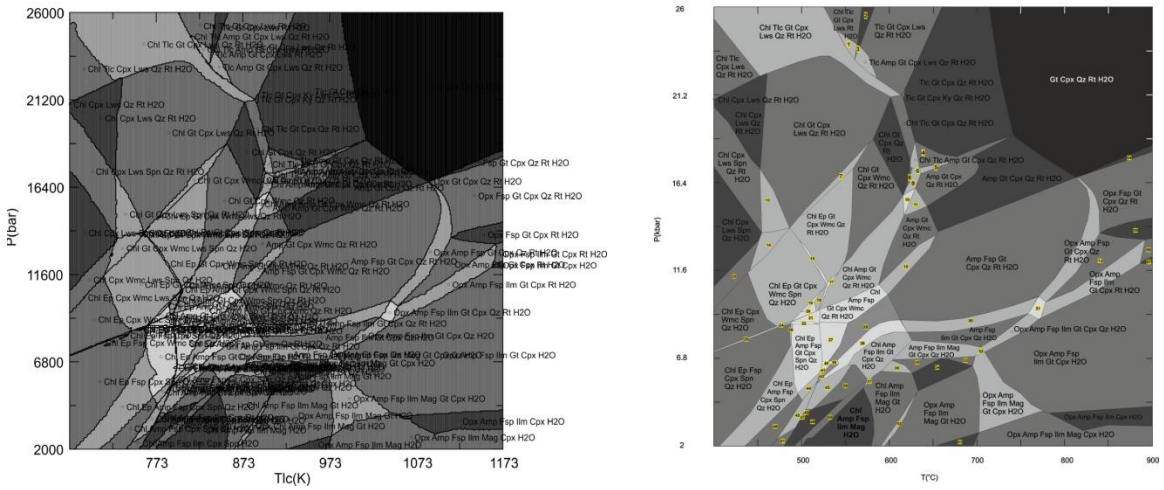
P-T pseudopresjeci izračunati su pomoću programa PERPLE_X (Connolly & Petrini, 2002; Connolly, 2005; August 2011 verzija preuzeta s internetske stranice http://www.preplex.ethz.ch/) za sustave komponenti $MnO\text{-}Na_2O\text{-}CaO\text{-}FeO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}H_2O\text{-}TiO_2\text{-}O_2$ (MnNCFMASHTO) i $MnO\text{-}Na_2O\text{-}CaO\text{-}FeO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}H_2O\text{-}TiO_2$ (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)

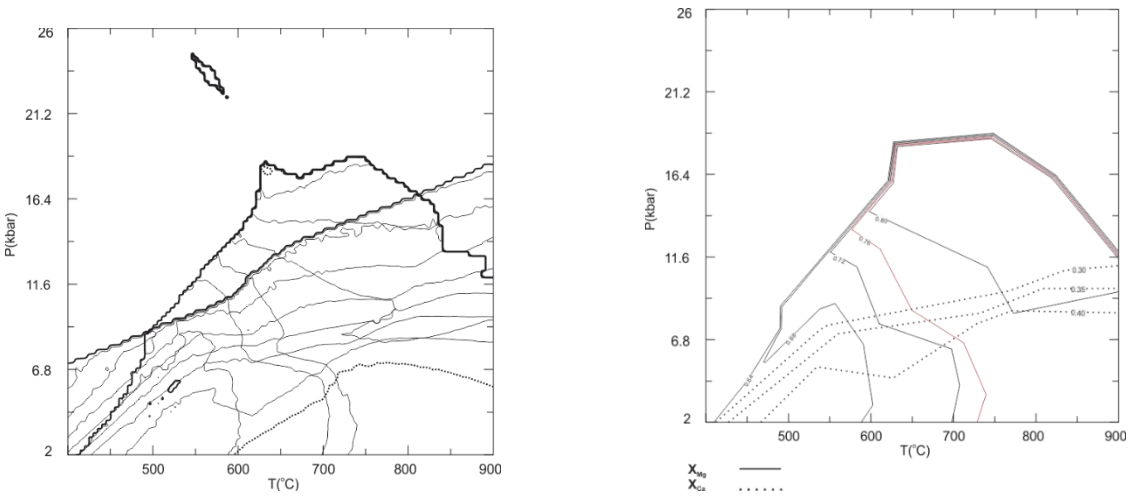
Perplex_option.dat – datoteka za definiranje parametara.

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: GlTrTsPg 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).

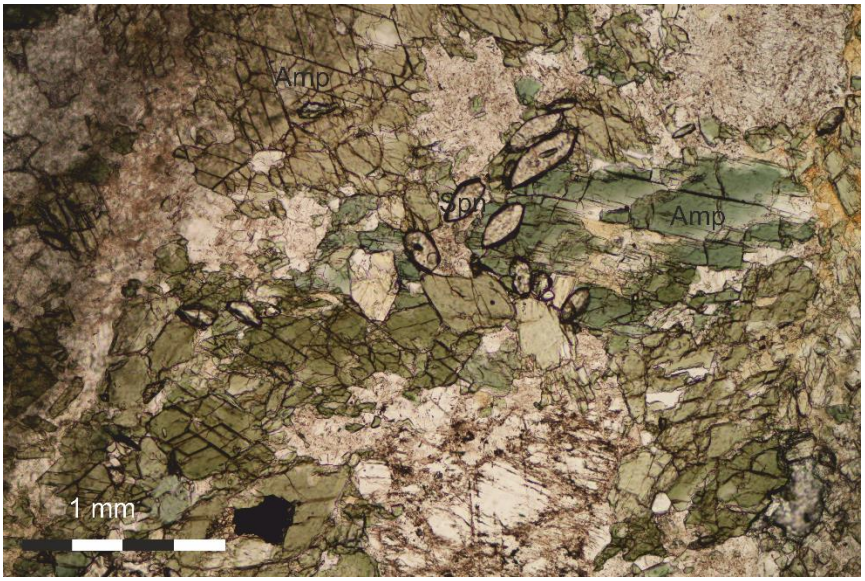
5. REZULTATI

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.

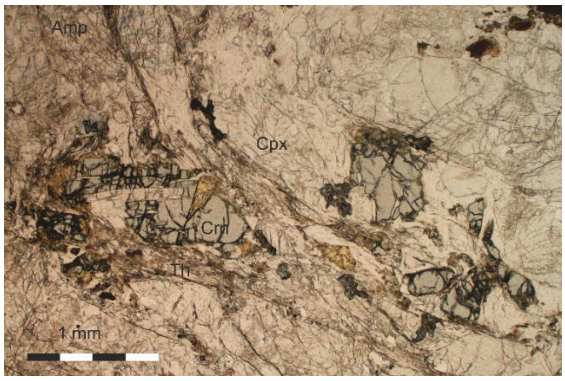


Slika 7. Mikrofotografija uzorka D4 (N-), amfibolit. Amp – amfibol, Spn – titanit.

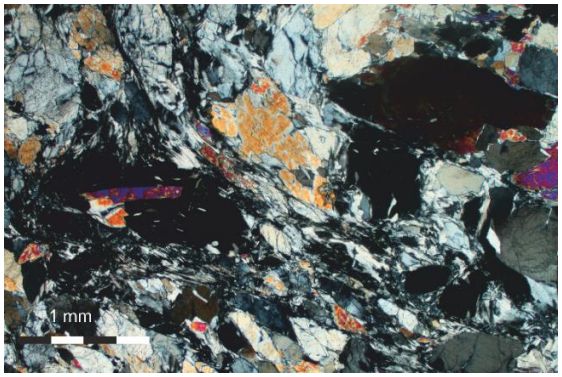
5.1.2. D6

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 uklopci 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.

