

Mineraloška karakterizacija sagvandita iz Troms i Finnmark pokrajine, Norveška

Benčić, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:962418>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Ivana Benčić

**Mineraloška karakterizacija sagvandita iz Troms i
Finnmark pokrajine, Norveška**
**(Mineralogical characterization of sagvandite from
Troms and Finnmark county, Norway)**

Seminar III
Preddiplomski studij Geologije

Mentor:
doc. dr. sc. Andrea Čobić

Zagreb, 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Seminar III

Mineraloška karakterizacija sagvandita iz Troms i Finnmark pokrajine, Norveška

Ivana Benčić

Rad je izrađen: Prirodoslovno-matematički fakultet, Mineraloško-petrografski zavod, Horvatovac 95, Zagreb

Sažetak: U sklopu ovog rada analizirana je stijena sagvandit iz pokrajine Troms i Finnmark u sjevernoj Norveškoj. Uzorci stijene prikupljeni su na tipskom lokalitetu u blizini grada Troms. Budući da stijena sagvandit ima značajan potencijal zbog prikupljanja ugljikovog dioksida iz atmosfere prilikom njezinog formiranja posljednjih je godina u fokusu istraživanja. Kako bi se utvrdio potencijal za sekvestraciju ugljikova dioksida potrebno je analizirati stijenu odnosno njezine karakteristike. U sklopu ovog rada utvrđene su mineralne faze od kojih je izgrađena stijena sagvandit. Analizirana su četiri makroskopska uzorka prikupljena na tipskom lokalitetu. Rezultati optičkih istraživanja u prolaznoj svjetlosti i difrakcije rendgenskih zraka na prahu pokazali su da stijenu grade ortopirokseni enstatit i broncit među kojima intersticijski kristalizira magnezit. Pirokseni se izmjenjuju u serpentine, talk i antofilit, te u manje zastupljene klorit, biotit i vermikulit. Prisutni su i minerali grupe spinela koji su uglavnom vezani uz pojavu serpentina, rjeđe se pojavljuju u piroksenima. Poznavanjem mineraloških karakteristika stijene sagvandita dobivamo jasniju sliku o uvjetima i načinu njezina nastanka.

Ključne riječi: stijena sagvandit, mineralni sastav, pirokseni, magnezit, talk, serpentin

Rad sadrži: 47+IV stranica, 39 slika i 15 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF

Mentor: doc. dr. sc. Andrea Čobić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Andrea Čobić, prof. dr. sc. Dražen Balen, doc. dr. sc. Borna Lužar Obereiter

Datum završnog ispita: 24.9. 2021.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Seminar III

**Mineralogical characterization of sagvandite from Troms and Finnmark county,
Norway**

Ivana Benčić

Thesis completed in: Faculty of Science, Division of Mineralogy and Petrology, Horvatovac 95, Zagreb

Abstract: As part of this study a sagvandite rock from Troms and Finnmark county in North Norway is analysed. Rock samples were collected at a type locality near the town of Troms. Because sagvandite has significant potential due to the collection of carbon dioxide from the atmosphere during its formation it has been in the focus of research in recent years. In order to determine the potential for carbon dioxide sequestration, it is necessary to analyze the rock as well as its characteristics. As part of this study mineral phases from which the sagvandite rock was built were determined. Four macroscopic samples collected at the type locality were analyzed. The results of optical studies in transmitted light and X-ray powder diffraction showed that the rock is formed by orthopyroxene enstatite and broncrite among which magnesite crystallizes interstitially. Pyroxenes are altered to serpentine, talc and anthophyllite, and to less represented chlorite, biotite and vermiculite. Minerals of the spinel group are also present, which are mainly related to the appearance of serpentine, less frequently related to pyroxenes. By knowing the mineralogical characteristics of the sagvandite rock, we are getting a clearer picture of the conditions and manner of its formation.

Keywords: sagvandite rock, mineral composition, pyroxene, magnesite, talc, serpentine

Seminar contains: 47+IV pages, 39 figures and 15 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Geological Library, Department of Geology, Faculty of Science

Supervisor: Doc. dr. sc. Andrea Čobić

Reviewers: Doc. dr. sc. Andrea Čobić, prof. dr. sc. Dražen Balen, doc. dr. sc. Borna Lužar Obereiter

Date of the final exam: September 24, 2021

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Sagvandit.....	2
3. Pregled dosadašnjih istraživanja	6
4. Geološka građa.....	8
5. Materijali i metode istraživanja.....	11
5.1. Materijali	11
5.2. Metode istraživanja	14
5.2.1. Optička istraživanja u prolaznoj svjetlosti.....	14
5.2.2. Difrakcija rendgenskih zraka na prahu (XRPD).....	15
6. Rezultati	18
6.1. Makroskopski opis uzoraka.....	18
6.2. Optička istraživanja u prolaznoj svjetlosti	19
6.3. Rendgenska difrakcija na prahu (XRPD).....	31
7. Rasprava.....	39
8. Zaključak.....	42
9. Literatura	43

1. Uvod

Peridotiti iz Zemljina plašta pojavljuju se na površini Zemlje najčešće kao izolirana tijela tektonskim pokretima smještena u stijene Zemljine kore. Njihova je pojava najčešća u tektonski izdignutim područjima planinskih lanaca. Veličina fragmenata plaštnih stijena peridotita varira u širokom rasponu veličina, od blokova centimetarskih dimenzija do onih veličine nekoliko kilometara (Bucher and Stober, 2019).

Izolirani peridotiti porijeklom iz subkontinentalnog plašta koji nisu dio ofiolitnog kompleksa pojavljuju se u orogenima širom svijeta. U Skandinavskom gorju zabilježeno je stotine pojava izoliranih peridotitnih tijela u stijenama kompleksa različite starosti, od onih najstarijih koje su dio podloge, odnosno baltičkog štita, do onih najmlađih smještenih u završnim fazama kaledonske orogeneze (Bucher – Nurminen, 1991).

Plaštne stijene uklopljene u Zemljinu koru u orogenetskim pojasevima često su djelomično ili u potpunosti karbonatizirane reakcijom navedenih stijena s fluidima iz Zemljine kore obogaćenim ugljikovim dioksidom. Navedene karbonatizacijom izmijenjene ultramafične stijene pojavljuju se na površini Zemlje u tri glavna varijeteta. Prvi varijetet je steatit (tzv. „soapstone“) građen od talka i magnezita, formiran parcijalnom karbonatizacijom serpentinita na niskim temperaturama. Drugi varijetet je listvenit u čijem sastavu najveći udio čine kvarc i magnezit, a formiran je iz serpentinita na niskim temperaturama potpunom izmjenom svih magnezijevih silikata iz primarne stijene u karbonate i rezidualni kvarc. Treći varijetet naziva se sagvandit (Bucher and Stober, 2019).

Cilj ovog rada je prikazati glavne mineraloške karakteristike stijene sagvandita s tipskog lokaliteta iz pokrajine Troms i Finnmark. Istraživanje se temelji na metodama:

- određivanja mineralnog sastava uzorka korištenjem optičkih istraživanja u prolaznoj svjetlosti
- određivanja mineralnog sastava uzorka korištenjem metode difrakcije rentgenskih zraka na prahu.

2. Sagvandit

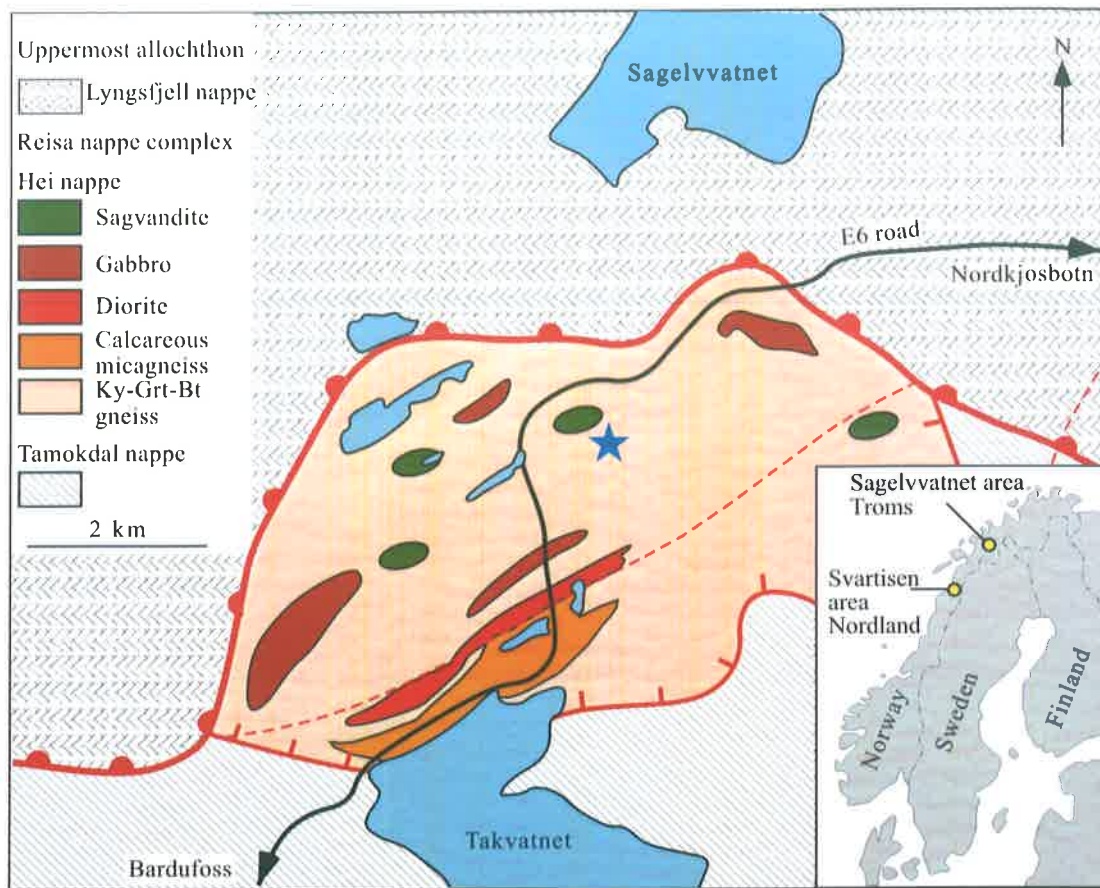
Stijenu sagvandit je 1883. prvi uočio i opisao Karl Pettersen.

Sagvandit je magnezitni-ortopiroksenit. Ova stijena, kao sub-grupa karbonatnih-ortopiroksenita je ustvari „klasični sagvandit“ s tipskog lokaliteta Troms. Sadrži 70 – 90 % enstatita/broncita koji većinom formiraju rozete građene od prizmatskih kristala dugačkih više od 12 cm, te od 10 – 30 % magnezita/breunnerita koji se nalazi intersticijski u prostoru među rozetama ortopiroksena. Mjestimice su vidljive male količine korodiranih zrna olivina (oko forsterit₉₀fajalit₁₀). Akcesorni minerali su flogopit, klorit, Cr – spinel, pentlandit i pirit. Male količine talka (i antofilita) mogu, ali ne moraju biti povezane s blastomilonitičnom deformacijom stijena. Serpentin nastaje posljednji kao rezultat retrogradne alteracije (Schreyer et al., 1972).

Vjerojatno je kako je primarni ultramafični materijal izložen CO₂ – H₂O – SiO₂ metasomatizmu, CO₂ potječe iz mramora visokog stupnja metamorfizma (Ohnmacht, 1973).

Sagvandit je stijena u čijem sastavu najveći udio čine enstatit i magnezit, nastala izmjenom dunita ili harzburgita u reakciji s fluidima obogaćenima ugljikovim dioksidom na visokim temperaturama, odnosno u P–T uvjetima gornjeg amfibolitnog facijesa. Ugljikov dioksid je glavni agens odgovoran za formiranje sagvandita, odnosno za karbonatizaciju ultramafičnih stijena, dok su otopljena silika i soli u sastavu fluida agensi koji svojim djelovanjem utječu na očuvanje prvotnog volumena primarnog ultramafičnog materijala prilikom njegove karbonatizacije (Bucher and Stober, 2019).

Pojava izdanaka sagvandita zabilježena je na više različitih mjesta u kompleksima stijena različite starosti duž skandinavskih kaledonida u Norveškoj. Svaki izdanak sagvandita zabilježen do danas, karakterizira upravo struktura koju čine radijalni snopovi kristala enstatita centimetarskih dimenzija, a intersticijski se među enstatitom pojavljuje magnezit. Česta je pojava da se očuva i nešto primarnog olivina, te akcesorni Cr – spinel i kromit (Bucher and Stober, 2019). Prvi zabilježeni izdanak lociran je u pokrajini Troms u sjevernoj Norveškoj (Slika 1).



Slika 1: Pojednostavljena geološka karta područja oko jezera Sagelvvatnet u Tromsu, sjeverna Norveška. Originalni tipski lokalitet sagvandita naznačen je plavom zvjezdicom (Pettersen, 1883). Lokacija sagvandita: 19°03'54"E/69°09'35"N (modificirano prema Zwaan et al., 1998).

Izmjena dunita u sagvandit ovisna je o tri metasomatske reakcije:

- karbonatizacija peridotita reakcijom s fluidima obogaćenima ugljikovim dioksidom

$$2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 2\text{MgCO}_3$$
- interakcija s vanjskim fluidima koji sadrže otopljenu siliku

$$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$$
- gubitak magnezija disolucijom forsterita u otopini obogaćenoj natrijevim kloridom

$$2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{NaCl}_{(\text{aq})} \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 2\text{MgCl}_{2(\text{aq})} + 4\text{NaOH}_{(\text{aq})}$$
; za fluide nastale dublje u Zemljinoj kori, karakterističan je visok salinitet, odnosno obogaćenje na kloridni anion.

Istovremeno djelovanje navedenih procesa u omjerima koji će očuvati volumen primarnog dunita objašnjava formiranje strukture stijene sagvandita. Nema geoloških dokaza da je došlo do veće promjene volumena, odnosno porasta volumena prilikom izmjene dunita u sagvandit, kao unutarnje deformacije ultramafične stijene. Zabilježene strukture i teksture stijena ukazuju na činjenicu da je primarni volumen stijene ostao očuvan prilikom izmjene (Bucher and Stober, 2019).

Izdanak sagvandita u blizini jezera Sagelvatnet je stijena u obliku leće, duga otprilike 100 m (Slika 2). Stijena je krupnozrnata, sive do smeđe boje, s vidljivim radijalno zrakastim agregatima ortopiroksena na površini, među kojima kristalizira magnezit. Površina je mjestimice trošna te porozna (Slika 3).



Slika 2: Izdanak sagvandita s tipskog lokaliteta u pokrajini Troms



Slika 3: a) Uvećani prikaz površine stijene sagvandita s tipskog lokaliteta u pokrajini Troms, b) trošna površina stijene sagvandita s rozetama ortopiroksena

3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Karbonatizirane ultramafične stijene relativno su rijetka pojava, stoga do danas nije objavljen veći broj radova koji se bave tematikom vezanom uz takve tipove stijena. Nekolicina autora bavila se kroz povijest opisom i kemijskim i mineraloškim analizama karbonatiziranih ultramafičnih stijena, sve do nekoliko godina unatrag, kada im se počela pridavati veća pozornost. Značaj takvih tipova stijena je u činjenici da predstavljaju primjere učinkovitog prirodnog prikupljanja (sekvestracije) ugljikova dioksida, fiksiranjem slobodnog ugljikova dioksida pretvarajući ga iz fluidne u čvrstu fazu (Eikeland et al., 2015; Gadikota et al., 2014; Kelemen et al., 2011; Lackner et al., 1995; Seifritz, 1990).

