

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZ- ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET
ÁSVÁNYTANI TANSZÉK

Komplex geológiai vizsgálatok a Novohrad-Nógrád Geopark gyulladásos metamorf egységein

TDK dolgozat

Horváth Laura

geológus M.Sc.

Témavezető:

Biró Máté, ELTE TTK Ásványtani Tanszék

Konzulens:

Weiszburg Tamás, ELTE TTK Ásványtani Tanszék

Prakfalvi Péter, Novohrad-Nógrád UNESCO Globális Geopark geológusa



Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

Absztrakt	3
1. Bevezetés, célkitűzés.....	4
2. Kutatástörténet, földtani háttér	5
3. Műszeres anyagvizsgálati módszerek, módszertan	8
<i>Módszertan</i>	8
<i>Mintaelőkészítés</i>	8
3.1. Mikroszkópi petrográfia	8
3.2. Röntgen pordiffrakció	8
3.3. Raman spektroszkópia.....	9
3.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok	9
3.5. Indukált csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES).....	9
4. Petrográfiai leírás	11
Makroszkópos leírás.....	11
Mikroszkópos és elektronmikroszkópi petrográfia	12
5. Raman-spektroszkópia	18
6. Teljeskörzet geokémiai elemzések	20
7. Értelmezés	23
Következtetés	27
További kutatási lehetőségek	28
Köszönetnyilvánítás	28
Felhasznált irodalom	29
Mellékletek.....	32

Absztrakt

Kutatásom tárgya Magyarország eddigi egyetlen dokumentált gyulladási metamorf komplexuma (Horváth & Vágó, 2023). Jelen dolgozatomban célja az ebben a komplexumban lejátszódó égés során felszabaduló hő hatására átalakult-megolvadt kőzetek olvadási, majd kristályosodási folyamatának értelmezése során nyitva maradt kérdések megválaszolása, tisztázása. Ehhez az in-situ megmaradt, makroszkóposan folyásos-breccás szövetű paraláva-kőzet behatóbb vizsgálatát végeztem el. A makroszkóposan diverz kőzetcsoport petrográfiaja további áteső és reflexiós polarizációs mikroszkópos, elektronmikroszkópos (SEM-EDS) és Raman-spektroszkópos vizsgálatokkal került kiegészítésre. Ezek mellett a képződmény protolitját jelentő szenes aleurolitból, a parciális olvadást el nem szenvedett metaaleurolitból („cserép”), nagyfokú parciális olvadást szenvedett buchitból és paraláva-kőzetből ICP-OES főelem összetételi mérések készültek.

A jelen kutatás keretein belül vizsgált paraláva-kőzet minta lokálisan legalább 5féle ásványos összetétellel jellemezhető, melyek mellett egy, az egész kőzetben előforduló szulfidolvadék jelenléte is igazolást nyert. Ezen 5 összetételi típus: a *cordierit-plagioklász-ilmenit-kőzetüveg*, a *piroxén-plagioklász-cristobalit-pirrhotin*, a *vázkristályos plagioklász-cristobalit-relikt kvarc-kőzetüveg*, az idiomorf, táblás, zónás kristályokat tartalmazó *plagioklász-Ti-oxid-kőzetüveg* és foszfátos slírekben a *cordierit-ilmenit-ensztatit-stanfieldit*.

A SiO_2 és Ti-oxid fázisok meghatározásához Raman-spektroszkópiát használtam, melyeken felül ortopiroxén, cordierit, plagioklász, ilmenit, pirrhotin fázisokat, valamint kőzetüveget is vizsgáltam. A SEM-EDS mérések, a reflexiós petrográfia és a Raman-spektroszkópia segítségével három, Magyarországról eddig leírásra nem került új ásvány is leírásra került: a pseudobrookit ásványcsoportba tartozó armalcolit ($\text{Mg}_{0,38-0,55}\text{Fe}_{0,37-0,52}\text{Al}_{0,06-0,07}(\text{Al}_{0,08-0,13}\text{Ti}_{1,87-1,92})\text{O}_5$, mely mellékelemként Cr-ot, Ge-ot, Mn-t is tartalmaz; a vízmentes foszfátok közé tartozó stanfieldit, és a cordierit hexagonális polimorf párja, az indialit is. Ezek mellett egy eddig nem azonosított, összetételében is változatos szilikát-foszfát-ásvány is megjelenik a kőzetben, amely ásvány további műszeres mérésekre vár.

Jelen munka a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap, illetve a MOL Új Európa Alapítvány által finanszírozott szakmai támogatásával készült.

1. Bevezetés, célkitűzés

Szilvás-kő területén, Salgótarján-Rónabánya falu keleti határában található Gusztáv IV.-es számú, később Szilváskő-táró közvetlen környékén egy különleges kőzetegyüttest fedezett fel Prakfalvi Péter, a Novohrad-Nógrád UNESCO Globális Geopark geológusa 2021-ben. A kőzetegyüttesről előző TDK munkám (Horváth & Vágó, 2023) során kiderült, hogy ez Magyarország első dokumentált gyulladáisos metamorf komplexuma.

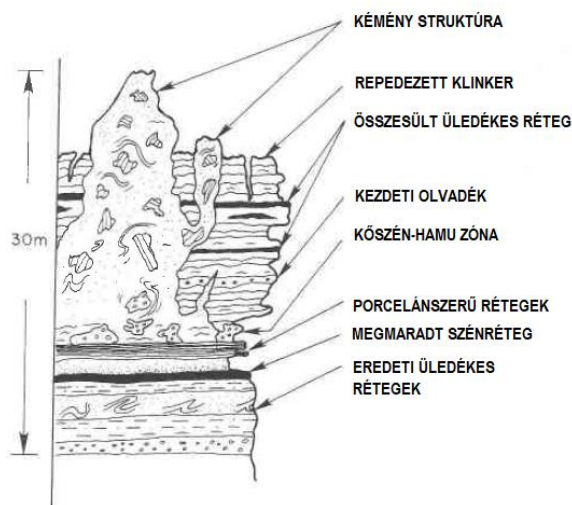
A jelen dolgozatom célja az előző kutatásomban felmerült, nyitva maradt kérdések megválaszolása: a buchit és paraláva-kőzetben megjelenő SiO_2 polimorf módosulatok tisztázása a pontosabb hőmérsékleti becslés elérésére, és a magas hőmérsékletű, nem egyensúlyi olvadék és ásványképződés megértése a Rónabánya Gyulladáisos Metamorf Komplexum¹ kőzeteiben. A képződmény alaposabb megismerésével, valamint tudományos igényvel történő dokumentációjával hozzá kívánunk járulni a Novohrad-Nógrád Geopark és a Bükk Nemzeti Park által a vizsgált területen és környezetében kialakított tanösvény földtudományos értékeinek bővítéséhez.

¹ Az egyszerűség kedvéért a dolgozat során a komplexumra „Rónabánya Gyulladáisos Metamorf Komplexum”-ként fogok hivatkozni, röviden „RGMK”.

2. Kutatástörténet, földtani háttér

A gyulladáshoz vezető metamorfózis jellemzői

A pirometamorfózis egy olyan folyamat, amely során az eredeti ásványfázisok átalakulása kiemelkedően magas hőmérséklet és alacsony nyomás alatt megy végbe, a kontakt metamorfózis szanidinit fácieséhez hasonlítható a legjobban. Ennek egy alfaja a gyulladáshoz vezető metamorfózis, amikor valamely éghető szervesanyag – kőszén, bitumen, kőolaj, földgáz – spontán égése során felszabaduló hő hatására, alacsony nyomáson (≤ 1 kbar) és magas, >1000 °C hőmérsékleten alakulnak át a kőzetek (Bentor et al., 1981; Cosca et al., 1989). Az ilyen típusú metamorfózis során kis területen, akár pár méteren belül is, magas, több száz fokos hőmérsékleti gradiens is tud kialakulni, geológiai időléptékben pillanatszerűen. Ezen okokból a folyamat során képződő kőzetek mikroléptéken változó litológiával jellemezhetők (1. ábra) és ásványos paragenézisüket a metastabil olvadás és a gyors ásványos reakciók dominálják szinte száraz, illómentes környezetben, hirtelen hűlési folyamattal (Grapes, 2011). Az átalakult kőzetek felszíni kiterjedése nagyban függ a terület geológiájától, a pár száz m^2 -től a több ezer km^2 -ig terjedhet. A kiindulási kőzetanyagból az emelkedő hőmérséklettel először cserépszerű, ún. klinkerek, majd parciális olvadás nyomait mutató buchit, illetve a kémény struktúrákban (1. ábra) teljesen megolvadt kőzetből kristályosodó-kidermedő paraláva-kőzetek keletkeznek. A legnagyobb kiterjedésű ismert gyulladáshoz vezető metamorf komplexum Észak-Amerikában található, a Powder folyó völgyében több mint 500 000 km^2 kiterjedésű (Bentor et al., 1981; Cosca et al., 1989), míg a legikonikusabb komplexum Izraelben található, a Hatrurim-medencében, amely különleges ásványfajok paradicsoma (Gross, 1977). Közép-Európában sem új a jelenség: a felső-sziléziai szénmedencében (Lengyelország) ma 780-870 méter mélyen találhatók gyulladáshoz vezető metamorf kőzetek. A begyulladáshoz szükséges körülményeket a Kárpátok előtéri hátán fennálló extenziós rezsimben kialakuló normálvetők, és az exhumálódó, akkor 100-150 méter mélyen lévő kőszén rétegek szolgáltatták (Nawrocki et al., 2022).

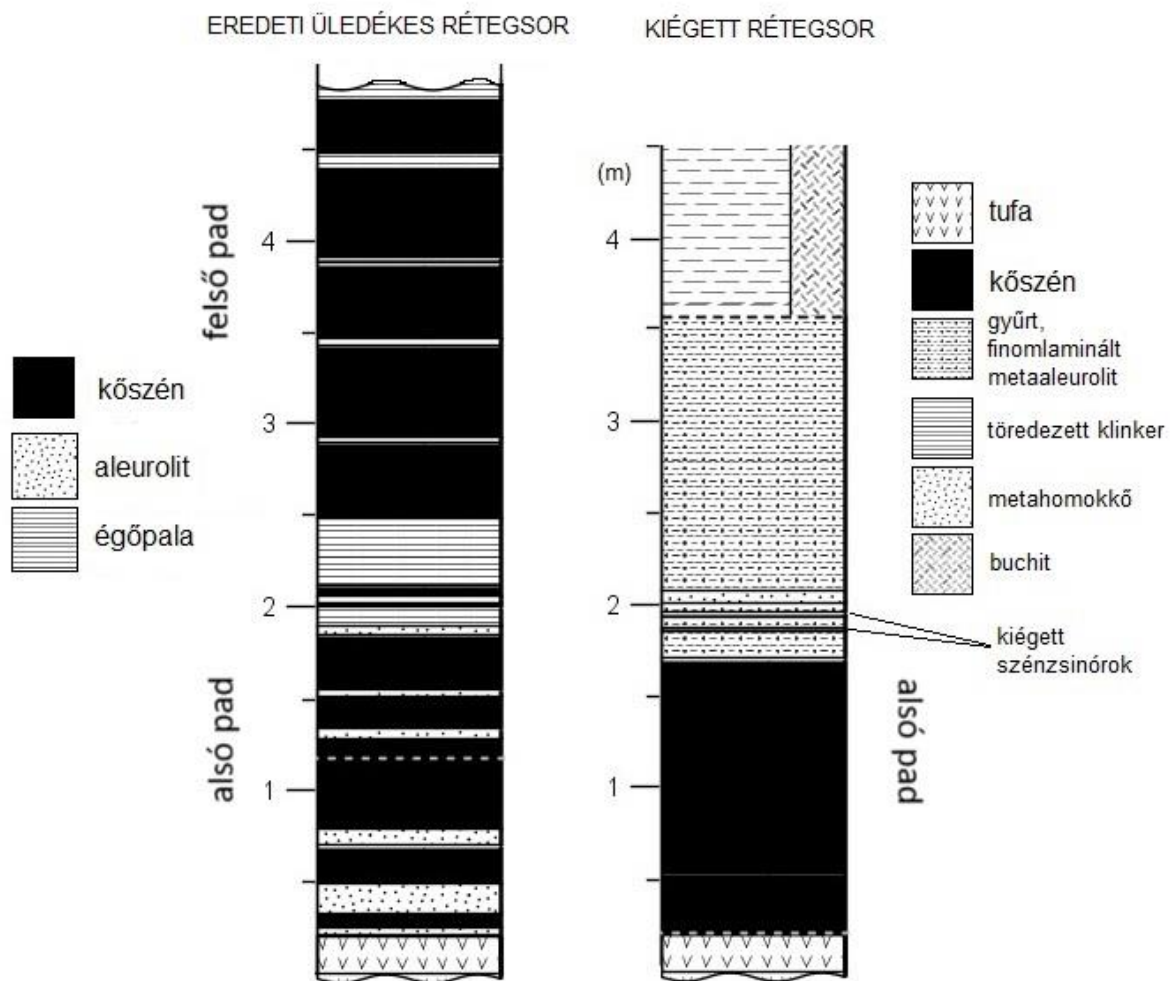


1. ábra: Egy gyulladáshoz vezető metamorf komplexum sematikus ábrája, Cosca et al. (1989) alapján

Kutatási terület

Kutatási területem a salgótarjáni szénmedence ÉK-i szegmensében található, a Karancs-Medves vidékhez tartozó Szilvás-kő lábánál, Rónabánya településtől DK-re, a Novohrad-Nógrád UNESCO Globális Geopark területén. A falu határában a IV. számú Gusztáv-tárótól induló geológiai tanösvény mentén É 48°07.429', K 019°53.768' (EOV: x=309266 y=713186) koordinátákon bukkan ki először a vizsgált képződmény (Horváth & Vágó, 2023). Az alsó-miocén során keletkezett Salgótarjáni Barnaköszén Formáció a területen a Tihaméri Riolit Lapillitufa Formáción telepszik (Babinszki et al., 2023), és kizárólag a III., limnikus kifejlődésű, 4-4,40 méter vastag fő széntelep található meg itt. A III. főtelep két fő padra, egy alsóra és egy felsőre osztható, amelyek között agyagos-aleurolitos betelepülés jellemző (Dzsida, 1944). A bazaltvulkanizmus előtti eróziós tevékenység letarolta a Salgótarjáni Barnaköszén Formáció felső, közel 2/3 részét benne az I. és a II. szénteleppel. A Salgóvári Bazalt Formáció anyaga gyakorlatilag befedte a fenti eróziós felszín alatti rétegeket, így a III. széntelepet, ezzel lehetővé a XIX.-XX. században az intenzív kőszénbányászatot (Id. Noszky, 1931). A gyulladáshoz metamorfózissal érintett terület rétegsorában jelenleg nem található meg a fedő bazalt, ugyanakkor nem tudjuk, hogy a Szilvás-kőből elinduló lávafolyás eredetileg el sem érte ezt a részt, vagy elérte, de azóta az lepusztult.