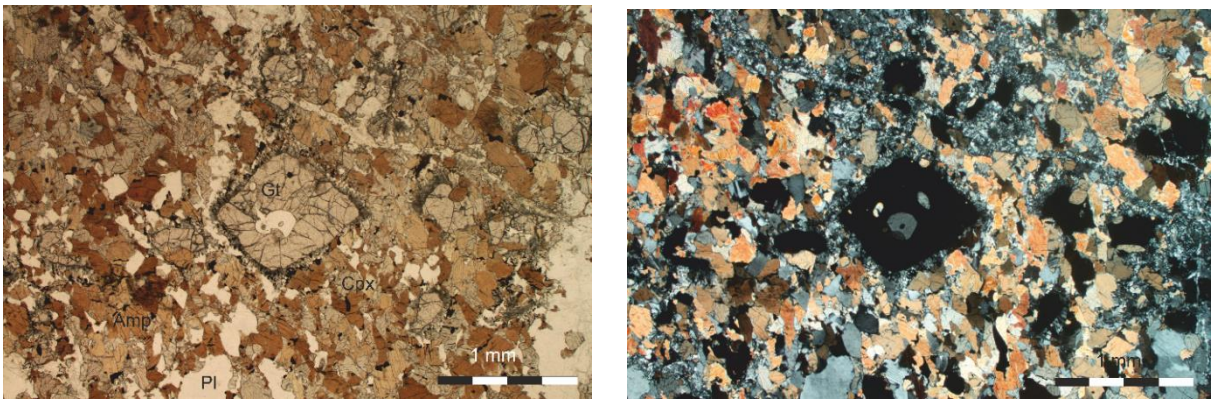


Slika 9. Mikrofotografija uzorka D6, amfibolit. N+

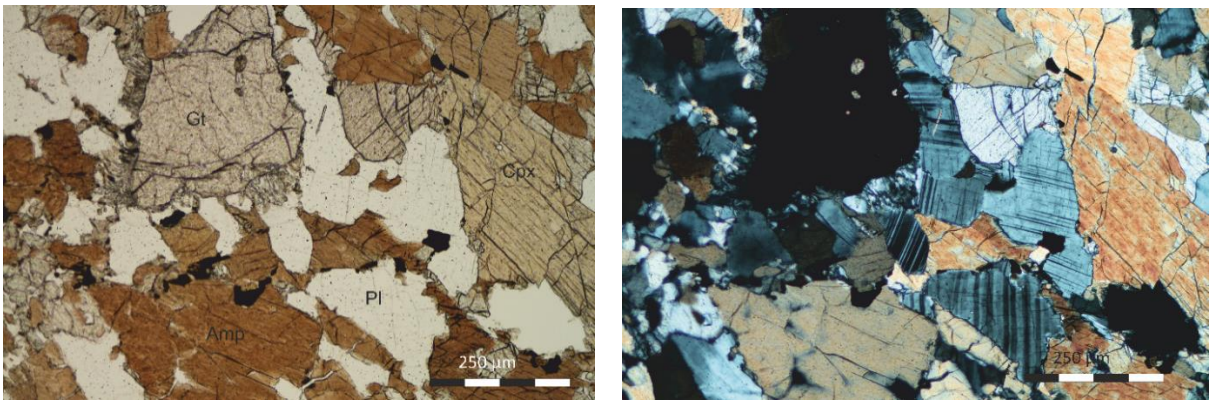
5.1.3. D9

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_2O_5, a time i dio Ca vezanog u apatitu, udio vode određen je na 6 tež.%, a suma je pritom ∑100).

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

	D4	D6	D9	D.L.*
wt (%)				
SiO_2	47,68	39,65	44,94	0,01
Al_2O_3	14,58	21,91	14,26	0,01
Fe_2O_3	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_2O	3,04	1,25	2,05	0,01
K_2O	0,32	0,14	0,04	0,01
TiO_2	1,49	0,06	1,40	0,01
P_2O_5	0,12	<0,01	0,09	0,01
MnO	0,14	0,06	0,23	0,01
LOI	3,00	4,10	1,20	
∑	99,76	99,70	99,73	
(ppm)				
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.
Hf	2,8	0,1	1,8	0,1
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Mo	0,2	<0,1	<0,1	0,1
Nb	4,4	0,5	1,9	0,1
Ni	61	791	76	20
Pb	0,4	1,1	0,8	0,1
Rb	2,0	2,0	<0,1	0,1
Sb	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Sc	44	6	50	1
Se	<0,5	<0,5	<0,5	0,5
Sn	<1	<1	<1	1
Sr	129,2	33,3	76,0	0,5
Ta	0,3	<0,1	0,1	0,1
Th	0,4	<0,2	<0,2	0,2
Tl	<0.1	<0,1	<0,1	0,1
U	<0.1	<0,1	<0,1	0,1
V	359	40	389	8
W	<0,5	<0,5	<0,5	0,5
Y	34,8	2,5	34,6	0,1
Zn	9	34	35	1
Zr	91,3	2,5	56,4	0,1
La	5,8	0,2	2,0	0,1
Ce	13,3	0,6	7,6	0,1
Pr	2,03	0,04	1,36	0,02
Nd	10,5	0,3	8,4	0,3
Sm	3,52	0,13	3,00	0,05
Eu	1,19	0,06	1,05	0,02
Gd	4,83	0,23	4,34	0,05
Tb	0,89	0,05	0,78	0,01
Dy	6,20	0,36	5,57	0,05
Ho	1,25	0,10	1,22	0,02
Er	3,68	0,25	3,70	0,03
Tm	0,52	0,03	0,55	0,01
Yb	3,44	0,21	3,44	0,05
Lu	0,48	0,03	0,54	0,01
∑REE	57,63	2,59	43,55	

***D.L. = granica detekcije metode**

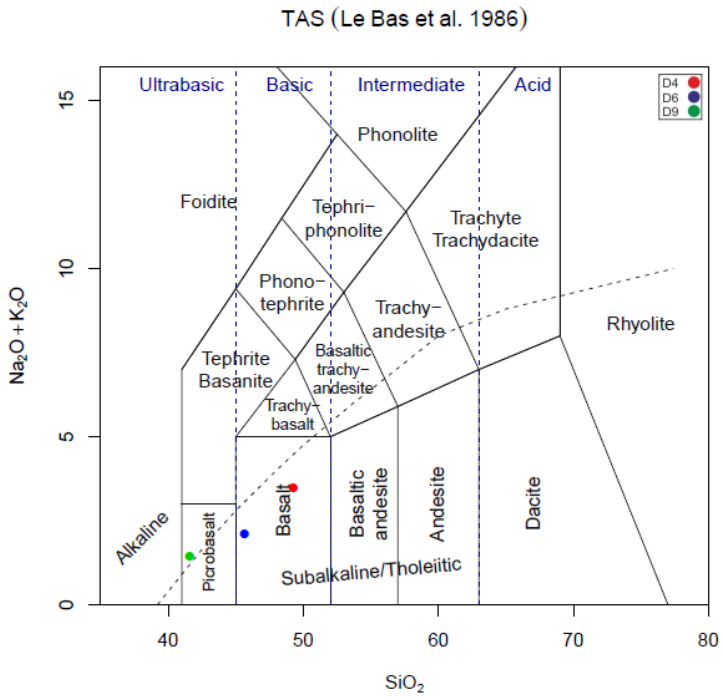
Tablica 2. Geokemijski podaci o makroelementima, prilagođeni za Perple_X.

Podaci pripremljeni za Perple_X					
	D4	**D4 (sve FeO*)**	**D6**	**D6 (sve FeO)**	**D9**
wt (%)					
SiO_2	47,085	47,140	39,337	39,361	43,583
TiO_2	1,471	1,473	0,060	0,060	1,358
Al_2O_3	14,398	14,415	21,737	21,750	13,829
FeO	9,831	9,842	5,179	5,182	12,002
O_2	0,109	0,000	0,057	0,000	0,000
MnO	0,138	0,138	0,060	0,060	0,223
MgO	8,236	8,246	16,687	16,697	9,620
CaO	9,729	9,740	9,643	9,649	11,358
Na_2O	3,002	3,006	1,240	1,241	1,988
K_2O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039
H_2O**	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
∑	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

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

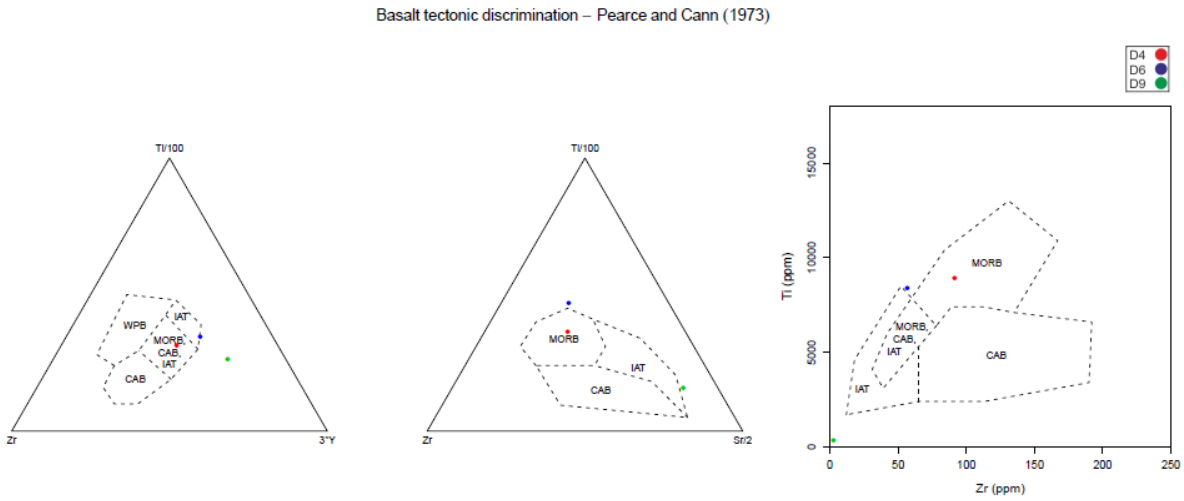
****H_2O – hipotetska voda potrebna za zasićenje sustava pri termodinamskom računu**

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 alkalija (Na_2O+K_2O). Naše analize razlikuju se od kemizma stijena opisanog u poglavlju *3.2. Geološka građa proučavanog područja* gdje je opisano da sastav odgovara alkalijskom bazaltu.



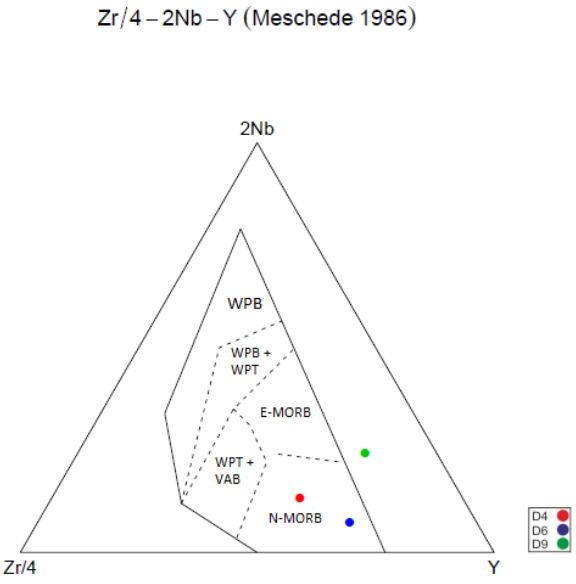
Slika 12. TAS klasifikacijski dijagram (Le Bas et al., 1986). Uzorci amfibolita D4 i D6 padaju u polje bazalta, dok granulit D9 pada u polje pikrobazalta.

