

Amfibolitne leće u filonitiziranim gnajsevima Krndije

Ostrelić, Damjan

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:123632>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geologije

**AMFIBOLITNE LEĆE U FILONITIZIRANIM GNAJSEVIMA
KRNDIJE**

Diplomski rad

Damjan Ostrelič

G-283

Zagreb, 2018.

AMFIBOLITNE LEĆE U FILONITIZIRANIM GNAJSEVIMA KRNDIJE

DAMJAN OSTRELIČ

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

Sažetak:

Istraživane amfibolitne leće uložene u filonitizirane paragnajseve Krndije pripadaju Psunjsko-kutjevačkom metamorfnom kompleksu slavonskih planina. Na terenu je prikupljeno sedam uzoraka amfibolita te dva uzorka filonitiziranih gnajseva. Metodama polarizacijske mikroskopije i rendgenske difrakcije određen je mineralni sastav i petrografskse karakteristike svih uzoraka, a kemijskim metodama emisijske i masene spektrometrije s induktivno spregnutom plazmom (ICP–ES i ICP–MS) određen je kemijski sastav pet odabranih uzoraka amfibolita i jednog uzorka filonitiziranog paragnajsa.

Uzorci amfibolita su prema petrografskim karakteristikama određeni kao trakasti i „porfiroblastični“ amfiboliti, dok su gnajsevi određeni kao filonitizirani paragnajsevi. Na temelju kemijskog sastava protoliti amfibolita određeni su kao toleitijski bazalti do bazalt-andeziti zalučnog bazena, a protoliti paragnajseva kao sedimentne stijene nastale trošenjem felzičnih stijena kalcijsko–alkalijske magmatske serije peraluminijskog karaktera nastalih na aktivnom kontinentalnom rubu.

Predloženi petrogenetski model protolitnih stijena je zalučni bazen iza zone subdukcije u kojem se taložio klastični materijal deriviran iz kontinentalne kore istovremeno s povremenim izljevima bazaltnih lava.

Ključne riječi: amfibolit, filonit, paragnajs, bazalt, bazaltni andezit, subdukcijska zona, vulkanski luk, zalučni bazen, metamorfizam, Krndija

Rad sadrži: 76 stranica, 3 tablice, 54 slike i 81 referencu

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Mentor: Doc. dr. sc. Vesnica Garašić
Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Vesnica Garašić, RGNF
Prof. dr. sc. Dunja Aljinović, RGNF
Prof. dr. sc. Bruno Tomljenović, RGNF

Datum obrane: 7. rujna 2018.

AMPHIBOLITE LENSES IN PHYLLONITIZED PARAGNEISSES OF MT. KRNDIJA

DAMJAN OSTRELIČ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mineralogy, Petrology and Mineral Deposits
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract:

The investigated amphibolite lenses in phyllonitized paragneisses of Mt. Krndija are a part of the Psunj-kutjevo metamorphic complex of the Slavonian mountains. Seven amphibolite field samples were taken along with two samples of paragneisses. Using polarised microscopy and X-ray diffraction, the mineral composition and petrographic characteristics of all samples were determined. Chemical composition of five selected amphibolite samples and one paragneiss sample were obtained using mass and emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP–MS and ICP–ES).

The investigated amphibolites were determined as lined or „porphyroblastic“ amphibolites based on their petrography, while the gneiss samples were determined as phyllonitized paragneisses. Based on the chemical composition of amphibolites, their protolith was determined as tholeiitic basalt to andesite–basalt formed in a back arc basin. The protolith of paragneisses was determined as a sedimentary rock formed by erosion of calc–alkali felsic rocks of peraluminous character at an active continental margin.

The proposed petrogenetic model of protolith rocks is a back arc basin in which siliciclastic material of continental origin was being deposited simultaneously with periodic effusions of basaltic lavas.

Keywords: amphibolite, phyllonite, paragneiss, basalt, basaltic andesite, subduction zone, volcanic arc, back arc basin, metamorphism, Mt. Krndija

Thesis: contains 76 pages, 3 tables, 54 figures and 81 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Supervisor: Assistant Professor Vesnica Garašić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Vesnica Garašić, PhD

Full Professor Dunja Aljinović, PhD

Full Professor Bruno Tomljenović, PhD

Date of defense: September 7, 2018.

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE KRNDIJE	5
3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE TERENA	6
4. PREGLED GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA	12
5. ANALITIČKE METODE ISTRAŽIVANJA	15
5.1. METODA POLARIZACIJSKE MIKROSKOPIJE	15
5.2. METODA RENDGENSKE DIFRAKCIJE	15
5.3. METODE KEMIJSKE ANALIZE	16
6. REZULTATI ANALITIČKIH METODA ISTRAŽIVANJA	18
6.1. PETROGRAFSKE ZNAČAJKE STIJENA	18
6.1.1 Uzorak KR-1A – Trakasti amfibolit	18
6.1.2. Uzorak KR-1B – „Porfiroblastični“ amfibolit	20
6.1.3. Uzorak KR-1C – Filonit	22
6.1.4. Uzorak KR-1D – Trakasti amfibolit	24
6.1.5. Uzorak KR-1E – Amfibolit	27
6.1.6. Uzorak KR-1F – Trakasti amfibolit	29
6.1.7. Uzorak KR-2A – Filonitizirani paragnajs	31
6.1.8. Uzorak KR-2B – „Porfiroblastični“ amfibolit	33
6.1.9. Uzorak KR-2C – Trakasti „porfiroblastični“ amfibolit	35
6.2. REZULTATI RENDGENSKE DIFRAKCIJSKE ANALIZE	38
6.3. KEMIJSKI SASTAV STIJENA	39
6.3.1. Sadržaj glavnih elemenata	39
6.3.2. Koncentracije elemenata u tragovima	41
7. DISKUSIJA	49
7.1. NAČIN POJAVLJIVANJA I PETROGRAFSKE ZNAČAJKE STIJENA	49
7.2. KEMIJSKA KLASIFIKACIJA STIJENA	50
7.3. ODREĐIVANJE MAGMATSKE SERIJE	52
7.4. ODREĐIVANJE GEOTEKTONSKOG POLOŽAJA	56
7.4.1 Amfiboliti	56
7.4.2 Filonitizirani paragnajs	62
7.4.3 Petrogenetski model	65
8. ZAKLJUČAK	68
9. ZAHVALE	69
10. POPIS LITERATURE	72

Popis tablica:

Tablica 6-1. Rezultati rendgenske difrakcijske analize na prahu	38
Tablica 6-2. Koncentracije glavnih elemenata u analiziranim uzorcima (tež. %).	39
Tablica 6-3. Koncentracije elemenata u tragovima (ppm).	43
Tablica 6-4. Koncentracije elemenata rijetkih zemalja (ppm).	43

Popis slika:

Slika 1-1. Prva točka uzorkovanja duž ceste Bektež–Našice.	2
Slika 1-2. Druga točka uzorkovanja duž ceste Bektež–Našice	3
Slika 1-3. Odlomljeni komad amfibolita u napuštenom kamenolomu	4
Slika 2-1. Geografski položaj slavonskih planina.....	5
Slika 3-1. Pojednostavljena geološka karta slavonskih planina s pozicijom tektonske mega jedinice Tisije unutar Panonskog bazena	7
Slika 3-2. Isječak osnovne geološke karte list Orahovica s označenim točkama uzorkovanja (Jamičić & Brkić, 1987).	11
Slika 6-1. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1A; N)	19
Slika 6-2. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1A; N+)	19
Slika 6-3. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR–1B; N).....	21
Slika 6-4. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR–1B; N+).....	21
Slika 6-5. Mikrofotografija filonita (uzorak KR–1C; N).....	23
Slika 6-6. Mikrofotografija filonita (uzorak KR–1C; N+).....	23
Slika 6-7. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1D; N+).....	24
Slika 6-8. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1D; N+).....	26
Slika 6-9. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1D; N)	26
Slika 6-10. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR–1E; N).	28
Slika 6-11. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR–1E; N+).....	28
Slika 6-12. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1F; N).....	30
Slika 6-13. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR–1F; N+).....	30
Slika 6-14. Mikrofotografija filonitiziranog paragnajsa (uzorak KR–2A; N)	32
Slika 6-15. Mikrofotografija filonitiziranog paragnajsa (uzorak KR–2A; N+)	32
Slika 6-16. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR–1B; N).....	34
Slika 6-17. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR–1B; N)	34

Slika 6-18. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-1B; N+).....	35
Slika 6-19. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR-2C; N)...	36
Slika 6-20. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-2C; N).....	37
Slika 6-21. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-2C; N+).....	37
Slika 6-22. Spider dijagram istraživanih amfibolita, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit iz Sun (1980).	45
Slika 6-23. Spider dijagram istraživanih filonitiziranog paragnajsa, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit iz Sun (1980).....	45
Slika 6-24. REE dijagram istraživanih amfibolita, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit prema Sun & McDonough (1989).	47
Slika 6-25. REE dijagram istraživanih filonitiziranog paragnajsa, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit prema Sun & McDonough (1989).	48
Slika 7-1. TAS dijagram prema LeBas i dr. (1986).	51
Slika 7-2. Zr/Ti – Nb/Y dijagram prema Pearce (1996).	52
Slika 7-3. Alkalijske – SiO ₂ dijagram prema Irvine & Baragar (1971).....	52
Slika 7-4. Diskriminacijski dijagram K ₂ O–SiO ₂ prema La Maitre i dr. (1989).....	53
Slika 7-5. AFM dijagram prema Irvine & Baragar (1971).	54
Slika 7-6. Dijagram FeO*/MgO–SiO ₂ prema Miyashiro (1975).....	54
Slika 7-7. Diskriminacijski dijagram La/10–Y/15–Nb/8 prema Cabanis & Lecolle (1989) ...	55
Slika 7-8. Diskriminacijski dijagram Th–Hf/3–Nb/16 prema Wood (1980)	56
Slika 7-9. Diskriminacijski dijagram Th–Hf/3–Ta prema Wood (1980)	57
Slika 7-10. Diskriminacijski dijagram Th–Zr/117–Nb/16 prema Wood (1980).....	57
Slika 7-11. Diskriminacijski dijagram Th/Yb–Nb/Yb prema Pearce (2008)	58
Slika 7-12. Diskriminacijski dijagram Th/Yb–Ta/Yb prema Pearce (1983).....	59
Slika 7-13. Diskriminacijski dijagram K ₂ O–TiO ₂ –P ₂ O ₅ prema Pearce (1975).....	59
Slika 7-14. Diskriminacijski dijagram Zr/Y–Ti/Y prema Pearce & Gale (1977).....	60
Slika 7-15. Diskriminacijski dijagram Zr–Ti/100–Sr/2 prema Pearce & Cann (1973).....	61
Slika 7-16. Diskriminacijski dijagram V–Ti/1000 prema Shervais (1982).....	61
Slika 7-17. Rb–(Y+Nb) dijagram (Pearce i dr., 1984).....	62
Slika 7-18. Rb–(Yb+Ta) dijagram (Pearce i dr., 1984).	63
Slika 7-19. Nb–Y dijagram (Pearce i dr., 1984)	63

Slika 7-20. Ta-Yb dijagram (Pearce i dr., 1984).....	64
Slika 7-21. Dijagram $Al/(Na+K)$ - $Al/(Ca+Na+K)$ prema Maniar-Piccoli (1989).	64
Slika 7-22. Dijagram elemenata u tragovima prema Runick & Gao (2003).....	65
Slika 7-23. Predloženi petrogenetski model zalučnog bazena protolitnih stijena istraživanih amfibolita i paragnajseva.....	67

1. UVOD

Leće amfibolita uložene u filonitizirane paragnajseve Krndije lijepo su vidljive između ostalog na izdancima duž ceste Bektež-Našice, a u geološkoj literaturi pripisane su Psunjsko-kutjevačkom metamorfnom kompleksu. Taj kompleks, koji sadrži metamorfne stijene facijesa zelenih škriljavaca (metapelite i kloritne škriljavce) i amfibolitnog facijesa (gnajseve, granatne tinjčeve škriljavce, amfibolite, metagabre i mramore), lokalno je intrudiran granodioritima i plagiogranitima (Pamić, 1986; Pamić i dr., 1988, Pamić & Lanphere, 1991).

Do sada je bilo uvriježeno mišljenje da je Psunjsko-kutjevački kompleks formiran tijekom bajkalske orogeneze, te naknadno izmijenjen mlađim metamorfnim događajima (Jamičić, 1983, 1988). Recentna određivanja starosti su pokazala da su granatni tinjčevi škriljavci Kutjevačke rijeke nastali metamorfnim događajem na granici ordovicij-silur (Balen i dr., 2006), da je ortognajs Vetova, formiran u okviru kadoimijskog metamorfizma na sjevernom rubu Gondvane (Balen i dr., 2015), a da su kloritno-sericitni škriljavci Kutjevačke rijeke niskog stupnja metamorfizma, prosječne starosti od 109 ± 13 milijuna godina, te odgovaraju alpskom metamorfizmu vezanom za krednu koliziju jadranske i europske ploče (Balen i dr., 2018).

Detaljna petrografska i geokemijska istraživanja amfibolitnih leća i asociranih paragnajseva na istraživanom terenu nisu rađena, stoga su uzeti uzorci obiju vrsta stijena na dva izdanka duž ceste Bektež-Našice u blizini Lončarskog visa te u starom napuštenom kamenolomu nedaleko od iste ceste.

Na prvom izdanku duž ceste Bektež-Našice uzeti su uzorci amfibolita KR-1A, KR-1B i KR-1D te uzorak filonita KR-1C (Slika 1–1). Leće amfibolita uložene u filonitizirane paragnajseve su debljine 20 cm do 50 cm i širine do 2 m. Filonitizirani paragnajsevi imaju jasnu folijativnu teksturu subhorizontalne orijentacije. Neki amfiboliti imaju makroskopski izraženu trakastu teksturu, dok je kod nekih ona manje izražena. Nekih stotinjak metara južno uzeti su uzorci amfibolita KR-1E i KR-1F (Slika 1–2). U starom, napuštenom kamenolomu uzeti su uzorci amfibolita KR-2A i KR-2B te uzorak filonitiziranog paragnajsa KR-2C (Slika 1–3).

Cilj ovog rada je napraviti detaljnu petrografsku analizu amfibolita i filonitiziranih paragnajseva te izraditi geokemijske analize koje između ostalog uključuju i elemente u tragovima zajedno s elementima rijetkih zemalja, a koje će poslužiti kao podloga za

klasifikaciju protolita istraživanih metamorfnih stijena, određivanje karaktera magmatske serije, determinaciju geotektonske pozicije formiranja protolita te konstrukciju petrogenetskog modela.



Slika 1-1. Prva točka uzorkovanja duž ceste Bektež–Našice. Leća amfibolita uložena u paragnajseve okonturena je crvenom iscrtkanom linijom.



Slika 1-2. Druga točka uzorkovanja duž ceste Bektež–Našice. Amfibolitne leće uložene u paragnajseve okonturene su crvenom iscrtkanom linijom.



Slika 1-3. Odlomljeni komad amfibolita u napuštenom kamenolomu. Crvenom linijom označen je kontakt između „porfiroblastičnih“ amfibolita (iznad linije) i trakastih amfibolita (ispod linije).

2. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE KRNDIJE

Krndija je smještena na granicama triju županija, Virovitičko–podravske, Osječko–baranjske i Požeško–slavonske županije. Nalazi se južno od gradova Orahovice i Našica te sjeverno od Požege i Kutjeva. Zapadno od Krndije su planine Papuk i Psunj, a južno Požeška gora i Dilj gora te zajedno čine planinski okvir Požeške kotline (Slika 2-1) kroz koju teče 89 km duga rijeka Orljava.

Zapadnu granicu Krndije predstavlja planinski prijevoj između vrha Češljakovački vis na Papuku i vrha Kapovca na Krndiji. Prema istoku, Krndija postupno prelazi u ravnicu u blizini Đakova, a od Dilj gore na jugoistoku odijeljena je rijekom Londžom.

Najviši vrh Krndije je Kapovac visine 792 metara. Nalazi se u njenom sjeverozapadnom dijelu u Požeško–slavonskoj županiji, na samoj granici s Osječko–baranjskom županijom. Petrov vrh predstavlja njezin najviši vrh u Osječko–baranjskoj županiji, visok 701 metar.

Zapadni dijelovi planine Krndije dio su parka prirode Papuk. Vegetaciju Krndije pretežito predstavljaju hrastove i bukove šume. Kutjevo, najveće naselje u blizini s 6247 stanovnika, leži na južnoj padini Krndije (Državni Zavod za Statistiku, 2011).



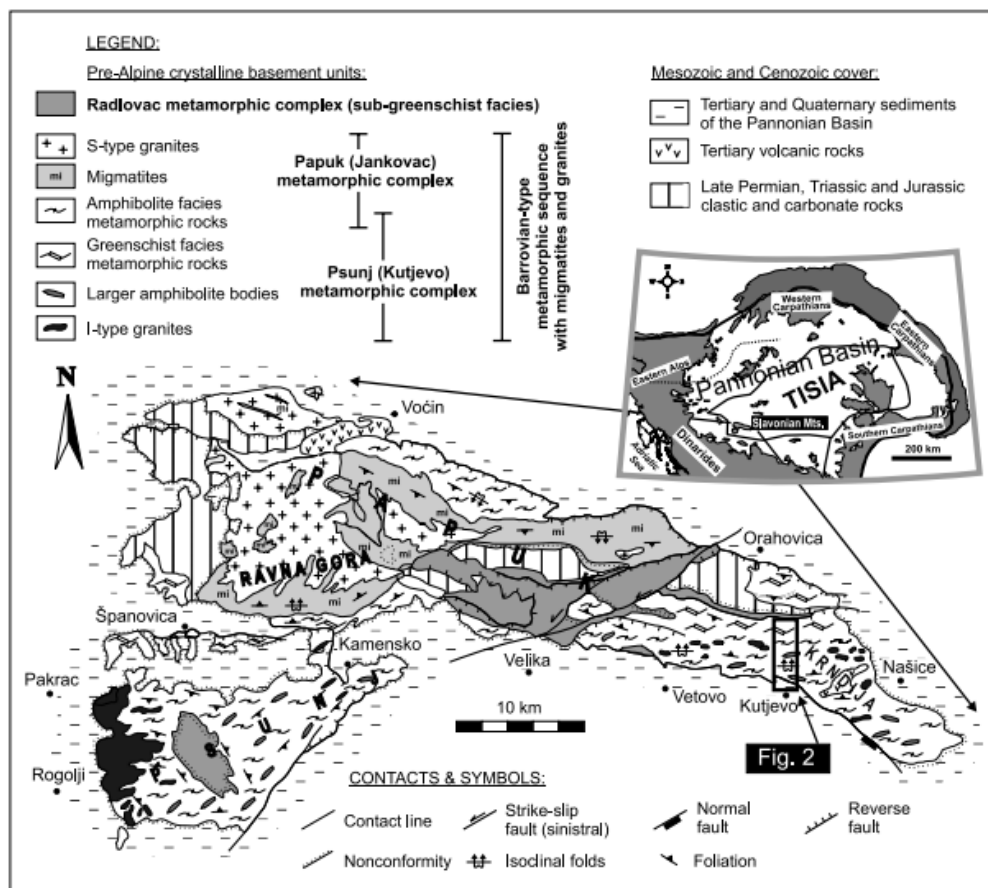
Slika 2-1. Geografski položaj slavonskih planina (karta preuzeta s <https://upload.wikimedia.org>).

3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE TERENA

Slavonske planine smještene su u južnom dijelu Panonskog bazena, a Krndija zajedno s Papukom čini njihov sjeverni dio. Strukturni položaj slavonskih planina i njihova pripadnost regionalnim tektonskim jedinicama su dosad različito interpretirani. Stariji autori interpretirali su ih kao „orijentalno kopno“ (Gorjanović–Kramberger, 1907), kao dio unutrašnje zone dinarskih horstova (Petković, 1961; Dimitrijević, Grubić & Sikošek, 1972; Vukašinović, 1976), kao dio „Panonske mase“ (Roksandić, 1969; Herak, 1969) ili pak kao dio slavonsko–sremskog bloka, odnosno eksterne Vardarske podzone (Dimitrijević, 1974).

Miladinović (1974) je prvi autor koji je slavonske planine interpretirao kao „panonsku navlaku“, koju osim njih čine i Medvednica te Fruška gora. Njegovom razmišljanju pridružio se Jamičić (1983), koji je izdizanje i navlačenje paleozojskih i mezozojskih kompleksa slavonskih planina vremenski vezao za miocen.

U novije vrijeme prevladava mišljenje da su slavonske planine, uključujući Krndiju, dio tektonske mega jedinice Tisije, koja se sastoji od pred-neogenske osnove centralnog i jugoistočnog dijela Panonskog bazena (Csontos, 1995; Pamić i dr., 2002), a što je prikazano na Slici 3–1, preuzetoj iz rada Balen i dr. (2006). Ova mega jedinica predstavlja fragment litosfere koji je odvojen od južnog dijela Europske ploče u srednjoj juri (Geczy, 1973), prilikom otvaranja istočnog ogranka alpskog Tetisa (Schmid i dr., 2008), a njen današnji položaj rezultat je kompleksnih tektonskih pokreta i višestrukih rotacija u mezozoiku i kenozoiku (Csontos, 1995; Fodor i dr., 1999; Csontos & Voros, 2004).



Slika 3-1. Pojednostavljena geološka karta slavonskih planina s pozicijom tektonske mega jedinice Tisije unutar Panonskog bazena (iz Balen i dr., 2006, prema Jamičić i dr., 1986; Jamičić & Brkić, 1987; Jamičić, 1988; Pamić & Lanphere, 1991).

Kristalinske stijene slavonskih planina bile su zahvaćene višestrukim metamorfnim događajima (Jamičić, 1983), a najviše su zahvaćene događajima hercinske orogeneze tijekom devona i karbona (Pamić & Lanphere, 1991; Pamić, 1998; Haas i dr., 2001; Pamić i dr. 2002; Haas & Pero, 2004). Jamičić (1983, 1988) je podijelio slavonske planine na tri tektono–metamorfne jedinice: (1) Psunjsko-kutjevački kompleks, za koji smatra da je formiran tijekom bajkalske orogeneze te naknadno izmijenjen mlađim metamorfnim događajima; (2) Papučko-jankovački kompleks, zahvaćen metamorfozom tijekom kaledonske orogeneze, i (3) Radlovački kompleks, koji predstavlja nisko–metamorfnu zonu formiranu tijekom hercinske orogeneze.

Psunjsko-kutjevački kompleks sadrži metamorfne stijene niskog do srednjeg stupnja metamorfizma, facijesa zelenih škriljavaca – metapelite i kloritne škriljavce te metamorfne stijene amfibolitnog facijesa – paragnajseve, granatne tinjčeve škriljavce, amfibolite, metagabre i mramore. Cijeli kompleks lokalno je intrudiran granodioritima i plagiogranitima (Pamić, 1986; Pamić i dr., 1988; Pamić & Lanphere, 1991).

Proučavajući tinjčeve škriljavce, gnajseve i amfibolite iz područja Kutjevačke rijeke, područja koje se pripisuje Psunjsko-kutjevačkom kompleksu, Balen i dr. (2006) su zaključili da najviše dosegnuti stupanj metamorfizma odgovara amfibolitnom facijesu, s temperaturama od 600–650°C i tlakovima od 8–11 kbar. Na temelju radiometrijskog datiranja monacita u granatnim tinjčevim škriljancima (444 ± 19 i 428 ± 25 milijuna godina) isti autori su mišljenja da se metamorfni događaj odigrao na granici ordovicij–silur.

Balen i dr. (2013) su istražujući kloritoidne škriljavce Kutjevačke rijeke za koje se smatralo da označavaju prijelaznu zonu, vjerojatno gornjodevonske starosti, koja dijeli stariji Psunjsko-kutjevački kompleks od permo-trijaskih sedimentnih stijena (Jamičić i dr., 1986), dobili U-Th-Pb metodom na ksenotimu starost od 120 ± 35 milijuna godina, zbog čega su zaključili da je alpski metamorfizam imao značajniji utjecaj na evoluciju južnog dijela Tisiye nego što se do tada mislilo. Isti autori su odredili da je vrhunac metamorfizma dosegnut na tlaku od 3.5 do 4 kbar i temperaturama od 340–380°C, pri čemu kemizam kloritoidnih škriljavaca ukazuje da su njihovi protoliti bili felzične stijene gornje kontinentalne kore, najvjerojatnije felzične stijene Papučko-jankovačkog kompleksa.

Na temelju U-Th-Pb datiranja monacita proučavajući ortognajs iz najstarijeg dijela metamorfnog kompleksa na Papuku (Vetovo) Balen i dr. (2015) su zaključili da ortognajs čuva jasne dokaze o srednjem stupnju metamorfizma kristalinske podloge Panonskog bazena u ranom paleozoiku (528 ± 7 milijuna godina), i pripisali su ga kadomijskom metamorfizmu na sjevernom rubu Gondwane. Protolit ortognajsa je bila kalcijsko-alkalijska do visoko K-kalcijsko-alkalijska peraluminijaska magmatska stijena kore (diorit) formirana na aktivnom kontinentalnom rubu. Balen i dr. (2015) su zaključili da je metamorfizam uzrokovan krustalnim zadebljanjem kao posljedicom kolizije Gondvane i mikrokontinenta, poslije subdukcije oceanske kore (Prototetisa). Ortognajs, koji je dio variscijskog kompleksa, a danas je dio Tisiye, je prema autorima nakon metamorfizma ekshumiran blizu površine, stoga hercinski i alpski tektonometamorfni događaji nisu na njemu ostavili značajnijeg traga.

Međutim, najnovija istraživanja kloritnih i kloritno-sericitnih škriljavaca niskog stupnja metamorfizma iz područja Kutjevačke rijeke i Vranova (Balen i dr., 2018), a za koje se do tada smatralo da pripadaju prekambrijskom odnosno staropaleozojskom metamorfizmu, su pokazala da je vrhunac metamorfizma dosegnut na tlaku od 4.6 do 6 kbar, i temperaturi od 445–465°C. Na temelju datiranja monacita u kloritnim i kloritno-sericitnim škriljancima

Balen i dr. (2018) su odredili prosječnu starost od 109 ± 13 milijuna godina, što upućuje na alpski metamorfizam i povezali ga s krednom kolizijom Jadranske i Europske ploče. Isti autori su istraživši kemizam ovih stijena zaključili da su protoliti istraženih škriljavaca bili sedimenti nastali trošenjem felzičnih stijena na aktivnom kontinentalnom rubu, ali da u odnosu na prethodno istražene kloritoidne škriljce predstavljaju ostatke niže strukturne jedinice.

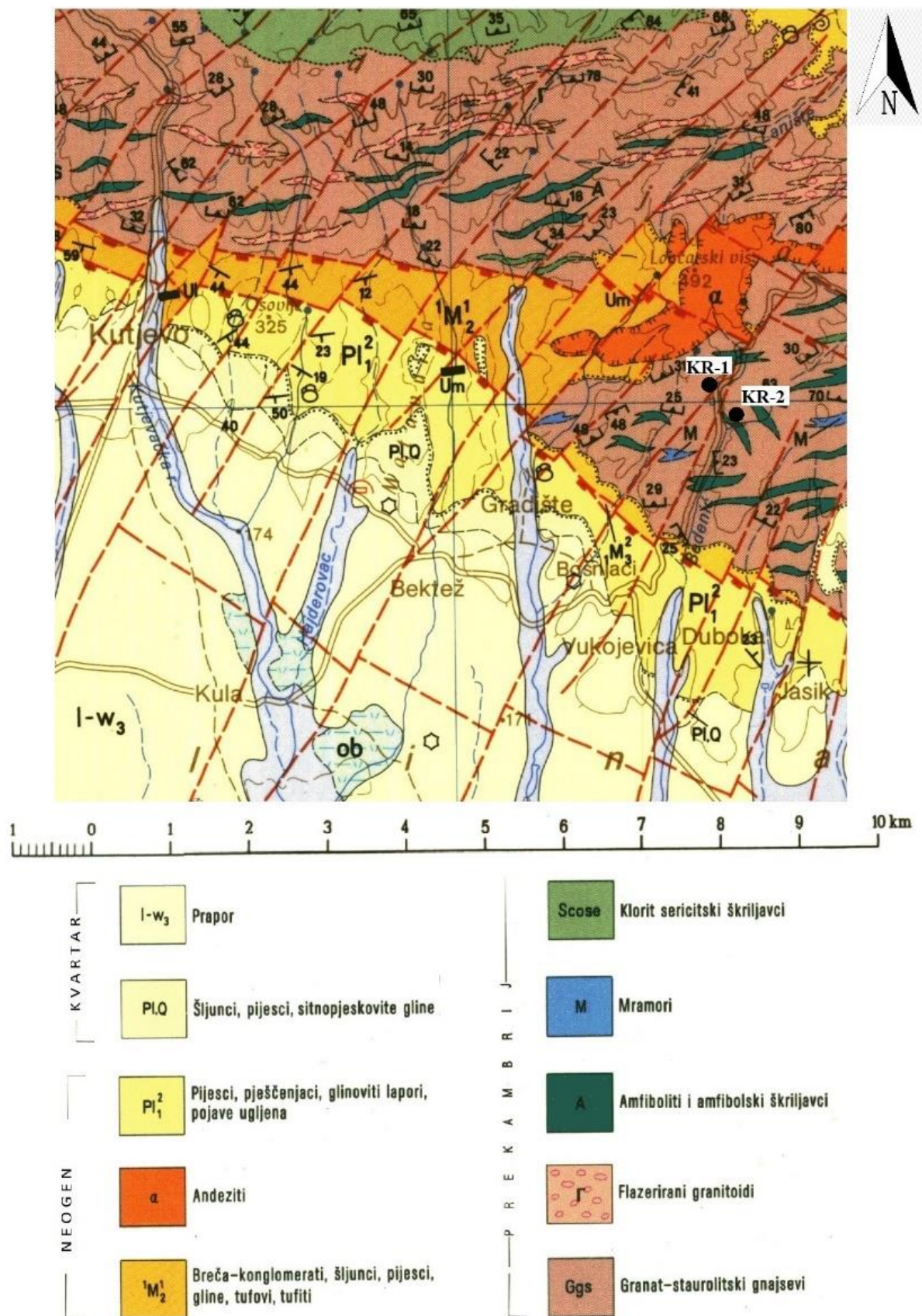
Papučko-jankovački metamorfni kompleks karakteriziran je srednjim do visokim stupnjem metamorfizma, pojavom S-tipa granita i pegmatita, koji su okruženi migmatitima te metamorfnim stijenama amfibolitnog facijesa, granatnim amfibolitima, paragnajsevima i tinjčevim škriljavcima (Pamić, 1986; Pamić i dr., 1988; Pamić & Lanphere, 1991).