A Rónabánya Gyulladáshoz Metamorf Komplexum (RGMK) sztratigráfiaiilag a Salgótarjáni Barnaköszén Formáció III. főtelepének alsó padja felett helyezkedik el, a felső pad, és az azt fedő üledékek kiégésével keletkezett (Horváth & Vágó, 2023). A vizsgált kőzetek egy meredek, megközelítőleg 30 méter magas völgyfalon érnek felszínre. A komplexum látható kiterjedése horizontálisan 400 méter K-NY-i irányban, vertikálisan 10 méter, mondhatni síkmenti a völgy oldalában. A komplexumban található litológiák – a protolitot jelentő aleurolit, a metaaleurolit, a buchit és a paraláva-kőzetek – a legtöbbször akár 1 méteren belül is megtalálhatók együtt, egy, mind makroszkóposan, mind mikroléptéken heterogén kőzetegyüttest alkotva. Az eredeti üledékes rétegsor, illetve a kiégett-átalakult rétegsor az 2. ábrán látható, amelyen az eredeti üledékes rétegsor szénzsinórkjainak és a kiégett szénzsinóroknak a mérete és elhelyezkedése alapján kijelenthető, hogy a két rétegsor jól korreál egymással. A folyamat és a keletkező kőzetek részletes leírása és nomenklaturája, illetve a részletesebb földtani háttér előző TDK dolgozatomban olvasható (Horváth & Vágó, 2023).



2. ábra: A Szilvaskő táró eredeti üledékes rétegsora és a szelvény mentén felvett kiégett rétegsor rajza.
(Horváth&Vágó, 2023 után módosítva)

3. Műszeres anyagvizsgálati módszerek, módszertan

Módszertan

Jelen dolgozat nagy része (az ICP-OES mérések leszámítva) 1 db kőzet részletes elemzésén alapszik. A minta kiválasztása során figyelembe vettem előző TDK dolgozatomban leírt petrográfiát, mely alapján az 3. ábrán látható paraláva-kőzetre esett a választásom, amely a kémény-struktúrából származik (S1 számú feltárás, Horváth&Vágó, 2023). Ebben a kőzetben 5 különféle ásvány paragenézis található 1 csiszolaton belül, amik a területre jellemző kőzetekben külön-külön is megtalálhatóak. A mintaválasztást a kőzet heterogenitása alapozta meg, mely elősegítheti a folyamat komplexitásának megismerését összefüggéseiben is.

Mintaelőkészítés

A kiválasztott paraláva-kőzetből 2 db 100 µm vékonyságú polírozott csiszolatot készítettem az Ásványtani Tanszék csiszolólaborjában (mintaszámok: RB_03_01, RB_03_02). A kőzetet a megfelelő méretre való vágást követően nedves korund csiszolóporon csiszoltam fel, majd felragasztás után az Ásványtani Tanszék 0.702 Fluidumzárvány laboratóriumában Struers Minitom precíziós vágóval vágtam le. Végezetül megfelelő vastagságúra csiszoltam a mintákat, majd 5-0,5 µm-es gyémánt polírpasztával, illetve 50 nm méretű γ-alumina aquasollal políroztam fel őket.

3.1. Mikroszkópi petrográfia

A petrográfiai leírást az ELTE TTK Ásványtani Tanszékén működő Zeiss Axioplan reflexiós és áteső megvilágítással egyaránt rendelkező, hosszú gyújtótávolságú objektívekkel és 4K Zeiss Axiocam mikroszkópkamerával szerelt polarizációs mikroszkóppal, illetve a Kőzettani Tanszék Litoszféra Kutatócsoport laborjában üzemelő Nikon OptiPhot2 polarizációs mikroszkóppal, valamint az erre szerelt Nikon CoolPix DS-Fi1 kamerával készítettem. A Zeiss Axiocam fotók méretarányos kimentéséhez és képszerkesztéséhez Zeiss ZEN core, a Nikon CoolPix DS-Fi1 fotók szerkesztéséhez NIS Elements AR 2.20 képelemző szoftvereket használtam. Fontosnak tartom kiemelni, hogy mintám átlagos szemcsemérete 10-20 mikron közé esik, így átesőfényes polarizációs mikroszkópi vizsgálatokra szinte alkalmatlannak bizonyult.

3.2. Röntgen pordiffrakció

A minták röntgen pordiffrakciós vizsgálata az ELTE Természettudományi Karának Ásványtani Tanszékén található Siemens D5000 műszeren zajlott, mely θ - θ kiépítésű (Bragg-Brentano) goniométerrel van felszerelve, azaz a mintatartó vízszintesen áll, míg a röntgencső

és a detektor θ és θ szöggel forog egymással szemben. A berendezés réz röntgensóvel működik, melynek K- α értéke 1,5406 Å, a K- β -t pedig másodlagos grafit monokromátor szűri. A műszert Keresztes Mária labortechnikus kezelte. Az eredményeket a mellékletek között található MIII. ábra szemlélteti.

3.3. Raman spektroszkópia

A Raman spektroszkópos vizsgálatokhoz az ELTE TTK KKIC Raman-mikrospektroszkóp laboratóriumában található HORIBA JobinYvon LabRAM HR típusú eszközt vettem igénybe. A berendezés egy diszperzív elven működő, élszűrőket alkalmazó, nagy felbontású konfokális Raman-mikrospektrométer, egy Olympus BXFM mikroszkóppal összekapcsolva, zöld (532 nm), illetve piros (633 nm) lézerrel és Andor iDUS CCD típusú detektorral felszerelve. A mérésekhez 532 nm hullámhosszú forrást használtunk, 1800 vonal/mm optikai ráccsal, 30 s mérési idővel, valamint az egyes ásványfajokra változó 10-100 mW lézerteljesítménnyel a minta károsítását elkerülendő. A műszert Hegedűs Máté Raman-operátor kezelte.

A fázisok azonosítása karakterisztikus Raman sávok alapján történt (a pozíciók meghatározását Gauss-Lorentz görbék illesztésével végeztem), az eredményeket LabSpec v5.41.15 szoftveres környezetben értékeltem ki, Chukanov & Vigasina 2020, illetve a RRUFF online adatbázis segítségével (rruff.info).

3.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

Az ELTE TTK Közettan–Geokémiai Tanszékén működő elektronmikroszkóp laboratóriumában található AMRAY 1830i, EDAX PV9800 típusú, INCA standardmentes energiadiszperzív rendszerrel felszerelt elektronmikroszkópot használtuk a petrográfiai vizsgálatok ásványtani és szöveti, és kőzet összetételi kiegészítéseként. A kőzet lokális általános összetételének méréséhez fókuszálatlan elektronsugárral, 150 μm x 150 μm területről kaptunk információt 0.1% kimutatási határ mellett. A kémiai elemzéseket 20 kV gyorsítófeszültség mellett, 1 nA mintaárammal, 1 μm foltmérettel, 100 másodperces mérési idővel végeztük. A műszert Biró Máté labortechnikus, és jómagam kezeltük.

Az eredményeket a mellékletek között található MI. táblázatban oxidos formában, az MII. táblázatban kiértékelve közlöm.

3.5. Indukált csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES)

A 4 fő kőzetcsoport (aleurolit – protolit, metaaleurolit (cserép), buchit, paraláva-kőzet) 1-1 mintájából a főkomponens analízis a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóság

(SZTFH) Geokémiai Laboratóriumában megtalálható PerkinElmer Avio 200 ICP-OES berendezésen készült el, amelyhez LiBO₂-os feltárást alkalmaztak a labor munkatársai. A minták porításához az Ásványtani Tanszék Csiszoló laboratóriumában lévő automata volfram-karbid törőmozsarat és kézi achát mozsarakat használtam, majd a mintaanyag homogenizációja után mintafelezéses módszerrel a mérésekhez kimértem 20 g-ot minden közettípusból.

Az ICP-OES és SEM-EDS adatok kiértékeléséhez az IMDEX ioGAS-64-Geoscience Analysis System 8.1. szoftvert használtam, a TAS-diagramot Le Bas et al. (1989) alapján készítettem.

A dolgozatban használt rövidítések összefoglaló táblázata:

Rövidítések					
an	anortit	gl	kőzetüveg	px	piroxén
amf	amfibol	hy	hialofán	po	pirrhotin
crb	cristobalit	ilm	ilmenit	qz	kvarc
cor	cordierit	jar	jarosit	SiPO	foszfát-szilikát
ens	ensztatit	kfs	káliföldpát	Ti-mt	titanomagnetit
Fe-ox	vas-oxid	plag	plagioklász	trid	tridimit

4. Petrográfiai leírás

Makroszkópos leírás

Vágott felszínen a kőzet szürke-fekete-sárga sávos, a sávok ívelt lefutásúak, méretük néhány mm-től 1 cm-ig terjed. Szövege afanitos, folyásos (3. ábra). Az üregek méretének eloszlása bimodális: a fekete részeken a nagyobb, max. 0,5 mm átmérőjű, szabálytalan üregek dominálnak, viszont a kisebb ~100 µm nagyságú üregek szétszórtnak az egész kőzetben homogénen jellemzőek. A világos szürke sávban elvétve néhány nagyobb, 0,5 mm átmérőjű üreg található, a kisebb üregek, melyek néhány 100 µm nagyságúak elszórtnak fordulnak elő. A minta polírozott felszínén a folyásos szövet mellett keveredési mintázat, gázkiszökési kürtőre hasonló megszakadt folyásos szövet, valamint ritkábban vörösesbarna vas-oxidos bevonatok és repedéskitöltések is megfigyelhetők. A polírozott felszínen ezek mellett súrló fényben fényesebb, opak szemcsék vehetők észre.



3. ábra: Az RB_03 minta makroszkópos szöveti fotója. A képen látható méretarány egy négyzetének éle 1 cm.

Mikroszkópos és elektronmikroszkópi petrográfia

Az 4. ábrán látható az RB3_2 számú csiszolat átnézeti egy nikolos, áteső fényben készült fotója, amelyen jól megfigyelhető vékonycsiszolati léptékben is a folyásos szövet. A kőzet javarészt hialopilités szövettel jellemezhető, néhol interszertális, valamint slírekben mikroholokristályos szövet is megfigyelhető (5./a ábra). A kőzet összetétele a kőzet egészére nézve egy ásványparagenezissel nem jellemezhető, tekintve, hogy a folyásos-keveredési szövet kémiai és ásványos összetételében is eltérő doméneket jelent. A kőzetben megjelenik változatos összetételű kőzetüveg mátrix (0-30%) mely tartalmazhat anortitos összetételű idiomorf, szivacsos hipidiomorf, vagy szimplektites, bytownitos-labradoritos összetételű (MI./a táblázat) plagioklász kristályokat (20-60%); ensztatitos összetételű (MI./a táblázat, MIII. ábra), gyakran Fe-zónás idiomorf, vagy vázkristályos piroxén táblákat, táblás hipidiomorf-idiomorf cordieritet, tús SiO_2 változatot, valószínűsíthetően cristobalitot (MIII. táblázat), rezorbeálódott relik t kvarcot, pirrhotint, legalább egy még ismeretlen szilikát-foszfát ásványt (MI./b táblázat), piritet és kis mennyiségben akcesszóriaként (<1%) Ti-oxid módosulatokat és cirkont, változatos ásvány paragenezisekben. A következő 5 féle alapvető ásvány paragenezist sikerült elkülönítenem: a cordierit-plagioklász-ilmenit-kőzetüveg; a piroxén-plagioklász-cristobalit-pirrhotin; a vázkristályos plagioklász-cristobalit-relik t kvarc; az idiomorf, táblás, zónás kristályokat tartalmazó plagioklász-pirrhotin-Ti-oxid-kőzetüveg és foszfátos slírekben a cordierit-ilmenit-ensztatit-plagioklász-szilikát-foszfát ásvány.



4. ábra: Az RB_03_02 számú csiszolat áteső fényes átnézeti fotója, 1N.

Piroxén-plagioklász-cristobalit-pirrhotin (px-an-crb-po) paragenézis

Ez a paragenézis kisebb zsebek, slírek formájában fordul elő a kőzetben, szövete mikroholokristályos, vagy nematoblasztos (5./b ábra). A piroxén (ensztatitos, ferroszilites összetételű – MI./a táblázat) és a plagioklász idiomorf-hipidiomorf, ritkán vázkristályos, 20-100 µm-es, táblás-léces megjelenésűek, de javarészt apró kristályokként (<5 µm) a mátrixban is megtalálhatók (5./b ábra). A plagioklász EDS összetétel mérések alapján anortitos, ritkán bytownitos-labradoritos összetételű. A cristobalit radiális, 0,2-0,5 mm-es fészkeket alkotva, 20-50 µm hosszú tűk formájában fordul elő, illetve szorosan összenőve plagioklász (5./e ábra), illetve piroxén kristályokkal (5./b ábra). Az egész paragenézisben jellemző a pirrhotin, ami kerek, 20-40 µm átmérőjű gömbök, formájában fordul elő. Az üregek kitöltése jellemzően jarositos, vas-oxidos.