Informacije o geotektonskom smještaju protolita ovih metamorfnih 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.



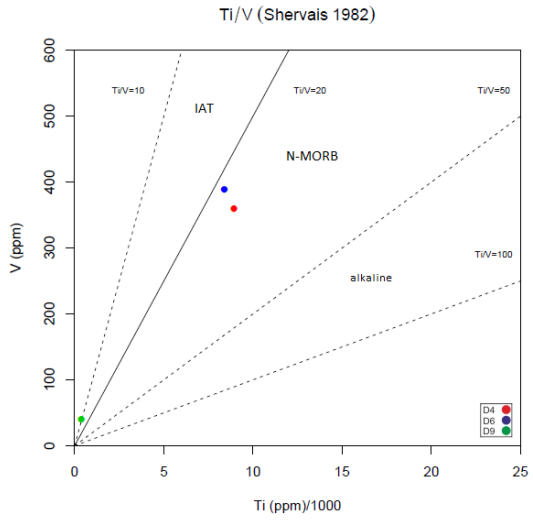
Slika 13. Tektonska klasifikacija bazalta (Pearce & Cann, 1973). *WPB – Within Plate Basalts, CAB – Continental Arc Basalts, IAT – Island Arc Tholeiites, MORB – Mid Ocean Ridge Basalt.* Granulit D9 pada izvan polja klasifikacija. Amfibolit D4 na sva tri dijagrama pada u polje MORB, a amfibolit D6 pada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



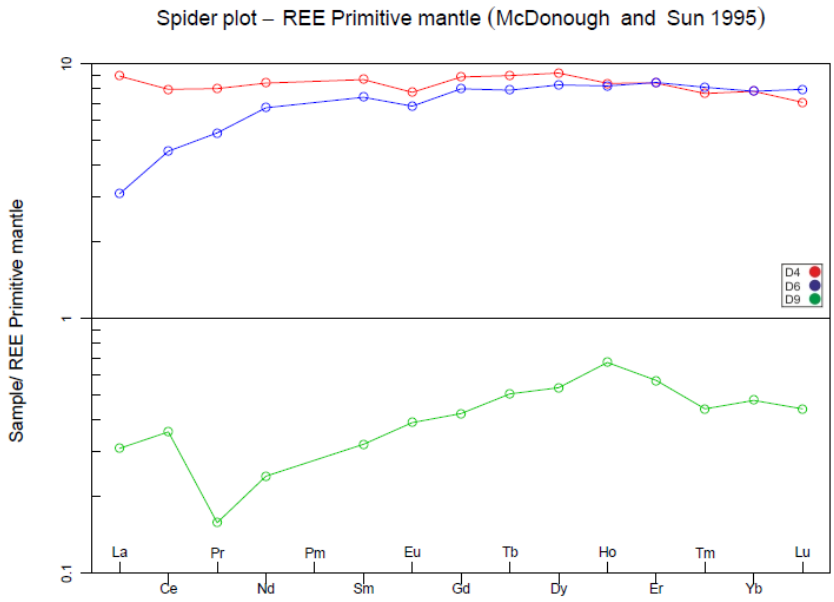
Slika 14. Zr-Nb-Y diskriminacijski dijagram (Meschede, 1986). *WPB – Within Plate Basalts, WPT – Within Plate Tholeiites, VAB – Volcanic Arc Basalts, E-MORB – Enriched MORB, N-MORB – Normal MORB.*
Granulit D9 pada izvan polja klasifikacije. Amfiboliti D4 i D6 padaju u polje MORB.

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.



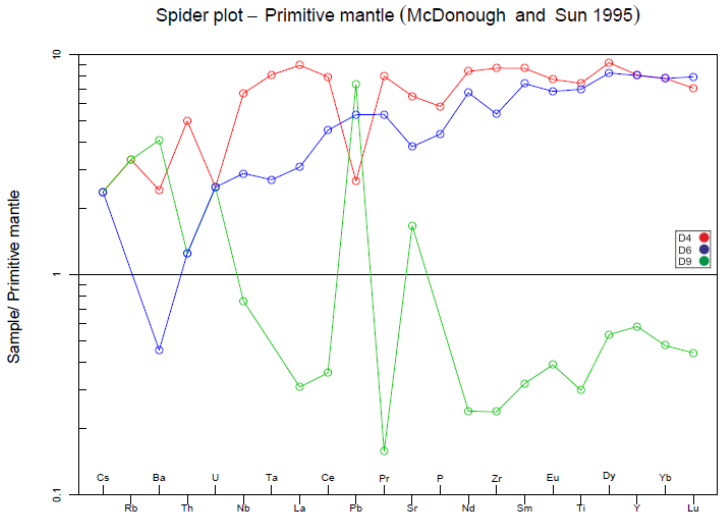
Slika 15. Ti-V diskriminacijski dijagram (Shervais, 1986). *IAT – Island Arc Tholeiites, N-MORB – Normal MORB.* Amfiboliti D4 i D6 padaju u N-MORB polje, a granulit D9 pada na rub IAT polja.

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.



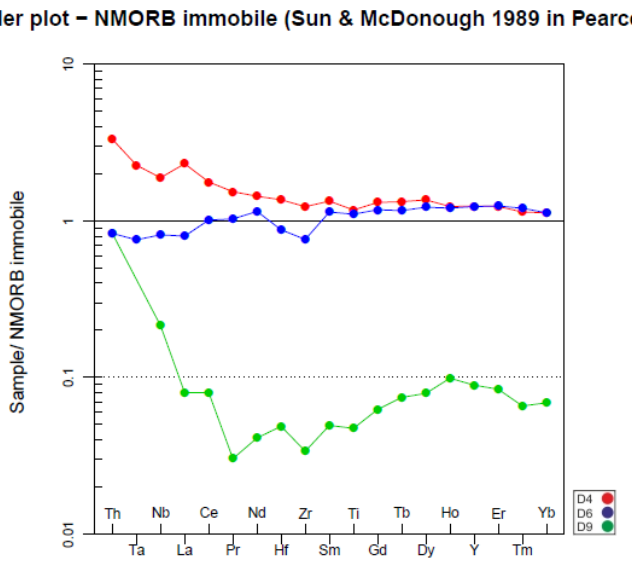
Slika 16. Normalizacija elemenata iz grupe lantanida (REE) na primitivni plašt (McDonough & Sun, 1995).

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.



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

5.2.2. Mineralna geokemija

Mineralna geokemija utvrđena je elektronskom mikrosondom 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, College & Perkins, preuzeto s 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.

	Amfibol			
	D4-am3	**D4-am5**	**D4-am6**	**D4-am7**
SiO_2	45,22	44,10	43,10	43,35
TiO_2	0,57	0,71	0,70	0,66
Al_2O_3	9,32	10,72	11,13	10,60
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe_2O_3	7,38	6,65	8,92	6,91
FeO	9,86	10,66	9,30	10,76
MnO	0,33	0,27	0,27	0,22
MgO	11,82	11,02	10,97	10,92
CaO	11,42	11,53	11,19	11,27
Na_2O	1,77	1,69	1,98	2,11
Ka_2O	0,12	0,18	0,17	0,17
BaO	0,00	0,06	0,00	0,03
H_2O	2,04	2,03	2,03	2,01
∑	99,83	99,60	99,76	99,00
Si	6,656	6,526	6,380	6,477
Al^{IV}	1,344	1,474	1,620	1,523
Ti	0,063	0,079	0,078	0,074
Al^{VI}	0,272	0,396	0,322	0,344

	D4-am3	D4-am5	D4-am6	D4-am7
Fe^{3+}	0,817	0,740	0,993	0,777
Fe^{2+}	1,213	1,319	1,151	1,345
Mn	0,041	0,034	0,034	0,027
Mg	2,593	2,432	2,422	2,432
Ca	1,801	1,828	1,774	1,804
Na	0,504	0,484	0,567	0,611
K	0,022	0,034	0,032	0,031
Ba	0,000	0,004	0,000	0,002
H	2,000	2,000	2,000	2,000
$^{*}X_{Mg}$	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.

Plagioklas				
	D4-pl2	**D4-pl3**	**D4-pl4**	**D4-pl5**
SiO_2	58,18	57,30	58,71	60,28
TiO_2	0,00	0,01	0,00	0,01
Al_2O_3	25,52	26,59	26,29	24,29
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe_2O_3	0,20	0,13	0,34	0,26
Mn_2O_3	0,02	0,01	0,02	0,00
MgO	0,03	0,01	0,02	0,02
CaO	7,72	8,42	7,72	6,08
Na_2O	7,41	6,86	7,07	8,23
Ka_2O	0,05	0,04	0,06	0,06
BaO	0,03	0,00	0,01	0,00
∑	99,17	99,38	100,25	99,22
Si	2,626	2,583	2,616	2,704
Al	1,357	1,413	1,381	1,284
Fe^{3+}	0,007	0,004	0,011	0,009
Mn^{3+}	0,001	0,000	0,001	0,000
Ba	0,001	0,000	0,000	0,000
Ca	0,373	0,407	0,368	0,292
Na	0,648	0,599	0,611	0,716
K	0,003	0,002	0,004	0,003
$^{*}X_{An}$	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.