U svojem je putovanju po Balsfjordu K. Pettersen opisao i kartirao stijenske jedinice fjorda, kao i one u njegovoj blizini, uključujući i sagvandit kojeg je ujedno i imenovao. Ime stijene potječe od jezera Sagelvatnet (*norv.* sag što znači pilana, *norv.* elv što znači rijeka, *norv.* vatnet što znači jezero) koje se nalazi u blizini izdanka gdje je prvi put uočena sama stijena (Reusch, 1891). Daljnja terenska istraživanja duž Balsfjorda provodio je T. Barth (1926.) koji je opisao zone kontakta sagvandita s okolnim stijenama razlikujući tri tipa s obzirom na njihov mineraloški sastav – kloritnu, granatnu i hornblenda-skapolit kontaktnu zonu. Petrološkim i mineraloškim analizama sagvandita prvi definira postotak zastupljenosti pojedinih mineralnih vrsta u samoj stijeni (broncit 89,9%, magnezit 9,2%, talk 0,9%) (Barth, 1927).

Daljnjim detaljnim istraživanjima došlo se do spoznaje kako je osnovni proces nastanka sagvandita metasomatizam u uvjetima visokog stupnja metamorfizma te su konstruirana polja stabilnosti karakterističnih mineralnih asocijacija. Nadalje, zaključeno je kako primarni ultramafični materijal nije bio serpentiniziran prilikom uvođenja ugljikovog dioksida u sustav jer u tom slučaju uvođenje fluida obogaćenog ugljikovim dioksidom ne bi rezultiralo formiranjem karbonata (Schreyer et al., 1972). Kemijski sastavi pojedinih faza određeni su iz optičkih svojstava. Za ortopiroksene određen je sastav $en_{90}fs_{10}$, dok je za olivine definiran sastav $fo_{90}fa_{10}$. Osim toga uočene su i petrografske značajke, odnosno teksturne karakteristike bitne u interpretaciji genetskih procesa te su za njih definirane i teoretske reakcije; zamjena olivina ortopiroksenom, zamjena olivina magnezitom, zamjena ortopiroksena magnezitom, zamjena olivina ortopiroksenom i magnezitom, zamjena ortopiroksena talkom ili talkom i magnezitom. Generalno masivan izgled stijene poremećen je na mjestima slabijim ili intenzivnijim deformacijama koje rezultiraju značajkama kao što su distorzija, kataklaze, ili čak milonitizacija na granicama zrna ortopiroksena (Ohnmacht, 1973).

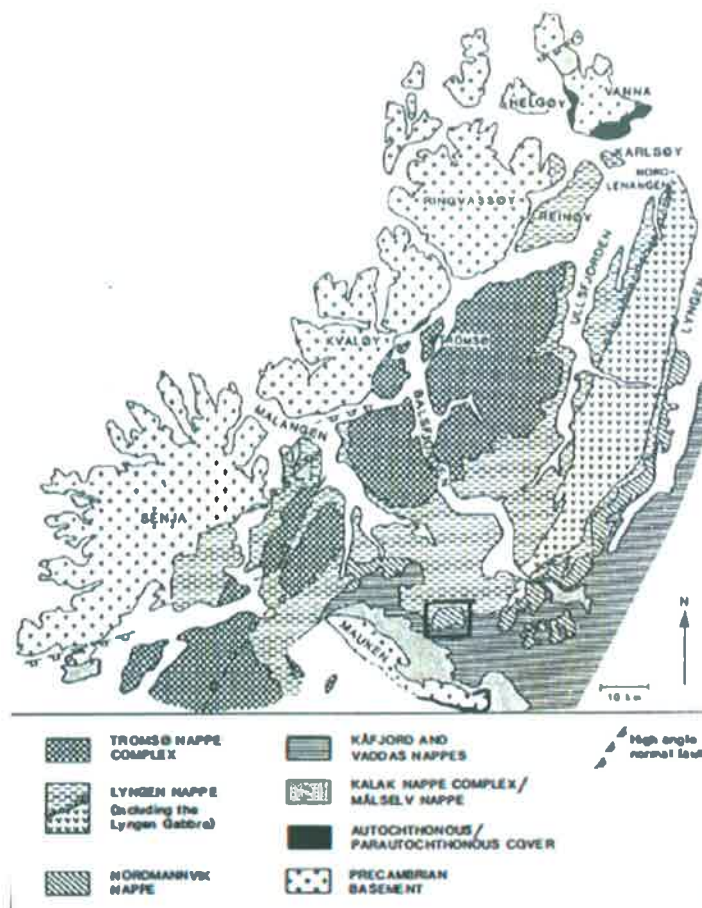
Provedba analize elektronskom mikroprobom rezultirala je detaljnom odredbom kemijskog sastava stijene sagvandita. Osim toga, dokazano je da staurolit nije prisutan u biotitnim gnajsevima bogatim granatima u koje je tektonski ugrađen izdanak analizirane stijene sagvandita, što limitira P – T uvjete za vrijeme formiranja gnajseva na 8 kbar i 700°C. Navedeni su uvjeti ograničeni prisutnošću kianita u stijenama, te odsutnošću staurolita. Gornji temperaturni limit iznosi 750°C pod tlakom 9 kbar i definiran je odsutnošću sillimanita. Na temelju dobivenih podataka konstruirani su P – T dijagrami uvjeta nastanka sagvandita te su definirane kemijske reakcije koje su zaslužne za njihovo formiranje (karbonatizacija peridotita fluidima obogaćenim na ugljikov dioksid, interakcija s vanjskim fluidima koji sadržavaju otopljenu siliku i gubitak magnezija disolucijom forsterita u otopini obogaćenoj na natrijev klorid) kao i uvjeti nastanka koji moraju biti prisutni u okolini (ranije navedene jednadžbe) (Bucher and Stober, 2019).

4. Geološka građa

Tipski izdanak sagvandita nalazi se u pokrajini Troms u sjevernoj Norveškoj, točnije 2 km južno od jezera Sagelvvatnet (Bucher and Stober, 2019).

Sagvanditi iz pokrajine Troms izdanjuju unutar planinskog lanca Skandinavskih kaledonida kojeg karakterizira kompleksan sustav navlaki koji nam ukazuje na potiskivanje slojeva prema prekambrijskoj podlozi Baltičkog štita. Tektonskim pokretima za vrijeme kaledonske orogeneze stijene su borane i metamorfozirane. Metamorfozirane stijene variraju u rasponu od onih zahvaćenih niskim stupnjem metamorfizma – zeleni škriljavci, sve do onih zahvaćenih visokim stupnjem metamorfizma – amfiboliti i gnajsevi. Sagvandit se pojavljuje isključivo na dijelovima terena zahvaćenim visokim stupnjem metamorfizma. Ne pronalazimo ih u zelenim škriljalcima, filitima i sl. (Schreyer et al, 1972).

Izdanak sagvandita u obliku leće smješten je unutar biotitnih gnajseva bogatih granatima koji lokalno sadržavaju kianit. Biotitni gnajsevi zajedno s dioritinim i gabro stijenama dio su Heia navlake koja pripada skupini Reisa kompleksa navlaki. Izdanci sagvandita iz pokrajine Troms pojavljuju se isključivo u Hei navlaci. Izdanci ultramafičnih stijena pronađenih u Tromso navlaci pretežno su izgrađeni od dunita (Bucher and Stober, 2019). Područje na kojem izdanjuje sagvandit prvi je kartirao Landmark (1973.), koji je zabilježio pojavu gnajseva višeg stupnja metamorfizma smještenih između stijena koje su evidentno nižeg stupnja metamorfizma (Kafjord/Vaddas i Lyngen sustavi navlaka) od Heia gnajseva. Elvevold (1988.) je prilikom proučavanja P – T uvjeta nastanka visokometamorfnihi stijena, koristio neformalno ime Heia navlaka kako bi imenovao megaleću Nordmannvik kompleksa navlaki (Slika 4). Heia navlaka građena je pretežno od milonitiziranihi tinjčastih gnajseva s granatima i kijanitom. Lokalno sadrži i leće amfibolita s piroksenima. Također se unutar navlake pojavljuju i karbonatno – silikatni gnajs, amfibolit, mramor i metadoleriti. Tijela sagvandita malih dimenzija (uključujući i tipski lokalitet) izadnjuju na udaljenosti manjoj od 1 km od metadiorita (Lindstrom and Andersen, 1992).



Slika 4: Geološka karta područja zapadnog Tromsa s distribucijom glavnih kaledonskih alohtona u regiji. Kvadrat označava područje od interesa (Lindstrom and Andersen, 1992).

Kontakti karbonatnih ortopiroksenita s okolnim stijenama nikada nisu, prema opažanjima, diskordantnog, intruzivnog tipa. Detaljnim kartiranjem zaključeno je kako su karbonatni ortopirokseniti stijenska tijela, odnosno leće čija debljina varira (3 – 50 m) te čiji kontakti s okolnim stijenama su u svim slučajevima isključivo konkordantnog tipa, odnosno granice su paralelne sa smjerom škriljavosti okolnih metamorfnihih stijena (Barth, 1926).

Unutrašnjost sagvandita može biti masivna, no uslojenost paralelna sa škriljavošću okolnih gnajseva je vidljiva u zoni kontakta ovih dviju stijena, a pojavljuje se mjestimice i unutar samog tijela. Više stilova, odnosno generacija bora definirano je u većini ovih ultramafičnih stijena te korelirano sa sličnim strukturama u okolnim gnajsevima. Neke bore se mogu pratiti preko vertikalnih kontakata iz gnajseva u ultramafične stijene. Nema indikacija da je došlo do promjena u stupnju metamorfizma gnajseva u blizini kontakta, no u nekoliko slučajeva na mjestima gdje izdanjuju dolazi do metasomatske reakcije između ultramafičnih

stijena i gnajseva. Ovisno o tipu stijene koja je u kontaktu s ultramafičnom stijenom dolazi do formiranja različitih kontaktnih zona (uglavnom širine manje od dva metra). Gdje se u kontaktu s ultramafičnim tijelom pojavljuju gnajsevi s kvarcem i feldspatima, formira se tremolitna kontaktna zona, a gdje se okolno pojavljuju bazičnije stijene (gnajsevi s granatima ili hornblenda – gnajsevi) unutarnja tremolitna kontaktna zona prelazi u vanjsku građenu od antofilita i biotita ili hornblende i biotita. Kada se u kontaktu s ultramafičnim tijelom nalaze vapnenačke stijene, razvija se mineralna asocijacija tipična za skarnove: granati, diopsid i karbonatni minerali, uz moguću prisutnost epidota (Moore et al, 1977).

5. Materijali i metode istraživanja

5.1. Materijali

Analizirana su četiri uzorka sagvandita prikupljena na tipskom lokalitetu u blizini Tromsa (Slika 1 i 2), oznaka SAG 1 (Slika 5), SAG 2 (Slika 6), SAG 3 (Slika 7) i SAG 4 (Slika 8). Kružićem su označena mjesta s kojih je uziman uzorak za XRPD analizu.



Slika 5: Makroskopski izgled uzorka SAG 1 korištenog za analizu u ovom radu (crvena kružić označava mjesto s kojeg je uzet uzorak za XRPD analizu SAG 1.1; plavi kružić označava mjesto s kojeg je uzet uzorak za XRPD analizu SAG 1.2)



Slika 6): Makroskopski izgled uzorka SAG 2 korištenog za analizu u ovom radu (crveni kružić označava mjesto s kojeg je uzet uzorak za XRPD analizu SAG 2.1)



Slika 7): Makroskopski izgled uzorka SAG 3 korištenog za analizu u ovom radu (crveni kružić označava mjesto s kojeg je uzet uzorak za XRPD analizu SAG 3.1)



Slika 8: Makroskopski izgled uzorka SAG 4 korištenog za analizu u ovom radu (crveni kružić označava mjesto s kojeg je uzet uzorak za XRPD analizu SAG 4.1)

5.2. Metode istraživanja

5.2.1. Optička istraživanja u prolaznoj svjetlosti

Optička istraživanja u prolaznoj svjetlosti je metoda kojom se određuju optička svojstva minerala ovisna o smjeru širenja svjetlosti kroz mineral. Koristi se polarizirana svjetlost koja vibrira samo u jednoj ravnini okomitoj na smjer širenja tzv. linearno polarizirana svjetlost (Vrkljan et al, 2019).. Svjetlost se polarizira na principu totalne refleksije, apsorpcije i refleksije.

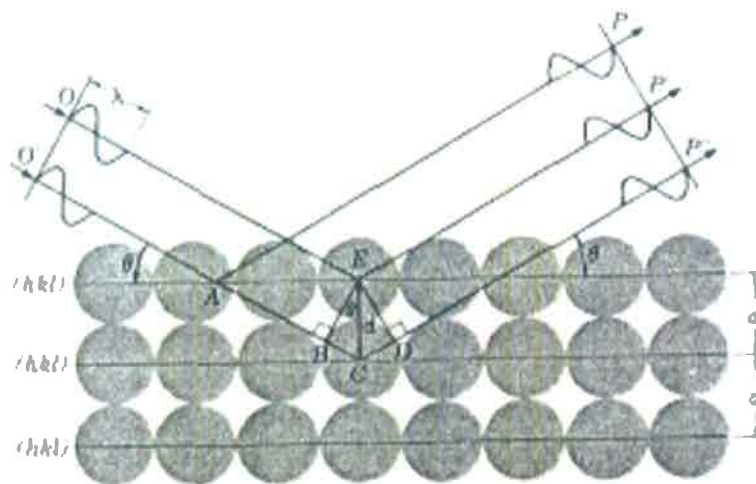
U uvjetima bez uključenog analizatora promatrani su oblik zrna, prisutnost kalavosti, pseudoapsorpcija, vlastita boja minerala te pleokroizam, dok su u uvjetima s uključenim analizatorom promatrane interferencijske boje minerala, potamnjenje i optički karakter izduženja.

5.2.1.1. Priprema uzoraka i eksperimentalni dio

Prikupljeni uzorci su ispiljeni na pločice i potom zalijepljeni na predmetno stakalce pomoću epoksidne smole te dalje brušeni grubim abrazivnim prahom pomoću stroja nakon čega slijedi ručno brušenje finijim prahovima do debljine preparata 0,02 – 0,03 mm. Naposljetku je na izbrušene preparate pomoću kanadskog balzama zalijepljeno pokrovno stakalce. Preparati su promatrani u ortoskopskim uvjetima bez uključenog analizatora i u ortoskopskim uvjetima s uključenim analizatorom. Analiza je provedena na Mineraloško – petrografskom zavodu Prirodoslovno – matematičkog fakulteta u Zagrebu.

5.2.2. Difrakcija rendgenskih zraka na prahu (XRPD)

Difrakcija rendgenskih zraka na prahu je metoda fazne analize koja se može primjenjivati za kvalitativnu i kvantitativnu analizu uzoraka. Difrakcija se temelji na raspršenju rendgenskih zraka, koje su reda veličine 1\AA , na elektronima. Difrakcija na mrežnoj ravnini dogodit će se ako se zadovolje uvjeti izraženi Braggovim zakonom ($n\lambda = 2d\sin\theta$) (Azároff 1968). Prema Braggovom zakonu (Slika 9), međumrežne ravnine koje se nalaze pod određenim kutom u odnosu na smjer upada zraka, gdje će razlika u hodu između reflektiranih zraka od međumrežnih ravnina biti jednaka cijelom broju višekratnika valne duljine zračenja te ujedno dolazi i do pojačavanja intenziteta zraka interferencijom. Svi minerali imaju svoju karakterističnu sliku difrakcije koja se uspoređuje sa standardiziranim uzorcima u bazi podataka (Slovenec 2011).



Slika 9: Braggov zakon (Azároff, 1968)

5.2.2.1. Priprema uzoraka i eksperimentalni dio

Uzorci su usitnjeni na veličinu praha u ahatnom tarioniku, potom su postavljeni na aluminijske nosače i analizirani. Analiza je provedena na difraktometru za prah Philips PW 3050/60 X'Pert PRO, uz bakreno zračenje ($\lambda = 1.54060\text{\AA}$) pri 40mA i 40 kV. Uzorci su snimani u rasponu $4^\circ - 65^\circ 2\theta$, korak snimanja je $0,02^\circ/2\theta$. Sa svakog od četiri makroskopska uzorka uzeta su dva uzorka za XRPD analizu (Slika 5, 6, 7 i 8).