Vázkristályos plagioklász-cristobalit-relikt kvarc-kőzetüveg (plag-crb-rq-gl) paragenézis

A kőzet legnagyobb részét ez a paragenézis jellemzi, amelyben a kőzetüveg mátrixban vázkristályosan megjelenő, 20-40 µm hosszú plagioklász tűk, 50-250 µm méretű rezorbeálódott, szegélyük felé zónásságot mutató kvarc szemcsék, és kisebb foltokban cristobalit fordulnak elő. Szövete mikroholokristályos. A rezorbeálódott kvarc kristályok szegélyén a kőzetüveg irányába jól megfigyelhető a SEM fotókon egy sötétebb, kőzetüvegből álló keret, mely mintegy 1-5 µm szélességben teljesen körülzárja a koncentrikusan repedezett rezorbeálódott kvarcsempéket (5./c ábra). A koncentrikus repedésrendszer a szemcséken kívül a kőzetüvegben is gyakorta folytatódik, körülveszi a kristályokat, a repedések kitöltése jellemzően vas-oxidos. Erre a paragenézisre is általánosan jellemzőek az 5-20 µm átmérőjű pirrhotin cseppek. A csiszolat egy szűk területére korlátozódva ugyanezen ásványtársulásban a plagioklász helyett tús Ba-földpát, celsián és hialofán is megjelenik (5./d ábra, MI./a táblázat).

Cordierit-plagioklász-ilmenit-kőzetüveg (cor-an-ilm-gl) paragenézis

A cordierit-plagioklász-ilmenit-kőzetüveg paragenézis (5./e ábra) jellemzően két másik paragenézis – a *px-an-crb-po* és a *plag-crb-rq-gl* – közötti határfelület mentén, sávszerűen helyezkedik el. Szövete hialopilitos. A kőzetüveg mátrixban a jellemző ásványfázis a cordierit, ami 2-10 µm méretű hipidiomorf krisztallitok formájában, "szivacs-szerűen" fordul elő a sávokban. Az ilmenit tús kifejlődésű, míg az anortit vázkristályos, táblás-léces kristálycsírákban van jelen. A sávban előforduló üregek kitöltése jarositos, vagy vas-oxidos, a sávon belül nem jelenik meg pirrhotin, semmilyen formában.

Idiomorf, táblás, zónás kristályokat tartalmazó plagioklász-Ti-ox-pirrhotin-kőzetüveg (plag-tio-po-gl) paragenézis

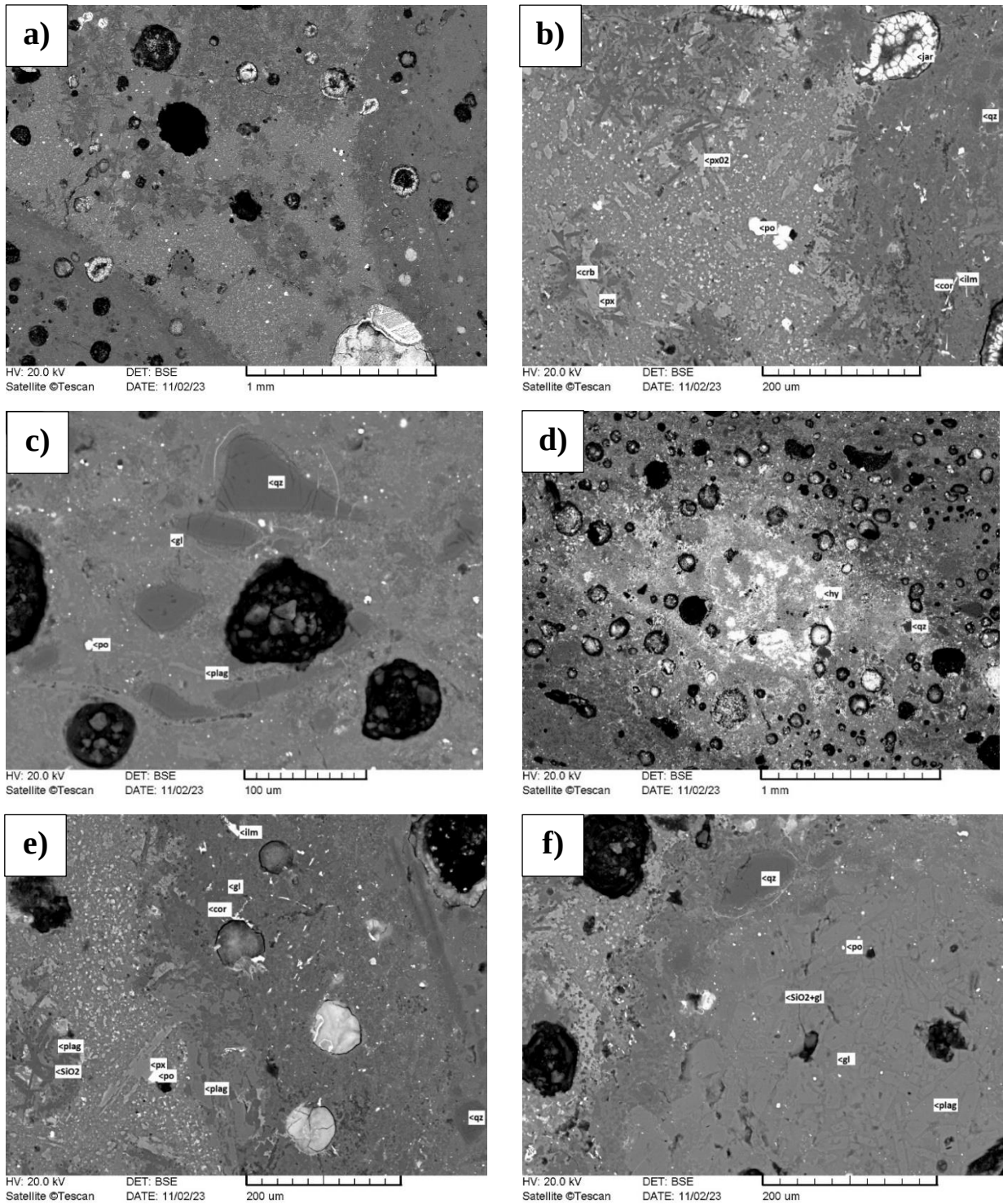
Ezen kőzet rész szövege interszertális. A kőzetüveg mátrixban, idiomorf, 50-100 µm méretű, zónás plagioklász táblák „úsznak” (5./f ábra). Itt is megjelennek az egész kőzetre jellemző pirrhotin cseppek, <5 µm átmérővel, illetve a sokszor kőzetüveggel szimplektites Ti-oxid módosulatok is (5./g ábra). Ilmenit és tiszta TiO₂ mellett, egy különleges sztöchiometriával, (Mg_{0,38-0,55}Fe_{0,37-1,06}Al_{0,06-0,15})(Al_{0,02-0,13}Ti_{1,87-1,92})O₅ összegképlettel jellemezhető ásvány is leírásra került, mely mellékelemként Cr-ot, Ge-ot, Mn-t is tartalmaz (MI. és MII. táblázat). A plagioklász táblák esetében a poliszintetikus ikresedés kizárólag ennél a paragenézisnél figyelhető meg érdemben az egész kőzetben, főként a nagyobb táblák esetében. A kőzet különböző részein eltérő habitussal is megjelenhetnek a plagioklász lécek, egyes csomókban/kumulátumokban, inkább tűs-léces, más csomókban inkább izometrikus, zömök táblás megjelenés tapasztalható. A zömök, izometrikus-táblás megjelenés esetén kőzetüveg zárványfelhők, valamint ritkán atoll-szerű kőzetüveg mag figyelhető meg a plagioklász táblákban, mely összetételében eltér a kristályok közötti kőzetüveg anyagtól (5./f ábra). A kőzetüveg mag egyes táblák esetében akár a kristály majd felét is kiteheti, jellemzően kör keresztmetszetű, mintegy “lyukas” megjelenést ad a tábláknak. A pirrhotin plagioklász zárványaként szinte soha nem jelenik meg, a gömbös megjelenésű szulfid minden esetben a kőzetüveghez kötődik ezen kőzetrészekben (5./f ábra).

Cordierit-cristobalit-plagioklász-ilmenit-ensztatit-szilikát-foszfátásvány (cor-ilm-enz-Si-PO₄) paragenézis

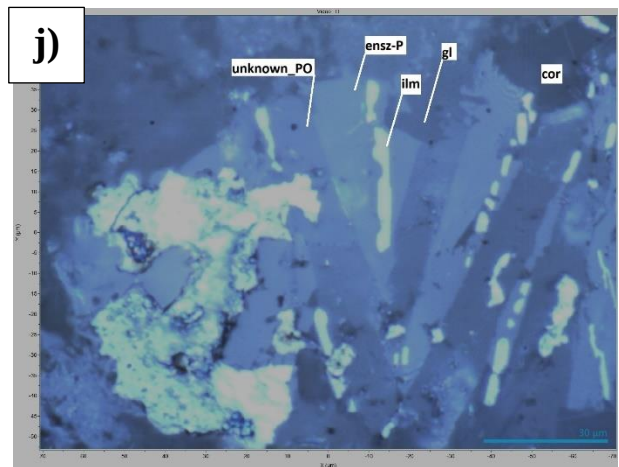
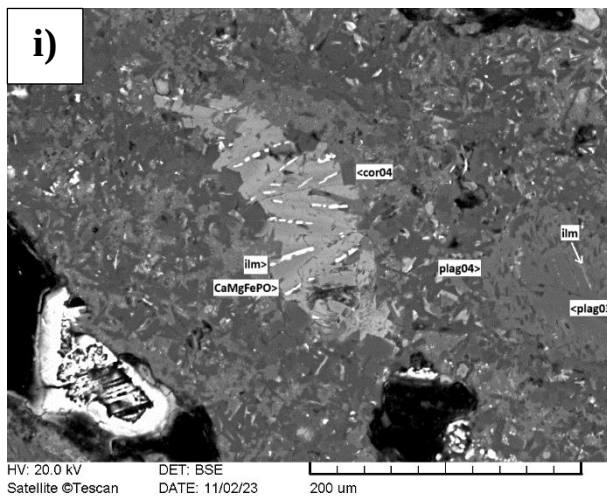
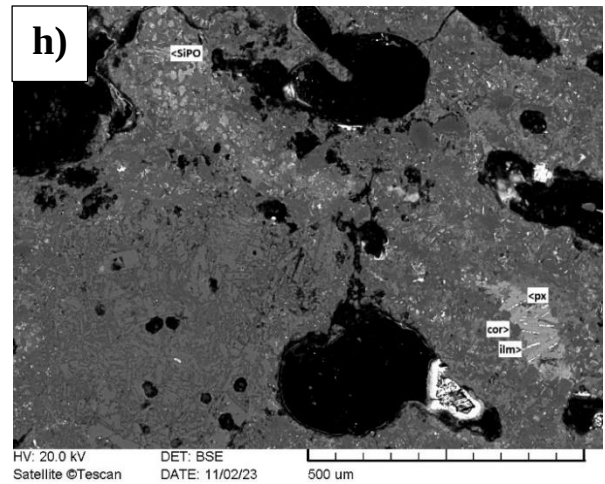
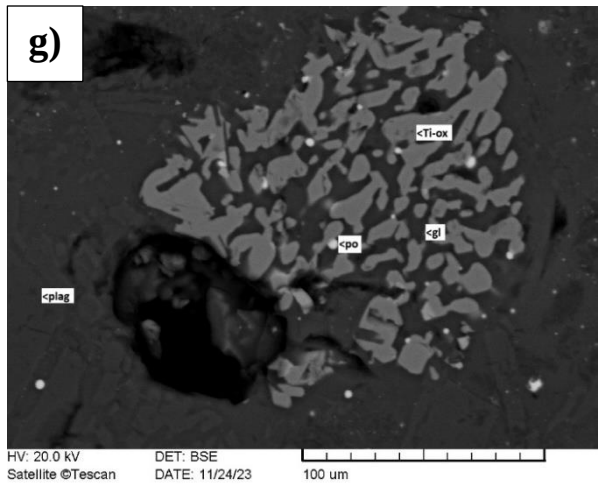
A cordierit-cristobalit-plagioklász-ilmenit-ensztatit-szilikát-foszfát ásvány paragenézis jellemzően sávok mentén, elnyúlt slírekben jelenik meg (5./h ábra). A sávokon belül az 5-30% kőzetüveg mátrixban a cordierit 5-40 µm méretű hidipiomorf-idiomorf, enyhén megnyúlt, néhol látszólag hexagonális táblákként (5./i ábra), a cristobalit 20-50 µm-os tűk formájában van jelen (5./i ábra), változatos mennyiségben. Az ásványtársuláson belül a cordierit és cristobalit leggyakoribb kísérője a 2 különböző megjelenési formával leírható plagioklász, mely lehet ép maggal, szivacsos-vázkristályos szegéllyel rendelkező formában, 50-100 µm mérettel, és 100-150 µm méretű hipidiomorf táblás formában. A slírekben ez a szilikátos paragenetikus egység hialopilit szöveggel jellemezhető. A paragenézisen belül a 30-50 µm méretű hipidiomorf, gyakran Fe-zónás ensztatit kristályok, a tűs ilmenit, és az ismeretlen szilikát-foszfát ásvány egymással szorosabb viszonyt mutat. Itt az ensztatit-ilmenit-szilikát-foszfát ásvány lokálisan mikroholokristályos, vagy nematoblasztos szövetet mutathat, míg máshol az ensztatit-ilmenit-

szilikát-foszfátos ásványtársulás inkább glomeroporfirként értelmezhető hialopilites szövetben. Az ismeretlen Ca-Mg-Fe-Al $\pm$ (Ti, Na, Ba, K, Mn)-szilikát-foszfát ásvány (MI./b és MII./b táblázatok) reflexiós petrográfiával élesen elkülönül a Fe-gazdagodott ensztatit peremektől (5./j ábra), míg SEM-BSE felvételeken a határvonal a két fázis között folytonosnak, nehezen elkülöníthetőnek tűnik (5./i ábra). A szilikát-foszfát ásvány és a változatos vastartalmú ensztatit magánosan egyedi fázisokként, de összenőve is megtalálhatók a slírek teljes kiterjedésében. Megjelenésük minden esetben együtt jár a pirrhotin hiánya mellett az ilmenit túszerű, vagy hipidiomorf vázkristályos megjelenésével.