	Amfibol		
	D6-am15	**D6-am16**	**D6-am21**
SiO_2	45,13	45,51	45,41
TiO_2	0,08	0,09	0,10
Al_2O_3	17,61	17,33	17,06
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,00
Fe_2O_3	4,63	4,78	4,93
FeO	0,00	0,00	0,00
MnO	0,03	0,06	0,02
MgO	16,56	16,77	16,80
CaO	11,89	11,94	11,92
Na_2O	1,71	1,59	1,68
Ka_2O	0,20	0,19	0,20
H_2O	2,17	2,18	2,18
∑	100,00	100,44	100,30
Si	6,233	6,251	6,257
Al^{IV}	1,767	1,749	1,743
Ti	0,008	0,009	0,010
Al^{VI}	1,099	1,056	1,027
Fe^{3+}	0,481	0,494	0,511
Mn	0,003	0,007	0,002
Mg	3,409	3,433	3,450
Ca	1,759	1,757	1,760
Na	0,459	0,423	0,449
K	0,035	0,034	0,036
H	2,000	2,000	2,000
***X_{Mg}**	1,000	1,000	1,000

***X_{Mg}=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.*

	Thomsonit		
	D6-px23	**D6-px24**	**D6-px25**
SiO_2	37,6551	38,1021	38,3836
TiO_2	0,0000	0,0103	0,0000
Al_2O_3	31,4992	31,2123	32,2249
FeO	0,0828	0,0508	0,0000
MnO	0,0454	0,0000	0,0136
MgO	0,0000	0,0181	0,0362
CaO	12,9563	12,7411	12,0778
Na_2O	3,7239	3,7265	3,3481
Ka_2O	0,0000	0,0091	0,0060
BaO	0,0196	0,0000	0,0000
H_2O	14,0176	14,1288	13,9088
∑	100,0000	99,9990	99,9990
Si	1,961	1,988	2,002
Ti	0,000	0,000	0,000
Al	1,934	1,919	1,981
Cr	0,000	0,000	0,000
Fe^{2+}	0,004	0,002	0,00
Mn	0,002	0,000	0,001
Mg	0,000	0,002	0,003
Ca	0,723	0,712	0,675
Ba	0,000	0,000	0,000
Na	0,376	0,377	0,339
K	0,000	0,001	0,000
X_{An}	0,658	0,654	0,666

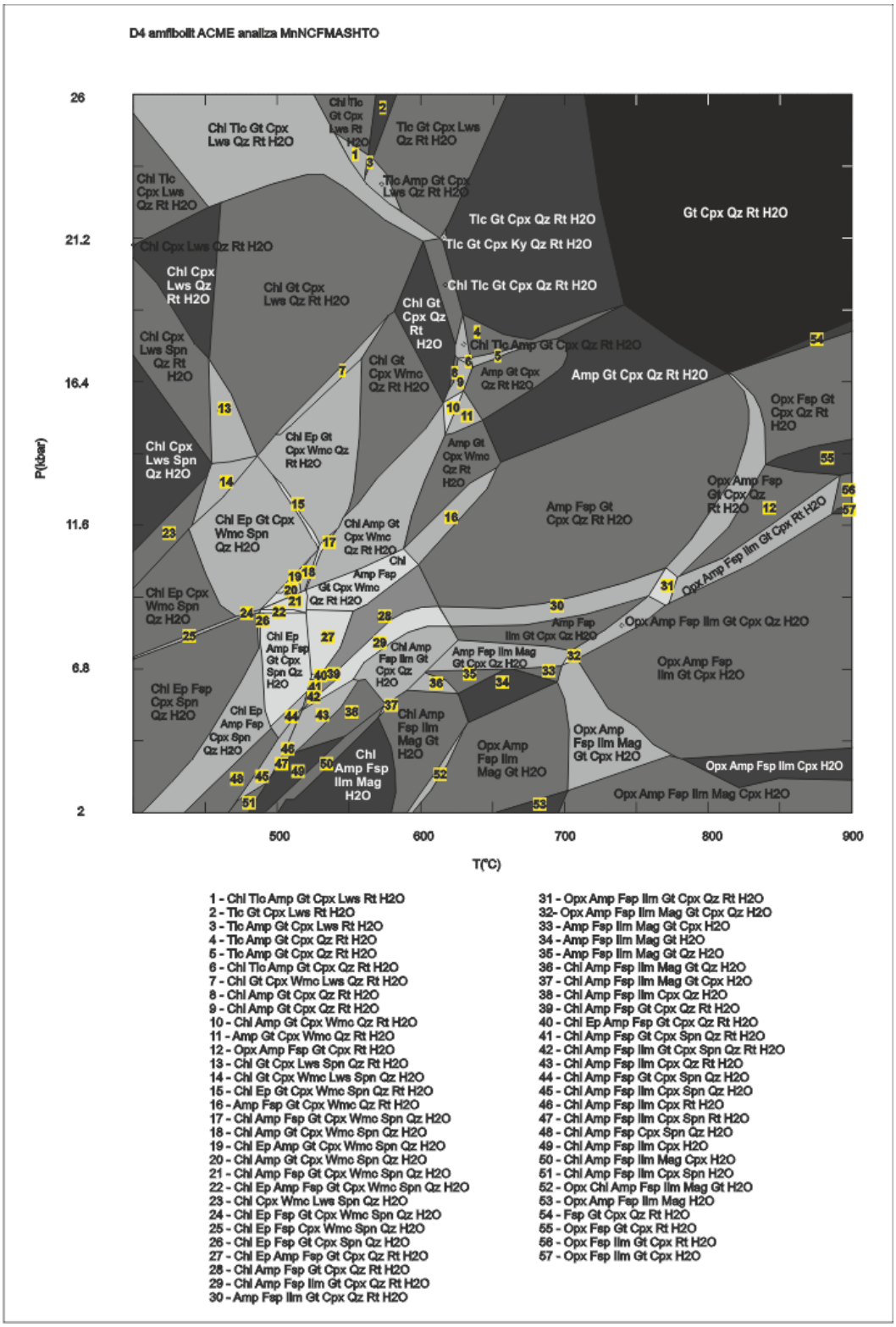
***X_{An}=Ca/(Ca+K+Na)**

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_2O) 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_2O. 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.

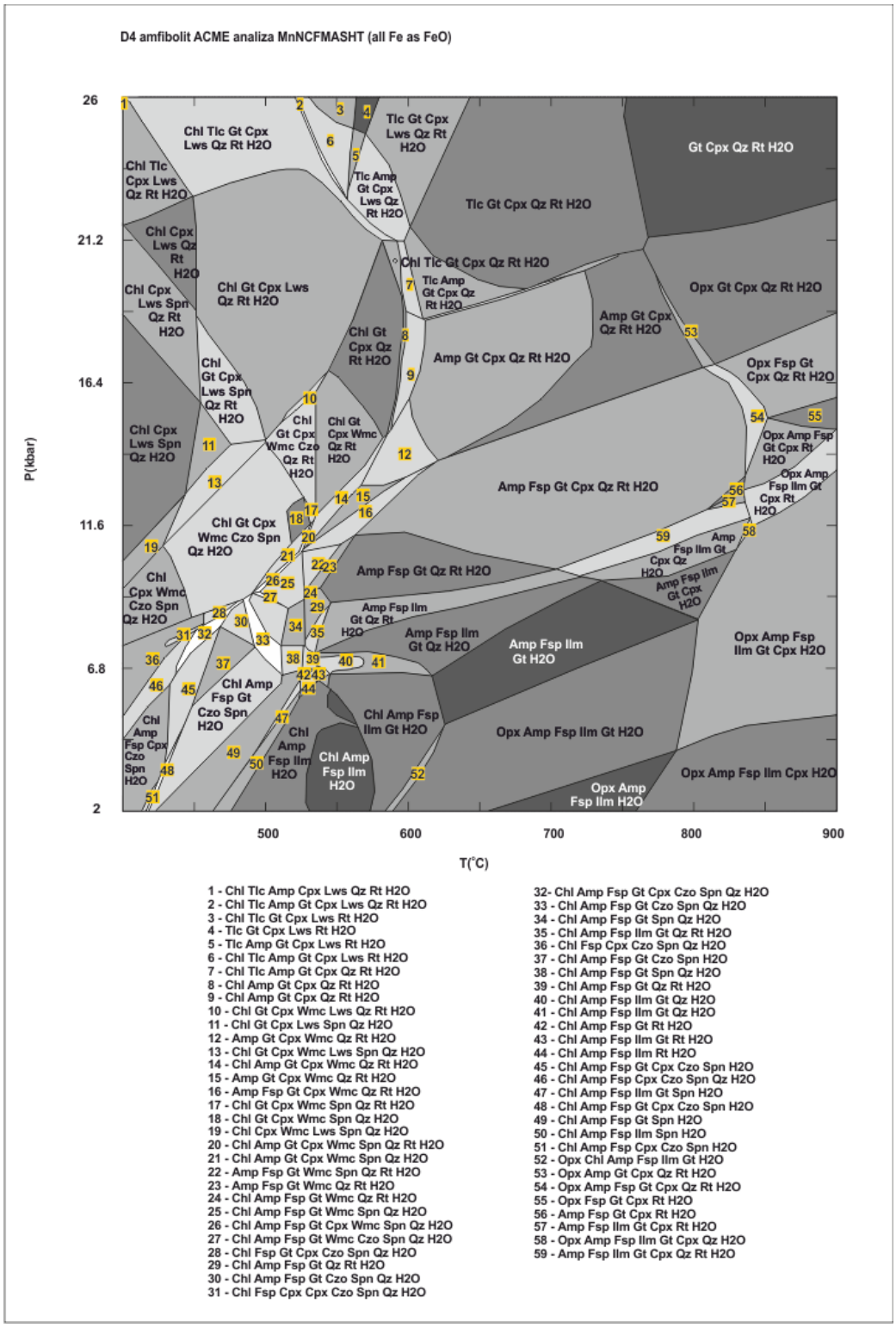


1 - Chl Tlc Amp Gt Cpx Lws Rt H2O
2 - Tlc Gt Cpx Lws Rt H2O
3 - Tlc Amp Gt Cpx Lws Rt H2O
4 - Tlc Amp Gt Cpx Qz Rt H2O
5 - Tlc Amp Gt Cpx Qz Rt H2O
6 - Chl Tlc Amp Gt Cpx Qz Rt H2O
7 - Chl Gt Cpx Wmo Lws Qz Rt H2O
8 - Chl Amp Gt Cpx Qz Rt H2O
9 - Chl Amp Gt Cpx Qz Rt H2O
10 - Chl Amp Gt Cpx Wmo Qz Rt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