SAG 1

- Uzorak SAG 1.1 izgreban je s površine stijene s obzirom na veličinu zrna koja iznosi 2 do 3 cm te sivo – zelenu boju prisutnih štapićastih minerala, te uočenih bijelih dijelova među radijalno poslagenim štapićastim zrnima koji su bili sitnozrnati mekani i praškasti.
- Uzorak SAG 1.2 izdubljen je s površine na jednom djelu s obzirom na izrazito tamnozeleno boju i vidljivu kalavost (vjerojatno poprečnu s obzirom da se kalao u vidu listića prilikom pokušaja vađenja) te velik promjer navedenog mineralnog zrna.

SAG 2

- Uzorak SAG 2.1 izgreban je s površine s obzirom na boju, odnosno činjenicu da je na tom dijelu bila kora narančaste do smeđe boje sa sivkastim dijelovima te svjetlucavim dijelovima i nešto bijelih praškastih dijelova. Čitav uzorak je sitnozrnat s tim da je vidljivo da su zrna koja svjetlucaju nešto krupnija od onih koja sačinjavaju bijeli praškasti dio koji je ujedno i dosta mekan, dok je kora narančaste do smeđe boje sa sivkastim dijelovima nešto tvrđa.
- Uzorak SAG 2.2 dobiven je nakon rezanja stijene na pločice te je samljeven kako bismo dobili podatke o mineralnom sastavu unutar samog uzorka SAG 2.

SAG 3

- Uzorak SAG 3.1 izgreban je s površine s obzirom na veličinu štapićastih zrna minerala od otprilike 2 cm, te njihovu svjetliju žućkasto – zelenu boju, među kojima su vidljivi sitnozrnati, praškasti bijeli dijelovi koji mjestimice svjetlucaju, a mjestimice imaju mat bijelu boju.
- Uzorak SAG 3.2 dobiven je nakon rezanja stijene na pločice te je samljeven kako bismo dobili podatke o mineralnom sastavu unutar samog uzorka SAG 3.

SAG 4

- Uzorak SAG 4.1 izgreban je s površine s obzirom na boju mineralnih zrna koja je neobične smeđe zelenkaste boje, s crnim dijelovima, a mjestimice crvenkasto – smeđa. Osim toga, ovaj uzorak karakterizira i činjenica da štapićasti minerali nisu razgranati

kao u slučaju prethodna tri uzorka, već kompaktnije povezani te djeluju savijeno. Osim toga površina im je dosta trošnja, s izraženijim pukotinama, mjestimice rijetko zapunjenim bijelim praškastim agregatom te djeluje porozno.

- Uzorak SAG 4.2 dobiven je nakon rezanja stijene na pločice te je samljeven kako bismo dobili podatke o mineralnom sastavu unutar samog uzorka SAG 4.

Analizirano je 8 uzoraka i računalnom obradom dobivenih difraktograma u programu X'Pert High Score Plus (Panalytical 2004) i usporedbom s podacima iz baze podataka PDF2 (ICDD 2004) dobiveni su rezultati analize.

6. Rezultati

6.1. Makroskopski opis uzoraka

Uzorak SAG 1 (Slika 5) predstavlja masivnu stijenu s tek mjestimice vidljivim radijalno zrakastim agregatima piroksena. Na površini uzorka vidljivo je nešto alteracijskih produkata, najvjerojatnije talka koji je bijele boje te nešto više produkata trošenja u vidu kore narančasto – crvene do smeđe boje što bi mogao biti agregat željezovitih oksid-hidroksida - limonit.

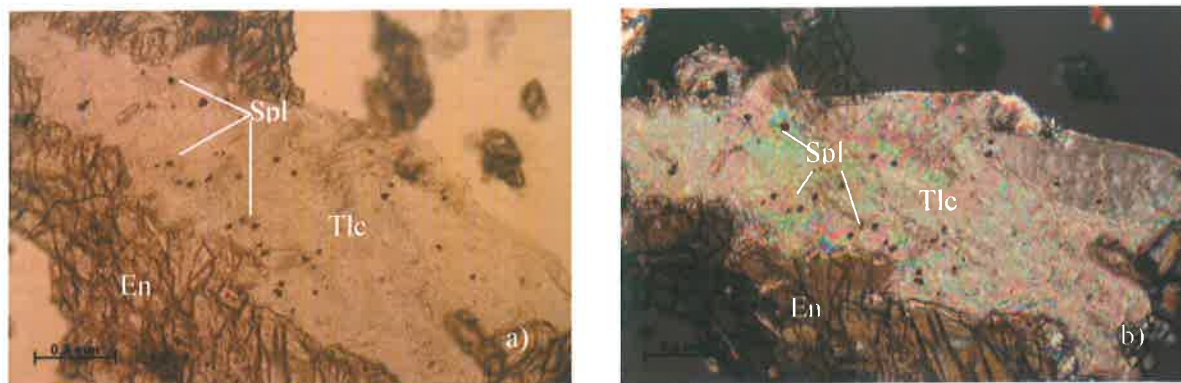
Uzorak SAG 2 (Slika 6) predstavlja masivnu stijenu s vidljivim radijalno zrakastim agregatima piroksena. Površina uzorka je djelomice izmijenjena. Alteracijski produkti su talk bijele boje te moguće agregat željezovitih oksid-hidroksida narančasto smeđe boje – limonit.

Uzorak SAG 3 (Slika 7) predstavlja stijenu građenu u potpunosti od radijalno zrakastih agregata piroksena, djelomice površinski izmijenjenu. Alteracijski produkt je također moguće agregat željezovitih oksid-hidroksida narančaste do smeđe boje – limonit.

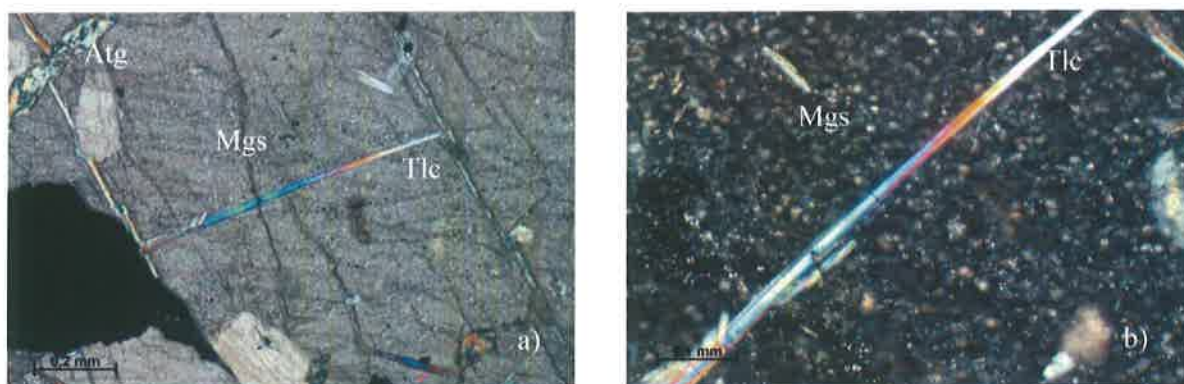
Uzorak SAG 4 (Slika 8) predstavlja također stijenu građenu u potpunosti od radijalno zrakastih agregata piroksena djelomice površinski izmijenjenu kao i kod ostalih uzoraka, najvjerojatnije u agregat željezovitih oksid-hidroksida narančaste do smeđe boje – limonit, uz tek nešto talka.

6.2. Optička istraživanja u prolaznoj svjetlosti

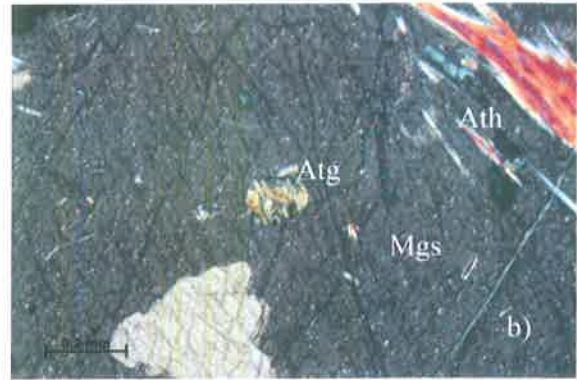
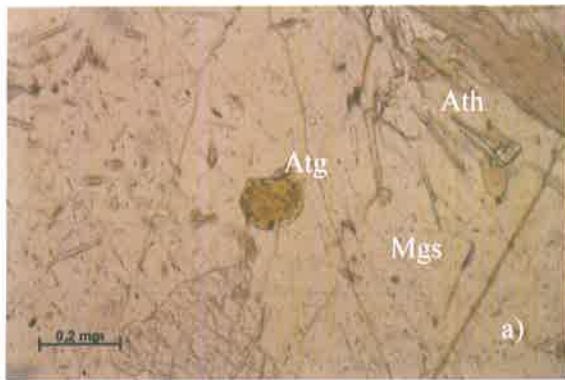
Uzorak SAG 1 predstavlja izmijenjene piroksene među kojima se nalazi mrljasti magnezit. Pirokseni se izmjenjuju u talk i antofilit, uglavnom se radi o listićavim agregatima talka, mjestimice ima i fibroznih, a vidljiva je i pseudomorfoza talka po serpentinu, krizotilu, s očuvanim opakim mineralima (Slika 10). Unutar magnezita vidljive su žilice talka (Slika 11) i antofilita, te nešto serpentina, antigorita (Slika 12). Mjestimice se u čitavom uzorku pojavljuje i serpentin (Slika 13). U uzorku su vidljivi i opáki minerali (Slika 10) i minerali serije čvrstih otopina biotita (Slika 14)



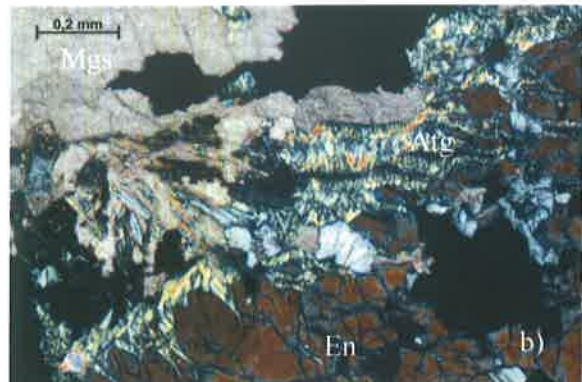
Slika 10. Mikroskopski uzorak SAG 1, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Tlc – talk, Spl – spinel, En – enstatit)



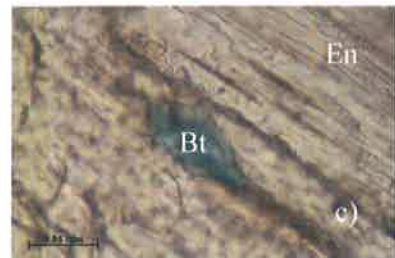
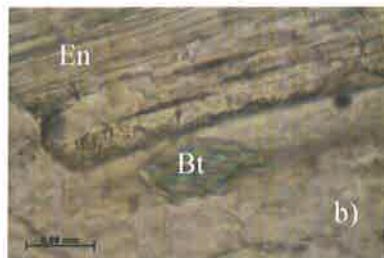
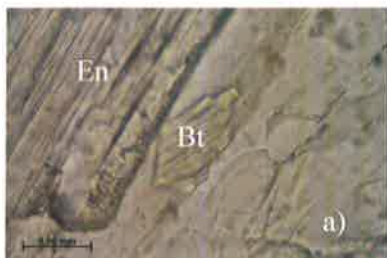
Slika 11. Mikroskopski uzorak SAG 1, a) s analizatorom, b) s analizatorom (uvećani prikaz) (Tlc – talk, Atg – antigorit, Mgs – magnezit)



Slika 12. Mikroskopski uzorak SAG 1, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Ath – antofilit, Atg – antigorit, Mgs – magnezit)

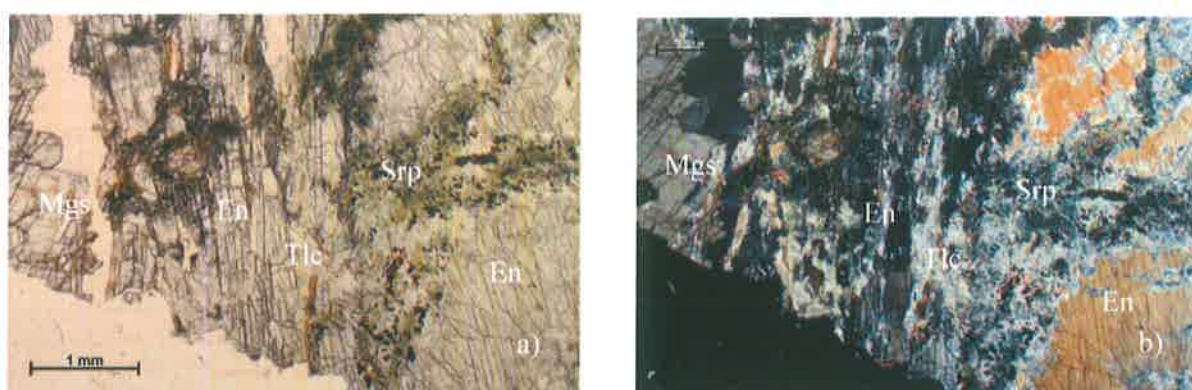


Slika 13. Mikroskopski uzorak SAG 1, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Atg – antigorit, Mgs – Magnezit, En – enstatit)

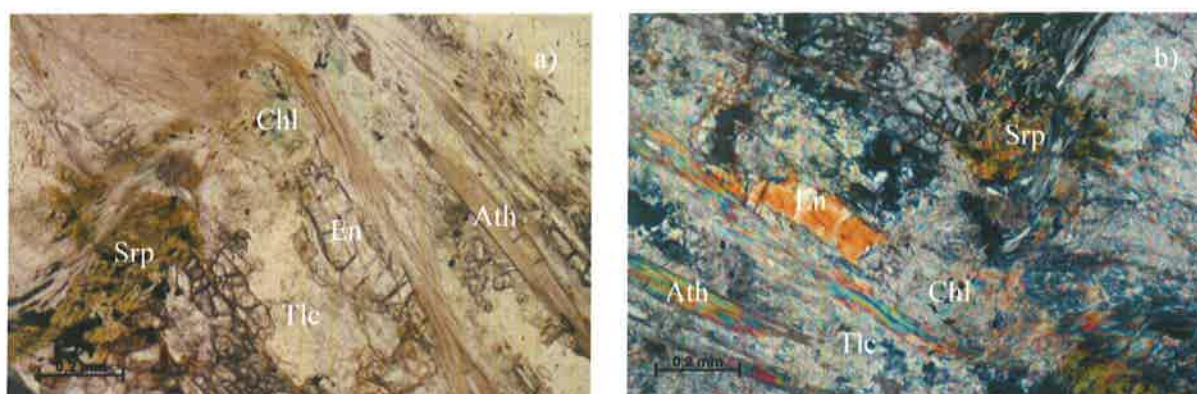


Slika 14. Mikroskopski uzorak SAG 1 a), b), c) bez analizatora (Bt – biotit, En – enstatit)