Paragenezistől függetlenül előfordulhatnak akcesszóriaként változatos Ti-oxid fázisok, valamint cirkon is, üregekben jarosit és Fe-oxid, vagy oxihidroxid fázisok a közet egészében. A Ti-oxid fázisok esetén SEM-BSE kontraszt alapján legalább 3 összetételileg eltérő Ti-, illetve Fe-Ti oxid ásvány különíthető el. A tiszta TiO₂ fázisokon kívül el tudtam különíteni Mn-tartalmú ilmenitet, illetve a már fentebb említett Fe-Mg-(Al, Cr, Ge, Mn)-Ti-oxidot is (MI./c és MII./c táblázatok).



5. ábra: Az RB_03 számú kőzet mintáinak szöveti képei. a) Átnézeti fotó a kőzet különböző egységeiről, b) a $px-an-crb-po$ paragenesis mikroholokristályos szöveti képe, c) a $plag-crb-rq-gl$ paragenesis mikroholokristályos szöveti képe, a rezorbeálódott kvarc kristályokkal, d) a $plag-crb-rq-gl$ paragenesisben található Ba-gazdag kristálycsoport szöveti képe, e) a $cor-an-ilm-gl$ paragenesis hialopilites szöveti képe, f) a $plag-tio-po-gl$ paragenesis interszertális szöveti képe. Az a)-i) ábrák SEM-BSE fotók, a j) ábra ráeső fényes polarizációs mikroszkópi fotó.

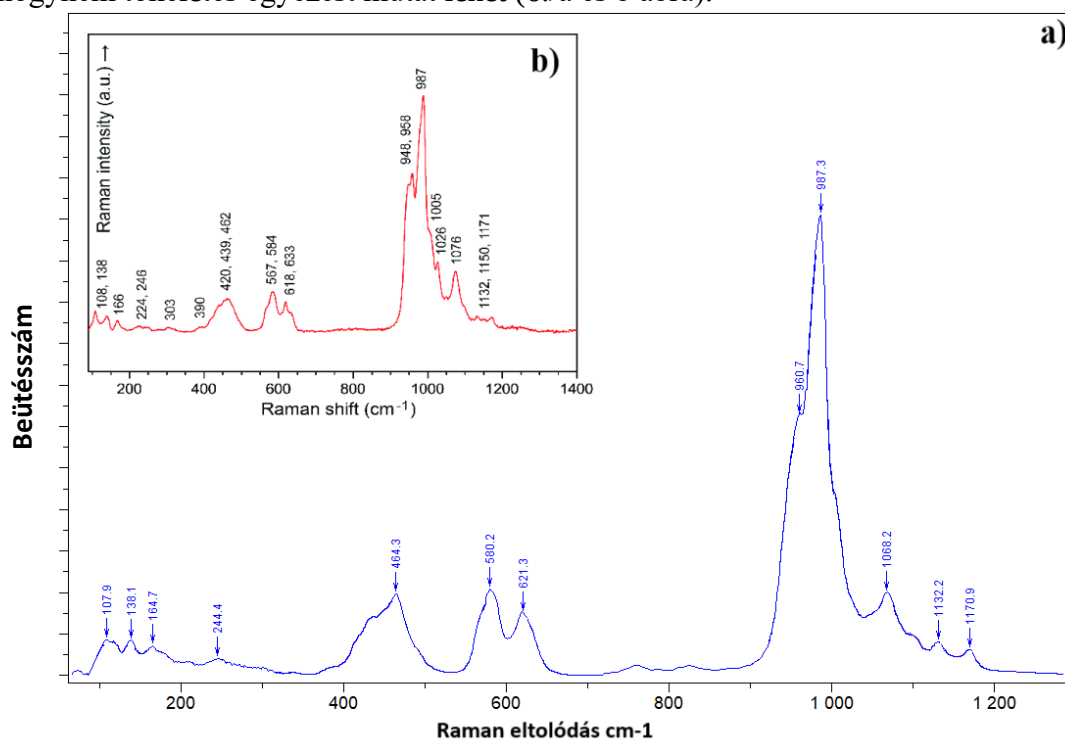


5. ábra folytatása: g) Kőzetüeggel szimplektites Ti-oxid módosulat, h) a cor-ilm-enz-Si-PO₄ paragenézis mikroholokristályos szövete képe, i) a cor-ilm-enz-Si-PO₄ paragenézis mikroholokristályos szövete, a lokálisan az enstatit-ilmenit-szilikát-foszfátos ásványtársulás glomeroporfíros szövetével, j) az enstatit-ilmenit-szilikát-foszfátos ásványtársulás glomeroporfírként. Az a)-i) ábrák SEM-BSE fotók, a j) ábra ráeső fényes polarizációs mikroszkópi fotó, 1N.

5. Raman-spektroszkópia

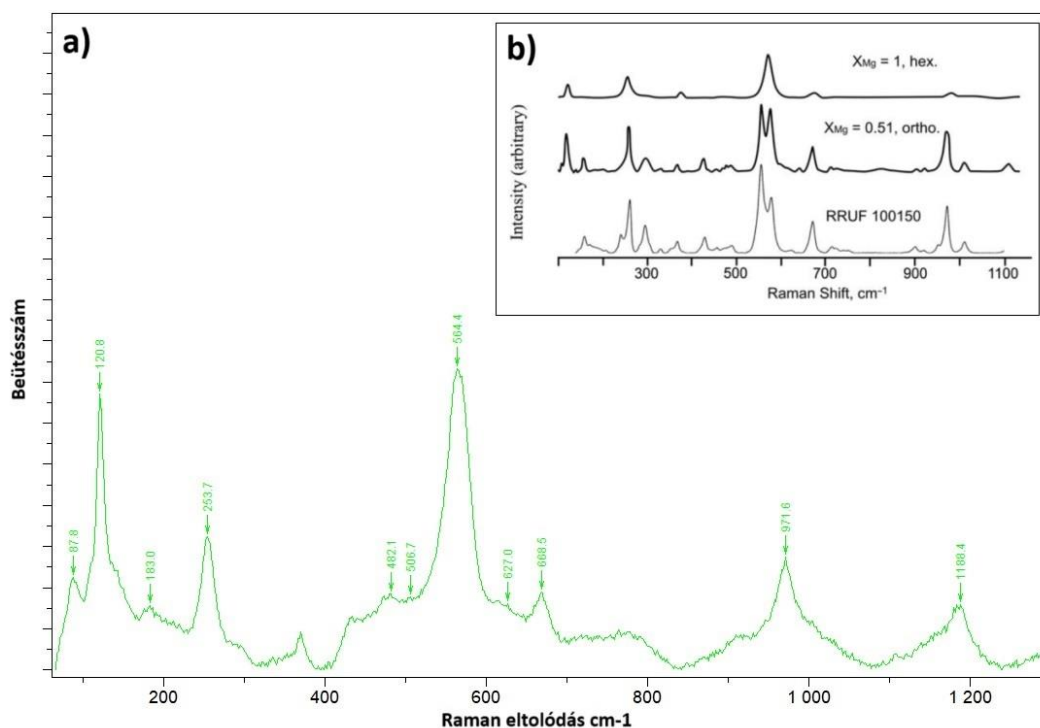
A tájékozódó Raman-spektroszkópos mérések célja a korábban XRD és SEM-EDS módszerek által feltételezett ásványfázisok azonosítása, megerősítése, illetve a különböző Ti-oxid és SiO₂ polimorf módosulatok elkülönítése volt. Az azonosított ásványokat és legkarakteresebb Raman-szórési sávjaikat reciprokcentiméterben a következő formában közlöm: *ásvány (x, y, z legjellemzőbb Raman-szórési sáv)*. A mintában azonosításra került cordierit (1188 cm⁻¹, 971 cm⁻¹, 668 cm⁻¹), ensztatit-ferroszilit összetételű piroxén (996 cm⁻¹, 673 cm⁻¹, 506 cm⁻¹), és plagioklász (559 cm⁻¹, 505 cm⁻¹, 487 cm⁻¹) is. A SiO₂ polimorf módosulatok közül cristobalit (1074 cm⁻¹, 779 cm⁻¹, 416 cm⁻¹, 229 cm⁻¹) is elkülönítésre került azonban doménszerűen a tridimit (785 cm⁻¹, 403 cm⁻¹, 289 cm⁻¹), jelenléte a mért kristályokban nem kizárható. A Ti-oxid ásványok közül rutil (611 cm⁻¹, 441 cm⁻¹, 246 cm⁻¹, 142 cm⁻¹) és ilmenit (604 cm⁻¹, 338 cm⁻¹, 228 cm⁻¹) is bizonyosan található a kőzetben. A mérések során felmerült a gyanú a Raman-szórési sávok alapján, hogy a pseudobrookit ásványcsoportba tartozó armalcolit (780 cm⁻¹, 644 cm⁻¹, 208 cm⁻¹, 168 cm⁻¹) is jelen van a mintában (MII. árba).

A SEM-EDS mérések során felmerült egy ismeretlen szilikát-foszfát ásvány jelenléte is a kőzetben, ami az előzetes Raman-spektroszkópos eredmények alapján a stanfieldit (1170 cm⁻¹, 1132 cm⁻¹, 1068 cm⁻¹, 987 cm⁻¹, 960 cm⁻¹, 621 cm⁻¹, 580 cm⁻¹, 464 cm⁻¹) ásvánnyal majdhogynem tökéletes egyezést mutat lehet (6./a és b ábra).



6. ábra: a) Az RB_03 mintában vizsgált ismeretlen szilikát-foszfát ásvány Raman-spektruma, b) a stanfieldit ásvány Raman-spektruma (Britvin et al., 2020).

A *cor-ilm-ensz-Si-PO₄* paragenézisben található hexagonális átmetszettel rendelkező cordierit kristályok Raman-spektrumán a karakterisztikus 2 szórási sáv (557 cm⁻¹, 578 cm⁻¹) helyett csak 1 volt jelen, 500-600 cm⁻¹ között, 564 cm⁻¹-nél (7./a és b ábra). Ez a szórási sáv tipikusan a cordierit magas hőmérsékletet jelző, hexagonális polimorf párjára, az indialitra jellemző (Haefeker et al., 2012).



7. ábra: a) Az RB_03 mintában vizsgált indialit Raman-spektruma, b) a szintetikus (Mg,Fe)₂Al₄Si₅O₁₈ hexagonális és rombos Raman-spektruma (Haefeker et al., 2012) és a RRUFF adatbázisból a Cordierit 100150 azonosítóval ellátott ásvány Raman-spektruma (Peretyazhko et al., 2017).

