

Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola

A doktori iskola vezetője:

Prof. Dr. Szűcs Péter egyetemi tanár



A hazai grafit előfordulások ásvány-kőzettani és genetikai jellemzése, kárpáti kitekintéssel

Doktori (PhD) értekezés

Leskóné Majoros Livia

Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszék

Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar

Miskolci Egyetem

Témavezető:

Dr. Kristály Ferenc

tanszékvezető tudományos főmunkatárs

Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszék

Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar

Miskolci Egyetem

Miskolc, 2025

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Leskóné Majoros Livia

„A hazai grafit előfordulások ásvány-kőzettani és genetikai jellemzése, kárpáti kitekintéssel”

című PhD értekezéséhez

A Jelölt a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karán szerzett alap- és mesterszakos (Földtudományi mérnöki) kitüntetéses oklevelet, majd felvételt nyert a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolába. Kutatói munkáját már alapszakos hallgatóként elkezdte, OTDK helyezéseket és tudományos díjakat szerezve, nemzetközi konferenciákon is előadásokat tartva. A földtudományi kutatásokhoz kellő rendszeres, részletekre kiterjedő munkát elsajátítva, számos kutatási ösztöndíjat nyert, illetve hazai és nemzetközi projektek megvalósításában vett részt, a doktori kutatásai mellett.

A PhD kutatási témáját a mesterszakon elkezdett kutatásaiból építette fel és bővítette az elvárt tudományos szintre. Az elvégzett kutatásai összetett jellegét jól mutatja, hogy a terepi mintagyűjtéstől, a minták előkészítésén és a legtöbb vizsgálat elvégzésén át, az adatok komplex értelmezéséig szisztematikusan végezte el a szükséges munkát. Az eredményeit szóbeli előadásokban hazai és nemzetközi konferenciákon sikeresen mutatta be, szakmai tudományos körökben megmérettette és tudományos közleményekben tette közzé, amelyek között egy Q1 és egy Q2 besorolású is található. Kutatási témájából adódóan, amely az EU kritikus nyersanyagait érinti, több kutatási projektben is részt tudott venni. Kutatási eredményeivel nagymértékben járul hozzá a hazai nyersanyag előfordulások adatainak aktualizálásához, új eredmények megteremtéséhez.

A sikeres PhD tanulmányok és az abszolutórium megszerzése után a benyújtott disszertáció, annak tézisei és a téziszfüzet mind formailag, mind tartalmilag eleget tesz a követelményeknek. A tézisek alapjául szolgáló megállapítások a nemzetközi közleményeiben és előadásaiban széles körben ismertetett megállapítások, kellő tudományos háttérrel. A Jelölt munkájával kiérdemelte a nyilvános vitára való bocsátást, és sikeres védelem esetén a doktori fokozat odaítélését, hogy munkájával a hazai és nemzetközi kutatói társadalom hasznos tagja legyen.

Miskolc, 2025. augusztus 13.

Dr. Kristály Ferenc

tudományos főmunkatárs, témavezető

TARTALOMJEGYZÉK

ÖSSZEFOGLALÓ	V
ABSTRACT	VII
1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	1
2. A GRAFIT KÉPZŐDÉSE, ÁSVÁNYTANI TULAJDONSÁGAI ÉS FELHASZNÁLÁSA	2
2.1. A GRAFITOSODÁS ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI	2
2.2. A GRAFIT ÁSVÁNYTANI TULAJDONSÁGAI	4
2.3. A GRAFIT NYERSANYAG KERESKEDELMI OSZTÁLYOZÁSA	5
2.4. A GRAFIT FELHASZNÁLÁSA	7
3. A GRAFIT KÉPZŐDÉSÉNEK ÉS MEGJELENÉSI TÍPUSAINAK KAPCSOLATA	8
3.1. MAGMÁS GRAFITTELEPEK	9
3.2. KONTAKT METASZOMATIKUS (SZKARN) TELEPEK	9
3.3. HIDROTERMÁS TELÉRES MEGJELENÉSŰ GRAFITTELEPEK	9
3.4. METAMORF GRAFITTELEPEK	11
3.4.1. 4A TÍPUSÚ METAMORF GRAFITTELEPEK	11
3.4.2. 4B TÍPUSÚ METAMORFIZÁLT GRAFITTELEPEK	11
3.5. REZIDUÁLIS GRAFITTELEPEK	12
4. MAGYARORSZÁGI ÉS KÁRPÁT-ÖVEZETBELI LELŐHELYEK GENETIKAI ÉS MEGJELENÉSI TÍPUSAI	13
4.1. MAGYARORSZÁGI GRAFIT ELŐFORDULÁSOK	13
4.2. KÁRPÁT-ÖVEZETBELI GRAFIT ELŐFORDULÁSOK	15
5. A VIZSGÁLT TERÜLETEK BEMUTATÁSA, TEREPEJÁRÁS ÉS MINTAGYŰJTÉS	17
5.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	17
5.1.1. TAPOLCSÁNYI FORMÁCIÓ	18
5.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD	19
5.2.1. SZENDRŐLÁDI MÉSZKŐ FORMÁCIÓ	22
5.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ	23
5.3.1. SZENDRŐI FILLIT FORMÁCIÓ	24
5.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES	24
5.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND	26
5.6. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM	27
5.6.1. KŐSZEGI METAMORFIT KOMPLEXUM	30