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

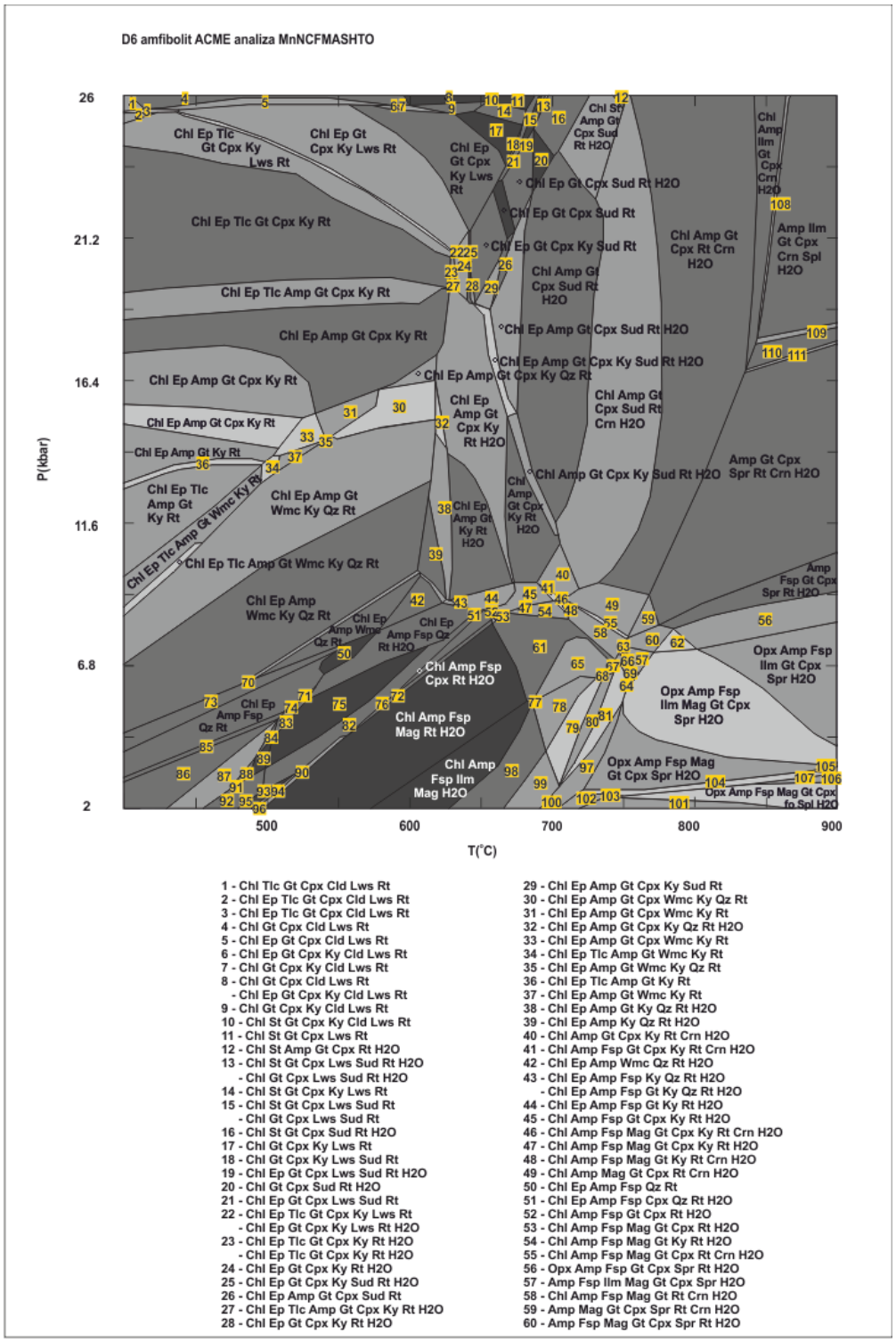
Razlike u odnosu na analizu sa sustavom komponenti MnNCFMASHTO nisu jako velike. Neka polja su proširena, a neka smanjena u odnosu na prethodnu analizu. Tako je maksimalni tlak na kojem nailazimo na amfibol nešto niži od prethodnog slučaja, ~21,2 kbar pri temperaturi od 760°C. Kod klorita je situacija 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.



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.



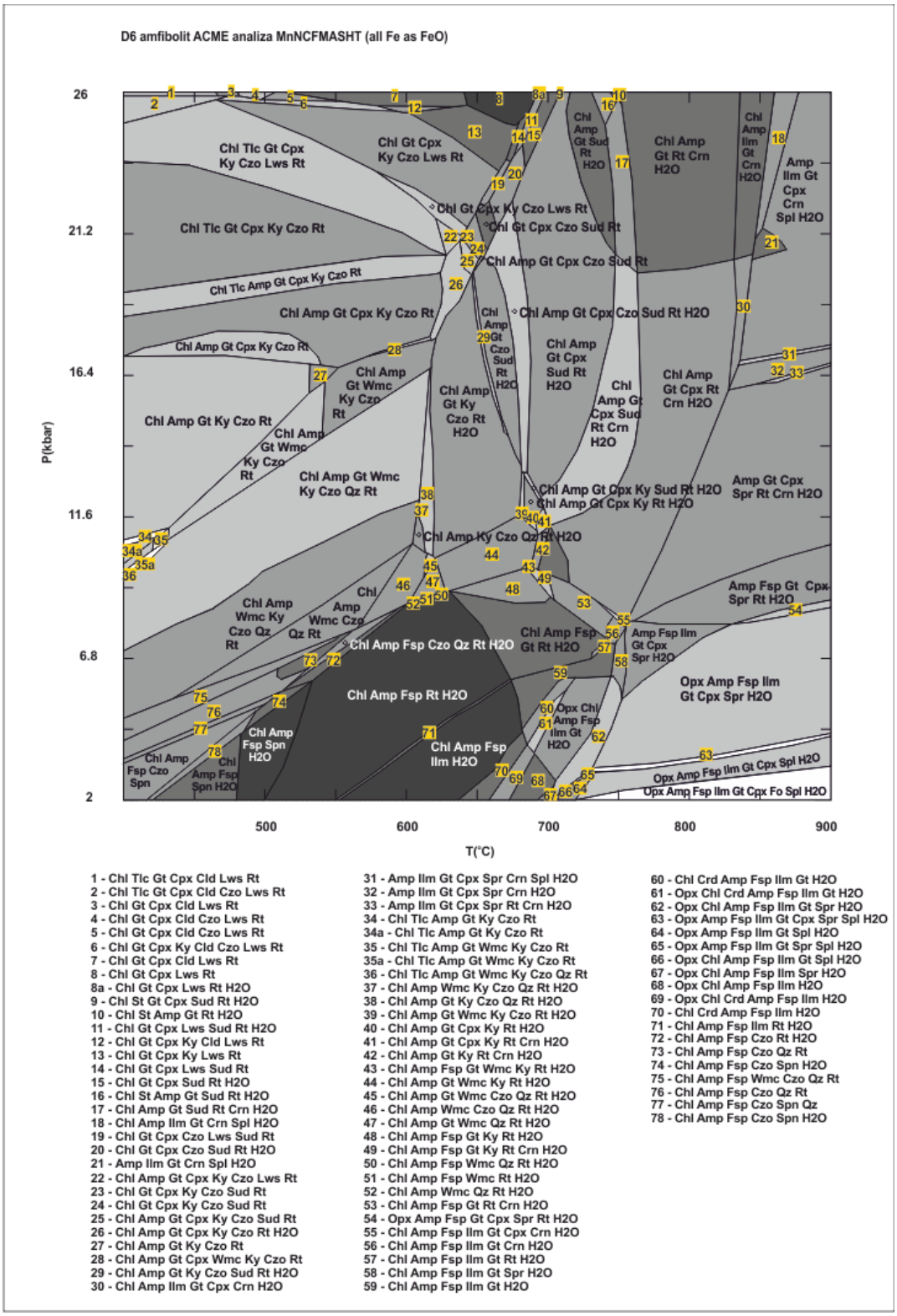
1 - Chl Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt
2 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt
3 - Chl Ep Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt
4 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt
5 - Chl Ep Gt Cpx Cld Lws Rt
6 - Chl Ep Gt Cpx Ky Cld Lws Rt
7 - Chl Gt Cpx Ky Cld Lws Rt
8 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt
- Chl Ep Gt Cpx Ky Cld Lws Rt
9 - Chl Gt Cpx Ky Cld Lws Rt
10 -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