Radlovački kompleks sadrži nemetamorfozirane stijene i stijene vrlo niskog stupnja metamorfizma podfacijesa zelenih škriljavaca, metagrauvake, metakonglomerate, slejtove i filite, koji su lokalno intrudirani metadijabazima i metagabrima (Pamić & Jamičić, 1986, Jamičić i dr., 1988).

Biševac i dr. (2013) su analizirajući metapelite i metapsamite Radlovačkog kompleksa na temelju sadržaja teških minerala (apatit, cirkon, turmalin, rutil, epidot/coisit, monacit i titanit) i U-Th-Pb datiranja na monacitima zaključili da su glavni izvor Radlovačkih metasedimenata bile felzične magmatske stijene variscijske starosti (330 ± 10 milijuna godina). Isti autori su na temelju analiza elemenata u tragovima poput La, Ce, Nd, Y Th, Zr, Hf, Nb, Ti i Sc u istraživanim sedimentima, koji su se projicirali u područje kontinentalnih otočnih lukova, mišljenja da je sedimentacijski bazen formiran na dobro razvijenoj kontinentalnoj kori ili tankom kontinentalnom rubu, te da su granitoidi, migmatiti i migmatitski gnajsovi Papučko-jankovačkog kompleksa bili protolit detritusa u istraživanim metasedimentima.

Područje Krndije (slika 3–2) izgrađeno je u najvećem dijelu od stijena Psunjsko-kutjevačkog metamorfnog kompleksa u centralnom i jugoistočnom dijelu (Jamičić, 1983; Jamičić, 1988). Ovaj prekambrijski kompleks sastoji se od leća amfibolita i amfibolskih škriljavaca, mramora i grafitnih škriljavaca uloženi u gnajseve, te proboja granita i pegmatita (Jamičić & Brkić, 1987). Manji dio Krndije, i to u njezinom sjevernom dijelu, izgrađuju metamorfne stijene Radlovačkog kompleksa (Jamičić, 1983; Jamičić, 1988). Mlađe stijene čine trijaski dolomiti i vapnenci te kvarcni pješčenjaci u sjevernom dijelu,

neogenski andeziti Lončarskog visa u središnjem dijelu te neogenski i kvartarni sedimenti u južnom dijelu Krndije (Jamičić & Brkić, 1987).



Slika 3-2. Isječak osnovne geološke karte list Orahovica s označenim točkama uzorkovanja (Jamičić & Brkić, 1987).

4. PREGLED GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA

Wodiczka (1855) je prvi vršio istraživanja kristalinskih stijena Papuka i Krndije te njegov rad čini prvi zapis o ovim stijenama.

Stur (1861, 1862) prvi opisuje mezozojske stijene ovog područja. Tako je u donji trijas svrstao i raznobojne škriljavce Papuka i Krndije, a srednjem i gornjem trijasu pridružio je sve vapnence i dolomite. Gnajseve i granite, koji leže ispod kristalinskih škriljavaca, smatra najstarijim stijenama ovog područja. Pilar (1875) je bio mišljenja da jače metamorfozirane stijene (gnajsevi) ne moraju biti starije od škriljavaca te je pretpostavio da starost svih metamorfita odgovara devon–karbonu.

Gorjanović–Kramberger (1897) je neke škriljavce na području Krndije uvrstio u donji trijas, a općenito smatra da su stijene višeg stupnja metamorfizma arhajske starosti, dok su one nižeg stupnja metamorfizma paleozojske starosti.

Prva geotektonska razmatranja o položaju i tektonskom razvoju slavonskih planina dali su Diener (1902), Poljak (1911) i drugi. Salopek (1914) je napisao sažet pregled dotadašnjih shvaćanja te prihvatio mišljenja o postojanju starog masiva, tzv. „Orijentalnog kopna“. Smatra da slavonsko gorje čini ostatak tog masiva, za razliku od Dienera i većine stranih istraživača koji smatraju da je ovo gorje sastavni dio Alpa.

Poljak (1912) je u okviru izrade geoloških karata svojim radom na Krndiji potvrdio Gorjanović–Krambergerov nalazak vrste *Daonella lommeli* te je na temelju ovog fosilnog nalaza istraživane naslage pridružio srednjem trijasu.

Koch (1919) je, za razliku od ranijih radova Stura (1861, 1862) u kojim je raznobojne škriljavce uvrstio u donji trijas, zaključio da su ove stijene paleozojske starosti.

Laskarev (1931) je metamorfni kompleks Papuka i Krndije smatrao produžetkom „požeške šarijaške ploče“ koji je navučen preko paleozojskih i mezozojskih stijena.

Petković (1932) je objavio list Orahovica na geološkoj karti Kraljevine Jugoslavije 1: 1,000 000.

Poljak (1923, 1934) je našao graptolite iz roda *Monograptus* u dolini potoka Radlovac, na temelju čega je odredio gornjosilursku starost filita u izmjeni s kvarcitima. Osim toga je na području Krndije istraživao sedimentne stijene trijasa, neogena i kvartara. Vapneno–

dolomitne naslage trijasa podijelio je prema starosti na anizičke, ladiničke i noričke. Neogenske naslage podijelio je na miocen, donji i gornji pont, a kvartarne naslage je opisao kao diluvijalne i aluvijalne.

Tajder (1947, 1955, 1956 i 1960) je petrografski istraživao eruptivne stijene s Lončarskog Visa te zapazio da su gnajsevi, graniti i srednjetrijaske naslage probijene efuzijama. U potoku Lipovac pronašao je vulkanske breče koje sadrže ulomke rudistnih vapnenaca što upućuje na postkredni vulkanizam.

Poljak (1951, 1952) je potvrdio gornjosilursku starost zona niskometamornih naslaga znatno većim brojem nalazišta graptolita i nalazom koralja iz porodice *Cyatoxonidae*. Dio kvarcita na Petrovom vrhu i Kapovcu svrstao je u perm.

Bolčić & Jovanović (1953, 1954) objavljuju pregled kamenoloma kod Bekteškog Gradišta.

Crnković i dr. (1961) dokazuju ladiničku starost karbonatnih naslaga na sjevernim padinama Krndije.

Golub & Marić (1968) su efuzivne stijene na Lončarskom Visu odredili kao kvarcni trahandezit. Smatraju da je mineralna parageneza ovih stijena nastala kao rezultat asimilacije i kontaminacije stranih stijena u ishodnoj magmi, koja je mogla biti bazaltskog, andezitobazaltskog ili trahibazaltskog sastava. Njihovo tumačenje suprotstavlja se razmišljanjima Kišpatića (1916) i Tajdera (1947), koji smatraju da je mineralna parageneza efuziva nastala samo kristalizacijskom diferencijacijom iz ishodne magme bazaltnog sastava.

Petković (1961) je smatrao da su slavonske planine dio unutrašnje zone dinarskih horstova. Sikošek & Medwednitsch (1962) te Dimitrijević, Grubić i Sikošek (1972) su bili istog mišljenja. S druge strane, Roksandić (1969) ih smatra dijelom „Panonske mase“, a granicu s Dinaridima postavlja na liniju Karlovac–Glina te dalje duž južnih podnožja Prosare i Motajice.

Jamičić (1976, 1979, 1980) je provodio strukturna istraživanja na Krndiji i Papuku te dokazao da su metamorfiti pretrpjeli dvostruko boranje i da ne pripadaju istom orogenetskom ciklusu, na temelju odnosa različitih lineacija.

Pamić (1989) je prikazao rezultate petroloških istraživanja progresivno metamorfoziranog kompleksa Krndije, za koji opisuje da je izgrađen od paragnajseva i tinjčevih škriljavaca s proslojcima amfibolitnih škriljavaca i mramora. Zaključio je da je metamorfni kompleks

nastao u uvjetima niskog i umjerenog stupnja metamorfizma te je izdvojio četiri metamorfne zone: klinocoisit–kloritnu, granat–biotitnu, granat–staurolitnu i disten–muskovitnu zonu.

Balen i dr. (2006) su istraživali tinjčeve škriljavce, gnajseve i amfibolite srednjeg stupnja metamorfizma na Krndiji te na temelju radiometrijskog datiranja monacita u granatnim tinjčevim škriljancima (444 ± 19 i 428 ± 25 milijuna godina) zaključili su da se metamorfni događaj odigrao na granici ordovicij–silur.

Balen i dr. (2013) su istraživanjem kloritoidnih škriljavaca Kutjevačke rijeke U-Th-Pb metodom na ksenotimu dobili starost od 120 ± 35 milijuna godina, zbog čega su zaključili da je alpski metamorfizam imao značajniji utjecaj na evoluciju južnog dijela Tisije nego što se do tada mislilo.

Biševac i dr. (2013) su analizirali metapelite i metapsamite Radlovačkog kompleksa te na temelju sadržaja teških minerala i U-Th-Pb datiranja monacita (330 ± 10 milijuna godina) zaključili da su glavni izvor Radlovačkih metasedimenata bile felzične magmatske stijene variscijske starosti, najvjerojatnije granitoidi, migmatiti i migmatitski gnajsovi Papučko-jankovačkog kompleksa.

Balen i dr. (2015) su iz ortognajsa iz najstarijeg dijela metamorfnog kompleksa na Papuku (Vetovo) izdvojili Ce-bogate monacite iz čijih su jezgara dobili starosti od 528 ± 7 i 465 ± 7 milijuna godina, zbog čega su zaključili da istraživani ortognajs čuva jasne dokaze o srednjem stupnju metamorfizma kristalinske podloge Panonskog bazena u ranom paleozoiku i pripisali su ga kadomijskom metamorfizmu na sjevernom rubu Gondwane. Isti autori su mišljenja da je ortognajs nakon metamorfizma ekshumiran blizu površine, stoga hercinski i alpski tektonometamorfni događaji nisu na njemu ostavili značajnijeg traga.

Balen i dr. (2018) su istraživali i kloritne i kloritno-sericitne škriljavce niskog stupnja metamorfizma iz područja Kutjevačke rijeke i Vranova, za koje se do tada smatralo da pripadaju prekambrijskom odnosno staropaleozojskom metamorfizmu, te ustanovili na temelju datiranja monacita prosječnu starost od 109 ± 13 milijuna godina. Autori su zaključili da ove starosti markiraju alpski metamorfizam vezan za krednu koliziju Jadranske i Europske ploče.

5. ANALITIČKE METODE ISTRAŽIVANJA

U okviru izrade ovog rada korištene su metode polarizacijske mikroskopije, rendgenske difrakcije na prahu, metoda atomske emisijske spektroskopije s induktivno spregnutom plazmom (ICP – AES) i metoda masene spektroskopije s induktivno spregnutom plazmom (ICP – MS).

5.1. METODA POLARIZACIJSKE MIKROSKOPIJE

Polarizacijska mikroskopija kao temeljna petrološka i mineraloška metoda omogućuje nedestruktivno određivanje modalnog mineralnog sastava stijena na temelju razlika u optičkim svojstvima minerala. Osim toga, ona daje uvid u strukturne značajke stijena, genezu minerala i postkristalizacijske procese. Priprema uzoraka za mikropetrografsku analizu izvodi se na način da se prvo dijamantnom pilom uzorci stijena režu na tanke pločice, koje se potom lijepe na stakalca pomoću kanadskog balzama. Nakon toga slijedi poliranje pločica prahovima različite granulacije do debljine 30 μm što je dovoljno mala debljina pločica da kroz nju prolazi svjetlost mikroskopa. U završnoj fazi pripreme mikroskopskog preparata, na pločice se lijepi pokrovno stakalce pomoću kanadskog balzama.

Svih devet terenskih uzoraka analizirano je polarizacijskim mikroskopom pri čemu je za svaki uzorak određen modalni mineralni sastav i struktura stijene te su na temelju tih podataka određeni nazivi stijena. Osim toga, pomoću mikropetrografske analize odabrano je šest najmanje alteriranih uzoraka za daljnu kemijsku i rendgensku analizu (KR–1B, KR–1E, KR–1F, KR–2A, KR–2B i KR–2C). Priprema mikroskopskih preparata i njihova analiza provedena je u Zavodu za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Model korištenog polarizacijskog mikroskopa je Leica Microsystem 020-522 101 DM/LSP, a fotoaparatom Canon EOS 1610D izrađene su mikrofotografije uzoraka.

5.2. METODA RENDGENSKE DIFRAKCIJE

Rendgenska difrakcija na prahu predstavlja nedestruktivnu metodu kojom se određuje mineralni sastav stijena. Uzorak prije analize mora biti smrvljen u prah te se pretpostavlja da su u tako sitnoj frakciji (optimalno 10^{-7} do 10^{-6} m) približno jednako zastupljene sve orijentacije pojedinih minerala. Na uzorak se projiciraju rendgenske zrake pod različitim

kutovima te se sukladno Braggovom zakonu za neke od upadnih kutova pojavljuju difrakcijski maksimumi karakteristični za pojedinu mineralnu fazu. Konačna difrakcijska slika predstavlja sumu svih difrakcijskih linija minerala u uzorku te se interpretira uspoređivanjem s difrakcijskim slikama pojedinačnih standardnih uzoraka. Rendgenska difrakcijska analiza provedena je za šest terenskih uzoraka (KR-1B, KR-1E, KR-1F, KR-2A, KR-2B i KR-2C) čime je određen njihov kvalitativni mineralni sastav. Uzorci su pripremljeni i analizirani u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a priprema je uključivala mljevenje uzoraka u prah pomoću ahatnog tarionika te sušenje uzoraka. Korišteni instrument za difrakcijsku analizu je Philipsov difraktometar s monokromatorom, Cu K α zračenje ($U = 40$ kV; $I = 35$ mA).

5.3. METODE KEMIJSKE ANALIZE

Kemijske analize odabranih uzoraka (KR-1B, KR-1E, KR-1F, KR-2A, KR-2B i KR-2C) napravljene su u laboratoriju Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. u Kanadi. Ukupni kemizam izabranih stijenskih uzoraka određen je metodom koja je uključila taljenje uzoraka pomoću litijevog borata te analizu tako oslobođenih elemenata pomoću masene i emisijske spektrometrije s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS/ES). Pri tome je metoda emisijske spektroskopije (ICP-ES) korištena za dobivanje koncentracija glavnih oksida i nekih elemenata u tragovima (Ni, Sc, Cu, Zn), a masena spektrometrija (ICP-MS) je bila glavna metoda za određivanje koncentracija elemenata u tragovima, poglavito elemenata rijetkih zemalja. Koncentracije ugljika i sumpora određene su Leco metodom.

Metoda masene spektroskopije koristi induktivno spregnutu plazmu argona, temperature 6000 – 10000 K, u cilju ioniziranja uzorka koji je prethodno otopljen u vrlo jakoj kiselini litijskog borata. Uzorak u ioniziranom stanju dolazi do masenog spektrometra koji različite ione razdvaja na temelju njihovog omjera mase i naboja. Odvojeni ioni dolaze do detektora i stvara se električni signal koji se uspoređuje sa standardnim uzorcima kako bi se odredila koncentracija atoma u uzorku. Kod metode atomske emisijske spektroskopije, argonska plazma također ionizira prethodno otopljeni uzorak i dovodi ga u pobuđeno energetska stanje. Prilikom hlađenja i vraćanja elektrona u osnovno energetska oslobađa se odnosno emitira višak energije u obliku fotonskog zračenja koje dolazi do spektrometra. Pojedinačni elementi određuju se na temelju karakterističnog emisijskog spektra, a intenzitet emitiranog zračenja proporcionalan je koncentraciji pojedinog elementa u

uzorku. Točan iznos koncentracija u uzorku dobiva se uspoređivanjem intenziteta zračenja sa standardnim uzorcima pojedinih elemenata. Uzorci su pripremljeni u laboratoriju Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a priprema je uključivala mljevenje uzoraka u prah pomoću ahatnog tarionika te sušenje uzoraka.

Danas su ove metode jedne od najčešće korištenih zbog svojih velikih brzina analize i niskih granica detekcije, koje iznose oko 0,01% za glavne elemente i 0,01 ppm za elemente u tragovima.

6. REZULTATI ANALITIČKIH METODA ISTRAŽIVANJA

6.1. PETROGRAFSKE ZNAČAJKE STIJENA

6.1.1 Uzorak KR-1A – Trakasti amfibolit

Glavni minerali u uzorku KR-1A su amfibol i plagioklas. U većoj količini prisutan je i kvarc. Akcesorni minerali su opaka faza, biotit i apatit, a kao rezultat retrogradne izmjene pojavljuje se titanit i sporadično klorit (Slike 6–1 i 6–2).

Amfibol u uzorku je hornblenda, koja je dobrim dijelom izmijenjena u aktinolit. Amfibol je prizmatskog do štapićastog habitusa, i odlikuje se pleokroizmom u svijetlozeleno maslinastoj do modrozelenoj boji. Prosječne dimenzije amfibola su od 0,1 do 0,65 mm. Amfibol je rijetko retrogradno izmijenjen u klorit. Štapići amfibola preferirano su orijentirani u trake. Između traka amfibola nalazi se sitnozrnati matriks sačinjen od plagioklasa i kvarca.

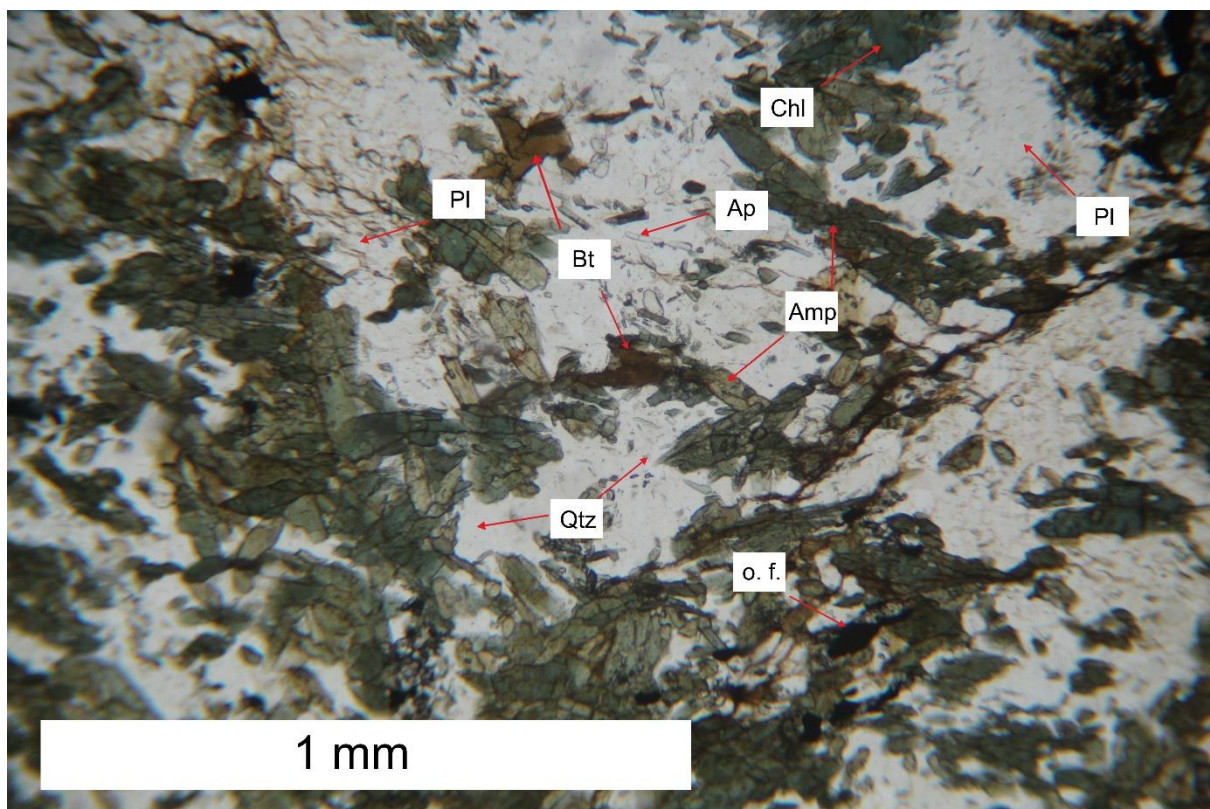
Blasti kvarca su dimenzija od 0,02 do 0,30 mm, svježiji i nepravilni, i uglavnom pokazuju undulozno potamnjene, za razliku od blasta plagioklasa koji su dimenzija od 0,06 do 0,20 mm, pravilnijeg oblika i češće sadrže uklopke drugih minerala, poput apatita. Plagioklasi ne pokazuju uvijek lamelarnu građu.

Opaka faza je karakterizirana nepravilnim zrnjem, dimenzija od 0,02 do 0,30 mm. Najvjerojatnije se radi o ilmenitu ili Ti-magnetitu, budući se na njezinim rubovima nalaze uvijek zrna titanita, koji se pojavljuje u obliku sitnog nepravilnog zrnja.

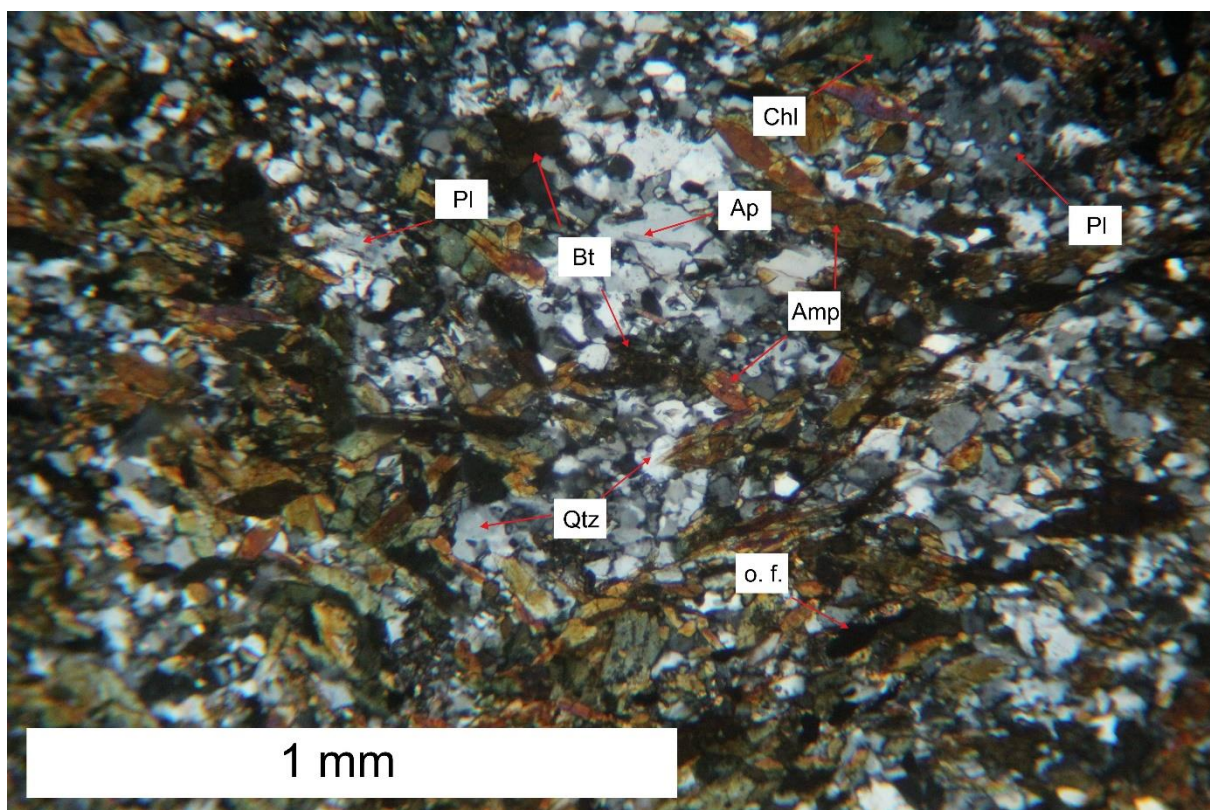
U uzorku se rijetko nalazi biotit u obliku sitnih listića dimenzija od 0,075 do 0,15 mm, a karakterizira ga pleokroizam u svijetlosmeđoj do smeđoj boji.

Apatit se javlja u obliku vrlo sitnih izduženih štapića u sitnozrnatom matriksu, najčešće kao uklopak u plagioklasu.

Uzorak ima trakastu teksturu, granonematoblastičnu strukturu i određen je kao **amfibolit**.



Slika 6-1. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1A; N). Amp-amfibol; Ap-apatit; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Chl-klorit; Bt-biotit.



Slika 6-2. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1A; N+). Amp-amfibol; Ap-apatit; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Chl-klorit; Bt-biotit.

6.1.2. Uzorak KR-1B – „Porfiroblastični“ amfibolit

Glavni minerali u uzorku KR-1B su amfibol i plagioklas. Akcesorni minerali su opaka faza, najvjerojatnije ilmenit, i apatit. Minerali koji nastaju kao produkt retrogradne izmjene su prehnit, coisit, klinocoisit, titanit i klorit (Slike 6–3 i 6–4).

Hornblenda, prosječnih dimenzija od 0,24 do 1,25 mm je glavni amfibol u ovom uzorku. Pokazuje pleokroizam u zeleno maslinastoj do modrozelenoj boji. Na rubovima je uočljiv prijelaz hornblende dobrim dijelom u štapićasti aktinolit. Mjestimice je uočljiva i retrogradna izmjena hornblende u klorit. Zrna amfibola pokazuju paralelnu do subparalelnu orijentaciju.

Plagioklas se pojavljuje u obliku velikih prizmatičnih zrna dimenzija od 3 do 9 mm, koji su međutim u velikoj mjeri retrogradno izmijenjeni u prehnit i coisit, te mjestimice i u klinocoisit, ili su rekristalizirali u sitnija zrna plagioklasa.

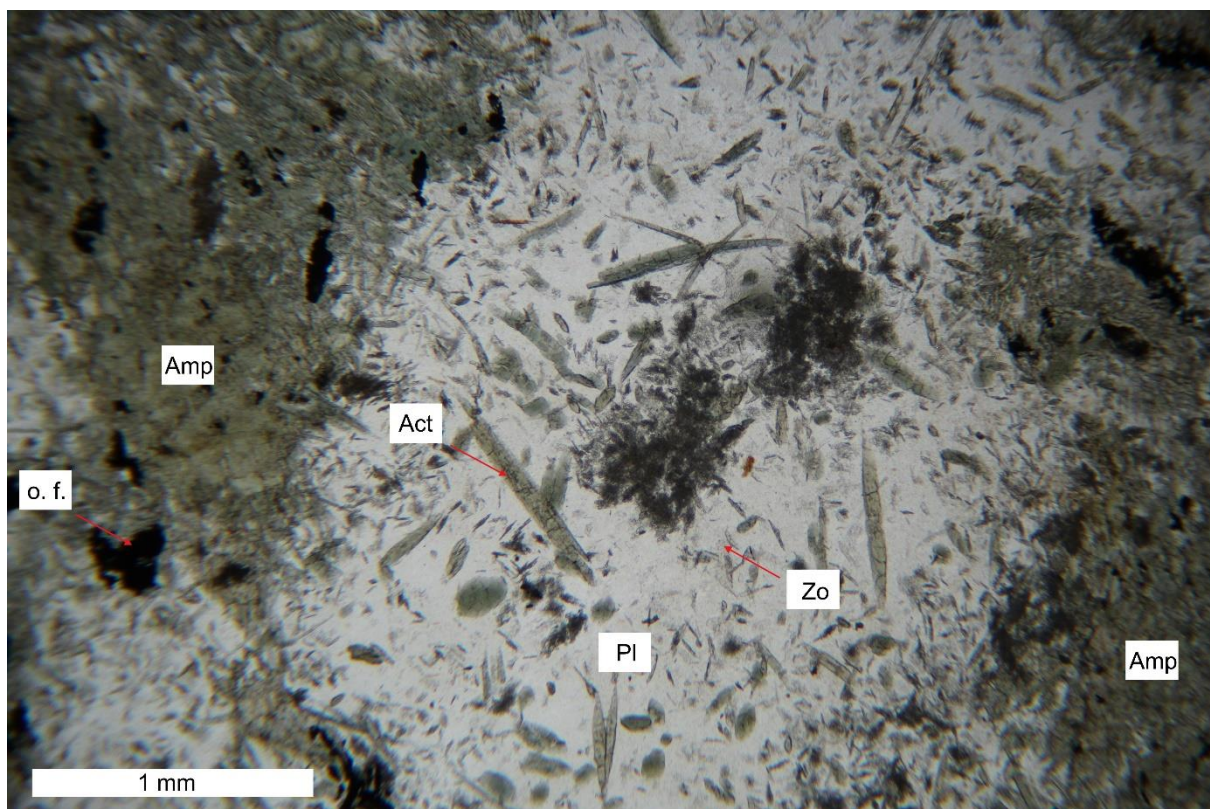
U uzorku je prisutan i opaki mineral u manjim količinama. Pojavljuje se u nepravilnom zrnju, mjestimice pokazuje „češljasti“ habitus, a mjestimice je na rubovima asociiran s titanitom, što sve ukazuje da se radi o ilmenitu.

Titanit je asociiran s opakom fazom i nalazi se u obliku nepravilnog sitnog zrnja.

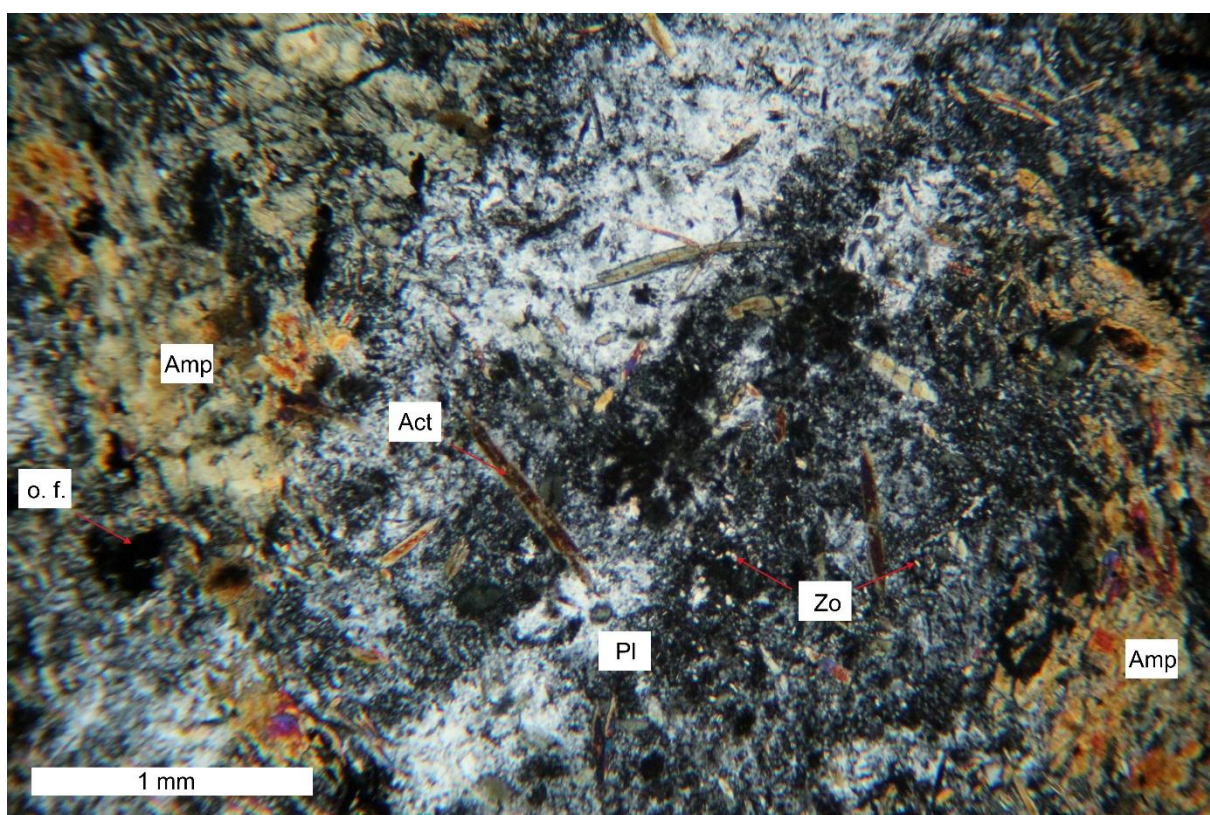
Apatit se pojavljuje samo u obliku izuzetno sitnih štapića u plagioklasu, pa je uočljiv samo kod najvećih povećanja.