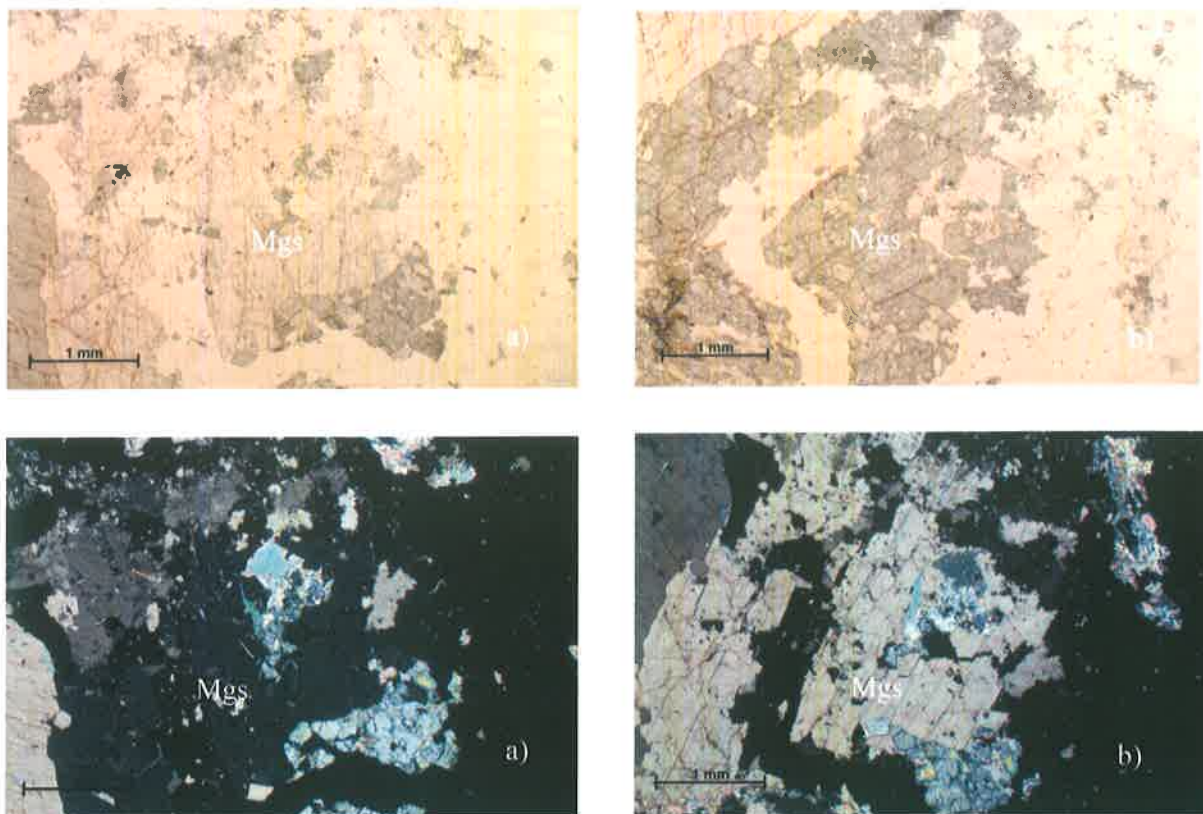
Uzorak SAG 2 predstavlja gotovo u potpunosti izmijenjenu stijenu. Pirokseni su izmijenjeni u listićave i fibrozne agregate talka, antofilit (Slika 18) i u serpentine (Slika 15). Vidljiva su i alotriomorfna korodirana reliktna zrna olivina (Slika 18), djelomice serpentinizirana. Intersticijski među piroksenima i olivinima se pojavljuje nešto magnezita (Slika 17). U uzorku nailazimo i na opake minerale, točnije minerale grupe spinela (Slika 17) te klorit. Uočavaju se i teksturne karakteristike direktne zamjene olivina enstatitom (Slika 19), dakle bez magnezita u asocijaciji s ortopiroksenom, a osim toga vidljiva je i pseudomorfoza talka po serpentinu (Slika 20).



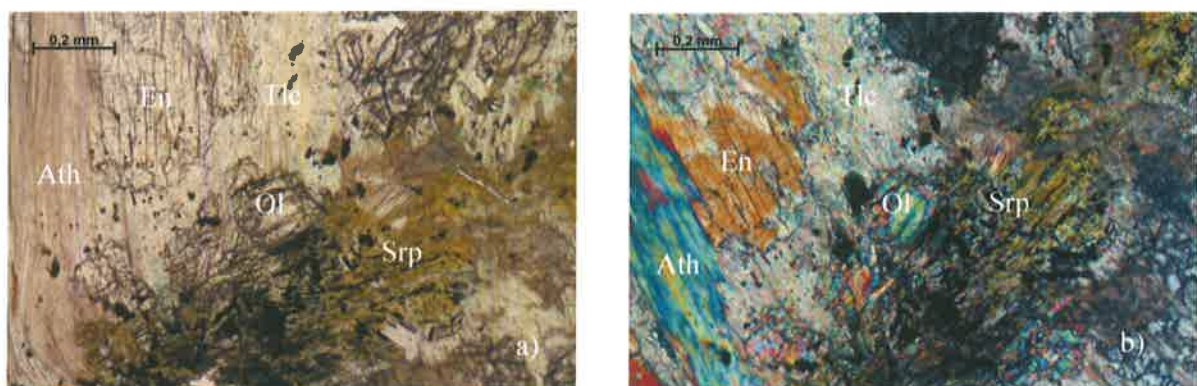
Slika 15. Mikroskopski uzorak SAG 2, a) bez analizatora, b) s analizatorom (En - enstatit, Mgs – Magnezit, Tlc – talk, Srp - serpentin)



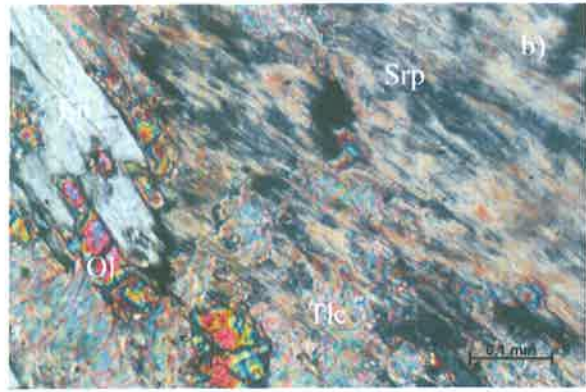
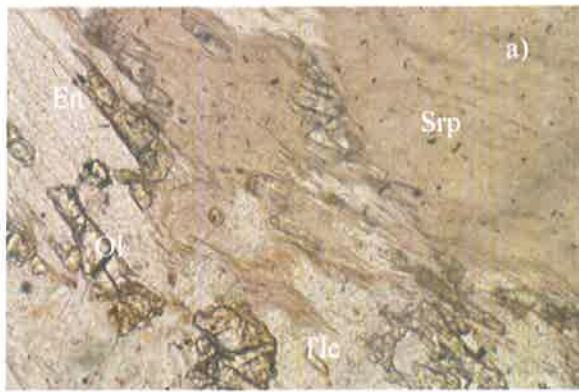
Slika 16. Mikroskopski uzorak SAG 2, a) bez analizatora, b) s analizatorom (En – enstatit, Srp – serpentin, Tlc – talk, Ath – antofilit, Chl – klorit)



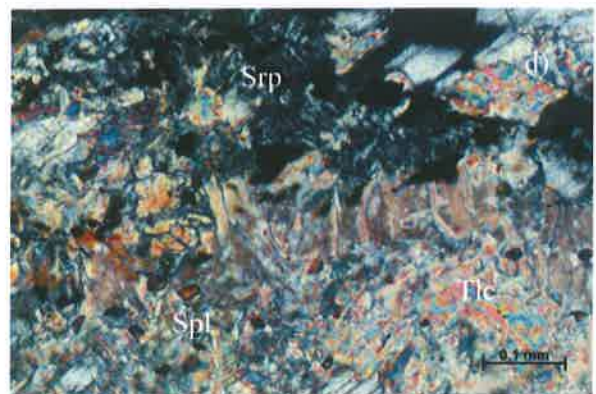
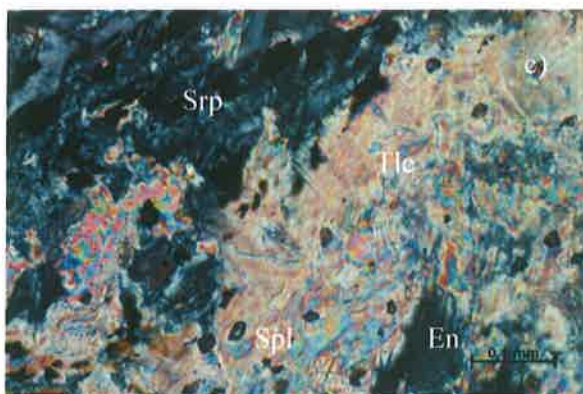
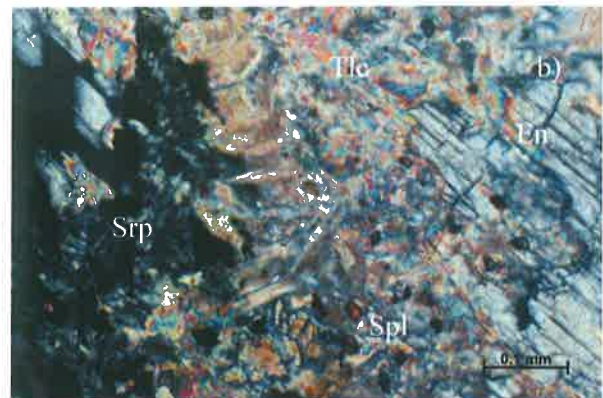
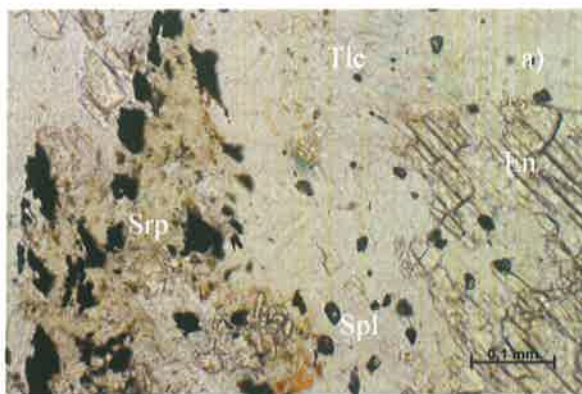
Slika 17. Mikroskopski uzorak SAG 2, a), b) bez analizatora, c), d) s analizatorom (Mgs – magnetit)



Slika 18. Mikroskopski uzorak SAG 2, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Ol – olivin, En – enstatit, Srp – serpentin, Ath – antofilit, Tlc – talk)

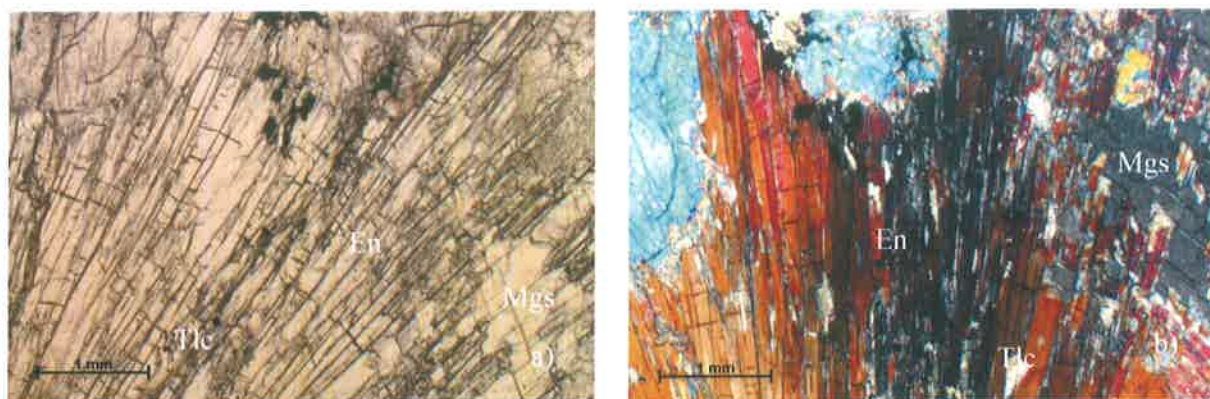


Slika 19. Mikroskopski uzorak SAG 2, a), b) s analizatorom (Ol – olivin, En – enstatit, Srp – serpentin, Tlc – talk)

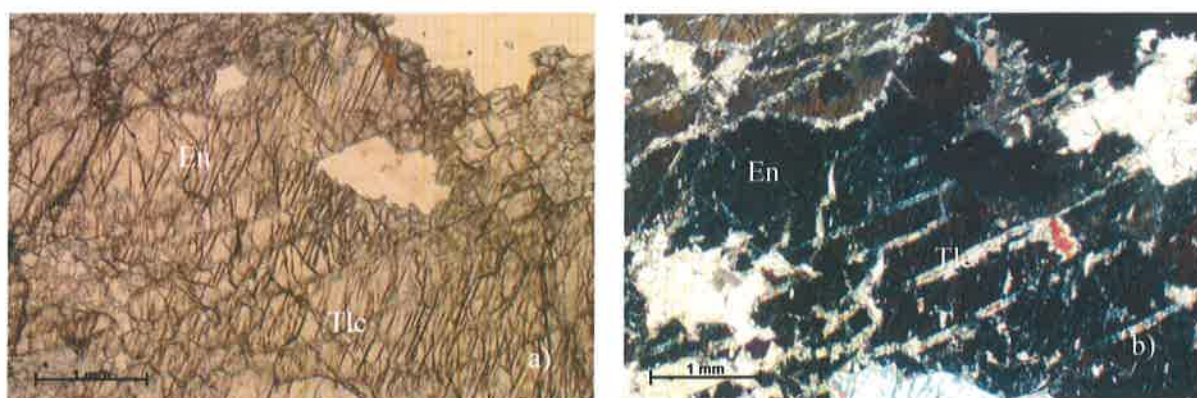


Slika 20. Mikroskopski uzorak SAG 2, a) bez analizatora, b), c), d) s analizatorom (En – enstatit, Srp – serpentin, Tlc – talk, Spl - spinel)

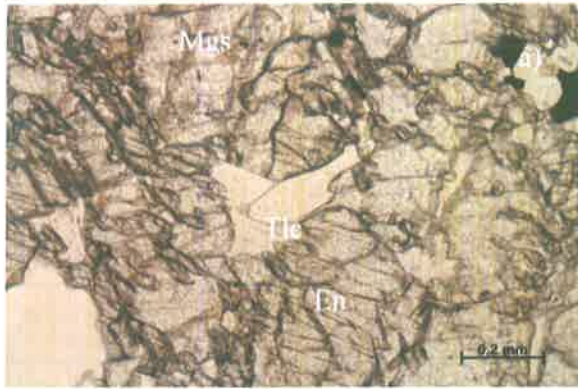
Uzorak SAG 3 predstavlja radijalno zrakaste agregate piroksena velike nekoliko centimetara (Slika 21), te magnezit (Slika 24). Uzorak je zahvaćen izmjenom tek djelomice. Vidljivo je da se produkti izmjene šire duž pukotina i ploha kalavosti (Slika 22). Od alteracijskih produkata najčešći je fibrozni agregat talka, nešto manje prisutan je listićavi (Slika 22), također su prisutni i manji lijepo razvijeni kristali talka (Slika 23) na kojima se vide pukotine kalavosti, dok serpentini nisu prisutni.