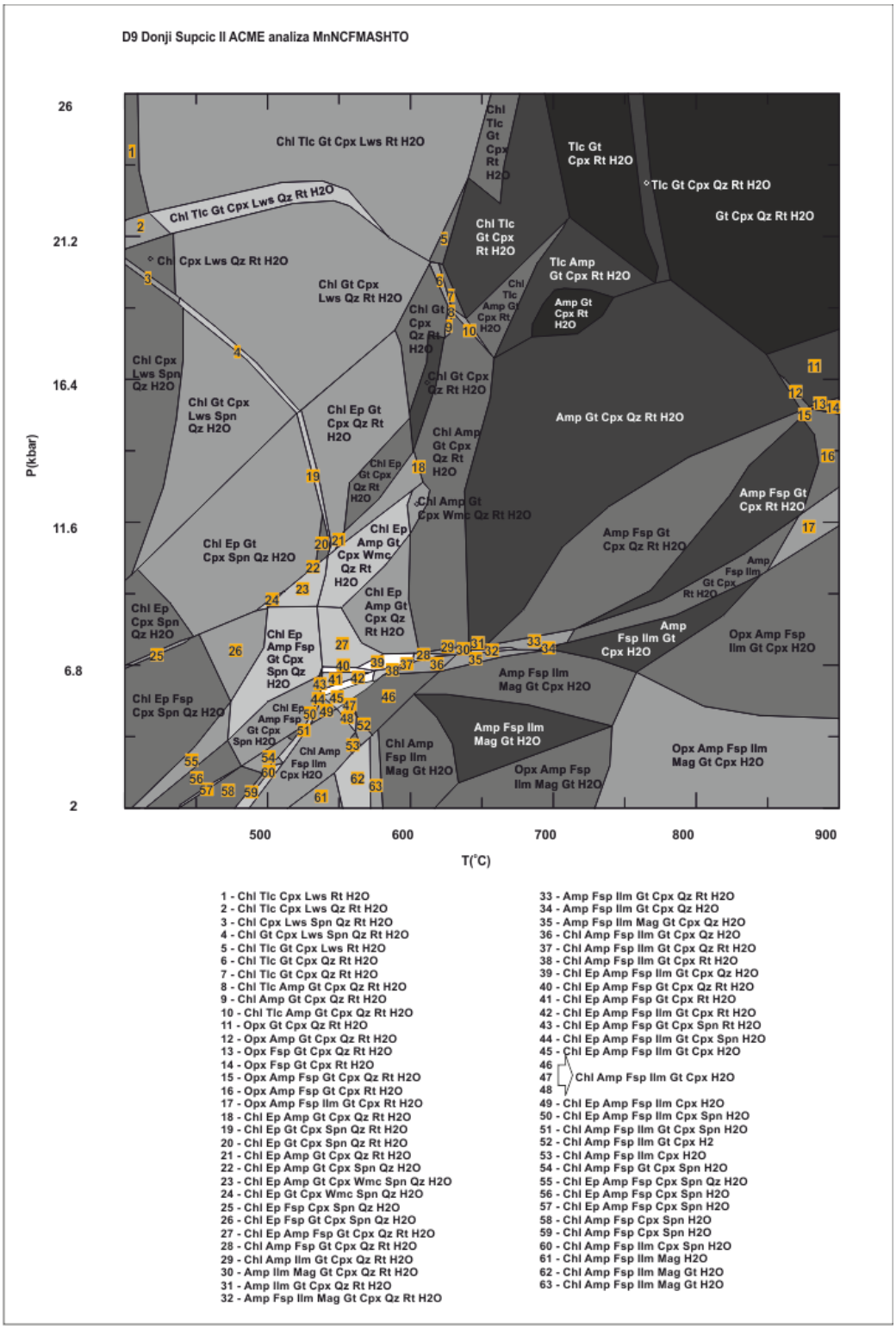


1 - Chl Tlc Gt Cpx Cld Lws Rt
2 - Chl Tlc Gt Cpx Cld Czo Lws Rt
3 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt
4 - Chl Gt Cpx Cld Czo Lws Rt
5 - Chl Gt Cpx Cld Czo Lws Rt
6 - Chl Gt Cpx Ky Cld Czo Lws Rt
7 - Chl Gt Cpx Cld Lws Rt
8 - Chl Gt Cpx Lws Rt
8a - Chl Gt Cpx Lws Rt H2O
9 - Chl St Gt Cpx Sud Rt H2O
10 - Chl St Amp Gt Rt H2O
11 - Chl Gt Cpx Lws Sud Rt H2O
12 - Chl Gt Cpx Ky Cld Lws Rt
13 - Chl Gt Cpx Ky Lws Rt
14 - Chl Gt Cpx Lws Sud Rt
15 - Chl Gt Cpx Sud Rt H2O
16 - Chl St Amp Gt Sud Rt H2O
17 - Chl Amp Gt Sud Rt Crn H2O
18 - Chl Amp Ilm Gt Crn Spl H2O
19 - Chl Gt Cpx Czo Lws Sud Rt
20 - Chl Gt Cpx Czo Sud Rt H2O
21 - Amp Ilm Gt Crn Spl H2O
22 - Chl Amp Gt Cpx Ky Czo Lws Rt
23 - Chl Gt Cpx Ky Czo Sud Rt
24 - Chl Gt Cpx Ky Czo Sud Rt
25 - Chl Amp Gt Cpx Ky Czo Sud Rt
26 - Chl Amp Gt Cpx Ky Czo Rt H2O
27 - Chl Amp Gt Ky Czo Rt
28 - Chl Amp Gt Cpx Wmc Ky Czo Rt
29 - Chl Amp Gt Ky Czo Sud Rt H2O
30 - Chl Amp Ilm Gt Cpx Crn H2O
31 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Crn Spl H2O
32 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Crn H2O
33 - Amp Ilm Gt Cpx Spr Rt Crn H2O
34 - Chl Tlc Amp Gt Ky Czo Rt
34a - Chl Tlc Amp Gt Ky Czo Rt
35 - Chl Tlc Amp Gt Wmc Ky Czo Rt
35a - Chl Tlc Amp Gt Wmc Ky Czo Rt
36 - Chl Tlc Amp Gt Wmc Ky Czo Qz Rt
37 - Chl Amp Wmc Ky Czo Qz Rt H2O
38 - Chl Amp Gt Ky Czo Qz Rt H2O
39 - Chl Amp Gt Wmc Ky Czo Rt H2O
40 - Chl Amp Gt Cpx Ky Rt H2O
41 - Chl Amp Gt Cpx Ky Rt Crn H2O
42 - Chl Amp Gt Ky Rt Crn H2O
43 - Chl Amp Fsp Gt Wmc Ky Rt H2O
44 - Chl Amp Gt Wmc Ky Rt H2O
45 - Chl Amp Gt Wmc Czo Qz Rt H2O
46 - Chl Amp Wmc Czo Qz Rt H2O
47 - Chl Amp Gt Wmc Qz Rt H2O
48 - Chl Amp Fsp Gt Ky Rt H2O
49 - Chl Amp Fsp Gt Ky Rt Crn H2O
50 - Chl Amp Fsp Wmc Qz Rt H2O
51 - Chl Amp Fsp Wmc Rt H2O
52 - Chl Amp Wmc Qz Rt H2O
53 - Chl Amp Fsp Gt Rt Crn H2O
54 - Opx Amp Fsp Gt Cpx Spr Rt H2O
55 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Cpx Crn H2O
56 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Crn H2O
57 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Rt H2O
58 - Chl Amp Fsp Ilm Gt Spr H2O
59 - Chl Amp Fsp Ilm Gt H2O
60 - Chl Crd Amp Fsp Ilm Gt H2O
61 - Opx Chl Crd Amp Fsp Ilm Gt H2O
62 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Gt Spr H2O
63 - Opx Amp Fsp Ilm Gt Cpx Spr Spl H2O
64 - Opx Amp Fsp Ilm Gt Spl H2O
65 - Opx Amp Fsp Ilm Gt Spr Spl H2O
66 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Gt Spl H2O
67 - Opx Chl Amp Fsp Ilm Spr H2O
68 - Opx Chl Amp Fsp Ilm H2O
69 - Opx Chl Crd Amp Fsp Ilm H2O
70 - Chl Crd Amp Fsp Ilm H2O
71 - Chl Amp Fsp Ilm Rt H2O
72 - Chl Amp Fsp Czo Rt H2O
73 - Chl Amp Fsp Czo Qz Rt
74 - Chl Amp Fsp Czo Spn H2O
75 - Chl Amp Fsp Wmc Czo Qz Rt
76 - Chl Amp Fsp Czo Qz Rt
77 - Chl Amp Fsp Czo Spn Qz
78 - Chl Amp Fsp Czo Spn H2O

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.



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

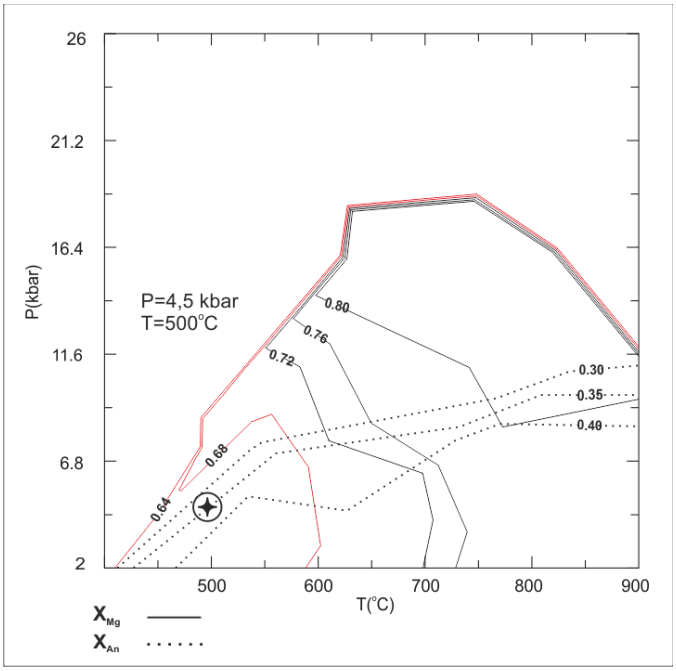
5.3.6. Dijagrami izopleta

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.