Makroskopski gledajući, stijena ima reliktnu porfiroblastičnu strukturu, u kojoj plagioklasi predstavljaju porfiroblaste u sitnozrnatijskom matriksu izgrađenom od amfibola. Međutim, mikroskopska istraživanja jasno pokazuju da su sada pojedina zrna hornblende krupnozrnatijski minerali u odnosu na retrogradno izmijenjeni i rekristalizirani plagioklas.

Uzorak ima trakastu teksturu, reliktnu porfiroblastičnu strukturu i određen je kao **amfibolit**.



Slika 6-3. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR-1B; N). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Act-aktinolit; Zo-coisit.



Slika 6-4. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR-1B; N+). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Act-aktinolit; Zo-coisit.

6.1.3. Uzorak KR-1C – Filonit

Glavni minerali u uzorku KR-1C su kvarc, feldspat, tinjci i granat. Akcesorni minerali su cirkon i opaki mineral, dok su kao produkt retrogradne izmjene nastali sericit, epidot, klinocoisit i klorit (Slike 6–5 i 6–6).

Blasti kvarca, dimenzija od 0,08 do 0,48 su najzastupljeniji u uzorku i formiraju često odijeljene leće mozaične građe. Pokazuju unduluzno potamnjenje i mjestimice formiranje subdomena, ali i rekristalizirana zrna. Kvarcne segregirane leće su krupnozrnatije od dijelova uzorka u kojima dominiraju retrogradno izmijenjeni feldspati i tinjci.

Blasti feldspata su usitnjeni i intenzivno retrogradno izmijenjeni u sericit (najvjerojatnije K-feldspat), a sporadično i u blaste epidota i klinocoisita (najvjerojatnije plagioklas) te su asocirani s listićima biotita.

Biotit je dimenzija od 0,05 do 0,10 mm i pokazuje pleokroizam u svijetlosmeđoj do smeđoj boji. Listići su paralelno orijentirani. U velikoj mjeri biotit je retrogradno izmijenjen u klorit.

Granat se u uzorku pojavljuje kao sitni blast, dimenzija od 0,05 do 0,20 mm, pravilnih oblika.

Blasti epidota su dimenzija od 0,08 do 0,25 mm. Karakteriziraju ih visoke interferencijske boje i visok reljef.

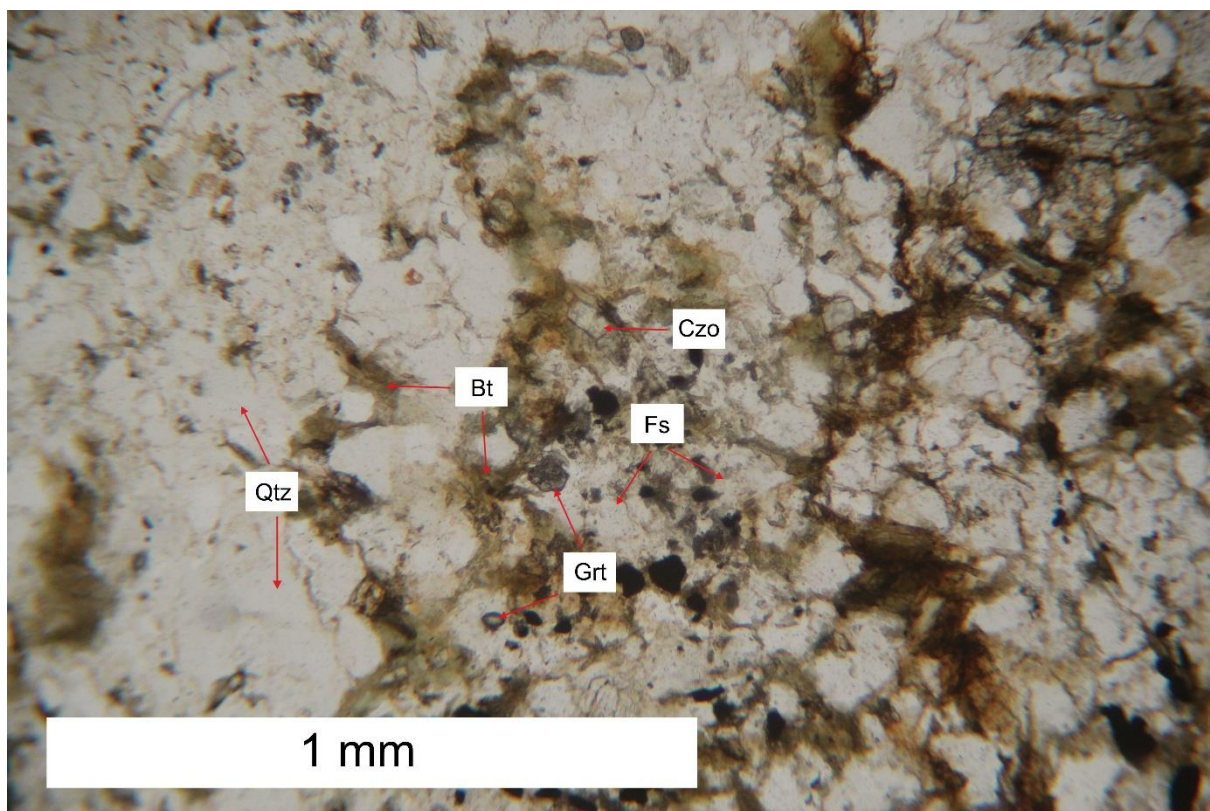
Opaki mineral je dimenzija od 0,05 do 0,35, a najvjerojatnije se radi o magnetitu ili ilmenitu.

Cirkon se javlja rijetko, u obliku vrlo sitnog zrnja, dimenzija od 0,10 do 0,15 mm.

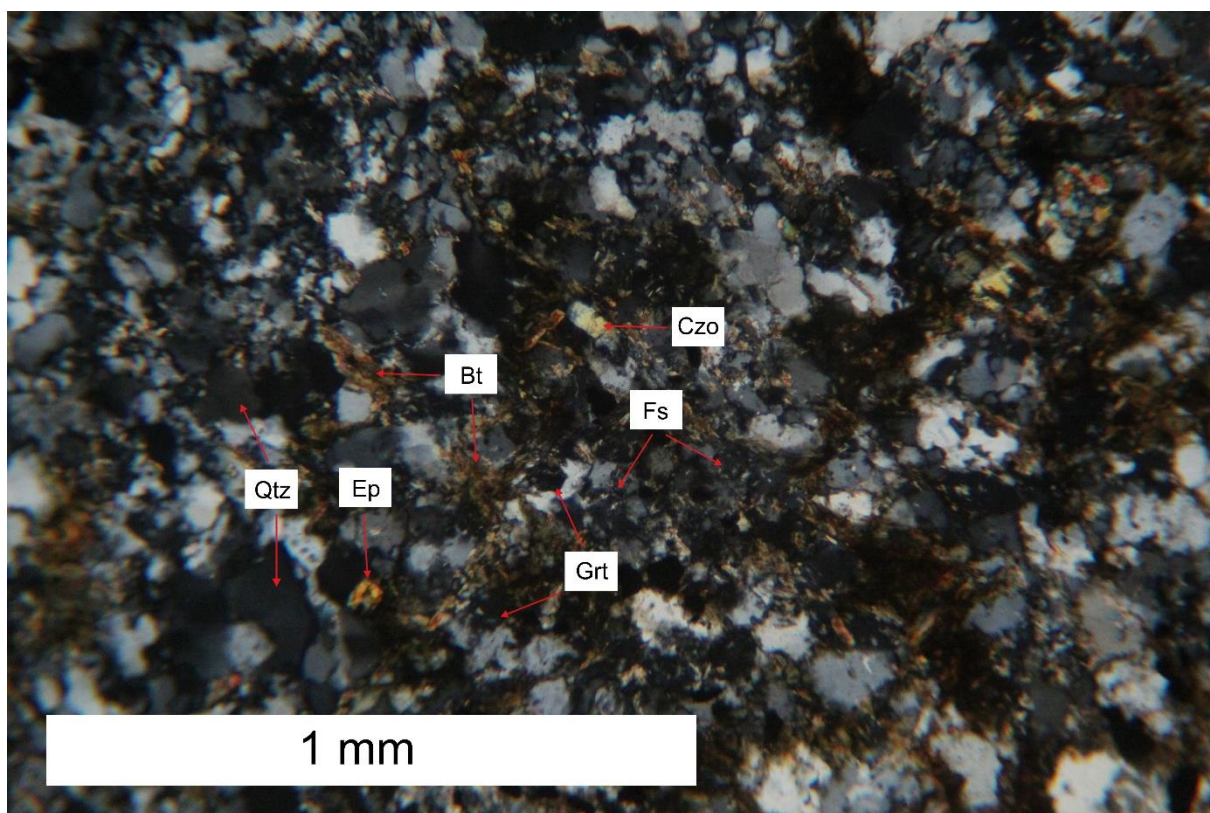
U uzorku je uočljiva izmjena dviju subparalelnih traka, od kojih jedna sadrži mozaično rekristalizirani kvarc, s rijetkim listićima biotita i zrnima granata, a druga usitnjene i intenzivno retrogradno izmijenjene feldspate u sericit i grupu epidota i klinocoisita, i u velikoj mjeri prisutan biotit mjestimice izmijenjen u klorit, a prisutna su i zrna granata.

Stijena ima trakastu teksturu, gnajs-porfiroklastičnu strukturu i određena je kao **filonit**.

Nastala je kao rezultat retrogradnog metamorfizma, udružena sa redukcijom zrna originalnog paragnajsa, pri čemu je formirana sitnozrnata folijativna stijena.



Slika 6-5. Mikrofotografija filonita (uzorak KR-1C; N). Bt-biotit; Czo-klinocoisit; Fs-feldspat; Grt-granat; Qtz-kvarc.



Slika 6-6. Mikrofotografija filonita (uzorak KR-1C; N+). Bt-biotit; Czo-klinocoisit; Fs-feldspat; Grt-granat; Qtz-kvarc.

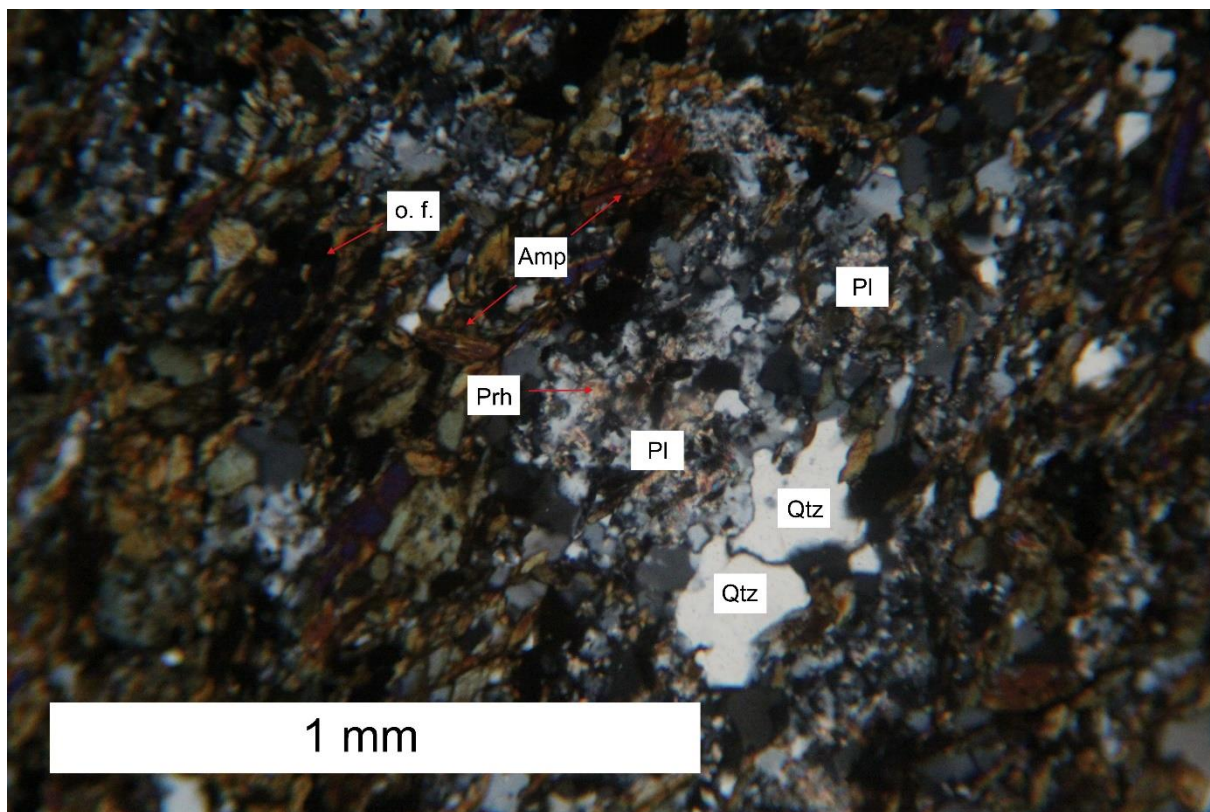
6.1.4. Uzorak KR-1D – Trakasti amfibolit

Glavni minerali u uzorku KR-1D su amfibol i plagioklas. U dosta velikoj količini dolazi kvarc i opaka faza. Akcesorni minerali su apatit i biotit, dok se prehnit/sericit, klinocoisit, coisit, titanit i klorit pojavljuju kao rezultat retrogradne izmjene (Slike 6–7, 6–8 i 6–9).

Amfibol u uzorku je hornblenda, dimenzija od 0,06 do 0,35 mm, koja pokazuje pleokroizam u maslinasto-zelenoj do modrozelenoj boji. Pojedina zrna pokazuju eksoluciju opake faze. Hornblenda mjestimično na rubovima prelazi u aktinolit, a puno rjeđe u klorit. Štapići amfibola preferirano su orijentirani u trake.

Plagioklas se pojavljuje u zrnima dimenzija od 0,05 do 0,20 mm, lamele nisu uvijek vidljive, a retrogradno je dobrim dijelom izmijenjen u prehnit odnosno sericit, te klinocoisit i coisit te zajedno s kvarcom čine sitnozrnati matriks između blasta amfibola.

Kvarc je prisutan u obliku sitnih zrna, dimenzija od 0,02 do 0,20 mm. Zrna kvarca su svježija, nepravilnih oblika i uglavnom pokazuju undulozno potamnjenje.



Slika 6-7. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1D; N+). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Prh-prehnit; Qtz-kvarc.

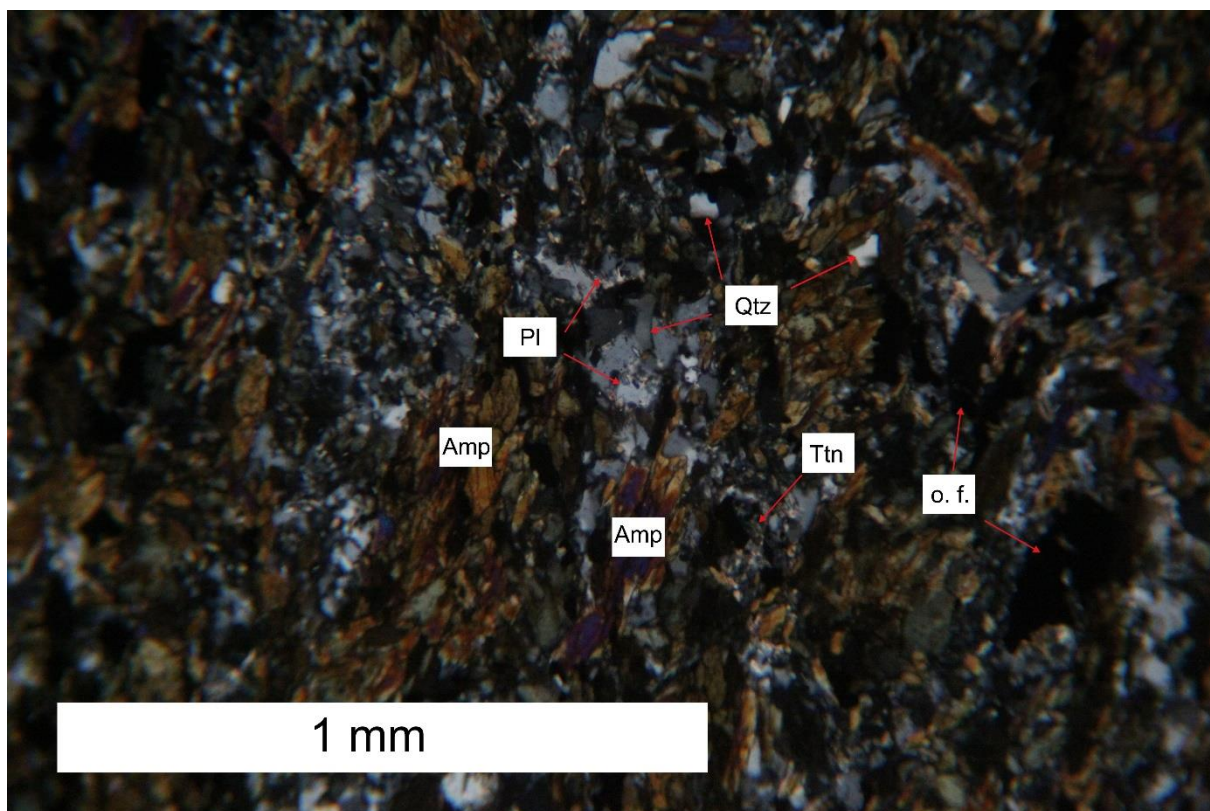
Opaka faza je u ovom uzorku dosta obilna, pojedina zrna su izdužena i orijentirana paralelno trakama amfibola, a na rubovima opake faze, najvjerojatnije ilmenita, se nalazi titanit u obliku sitnozrnatog agregata.

Apatit se pojavljuje samo u obliku izuzetno sitnih štapića u u plagioklasu, pa je uočljiv samo kod najvećih povećanja.

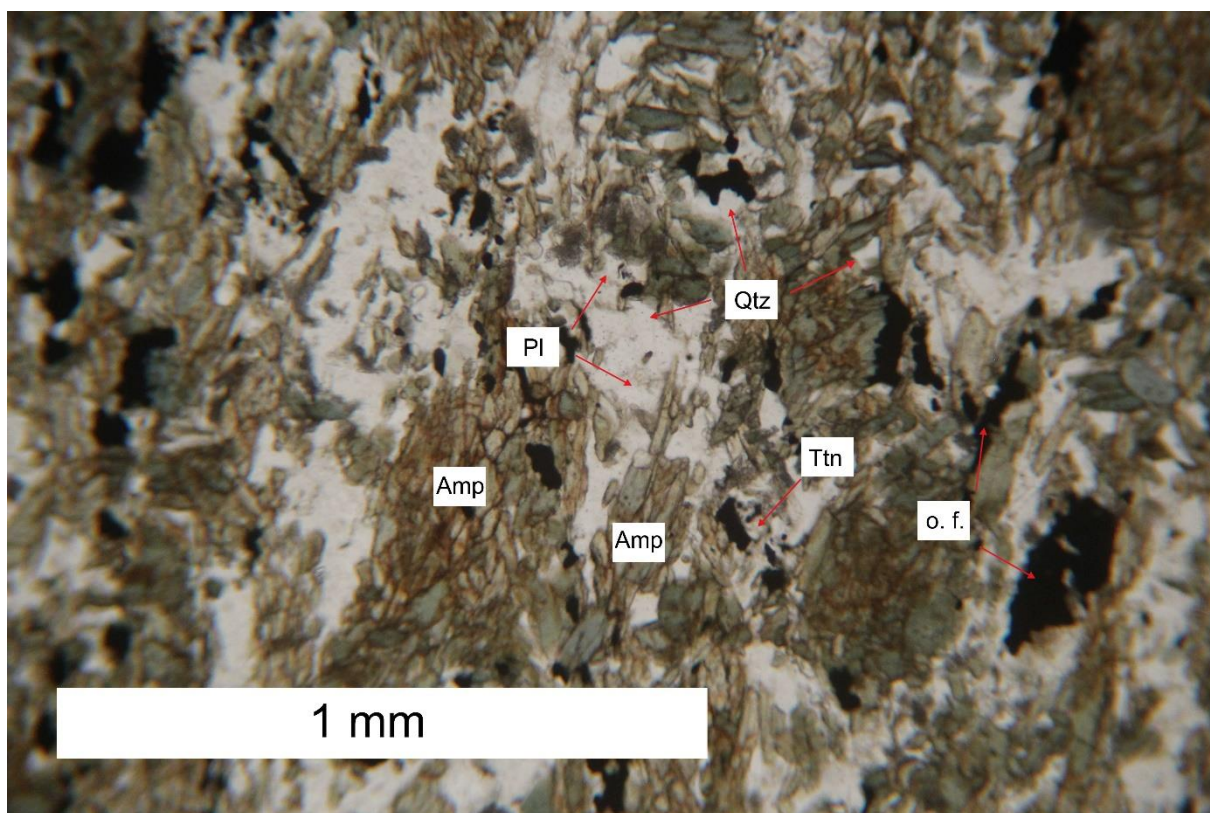
Titanit se vrlo rijetko pojavljuje i to isključivo uz opaku fazu, u obliku sitnozrnatih agregata.

Biotit je vrlo rijedak u uzorku, a pojavljuje se u obliku vrlo sitnih listića, dimenzija 0,04 do 0,08 mm.

Stijena ima trakastu teksturu, granonematoblastičnu strukturu i određena je kao **amfibolit**.



Slika 6-8. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1D; N+). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Ttn-titanit.



Slika 6-9. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1D; N). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Ttn-titanit.

6.1.5. Uzorak KR-1E – Amfibolit

Glavni minerali u uzorku KR-1E su amfibol i plagioklas. U manjoj mjeri dolazi kvarc i opaka faza. Epidot, prehnit/sericit i klorit javljaju se kao produkti retrogradne izmjene (Slike 6–10 i 6–11).

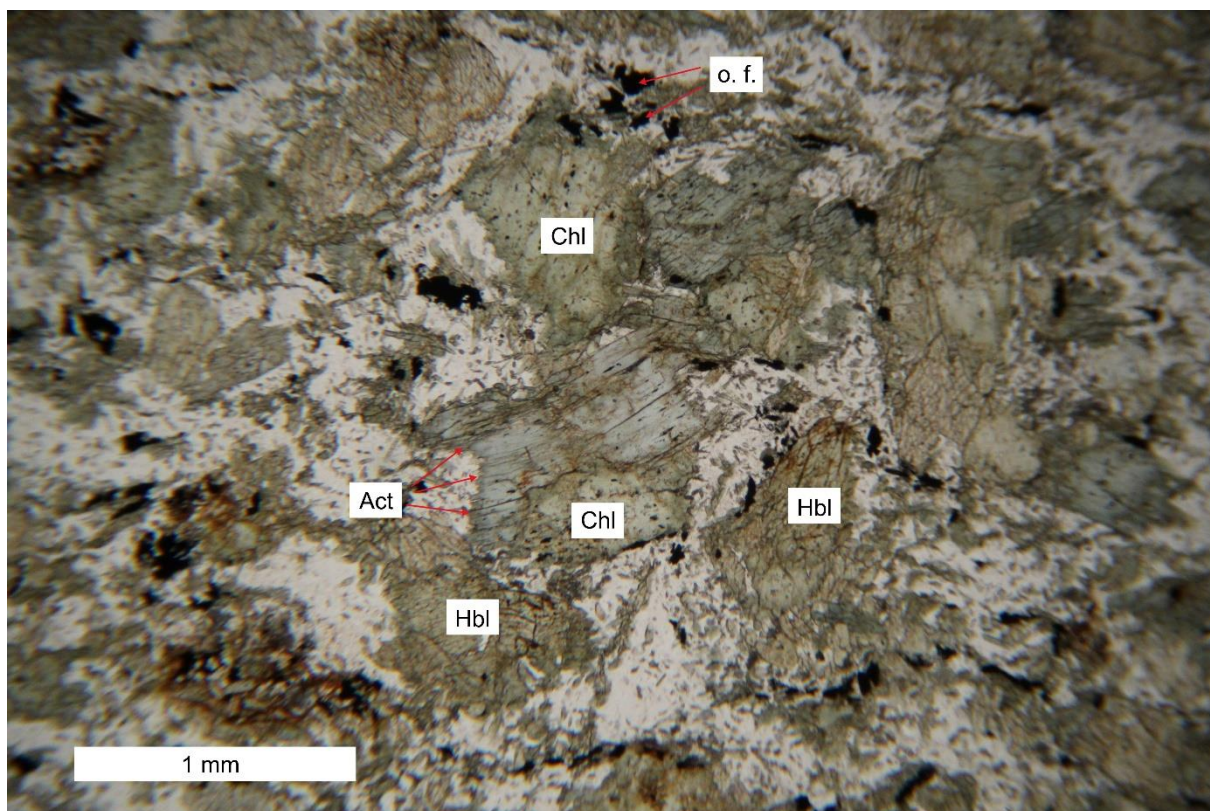
Dominantni amfibol u uzorku je hornblenda, sa dimenzijama zrna od 0,06 do 1,20 mm i karakterističnim pleokroizmom u svijetlozelenoj do modrozelenoj boji. Zrna su hipidiomorfnog oblika, četverostranog i šesterostranog presjeka, a neka od njih pokazuju eksoluciju opake faze. Hornblenda se često odlikuje prijelazom u štapićasti aktinolit na rubovima, a mjestimice je i kloritizirana. Između blasta amfibola nalazi se matriks koji se sastoji od plagioklasa i kvarca.

Plagioklas je dimenzija 0,04 do 0,20 mm, mjestimice je retrogradno izmijenjen u prehnit odnosno sericit, te epidot. Dodatno, plagioklas je u velikoj mjeri rekristaliziran, stoga se opažaju subdomene plagioklasa različitih optičkih orijentacija.

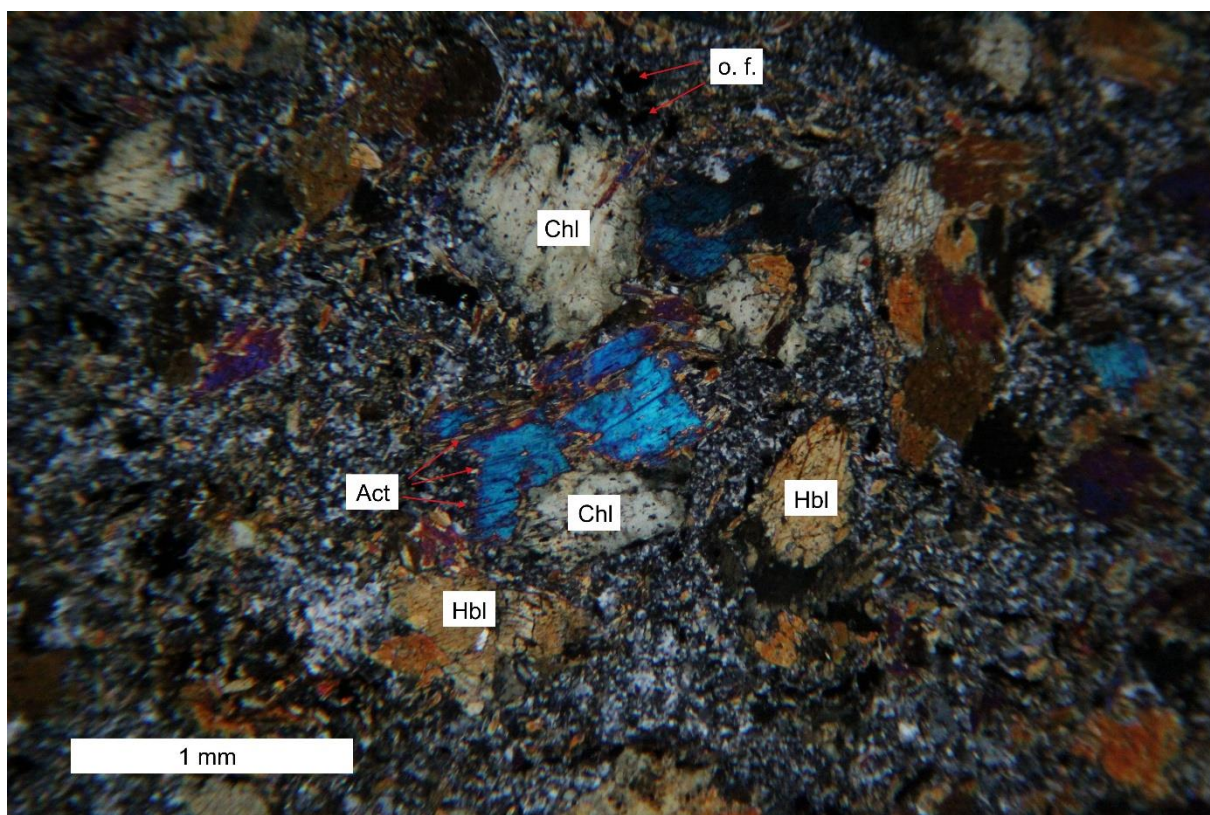
Opaka faza se pojavljuje i u matriksu i asocirana s amfibolima. Moguće je da se radi o magnetitu ili ilmenitu.