5.7. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS.....	31
5.7.1. FERTŐRÁKOSI METAMORFIT KOMPLEXUM	32
5.8. RIMAKOKOVA (SZLOVÁKIA)	32
5.8.1. DÉL-VEPORIKUMI KRISTÁLYOS ALJZAT, SZLOVÁKIA	33
5.9. CĂTĂLINUL-PARENG (ROMÁNIA)	34
5.9.1. LAINICI PĂIUȘ FORMÁCIÓ-CSOPORT	36
6. MINTA-ELŐKÉSZÍTÉS, APRÍTÁSI ÉS SZEPARÁLÁSI KÍSÉRLETEK	37
6.1. POLÍROZOTT FELÜLETI ÉS VÉKONYCSISZOLAT KÉSZÍTÉSE	37
6.2. HAGYOMÁNYOS PORÍTÁSI ELJÁRÁS.....	38
6.3. A HAGYOMÁNYOS PORÍTÁSI ELJÁRÁS TOVÁBBFEJLESZTÉSE, ULTRAHANGOS APRÍTÁS.....	38
6.4. DÚSÍTÁSI KÍSÉRLET	40
6.5. GRAVITÁCIÓS ÜLEPÍTÉS, AGYAGÁSVÁNY SZEPARÁLÁS.....	40
6.6. SAVAZÁSI KÍSÉRLET	41
6.7. DEKANTÁLÁS	41
7. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	42
7.1. OPTIKAI VIZSGÁLATOK	42
7.2. SEM-EDX VIZSGÁLATOK	42
7.3. TRANZMISSZIÓS ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATI MÓDSZER.....	43
7.4. XRD VIZSGÁLATOK.....	44
7.5. XRF VIZSGÁLATOK	44
7.6. ICP-MS VIZSGÁLATOK	45
7.7. SZIMULTÁN DTA-TG-DTG VIZSGÁLATOK.....	45
7.8. RAMAN-SPEKTROSKÓPOS VIZSGÁLATOK	46
7.8.1. GRAFIT GEOTERMOMETRIA.....	47
8. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE	50
8.1. OPTIKAI ÉS SEM-EDX VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI.....	50
8.1.1. ÚPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	50
8.1.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS.....	53
8.1.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK	60
8.1.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ	61
8.1.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES	62
8.1.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND.....	65
8.1.7. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM	68

8.1.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS	70
8.1.9. SZLOVÁKIA, NYUGATI-KÁRPÁTOK, RIMAKOKOVA	72
8.1.10. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG	73
8.2. TRANZMISSZIÓS ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	76
8.2.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	76
8.2.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK	78
8.2.3. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG	80
8.3. RÖNTGEN-PORDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	81
8.3.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	81
8.3.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS.....	83
8.3.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK	85
8.3.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ	86
8.3.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES	86
8.3.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND.....	87
8.3.7. KÓSZEGI-HEGYSÉG, VELEM	87
8.3.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS	88
8.3.9. SZLOVÁKIA, NYUGATI-KÁRPÁTOK, RIMAKOKOVA	88
8.3.10. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG	89
8.3.11. A RIETVELD-ILLESZTÉS EREDMÉNYE.....	90
8.3.12. AZ XRD KIÉRTÉKELÉS ÉS RIETVELD-ILLESZTÉS SORÁN ÉSZLELTEK	91
8.4. RÖNTGEN FLUORESZCENS SPEKTROMETRIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI....	93
8.5. ICP-MS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI.....	96
8.6. SZIMULTÁN DTA-TG-DTG VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	97
8.6.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	97
8.6.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS.....	97
8.6.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK	98
8.6.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ	98
8.6.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES	98
8.6.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND.....	99
8.6.7. KÓSZEGI-HEGYSÉG, VELEM	99
8.6.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS	99
8.6.9. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG	99
8.7. RAMAN-SPEKTROSKÓPOS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI.....	100
8.7.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY	100

8.7.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS.....	100
8.7.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES	101
8.7.4. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM	101
8.7.5. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS	102
8.7.6. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG	102
9. DISZKUSSZIÓ	103
9.1. A GRAFIT KIMUTATÁSA	103
9.2 A GRAFIT-KRISTÁLYOSODÁS GENETIKAI VISZONYAI	104
9.3. KRISTÁLYOSODÁSI FOLYAMATOK	110
9.4. KÖZETALKOTÓ ÉS JÁRULÉKOS ÁSVÁNYOK	113
9.5. LELŐHELYRŐL ÚJ ÁSVÁNY LEÍRÁS.....	114
9.6. GAZDASÁGFÖLDTANI ÉRTÉKELÉS.....	115
10. TÉZISEK.....	117
11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	120
12. IRODALOMJEGYZÉK.....	121
13. A DOKTORI TÉMÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK	140
14. MELLÉKLETEK.....	142

ÖSSZEFOGLALÓ

Az Európai Unió Kritikus Nyersanyagok listáján 2011 óta szerepel kritikus nyersanyagként a természetes grafit (Study on the Critical Raw Materials, 2023). A hazai grafit előfordulásokkal eddig viszonylag kevés kutatás foglalkozott (például Raincsákné Kosáry, 1978; Demény, 1986; Hermes, 1990), viszont a modern műszeres analitika lehetővé teszi a grafit, illetve a grafitosodott anyag részletesebb vizsgálatát.

Doktori kutatásom célja a hazai grafit előfordulások részletes ásvány- és kőzettani, illetve genetikai vizsgálata volt. Az Upponyi-hegységből (Dédestapolcsány), a Szendrői-hegységből (Szendrőlád, Szendrő, Meszes, Rakacaszend), a Kőszegi-hegységből (Velem) és a Soproni-hegységből (Fertőrákos) gyűjtöttem mintákat, valamint kárpát-övezetbeli kitekintésként Rimakokováról (Szlovákia) és Parengről (Déli-Kárpátok, Románia) vizsgáltam meg mintákat.

Kutatásom során alkalmaztam polarizációs mikroszkópiát, pásztázó elektronmikroszkópiát (SEM-EDX), röntgen-pordiffrakciót (XRD), röntgen fluoreszcens spektrometriát (XRF), nyomelem geokémiát (ICP-MS), transzmissziós elektronmikroszkópiát (TEM), termogravimetriát (szimultán DTA-DT-DTG) és Raman-spektroszkópiát. Ezekon kívül pedig a grafit dúsítására, kinyerésére is végeztem laboratóriumi kísérleteket.