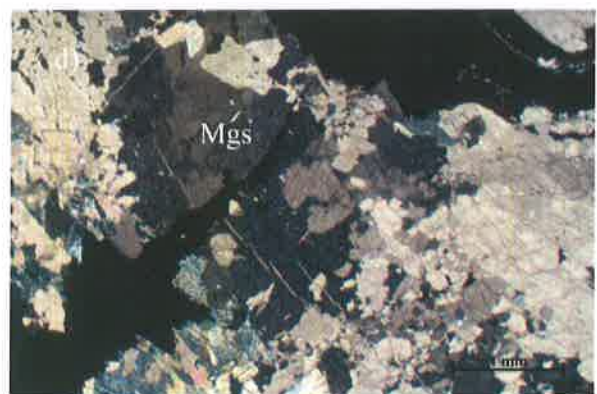
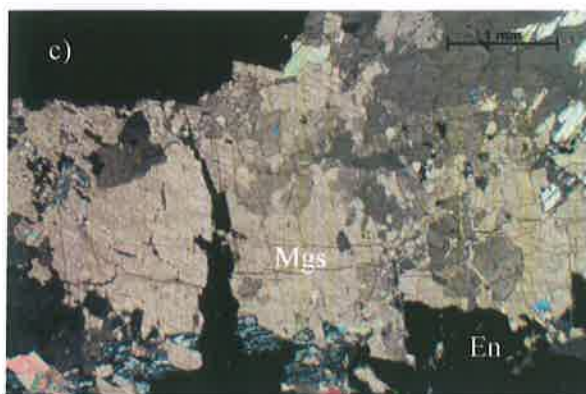
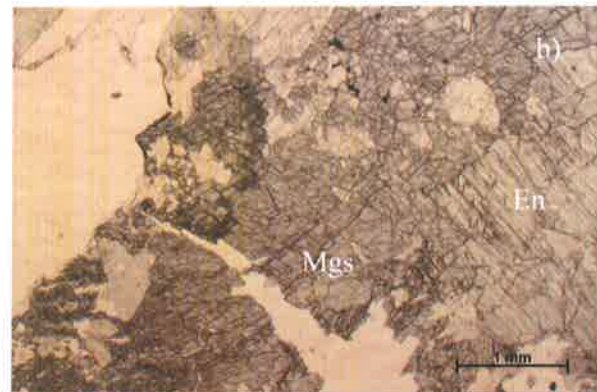
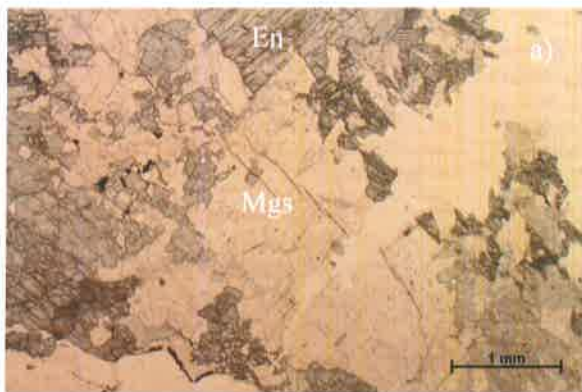
Slika 21. Mikroskopski uzorak SAG 3, a) bez analizatora, b) s analizatorom (En – enstatit, Tlc – talk, Mgs – magnezit)



Slika 22. Mikroskopski uzorak SAG 3, a) bez analizatora, b) s analizatorom (En – enstatit, Tlc – talk)

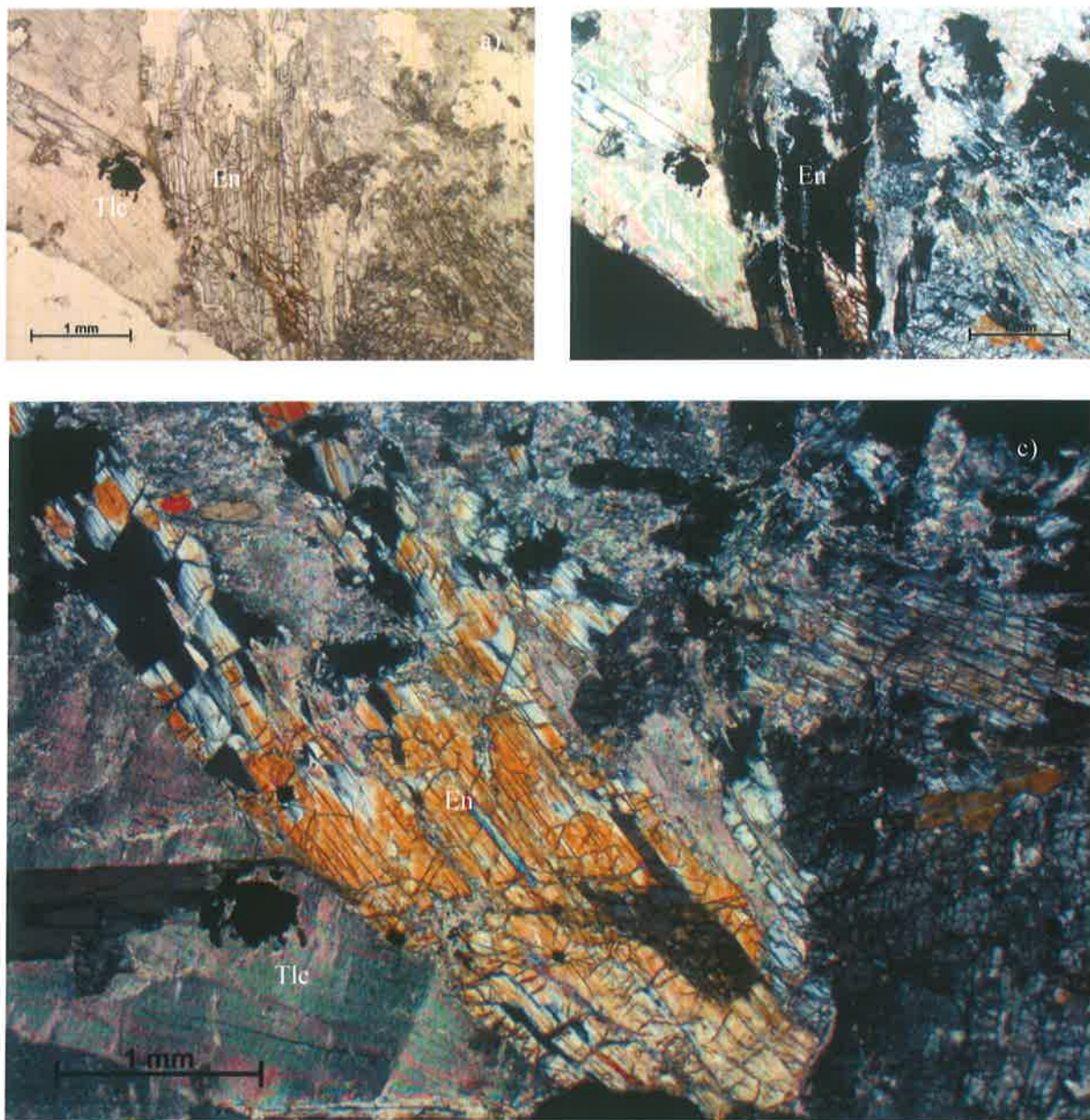


Slika 23. Mikroskopski uzorak SAG 3, a) bez analizatora, b) s analizatorom (En – enstatit, Tlc – talk, Mgs – magnezit)

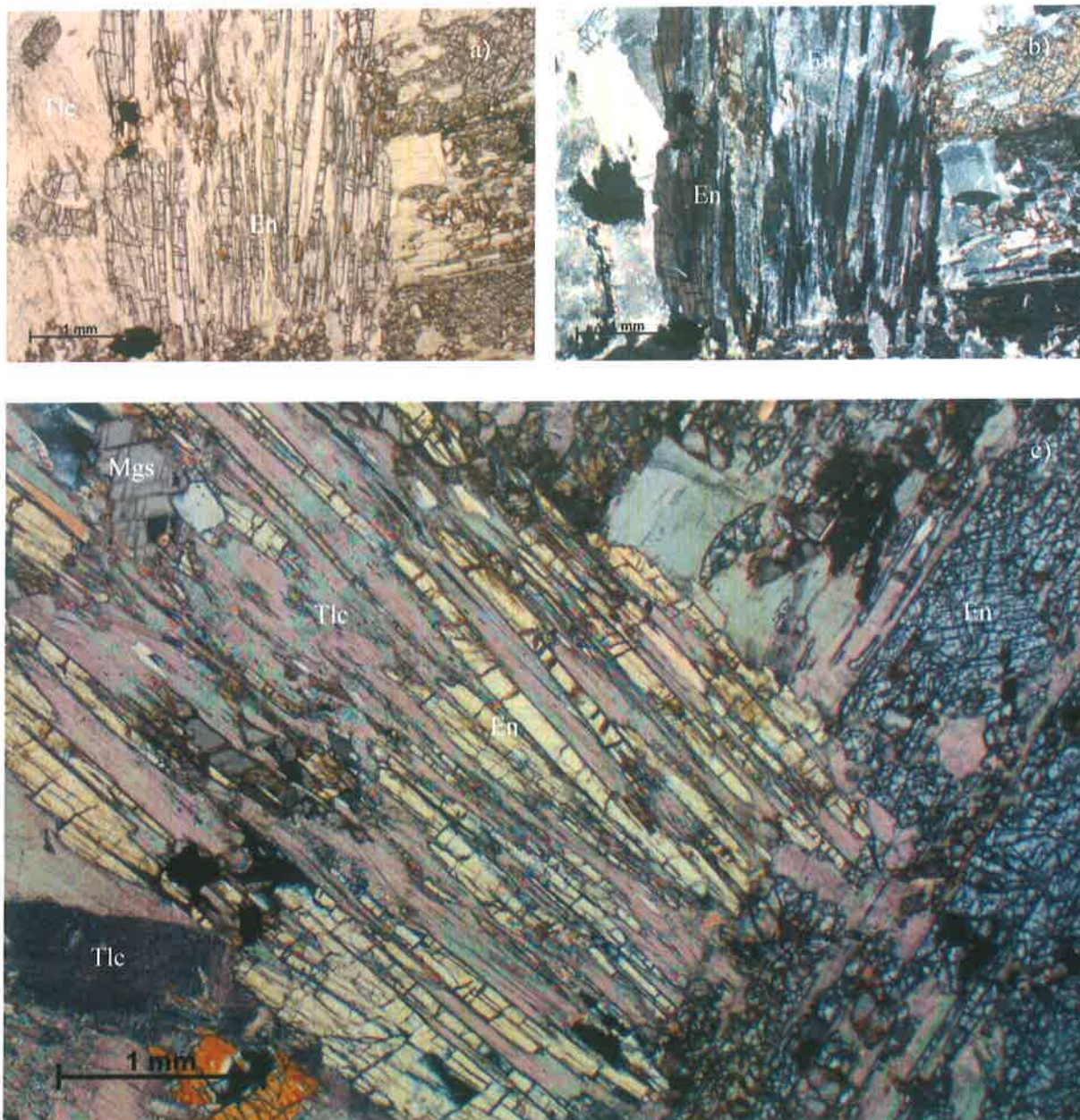


Slika 24. Mikroskopski uzorak SAG 3, a), b) bez analizatora, c), d) s analizatorom (En – enstatit, Mgs – magnezit)

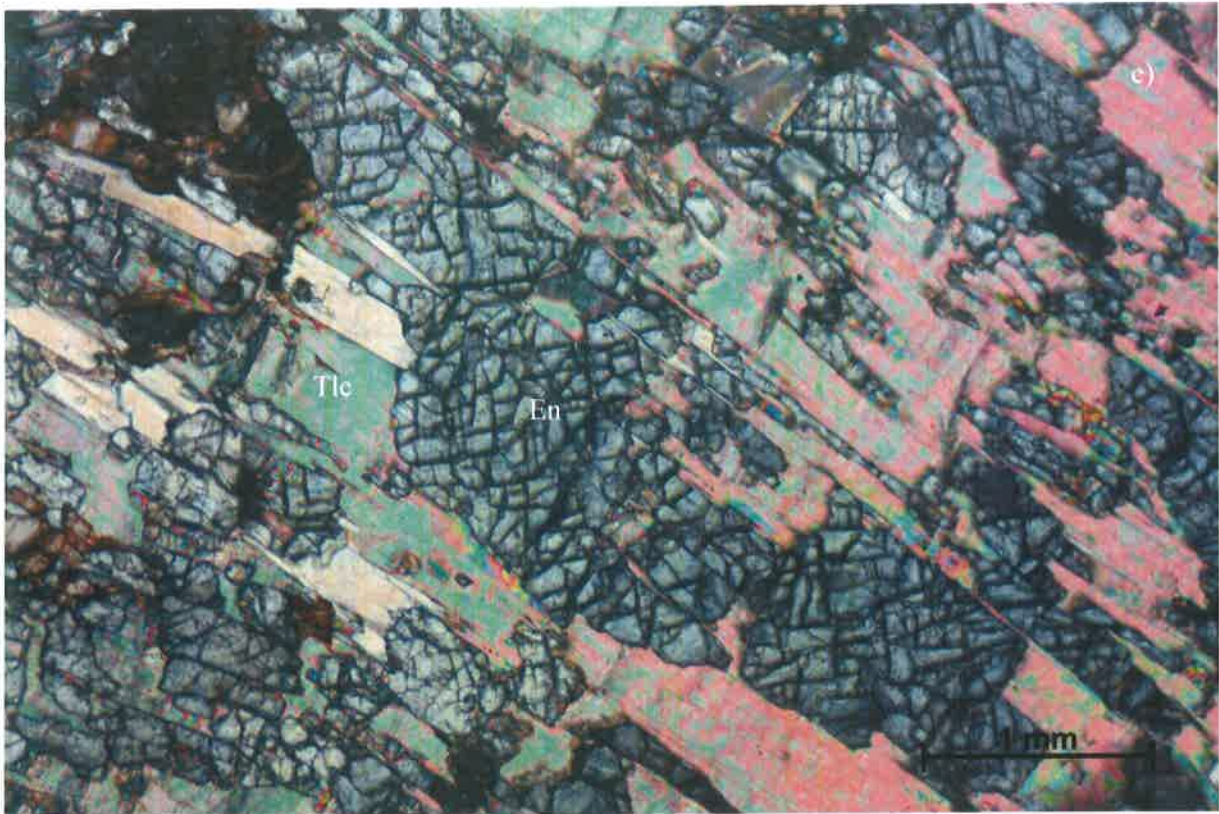
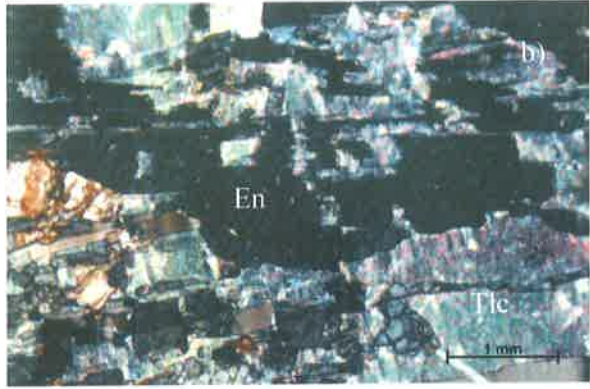
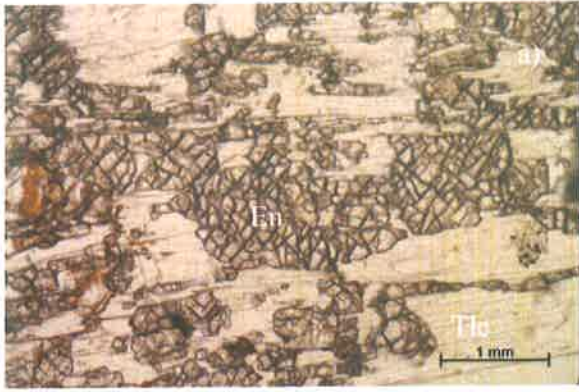
Uzorak SAG 4 predstavlja hipidiomorfne kristale piroksena (Slika 25, 26, 27 i 28) zahvaćene produktima izmjene duž ploha kalavosti i pukotina. Produkti izmjene su fibrozni i listićavi agregati talka (Slika 25) te nešto serpentina od kojih je najzastupljeniji varijetet krizotil (Slika 30). Osim toga, vidljiva je i pseudomorfoza talka po piroksenima (Slika 28). U ovom uzorku magnezita je vrlo malo (Slika 26 i 29). Vidljivo je i alotriomorfno korodirano reliktno zrno olivina u manjoj mjeri serpentinizirano na djelu ruba (Slika 29). U uzorku su prisutni i opáki minerali u talku (Slika 31).