Kvarc je dimenzija 0,02 do 0,12 mm. Zrna kvarca su svježja, nepravilnog oblika i pokazuju undulozno potamnjenje.

Stijena ima više homogenu nego trakastu teksturu, granonematoblastičnu strukturu i određena je kao **amfibolit**.



Slika 6-10. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR-1E; N). Act-aktinolit; Chl-klorit; Hbl-hornblenda; o.f.-opaka faza.



Slika 6-11. Mikrofotografija amfibolita (uzorak KR-1E; N+). Act-aktinolit; Chl-klorit; Hbl-hornblenda; o.f.-opaka faza.

6.1.6. Uzorak KR-1F – Trakasti amfibolit

Glavni minerali u uzorku KR-1F su amfibol i plagioklas. U zamjetnoj količini prisutni su opaka faza i kvarc. Akcesorni minerali u uzorku su biotit i cirkon, a kao produkt retrogradne izmjene, koja nije jako izražena, prisutni su prehnit odnosno sericit, titanit i klorit (Slike 6-12 i 6-13).

Dominantni amfibol u uzorku je aktinolit, koji je nastao na račun hornblende. Blasti aktinolita i hornblende su štapićastog habitusa, dimenzija su od 0,05 do 1 mm, pokazuju pleokroizam od maslinasto zelene do svijetloplave boje, rijetko su retrogradno izmijenjeni u klorit te su preferirano orijentirani u trake. Između traka amfibola nalazi se sitnozrnati matriks koji se sastoji od plagioklasa i kvarca.

Plagioklas je dimenzija od 0,10 do 0,30 mm. Relativno je svjež i tek mjestimice retrogradno izmijenjen u prehnit odnosno sericit, sadrži rijetke uklopke cirkona, ali je u velikoj mjeri rekristaliziran u sitnozrnati agregat.

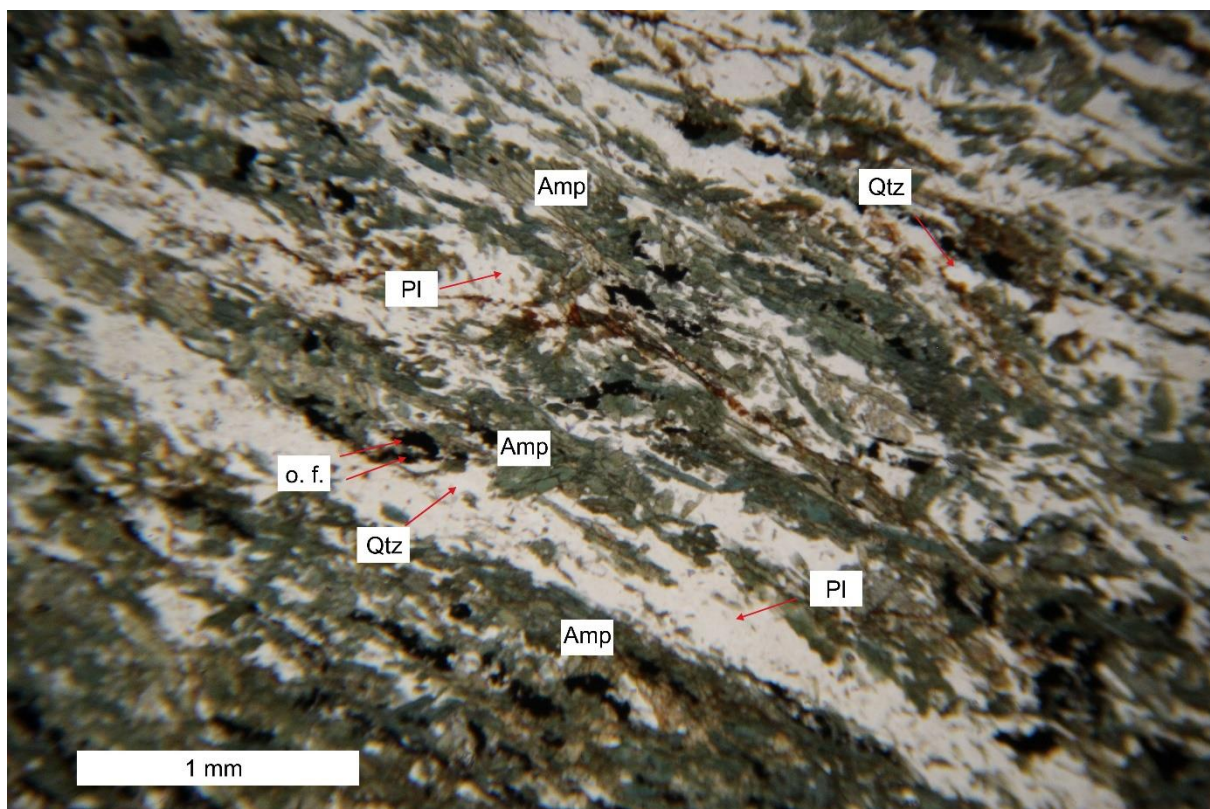
Kvarc je prisutan u obliku nepravilnih, svježih zrna dimenzija od 0,04 do 0,20 mm, te uglavnom pokazuje undulozno potamnjenje.

Opaka faza se javlja u obliku nepravilnog zrnja, ponekad s uočljivom „češljastom“ strukturom, pa je vjerojatno da se radi o ilmenitu ili Ti-magnetit. S njom je asociran titanit u obliku sitnih kristala i agregata.

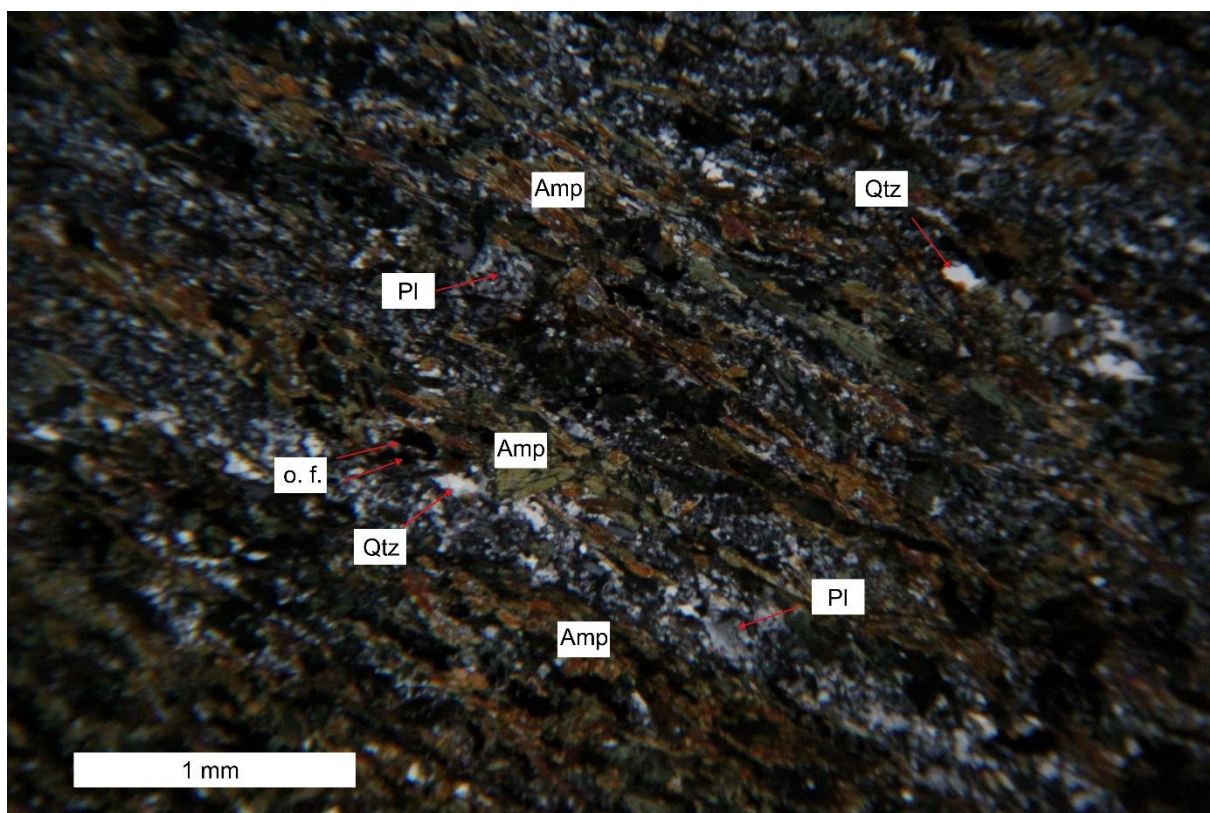
Biotit se javlja u obliku listića, dimenzija od 0,02 do 0,18 mm i pokazuje pleokroizam u svijetlosmeđoj do smeđoj boji.

Cirkon je vrlo rijedak, najčešće uočen kao uklopak u plagioklasu.

Stijena ima izraženu trakastu teksturu, granonematoblastičnu strukturu i determinirana je kao **amfibolit**.



Slika 6-12. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1F; N). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc.



Slika 6-13. Mikrofotografija trakastog amfibolita (uzorak KR-1F; N+). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc.

6.1.7. Uzorak KR-2A – Filonitizirani paragnajs

Glavni minerali u uzorku KR-2A su kvarc, feldspat, muskovit, biotit i granat. Akcesorni minerali su rijetki opaki mineral i turmalin, a kao produkt retrogradne izmjene nastali su sericit i klorit (Slike 6–14 i 6–15).

Kvarc je karakteriziran zrnima nepravilnih granica, dimenzija od 0,04 do 0,25 mm, pokazuje unduluzno potamnjenje, razvoj subodmena u nekad homogenom zrnju, ali i svježa rekristalizirana zrna. Tvori lećasta izduženja u stijeni i asociiran je s manjom količinom tinjaca i granata.

Feldspati se pojavljuju u obliku svježih plagioklasa, dimenzija od 0,10 do 0,30 mm, ali i kao potpuno alterirana zrna u agregate listićavog sericita, pri čemu formiraju izdužene leće sericita. Takve leće su duljina od 2,25 do 110 mm.

Muskovit dolazi u obliku listića, dimenzija od 0,05 do 0,40 mm. Zrna muskovita su paralelno orijentirana. Često je asociiran s biotitom i granatom.

Biotit se javlja u obliku listića, dimenzija od 0,10 do 0,20 mm, i pokazuje pleokroizam u svijetlosmeđoj do smeđoj boji. Često je intenzivno retrogradno izmijenjen u klorit. Pojedina zrna su paralelno orijentirana, ali ona koja su intenzivno kloritizirana su krupnija, javljaju se u obliku blasta dimenzija od 0,25 do 1 mm i pokazuju orijentaciju koja nije paralelna s orijentacijom muskovita i svježih biotita.

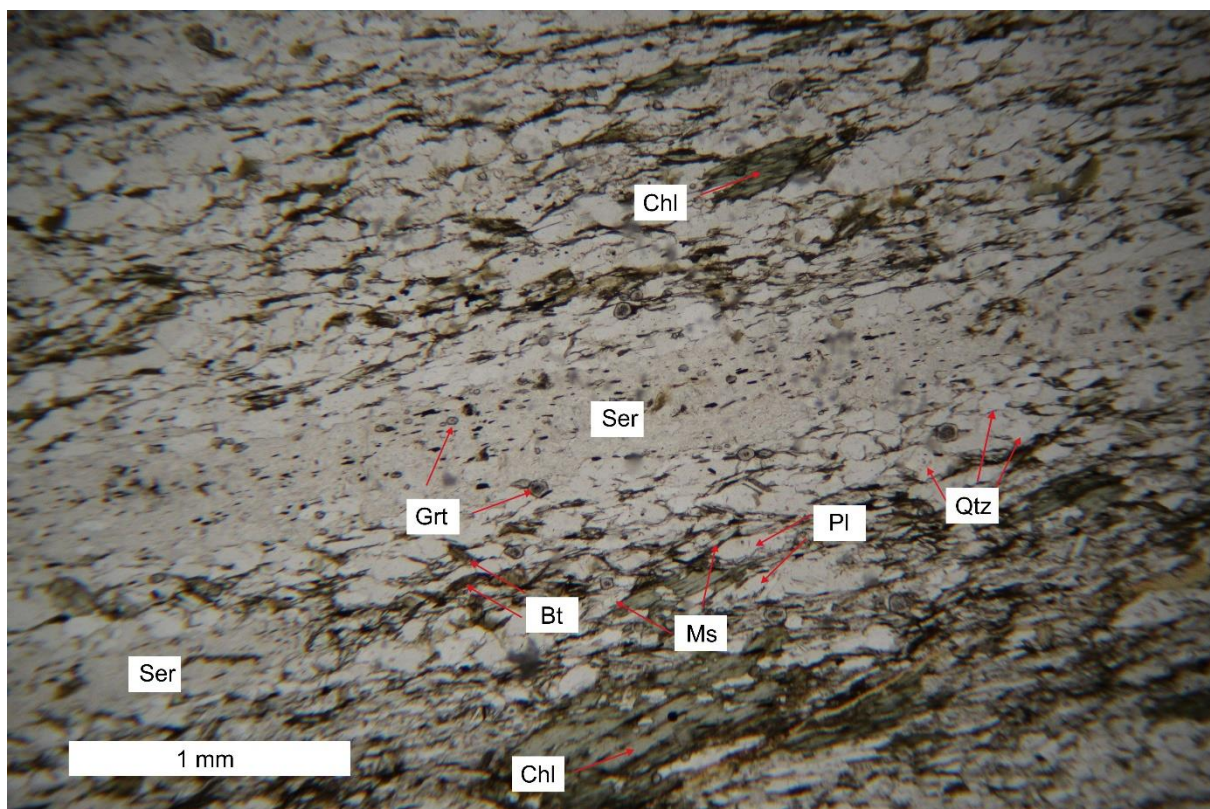
Granat je karakteriziran sitnim zrnima, dimenzija od 0,05 do 0,15 mm i idiomorfnim oblikom. Mjestimice pokazuje povećanu količinu uklopaka u jezgri, koji su toliko sitni da ih nije moguće točno odrediti. Iako je granat prisutan u cijelom uzorku, više je koncentriran u slojevima s tinjcima i feldspatima.

Opaki mineral se javlja u obliku sitnog zrnja, dimenzija od 0,02 do 0,10 mm. Najvjerojatnije se radi o magnetitu ili ilmenitu.

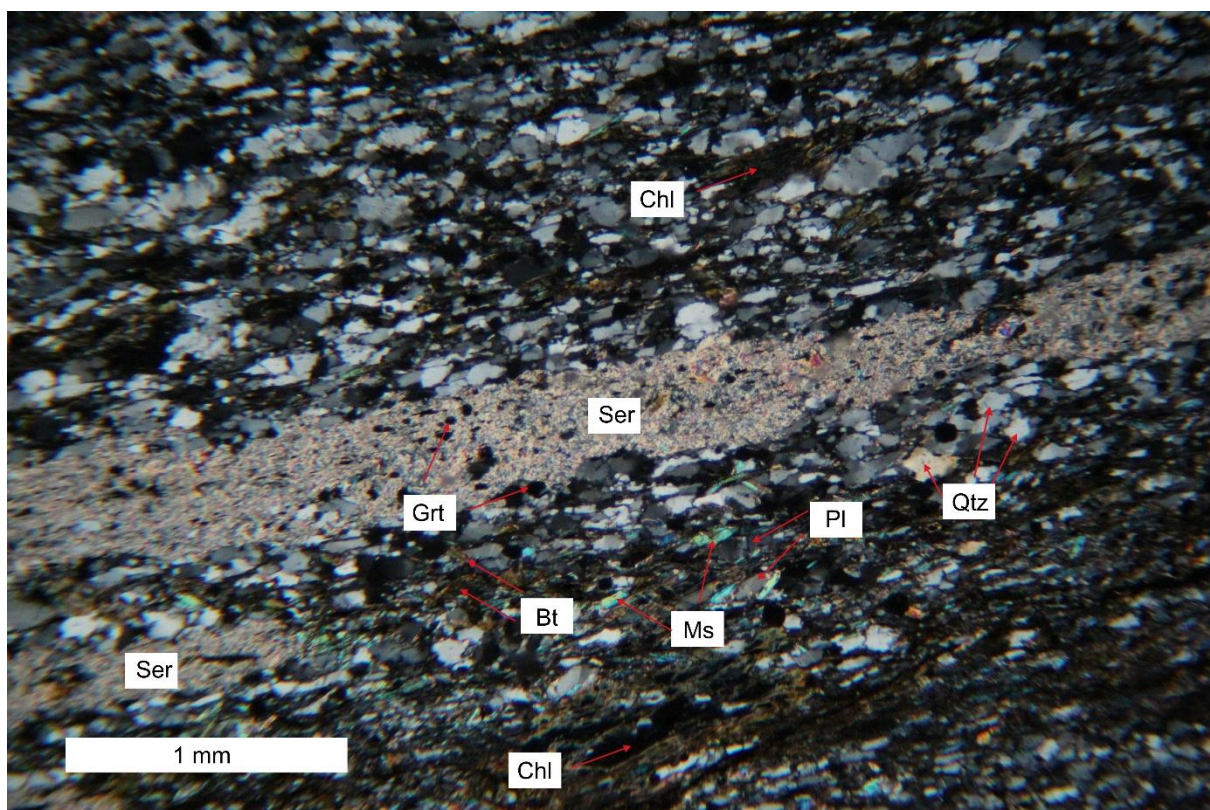
Turmalin je rijedak, prisutan je u obliku zrna, dimenzija od 0,10 do 0,15 mm, i pokazuje pleokroizam u svijetloplavoj do plavoj boji te zonalno građu.

Stijena je karakterizirana folijacijom, u okviru koje se razlikuju trake bogate izduženim lećama kvarca, izduženim lećama sericitiziranog feldspata i trakama bogatim tinjcima i feldspatima.

Stijena ima trakastu, folijativnu teksturu, porfiroklastičnu do djelomice porfiroblastičnu strukturu i određena je kao **filonitizirani paragnajs**.



Slika 6-14. Mikrofotografija filonitiziranog paragnajsa (uzorak KR-2A; N). Bt-biotit; Chl-klorit; Grt-granat; Ms-muskovit; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Ser-sericit.



Slika 6-15. Mikrofotografija filonitiziranog paragnajsa (uzorak KR-2A; N+). Bt-biotit; Chl-klorit; Grt-granat; Ms-muskovit; Pl-plagioklas; Qtz-kvarc; Ser-sericit.

6.1.8. Uzorak KR-2B – „Porfiroblastični“ amfibolit

Glavni minerali u uzorku 2B su amfibol i plagioklas. U znatnoj količini prisutna je opaka faza i kvarc. Minerali koji su rezultat retrogradne izmjene jesu titanit, klinocoisit, coisit, prehnit/ sericit i klorit (Slike 6–16, 6–17 i 6–18).

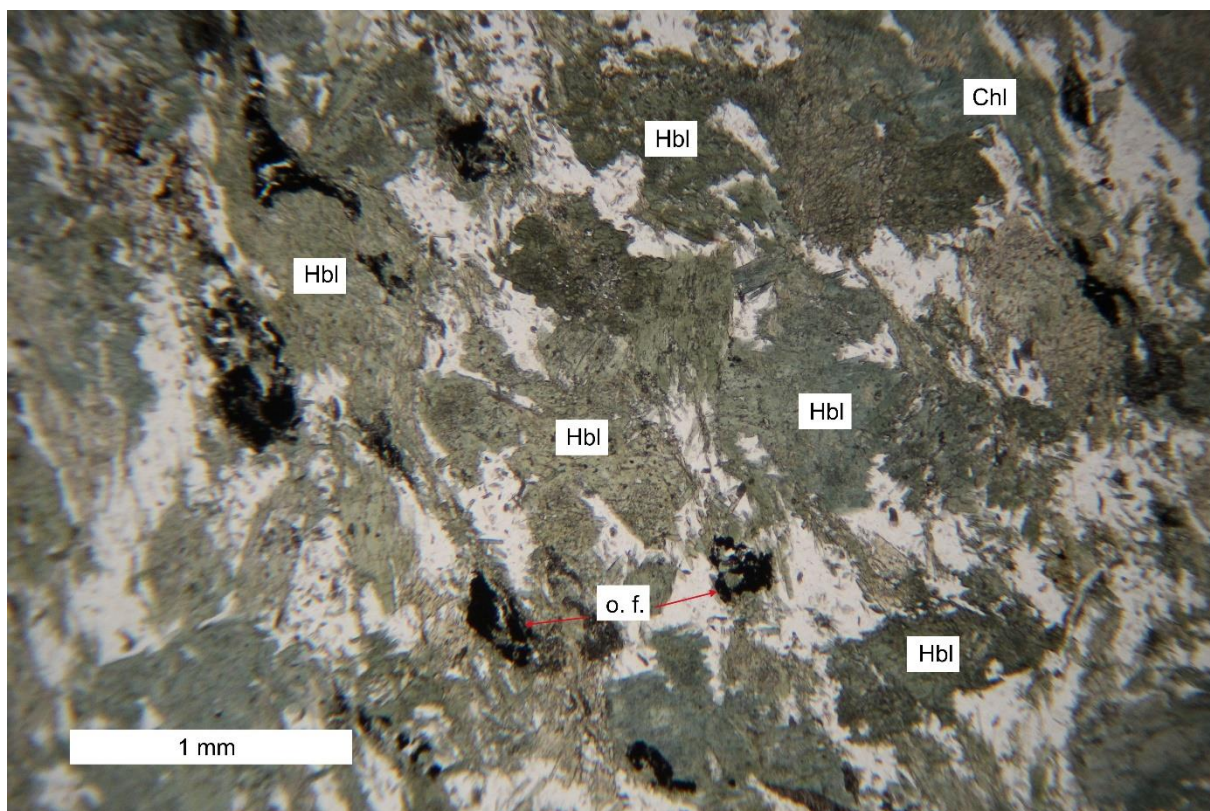
Dominantni amfibol u uzorku je hornblenda, čija su zrna dimenzija od 0,10 do 0,80 mm i pokazuju pleokroizam u zelenoj do modrozelenoj boji. Mjestimično, zrna hornblende na rubovima pokazuju retrogradni prijelaz u aktinolit ili su u potpunosti zamijenjena aktinolitom, a rjeđe i kloritom. Zrna amfibola su karakterizirana paralelnom do subparalelnom orijentacijom.

Plagioklas se pojavljuje u obliku velikih, prizmatičnih, porfiroblastičnih zrna, dimenzija od 1 do 5 mm, koja su međutim u potpunosti retrogradno izmijenjena u agregat prehnita/sericita, klinocoisita i coisita ili su rekristalizirala pri čemu su nastale subdomene različite optičke orijentacije bivšeg, nekad homogenog, zrna plagioklasa ili sitnija zrna plagioklasa.

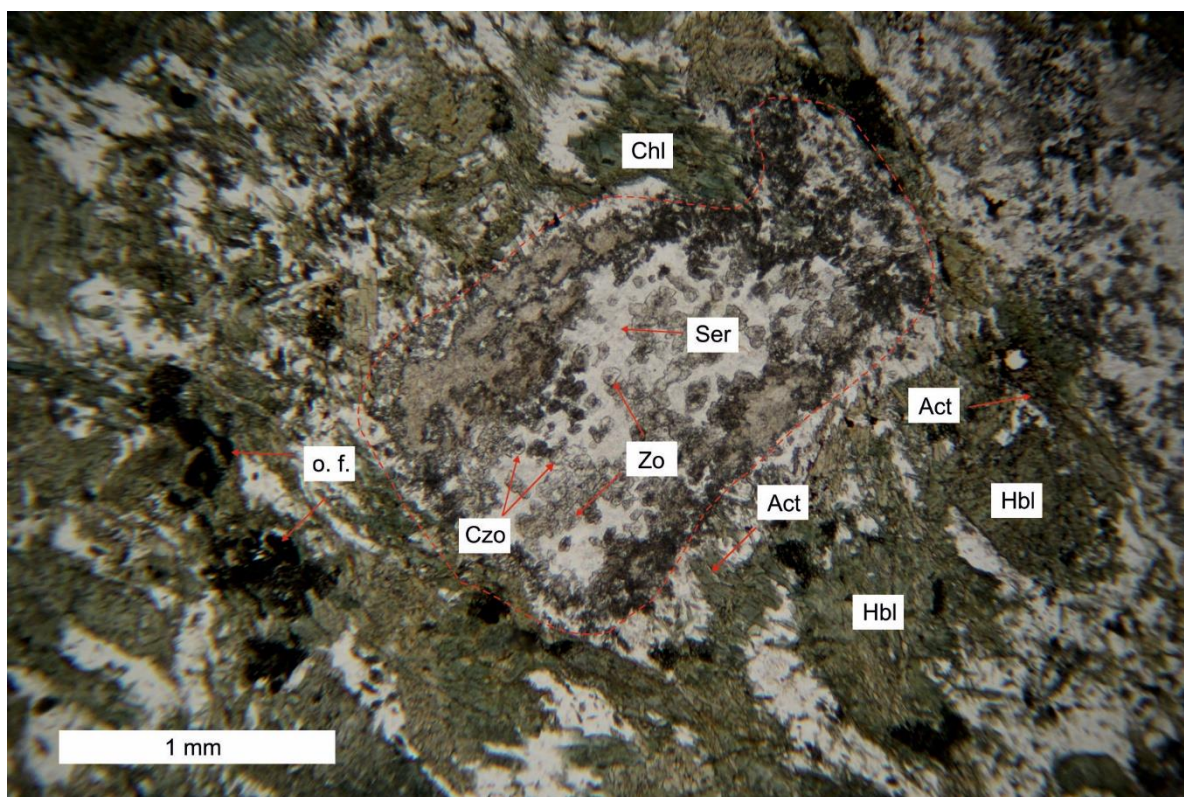
Kvarc se javlja u obliku sitnih, nepravilnih, svježih zrna između amfibola i plagioklasa.

Opaka faza je karakterizirana relativno krupnim dimenzijama od 0,10 do 0,30 mm nepravilnim zrnjem, često izduženim paralelno orijentaciji amfibola. Najvjerojatnije se radi o ilmenitu, budući je opaka faza u velikoj mjeri retrogradno izmijenjena u titanit, koji se javlja u obliku sitnozrnatih agregata. Neki blasti ilmenita su gotovo u potpunosti potisnuti titanitom.

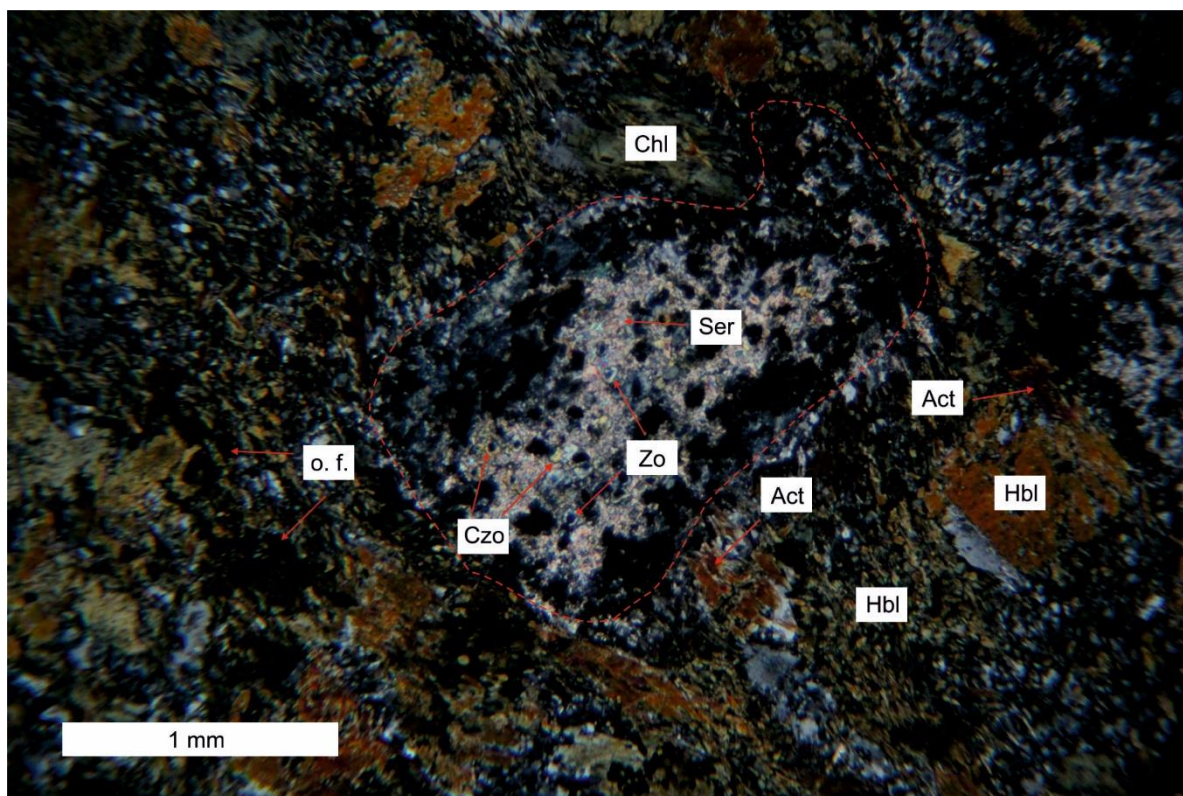
Stijena ima trakastu teksturu, reliktnu porfiroblastičnu strukturu i određena je kao **amfibolit**.



Slika 6-16. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR-1B; N). Chl-klorit; o.f.-opaka faza; Hbl-hornblenda.



Slika 6-17. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-1B; N). Act-aktinolit; Chl-klorit; Czo-klinocoisit; Hbl-hornblenda; o.f.-opaka faza; Ser-sericit; Zo-coisit.



Slika 6-18. Mikrofotografija „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-1B; N+). Act-aktinolit; Chl-klorit; Czo-klinocoisit; Hbl-hornblenda; o.f.-opaka faza; Ser-sericit; Zo-coisit.

6.1.9. Uzorak KR-2C – Trakasti „porfiroblastični“ amfibolit

Glavni minerali u ovoj stijeni su amfibol i plagioklas. Opaka faza i kvarc su prisutni u značajnoj mjeri. Titanit, klinocoisit, coisit, prehnit/sericit i klorit nastali su kao produkt retrogradne izmjene (Slike 6–19, 6–20 i 6–21).