A kapott eredmények szerint rendezetlen kristályszerkezetű grafit, grafitos anyag volt kimutatható az általam vizsgált mintákban, amely változó szemcseméretben (például 1–20 μm – Dédestapolcsány, Pareng; 20–50 μm – Szendrőlád, Velem; 50–150 μm – Dédestapolcsány, Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Fertőrákos, >150 μm – Rimakokova, Pareng) és morfológiával (közetszínező pikkely, nem deformált és deformált pikkely, szemcsés halmaz, aggregátum, lencseszerű aggregátum) volt megfigyelhető.

A magyarországi lelőhelyekről származó minták esetében megállapítottam, hogy a vizsgált kőzetekben található grafit a regionális metamorfózissal szingenetikus képződésű, és nyírózónákban keletkezett. A grafit szerves anyag eredetű, erre utal többek között a grafitokban észlelt kevés kén-tartalom (Dédestapolcsány, Szendrőlád, Rimakokova), a TiO_2 -okban és muszkovitban megfigyelt V-tartalom (Dédestapolcsány, Szendrőlád, Rimakokova), valamint a kísérő fázisokban megfigyelt U-, Th- és RFF-tartalom is.

A Raman-spektroszkópos eredmények alapján kiszámítottam, Beyssac et al. (2002) és Aoya et al. (2010) formuláit alkalmazva, a mintákban található grafit átlagos képződési csúcshőmérsékletét. A számolt átlagos képződési hőmérséklet értékek: Dédestapolcsány –

335 °C (± 50 °C), Szendrőlád – 405 °C (± 50 °C), Meszes – 420 °C (± 50 °C), Velem – 400 °C (± 50 °C), Fertőrákos – 440 °C (± 50 °C) és Pareng – 390 °C (± 50 °C).

A szimultán DTA-TG-DTG eredmények, valamint az XRD vizsgálatok során kapott diffraktogramok Rietveld-illesztésével lehetővé vált a mintákban lévő grafit, grafitosodott anyag mennyiségi kiértékelése is. A magyarországi vizsgált mintákat tekintve mindenhol ~5 tömeg%-nál kevesebb a grafit mennyisége, amely átlagosan 3–5-szörösére dúsítható fel a grafit hidrofób természetét kihasználva.

ABSTRACT

Since 2011, natural graphite has been classified as a critical raw material on the List of Critical Raw Materials for the European Union (Study on the Critical Raw Materials, 2023). Only a few studies dealt with Hungarian graphite occurrences (e.g., Raincsákné Kosáry, 1978; Demény, 1986; Hermes, 1990), however, modern analytical techniques allow for more detailed investigations of graphite and graphitized materials.

The objective of my doctoral research was to conduct a detailed mineralogical, petrological and genetic study of Hungarian graphite occurrences. I collected samples from the Uppony Mountains (Dédestapolcsány), the Szendrő Mountains (Szendrő, Szendrő, Meszes, Rakacaszend), the Kőszeg Mountains (Velem) and the Sopron Mountains (Fertőrákos). As part of a broader regional comparison within the Carpathian area, I also examined samples from Kokava nad Rimavicou (Slovakia) and Parâng (Southern Carpathians, Romania).

During my investigations, I used a wide range of analytical techniques, including polarized light microscopy, scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX), X-ray powder diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectrometry (XRF), trace element geochemistry (ICP-MS), transmission electron microscopy (TEM), thermogravimetry (simultaneous DTA-DT-DTG) and Raman spectroscopy. In addition, I carried out laboratory experiments on graphite enrichment and extraction.

According to the results, disordered graphite (graphitic material) were detected in the samples, appearing in varying grain sizes (e.g. 1–20 μm – Dédestapolcsány, Parâng; 20–50 μm – Szendrő, Velem; 50–150 μm – Dédestapolcsány, Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Fertőrákos; >150 μm – Kokava nad Rimavicou, Parâng) and morphologies (rock-coloring flakes, undeformed and deformed flakes, granular aggregates, aggregates, lenticular aggregates).

In the case of the Hungarian samples, I concluded that the graphite present in the studied rocks formed syngenetically during regional metamorphism, specifically within shear zones. The graphite is of organic origin, as indicated by several factors, including the low sulfur content observed in the graphite (Dédestapolcsány, Szendrő, Kokava nad Rimavicou), the vanadium content found in TiO_2 phases and muscovite (Dédestapolcsány, Szendrő, Kokava nad Rimavicou), and the presence of uranium, thorium, and rare earth elements (REEs) in the associated mineral phases.

Based on Raman spectroscopic results, I calculated the average peak formation temperature of graphite in the samples using the formulas of Beyssac et al. (2002) and Aoya et al. (2010). The calculated average formation temperatures are: Dédestapolcsány – 335 °C (± 50 °C), Szendrőlád – 405 °C (± 50 °C), Meszes – 420 °C (± 50 °C), Velem – 400 °C (± 50 °C), Fertőrákos – 440 °C (± 50 °C) and Parâng – 390 °C (± 50 °C).

Using the results of simultaneous DTA-TG-DTG, and Rietveld refinement of the diffractograms obtained by XRD analyses, it was also possible to quantify the amount of graphite or graphitized material in the samples. In the case of the investigated Hungarian samples, the graphite content is generally less than ~5 wt%, that can be enriched by a factor of approximately 3 to 5 by exploiting the hydrophobic nature of graphite.