6. Teljeskörzet geokémiai elemzések

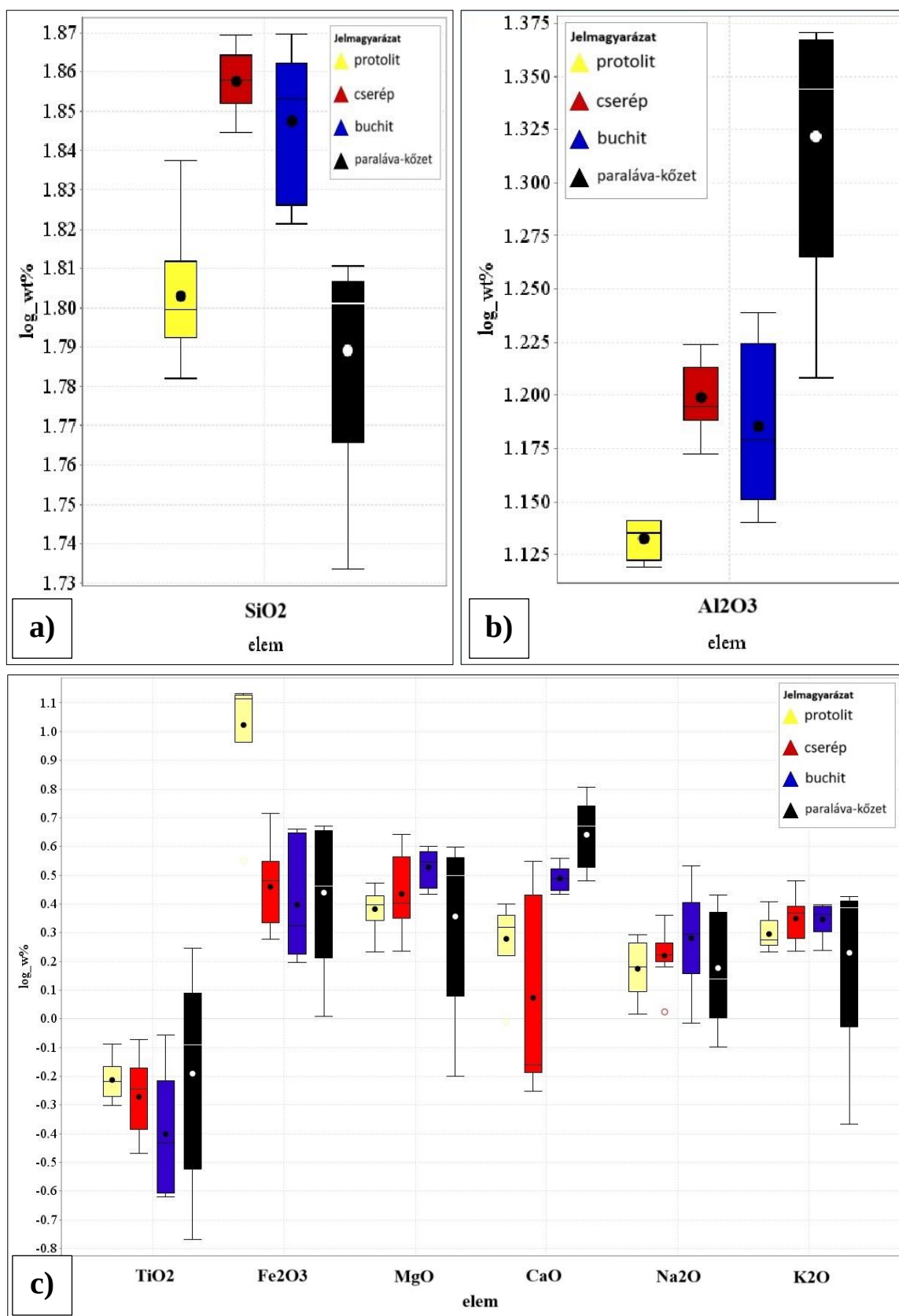
mintaszám/wt%	típus	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	BaO	SrO	CO ₂	+H ₂ O	-H ₂ O
PR02	protolit	68,8	0,818	13,2	3,55	0,024	0,979	1,71	1,32	2,55	<0,25	n.d.	0,045	0,0095	0,63	4,12	2,16
CS03	cserép	69,9	0,845	15,5	5,18	0,023	0,684	1,72	1,06	3,03	<0,25	n.d.	0,050	0,0103	<0,3	1,23	0,26
PL02	paraláva	66,3	0,878	17,3	4,42	0,034	3,62	2,89	0,964	2,47	<0,25	n.d.	0,068	0,0230	n.d.	0,65	0,14
RB03	paraláva	64,6	0,813	16,1	4,69	0,048	3,03	2,28	0,795	2,47	<0,25	2,28	0,074	0,0217	<0,3	1,89	0,42

1. táblázat: Az ICP-OES mérések eredményei táblázatba foglalva.

A 4 fő közetcsoporthoz – aleurolit – protolit, metaaleurolit (cserép), buchit, és paraláva-közet – főkomponens analízise a következő eredményeket hozta (1. táblázat).

Az ICP-OES teljeskörzet mérések esetében a következő megfigyeléseket tehetjük: A protolit – szenes aleurolit (PR02) a kiindulási összetétel, melyhez képest a metaaleurolit (cserép) esetén a következő változásokat tapasztalhatjuk: A teljeskörzet SiO₂ tartalmában érdemi változás nincs, csupán csekély növekedés tapasztalható az Al, Fe és K tartalom növekedése mellett. Ezen felül több-kevesebb csökkenés tapasztalható a Ca és Na elemekben, valamint a CO₂ teljesen eltűnik a kőzetből az átalakulás során. Az RB03 mintaszámú, korábban buchitnak gondolt paraláva-közetmintában a protolithoz képest az Al, Fe, és Ca tartalom nő, viszont a K és Na elemekben még a cseréphez képest is csökkenés tapasztalható. A protolithoz képes Ba tartalma 1,5x-esére, Mn tartalma 2x-esére nőtt. A mintában a többihez képest kiugróan nagy mennyiségű (2,28 wt%) kén is kimutatásra került, amely egyik másik kőzetmintában sem fordult elő. A PL02 számú, felhabzott, üregekkel teli paraláva-közet SiO₂ a protolithnál szegényebb, míg Al, Ca és Mg tartalma a legmagasabb a minták közül. Na és K tartalmában csökkenés tapasztalható a protolithoz képest. A Sr mennyisége a protolithoz képes 2,5x-esére nőtt. Az adatok alapján elmondható, hogy a Ti koncentrációja minden kőzetmintában szinte azonos, nem tapasztalható változás.

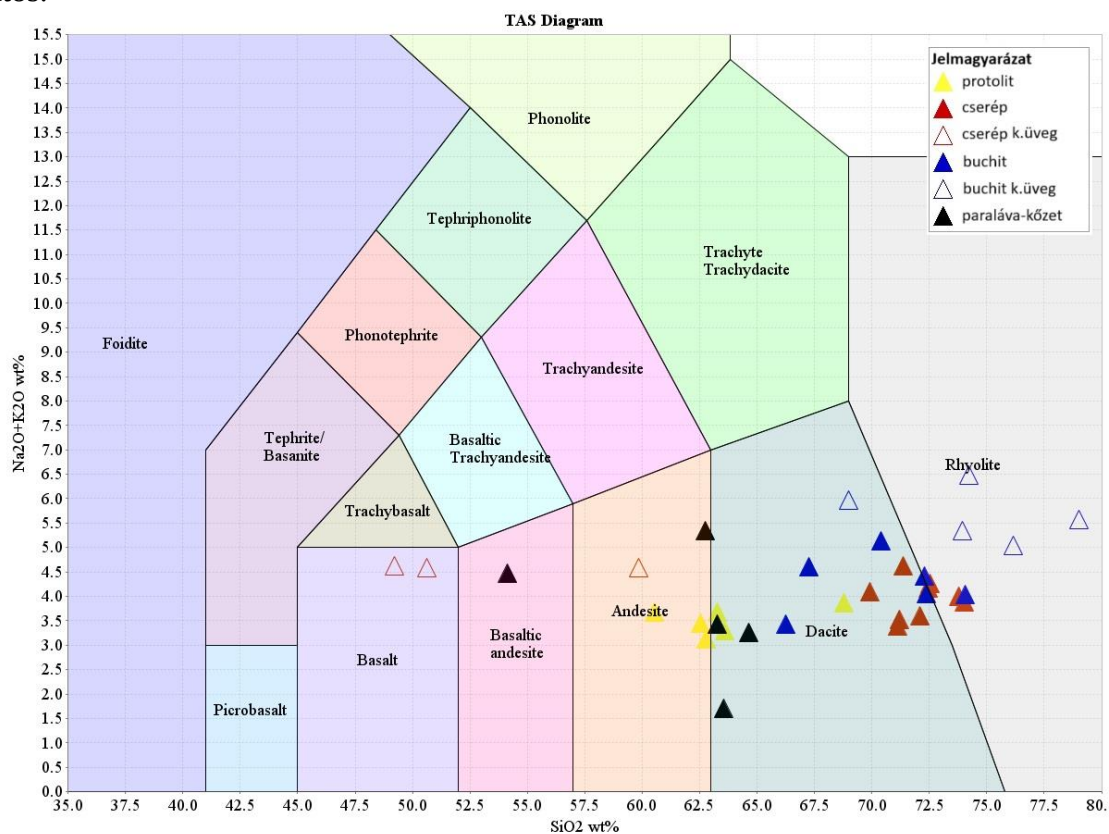
A kőzetek lokális általános összetételének mérésére SEM-EDS vizsgálatokat végeztem, amelyek kiegészítésül szolgálnak az ICP-OES adatokhoz (8./a, b és c ábrák). Az adatokat előző TDK munkámból (Horváth & Vágó, 2023) használtam fel, és a MI. és MII. táblázatban található adatokkal egészítettem ki. Az ICP-OES adatokkal összehasonlítva a SEM-EDS mérések során a protolit vas-tartalmában szignifikáns különbség észlelhető (8./c ábra), ami feltehetőleg módszertani, mintázási hibán alapszik, miszerint a beágyazott, porlós protolit mintán nem tudtam kialakítani olyan síkfelületet, mint bármely másik masszívabb mintámon, így a vas-oxidos cement túltreprezentált a mérésekben. Előző TDK munkámban hasonló problémába ütköztünk az XRF méréseknél a porított kőzetek mérése során, ahol a vas-oxidos cement fázis a szemcsék felszínén anomálishan magasnak látszó Fe-tartalmat okozott (Horváth & Vágó, 2023).



8. ábra: Az ICP-OES és SEM-EDS adatok dobozdiagramjai: a) a kőzettípusok SiO_2 tartalma, b) a kőzettípusok Al_2O_3 tartalma, c) a kőzettípusok további főelem tartalma.

Az 8./c ábrán is hasonló megfigyelés tehető, mint az ICP-OES méréseknél: a Na és K tartalomban szignifikáns változás nem követhető le, míg a Ca tartalom esetében csökkenés látható a protolithoz képest a cserepekben, majd nő a paraláva-kőzet felé. A Ti adatok noha az ICP-OES alapján nem mutatnak érdemi eltérést, mégis egy csökkenő tendencia figyelhető meg a dobozdiagramokon, így a protolithtól a buchit felé haladva a Ti mennyisége a kőzetben látszólag csökken, míg a felhabzott paraláva kőzetben magas, azonban igen széles tartományban szór. Ellenkező irányú trend állapítható meg a Mg esetén, mely a protolithtól a buchit felé haladva csekély mértékben fokozatosan nő, és a paraláva kőzetben ismételen széles tartományban szór. Megfigyelhető a diagramokról az is, hogy a paraláva-kőzet adatai szórnak a legnagyobb mértékben a legtöbb elemre vonatkoztatva.

Az 9. ábrán látható a kőzetek ugyanezen adatok alapján elkészített vulkáni TAS-diagramja. Megfigyelhető a diagramon, hogy a protolit kiindulási összetétele alapján az andezites-dácitos mezőbe esik, a cserepek dácitos-riolitos, a buchitok túlnyomórészt dácitos, a paraláva-kőzetek pedig bazaltos-andezites-dácitos összetétellel jellemezhetőek alkáliák terén. A diagramon feltüntettem a cserép, illetve buchit mintákból mért kőzetüveg összetételeket is. A cserépben található kőzetüveg összetétele bazaltos-andezites, míg a buchitban lévő jellemzően inkább riolitos.



9. árba: Az RGMK üledékes és metamorf kőzeteinek összetétele TAS-diagramon (Le Bas et al. 1989).

7. Értelmezés

A jelen dolgozatomban vizsgált kőzet a Rónabánya Gyulladásos Metamorf Komplexum kémény-struktúrájából származik, amely általánosan a gyulladásos metamorf komplexumokra nézve a legmagasabb hőmérsékletű egység (Bentor et al., 1981; Cosca et al., 1989). Itt a kőzetek átalakulásáért a repedésrendszeren feláramló, köszén égéséből származó forró (~1000 °C) redukív gázok és gőzök felelősek. Felszíni nyomáskörülmények között, rövid felfűtés során a hőmérséklet gyorsan átlépi az egyensúlyi olvadás és egyensúlyi ásványképződés feltételeit, így a folyamatot metastabil olvadás és gyors ásványos reakciók jellemzik (Grapes, 2011). Végeredményben létrejöhetnek olyan ásványok is, amelyek atmoszférikus körülmények között metastabil állapotúak, ezzel különleges ásványparageneziseket létrehozva.

Hőmérséklet

A kőzet masszív, sok, változatos méretű üreget tartalmazó paraláva-kőzet. Az üregek létrejöttét a kigázosodás okozta, ami általában 900 °C környékén kezdődik meg, és 1200 °C-on történik meg az olvadt kőzet felhabzása, keveredése (Grapes, 2011). A vizsgált kőzetpéldányban megjelenő 5 féle paragenezis keveredési, folyásos szövetet mutat.

A plagioklász mind a *cor-ilm-ensz-Si-PO₄*, mind a *plag-tio-po-gl* paragenezisben gyulladásos metamorf kőzetekre jellemző „ujjlenyomat” szerű, szimplektites szövettel, illetve kőzetüveget atoll-szerűen körbenőve is megtalálható. Az ujjlenyomat-szerű szövet a protolit kőzet eredeti földpát ásványainak visszaolvadásából képződik, amely visszaolvadás 820-880 °C környékén kezdődik meg (Grapes, 2011). A folyamat során az eredeti plagioklász köré egy új, kalciumban gazdagabb fázis kristályosodik ki (5./i ábra, plag03 és plag04 mérései – MI. és MII. táblázat), kőzetüveggel szoros összenövésben. A plagioklász cristobalittal, illetve ensztatitos összetételű piroxénnel összenőve megtalálható a *px-an-crb-po* paragenezisben, és a *cor-an-ilm-gl* paragenezis határán cordierittel is. A piroxén-plagioklász-cordierit társulásra Shu et al. (2015) alapján 1250 °C körüli hőmérséklet becsülhető, míg a plagioklász-cristobalit társulásra 1200-1225 °C (Taskiran et al., 2005).

A *cor-ilm-ensz-Si-PO₄* paragenezisben a cordierit egy magas hőmérsékleten képződő hexagonális polimorf párját, az indialitot is sikerült azonosítani a Raman-spektroszkópia és SEM-EDS segítségével. Az indialit 1100-1300 °C között jellemző ásványfázis, mely hexagonális mivoltát a gyors hűlés miatt őrizhette meg (Haefeker et al., 2012).