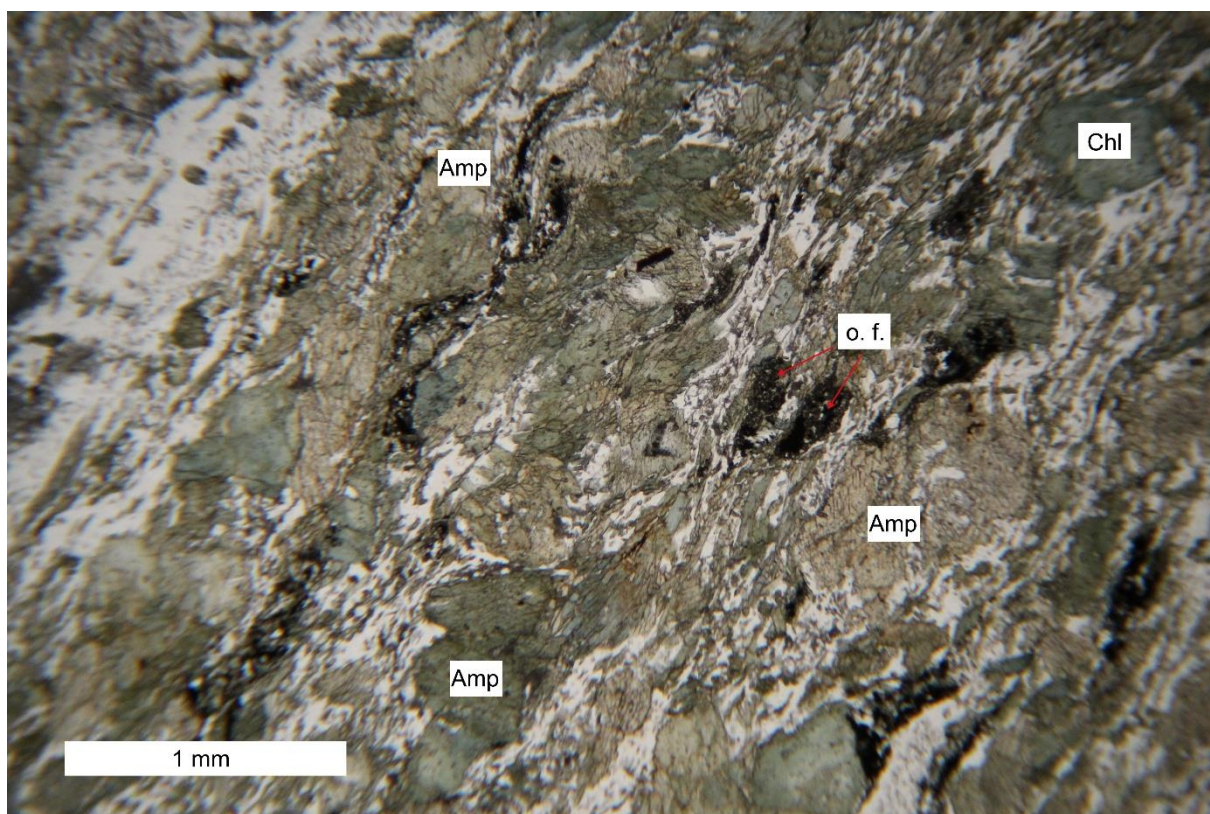
Dominantni amfibol u uzorku je hornblenda, dimenzija od 0,10 do 0,75 koja pokazuje prijelaz u aktinolit na rubovima blasta. Na nekim blastima hornblende primijećuje se i njen prijelaz u klorit. Blasti amfibola preferirano su orijentirani u trake između kojih se nalazi matriks sačinjen od reliktnih porfiroblastičnih plagioklasa i kvarca. Porfiroblasti plagioklasa retrogradno su izmijenjeni u potpunosti u sitnozrnate agregate coisita, klinocoisita, prehnita i sericita ili su rekristalizirali, pri čemu su razvijene subdomene nekad homogenog porfiroblasta. Ovi porfiroblasti izduženi su u smjeru traka amfibola, odnosno u subparalelnom su odnosu sa trakama amfibola.

Opaka faza u uzorku je najvjerojatnije ilmenit ili Ti-magnetit, budući je na njegovim rubovima karakteristična retrogradna pojava titanita u obliku sitnozrnatih agregata.

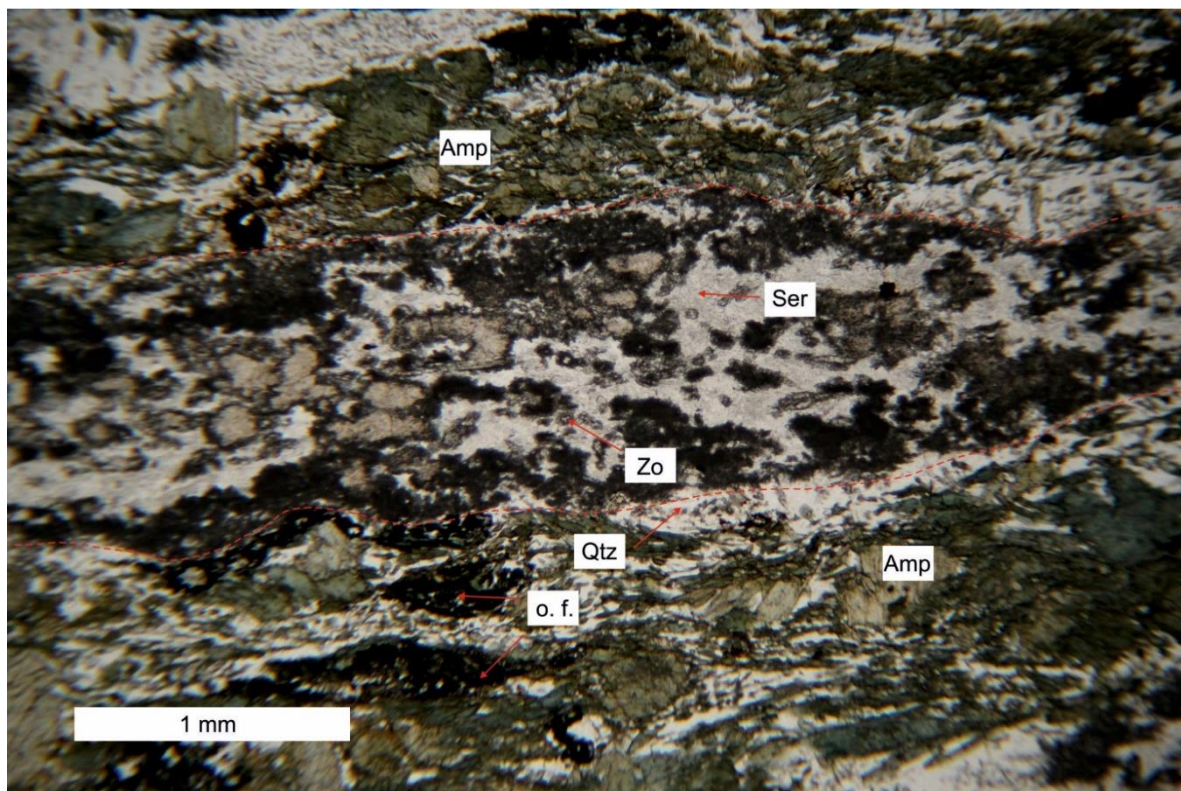
Kvarc se pojavljuje u obliku sitnih zrna dimenzija 0,02 do 0,10 mm, nepravilnih oblika te pokazuje undulozno potamnj enje.

Amfiboli i produkti retrogradne izmjene plagioklasa i retrogradne izmjene opake faze pokazuju istu paralelnu orijentaciju u uzorku, stoga je o čito da je do deformacije došlo nakon retrogradnih procesa u uzorku.

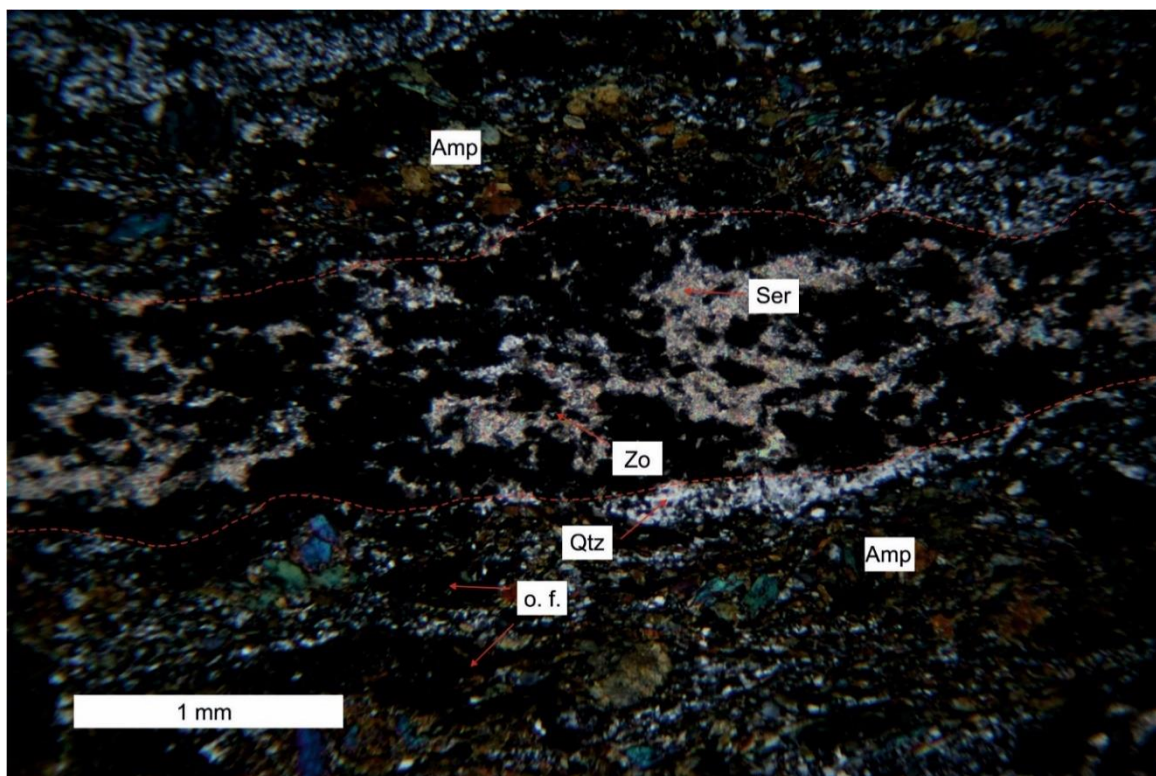
Stijena ima trakastu teksturu, reliktnu porfiroblastičnu do porfiroklastičnu strukturu i određena je kao **amfibolit**.



Slika 6-19. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita (uzorak KR-2C; N). Amp-amfibol; Chl-klorit; o.f.-opaka faza.



Slika 6-20. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-2C; N). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Qtz-kvarc; Ser-sericit; Zo-coisit.



Slika 6-21. Mikrofotografija trakastog „porfiroblastičnog“ amfibolita s okonturenim porfiroblastom plagioklasa (uzorak KR-2C; N+). Amp-amfibol; o.f.-opaka faza; Qtz-kvarc; Ser-sericit; Zo-coisit.

6.2. REZULTATI RENDGENSKE DIFRAKCIJSKE ANALIZE

Kao rezultat analize uzoraka rendgenskom difrakcijom na prahu izrađena je tablica koja prikazuje interpretaciju rendgenskih snimaka (Tablica 6–1).

Tablica 6-1. Rezultati rendgenske difrakcijske analize na prahu. Amp = amfibol; Ep = epidot; Pl = plagioklas; Qtz = kvarc; Ttn = titanit; Czo = klinocoisit; Kln = kaolinit; S = smektit; X = neidentificirani mineral; T = tinjčasti minerali; $14\text{\AA}$ = $14\text{\AA}$ filosilikati; + = potvrđeno prisustvo minerala; ? = moguće prisustvo minerala; – = nema indicija za prisustvo minerala.

Uzorak	Amp	Pl	Qtz	Ttn	Czo	T	$14\text{\AA}$
KR-1B	+	+	-	?	?	?	+ Chl
KR-1E	+	+	-	?	?	+	+ Chl
KR-1F	+	+	+	?	-	+	+ Chl i/ili Kln
KR-2A	-	+	+	-	-	+	+ Chl i Vrm i/ili S
KR-2B	+	+	+	?	+	?	+ Chl
KR-2C	+	+	+	?	?	?	+ Chl

Svi uzorci amfibolita (KR-1B, KR-1E, KR-1F, KR-2B i KR-2C) sadrže amfibole, dok ih uzorak filonitiziranog paragnajsa (KR-2A) ne sadrži. U svim analiziranim uzorcima potvrđena je prisutnost plagioklasa. U uzorcima KR-1B i KR-1E na difrakcijskim dijagramima nije bilo indicija za prisutnost kvarca, ali je njegova prisutnost određena mikropetrografskim analizama. U svim uzorcima osim KR-2A postoje indicije za prisutnost titanita. Klinocoisit je potvrđen jedino u uzorku KR-2B, dok u uzorcima KR-1B, KR-1E i KR-2C postoje indicije za njegovu prisutnost. Naznake epidota na difrakcijskim dijagramima prisutne su kod uzoraka KR-1B, KR-1E i KR-2C, dok u ostalim uzorcima nema takvih naznaka. Tinjčasti minerali potvrđeni su u uzorcima KR-1E, KR-1F i KR-2A, a u ostalim uzorcima postoje dobre indicije za prisutnost tinjčastih minerala. Prisutnost klorita potvrđena je u svim uzorcima.

6.3. KEMIJSKI SASTAV STIJENA

6.3.1. Sadržaj glavnih elemenata

Silicij, aluminij, željezo, magnezij, kalcij, natrij, kalij, titan, fosfor, mangan i krom čine 10 glavnih elemenata kojima je maseni udio u Zemljinoj kori veći od 0,1 tež. %. Sadržaji glavnih elemenata koriste se za klasifikaciju stijena, izradu geokemijskih dijagrama i usporedbu sa eksperimentalno određenim kemijskim sastavima stijena čiji su uvjeti nastanka poznati. Osim toga, u kombinaciji s podacima elemenata u tragovima koriste se i za određivanje originalnog geotektonskog položaja stijena.

Sadržaj glavnih elemenata analiziranih uzoraka, izražen u tež. %, prikazan je u Tablici 6-2.

Tablica 6-2. Koncentracije glavnih elemenata u analiziranim uzorcima (tež. %).

Uzorak	KR-1B	KR-1E	KR-1F	KR-2B	KR-2C	KR-2A
SiO ₂	46,43	48,40	51,17	48,48	48,54	63,27
TiO ₂	1,11	1,65	2,65	1,97	1,80	0,84
Fe ₂ O ₃	10,56	11,97	13,97	12,70	11,87	7,10
MgO	6,41	7,01	4,43	5,91	5,62	1,96
CaO	11,05	10,08	7,93	10,42	10,36	1,00
Na ₂ O	2,84	2,97	3,86	3,23	3,47	1,81
K ₂ O	0,28	0,44	0,50	0,31	0,34	2,89
Al ₂ O ₃	19,55	15,96	14,00	14,99	16,41	16,79
P ₂ O ₅	0,12	0,15	0,33	0,19	0,18	0,15
MnO	0,17	0,21	0,24	0,21	0,20	0,15
Cr ₂ O ₃	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
G, Ž,	1,20	0,90	0,70	1,30	1,00	3,80
Σ	99,79	99,75	99,77	99,76	99,78	99,87
TOT/C	<0,02	0,11	0,11	0,13	0,07	<0,02
TOT/S	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

* Gubitak žarenjem

Uzorci analiziranih amfibolita (KR-1B, KR-1E, KR-1F, KR-2B i KR-2C) sadrže koncentracije SiO₂ u rasponu od 46,43 tež. % (KR-1B) do 51,17 tež. % (KR-1F). Sadržaj SiO₂ znatno je viši u filonitiziranom paragnajsu (KR-2A), a iznosi 63,27 tež. %. Prema

tome, svi amfiboliti su bazičnog karaktera, a filonitizirani paragnajs je neutralnog do kiselog karaktera.

Sadržaj TiO_2 najniži je u filonitiziranom gnajsu KR-2A (0,84 tež. %),. Uzorci amfibolita iz napuštenog kamenoloma imaju sličan sadržaj TiO_2 , sa vrijednostima 1,97 tež. % u amfibolitu KR-2B i 1,80 tež. % u amfibolitu KR-2C, a kod preostalih amfibolita vrijednosti variraju od 1,11 tež. % (KR-1B) do 2,65 tež. % (KR-1F).

Sadržaj Al_2O_3 varira od 14,00 tež. % (KR-1F) do 19,55 tež. % (KR-1B). Uzorak KR-1B ima do 5 tež. % višu koncentraciju Al_2O_3 u odnosu na ostale uzorke amfibolita. Filonitizirani paragnajs sadrži 16,79 tež. % Al_2O_3 .

Najmanje Fe_2O_3 sadrži filonitizirani paragnajs KR-2A (7,10 tež. %), dok se u amfibolitima u kreće u rasponu od 10,56 tež. % (KR-1B) do 13,97 tež. % (KR-1F).

U odnosu na sadržaj MgO uzorci amfibolita uzeti iz napuštenog kamenoloma (KR-2B i KR-2C) imaju vrlo slične vrijednosti (5,91 tež. % i 5,62 tež. %), dok uzorci amfibolita uzetih iz zasjeka ceste pokazuju vrijednosti od 4,43 tež. % (KR-1F) do 7,01 tež. % (KR-1E). Uzorak filonitiziranog gnajsa KR-2A sadrži znatno niže koncentracije MgO (1,96 tež. %) što je za očekivati s obzirom na vrstu stijene.

Koncentracije CaO su također znatno niže u filonitiziranom paragnajsu (1,00 tež. %) u odnosu na amfibolite u kojima se uglavnom kreću u uskom rasponu od 10,08 tež. % do 11,05 tež. %. Uzorak amfibolita KR-1F jedini odstupa od navedenih vrijednosti sa sadržajem CaO od 7,93 tež. %.

Koncentracije Na_2O u filonitiziranom gnajsu su neočekivano niže (1,81 tež. %) od onih u amfibolitima koje variraju u rasponu od 2,84 tež. % (KR-1B) do 3,86 tež. % (KR-1F). To jasno ukazuje na činjenicu da su plagioklasi u amfibolitima retrogradno izmijenjeni u albit. Uzorak amfibolita koji sadrži najmanje CaO (KR-1F) ujedno sadrži i najviše Na_2O .

Najbogatiji kalijem je očekivano uzorak filonitiziranog gnajsa KR-2A (2,89 tež. %), dok su koncentracije K_2O u uzorcima amfibolita znatno niže i variraju od 0,28 tež. % (KR-1B) do 0,50 tež. % (KR-1F).

Uzorak najbogatiji s P_2O_5 je amfibolit KR-1F (0,33 tež. %). Ostali uzorci amfibolita imaju slične sadržaje fosfora u rasponu koncentracija od 0,12 tež. % (KR-1B) do 0,19 tež. % (KR-2B). Uzorak filonitiziranog gnajsa KR-2A sadrži 0,15 tež. % P_2O_5 .

Svi uzorci amfibolita imaju slične vrijednosti koncentracija MnO, i to u rasponu od 0,17 tež. % (KR-2B) do 0,24 tež. % (KR-1F). Uzorak filonitiziranog gnajsa KR-2A sadrži najmanje MnO (0,15 tež. %).

Najviše vrijednosti Cr₂O₃ imaju uzorci amfibolita KR-1B i KR-1E s 0,029 tež. % i 0,026 tež. %. Najniži sadržaj Cr₂O₃ kod amfibolita ima uzorak KR-1F (0,008 tež. %), dok uzorci KR-2B i KR-2C sadrže 0,017 tež. % i 0,014 tež. % Cr₂O₃. Uzorak KR-2A sadrži 0,013 tež. % Cr₂O₃.

Gubitak žarenjem varira u uzorcima amfibolita od 0,7 tež. % (KR-1F) do 1,3 tež. % (KR-2B). Gubitak žarenjem je znatno veći kod uzorka filonitiziranog paragnajsa (KR-2A), a iznosi 3,8 tež. %).

Uzorci amfibolita iz kamenoloma imaju vrlo sličan kemijski sastav glavnih elemenata. Razlike koncentracija glavnih elemenata između ova dva uzorka prelaze 1,00 tež. % samo kod sadržaja Al₂O₃ gdje uzorak KR-2C ima 1,42 tež. % više aluminija od uzorka KR-2B. S druge strane, uzorci amfibolita uzeti iz zasjeka ceste pokazuju znatnije varijacije u kemijskom sastavu. Najveća odstupanja pokazuje uzorak KR-1F, koji za svaki glavni element ima ili najvišu ili najnižu vrijednost koncentracije. Uzorci KR-1B i KR-1E su sadržajem slični za većinu glavnih elemenata, ali pokazuju znatnu razliku u sadržaju Al₂O₃.

6.3.2. Koncentracije elemenata u tragovima

Elementi u tragovima su elementi u stijenama čiji maseni udio ne premašuje 0,1 tež. %, odnosno 1000 ppm-a (*parts per million*). Neki od ovih elemenata mogu formirati svoje minerale, ali većina zamjenjuje glavne elemente u mineralima. Klasificiraju se u grupe prema položaju u periodnom sustavu elemenata (PSE) ili prema ponašanju u magmatskim sustavima. Neke grupe elemenata u tragovima u periodnom sustavu su od posebnog geokemijskog značaja, kao npr. (1) elementi rijetkih zemalja (REE – *rare earth elements*) odnosno lantanidi, elementi od lantana do lutecija, atomskih brojeva 57 – 71; (2) platinska grupa elemenata (PGE), koju čine elementi rutenij, rodij, paladij, osmij, iridij, platina i zlato; i (3) prvi red prijelaznih metala, elementi od skandija do cinka (Rollinson, 1993). Prema ponašanju u magmatskim sustavima elementi u tragovima dijele se na kompatibilne i inkompatibilne. Kompatibilni elementi u tragovima spremno se ugrađuju u mineralne faze, dok inkompatibilni elementi preferiraju magmu odnosno bježe iz strukture minerala

kad god uvjeti to dopuštaju. Valja naglasiti da na stupanj kompatibilnosti pojedinog elementa utječe i sastav magme.

Inkompatibilni elementi mogu se dalje podijeliti prema omjeru naboja i ionskog radijusa na male katione visokog naboja (HFSE – *high field strength elements*) i velike katione malog naboja (LILE – *large ion lithophile elements*). U skupinu HFSE spadaju Sc, Y, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta, P i elementi rijetkih zemalja, a u skupinu LILE spadaju Cs, Rb, K i Ba (Rollinson, 1993).

Za mjeru kompatibilnosti elemenata koristi se tzv. distribucijski koeficijent, koji predstavlja omjer koncentracije elementa u krutoj fazi prema koncentraciji tog istog elementa u taljevinu. Prema tome, što je distribucijski koeficijent veći to je i element kompatibilniji odnosno ima tendenciju da se ugrađuje u mineralne strukture.

U petrologiji su koncentracije i omjeri pojedinih elemenata u tragovima postali važan indikator petroloških procesa kroz koje je stijena prošla. U pojedinoj grupi elemenata u tragovima svi elementi imaju slična kemijska svojstva i očekivano je da će se geokemijski slično ponašati. Ipak, prilikom djelovanja geoloških procesa dolazi do različitog ponašanja elemenata unutar grupa elemenata zbog sitnih kemijskih razlika pojedinih elemenata. Ovakva odstupanja pojedinih elemenata od grupnog ponašanja ili pak sistematske promjene ponašanja unutar grupa koriste se kao indikatori petroloških procesa i njihovih intenziteta.

Koncentracije elemenata u tragovima dobivene kemijskom analizom istraživanih stijena Krndije prikazane su u Tablici 6-3, pri čemu su koncentracije elemenata rijetkih zemalja prikazane u zasebnoj tablici, u Tablici 6-4.

U Tablici 6-3 je vidljivo da je količina Ba u filonitiziranom gnajsu KR-2A očekivano daleko veća (636 ppm) nego u amfibolitima (34-75 ppm). Međutim neobično je da je količina Ni u filonitiziranom gnajsu veća (44 ppm) nego u nekim amfibolitima u kojima varira između 28 i 74 ppm. Količina Rb u filonitiziranom gnajsu iznosi 68,30 ppm, što je očekivano više nego u amfibolitima (4,80 do 11,80 ppm). Iznenaduje međutim činjenica da je filonitizirani gnajs karakteriziran s manjom količinom Sr (67,80 ppm) nego amfiboliti kod kojih Sr varira od 111,60 do 269,30 ppm. Urana je očekivano više u filonitiziranom gnajsu (2,70 ppm) u odnosu na amfibolite (0,10 do 0,70 ppm). Neočekivano elementa Zr najviše ima u amfibolitu KR-1F (246,20 ppm). U svim drugim amfibolitima Zr varira od 71,60 do 125 ppm, dok njegov sadržaj u filonitiziranom gnajsu iznosi 197,50 ppm.

Tablica 6-3. Koncentracije elemenata u tragovima (ppm).

Uzorak	KR-1B	KR-1E	KR-1F	KR-2B	KR-2C	KR-2A
Ba	34,00	65,00	75,00	62,00	38,00	636,00
Ni	74,00	51,00	28,00	29,00	28,00	44,00
Sc	25,00	40,00	37,00	43,00	39,00	17,00
Be	2,00	<1,00	1,00	<1,00	1,00	3,00
Co	37,50	45,70	34,70	38,20	39,10	17,30
Cs	0,40	0,20	0,40	<0,1	<0,1	1,20
Ga	16,30	17,50	20,70	17,20	18,90	20,10
Hf	1,80	3,10	6,20	3,60	3,00	5,20
Nb	1,00	1,80	4,90	2,10	1,90	11,30
Rb	4,80	11,80	10,00	5,80	5,20	68,30
Sn	<1,00	2,00	2,00	1,00	<1,00	2,00
Sr	269,30	281,90	111,60	205,40	265,40	67,80
Ta	<0,1	0,10	0,40	0,20	0,20	0,70
Th	0,30	0,70	1,90	0,50	0,40	9,00
U	0,10	0,30	0,70	0,10	0,20	2,70
V	204,00	284,00	330,00	320,00	291,00	131,00
W	<0,50	<0,50	<0,50	0,50	<0,50	1,60
Zr	71,60	115,30	246,20	125,00	114,70	197,50
Y	20,60	32,40	62,20	35,00	33,00	28,10

Tablica 6-4. Koncentracije elemenata rijetkih zemalja (ppm).

Uzorak	KR-1B	KR-1E	KR-1F	KR-2B	KR-2C	KR-2A
La	4,90	7,10	15,10	7,40	6,70	31,30
Ce	11,80	17,70	38,70	18,90	17,60	59,00
Pr	1,82	2,77	6,00	3,01	2,88	7,38
Nd	9,60	14,30	29,70	15,60	14,30	29,20
Sm	2,70	4,26	8,52	4,59	4,50	5,56
Eu	1,10	1,52	2,65	1,73	1,68	1,34
Gd	3,71	5,31	11,08	5,98	5,82	5,66
Tb	0,59	0,89	1,79	1,04	0,97	0,87
Dy	3,60	5,90	11,46	6,77	6,30	5,34
Ho	0,77	1,30	2,41	1,41	1,28	1,09
Er	2,32	3,78	7,09	4,25	3,84	3,13
Tm	0,30	0,52	0,96	0,55	0,54	0,47
Yb	1,95	3,15	6,23	3,54	3,15	3,04
Lu	0,32	0,47	0,96	0,55	0,48	0,46
Σ REE	45,48	68,97	142,65	75,32	70,04	153,84
Eu/Eu*	1,06	0,98	0,83	1,01	1,00	0,73
LaN/YbN	1,80	1,62	1,74	1,50	1,53	7,39

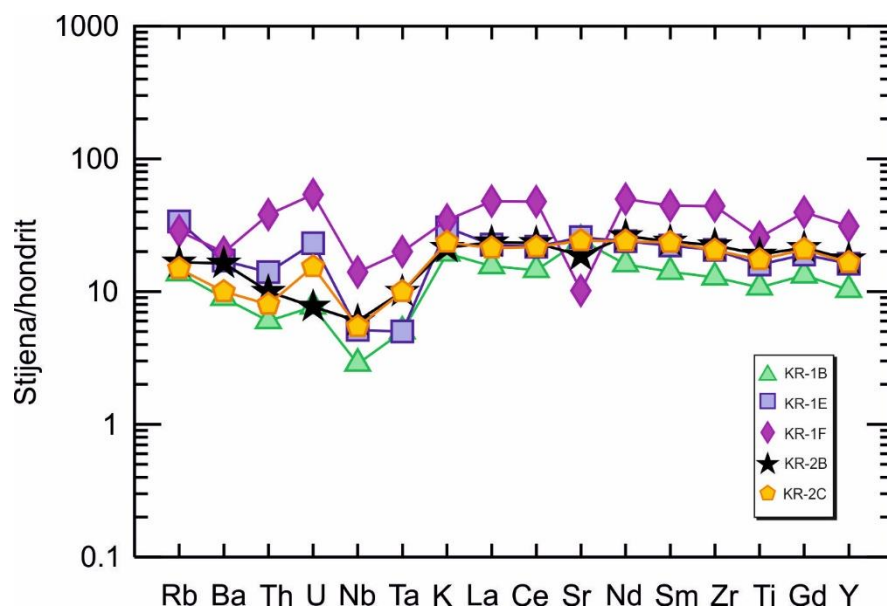
Elementi u tragovima se najčešće prikazuju tzv. *spider* dijagramima i REE dijagramima, koji daju slikovitiji prikaz njihovih koncentracija u uzorcima.

6.3.2.1 Spider dijagrami

Spider dijagrami prikazuju omjer koncentracija inkompatibilnih elemenata u uzorku u odnosu na koncentracije tih istih elemenata u nekom od standardnih uzoraka, odnosno prikazuju normalizirane vrijednosti inkompatibilnih elemenata u uzorku. Kao standard najčešće se upotrebljava sastav primarnog plašta, hondrita ili srednjooceanskog bazalta (MORB-a). Ovakav normalizirani prikaz koncentracija inkompatibilnih elemenata u stijenama jasno prikazuje razlike stijena različitih porijekla. U ovom radu kao standard korišten je hondritni meteorit s normalizacijskim vrijednostima prema Sun (1980). Spider dijagram za istraživane amfibolite prikazan je na Slici 6–22, a za filonitizirani paragnajs na Slici 6–23.