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A grafittermelésnek Európában jelentős történelme van, már az ókorban is ismerték és bányászták. Azonban napjainkban az Európai Unióban csupán néhány országban folyik kitermelés, világviszonylatban kis méretű telepekből (Földessy et al., 2013). Ez ellenben nem fedezi az Európai Unió grafit szükségleteit, 99%-ban importált grafitra van szüksége (Study on the Critical Raw Materials, 2023). Többek között ezért is dolgozta ki az Európai Unió a háromévente kiadott kritikus nyersanyagok listáját, amelyen a számára fontos stratégiai nyersanyagok szerepelnek. 2023-ban, immár ötödik alkalommal adta ki az EU az új listát (Study on the Critical Raw Materials, 2023), amelyen már 34 kritikus nyersanyag szerepel, 2011 óta töretlenül a természetes grafit is.

A magyarországi grafitos képződményekkel eddig kevés hazai kutatás foglalkozott, 1970-1990 között zajlottak kisebb mértékű kutatások (például Raincsákné Kosáry, 1978; Demény, 1986; Hermes, 1990). A modern műszeres analitika (például Raman-spektroszkópia) azonban lehetővé teszi a grafit, illetve a grafitosodott anyag részletesebb vizsgálatát. Ezért a doktori kutatásom célja a hazai grafit előfordulások részletes ásvány- és kőzettani, valamint genetikai vizsgálata volt. Kutatásom fókusza az upponyi- és szendrői-hegységi lelőhelyekre estek (Dédestapolcsány, valamint Szendrőlád, Szendrő, Meszes, Rakacaszend), mivel ezek a területek potenciális grafit lelőhelyek, azonban a Soproni-hegységből (Fertőrákos) és a Kőszegi-hegységből (Velem) is vizsgáltam lelőhelyeket. Kárpát-övezetbeli kitekintésként és összehasonlításként Rimakokováról (Szlovákia) és Parengről (Románia, Déli-Kárpátok) tanulmányoztam kőzeteket.

A hazai lelőhelyek esetében, a terepbejárások során a mintagyűjtés főként a nyírózónákból származó, fekete (potenciálisan grafitos anyagot tartalmazó) kőzeteket érintette. Bár nem lehet teljes képet kapni szerkezetföldtani értelmezés nélkül, kutatásom fókuszában mégsem ez állt, hanem a mintákban lévő grafit, grafitos anyag kimutatása, kristályszerkezeti rendezettségének és genetikájának részletes vizsgálata, valamint a grafit mellett előforduló ásványparagenezisek jellemzése.

Vizsgálataim során az alapvető műszeres analitikai módszerek (polarizációs mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia – SEM-EDX, röntgen-pordiffrakció – XRD, röntgen fluoreszcens spektrometria – XRF) mellett alkalmaztam nyomelem geokémiai vizsgálatot (ICP-MS), transzmissziós elektronmikroszkópiát (TEM), termogravimetriát (szimultán DTA-DT-DTG) és Raman-spektroszkópiát. Ezekon kívül pedig a grafit dúsítására, kinyerésére is végeztem laboratóriumi kísérleteket.

2. A GRAFIT KÉPZŐDÉSE, ÁSVÁNYTANI TULAJDONSÁGAI ÉS FELHASZNÁLÁSA

2.1. A GRAFITOSODÁS ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI

A jól kristályosodott grafit 400 °C-nál nagyobb hőmérsékleteken képződik (Landis, 1971), képződési környezete lehet metamorf (regionális vagy kontakt), valamint magmás folyamatokhoz kapcsolódó hidrotermás jellegű (Dill, 2010). Kiindulási anyaga eltérő a képződési körülményeknek megfelelően, így képződhet karbonát ásványok elbontásából (Galvez et al., 2013), illetve szerves anyag metamorfózisával (Kwiecińska és Petersen 2004). Kőzetfejlődési szakaszok szempontjából a grafit lehet a kőzettel egyidejűleg képződő (szingenetikus), vagy később kifejlődő (epigenetikus). A szingenetikus grafit rétegekként figyelhető meg a metamorf kőzetekben, ezzel szemben az epigenetikus grafit kitölti a pegmatitokat és metamorf kőzeteket átjáró ereket (Erdosh, 1972).

A szingenetikus grafit az üledékes kőzetekben lévő szerves anyag metamorfózisával képződik, az epigenetikus grafit esetében pedig szilárd szén válik ki szénben telített C-O-H fluidumokból (Pasteris és Wopenka, 1991; Wopenka és Pasteris, 1993; Rodas et al., 2000), vagy karbonát ásványokból. A legnagyobb metamorfizációs fokoknál előforduló, teljesen rendezett, tiszta grafit tekinthető az úgynevezett „grafitosodás” végső termékének (Kwiecińska és Petersen, 2004). A természetes grafitosodás egy folyamatos, progresszív folyamat, amely során a széntartalmú anyag átalakulása szerkezeti és összetételbeli változásokat eredményez (Grew, 1974; Diessel és Offler, 1975). A széntartalmú anyag ugyanis a szerves anyagból megmaradt komponensekből áll: szénből, hidrogénből, nitrogénből, oxigénből és szerves kénből. Grew (1974) vizsgálatai kimutatták, hogy a metamorfózis fokának növekedésével csökken a hidrogén, nitrogén, kén és oxigén mennyisége, és nő a széntartalom, illetve a kristályszerkezet rendezettsége.

A metamorf grafit képződése felső-zöldpala – alsó-amfibolit fáciesről a granulit fáciesig terjed. A biogén eredetű grafit számos szerves anyagból képződhet: vízi és szárazföldi növényekből, kerogénből, bitumenes anyagból és egyéb szerves maradványokból. A mészkövekben, fillitekben, palákban, meta-antracitokban és szemi-grafitokban azonosított szerves szerkezetek töredékei bizonyítják a grafit biogén eredetét (Hamilton et al., 1970; Landis, 1971; Carraro és Charrier, 1972; Sedlak, 1973; Diessel és Offler, 1975; Stadler et al., 1976; Diessel et al., 1978; Kwiecińska, 1980; Stach et al., 1982; Barrenechea et al., 1992; Taylor et al., 1998).