A cristobalit képződése, és alaki megjelenése a kőzetben sok kérdést felvet: atmoszférikus nyomáskörülmények között stabilitási tartománya 1470-1705 °C között van, de akár már 1000 °C alatti hőmérsékleten kőzetüvegből is keletkezhet metastabilan (Gupta & Jean, 1994; Pagliari et al., 2013). Alaki megjelenése sok esetben fészkes, sugaras (5./a ábra), mintha az eredeti üledékes kvarc szemcsék helyén keletkezett volna, így felmerült a kérdés, hogy átkristályosodással, vagy olvadékból való kristályosodással keletkezett-e. Az olvadékból való kristályosodás ellen a sugaras cristobalit-ensztatit-plagioklász csomók mikroholokristályos - lokálisan teljesen kőzetüveg-mentes - szövete szólhat, míg mellette az, hogy ugyanezen ásványtársulás a fészkek körül 10-30% kőzetüvegben, interszertális-hialopilitis szöveggel figyelhető meg.

A *cor-ilm-ensz-Si-PO₄* paragenézisben található ismeretlen szilikát-foszfát ásvány SEM-EDS (MI./b és MII./b táblázat) és Raman-spektroszkópos (6./h és i ábra) adataiból levonható a következtetés, hogy az ismeretlen ásvány stanfieldit, mely Magyarországról eddig nem került leírásra. A stanfieldit egy vízmentes foszfát, $\text{Ca}_4(\text{Mg})_5(\text{PO}_4)_6$ - $\text{Ca}_7\text{Mg}_2\text{Mg}_9(\text{PO}_4)_{12}$ összegképlettel (Britvin et al, 2020), ami eddig csak kő-vas (pallazit) típusú meteoritokból (Fuchs, 1967) és egy tiroli rituális áldozati helyen parciálisan megolvadt kvarcfillitből (Schneider et al., 2013; Tropper et al., 2004) került leírásra. A tiroli esetben a foszfor forrása Tropper et al. (2004) szerint állati csontok, míg Schneider et al. (2013) szerint a kvarcfillitben található akcesszórius apatit lehetnek. Az RGMK-ban észlelt stanfieldit esetén a foszfor forrása lehetne az aleurolitban található nagyon kis mennyiségben jelen lévő akcesszórius apatit, de a foszfátos közet rész slíres-sávós megjelenése és a benne lévő foszfor mennyisége arra enged következtetni, hogy a szenes aleurolitban (protolitban) lévő szén, vagy akár az égő szén maga is lehet a foszfor forrása.

A kőzetben található Ti-oxid módosulatok közül sikerült azonosítanom rutilt, ilmenitet és a pszeudobrookit ásványcsoportba tartalmazó armalcolitot is (MI./a-d ábra). Az armalcolit $(\text{Fe,Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ általános képlettel jellemezhető (Anderson et al., 1970), alapvetően redukált holdközetekre jellemző ásvány – nevében az első Holdra szálló űrhajósok nevét őrzi. Földi körülmények között ultra magas hőmérsékleten keletkezett gránát-szillimanit gneiszből (Kawasaki et al., 2013), és buchit xenolitból (del Moro et al., 2011; Pedersen, 1979), illetve harzburgitis xenolitból (Grégoire et al., 2000) került leírásra. Az armalcolit kiváló oxigén fugacitás jelző: atmoszférikus nyomáson 1200 °C-on $10^{-9,5}$ - $10^{-10,5}$ $f\text{O}_2$ értékek között stabil, amelyet Friel et al. (1977) kísérletezett ki laborkörülmények között. Esetünkben az armalcolit változatosan rutillal, és ilmenittel összenövésben található meg (MI./a ábra). Ez az

ásványtársulás 1000-1100 °C körüli hőmérsékleten és a WM-IW-QIF pufferek közötti fO_2 értéken jellemző, ami redukzív környezetre utal (Friel et al., 1977). Fontos kiemelni, hogy noha a mért ásvány megfigyelt Raman-szórási sávjainak nagy része átfed az armalcolittal (MII. ábra), az ásvány oxidatív légkörben való reakciója a korábban, Ti-oxid fázisok azonosításához használt lézer teljesítményének hatására befolyásolhatja a mérés kimenetelét, és eltolódásokat okozhat a Raman-szórási sávokban.

Összetétel

Az ICP-OES adatok alapján szignifikáns változás a kőzetek összetételében nem látható, hiszen mindegyik ugyanabból a homogénnek tekinthető protolitból képződött, és ez nem is elvárt a gyulladáshoz metamorf komplexumokra jellemző kőzetektől. Geller et al. (2012) bebizonyította, hogy feltárás és komplexum léptékben a kőzetek átalakulása egy zárt rendszerben, izokémikus folyamatok során megy végbe, és az olyan folyamatok, mint például a frakcionáció, sokkalta kisebb – centiméteres, milliméteres – léptékben, egy már nyílt rendszerben nyer értelmet. A kutatásomban ez a vizsgált buchit és paraláva-kőzetek SEM-EDS eredményeinek a szórásán látható (8. ábra), illetve a TAS-diagramon (9. ábra) például a paraláva- kőzetek bazaltos-andezites, andezites és dácitos összetételi szórásán tapasztalható.

A teljeskörű geokémiai vizsgálatok alapján elmondható, hogy a protolithoz képest a CO_2 veszteséssel párhuzamosan enyhén nő a Mg és Ca aránya a paraláva-kőzetekben. A Mg és Ca forrása a protolitban megtalálható gipsz és/vagy dolomit lehetnek (Horváth & Vágó, 2023). A Ca és Mg a cserépben ismert módon a piroxénben, a buchit-paraláva-kőzet kifejlődések esetén oxid, foszfát és szilikát fázisokban dúsulhatnak. Szállításuk a forró gázokban komplexek formájában, vagy a változatos mennyiségű parciális olvadék mozgásával történik (Clark & Peacor, 1992). A protolitban jelenlévő, kis mennyiségű, vélhetőleg baritból származó Ba a paraláva-kőzetben már hialofán-celsián – Ba-földpát – formában, lokálisan, a *plag-crb-rq-gl* paragenézisben található meg. A bárium mobilizálásért feltehetőleg a termokémiai szulfát redukció folyamata felelős, amely során a magas hőmérsékletekig stabil maradó barit kén tartalma szulfiddá redukálódik, 1100-1200 °C között elemi szén jelenléte mellett (Balintova et al., 2017; Kresse et al., 2007), majd további reakciók során felszabadul a bárium és Ba-szilikátot (Kresse et al., 2007), esetünkben hialofánt-celsiánt képez.

A kőzetben szinte minden ásványparagenézisre jellemző fázis a pirrotin, amelynek eredetére több magyarázat is szolgálhat. A termokémiai szulfát redukcióval létrejövő szulfid által olvadékban megkötve választ adhat a kérdésre, de a köszénben, és a protolitban is

kőzetalkotóként jelenlévő gipsz, jarosit vagy terméskén és a vas-oxidos cement fázis reakciója során magas hőmérsékleten (Ding et al., 2010) is létrejöhet. Forrása lehet még a kőszénben lévő pirit, ami 530-620 °C között pirrhotinná válik a kőzet felfűtése közben, majd 950 °C-on szulfid olvadék képződik belőle (Grapes, 2011), amely alacsony fO_2 és magas fS_2 körülmények között fennmaradt. A mért, nem átalakult pirrhotin $Fe_{0,999}S$ képlettel jellemezhető (MI./a és MII./a táblázat), mely 1000 °C fölötti hőmérséklet esetén $<-5 \log fS_2$ és $<-10 \log fO_2$ értékekkel jellemezhető (Lorand et al., 2018). A szintén teljes kőzetre jellemző armalcolittal és ilmenittel pontosabb oxigén-, és kénfugacitás is meghatározható lesz további méréseket követően.

Következtetés

A Rónabánya Gyulladásos Metamorf Komplexum kémény-struktúrájából, az kiégett kőszéntelep közeléből, vagy közvetlenül belőle származó kőzetminta diverz ásványparagenezisei alapján a keletkezési hőmérséklete 1200 °C körül tetőzhetett. Az 5 féle paragenetikus egység között, milliméter-mikrométeres tartományon belül nem feltételezhető nagy hőmérsékletkülönbség, így a paragenézisek szöveti és ásványos összetételbeli különbségeire máshol keresendő a válasz. A kialakuló kőzet heterogenitásához hozzájárulhat a protolit kis léptéken való heterogenitása, a szén égéséből felszabaduló redukzív gázok miatti oxigén-, és kénfugacitás változása, a gázokban szállított komplexek hozzáadódása, és a gázok, illetve az olvadék áramlása miatti keveredés is. A teljeskőzet-geokémiai elemzések eredménye, hogy míg feltárás léptékben a lezajló folyamatok izokémikusnak látszanak, addig mikroléptéken nagy összetételbeli változások tapasztalhatók, éppen az előbb említett folyamatok okán.

A paraláva-kőzet mintán végzett vizsgálatok során nem csupán behatóbban megismerhettük az RGMK kőzeteinek képződési körülményeit a vélhetőleg legmagasabb hőmérsékletű zónából, azonban három új ásványt is felfedeztünk a paragenézisben, melyek némelyike nem csupán Magyarországról volt eddig ismeretlen, azonban földi anyagokban is ritkán jelenik meg. Az armalcolit, a stanfieldit és az indialit észlelése így nem csupán a metamorf komplexum képződési körülményeinek képződéséről alkotott képünket, hanem a hazai rendszeres ásványtani ismereteinket is gyarapítja.

További kutatási lehetőségek

További kutatási terveim közé tartozik az új ásványfázisok alaposabb Raman-spektroszkópos és mikroszondás vizsgálata, illetve az ebben a dolgozatban azonosításra nem került foszfát-szilikát ásványok részletesebb vizsgálata, például mikro-XRD segítségével.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Máténak, a végtelen kíváncsiságáért, a rengeteg jó tanácsáért, és nem utolsó sorban szakmai igényességéért és hozzáértéséért. Köszönöm Weiszburg Tamásnak, és Prakfalvi Péternek a szakmai hozzájárulásukat, az ELTE TTK Ásványtani Tanszék összes kollégájának a türelmét, szakmai hozzájárulását, valamint Guzmics Tibornak, és a technikus, operátor kollégáknak a műszeres anyagvizsgálatokhoz szükséges háttér megteremtését.

Jelen munka a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által finanszírozott szakmai támogatásával, illetve a MOL Új Európa Alapítvány Tehetségtámogató Program támogatásával készült. Köszönöm a támogatást!

Felhasznált irodalom

- Anderson, A. T., Bunch, T. E., Cameron, E. N., Haggerty, S. E., Boyd, F. R., Finger, L. W., James, O. B., Keil, K., Prinz, M., Ramdohr, P., & Goresy, A. El. (1970). Armalcolite: A new mineral from the Apollo 11 samples. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*, 1, 55–63.
- Babinszki, E., Piros, O., Csillag, G., Fodor, L., Gyalog, L., Kercksmár, Zs., Less, Gy., Lukács, R., Sebe, K., Selmeczi, I., Szepesi, J., Sztanó, O. (2023): Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása II. Kainozoos képződmények. – Kiadja az SZTFH és az MTA Földtani Tudományos Bizottság Rétegtani Albizottsága 179 p.
- Balintova, M., Demcak, S., Estokova, A., Holub, M., & Pavlikova, P. (2017). Study of thermal reduction of barium sulphate for barium sulphide preparation. *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*.
<https://doi.org/10.3846/enviro.2017.004>
- Bentor, Y. K., Kastner, M., Perlman, I., & Yellin, Y. (1981). *Combustion metamorphism of bituminous sediments and the formation of melts of granitic and sedimentary composition*.
- Britvin, S. N., Krzhizhanovskaya, M. G., Bocharov, V. N., & Obolonskaya, E. V. (2020). Crystal chemistry of stanfieldite, $\text{Ca}_7\text{M}_2\text{Mg}_9(\text{PO}_4)_{12}$ ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}$), a structural base of $\text{Ca}_3\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_4$ phosphors. *Crystals*, 10(6), 1–14.
<https://doi.org/10.3390/cryst10060464>
- Chukanov, N., & Vigasina, M. (2020). *Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds*. Springer Nature Switzerland AG 2020.
<http://www.springer.com/series/13488>
- Clark, B. H., & Peacor, D. R. (1992). Contributions to Mineralogy and Petrology
Pyrometamorphism and partial melting of shales during combustion metamorphism: mineralogical, textural, and chemical effects*. In *Contrib Mineral Petrol* (Vol. 112).
- Cosca, A. M., Essene, E. J., Geissman, J. W., Simmons, W. B., & Coates, D. A. (1989). Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River Basin, Wyoming*. In *American Mineralogist* (Vol. 74).
- del Moro, S., Renzulli, A., & Tribaudino, M. (2011). Pyrometamorphic processes at the magma-hydrothermal system interface of active volcanoes: Evidence from buchite ejecta of Stromboli (Aeolian Islands, Italy). *Journal of Petrology*, 52(3), 541–564.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egq090>
- Ding, K., Li, S., & Yue, C. (2010). Investigation of two kinds of thermochemical sulfate reduction systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 32(12), 1130–1141. <https://doi.org/10.1080/15567030802654046>
- Dzsida, J. (1944). *A Salgótarjáni Kőszénbánya Rt. nógrádi szénbányászatának története 1868-1943-ig*. A Salgótarjáni Kőszénbánya Rt. Igazgatósága.
- Friel, J. J., Harker, I., & Ulmer, G. C. (1977). *Armalcolite stability as a function pressure and oxygen fugacity* (Vol. 41). Pergamon Press.