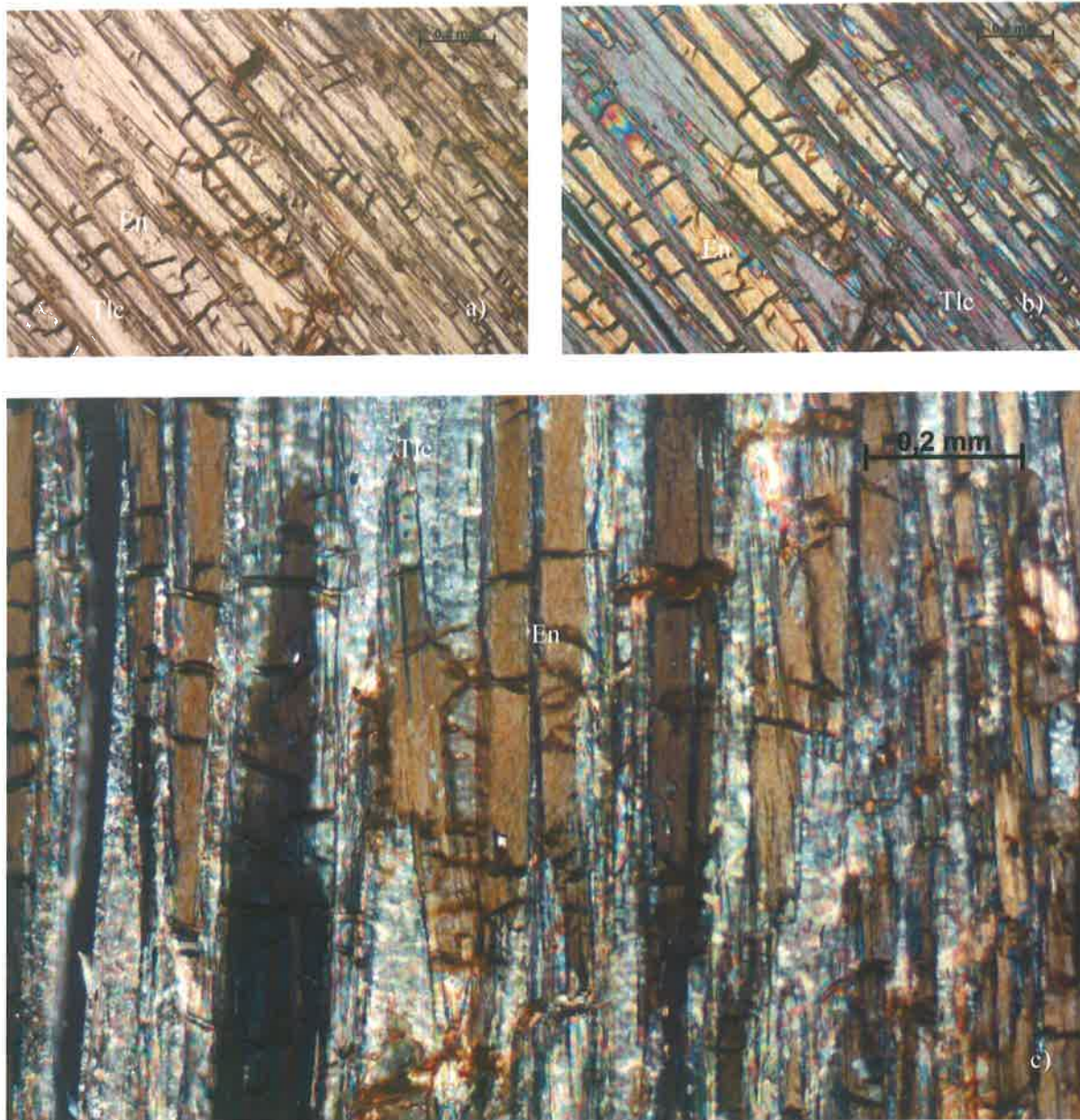
Slika 25. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b), c) s analizatorom – piroksen u položaju maksimalnog potamnjenja i maksimalne rasvjete (En – enstatit, Tlc – talk)



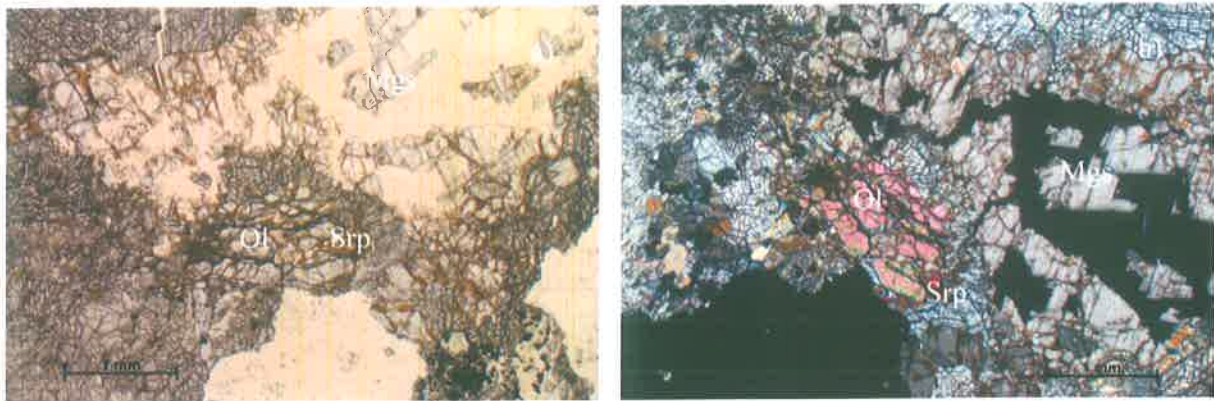
Slika 26. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b), c) s analizatorom – piroksen u položaju maksimalnog potamnjenja i maksimalne rasvjete (En – enstatit, Tlc – talk)



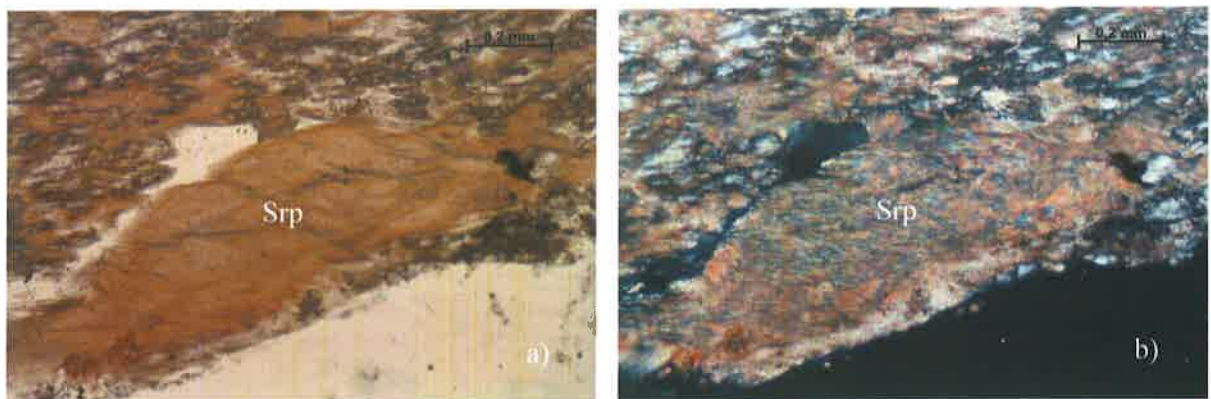
Slika 27. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b), c) s analizatorom – piroksen u položaju maksimalnog potamnjenja i maksimalne rasvjete (En – enstatit, Tlc – talk)



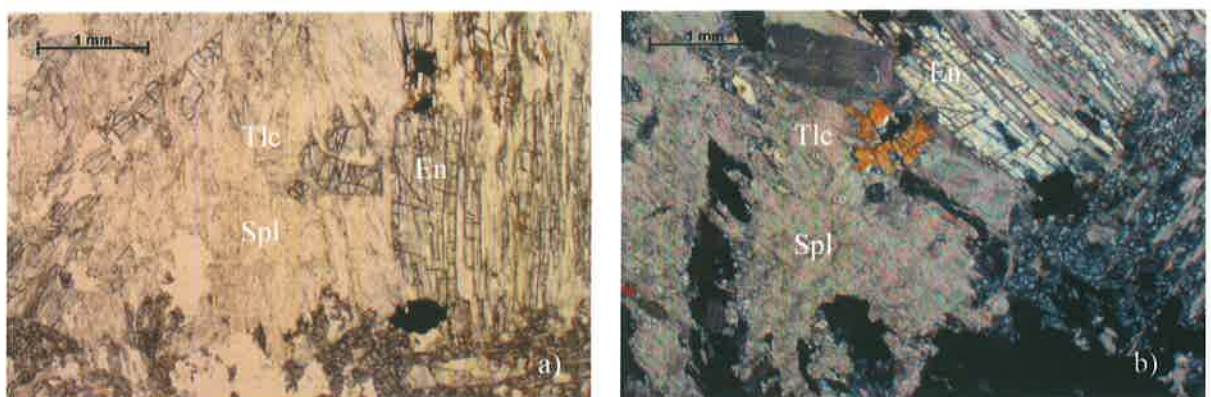
Slika 28. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b), c) s analizatorom – piroksen u položaju maksimalnog potamnjenja i maksimalne rasvjete (En – enstatit, Tlc – talk)



Slika 29. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Ol – olivin, Srp – serpentin, Mgs – magnezit)



Slika 30. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Ol – olivin, Srp – serpentin, Mgs – magnezit)



Slika 31. Mikroskopski uzorak SAG 4, a) bez analizatora, b) s analizatorom (Tlc – talk, En – enstatit, Spl – spineli)

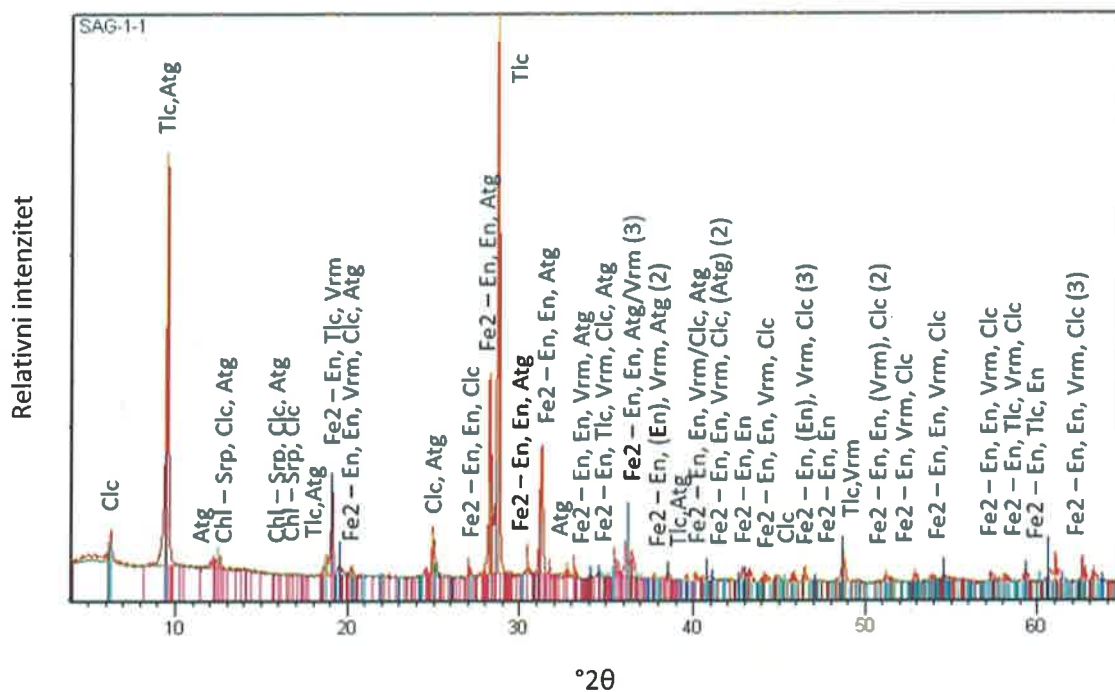
6.3. Rendgenska difrakcija na prahu (XRPD)

Rendgenskom difrakcijom na prahu analizirano je osam uzoraka.

S uzorka SAG 1 (Slika 5) izdvojene su dvije faze za XRPD analizu s obzirom na boju, veličinu zrna i teksturu faza, te su snimljena dva difraktograma: SAG 1.1 (Slika 32) i SAG 1.2 (Slika 33).

SAG 1.1

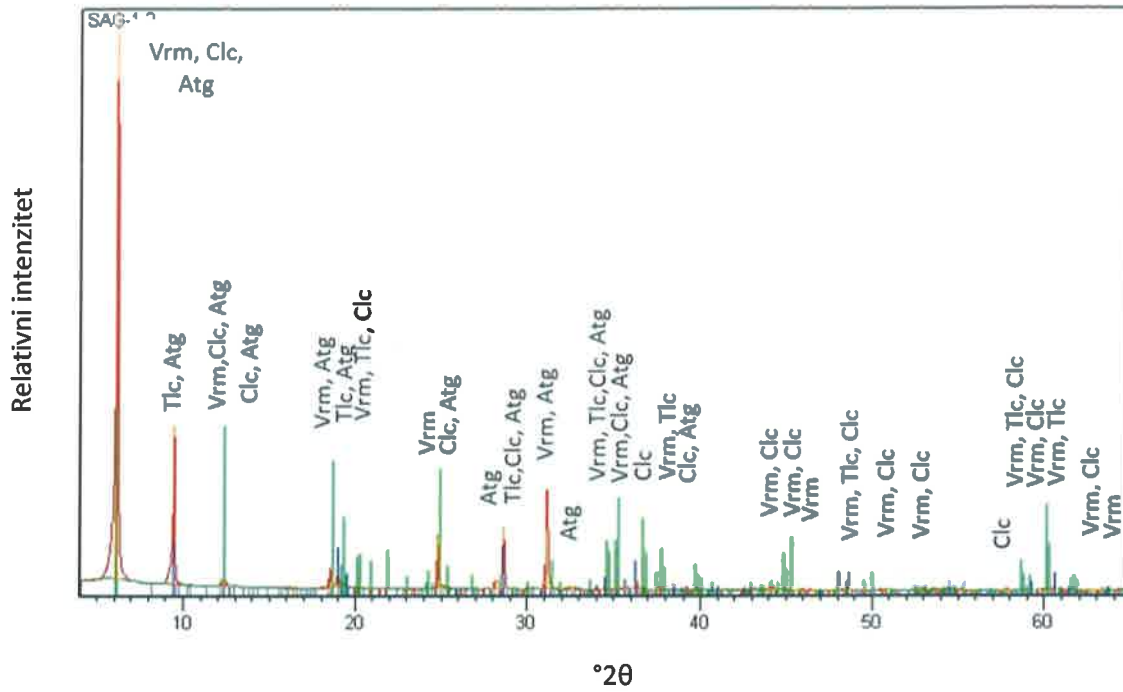
Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 1.1 utvrđeni su enstatit, feroenstatit, talk, klorit – serpentin, klinoklor, vermikulit i antigorit (Slika 32).



Slika 32. Difraktogram uzorka SAG 1.1 (Clc – klinklor, Tlc – talk, Atg – antigorit, Chl-Srp – klorit-serpentin, Fe2-En – željezoviti enstatit/bronicit, En – enstatit, Vrm – vermikulit)

SAG 1.2

Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 1.2 utvrđeni su vermikulit, talk, klinoklor i antigorit (Slika 33).