A klasszikus prograd metamorfózis mellett a széntartalmú anyag grafitosodását gyakran a nyírófeszültség és nyírási zónák nyomás-hőmérséklet viszonyai is előidézhetik. A nyomás és nyírás elősegíti az alapvető szerkezeti egységek molekuláris rendeződését, amely a grafitban szükséges C-gyűrűket létrehozza, valamint az aromás lamellák és pórusok megfelelő kötését eredményezi (Bonijoly et al., 1982; Buseck és Bo-Jun, 1985; Wilks et al., 1993; Bustin et al., 1994).

A grafitosodás fizikai feltételeit számos szerző különböző módon becsülte meg: Landis (1971) például a grafitosodás kezdetét legalább 300 °C-ra tette, a teljesen rendezett grafit nem jelenhet meg 450 °C alatt, a nyomás értéke pedig 200–600 MPa közötti. Grew (1974) 300–500 °C és 300 MPa feletti adatokat közölt regionális metamorfózis esetén, illetve 1000 °C hőmérsékletet és 100 MPa nyomást kontakt metamorfózisnál. Diessel és Offler (1975) szerint a grafitosodás a zöldpala fácies klorit zónájában kezdődik és az amfibolit fácies kezdetéig tart 380–450 °C közötti hőmérsékleten és 200–300 MPa közötti nyomáson. Kwiecińska (1980) pedig tökéletes, három dimenzióban rendezett rácsú grafitot mutatott ki amfibolit és granulit fáciesekből.

A széntartalmú kőzetekben (legyen akár szénülési sor tagja vagy feketepala, grafitos pala), a szerves anyaghoz való affinitásuk révén, számos elem dúsulása megfigyelhető, többek között a vanádiumé, krómé, molibdéné, nikkelé, uráné, aranyé és cinké (Holland, 1979; Brumsack és Lew, 1982). Geokémiai csoportokra bontva a grafitosodáshoz az alábbi elem dúsulások és elemhelyettesítések kötődhetnek:

1. Vanádium és króm muszkovitban (például Brumsack, 1983; Brumsack és Gieskes, 1983; Wanty, 1986, Breit és Wanty, 1991; Dill, 2010)
2. Germánium, higany, arzén, antimon és molibdén szulfidosan (például Akçay et al., 2003, 2006; Zhuang et al., 2006; Seredin és Finkelman, 2008; Dill, 2010)
3. Réz, nikkel, ólom, cink szulfidosan (például Lewan, 1984; Wenger és Baker, 1986; Loukola-Ruskeeniemi és Heino, 1996; Dill, 2010)
4. Ritkaföldfémek (RFF) foszfátban, uránnal és tóriummal (például Heier, 1975; Eskenazy, 1998; Dill, 2001, 2010)
5. Arany és platinafémek (PGE) terméselemként (például Dill, 1986; Coveney és Nansheng, 1991; Zhuravlev és Wood, 1996; Dill, 2010)

2.2. A GRAFIT ÁSVÁNYTANI TULAJDONSÁGAI

A grafit az elemi szén hexagonális rendszerben kristályosodó polimorf módosulata, amelynek két gyakori politípus megjelenése ismert a természetben: a termodinamikailag stabilabb 2H (hexagonális), valamint a metastabil $\bar{3}R$ (romboéderes) formák (Kwiecińska és Petersen, 2004). A grafit kifejlődése általában lemezes, lemezei (pikkelyei) hajlékonyak, (0001) szerint kitűnő hasadást mutatnak. Zsíros tapintású, a Mohs-féle keménységi skálán alacsony értékű (1), sűrűsége 2,09-2,26 g/cm³ (Mitchell, 1993; Dill, 2010). Színe a feketétől a szürkésfeketéig változik, fémes fényű, opak ásvány, karcolási porszíne fekete vagy sötétszürke (Szakáll, 2005). Egyaránt vannak fémes jellemzői, mint a kitűnő elektromos- és hővezetése, valamint nemfémes tulajdonságai, mint a magas hőállósága és csúszóssága (Dill, 2010). Párolgási hőmérséklete 4500 °C, kémiaiilag inert, nem toxikus ásvány (Mitchell, 1993).

Makroszkóposan általában lemezes-pikkelyes, ritkán gömbös-szemcsés vagy szálásrostos, tús megjelenésű. A nagyobb grafitkristályok ezüstszínűek, hexagonális pikkelyes megjelenésűek és erős fémes fényel rendelkeznek, gyakran barázdáltak, néha ikresedettek (Mitchell, 1993; Kwiecińska és Petersen, 2004).

A grafit optikailag egytengelyű ásvány, reflexiós mikroszkópban vizsgálva enyhén barnásszürke színű, erős pleokroizmussal, bireflexióval és anizotrópiával, illetve változó reflexiós mutatóval rendelkezik (Galopin és Henry, 1972; Kubovics, 1993; Kwiecińska és Petersen, 2004). A szerves anyag grafitosodásának függvényében a polírozott felületen végzett reflexiós vizsgálatok értékei jelentős különbségeket mutatnak (Ramdohr, 1980).

Mikroszkóposan gyakran kriptokristályos megjelenésű a grafit (szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék) és közetszínező pigmentként jelenik meg újrakristályosodott mészkövekben, márványokban, palákban és fillitekben. A kriptokristályos grafitos massa a kőzetekben néha mikrodöket, mikrolaminákat, slíreket és ereket is formálhat. Kvarcitokban és kvarcitos palákban vagy pikkelyeket, vagy aggregátumokat alkot a grafit. Magasabb fokú metamorf kőzetekben (amfibolit és granulit fáciesnél) eltérő kristályformái figyelhetők meg, egyrészt, mint elkülönült idioblasztok, másrészt, mint lécszerű, szálásrostos, illetve táblás formák (Kwiecińska és Petersen, 2004).