- Fuchs, L. H. (1967). Stanfieldite: A new phosphate mineral from stony-iron meteorites. *Science*, 158(3803), 910–911.
- Geller, Y. I., Burg, A., Halicz, L., & Kolodny, Y. (2012). System closure during the combustion metamorphic “Mottled Zone” event, Israel. *Chemical Geology*, 334, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.029>
- Grapes, R. (2011). *Pyrometamorphism*. 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg **2011**, 377 p.
- Grégoire, M., Lorand, J. P., O’reilly, S. Y., & Cottin, J. Y. (2000). *Armalcolite-bearing, Ti-rich metasomatic assemblages in harzburgitic xenoliths from the Kerguelen Islands: Implications for the oceanic mantle budget of high-field strength elements*.
- Gross, S. (1977). The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel. *Geol. Surv. Israel, Bull.*, 70, 1–80.
- Gupta, T. K., & Jean, J.-H. (1994). Origin of cristobalite formation during sintering of a binary mixture of borosilicate glass and high silica glass. *Journal of Materials Research*, 9(4), 999–1005. <http://journals.cambridge.org>
- Haefeker, U., Kaindl, R., & Tropper, P. (2012). Semi-quantitative determination of the Fe/Mg ratio in synthetic cordierite using Raman spectroscopy. *American Mineralogist*, 97(10), 1662–1669. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4189>
- Horváth, L., & Vágó, S. (2023). *Gyulladásos metamorf kőzetek vizsgálata a Salgótarjáni-medence Rónabányán kibukkanó miocén rétegsorában* [kézirat, Országos Tudományos Diákköri dolgozat bemutatva a 36. OTDK-n]. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Ásványtani Tanszék.
- Ifj. Noszky, J. (1931). *Salgótarján és barnakőszén-bányászata, különös tekintettel a néprajzi viszonyokra*.
- Kawasaki, T., Adachi, T., Nakano, N., & Osanai, Y. (2013). Possible armalcolite pseudomorph-bearing garnet-sillimanite gneiss from Skallevikshalsen, Lützow-Holm Complex, East Antarctica: Implications for ultrahigh-temperature metamorphism. *Geological Society Special Publication*, 383(1), 135–167. <https://doi.org/10.1144/SP383.2>
- Kresse, R., Baudis, U., Jäger, P., Riechers, H. H., Wagner, H., Winkler, H., & Wolf, H. U. (2007). Barium and barium compounds. *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 3, 351–375.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., & Zanettin, B. (1989). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3). <http://petrology.oxfordjournals.org/>
- Lorand, J. P., Pont, S., Chevrier, V., Luguet, A., Zanda, B., & Hewins, R. (2018). Petrogenesis of martian sulfides in the Chassigny meteorite. *American Mineralogist*, 103(6), 872–885. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6334>
- Nawrocki, J., Ciesielczuk, J., Jura, D., Fabiańska, M. J., & Misz-Kennan, M. (2022). The Miocene deep-seated spontaneous coal-seam fire in the Upper Silesian Coal Basin (S

- Poland) and its geotectonic trigger mechanism. *Terra Nova*, 34, 184–192.
<https://doi.org/10.1111/ter.12576>
- Pagliari, L., Dapiaggi, M., Pavese, A., & Francescon, F. (2013). A kinetic study of the quartz-cristobalite phase transition. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(15–16), 3403–3410. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.06.014>
- Pedersen, A. K. (1979). A Shale Buehite Xenolith With Al-Armalcolite and Native Iron in a Lava From Asuk, Disko, Central West Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 83–94.
- Peretyazhko, I. S., Savina, E. A., & Khromova, E. A. (2017). Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex in the Choir–Nyalga basin (Central Mongolia): composition, mineral assemblages and formation conditions. *Mineralogical Magazine*, 81(4), 949–974. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.144>
- Schneider, P., Tropper, P., & Kaindl, R. (2013). The formation of phosphoran olivine and stanfieldite from the pyrometamorphic breakdown of apatite in slags from a prehistoric ritual immolation site (Goldbichl, Igls, Tyrol, Austria). *Mineralogy and Petrology*, 107(2), 327–340. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0255-1>
- Shu, Q., Wang, Y., Li, J., Liu, Y., Li, P., & Chou, K. (2015). Effect of Na₂O on dissolution rate of alumina in CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂ slag. *ISIJ International*, 55(11), 2297–2303. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-211>
- Taskiran, M. U., Demirkol, N., & Capoglu, A. (2005). A new porcelainised stoneware material based on anorthite. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(4), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.03.017>
- Tropper, P., Recheis, A., & Konzett, J. (2004). Pyrometamorphic formation of phosphorus-rich olivines in partially molten metapelitic gneisses from a prehistoric sacrificial burning site (Otz Valley, Tyrol, Austria). *European Journal of Mineralogy*, 16(4), 631–640. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2004/0016-0631>

Webes források:

www.rruff.info, utolsó letöltés dátuma 2024. január 7.

Mellékletek

mintanév/oxid wt%	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Cr2O3	BaO	SO3	Ni	S	TOTAL
a) Kőzetalkotó ásványok mérései																
cor01	51,95		32,67	3,67		11,7										100
cor02	49,44		35,3	4,5	0,21	10,55										100
corgl01	51,35	0,9	26,65	5,33	0,08	6,96	1,42	1,21	1,57	4,53						100
tk_foto10cor	54,14	1,76	23,09	3,74	0,17	3,35	4,72	2,04	2,43	4,55						100
gl01	79,62	1,09	10,88	2,44			0,84	2,8	0,97	1,37						100
gl03	96,33		3,16	0,34					0,17							100
gl04	85,82	0,64	8,92	1,46		1,95	0,25	0,2	0,61				0,15			100
gl05	76,26	0,92	6,99	11,21		0,44	0,85	0,5	1	1,62			0,2			100
SiO2gl01	89,68	1,83	4,07	1,84		1,07	0,59	0,44	0,48							100
ismeretlencCOR_fenyves	24,38		8,64	18,85	0,56	7,89	6,86	1,06	1,41	27,2		3,16				100
ismeretlencCOR_02	26,83	4,8	11,21	13,22	0,52	7,93	9,46	0,78	1,88	23,36						100
ismeretlencCOR_02_Ba	26,22		11,14	12,16	0,45	7,83	8,74	0,77	1,74	22,34		8,61				100
hy_01	36,17		26,79				0,75	0,3	1,02			34,98				100
hy_02	44,91		24,73				2,25	1,03	3,8			23,28				100
hy_03	38,91		25,05				0,75	0,41	1,84			33,03				100
hy_04	36,43		25,54				0,71	0,53	0,59			36,2				100
plag_01	52,31		32,41				12,47	1,97	0,84							100
plag_02	56,62		30,46				9,9	1,85	1,16							100
px_01	51,72		7,11	13,57	0,21	26,68	0,71									100
jar_01				57,47*					8,89	3,55			30,09			100
jar_02			9,2	46,77*					10,44				33,6			100
py_01				46,85°										0,81	52,34	100
py_02				48,71°										0,79	50,5	100
amf_01	48,41	0,88	11,9	19,54	0,63	13,29	3,55		0,62	1,19						100
cor_01	52,06	0,21	33,03	3,88	0,11	10,72										100
cor_02	56,03	0,23	29,88	3,97	0,07	9,82										100
cor_03	49,99	0,2	34,63	4,27		10,91										100
cor_04	50,39	0,15	34,22	4,39		10,84										100
flm_01	40,03	0,99	10,02	18,83	0,65	11,1	7,48		0,71	10,2						100
ilm_01		52,77		42,66	0,91	3,42					0,25					100
plag_01	53,11		30,83				14,53	1,31	0,23							100
plag_02	52,49		30,96				13,52	2,72	0,3							100
plag_03	55,41		29,05				9,72	5,04	0,78							100
plag_04	47,89		35,23				14,98	1,63	0,26							100
po_01				63,55											36,45	100
px_01	48,97	1,03	6,46	18,12	0,63	22	1,18			1,61						100
px_02	47,06	1,39	5,57	24,2	0,65	19,56	0,33			1,23						100
tk_finomsz	63,53	0,53	22,06	2,25		3,97	4,7	1,27	0,43	1,26						100
tk_plagzone	62,75	0,17	23,49	0,88		0,63	6,4	2,69	2,66				0,34			100
tk_szimp_02_01	63,26	0,86	21,01	2,5		3,16	3,73	1,38	2,05	1,26			0,79			100
b) Foszfát-szilikát, stanfieldit mérések																
CaMgFePO01_1102	2,8	0,35	1,02	12,39	0,5	17,91	21,76		0,18	43,09						100
CaMgFePO02_1102	0,88	0,25	0,75	11,87	0,62	18,95	23,08		0	43,6						100
CaMgFePO02_woK_1102	0,92		0,96	11,78	0,72	18,78	22,72			44,11						100
CaAlSiO2_total	49,9	2,24	16,95	10,12*	0,22	4,8	5,96	1,11	1,39	7,3						100
CaMgFePO	0,95	0,13	0,2	13,61*	0,7	18,37	22,25			43,77						100
CaMgFePO02	3,37	0,23	1,02	13,42*	0,57	17,61	21,97			41,81						100
CaMgFeAlSiPO03	22,67	0,51	6,87	15,05*	0,47	13,06	13,64		0,26	27,47						100
CaMgFeAlSiPO04	5,49	0,3	1,84	16,01*	0,76	15,76	19,49		0,15	40,2						100
CaMgFeAlSiPO05	32,28	1,21	8,56	13,53*	0,57	9,42	9,73		1,19	23,51						100
MgAlFeSiPO06	28,54		4,05	31,97*	0,57	21,16	0,85			12,86						100
CaMgAlFeSiPO07	6,57	0,22	1,8	16,65*	0,54	15,78	19,44		0,22	38,78						100
MgAlFeSiPO08	28,55	0,37	2,78	41,16*	0,53	17,27	0,89		0,2	8,25						100
P-ens	45,75	1,22	6,97	20,2	0,58	21,9	0,93			1,73	0,12					100
px_p	48,54	1,65	7,99	22,56	0,21	14,61	1,04			2,6	0,12					100
A csillaggal jelölt értékek Fe2O3 értékek, a °-val jelölt érték Fe																
MI. a-c táblázat: SEM-EDS mérések eredményei. a) Kőzetalkotó ásványok mérései, b) foszfát-szilikát ásvány mérései. A csillaggal jelölt értékek Fe ₂ O ₃ értékek, a °-val jelölt érték Fe.																

mintanév/oxid wt%	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Cr2O3	BaO	SO3	Ni	S	TOTAL
c) Armalcolit mérések																
armalcolite_01_Fe2		61,51	1	32,42	0,78	3,96					0,33					100
armalcolite_01_Fe3		59,37	0,97	34,77*	0,75	3,82					0,32					100
armalcolite_02		55,97	0,87	38,47	0,85	3,58					0,26					100
armalcolite_03		69,72	4,6	17,49	0,05	7,12					1,02					100
armalcolite_04_3ox		61,39	1,38	30,61	0,66	5,8					0,16					100
armalcolite_04_5ox		61,39	1,38	30,61	0,66	5,8					0,16					100
armalcolite_05_Fe2		67,02	1,43	25,48	0,59	4,78					0,69					100
armalcolite_05_Fe3		65,2	1,39	27,52*	0,58	4,64					0,67					100
armalcolite_06_Fe2		64	6,89	20,67	0,05	6,44					1,94					100
armalcolite_06_Fe3		62,59	6,73	22,45*	0,05	6,29					1,9					100
armalcolite_08		70,79	3,46	17,43	0,12	7,67					0,52					100
armalcolite_09		71,75	3,25	16,1	0,07	8,3					0,53					100
armalcolite_11		71,7	4,86	12,81	0,18	9,73					0,72					100
armalcolite_12		70,49	4,79	16,67	0,09	7,24					0,71					100
armalcolite_13		70,89	4,49	12,47	0,16	10,53					1,46					100
ilm_01		54,85		37,42	2,29	4,71					0,72					100

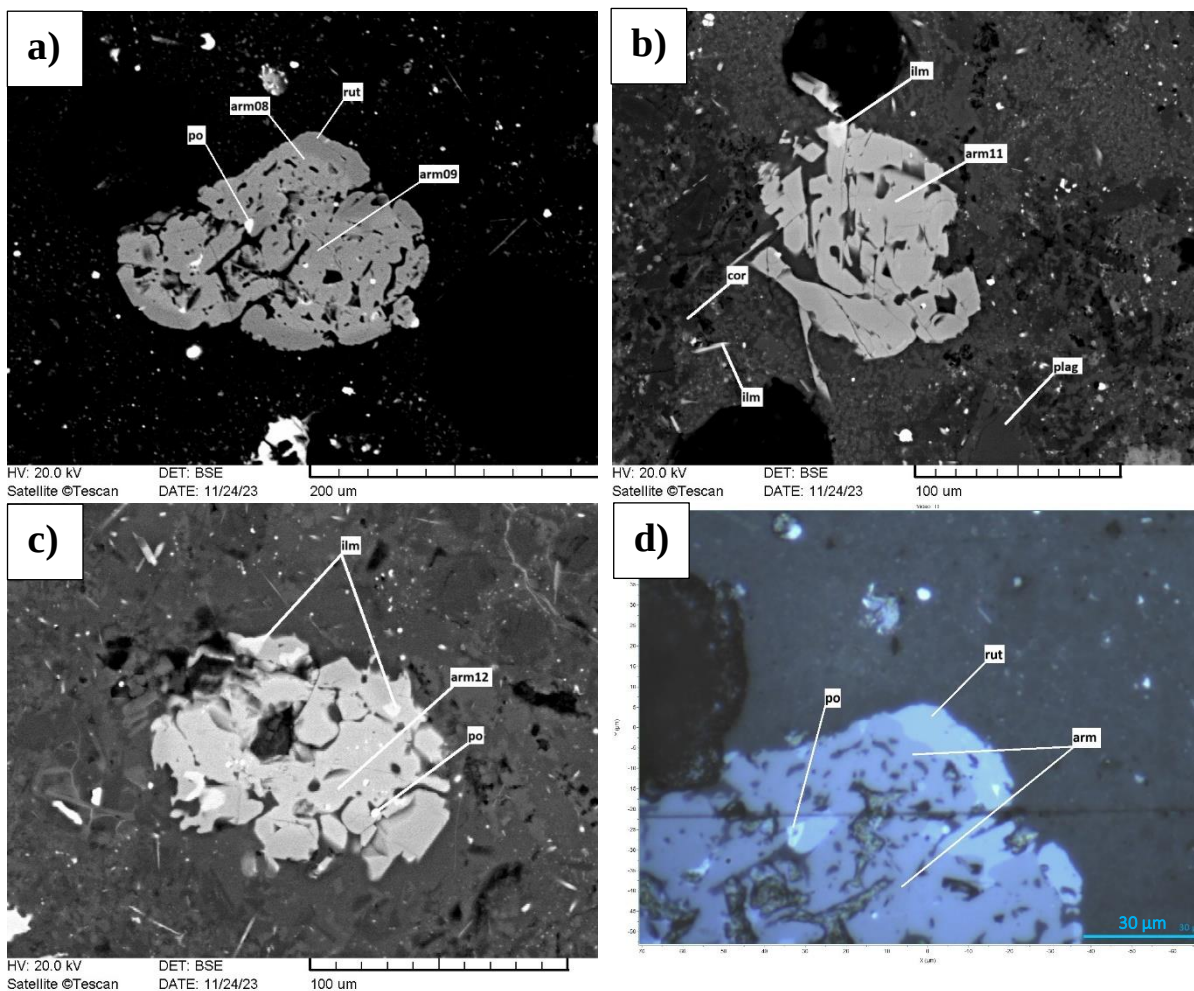
MI. a-c táblázat folytatása: SEM-EDS mérések eredményei. c) armalcolit mérések. A csillaggal jelölt értékek Fe₂O₃ értékek, a ◇-val jelölt érték Fe.