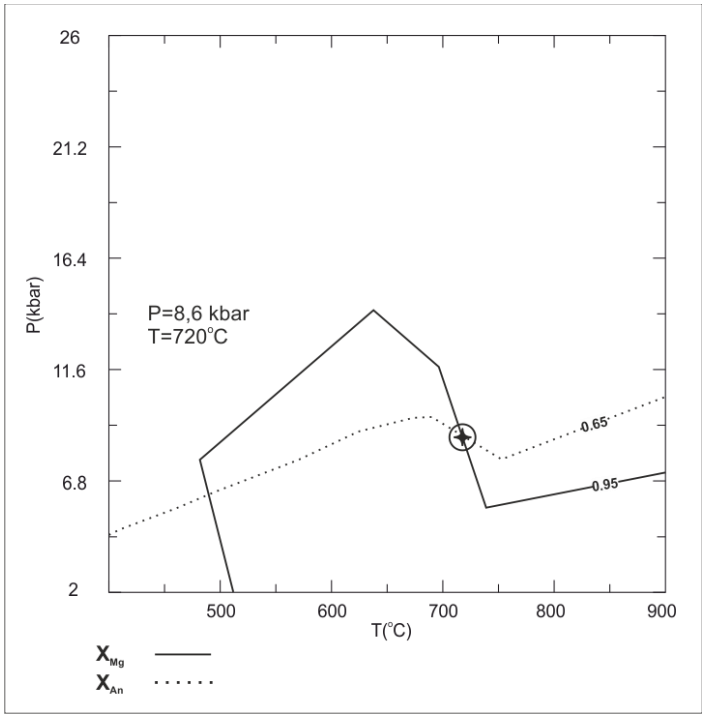
Tablica 7. Raspon vrijednosti izopleta dobivenih Perple_X-om.

	D4		**D6**	
	X_{Mg}	**X_{An}**	**X_{Mg}**	**X_{An}**
min	0,64	0,05	0	0,05
max	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.



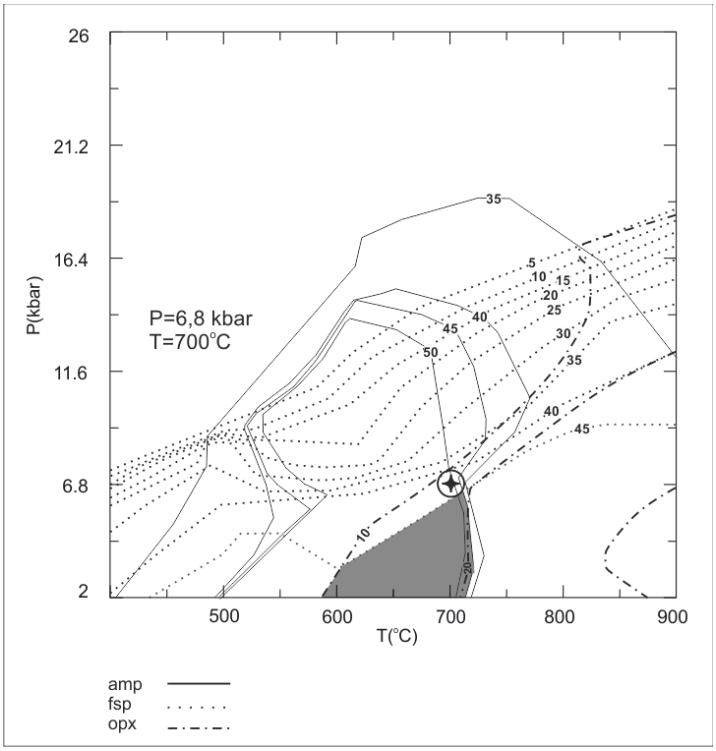
Slika 24. Prikaz polja stabilnosti izopleta s udjelom Mg u amfibolu i anortitne komponente u plagioklasu za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO.



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

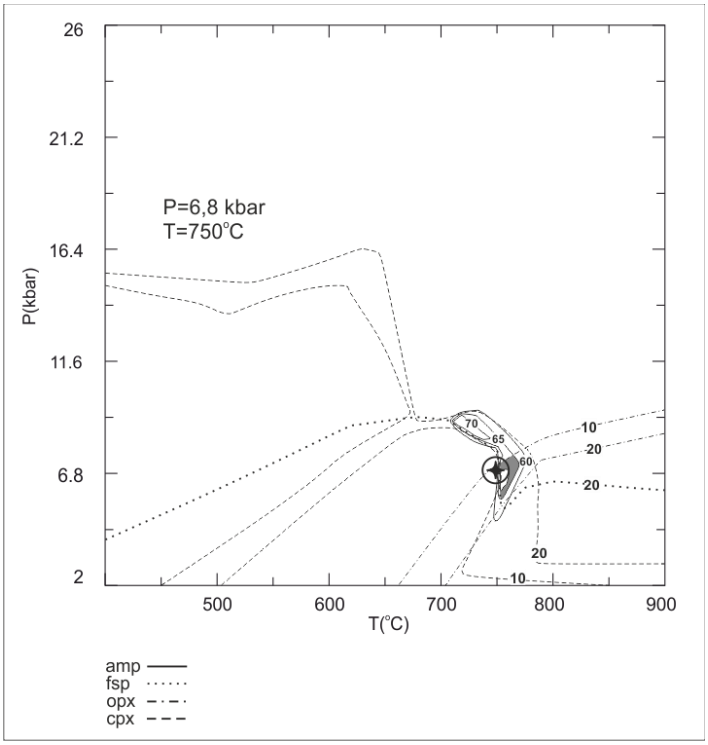
Radi bolje preglednosti, konstruirane su izoplete kojima se omeđilo područje pojave pojedinih minerala (sl. 26-28); zapravo je riječ o izomodama (*isomodes*), linijama s istim vol% minerala. Preklapanjem područja koja sadrže amfibol, plagioklas i piroksene u uzorcima D4 i D6, te područja koja sadrže 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.



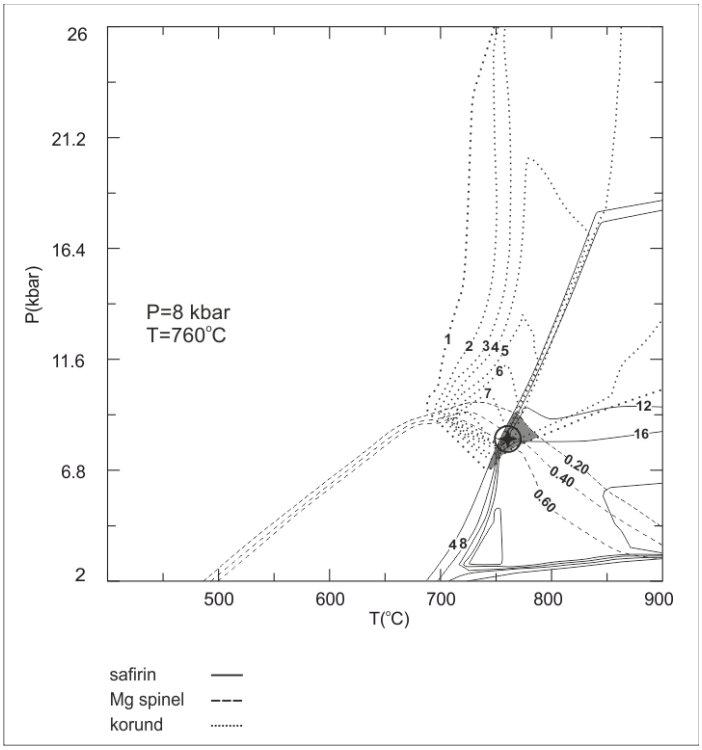
Slika 26. Prikaz polja stabilnosti izopleta koje omeđuju područja pojave amfibola (amp), plagioklasa (fsp) i ortopiroksena (opx) za uzorak D4 u sustavu MnNCFMASHTO.

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.



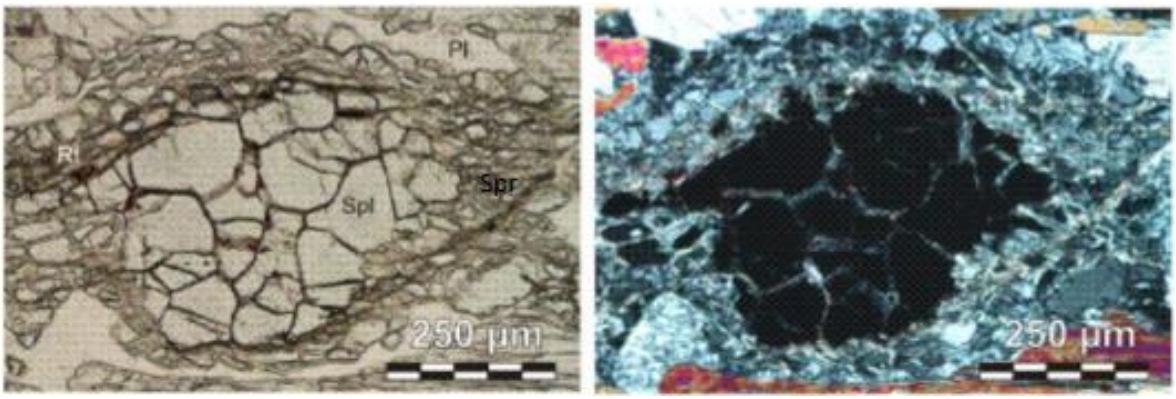
Slika 28. Prikaz polja stabilnosti izopleta koje omeđuju područja pojave safirina, Mg spinela i korunda za uzorak D6 u sustavu MnNCFMASHTO.