A grafit jellegzetes kísérő ásványai például a goethit, „hidro-hematit”, ilmenit, anatóz és a brookit (Kwiecińska és Petersen, 2004). Lehetséges grafit indikátor a pozitív vanádium és nikkell anomália, valamint negatív bór anomália. Továbbá szulfidok és urán jelenléte szintén jelezhet grafitot (Mitchell, 1993).

A grafit kristályszerkezeti rendezettsége alapján megkülönböztetnek jól kristályos vagy rendezett szerkezetű (angolul „*well-crystallized*” vagy „*well-ordered*”) és rendezetlen szerkezetű (angolul „*disordered*”) grafitot (Henry et al., 2019b).

2.3. A GRAFIT NYERSANYAG KERESKEDELMI OSZTÁLYOZÁSA

A nyersanyag kereskedelem létrehozott egy kategorizálási rendszert, amelyben a szemcseméret és fizikai megjelenés alapján osztályozzák a grafitot. E szerint három típusát különböztetik meg (1. táblázat): (1) lemezes-pikkelyes grafit, (2) darabos/teléres (angolul *lump, vein*) grafit és (3) „amorf” grafit (Mitchell, 1993; Simandl et al., 2015).

1. táblázat: Összefoglaló táblázat a grafit nyersanyag kereskedelemben használt kategóriáiról. Fogg és Boyle (1987), Kavanagh és Schlögl (1988), Kenan (1991) után módosítva

Grafit típus	Pikkelyes	Darabos (teléres)	Amorf
Morfológia	Kristályos pikkelyek, durva ~: >150 µm, finom ~: <150 µm	Nagyméretű kristályok, többnyire >4 cm	Mikrokristályos, <70 µm
Eredet	Szingenetikus, regionális metamorfózis	Epigenetikus, regionális metamorfózis vagy hidrotermás teléres	Szingenetikus, kontakt és/vagy regionális metamorfózis
Teleptani megjelenés	5–30% grafit tartalom; strata-bound, táblás vagy lencsés telepek	~90 % grafit tartalom; telérek, erek, repedések	Gyakran gyúrt, rétegszerű telepek
Minőség	75–97% tisztaságú grafit	98–99,9% tisztaságú grafit	60–90% tisztaságú grafit
Sűrűség [g/cm³]	2,29	2,26	2,31
Fő felhasználás	Tűzállóipar, fékbetétek, kenőanyagok, Li-ion akkumulátorok	Szénkefék, fékbetétek, kenőanyagok	Tűzállóipar, acélipar, festékek, akkumulátorok
Főbb termelők	Kína, Brazília, India, Madagaszkár, Németország, Norvégia, Kanada, Zimbabwe	Sri Lanka	Kína, Dél-Korea, Csehország, Ausztria, Észak-Korea

A pikkelyes grafit lapos, lemezszerűen, szögletes, lekerekített vagy szabálytalan éllel jelenik meg elszórtan az eredetileg szerves anyag tartalmú metaszedimentekben. Grafit-hordozó kőzet lehet kvarc-tartalmú csillámpala, földpátos vagy csillámos kvarcit és gneisz. Szintén előfordulhat pikkelyes grafit metamorfizált karbonátokban, habár jelenleg

ezek az előfordulások gazdaságilag kevésbé jelentősek. A pikkelyes grafit telepei általában strata-bound megjelenésűek, önálló rétegekkel, padokkal és lencsékkel, amelyek vastagsága 30 cm-től akár >30 m is terjedhet, hosszanti kiterjedésük pedig >2 km. A grafitos testek rendszerint táblásak, néha lencse alakúak, és lokálisan szabálytalan alakú testekként jelennek meg redők csuklózónájában. Az archaikumtól a késő proterozoikumig képződtek a legjobb gazdasági jelentőségű pikkelyes grafit telepek, amelyekben a kőzetek akár 90% grafitot is tartalmazhatnak, miközben egy tipikus grafitos test csupán 10–15% grafitot tartalmaz (Mitchell, 1993).

A kereskedelemben a pikkelyes grafitot durva (150–850 μm átmérőjű) és finom (45–150 μm átmérőjű) pikkelyesre osztják fel. A finom pikkelyes kategóriát még tovább lehet osztani közepes (100–150 μm), apró pikkelyes (75–100 μm) és por (<75 μm) alkategóriákra (Syrett, 2015; Chehreh Chelgani et al., 2016). A metaszedimentekben gyakran megjelenő ásványok okozhatnak szennyeződést, ilyen ásvány lehet például kvarc, földpát, csillám, amfibol, gránát és kalcit, illetve ritkán pirrotin, pirit és magnetit (Mitchell, 1993).

A teléres (vagy darabos) grafit összefogazódó, durva- és/vagy mikrokristályos lemezes vagy (elvétve) tús grafit aggregátumokként figyelhető meg, amelyek nagysága általában >4 cm (Mitchell, 1993). A teléres grafit a grafit részleges szublimációjából és az azt követő újrakristályosodásával képződik regionális granulit és/vagy charnokit fáciesű metamorfózis során (Mitchell, 1993).