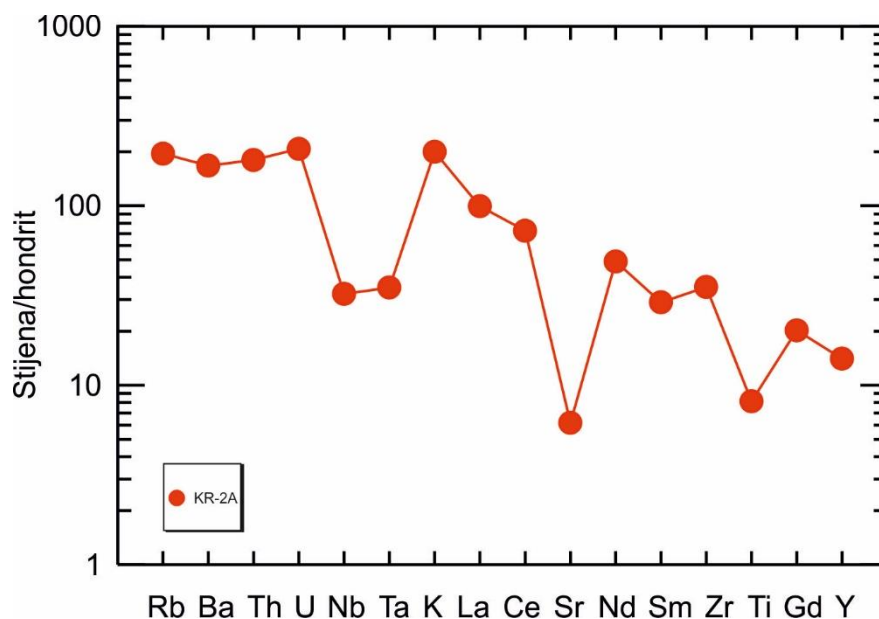
Na apscisi dijagrama postavljeni su određeni elementi u tragovima poredani na način da s lijeva na desno raste njihova kompatibilnost, odnosno pada njihova mobilnost u magmatskom sustavu. Na ordinati dijagrama postavljeni su omjeri koncentracija elemenata u stijeni i standardu. Ordinata je u logaritamskom mjerilu kako bi se veće varijacije u sastavu mogle jasno prikazati.

Svi uzorci amfibolita pokazuju obogaćenje elementima u tragovima u odnosu na hondritni meteorit te krivulje svih uzoraka imaju skokovit trend (Slika 6-22). Najmanje obogaćenje pokazuje uzorak KR-1B, u iznosu od 3 do 12 puta u odnosu na standard, a najveće amfibolit KR-1F. Kod svih uzoraka amfibolita uočljiva je negativna Nb-Ta anomalija i negativna Ti-anomalija. Svi uzorci amfibolita, osim uzorka KR-2B, pokazuju pozitivnu U-anomaliju. Dodatno su uzorci KR-1F i KR-2B karakterizirani negativnom Sr-anomalijom, a uzorci KR-1B, KR-1E i KR-2C slabom pozitivnom Sr-anomalijom.



Slika 6-22. Spider dijagram istraživanih amfibolita, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit iz Sun (1980).

Uzorak filonitiziranog gnajsa KR-2A je u odnosu na hondrit obogaćen 5 do 200 puta, a najobogaćeniji je inkompatibilnim elementima kao što su Rb, Ba, Th, U, K, i La (Slika 6-23). Dodatno je, kao i amfiboliti, karakteriziran jako izraženom negativnom Nb-Ta-anomalijom. Ovaj uzorak još ima izraženu negativnu Sr-anomaliju i negativnu Ti-anomaliju.



Slika 6-23. Spider dijagram istraživanog filonitiziranog paragnajsa, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit iz Sun (1980).

6.3.2.2. REE dijagram

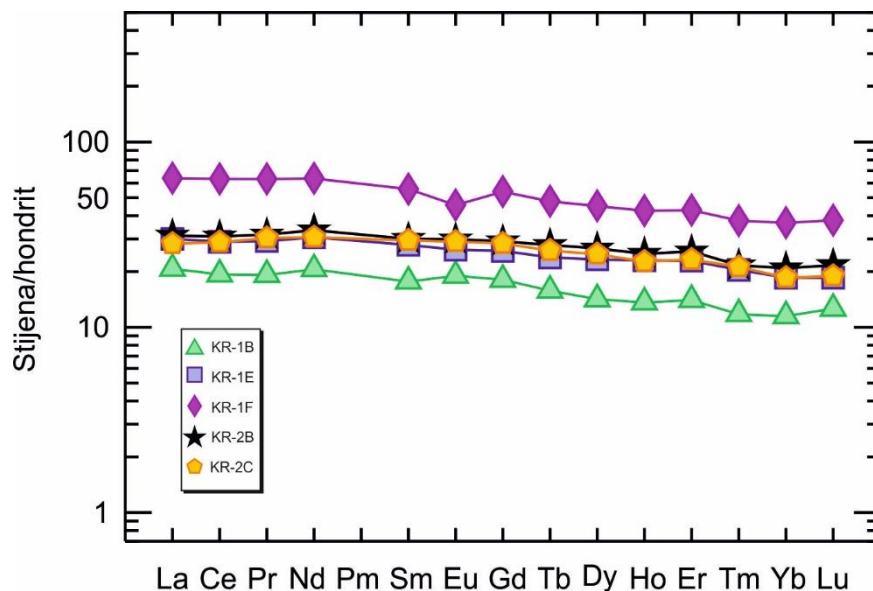
Elementi rijetkih zemalja su karakterizirani sličnim kemijskim i fizičkim svojstvima te svi formiraju stabilne ione sličnih veličina, naboja 3+. Izuzetak predstavljaju Eu, koji može imati i oksidacijsko stanje 2+, te Ce koji dodatno može imati naboj 4+. Sitno, ali postupno smanjenje veličine iona kao posljedice povećanja atomskog broja u ovoj grupi inkompatibilnih elemenata omogućuje frakcionaciju ovih elemenata u petrološkim procesima (Rollinson, 1993). Ovakve pojave se u geokemiji koriste kao uvid u porijeklo stijene i petrološke procese kojima je bila zahvaćena.

Normalizacija koncentracija elemenata rijetkih zemalja u uzorku vrši se prema nekom od standarda, a to je najčešće hondritni meteorit. Poznato je da su u Sunčevom sustavu, elementi s parnim atomskim brojevima stabilniji i stoga imaju veće koncentracije od onih s neparnim atomskim brojem (Odo-Harkinsov efekt). Zbog toga normalizacija vrijednosti koncentracija elemenata ima dvije funkcije: (1) odstranjuje cik-cak varijacije u koncentracijama između elemenata parnih i neparnih atomskih brojeva i (2) omogućuje usporedbu koncentracije elemenata u uzorcima s onima u standardu, odnosno daje uvid u frakcionaciju pojedinih elemenata (Rollinson, 1993). Za izradu REE dijagrama u ovom radu je kao standard korišten hondritni meteorit s normalizacijskim vrijednostima prema Sun & McDonough (1989). REE dijagram za istraživane uzorke prikazan je za amfibolite na Slici 6-24, a za filonitizirani paragnajs na slici 6-25.

Svi uzorci pokazuju obogaćenje elementima rijetkih zemalja u odnosu na hondritni meteorit.

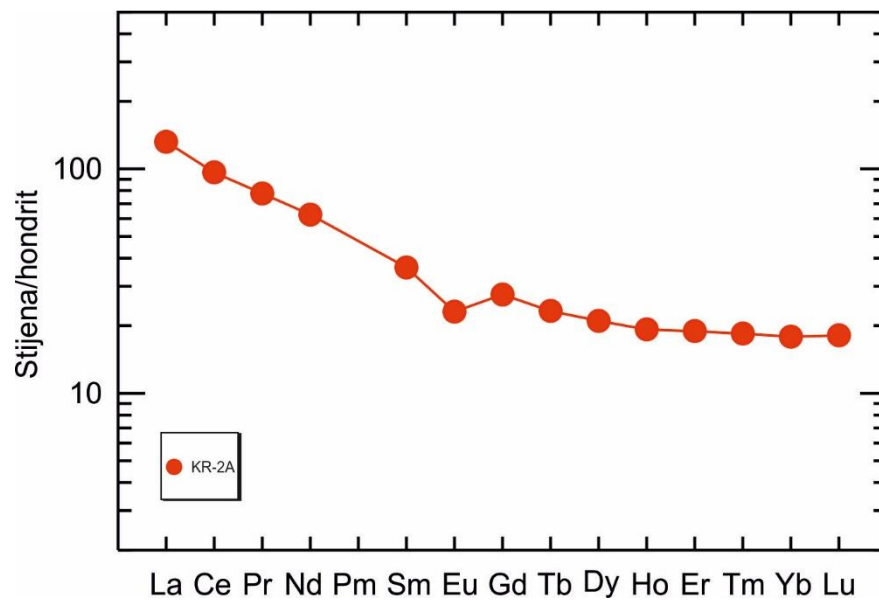
Krivulje amfibolita (uzorci KR-1B, KR-1E, KR-1F, KR-2B i KR-2C) pokazuju gotovo identičan oblik krivulje. Uzorci amfibolita KR-1E, KR-2B i KR-2C osim identičnog oblika krivulje imaju i gotovo iste vrijednosti koncentracija elemenata rijetkih zemalja, s obogaćenjem lakšim elementima oko 30 puta i težim elementima oko 20 puta u odnosu na hondritni meteorit. Uzorak KR-1B pokazuje najmanje obogaćenje elementima rijetkih zemalja s oko 20 puta za lakše elemente i oko 15 puta za teže elemente u odnosu na hondritni meteorit. Uzorak KR-1F pokazuje najveće obogaćenje elementima rijetkih zemalja među uzorcima amfibolita koje iznosi oko 60 puta za lakše elemente i oko 40 puta

za teže elemente u odnosu na hondritni meteorit. Ovaj uzorak također pokazuje blagu negativnu Eu anomaliju.



Slika 6-24. REE dijagram istraživanih amfibolita, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit prema Sun & McDonough (1989).

Uzorak filonitiziranog paragnajsa, KR-2A, znatno je obogaćen lakim elementima rijetkih zemalja koje za La iznosi oko 140 puta u odnosu na hondritni meteorit. Obogaćenje elementima rijetkih zemalja u ovom uzorku postupno opada povećanjem atomskog broja sve do Eu, za koji je vidljiva negativna anomalija. Nakon Eu, obogaćenja prate trend amfibolita, a vrijednosti obogaćenja za teže elemente rijetkih zemalja iznose od 20 (Gd) do 10 (Lu) puta u odnosu na hondritni meteorit.



Slika 6-25. REE dijagram istraživaniog filonitiziranog paragnajsa, normaliziran prema vrijednostima za hondritni meteorit prema Sun & McDonough (1989).

7. DISKUSIJA

7.1. NAČIN POJAVLJIVANJA I PETROGRAFSKE ZNAČAJKE STIJENA

Istraživane stijene se na terenu pojavljuju kao leće amfibolita uložene u filonite i filonitizirane paragnajseve, što odgovara opisu koji su dali Jamičić i Brkić (1987). Prema podjeli slavonskih planina na tri tektono–metamorfne jedinice prema Jamičiću (1983, 1988), istraživane stijene Krndije pripadaju Psunjsko–kutjevačkom kompleksu koji se sastoji od stijena niskog do srednjeg stupnja metamorfizma. Jamičić (1983, 1988) je smatrao da je ovaj kompleks stijena formiran tijekom bajkalske orogeneze u neoproterozoiku te da je naknadno izmijenjen mlađim metamorfnim događajima. Prema istraživanjima Balena i dr. (2006) može se zaključiti da je najviše dosegnuti stupanj metamorfizma odgovarao amfibolitnom facijesu, s temperaturama od 600–650°C i tlakovima od 8–11 kbar. Osim toga, Balen i dr. (2006) zaključili su da se metamorfni događaj odigrao na granici ordovicij–silur (444 ± 19 i 428 ± 25 milijuna godina) na temelju radiometrijskog datiranja monacita u granatnim tinjčevim škriljavcima Kutjevačke rijeke. Međutim, istražujući između ostalog i kloritno-sericitne škriljavce niskog stupnja metamorfizma Kutjevačke rijeke Balen i dr. (2018) su temeljem datiranja monacita dobili prosječne starosti od 109 ± 13 milijuna godina, te odredili vrhunac metamorfizma pri tlaku od 4,6 do 6,0 kbar i temperaturama 445 do 460°C, kojeg su pripisali alpskom metamorfizmu te ga vezali za krednu koliziju Jadranske i Europske ploče.

Na temelju petrografskih analiza uzorak KR-1E određen je kao amfibolit, uzorci KR-1A, KR-1D i KR-1F kao trakasti amfiboliti, uzorci KR-1B i KR-2B kao „porfiroblastični“ amfiboliti, uzorak KR-2C kao trakasti „porfiroblastični“ amfibolit, a uzorci KR-1C i KR-2A određeni su kao filonit odnosno filonitizirani paragnajs. Glavne minerale u amfibolitima čine amfibol i plagioklas, a u nekim uzorcima je u većoj količini prisutan i kvarc (npr. uzorak KR-1F). Akcesorni minerali u amfibolitima su opaka faza (najvjerojatnije ilmenit), biotit i apatit. Kao produkt retrogradne izmjene u amfibolitima nalaze se aktinolit, klorit, prehnit, sericit, epidot, coisit, klinocoisit i titanit. U filonitu i filonitiziranom paragnajsu glavni minerali su kvarc, feldspat, tinjčasti minerali i granat, dok se akcesorno pojavljuju cirkon, opaki minerali i turmalin. Kao produkt retrogradne izmjene u filonitu i filonitiziranom paragnajsu pojavljuju se sericit, epidot, klinocoisit i klorit.

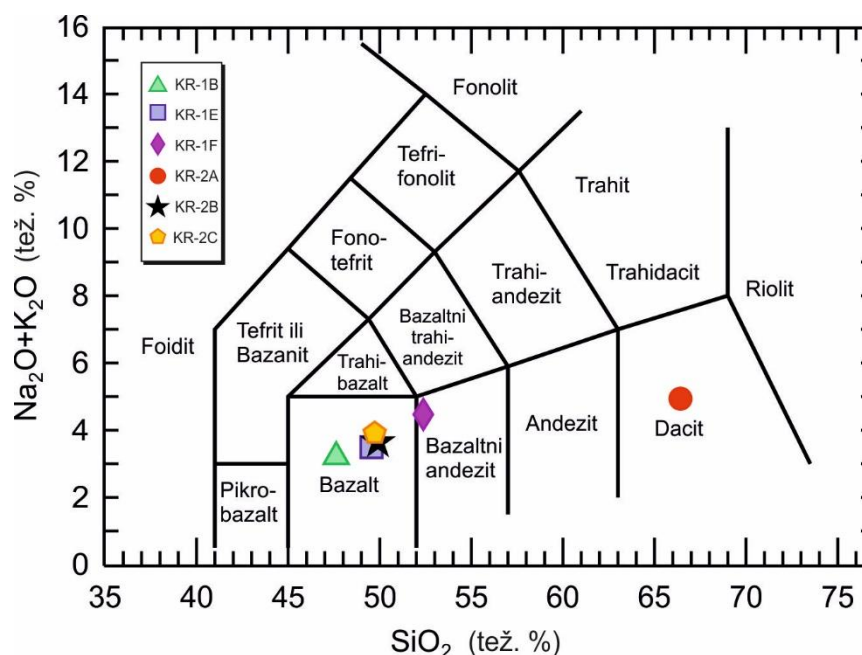
Iz petrografskih analiza može se zaključiti da su sve istraživane stijene nakon originalnog metamorfnog događaja zahvaćene retrogradnim izmjenama, što je dokumentirano prijelazom minerala hornblende u aktinolit i klorit, plagioklasa u prehnit, sericit, epidot, coisit i klinocoisit, biotita u klorit, te opake faze u titanit.

Različiti tipovi amfibolita ukazuju na razlike u protolitima iz kojih su formirani. Minerali amfibola i plagioklasa u trakastim amfibolitima jesu sitnozrnatiji od „porfiroblastičnih“ amfibolita. Istraživani amfiboliti imaju vrlo sličan modalni mineralni sastav, a razlikuju se u veličini zrna i po strukturama, što daje naslutiti da su protoliti bili sličnog kemijskog sastava.

Istraživani filoniti su folijativne teksture i bogati tinjčastim mineralima, muskovitom i biotitom. Karakterizirani su i trakastim teksturama s izmjenom traka bogatih tinjcima i kvarcom, te traka bogatih feldspatima i kvarcom. Biotit je retrogradno kloritiziran, a najintenzivnije kloritizirani listići biotita u uzorku KR-2A ne pokazuju orijentaciju paralelnu drugim mineralima, što upućuje na to da je retrogradna izmjena biotita u klorit nastupila nakon deformacijskog događaja vezanog za progradni metamorfizam.

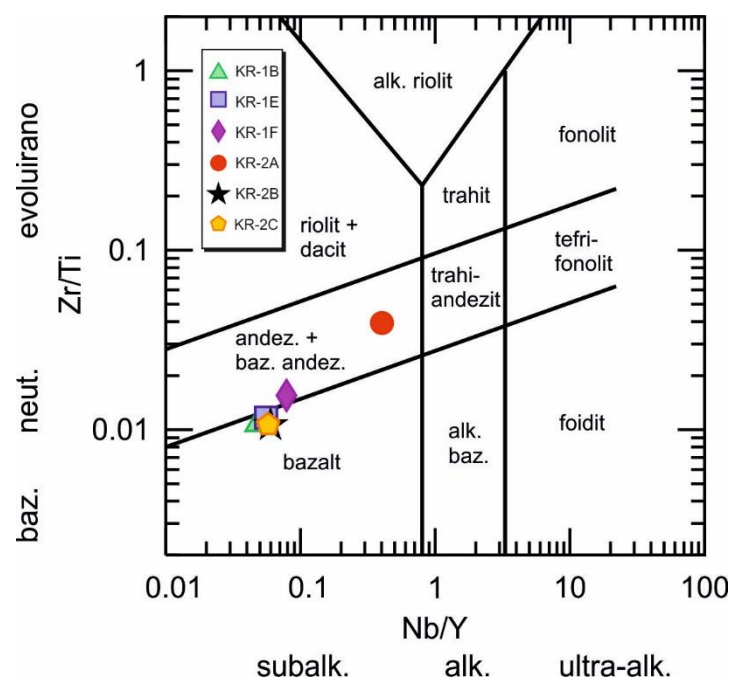
7.2. KEMIJSKA KLASIFIKACIJA STIJENA

Za klasifikaciju magmatskih stijena najčešće se koristi TAS (*total alkali – silica*) dijagram, koji prikazuje sumu masenih udjela Na_2O i K_2O na ordinati i maseni udio SiO_2 na apscisi. Postoje TAS dijagrami različitih autora, a u ovom radu je korišten dijagram LeBas i dr. (1986). Kod istraživanja metamorfnih stijena TAS dijagram služi za određivanje protolita, ali zahtjeva oprez budući da alkalije mogu biti lako mobilizirane metamorfnim procesima, alteracijama i procesima trošenja. Zbog toga su u ovom radu za kemijsku analizu korišteni najsvježiji uzorci, određeni petrografskom analizom. Uzorci amfibolita KR-1B, KR-1E, KR-2B i KR-2C projicirani su u polje bazalta (Slika 7-1), a uzorak amfibolita KR-1F u polje bazalnog andezita radi povećanog sadržaja SiO_2 u odnosu na ostale uzorke amfibolita. Uzorak filonitiziranog paragnajsa KR-2A projiciran je u polje dacita što je očekivano s obzirom na količinu kvarca u uzorku (Slika 7-1).



Slika 7-1. TAS dijagram prema LeBas i dr. (1986).

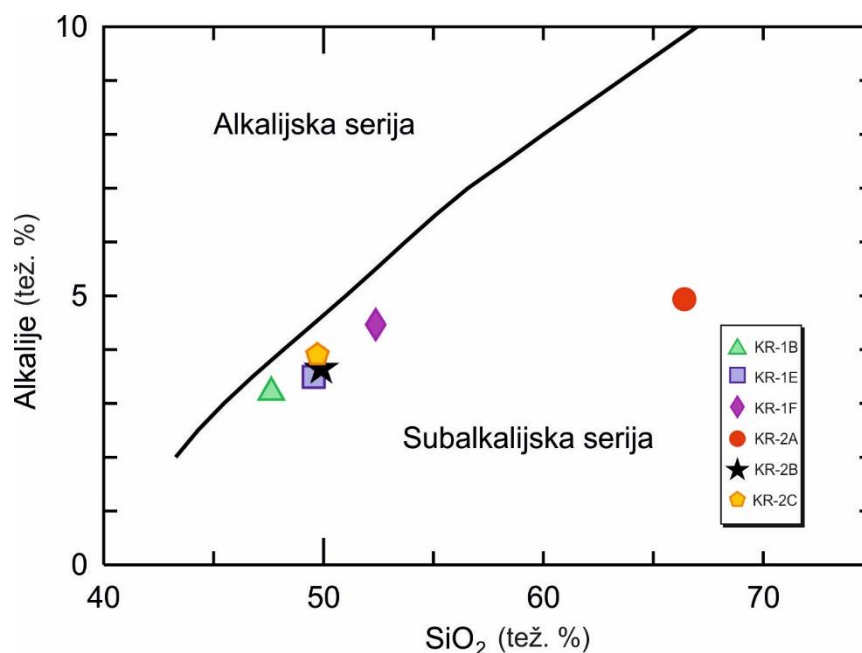
Zbog veće sigurnosti u kemijskoj klasifikaciji stijena, korišten je i dodatni klasifikacijski dijagram $Zr/Ti - Nb/Y$ čiji je autor Pearce (1996). Ovaj dijagram koristi omjere koncentracija imobilnih elemenata u tragovima pa se smatra vrlo pouzdanim prilikom klasifikacije alteriranih i metamorfoziranih stijena. Na apscisi se nalazi omjer Nb prema Y, a na ordinati omjer Zr prema Ti. Korištenjem ovog dijagrama dobiva se nešto drukčija slika o protolitima istraživanih stijena. Uzorci amfibolita KR-1B, KR-1E, KR-2B i KR-2C ovdje se projiciraju u polje bazalta, ali na samoj granici s poljem andezita i bazaltnih andezita, kojem pripada uzorak KR-1F (Slika 7-2). Uzorak KR-2A također se projicira u polje andezita i bazaltnih andezita što se znatno razlikuje od njegove projekcije na TAS dijagramu. Na temelju ovog dijagrama može se reći da su svi protoliti amfibolita bazičnog do neutralnog karaktera, a filonitiziranog paragnajsa neutralnog karaktera (Slika 7-2).



Slika 7-2. Zr/Ti – Nb/Y dijagram prema Pearce (1996).

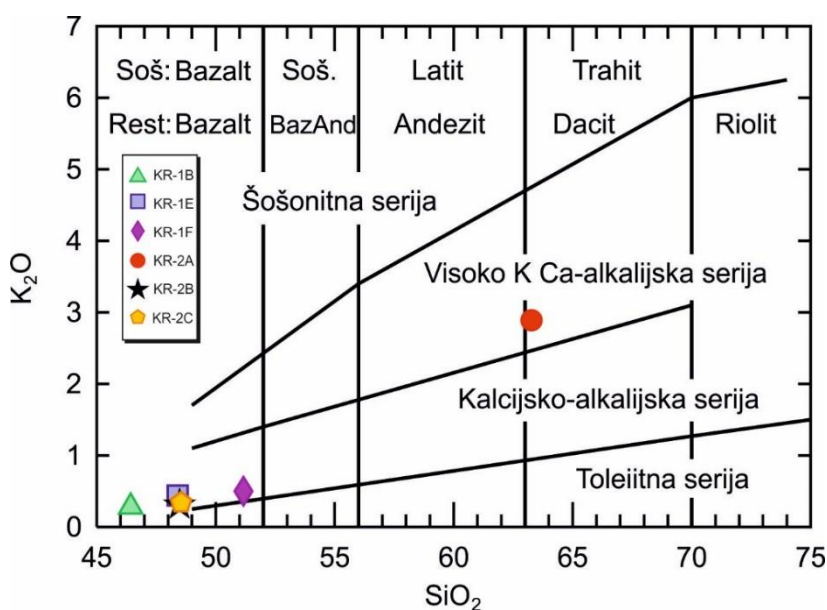
7.3. ODREĐIVANJE MAGMATSKJE SERIJE

Osnovna podjela magmatskih serija stijena je na alkalijsku i subalkalijsku seriju. Osim za klasifikaciju stijena, dijagram alkalija i SiO_2 može se koristiti za osnovnu odredbu magmatske serije stijena. U ovu svrhu korišten je dijagram prema Irvine & Baragar (1971), na kojem su se sve istraživane stijene projicirale se u polje subalkalijske magmatske serije (Slika 7–3).



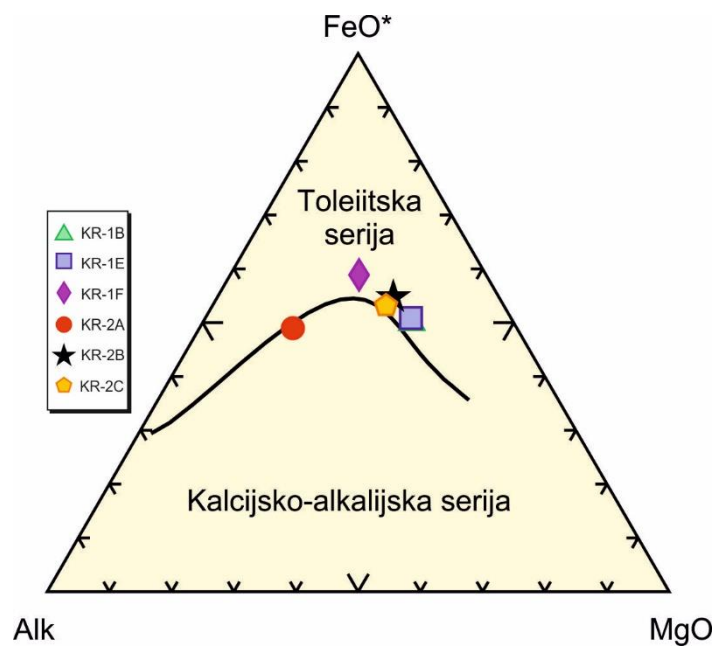
Slika 7-3. Alkalije – SiO_2 dijagram prema Irvine & Baragar (1971).

Subalkalijska magmatska serija se dalje dijeli na toleitnu i kalcijsko–alkalijsku seriju, a kalcijsko–alkalijska serija može evolucijom prijeći u visoko–K i šošonitnu seriju s obzirom na sadržaj K_2O . Za detaljnije i preciznije određivanje magmatske serije istraživanih stijena korišteni su dodatni dijagrami, jedan od kojih je K_2O – SiO_2 dijagram prema La Maitre i dr. (1989). Ovaj dijagram služi za detaljnu podijelu subalkalijske serije na spomenute podtipove. Uzorci amfibolita se na ovom dijagramu projiciraju na granicu toleitne i kalcijsko–alkalijske serije, a uzorak filonitiziranog paragnajsa u polje visokokalijske–kalcijsko–alkalijske serije (slika 7–4).



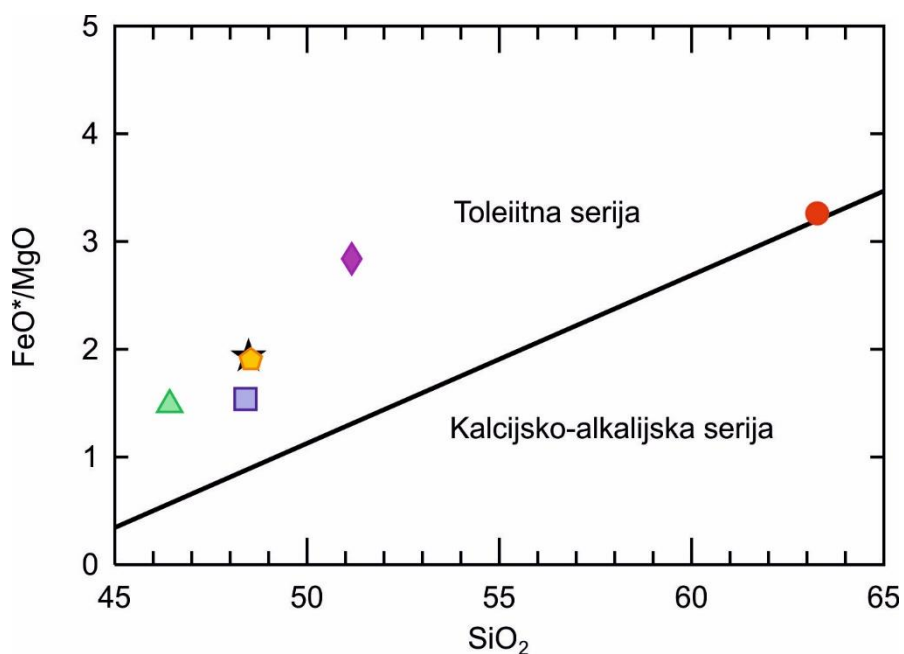
Slika 7-4. Diskriminacijski dijagram K_2O – SiO_2 prema La Maitre i dr. (1989).

Budući da geokemijski dijagrami nisu jednoznačni, za odredbu magmatske serije korišteno je više dijagrama kako bi se dobila realnija slika. Stoga su korišteni i AFM dijagram prema Irvine & Baragar (1971) te FeO^*/MgO – SiO_2 dijagram prema Miyashiro (1975). AFM dijagram je trokomponentni dijagram $Na_2O + K_2O$ (Alk), $FeO + Fe_2O_3$ (FeO^*) i MgO , a smatra se vrlo pouzdanim za odvajanje toleitne i kalcijsko–alkalijske magmatske serije. Svi uzorci amfibolita su na AFM dijagramu projicirani u polje toleitske magmatske serije, a uzorak KR-2A u polje kalcijsko–alkalijske magmatske serije, na samoj granici s toleitnom serijom (Slika 7–5).



Slika 7-5. AFM dijagram prema Irvine & Baragar (1971).

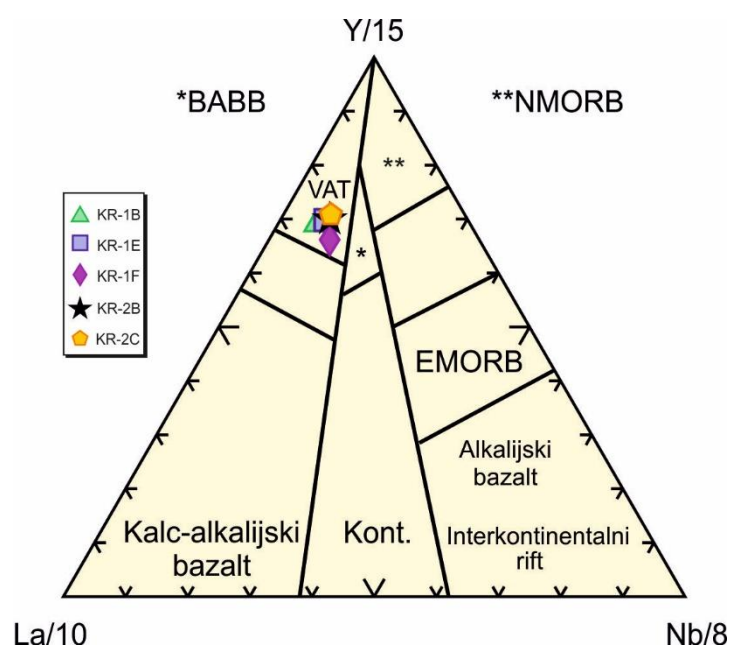
U $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ dijagramu prema Miyashiro (1975) svi su uzorci projicirani u polje toleiitne magmatske serije. Uzorak KR-2A projiciran je na samu granicu s kalcijsko-alkalijskom serijom (slika 7-6).