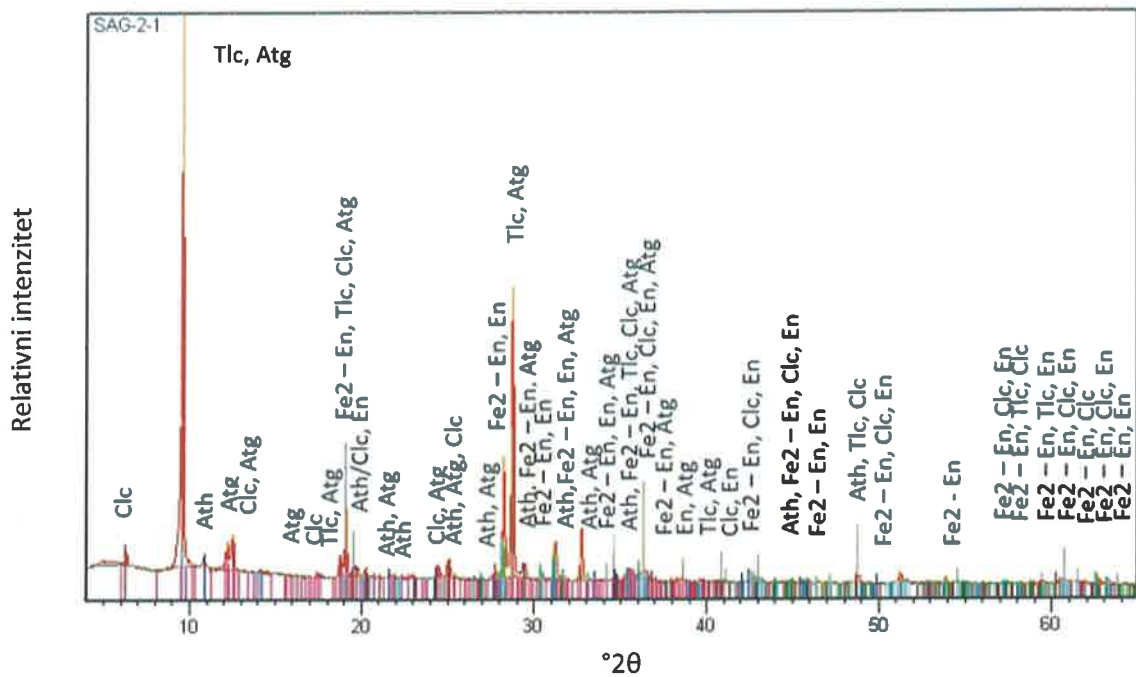


Slika 33. Difraktogram uzorka SAG 1.2 (za kratice vidjeti sliku 32)

S uzorka SAG 2 (Slika 6) izdvojene su dvije faze za XRPD analizu s obzirom na boju, veličinu zrna i teksturu faza, te su snimljena dva difraktograma: SAG 2.1 (Slika 34) i SAG 2.2 (Slika 35).

SAG 2.1

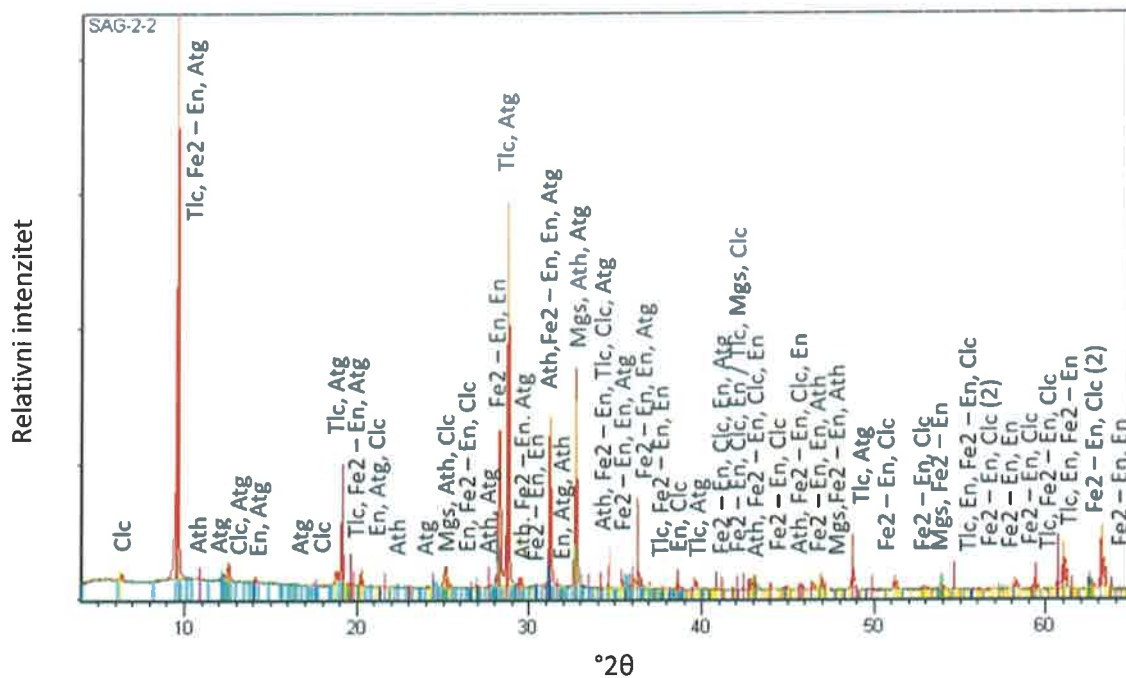
Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 2.1 utvrđeni su enstatit, feroenstatit, talk, antofilit, klinoklor i antigorit (Slika 34).



Slika 34. Difraktogram uzorka SAG 2.1 (Ath – antofilit, za ostale kratice vidjeti sliku 32)

SAG 2.2

Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 2.2 utvrđeni su enstatit, feroenstatit, talk, antigorit, antofilit i klinoklor (Slika 35).

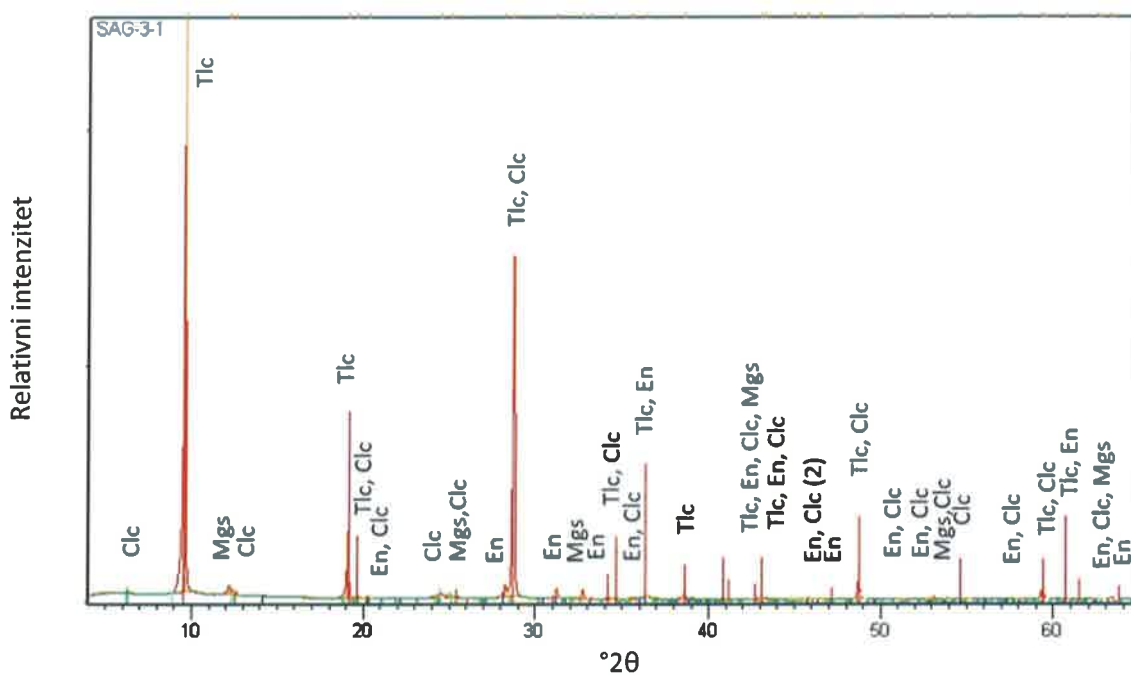


Slika 35. Difraktogram uzorka SAG 2.2 (za kratice vidjeti slike 32 i 34)

S uzorka SAG 3 (Slika 7) izdvojene su dvije faze za XRPD analizu s obzirom na boju, veličinu zrna i teksturu faza, te su snimljena dva difraktograma: SAG 3.1 (Slika 36) i SAG 3.2 (Slika 37).

SAG 3.1

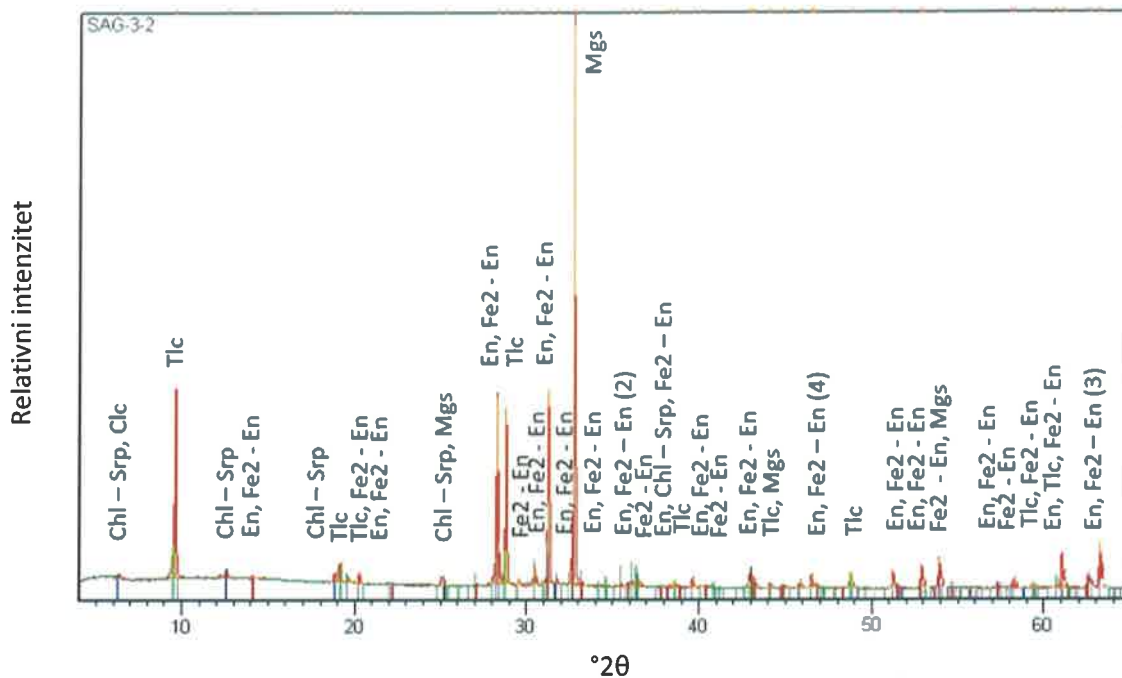
Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 3.1 utvrđeni su enstatit, talk, klinoklor i magnezit (Slika 36).



Slika 36. Difraktogram uzorka SAG 3.1 (Mgs – magnezit, za ostale kratice vidjeti sliku 32)

SAG 3.2

Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 3.2 utvrđeni su enstatit, feroenstatit, talk, magnezit i klorit – serpentin (Slika 37).

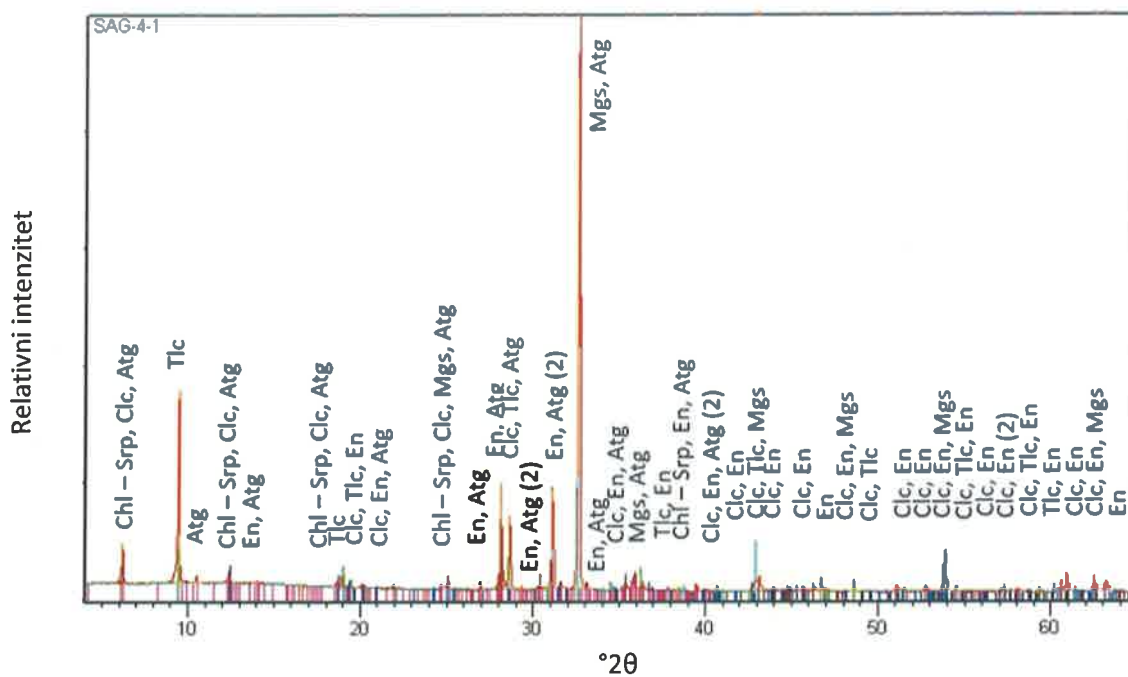


Slika 37. Difraktogram uzorka SAG 3.2 (za kratice vidjeti sliku 32 i 36)

S uzorka SAG 4 (Slika 8) izdvojene su dvije faze za XRPD analizu s obzirom na boju, veličinu zrna i teksturu faza, te su snimljena dva difraktograma: SAG 4.1 (Slika 38) i SAG 4.2 (Slika 39).

SAG 4.1

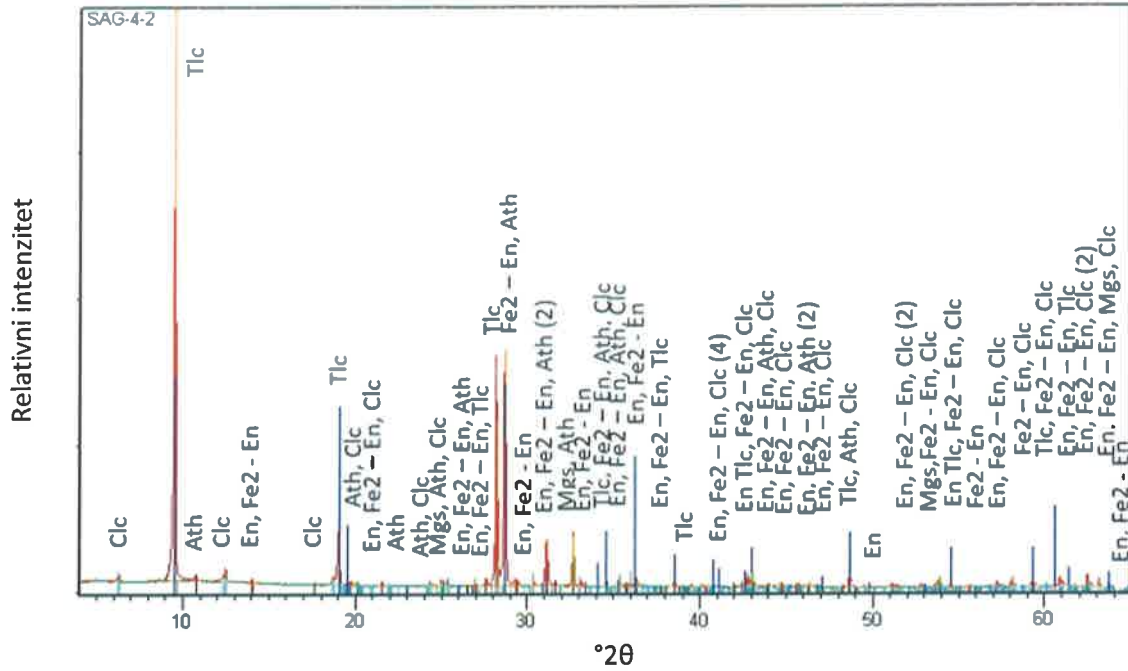
Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 4.1 utvrđeni su enstatit, talk, magnezit, antigorit, klinoklor i klorit – serpentin (Slika 38).