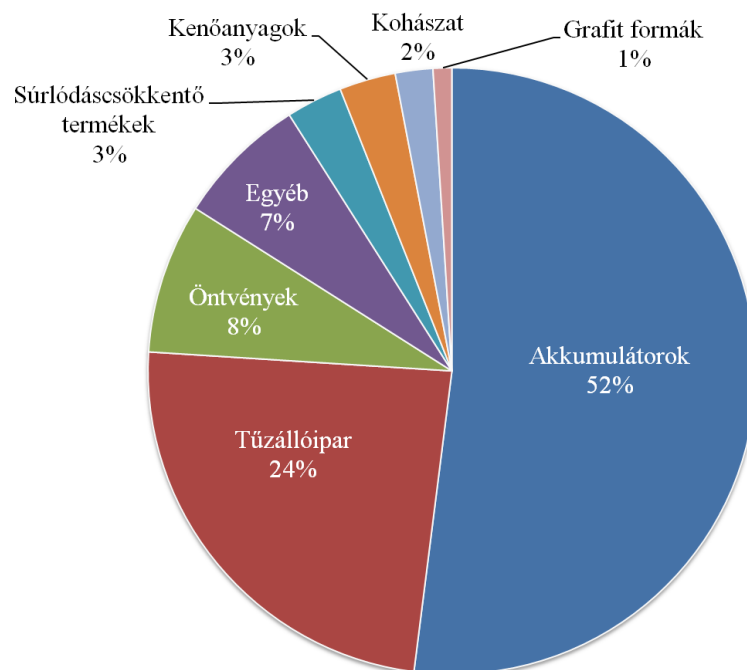
Az „amorf” grafit finomszemcsés grafitkristályok aggregátumából áll, amely puha, fekete, földes megjelenésű. Ásványtanilag az „amorf” kifejezés helytelenül használt, mivel a grafit kristályosságát tekintve nem amorf, hanem a szabad szemmel nem látható, nagyon finomszemcsés grafitra utal (Dill, 2010), amely a kriptokristályos megjelenési formának felel meg. Definíció szerint az „amorf” grafit 40 μm -nél kisebb átmérővel rendelkezik, de néhány ipari besorolás 70 μm -es szemcsenagyságnál húzza meg a felső határt (az emberi szem felbontása 40–70 μm közötti) (Mitchell, 1993).

Az „amorf” grafit általában szén vagy szerves anyag tartalmú üledékek, valamint kőszéntelepek termális vagy regionális metamorfózisával képződik. A befogadó kőzet lehet kvarcit, fillit, metagrauvakke és konglomerátum. A 80% feletti grafit tartalmú telepek számítanak gazdaságilag jelentősnek (Mitchell, 1993).

2.4. A GRAFIT FELHASZNÁLÁSA

A legtöbb természetes grafitot akkumulátorokban, a tűzállóiparban, autóiparban, kohászatban, acélgégyártásban, illetve kenőanyagként használják fel (1. ábra; Shaw, 2013).

A grafitot mindezek mellett a modern csúcs-technológiában is alkalmazzák. Például lítium-ion akkumulátorokban, nagy kapacitású áramtároló eszközökben, űrkutatásban, üzemanyagcelláknál, nukleáris reaktoroknál és napelemeknél (Olson, 2018). Ezeken kívül a grafit származékoknak is széles a felhasználási köre. Ilyen származék például a grafén (Dickson, 2014; Sadasivuni et al., 2014), a gömbgrafit, az expandált grafit és a grafitfólia (Simandl et al., 2015).



1. ábra: A természetes grafit fő alkalmazási területei az EU-ban 2024-ben¹

A természetes grafit gyakran tartalmaz meddő ásványokat, mint kvarc, földpát vagy muszkovit, amelyek megtalálhatóak zárványként a grafit rétegei között vagy a felületéhez tapadva. Ezek az ásványok csökkentik a grafit tisztaságát, és jelentősen nehezítik a feldolgozást, különösen az elektrokémiai alkalmazásokhoz (pl. akkumulátorok anódjai) szükséges nagy tisztaságú (>99,9 %) anyagok esetén. A grafit kéntartalma szintén okozhat problémát, ugyanis a kén zavarhatja az elektrokémiai folyamatokat (pl. akkumulátorokban vagy tüzelőanyag-cellákban), valamint környezetvédelmi és korróziós problémákat is eredményezhet feldolgozás közben (Jara et al., 2019).

¹ Az ECGA (European Advanced Carbon and Graphite Materials Association) adatai alapján <https://ecga.net/main-uses-of-graphite/> (Utoljára frissítve: 2025.04.08.)

3. A GRAFIT KÉPZŐDÉSÉNEK ÉS MEGJELENÉSI TÍPUSAINAK KAPCSOLATA

Genetikai szempontból egy grafittelep lehet: 1. magmás környezethez kapcsolódó, 2. kontakt metasomatikus, 3. hidrotermás teléres megjelenésű, 4. metamorfózishoz kapcsolódó: A) metamorf, B) metamorfizált (regionális vagy kontakt), valamint 5. reziduális (Kučvart, 1984; Dill, 2010). Az 1, 2, 3 és 4A genetikai típusok a szén CO és CO₂ formájában történő szállítását és koncentrációját feltételezi a különböző környezetekben. A grafit 650 °C alatti hőmérsékleten képződik CO és CO₂ redukciójával, hidrogén jelenlétében. A 4B genetikai típusnál a grafit az amorf szén kristályosodásával képződik magasabb hőmérsékleten és nyomáson. Mindegyik genetikai típusban képződhet pikkelyes grafit, kivéve a kontakt-metamorf telepeknél, ahol a tömeges megjelenés a gyakori (Kučvart, 1984).

A következő alfejezetekben az egyes genetikai típusokat ismertetem részletesebben, amelyekről egy összefoglalás látható a 2. táblázatban.