Slika 7-6. Dijagram $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ prema Miyashiro (1975). Preračunavanje Fe_2O_3 u FeO^* :
 $\text{FeO}^* = 0,89981 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Iz prikazanih dijagrama vidljivo je da su protoliti analiziranih amfibolita najvjerojatnije pripadali toleitiitnoj magmatskoj seriji, a protolit filonitiziranog gnajsa (uzorak KR-2A) kalcijsko–alkalijskoj magmatskoj seriji, koja je karakteristična za zone subdukcije.

Kako bi se s većom sigurnošću odredile magmatske serije istraživanih stijena korišten je i dijagram elemenata u tragovima La, Y i Nb, konstruiran za bazaltne stijene. Ovaj dijagram prema Cabanis & Lecolle (1989) dodatno potvrđuje da su protoliti analiziranih amfibolita pripadali toleitiitnoj seriji, i dodatno da su stijene protoliti bile formirane u vulkanskom luku (Slika 7–7).



Slika 7-7. Diskriminacijski dijagram La/10–Y/15–Nb/8 prema Cabanis & Lecolle (1989). BABB = back arc basin basalts (bazalti zalučnog bazena); NMORB = normal mid–ocean ridge basalt (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); EMORB = enriched mid–ocean ridge basalts (obogaćeni bazalti srednjooceanskog grebena); VAT = volcanic arc tholeiites (toleitiitski bazalti vulkanskog luka).

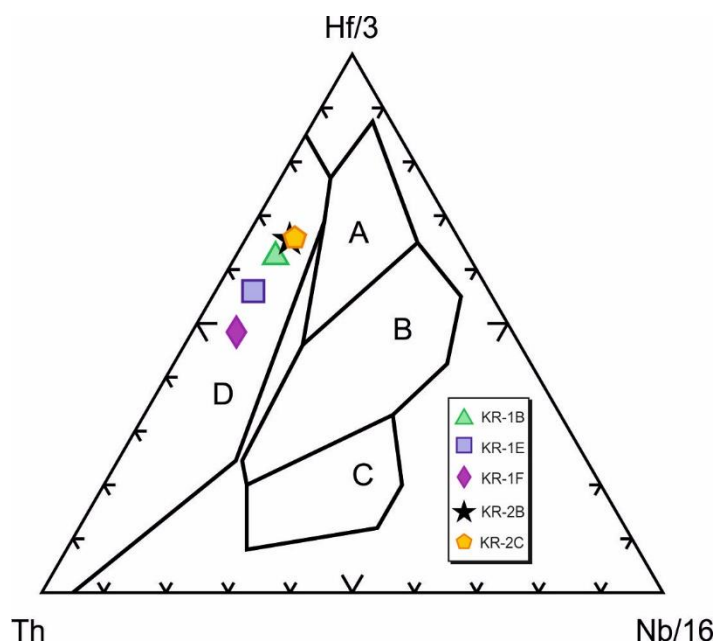
Dodatna potvrda da uzorak KR-2A pripada kalcijsko–alkalijskoj seriji stijena može se naći u sadržaju elemenata rijetkih zemalja. Uzorak KR-2A pokazuje znatno obogaćenje lakim elementima rijetkih zemalja u odnosu na teške ($La_N/Yb_N = 7,39$) što je uobičajena karakteristika stijena kalcijsko–alkalijske serije (Wilson, 1989; Arculus, 2003), koja je uobičajena za subdukcijske zone.

7.4. ODREĐIVANJE GEOTEKTONSKOG POLOŽAJA

7.4.1 Amfiboliti

Pri istraživanju metamorfnih stijena, diskriminacijski dijagrami za određivanje geotektonskog položaja upućuju na povezanost protolitnih stijena s okolišem u kojem su nastale. Ovo poglavlje se odnosi na istraživane amfibolite, koji su nastali metamorfozom toleitskih bazalta. Prema tome, korišteni su diskriminacijski dijagrami za stijene bazalnog sastava.

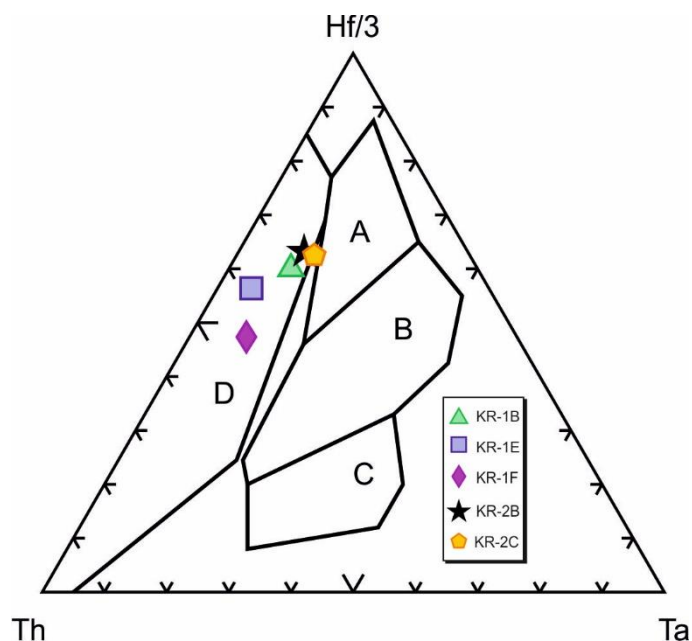
Trokomponentni diskriminacijski dijagrami prema Wood (1980) koriste različite omjere imobilnih HFSE poput Th, Hf, Nb, Ta i Zr, a služe za određivanje geotektonskog položaja kako bazaltnih stijena tako i stijena neutralnog i kiselog sastava. Smatraju se izuzetno pouzdanim u identificiranju bazalta vulkanskih lukova. Na dijagramu Th-Hf/3-Nb/16 prema Wood (1980) svi uzorci amfibolita projicirali su se u polje bazalta vulkanskih lukova (slika 7–8).



Slika 7-8. Diskriminacijski dijagram Th-Hf/3-Nb/16 prema Wood (1980). A = normal mid-ocean ridge basalts (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); B = enriched mid-ocean ridge basalts (obogaćeni bazalti srednjooceanskog grebena); C = ocean island basalts (bazalti oceanskih otoka); D = volcanic arc basalts (bazalti vulkanskog luka).

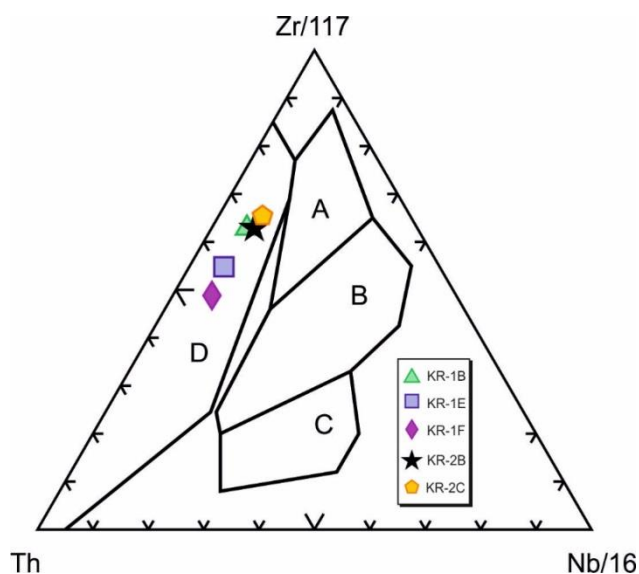
Istraživani amfiboliti na dijagramu Th-Hf/3-Ta prema Wood (1980) uglavnom su također projicirani u područje bazalta vulkanskih lukova. Na ovom dijagramu uzorci KR-1B, KR-

2B su projicirani bliže granici polja N-MORB bazalta, a uzorak KR-2C na samu granicu (Slika 7–9).



Slika 7-9. Diskriminacijski dijagram Th-Hf/3-Ta prema Wood (1980). A = normal mid-ocean ridge basalts (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); B = enriched mid-ocean ridge basalts (obogaćeni bazalti srednjooceanskog grebena); C = ocean island basalts (bazalti oceanskih otoka); D = volcanic arc basalts (bazalti vulkanskog luka).

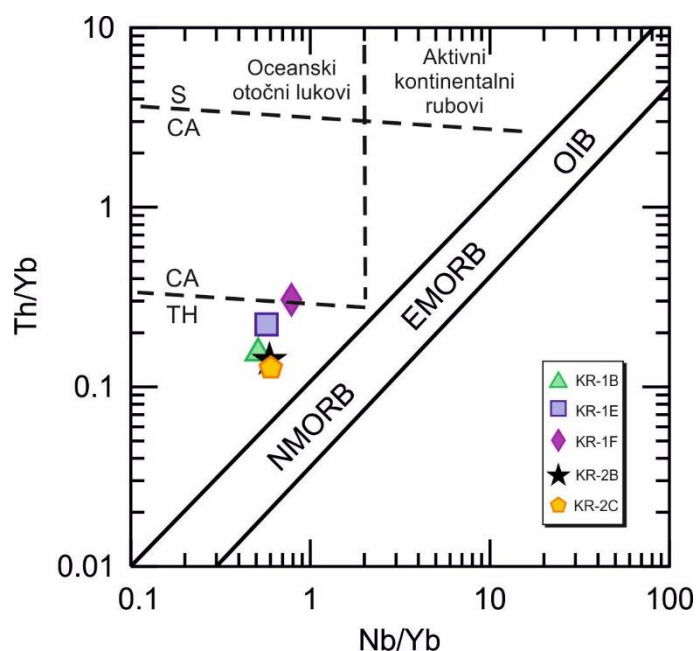
Posljednji korišteni dijagram prema Wood (1980) je Th-Zr/117-Nb/16 dijagram na kojem se istraživani amfiboliti ponovno projicirani u polje bazalta vulkanskih lukova (Slika 7–10).



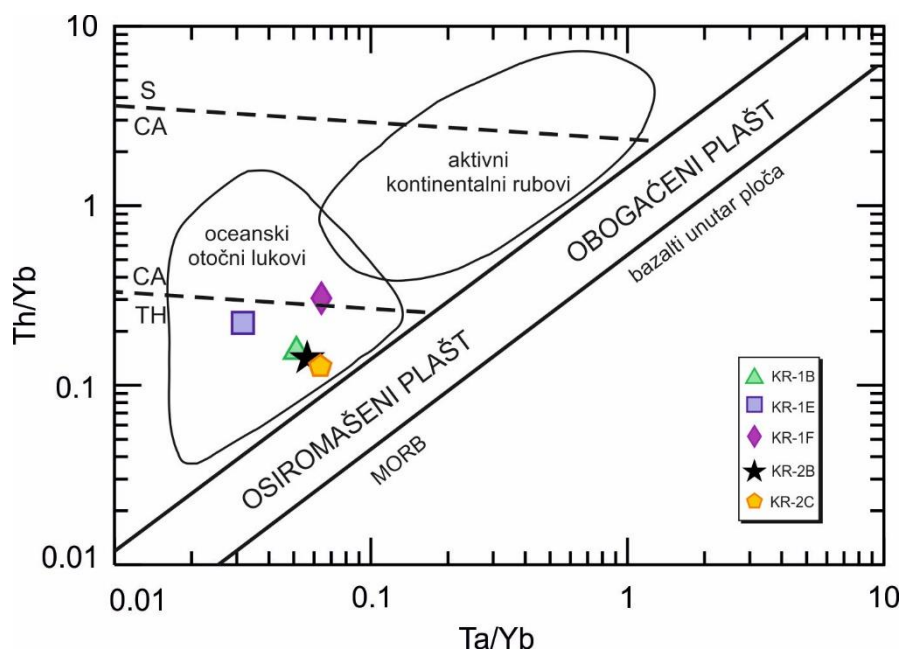
Slika 7-10. Diskriminacijski dijagram Th-Zr/117-Nb/16 prema Wood (1980). A = normal mid-ocean ridge basalts (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); B = enriched mid-ocean ridge basalts (obogaćeni bazalti srednjooceanskog grebena); C = ocean island basalts (bazalti oceanskih otoka); D = volcanic arc basalts (bazalti vulkanskog luka).

Dodatno su korišteni dijagrami prema Pearce (1983, 2008) koji također koriste omjere imobilnih HSF elemenata Th, Yb, Nb i Ta. Ovi dijagrami se osim za određivanje geotektonskog položaja stijena koriste i za određivanje podtipa subalkalijske magmatske serije stijena. Na dijagramu Th/Yb-Nb/Yb prema Pearce (2008) istraživani amfiboliti projicirani su u polje oceanskih otočnih lukova (slika 7-11). Osim toga, prema tom dijagramu protoliti svih uzoraka amfibolita pripadaju toleitijskoj magmatskoj seriji, osim protolita uzorka KR-1F koji je projiciran na samu granicu s kalcijsko–alkalijskom magmatskom serijom (slika 7–11).

Korištenjem dijagrama Th/Yb-Ta/Yb prema Pearce (1983) dobiva se ista slika kao i kod dijagrama prema Pearce (2008). Protoliti istraživanih amfibolita geotektonski pripadaju oceanskom otočnom luku, a po karakteru pripadaju toleitijskoj magmatskoj seriji izuzev protolita amfibolita KR-1F koji je projiciran na granicu s kalcijsko–alkalijskom serijom (slika 7–12).

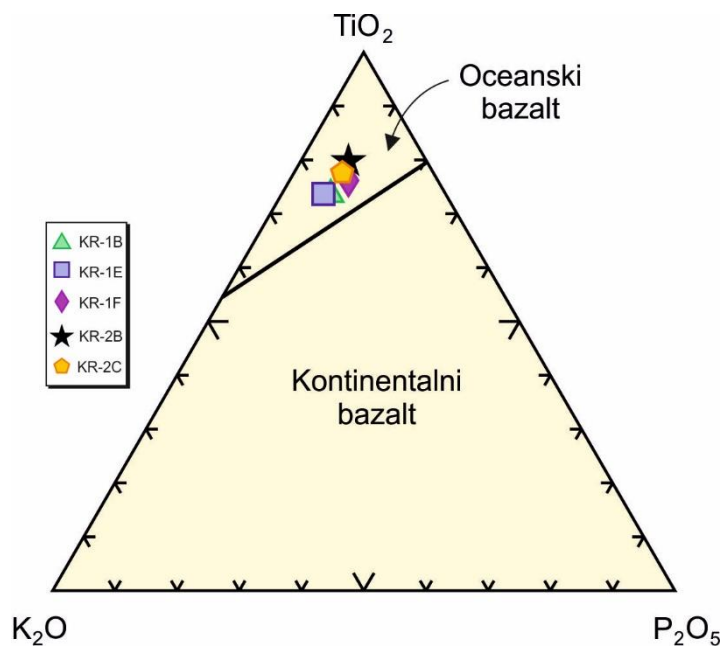


Slika 7-11. Diskriminacijski dijagram Th/Yb-Nb/Yb prema Pearce (2008). NMORB = normal mid-ocean ridge basalts (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); EMORB = enriched mid-ocean ridge basalts (obogaćeni bazalti srednjooceanskog grebena); OIB = ocean island basalts (bazalti oceanskih otoka); S = šošonitna serija; CA = kalcijsko alkalijska serija; TH = toleitijska serija.



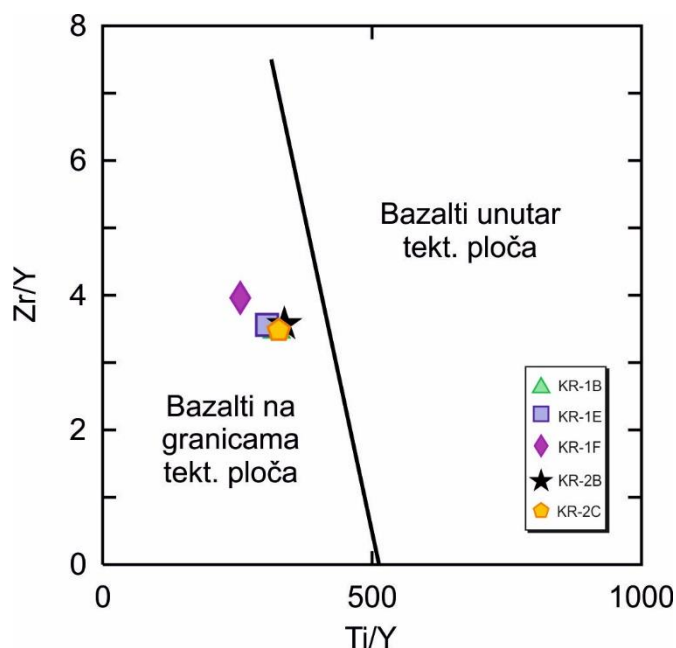
Slika 7-12. Diskriminacijski dijagram Th/Yb-Ta/Yb prema Pearce (1983). NMORB = normal mid-ocean ridge basalts (normalni bazalti srednjooceanskog grebena); S = šošonitna serija; CA = kalcijsko alkalijska serija; TH = toleitna serija.

Upotrijebljen je trokomponentni diskriminacijski dijagram prema Pearce (1975) koji koristi glavne elemente kalij, titan i fosfor za podjelu bazalta na oceanske (MORB i bazalte oceanskih otoka) i kontinentalne. Svi istraživani amfiboliti jasno se projiciraju u polje oceanskih bazalta (Slika 7–13).



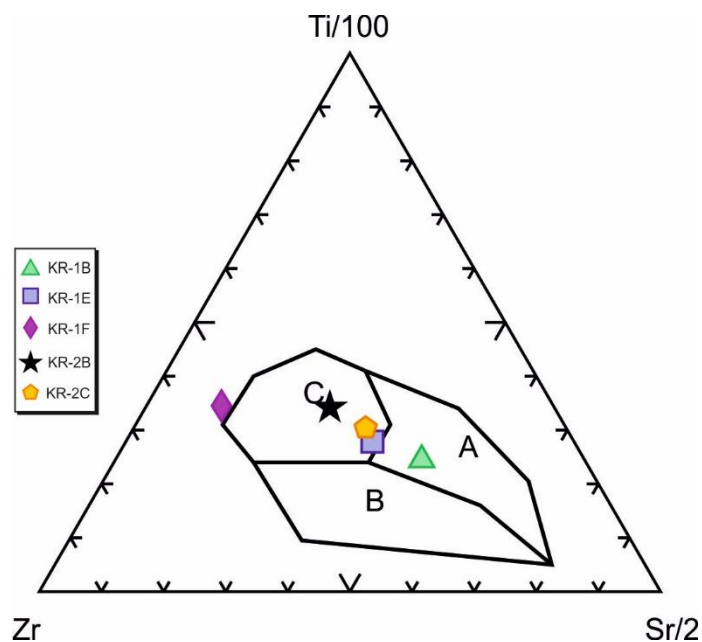
Slika 7-13. Diskriminacijski dijagram $\text{K}_2\text{O-TiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ prema Pearce (1975).

Dijagram Zr/Y-Ti/Y prema Pearce (1975) razdvaja bazalte nastale na granicama tektonskih ploča i bazalte nastale unutar tektonskih ploča. Svi istraživani uzorci projiciraju se u polje bazalta nastalih na granicama tektonskih ploča (Slika 7–14).



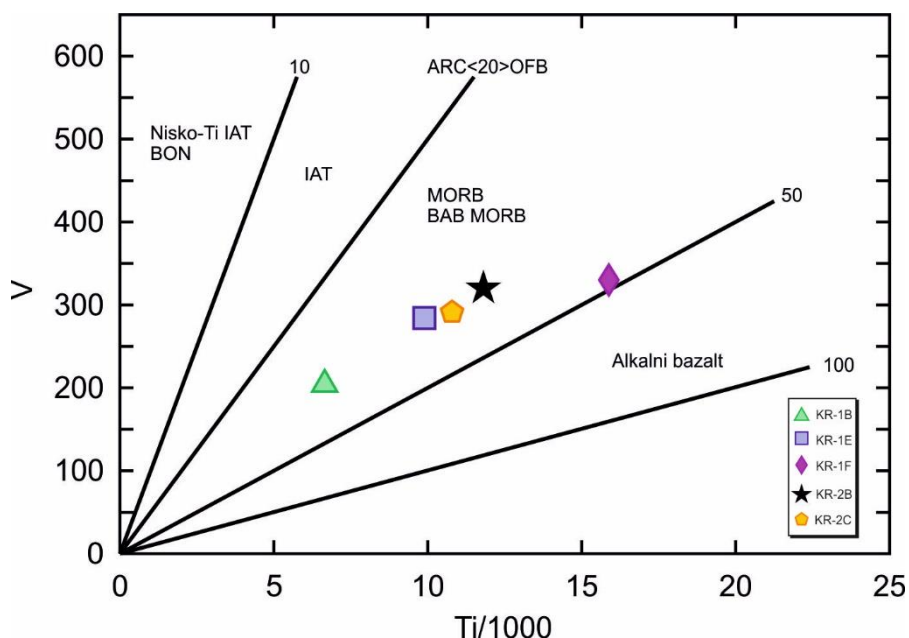
Slika 7-14. Diskriminacijski dijagram Zr/Y-Ti/Y prema Pearce & Gale (1977).

Na dijagramu Zr-Ti/100-Sr/2 prema Pearce & Cann (1973) istraživani amfiboliti projiciraju se u različita polja. Uzorci KR-1E, KR-2B i KR-2C projiciraju se u polje bazalta oceanskog dna, uzorak KR-1B u polje bazalta otočnog luka, a uzorak KR-1F blizu ali izvan polja bazalta oceanskog dna (Slika 7–15). Ovakav raspored može se objasniti krustalnom kontaminacijom izdižuće magme u zoni subdukcije. Taljenjem subducirajuće ploče karaktera bazalta oceanskog dna došlo je do izdizanja magme koja je u kontaktu sa stijenama kontinentalne kore bila kontaminirana. Ovakav geokemijski otisak, u kojem su prisutne karakteristike bazalta oceanskog dna i karakteristike bazalta otočnog luka, ukazuje na to da su stijene nastale u zalučnom bazenu, (back arc basin) iza zone subdukcije.



Slika 7-15. Diskriminacijski dijagram Zr-Ti/100-Sr/2 prema Pearce & Cann (1973). A = bazalti oceanskih otoka; B = kalcijsko-alkalijski bazalti; C = bazalti oceanskog dna.

Diskriminacijski dijagram V-Ti/1000 prema Shervais (1982) dijeli bazaltne stijene na toleitske bazalte otočnih lukova, MORB-ove, bazalte nastale u zalučnim bazenima (BAB MORB), alkalne bazalte i boninite. Istraživani amfiboliti su na ovom dijagramu projicirani u polje koje odgovara MORB-u i bazaltima zalučnog bazena (Slika 7-16).



Slika 7-16. Diskriminacijski dijagram V-Ti/1000 prema Shervais (1982). MORB = mid-ocean ridge basalts (bazalti srednjooceanskog grebena); BAB = back arc basalts (bazalti zalučnog bazena). IAT = island arc basalts (bazalti otočnih lukova).

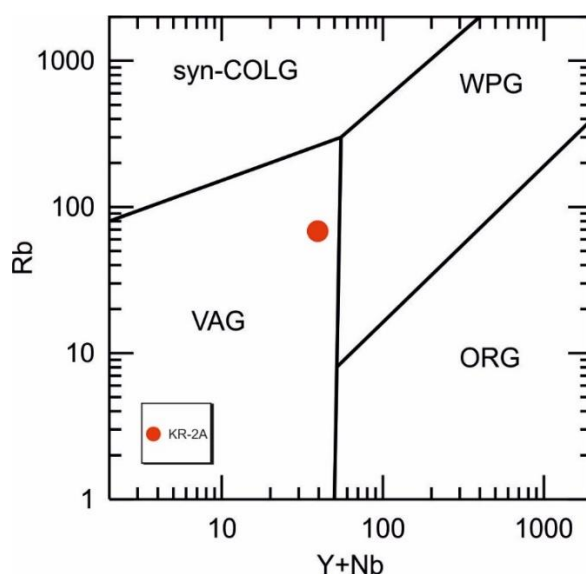
Spider dijagrami svih istraživanih stijena pokazuju skokovit trend s izraženim negativnim i pozitivnim pikovima, kakav je uobičajen za stijene nastale u subdukcijskim zonama. Svi analizirani uzorci pokazuju jasne negativne Nb-Ta anomalije, koje se mogu objasniti zadržavanjem ovih elemenata u restitnoj mineralnoj fazi (ilmenit, titanit i dr.) prilikom parcijalnog taljenja stijena uzrokovano subdukcijom. Na isti način mogu se objasniti negativne anomalije Ti kod uzoraka KR-1F i KR-2A. Izražene negativne anomalije Sr u uzorcima KR-1F i KR-2A vjerojatno su posljedica zamjene Ca^{2+} sa Sr^{2+} u plagioklasima, koji su prilikom parcijalnog taljenja ostali u restitnoj fazi subducirane ploče.

Oblik krivulje raspodjele koncentracija elemenata rijetkih zemalja u kojem su LREE blago obogaćene u odnosu na HREE, s vrijednostima La_N/Yb_N od 1,50 do 1,80 također ukazuju da se radi o protolitu prije u zalučnom bazenu nego na srednjeoceanskom grebenu.

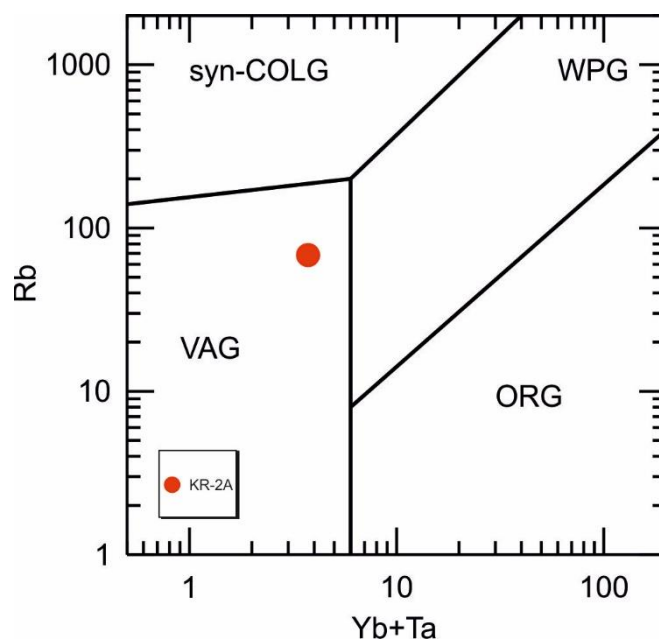
Na temelju svih prikazanih dijagrama za određivanje geotektonskog položaja može se reći da su stijene protoliti amfibolita bili bazalti oceanskog porijekla, nastali na granici tektonskih ploča, vjerojatno vezani za okoliš zalučnog bazena iza zone subdukcije te da pripadaju toleitskoj magmatskoj seriji.

7.4.2 Filonitizirani paragnajs

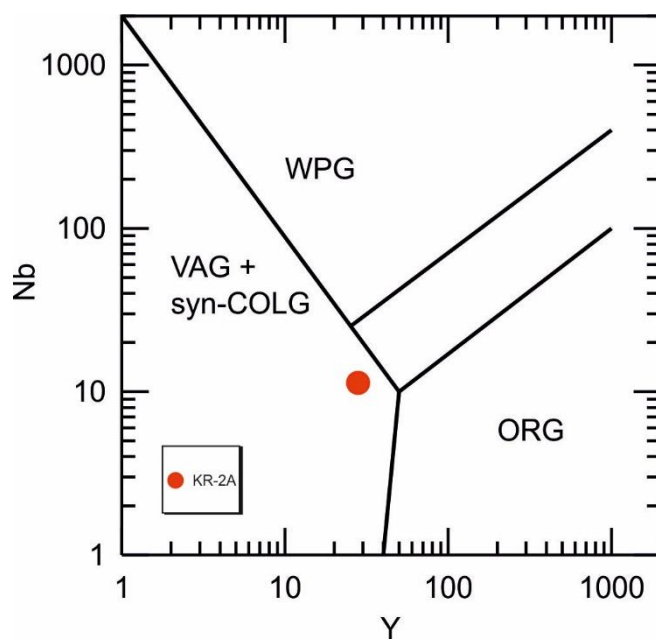
Za određivanje geotektonskog položaja nastanka protolita filonitiziranog gnajsa korišteni su Rb-(Y+Nb), Rb-(Yb+Ta), Nb-Y i Ta-Yb dijagrami čiji su autori Pearce i dr. (1984). U svim navedenim dijagramima filonitizirani gnajs KR-2A projiciran je u područje vulkanskih lukova (Slike 7-17, 7-18, 7-19 i 7-20).



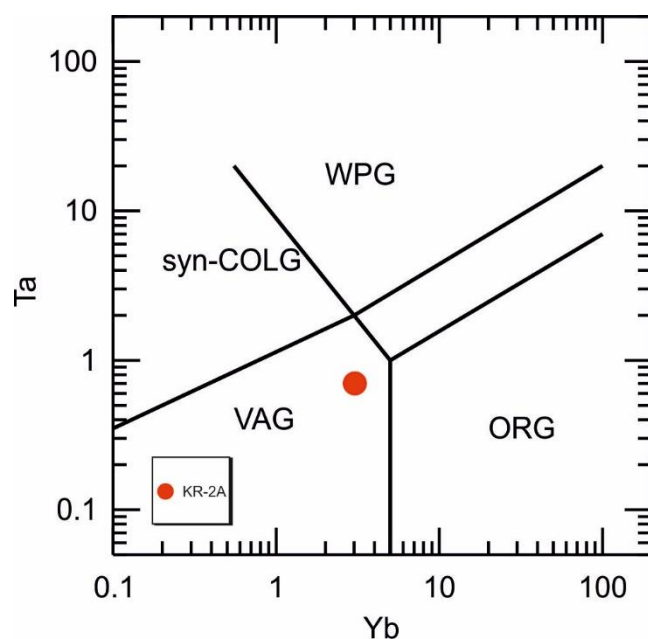
Slika 7-17. Rb-(Y+Nb) dijagram (Pearce i dr., 1984). syn-COLG = sinkolizijski graniti; WPG = graniti unutar ploča; VAG = graniti vulkanskog luka; ORG = graniti oceanskog grebena.



Slika 7-18. *Rb-(Yb+Ta) dijagram (Pearce i dr., 1984).* syn-COLG = sinkolizijski graniti; WPG = graniti unutar ploča; VAG = graniti vulkanskog luka; ORG = graniti oceanskog grebena.