6. RASPRAVA

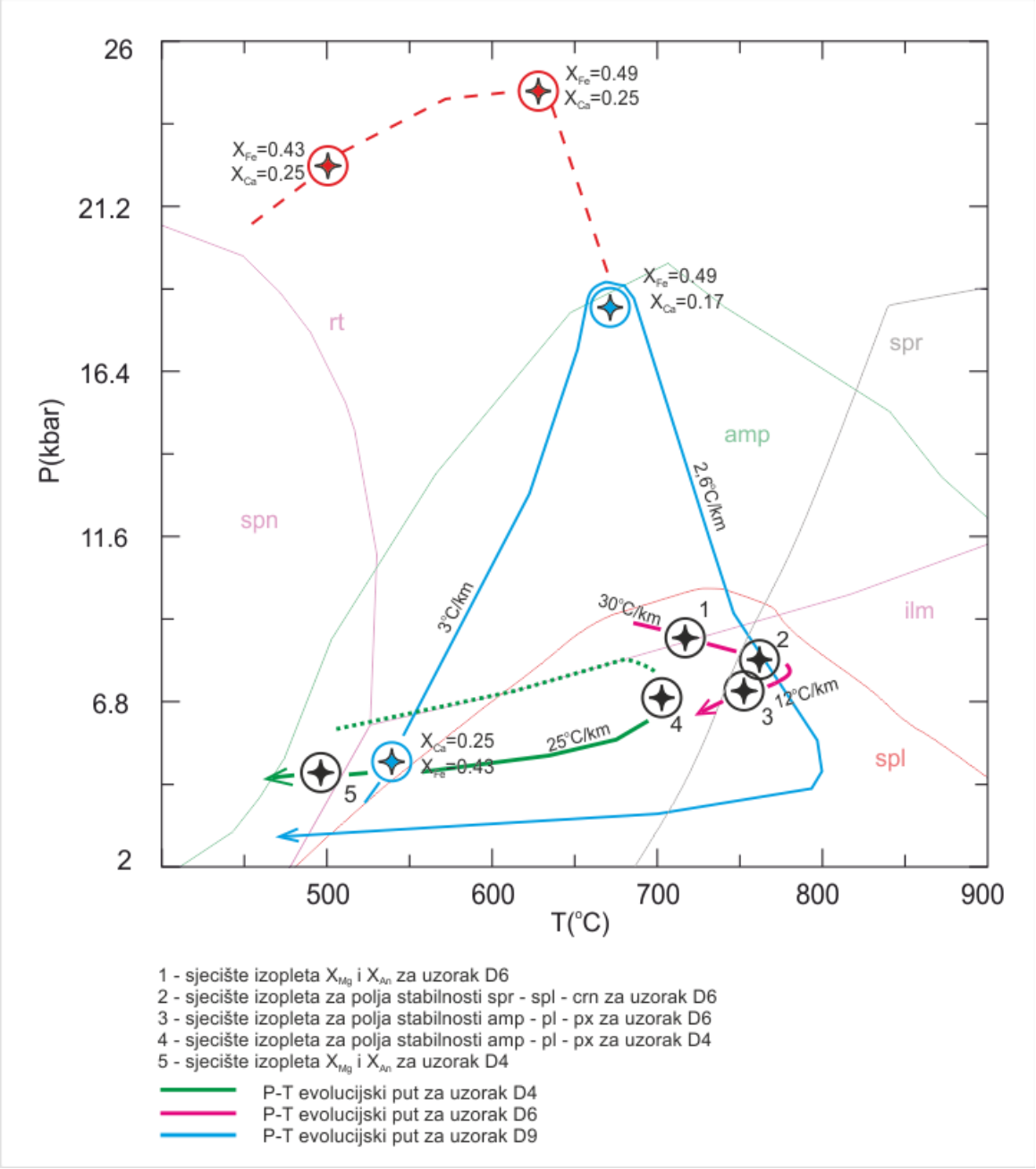
S obzirom na mineraloške karakteristike, klasifikacijske dijagrame te napravljene pseudopresjeke u P-T rasponu 400-900°C i 2-26 kbar, uzorci D4 i D6 mogu se odrediti kao amfiboliti bazaltnog protolita, a uzorak D9 kao granulit.

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^{3+} 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+.



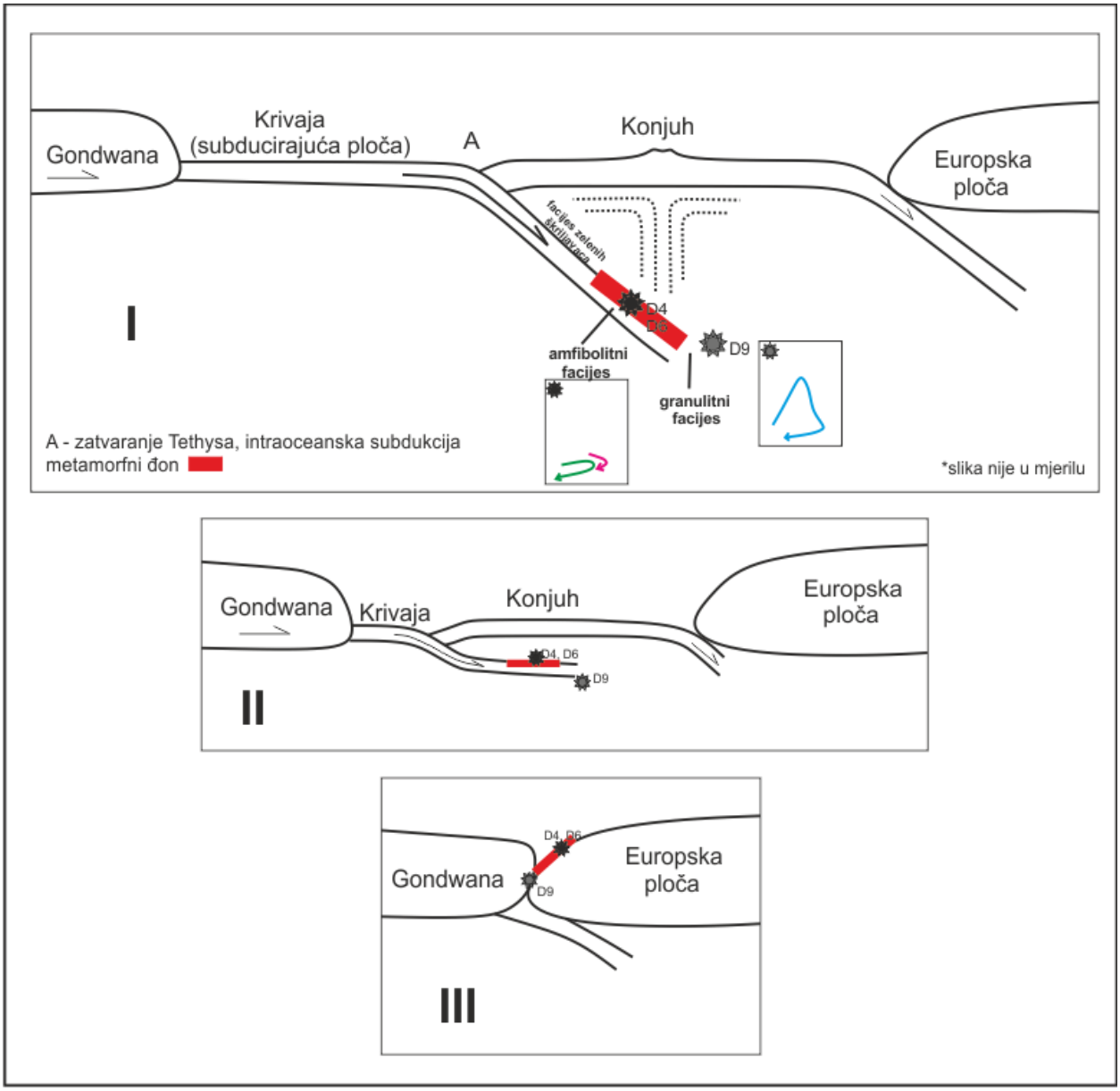
Slika 30. Dijagram P-T evolucijskih puteva za uzorke amfibolita D4, D6 i uzorak granulita D9.

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 °C/km, padaju temperatura i tlak. Kod uzorka D6 riječ je o prijelazu iz amfibolitnog u granulitni facijes pri porastu temperature 30 °C/km te povratak u amfibolitni facijes uz pad tlaka pri gradijentu -12 °C/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 ~40 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 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 metamorfnog đona iz Dinaridske ofiolitne zone. Uzorci su prikupljeni na području Duboštice 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 presjecištma 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 Fe-Ti oxides. American Mineralogist73, 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 Zentralbosnian. 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 Meramorphic 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): Uber 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 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 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 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.
- 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., Plümper, 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 hing-pressure m etapelites in the system KFMASH (K2O-FeO-MgO-Al2O3-SiO2-H2O) 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, Estern Australia. Journal of Meramorphic Geology 21, 455-468.
- Whitney, D.I., Evans, B.W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95, 185-187.