Slika 38. Difraktogram uzorka SAG 4.1 (za kratice vidjeti sliku 32 i 36)

SAG 4.2

Rendgenskom difrakcijom na prahu u uzorku SAG 4.2 utvrđeni su enstatit, feroenstatit, talk, magnezit, antofilit i klinoklor (Slika 39).



Slika 39. Difraktogram uzorka SAG 4.2 (za kratice vidjeti sliku 32, 34 i 36)

7. Rasprava

Analizirane uzorke sagvandita karakterizira radijalno slaganje minerala piroksena, u obliku rozete (Slika 2, 5 i 21), među kojima intersticijski kristalizira mineral magnezit (Slika 21 i 26), što je također već zabilježio i Schreyer et al., (1972). U analiziranim uzorcima prevladavaju izmijenjeni pirokseni (Slika 15, 25, 26 i 27).

U uzorku SAG 3 pirokseni su u odnosu na ostale uzorke, dosta očuvani (Slika 21). Izmjene su zahvatile pukotine i plohe kalavosti (Slika 22), dok su preostala tri uzorka u većinskom postotku zahvaćena alteracijom (Slika 15, 25, 26 i 27), čiji su produkti naročito vidljivi u uzorku SAG 2 (Slika 15, 16, 18 i 20) koji je najintenzivnije izmijenjen. Rendgenskom difrakcijom pokazalo se da u uzorcima dominira enstatit, uz nešto fero-enstatita (broncita) (Slika 32, 34 – 39). Optičkim istraživanjima u prolaznoj svjetlosti ne može se sa sigurnošću utvrditi o kojem se točno karbonatu koji kristalizira intersticijski radi iz razloga što karbonatni minerali imaju vrlo slična optička svojstva kada ih promatramo polarizacijskim mikroskopom. Rendgenskom difrakcijom na prahu utvrđeno je kako je u uzorku riječ o magnezitu (Slika 36, 37, 38 i 39), te da ostali karbonati nisu prisutni.

Stijena sagvandit nastaje interakcijom slanih fluida iz kore obogaćenih na ugljikov dioksid s fragmentima bazičnih stijena, dunita ili harzburgita, porijeklom iz Zemljina plašta, koji su tektonskim procesima ugrađeni su donje djelove kore tijekom kaledonske orogeneze. Kontaktom olivina s fluidima obogaćenim na ugljikov dioksid dolazi do njegove zamjene mineralnom asocijacijom karakterističnom za stijenu sagvandit ($2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 2\text{MgCO}_3$). Prevladavajuća forsteritna komponenta prelazi u sastav razvijenih idiomorfni kristala ortopiroksena enstatita, te u sastav magnezita koji kristalizira intersticijski među rozetama enstatita. Fajalitna komponenta također prelazi u sastav navedenih razvijenih minerala, no manje je zastupljena od forsteritne, formirajući ferosilitne djelove ortopiroksena. Nadalje, fajalitna komponenta bi mogla formirati sideritne djelove u sastavu karbonata magnezita (breunnerita). Navedena reakcija konzumacije ugljikova dioksida iz fluidne faze zaustavljena je vjerojatno iz razloga što je fluid bogat ugljikovim dioksidom na strani reaktanta u potpunosti konzumiran ili jednostavno postaje nedostupan iz izvora, na što ukazuju reliktna zrna olivina (Slika 18 i 29), primarnog plašnog materijala, zaostala u izmijenjenoj stijeni. S obzirom na veću zastupljenost ortopiroksena u uzorcima u odnosu na magnezit, od one definirane navedenom reakcijom, u metasomatskoj reakciji dolazi do dodavanja otopljenog $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ u sastavu fluida koji djeluje na primarni materijal, dunit ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_{2(\text{aq})} \rightarrow$

$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$). Radi se o direktnoj zamjeni olivina enstatitom (Slika 19), dakle u asocijaciji nema magnezita. Reakcija zaslužna za očuvanje prvotnog volumena stijene prilikom izloženosti fluidima je izmjena olivina u enstatit odnošenjem magnezija prilikom interakcije s fluidom ($2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{NaCl}_{(\text{aq})} \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + 2\text{MgCl}_{2(\text{aq})} + 4\text{NaOH}_{(\text{aq})}$). Dakle, formiranje stijene sagvandita posljedica je istovremenog zajedničkog djelovanja navedenih triju kemijskih procesa koji se odvijaju djelovanjem fluida na primarni ultrabazični plašni materijal (Bucher and Stober, 2019), a što se jasno vidi i na uzorcima istraživanim u ovom radu.

Ortopirokseni mogu se procesom bastitizacije izmjenjivati u serpentin (Slika 15), te osim toga u amfibol (Slika 18) ili talk (Slika 25, 26 i 27). Kristali piroksena u uzorcima izmjenjuju se u igličaste agregate antofilita što je potvrđeno i rendgenska difrakcija na prahu nam također ukazuje na prisutnost antofilita u uzorcima (Slike 34, 35 i 36).. Ovaj mineral grupe amfibola također u svojoj strukturi može sadržavati željezo (varijetet fero-antofilit). Često dolazi u asocijaciji s talkom, u stijenama srednjeg stupnja metamorfizma bogatim magnezijem (Bermanec i Slovenec, 2006). Talk je u uzorcima prisutan u vidu listićastih (Slika 19 i 20) i rjeđe fibroznih agregata (Slika 10 i 25) koji su vjerojatno posljedica izmjene serpentinskih minerala, no prisutno je i nešto pravilno razvijenih kristala talka (Slika 23). Dakle, vidljiva je pseudomorfoza u kojoj oblik prvotnog minerala, konkretno serpentina, ostaje očuvan prilikom izmjene serpentina u talk (Slika 10), a osim toga vidljiva je i kod izmjene piroksena u talk (Slika 26 i 28). Napredovanjem reakcije, dolazi do formiranja potpuno gustog, jednoličnog sitnolistićastog agregata talka (Slika 20). Talk nastaje uglavnom djelovanjem hidrotermalnih otopina na stijene bogate magnezijem. Stvaranje talka (steatitizacija) u ultrabazičnim stijenama slijedi iza njihove serpentinizacije, a važnu ulogu ima ugljična kiselina, te uz talk nastaje i magnezit: $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 3\text{MgCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ (Bermanec i Slovenec, 2006). Serpentine primarno nastaju alteracijama iz olivina, amfibola ili piroksena (Bermanec i Slovenec, 2006). U preparatima su serpentinski minerali prisutni najčešće u vidu prorastanja različitih varijeteta (Slika 18). U uzorku SAG 1 razvijen je serpentinski mineral u pravilnim listićima, s obzirom na način pojavljivanja mogao bi biti antigorit (Slika 13). Vidljiva su tri najčešća serpentinska minerala, lizardit (Slika 20), antigorit (Slika 13) i krizotil (Slika 19 i 30). Najčešće u asocijacijama s mineralima serpentina dolaze i minerali grupe spinela (Bermanec, 1999). Lizardit karakterizira pojava opakih minerala u asocijaciji (minerala grupe spinela), stoga je u tom slučaju zelena boja uglavnom zagasitija, tamnija ili maskirana fino disperznim magnetitom zbog čega je kada ga promatramo optičkim istraživanjima u prolaznoj svjetlosti na nekim djelovima crveno – smeđe boje (Slika 16). Izmjenom serpentina u talk, opaki

minerali ostaju neizmijenjeni, te ih optičkim istraživanjima u prolaznoj svjetlosti možemo uočiti u sitnozrnastim agregatima talka. Ponekad je vrlo teško promatranjem pod polarizacijskim mikroskopom odrediti radi li se o spinelu, kromitu ili magnetitu (minerali grupe spinela) jer su vrlo slične boje (crvene, crveno-smeđe do tamno smeđe) (Slika 20). Listićavi serpentini, moguće antigorit je uočen u asocijaciji s magnezitom što je vjerojatno posljedica izmjene kristala ortopiroksena u magnezitu jer je presjek poprečan i hipidiomorfan, gotovo osmerokutan. (Slika 12).

Kloriti su u eruptivnim stijenama i stijenama višeg stupnja metamorfizma sekundarni minerali, a nastali su uglavnom hidrotermalnom alteracijom primarnih Fe-Mg minerala – tinjaca, piroksena, amfibola, granata i olivina (Bermanec i Slovenec, 2006). Pojava klorita u preparatima vezana je u najvećem broju slučajeva uz pojavu serpentina, dakle klorit se gotovo uvijek nalazi u blizini serpentiniziranih djelova ove stijene, gdje su pirokseni u velikoj mjeri izmijenjeni što je vidljivo kod optičkih istraživanja u prolaznoj svjetlosti (Slika 16). Rendgenskom difrakcijom dokazano je kako se u uzorcima radi o klinokloru (Slika 32 – 39), osim klinoklora pojavljuje se i mješovito prorastanje klorita i serpentina koje još nije dovoljno istraženo te nema mnogo članaka na tu temu (Slika 32, 37 i 38). Pojava minerala iz serije biotita, moguće flogopita ili siderofilita, koji je dosta rjeđi nego klorit u uzorcima, također je vezana uz pojavu navedenih dvaju mineralnih vrsta, dakle također je sekundarni mineral (Slika 14), s obzirom da pokazuje pleokroizam u žučkastoj i dvije različite zelene nijanse vrlo vjerojatno se radi o siderofilitu, presjek je zasigurno pseudoheksagonski, no nije pogodan za analizu jer se ne radi o točno poprečnom presjeku, osim toga pronađeni mineral je vrlo malen. Flogopit se često nalazi i u metamorfoziranim karbonatnim stijenama i u ultrabazitima (Bermanec i Slovenec, 2006). Flogopit se kao član serije biotita dalje izmjenjuje u klorit ili vermikulit. Rendgenskom difrakcijom na prahu utvrđeno je da se na uzorku SAG 1 površinski pojavljuje i vermikulit (Slika 32 i 33) koji je vjerojatno rezultat kontakta sagvandita s površinskim uvjetima, konkretno vodom, i moguće je da nastaje iz klorita. Osim navedenog vermikulita, kao rezultat površinskog trošenja površina čitavog izdanka postaje porozna, što je posljedica otapanja karbonata u sastavu sagvandita (Slika 7). Nadalje, površina je također mjestimice izrazito narančaste do zemljasto – smeđe boje (Slika 5, 6, 7 i 8), što je posljedica trošenja željeza u sastavu stijene, odnosno razvoja Fe^{3+} - oksihidroksida (Bucher and Stober, 2019).

8. Zaključak

U ovom Završnom radu analiziran je uzorak sagvandita s tipskog lokaliteta u pokrajini Troms i Finnmark u Norveškoj. Uzorci su analizirani s ciljem određivanja mineralošskog sastava stijene. Tijekom analize uzoraka utvrđeno je sljedeće:

- Stijena sagvandit po svojem je sastavu ustvari karbonatni ortopiroksenit s karakterističnom mineralnom asocijacijom koju primarno čine enstatit i magnezit.
- Teksturane karakteristike ukazuju nam da je prilikom formiranja stijene došlo i do direktne zamjene olivina enstatitom.
- Magnezit je mrljast te sadrži žilice talka i antofilita u sebi.
- Minerali nastali procesima alteracije su talk, serpentin, klorit, biotit, vermikulit i antofilit te su razvijeni u vidu agregata različitih strukturnih i teksturnih obilježja.
- Talk je mineral koji je prisutan u uzorcima najčešće u vidu listićavih i fibroznih agregata (rijetki su kristali) te nastaje izmjenom piroksena ili serpentina.
- Pseudomorfoza je kao teksturna karakteristika vidljiva u slučaju zamjene serpentina talkom, te u slučaju zamjene ortopiroksena talkom.
- Serpentin nastaje alteracijom iz prisutnih ortopiroksena, a razvija se i na rubovima reliktnih zrna olivina. Najčešće se prisutni u vidu prorastanja različitih varijeteta ovog minerala.
- U asocijaciji sa serpentinom prisutni su minerali grupe spinela i klorit.
- Klorit je u uzorku prisutan u izmjeni sa serpentinom i u vidu mrljastih listićavih agregata
- Vermikulit se pojavljuje isključivo na površini uzorka, formira se trošenjem klorita ili biotita prisutnih u uzorcima.
- Antofilit nastaje procesima izmjene ortopiroksena i tvori igličaste agregate.
- Minerali grupe spinela osim u asocijaciji sa serpentinom rjeđe dolaze i u piroksenima te u talku (nastalom izmjenom serpentina).
- Vjerojatno je nastala metasomatskim procesima iz primarnog ultrabazičnog materijala koji je po svojem sastavu olivin (dunit/harzburgit) te su nakon procesa izmjene očuvana reliktna zrna olivina.
- Površina makroskopskih uzoraka je narančasto – crvene do zemljasto smeđe boje što je posljedica površinskog trošenja stijene, odnosno razvoja željezovitih oksidnih hidroksida na površini uzoraka, a površina je porozna što je posljedica otapanja karbonata magnezita prisutnog u sastavu stijene.

9. Literatura

Andersen, A., Fareth E., Bergh, S., Kristensen S. E., Krogh, E. (1985.): *Review of Caledonian lithotectonic units in Troms, north Norway*. John Wiley & Sons Ltd., 569 – 578.

Azároff, L. V (1968): *Elements of X-ray crystallography*. Mcgrawhill book Co. New York, 116.

Barth, T. (1927.): *Sagvandite, a magnesite bearing igneous rock*. Norsk Geologisk Tidsskrift, 9, 271 – 303.

Bermanec, V. (1999.): *Sistematska mineralogija – mineralogija nesilikata*. Targa, Zagreb, 83 – 106.

Bermanec, V., Slovenec, D. (2006.): *Sistematska mineralogija – mineralogija silikata*. Denona d.o.o., Zagreb, 28 – 257.

Bucher – Nurminen, K. (1991.): *Mantle fragments in the Scandinavian Caledonides*. Tectonophysics 190, 173 – 192.

Bucher – Nurminen, K., Stober, I. (2019.): *Interaction of Mantle Rocks with Crustal Fluids: Sagvandites of the Scandinavian Caledonides*. Journal of Earth Science, 30, No. 6., 1084 – 1094.

Dabirian, R., Beiranvand, M. S., Aghahoseini, S. (2012.): *Mineral carbonation in peridotite rock for CO₂ sequestration and a method of leakage reduction of CO₂ in the rock*. NAFTA 63 (1 – 2), 44 – 48.

Lindstrom, M., Andersen, A. (1992.): *Early Caledonian high-grade metamorphism within exotic terranes of the Troms Caledonides?*. Norsk Geologisk Tidsskrift, 72, 375 – 379.

Moore, A. C. (1977.): *The petrography and possible regional significance of the Hjelmkona ultramafic body (sagvandite), Nordmore, Norway*. Norsk Geologisk Tidsskrift, 57, 55 – 64.

Moore, A. C., Qvale, H. (1977.): *Three varieties of alpine – type ultramafic rocks in the Norwegian Caledonides and Basal Gneiss Complex*. Lithos 10, 149 – 161.

Ohnmacht, W. (1974.): *Petrogenesis of Carbonate-orthopyroxenites (Sagvandites) and related rocks from Troms, Northern Norway*. Journal of Petrology, 15, II, 303 – 324.

Reusch, H. (1891.): *Optegnelser fra Balsfjorden*. Norges Geologiske undersøkelse, 4, 127 – 130.

Schreyer, W., Ohnmacht, W., Mannchen, J. (1972.): *Carbonate-orthopyroxenites (sagvandites) from Troms, northern Norway*. Lithos 5, 345 – 364.

Vrkljan, M., Borojević Šoštarić, S., Tomašić, N. (2019.): *Optička mineralogija, određivanje minerala polarizacijskim mikroskopom*. Udžbenici sveučilišta u Zagrebu – Manualia Universitas studiorum Zagrabiensis, Zagreb, 39.