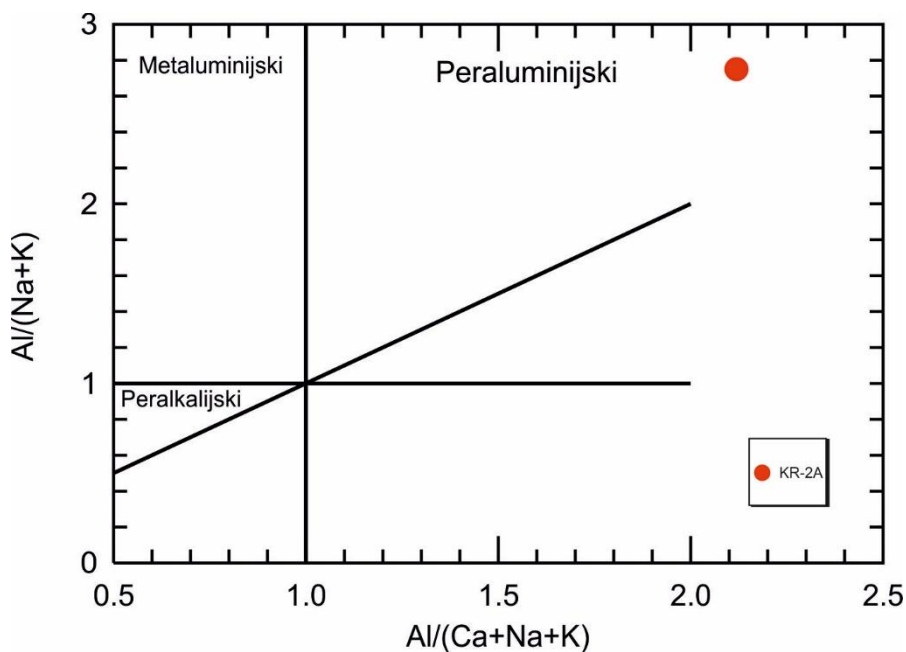


Slika 7-19. *Nb-Y dijagram (Pearce i dr., 1984).* syn-COLG = sinkolizijski graniti; WPG = graniti unutar ploča; VAG = graniti vulkanskog luka; ORG = graniti oceanskog grebena.



Slika 7-20. Ta-Yb dijagram (Pearce i dr., 1984). syn-COLG = sinkolizijski graniti; WPG = graniti unutar ploča; VAG = graniti vulkanskog luka; ORG = graniti oceanskog grebena.

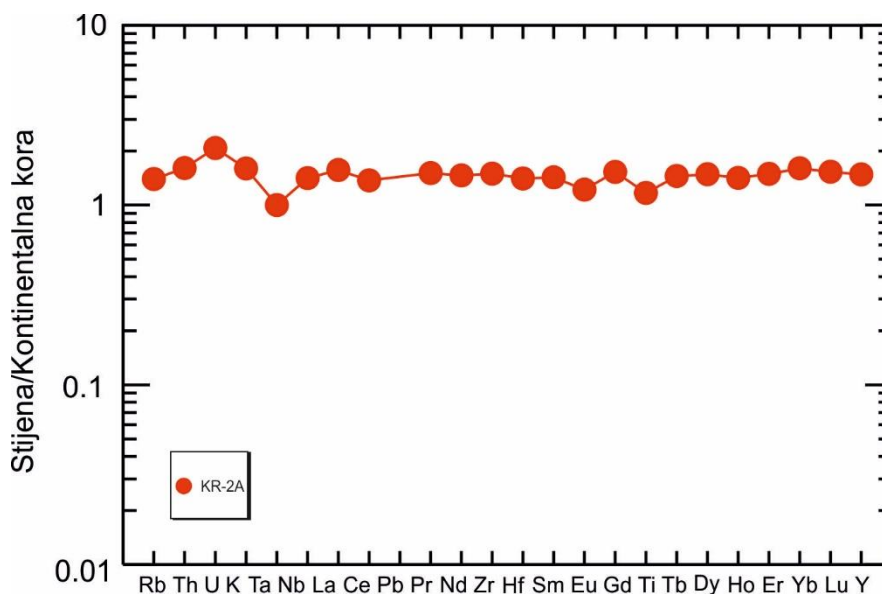
Po svom karakteru protolit istraživanog filonitiziranog gnajsa bio je peraluminijskog karaktera, što je ilustrirano na $Al/(Na+K)$ - $Al/(Ca+Na+K)$ dijagramu prema Maniar & Piccoli (1989) na Slici 7-21. Za peraluminijske granite se smatra da su nastali taljenjem metasedimenata ili da su kontaminirani materijalom kore.



Slika 7-21. Dijagram $Al/(Na+K)$ - $Al/(Ca+Na+K)$ prema Maniar-Piccoli (1989).

Usporedba elemenata u tragovima u istraživanom filonitiziranom gnajsu s njihovom prosječnom koncentracijom u kori prema Rudnick & Gao (2003) prikazana je na Slici 7-22

, a iz koje je jasno da se radi o materijalu kore, budući su elementi u tragovima u filonitiziranom gnajsu ujednačeno samo 1 do 2 puta obogaćeni u odnosu na prosječni sastav kore.



Slika 7-22. Dijagram elemenata u tragovima prema Runick & Gao (2003).

Oblik krivulje raspodjele koncentracija elemenata u tragovima u spider dijagramu (Slika 6-23) s jasno izraženom Nb-Ta anomalijom, pozitivnom U-anomalijom, te negativnim Sr- i Ti-anomalijom karakteristika je stijena formiranih u zoni subdukcija.

Oblik krivulje raspodjele koncentracija elemenata rijetkih zemalja u REE dijagramu (Slika 6-25), s obogaćenim LREE u odnosu na HREE, pri čemu je LaN/YbN jednak 7,39 a ΣREE jednaka 153,84 također jednoznačno upućuje da je protolit filonitiziranog gnajsa krustalnog porijekla.

7.4.3 Petrogenetski model

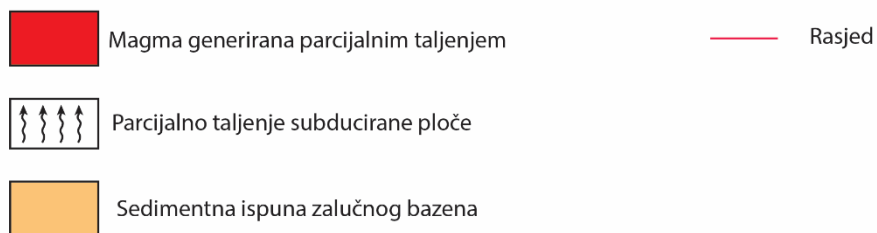
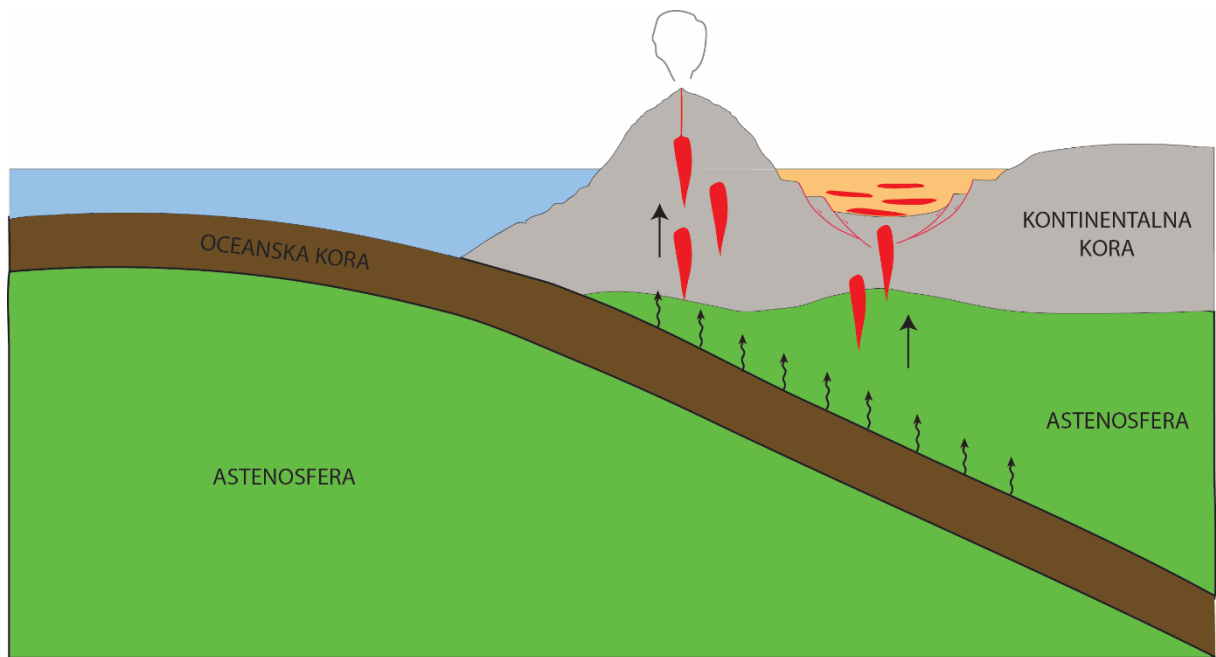
U okviru ovog rada napravljena su petrografska i geokemijska istraživanja amfibolita uložениh u filonitizirane paragnajseve na Krndiji, a za koje se smatra da pripadaju Psunjsko-kutjevačkom kompleksu. Taj kompleks sadrži metamorfne stijene niskog do srednjeg stupnja metamorfizma facijesa zelenih škriljavaca (metapelite i kloritne škriljavce) te metamorfne stijene amfibolitnog facijesa (gnajseve, granatne tinjčeve škriljavce, amfibolite, metagabre i mramore), a cijeli je kompleks lokalno intrudiran granodioritima i plagiogranitima (Pamić, 1986; Pamić i dr., 1988, Pamić & Lanphere, 1991).

Do sada je bilo uvriježeno mišljenje da je Psunjsko-kutjevački kompleks formiran tijekom bajkalske orogeneze, te naknadno izmijenjen mlađim metamorfnim događajima (Jamičić, 1983, 1988). Recentna određivanja starosti su pokazala da su granatni tinjčevi škrljavci Kutjevačke rijeke nastali metamorfnim događajem na granici ordovicij-silur (Balen i dr., 2006), da je ortognajs Vetova, peraluminijuskog karaktera, obilježja kalcijско-alkalijske do visoko K-kalcijско-alkalijske magmatske serije, nastao na aktivnom kontinentalnom rubu, formiran u okviru kadoмијskog metamorfizma na sjevernom rubu Gondvane (Balen i dr., 2015), a da su kloritno-sericitni škrljavci Kutjevačke rijeke niskog stupnja metamorfizma, prosječne starosti od 109 ± 13 milijuna godina, te odgovaraju alpskom metamorfizmu vezanom za krednu koliziju jadranske i europske ploče (Balen i dr., 2018).

Budući recentna radiometrijska istraživanja amfibolita i paragnajseva Krndije nisu vršena, a upravo su takva istraživanja drugih vrsta stijena ovog kompleksa dovela u pitanje do sada uvriježena mišljenja o pretpostavljenoj prekambrijskoj ili staropaleozojskoj starosti stijena ovog kompleksa, nije moguće ništa reći o starosti metamorfizma ovdje istraživanih stijena.

Međutim, petrografska i geokemijska istraživanja jasno pokazuju da su protoliti paragnajseva bili sedimenti nastali trošenjem stijena kontinentalne kore, a koje su imale peraluminijски karakter, pripadale kalcijско-alkalijskoj magmatskoj seriji i koje su nastale u zoni subdukcije. Protoliti amfibolita su bili bazalti do bazalt-andeziti oceanskog porijekla, koji su pripadali toleitskoj magmatskoj seriji, nastali u zoni subdukcije, i to u okolišu zalučnog bazena.

Stoga predloženi petrogenetski model uključuje sedimentaciju kontinentalnog detritusa nastalog trošenjem felzičnih stijena peraluminijuskog karaktera, pripadnosti kalcijско-alkalijskoj magmatskoj seriji, formiranih na aktivnom kontinentalnom rubu. Sedimentacija kontinentalnog detritusa odvijala se istovremeno s periodičnim izljevima bazaltnih lava toleitskog karaktera u sedimentacijskom bazenu, koji je formiran subdukcijском tektonikom u okolišu koji odgovara zalučnom bazenu (Slika 7–23).



8. ZAKLJUČAK

Istraživane stijene Krndije pripadaju Psunjsko-kutjevačkom metamorfnom kompleksu koji sadrži stijene niskog do srednjeg stupnja metamorfizma. Petrografskom analizom istraživani uzorci određeni su kao trakasti i „porfiroblastični“ amfiboliti te filonitizirani paragnajsevi. Amfiboliti se na terenu pojavljuju u obliku leća metarskih dimenzija uloženi u filonitizirane paragnajseve koji su borani.

Kemijske analize pokazale su da su protoliti amfibolita bili toleitijski bazalti do bazalt-andeziti oceanskog porijekla. Geokemijske analize elemenata u tragovima ovih stijena ukazuju na to da su njihovi protoliti nastali iza zone subdukcije, u području zalučnog bazena. Filonitizirani paragnajsevi nastali su metamorfizmom sedimentnih stijena nastalih trošenjem felzičnih stijena kontinentalne kore kalcijsko-alkalijske magmatske serije peraluminijuskog karaktera čije je porijeklo s aktivnog kontinentalnog ruba.

Izvorni geotekonski položaj protolita odgovara zalučnom bazenu iza zone subdukcije u kojem se taložio sedimentni materijal deriviran s kontinenta istovremeno s povremenim izljevima bazaltnih lava. Nakon progradne faze metamorfizma kojim je došlo do boranja ovih stijena i pretvorbe u amfibolite i paragnajseve, stijene su pretrpjele retrogradnu fazu metamorfoze što je dokumentirano formiranjem retrogradnih minerala i u amfibolitima i filonitiziranom paragnajsu.

Metamorfni događaj koji je zahvatio istraživane stijene Psunjsko-kutjevačkog kompleksa na Krndiji nije moguće odrediti bez radiometrijskih istraživanja.

9. ZAHVALE

Zahvaljujem se djelatnicima Zavoda za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine, višim tehničarima gđi. Branki Prši i gosp. Vinku Baranašiću te stručnoj suradnici dr. sc. Michaeli Hruškovej na pomoći pri pripremi uzoraka za geokemijska i rendgenska istraživanja. Također se zahvaljujem tehničaru gosp. Mariju Valentu za izradu mikropetrografskih preparata te stručnom suradniku Nevenu Tadeju za pomoć pri interpretaciji rendgenograma.

Dr. sc. Mirku Belaku iz Hrvatsko geološkog instituta, koji je ukazao na najbolje očuvane izdanke amfibolita i filonitiziranih gnajseva, najljepše zahvaljujem za odlično vodstvo pruženo na terenu.

Najveću zahvalnost dugujem mentorici doc. dr. sc. Vesnici Garašić za pruženu podršku, razumijevanje i vodstvo te puno uloženog vremena kroz izradu diplomskog rada.

Na kraju, htio bih zahvaliti svojoj majci, Snježani Ostrelič, za bezuvjetnu podršku koju mi je pružila tijekom studija i života.

10. POPIS LITERATURE

- ARCULUS, R. J. (2003): *Use and Abuse of the Terms Calcalkaline and Calcalkalic*. Journal of Petrology 44/5, p. 929-935.
- BALEN, D., HORVATH, P., TOMLJENović, B., FINGER, F., HUMBER, B., PAMIĆ, J., ARKAI, P. (2006): *A record of pre-Variscan Barrovian regional metamorphism in the eastern part of the Slavonian Mountains (NE Croatia)*, Mineralogy and Petrology 87, p. 143-162.
- BALEN, D., HORVATH, P., FINGER, F., STARIJAŠ, B. (2013): *Phase equilibrium, geothermobarometric and xenotime age dating constraints on the Alpine metamorphism recorded in chloritoid schists from the southern part of the Tisia Mega-Unit (Slavonian Mts., NE Croatia)*. Int J Earth Sci (Geol Rundsch) (2013) 102:1091–1109.
- BALEN, D., MASSONNE, H.-J., PETRINEC, Z. (2015): *Collision-related Early Paleozoic evolution of a crustal fragment from the northern Gondwana margin (Slavonian Mountains, Tisia Mega-Unit, Croatia): Reconstruction of the P–T path, timing and paleotectonic implications*, Lithos 232, p. 211-228.
- BALEN, D., MASSONNE, H.-J., LITHER, I. (2018): *Alpine metamorphism of low-grade schists from the Slavonian Mountains (Croatia): new P-T and geochronological constraints*, International Geology Review 60:3, p. 288-304.
- BIŠEVAC, V., KRENN, E. FINGER, F., LUŽAR-OBERITER, B., BALEN, D. (2013): *Provenance of Paleozoic very low- to low-grade metasedimentary rocks of South Tisia (Slavonian Mountains, Radlovac Complex, Croatia)*. GEOLOGICA CARPATHICA, FEBRUARY 2013, 64, 1, 3—22.
- BOLCIC, I., JOVANOVIĆ, D. (1953): *Geološki Pregled Kamenoloma Krndija Kod Bekteškog Gradišta*. Fond struč. dok. IGI, Zagreb.
- BOLCIC, I., JOVANOVIĆ, D. (1954): *Geološki Pregled Kamenoloma Radlovac U Slav. Orahovici*. Fond struč. dok. IGI, Zagreb.
- CABANIS, B. & LECOLLE, M. (1989): *Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et ou de contamination crustale*. C. R. Acad. Sci. Ser. II, 309, 2023-2029.

- CSONTOS, L. (1995): *Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review*. Acta Vulcanologica 7, 1–13.
- CSONTOS, L., VÖRÖS, A. (2004): *Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region*. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 210, 1–56.
- CRNKOVIC, B., JURIŠA, M., MALEZ, M., MARIĆ, L., NIKLER, L., SOKAČ, B. & ŠIKIĆ, K. (1961): *Tumač Osnovnoj Geološkoj Karti Fnrj. List Orahovici*. Fond struč dok. IGI, Zagreb.
- DIENER, C. (1902): *Die Stellung Der Kroatisch-Slavonischen Inselgebirge Zu Den Alpen Und Dem Dinarischen Gebirgssysteme*. Mitt. Geogr. Ges., 45/9-10, 292-298, Wien.
- DIMITRIJEVIC, M. D., GRUBIC A., SIKOŠEK, B. (1972): *Tectonic Map Of Yugoslavia*. In M. Mahel: *Tectonic Map~Of Carpathien-Balkan Mountain System And Adjacent Areas*, 1 : 1,000.000. Bratislava.
- DIMITRIJEVIĆ, M. (1974): *Dinaridi: jedan model baziran na novoj globalnoj tektonici. Metalogenija i koncepcije geotektonskog razvoja Jugoslavije*. Simpozij, p. 141-178, Beograd.
- FODOR, L., CSONTOS, L., BADA, G., GYÖRFI, I., BENKOVICS, L. (1999): *Tertiary Tectonic Evolution of the Pannonian Basin System and Neighbouring Orogens: A New Synthesis of Palaeostress Data*. In: Durand, D., Jolivet, L., Horváth, F., Séranne, M. (Eds.), *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geological Society Special Publications 156, pp. 295–334.
- GÉCZY, B. (1973): *The origin of Jurassic faunal provinces and the Mediterranean plate tectonics*. Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eötvös Nominatae, Sectio Geologica 16, 99–114.
- GOLUB, LJ. & MARIE, L. (1968): *Kvarcni Trahiandezit S Loncarskog Visa (Krndija)*. Geol. vjesnik, 21, 255-271, Zagreb.
- GORJANOVIC-KRAMBERGER, D. (1897): *Geologija Okolice Kutjeva*. Rad JAZU, 131, 10-29, Zagreb.
- GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. (1907): *Die geotektonischen Verhaeltnisse des Agramer Gebires und die mit denselben in Zusammenhange stehenden Erscheinungen*, Verh. Geol. Reichsan. 13, p. 313-314, Beč.

- HAAS, J., HAMOR, G., JAMBOR, A., KOVACS, S., NAGYMAROSY, A., SZEDERKENYI, T. (2001): *Geology of Hungary*. Eotvos University press, Budapest.
- HAAS, J., PERO, C. (2004): *Mesozoic evolution of the Tisza Mega-unit*. Int J Earth Sci 93: 297–313.
- HERAK, M. (1969): *Current geologic problems of the dinarides*. III. simpozij dinarske asocijacije, 1, 1-9, Zagreb.
- IRVINE, T. N. & BARAGAR, W. R. A. (1971): *A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks*. Can. J. Earth Sci. 8, 523-548.
- JAMIČIĆ, D. (1976): *Structural Fabric The Metamorphosed Rocks Of Mt. Krndija And The Eastern Part Of Mt. Papuk*. BuH, Sci. Cons. Acad. RSF. Jugoslav., 21, 2-3, Zagreb.
- JAMIČIĆ, D. (1979): *Prilog Poznavanju Tektonskih Odnosa Papuka I Krndije*. Znanstveni savjet za naftu JAZU, IY. god. znanst. skup sekcije za primjenu geol. geofiz. i geokemije. Zbornik radova, A, 7, 199-206. Stubičke Toplice.
- JAMIČIĆ, D. (1980): *Dvostruko Boranje U Jednom Dijelu Metamorfnih Stijena Papuka I Krndije*. Geol. vjesnik, 31, 355-358, Zagreb.
- JAMIČIĆ, D. (1983): *Strukturni sklop metamorfnih stijena Krndije i južnih padina Papuka (Structural fabric of the metamorphosed rocks of Mt. Krndija and the eastern part of Mt. Papuk)*, Geol. vjesnik Zagreb 36, p. 51–72.
- JAMIČIĆ, D., BRKIĆ, M., CRNKO, J., VRAGOVIĆ, M. (1986): *Basic geological map of Yugoslavia – Explanatory notes for sheet Orahovica*. Geol Inst Zagreb, Fed Geol Inst Beograd.
- JAMIČIĆ, D. & BRKIĆ, M. (1987): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Orahovica, L33-96*. Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd.
- JAMIČIĆ, D. (1988): *Strukturni sklop slavonskih planina (Tectonics of the Slavonian Mts.) (PhD Thesis)*, University of Zagreb, 152 pp.
- KISPATIC, M. (1916): *Eruptivgesteine Des Krndia - Gebirges*. Glasnik Hrv. prirodosl. društva. 28, 65-79, 4 sI.. Zagreb.
- KOCH, F. (1919): *Grundlinien Der Geologie Von West-Slavonien*. Glasnik Hrv. prir. društva, 31/2, 217-236, Zagreb.

- LASKAREV, V. (1931): *Prilozi Za Poznavanje Tektonike Požeške Gore (Slavonija)*. Glas Srp. kralj. akad., 141, (I. razr., 68), 101-118, Beograd.
- LeBAS, 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(3): 745-750.
- LE MAITRE, R. W. (1989): *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Recommendations of the USGS Commision on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: Blackwell.
- MANIAR, P.D. i PICCOLI, P.M., (1989): Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 5, 635-643.
- MIYASHIRO, A. (1975): *Classification of basalts and three main volcanic rock series*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 3: 251-26.
- MILADINOVIĆ, M. (1974): *Tektonska građa severnih delova jugoslovenskih Dinarida*. Geol. glasnik, 7, Titograd.
- PAMIĆ, J. (1986): *Magmatic and metamorphic complexes of the adjoining area of the northernmost Dinarides and Pannonian Mass*. Acta Geol Hungarica 29, p. 203–220.
- PAMIĆ J, JAMIČIĆ, D. (1986): *Metabasic intrusive rocks from the Paleozoic Radlovac complex of Mt. Papuk in Slavonija (northern Croatia)*. Rad Jugosl Akad Znan Umjet Zagreb 424:97–125.
- PAMIĆ, J. (1988): *Stijene grainit–granodioritne asocijacije Krndije u Slavoniji (sjeverna Hrvatska, Jugoslavija)*, Rad JAZU, 441 (23), p. 97-114.
- PAMIĆ, J. (1989): *Zonalnost hercinskog metamorfnog kompleksa Kmdije u Slavoniji (Sjev. Hrvatska, Jugoslavija)*, Geol. vjesnik, vol. 42, p. 79-92.
- PAMIĆ, J. & LANPHERE M. (1991): *Hercinske granitne i metamorfne stijene Papuka, Psunja, Krndije i okolne podloge Panonskog bazena u Slavoniji (sjeverna Hrvatska)*, Monogr., Geologija 34, p. 81-253.
- PAMIĆ, J., JURKOVIĆ, I. (2002): *Paleozoic tectonostratigraphic units in the northwest and central Dinarides and the adjoining South Tisia*. International Journal of Earth Sciences 91, 538–554.

- PEARCE, J.A. AND CANN, J.R. (1973): *Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses*. Earth and Planetary Science Letters, 19, 290-300.
- PEARCE, T.H., GORMAN, B.E. AND BIRKETT, T.C. (1975): *The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 Diagram, a Method of Discrimination between Oceanic and Non-Oceanic Basalt*. Earth and Planetary Science Letters, 24, 419-426.
- PEARCE, J.A. & GALE, G.H. (1977): *Identification of ore-deposition environment from trace-element geochemistry of associated igneous host rocks*. In: Volcanic Processes in Ore Genesis. Geological Society, London, Special Publications 7, 14-24.
- PEARCE, J. A. (1983): *Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*. In: Hawkesworth C. J. and Norry M. J. (eds.), Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva, Nantwich, pp. 230-249.
- PEARCE, J. A., HARRIS, N. B., TINDLE, A. G., (1984): Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol* 25: 956-983.
- PEARCE, J. A. (1996): *A users guide to basalt discrimination diagrams*. In: Wyman, D. A. (ed.) Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79-113.
- PEARCE, J. A. (2008): *Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust*. Lithos 100, 14-48.
- PETKOVIC, K. V. (1932): *Geološka Karta Kraljevine Jugoslavije, 1 : 1,000.000*, Beograd.
- PETKOVIC, K. (1961): *Tektonska karta FNRJ*. Glas SANU, 249, Odel. prir. mat. nauka, 22, p. 130-144, Beograd.
- PILAR, GJ. (1875): *Podravina, Dakovstina I Dilj-Gora*. Rad JAZU, 33, 38-57, Zagreb.
- POLJAK, J. (1911): *Kratak Prijegled Geotektonskih Odnosa Hrvatsko-Slavonskog Gorja*. Glasnik Hrv. prir. društva, 23/1-2, 108-127, Zagreb.
- POLJAK, J. (1912): *Prethodni Izveštaj O Geologijskom Snimanju U Opsegu Listova Orahovica-Beničanci I Našice-Kutjevo*. Topografske karte 1: 75.000. Vijesti Geol. povj., 2, 20-28, Zagreb.

- POLJAK, J. (1923): *Prilog Geološkom I Morfološkom Poznavanju Krndije*. Glasnik Hrv. prir. društva, 35/1-2, 21-45, 3 sl., Zagreb.
- POLJAK, J. (1934): *Tumač Za Geološku Kartu Orahovica-Beničanci 1 : 75.000*. Povr. izd. Geol. inst., 18 str., Beograd.
- POLJAK, J. (1951): *Paleogeografija I Tektonika II.. Mediterana I Pliocena Na Obodu Pšunja-Papuka I Krndije*. Fond struc. dok. IGI, Zagreb.
- POLJAK, J. (1952): *Predpaleozojske I Paleozojske Naslage Papuka I Krndije*. Geol. vjesnik, 2-4, 63-82, Zagreb.
- Popis stanovništva Republike Hrvatske, 2011. *Državni zavod za statistiku, Zagreb*.
<http://www.dzs.hr/>
- ROKSANDIĆ, M. (1969): *O granici između Dinarida i Panonske međuvjencane mase*. Zapisnici Srp. geol. društva, (1964-1967.), jub. sv., 495-501, Beograd.
- ROLLINSON, H. R. (1993): *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Edinburgh Gate: Longman Scientific & Technical.
- RUDNICK, R. L. & GAO S. (2004): *Composition of the Continental Crust*. Treatise on Geochemistry, Volume 3.
- SALOPEK, M. (1914): *Moderna Alpiska Tektonika I Geologija Hrvatske I Slavonije*. Glasnik Hrv. prir. društva, 26/2, 85-109, Zagreb.
- SCHMID, S.M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATENCO, L., SCHEFER, S., SCHUSTER, R., TISCHLER, M., USTASZEWSKI, K. (2008): *The Alpine–Carpathian–Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units*. Swiss Journal of Geosciences 101, 139–183.
- SHERVAIS, J. W. (1982): *Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas*. Earth and Planetary Science Letters, 59 (1982), 101 – 118.
- STUR, D. (1861): *Geologische karte von west-Slavonien*. Jahrb. Geol. Reichsanst., 12 (Verh.), 115-118, Wien.
- STUR, D. (1862a): *Uebersichtsaufnahme von west-Slavonien*. Jahrb. Geol. Reichsanst., 12 (Verh.), 200-205, Wien.
- SUN, S. S. (1980): *Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs*. Phil. Trans. R. Soc., A297, 409-445.

SUN, S. S. & McDONOUGH W. F. (1989): *Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes*. Magmatism in the ocean basins. Geological Society, Special Publication, 42, 313-345.

TAJDER, M. (1947): *Problem Pojave Kremena U Olivinskom Bazaltu Kod Kutjeva*. Geol. vjesnik, 1, 190-201, Zagreb.

TAJDER, M. (1955): *Istraživanje Papuka I Požeške Gore*. Ljetopis JAZU, 60, 307-308, Zagreb.

TAJDER, M. (1956): *Albitski Efuzivi Okolice Voćina I Njihova Geneza*. Acta geol., 1, (Prir. istraž. JAZU, 27), 35-48, Zagreb.

TAJDER, M. (1960): *Anortoklasni Egirinski Riolit Iz Potoka Rupnice Kod Vogina*. Acta geol., 2 (Prir. istraž. JAZU, 29), 95-101, Zagreb.

VUKAŠINOVIĆ, S. (1976): *Anomalno magnetsko polje i geološka građa unutrašnjih Dinarida*. Inst. za geol-rud. istraž. i ispit. nuklear. i drugih miner. sirovina, Posebna izdanja 5, 1-92, Beograd.

WILSON, B. M. (1989): *Igneous Petrogenesis. A Global Tectonic Approach*. London: Chapman & Hall, pp. 466.

WODICZKA, P. (1855): *Bericht uber geologische untersuchung der K.K. studienfondsherrschaft Kutjevo in Slavonien*. Jahrb. Geol. Reichsanst., 6/4 (Verh.). str. 858, Wien.

WIKIPEDIA COMMONS. <https://upload.wikimedia.org/>.

WOOD, D. A. (1980): *The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province*. Earth and Planetary Science Letters 50, 11-30.