mintaszám/elem wt%	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	Cr	Ba	S6+	Ni	S2-	TOTAL	megj.
a) Kőzetalkotó ásványok mérései																	
cor01	5,13		3,8	0,3		1,72										10,96	18ox
cor02	4,92		4,14	0,37	0,02	1,56										11,1	18ox
ismeretlencCOR_fenyos	1,07		0,45	0,69	0,02	0,51	0,32	0,09	0,08	1,01		0,05				4,29	7ox
ismeretlencCOR_02	1,13	0,15	0,56	0,47	0,02	0,5	0,43	0,06	0,1	0,84						4,26	7ox
ismeretlencCOR_02_Ba	1,18		0,59	0,46	0,02	0,52	0,42	0,07	0,1	0,85		0,15				4,34	7ox
hy_01	2,14		1,87				0,05	0,03	0,08			0,81				4,98	8ox
hy_02	2,42		1,57				0,13	0,11	0,26			0,49				4,98	8ox
hy_03	2,27		1,72				0,05	0,05	0,14			0,75				4,97	8ox
hy_04	2,18		1,8				0,05	0,06	0,05			0,85				4,98	8ox
plag_01	2,35		1,72				0,6	0,17	0,05							4,9	8ox
plag_02	2,51		1,59				0,47	0,16	0,07							4,8	8ox
px_01	1,85		0,3	0,41	0,01	1,42	0,03									4	6ox
jar_01				3,26*					0,86	0,23			1,7			6,05	11ox
jar_02			0,79	2,56*					0,97				1,83			6,15	11ox
py_01				33,75										0,56	65,69		
py_02				35,44										0,55	64,01		
amf_01	6,85	0,09	1,98	2,31	0,08	2,8	0,54		0,11	0,14						14,91	23ox
cor_01	5,15	0,02	3,85	0,32	0,01	1,58										10,92	18ox
cor_02	5,5	0,02	3,46	0,33	0,01	1,44										10,75	18ox
cor_03	4,96	0,01	4,05	0,35		1,61										11	18ox
cor_04	5	0,01	4	0,36		1,6										10,98	18ox
ilm_01		0,98		0,88	0,02	0,13										2,02	3ox
plag_01	2,39		1,64				0,7	0,11	0,01							4,85	8ox
plag_02	2,37		1,65				0,65	0,24	0,02							4,93	8ox
plag_03	2,49		1,54				0,47	0,44	0,04							4,98	8ox
plag_04	2,18		1,89				0,73	0,14	0,02							4,96	8ox
po_01				50,02											49,98		
px_01	1,79	0,03	0,28	0,55	0,02	1,2	0,05			0,05							6ox
px_02	1,78	0,04	0,25	0,76	0,02	1,1	0,01			0,04							6ox
P-ens	1,7	0,03	0,31	0,63	0,02	1,21	0,04			0,05						4,02	6ox
px_p	1,8	0,05	0,35	0,7	0,01	0,81	0,04			0,08						3,85	6ox
b) Foszfát-szilikát, stanfieldit mérések																	
CaMgFePO01_1102	0,43	0,04	0,17	1,56	0,06	4	3,5			5,48	15,23						24ox
CaMgFePO02_1102	0,43	0,04	0,17	1,56	0,06	3,99	3,5		0,03	5,47	15,26						24ox
CaMgFePO02_woK_1102	0,13		0,13	1,5	0,08	4,27	3,74			5,58	15,43						24ox
CaMgFePO	0,15		0,04	1,57	0,09	4,18	3,65			5,67	15,33						24ox
CaMgFePO02	0,51		0,18	1,54	0,07	3,99	3,59			5,4	15,29						24ox
CaMgFeAlSiPO04	0,84		0,33	1,85	0,1	3,59	3,21			5,23	15,15						24ox
CaMgAlFeSiPO07	1,01		0,33	1,93	0,07	3,61	3,21			5,07	15,22						24ox

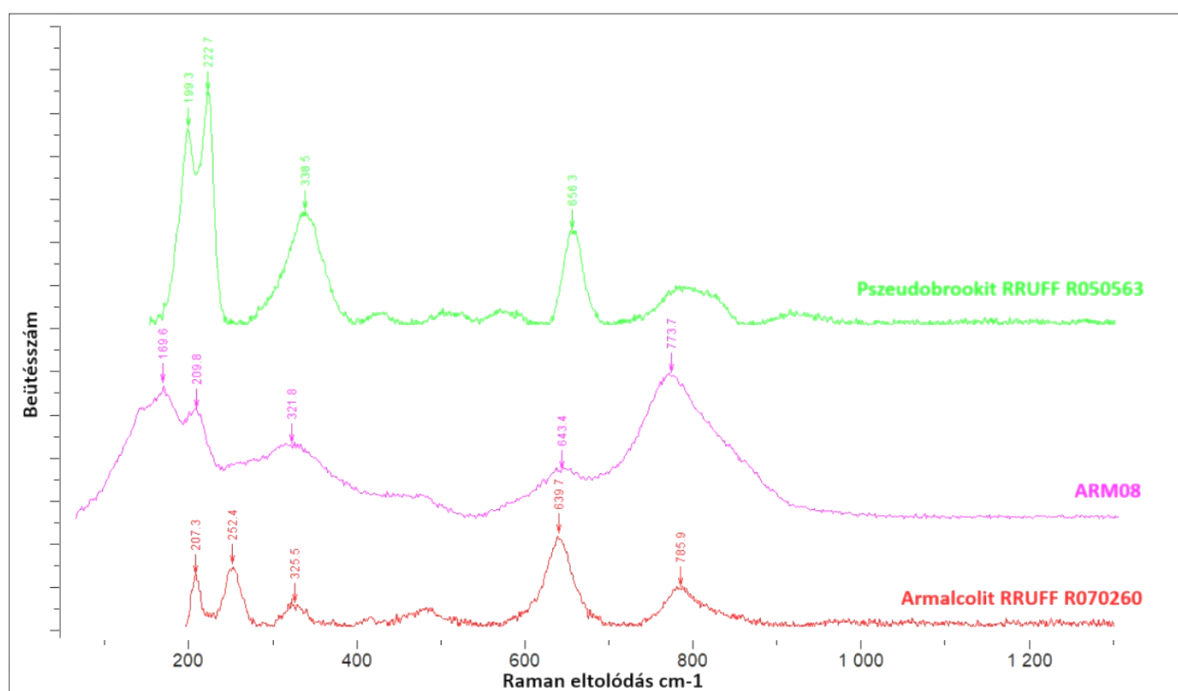
III. táblázat: SEM-EDS mérések eredményei kiértékelve. a) Kőzetalkotó ásványok mérései, b) foszfát-szilikát ásvány mérések. A csillaggal jelölt értékek Fe³⁺ értékek.

c) Armalcolit mérések																
armalcolite_01_Fe2		1,8	0,05	1,06	0,03	0,23					0,01				3,17	
armalcolite_01_Fe3		1,63	0,04	0,96*	0,02	0,21					0,01				2,87	
armalcolite_02		1,02	0,02	0,78	0,02	0,13					0,01				1,97	
armalcolite_03		1,88	0,19	0,52	0	0,38					0,03				3,01	
armalcolite_04_3ox		1,07	0,04	0,59	0,01	0,2					0				1,91	3ox
armalcolite_04_5ox		1,78	0,06	0,99	0,02	0,33					0,01				3,19	5ox
armalcolite_05_Fe2		1,89	0,06	0,8	0,02	0,27					0,02				3,06	
armalcolite_05_Fe3		1,75	0,06	0,74*	0,02	0,25					0,02				2,84	
armalcolite_06_Fe2		1,75	0,3	0,63	0	0,35					0,06				3,08	
armalcolite_06_Fe3		1,65	0,28	0,59*	0	0,33					0,05				2,89	
armalcolite_08		1,91	0,15	0,52	0	0,41					0,01				3,01	
armalcolite_09		1,92	0,14	0,48	0	0,44					0,01				3	
armalcolite_11		1,89	0,2	0,38	0,01	0,51					0,02				3	
armalcolite_12		1,89	0,2	0,5	0	0,38					0,02				3	
armalcolite_13		1,87	0,19	0,37	0	0,55					0,04				3,02	
ilm_01		1		0,76	0,05	0,17					0,01				1,99	

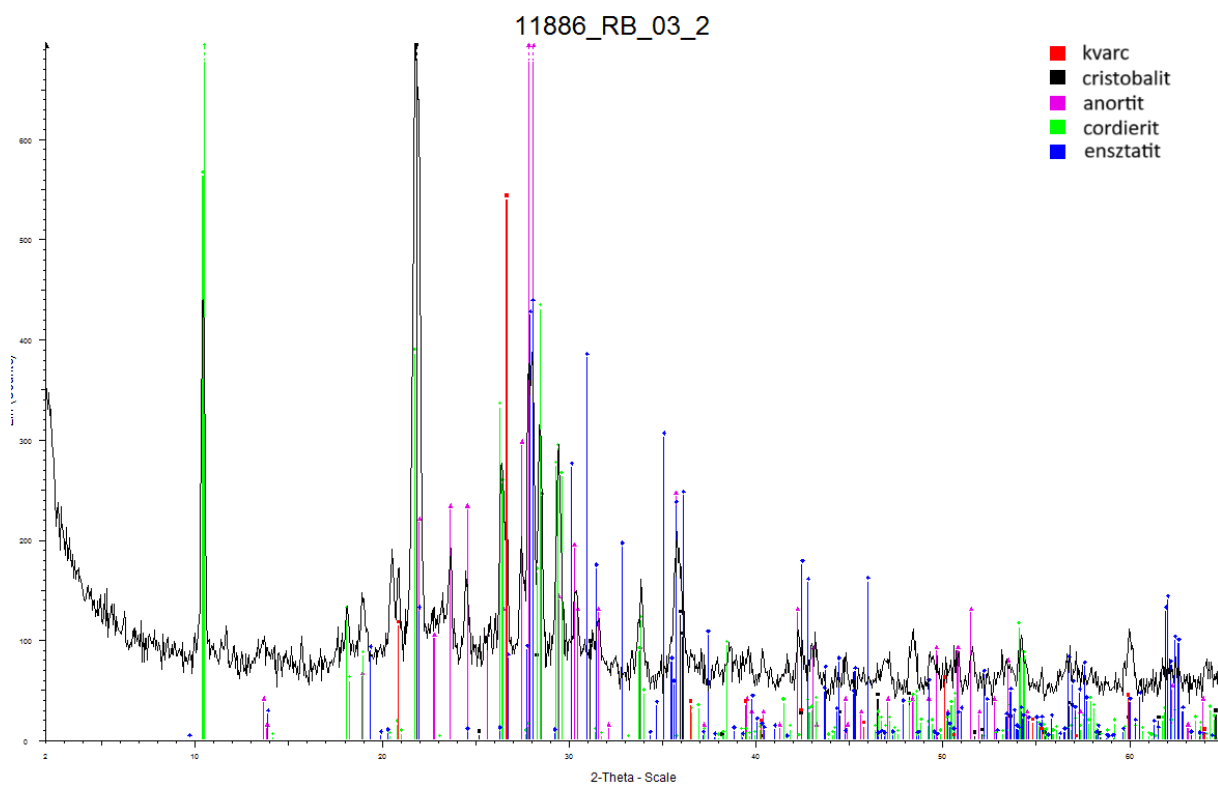
MII. a-c táblázat folytatása: SEM-EDS mérések eredményei kiértékelve. c) Armalcolit mérések. A csillaggal jelölt értékek Fe³⁺ értékek.



MI. ábra: Armalcolit kristályok a)-c) SEM-EDS, és d) ráesőfényes polarizációs mikroszkópi fotója, 1N.



MII. ábra: Pszeudobrookit, armalcolit, és az arm08 mérés Raman-spektrumai.



MIII. ábra: Az RB03_2 minta röntgen eredménye.