2. táblázat: Összefoglaló táblázat a különböző grafittelepekről Kučvart (1984) és Dill (2010) nyomán

Képződési mód	Származási anyag	Megjelenési típus	Példa
Magmás	CO _x	Pikkelyes	Khondalite-öv (D-India), Itge Naidvar és Khargana Gol (Mongólia), Hearst, Ontario, (Kanada)
Kontakt metasomatikus (szkarn)	CO _x	Pikkelyes	Black Donald, Ontario és Grenville, Québec (Kanada)
Hidrotermás teléres megjelenésű	CO _x	Pikkelyes és teléres (darabos)	Srí Lanka, Dillon (Montana, USA)
4A típusú metamorf	CO _x	Pikkelyes	Archaikumi ukrán pajzs
4B típusú metamorfizált (regionális vagy kontakt)	Szerves anyag	Pikkelyes és „amorf” (tömeges megjelenés)	Québec és Ontario (Kanada), Trieben és Kaisersberg (Ausztria), Černa és Český Krumlov (Csehország)
Reziduális	Korábban képződött grafit	Pikkelyes	Tamatave és Marovintsy (Madagaszkár)

3.1. MAGMÁS GRAFITTELEPEK

A magmás grafittelepek különböző összetételű (savanyú, alkáli vagy ultrabázikus) magmákból képződhetnek CO vagy CO₂-ból, amely vagy juvenilis eredetű, vagy karbonát xenolitok disszociációjából szabadult fel, vagy a környező kőzetek szerves széntartalmából származik. A széntartalom 650 °C alatt, hidrogén jelenlétében a CO és CO₂ elemi szénre redukálódik, amely pikkelyes grafitként kristályosodik ki ($\text{CO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{C} + \text{H}_2\text{O}$; $\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2 \leftrightarrow \text{C} + 2 \text{H}_2\text{O}$). Magasabb hőmérsékleteken a reakciók jobbról balra mennek végbe (Tatarinov, 1969). A grafit az intruzív kőzetekben impregnációkat, fészkeket, tömzsöket vagy teléreket alkot. A grafit a korai magmás szakaszban képződik és koncentrálnak (Kužvart, 1984).

Ilyen genetikai típusú telepre példa a pegmatitokban előforduló grafit az oroszországi Hackman-völgyben, a Yukspor-hegyen, a Khibiny masszívumon (Jaszczak et al., 2007), valamint a keralai Khondalite-övben (D-India) (Satish-Kumar és Santosh, 1998). Továbbá számos grafit tartalmú nefelinszienit ismert ÉNY Mongóliából, például az Itge Naidvar és Khargana Gol telepek (United Nations, 1999). A Zenyatta vagy más néven Albany grafittelep Hearst közelében (Ontario, Kanada) szintén ilyen genetikai típusú; a magmás folyamatokhoz kapcsolódó, fluidumokból kiváló, epigenetikus grafittelep két breccsa kürtőben helyezkedik el (Conly és Moore, 2015).

3.2. KONTAKT METASZOMATIKUS (SZKARN) TELEPEK

A kontakt metasztatikus (szkarn) telepek karbonátok és mélységi magmás kőzetek kontaktusán képződnek, vagy szerves eredetű szén kristályosodásával, vagy CO₂ redukciójával (akárcsak a magmás telepeknél). A grafit nagypikkelyes megjelenésű. Ca-Mg szkarnokban a grafitestek tömzsök és telérek formájában fordulnak elő. Főként Kanadában (Black Donald, Ontario; Grenville, Québec) és az USA-ban (Ticonderoga, New York) ismertek ilyen típusú telepek (Kužvart, 1984), de Tromso közelében (Norvégia) is található, ahol 200 m hosszúságú, 5–6 m átlagos vastagságú, 20–30% grafitot hordozó szkarn lencsék figyelhetők meg (Bugge, 1978).

3.3. HIDROTERMÁS TELÉRES MEGJELENÉSŰ GRAFITTELEPEK

Ezek a típusú telepek könnyenillókban (főként CO₂-ban) gazdag utómagmás oldatokból képződnek. Teléres és lencsés megjelenésűek, amelyek mérete néhány mm-től 2–5 m-ig változhat. A grafit mennyisége 80–98% közötti. A durva pikkelyes, néha idiomorf

grafit mellett megfigyelhető biotit, ortoklász, kvarc, apatit és más ásványok. A mélység növekedésével a grafit telérek fokozatosan mennek át grafittartalmú pegmatit telérekbe. A grafit feltehetőleg a pegmatit kristályosodásával hasonlóan korai képződésű, és 650–600 °C között képződik. A repedésekbe valószínűleg hidrotermás oldatok szállították a grafit pikkelyeket, és tektonikus mozgások alakították ki a telérek végleges alakját (Kužvart, 1984).

A hidrotermás teléres genetikai típusra a teléres („darabos”) megjelenési típusú grafit jellemző, amelynek nagyon kevés a telep méret szempontjából gazdaságilag is jelentős előfordulása (Rumble és Hoering, 1986; Soman et al., 1986; Jara et al., 2019).

Srí Lanka Északi, Nyugati és Sabaragamuwa tartományaiban 1834 óta művelik ennek a genetikai típusnak a legnagyobb telepét. A telér szélei mentén a grafit keresztirányban szálal-rostos, belül pedig foliációt és lemezes elválást mutat; a grafit durvakristályos (akár 20 cm-es kristályok is lehetnek) (Wadia, 1943; Erdosh, 1972; Dobner et al., 1978; Kužvart, 1984). A 2. ábra egy teléres megjelenésű grafit példányt mutat a Bogala bányából (Srí Lanka).

Szintén ilyen genetikai típusú grafit előfordulás van még Buckingham közelében (Québec, Kanada), ahol a pegmatit széle mentén néhány cm–dm vastag grafit telérek fordulnak elő. Az USA-ban az első működő grafitbánya (1640, Sturbridge, Massachusetts) szintén ilyen típusú volt, akárcsak a legnagyobb grafit előfordulás Dillonban (Montana, USA) (Kužvart, 1984).



2. ábra: 8 cm × 6,1 cm × 5,2 cm-es nagyságú kőzet, kétoldalán teléres megjelenésű grafittal (Bogala grafitbánya, Srí Lanka)²

² A kép forrása: <https://www.mindat.org/photo-276896.html>

3.4. METAMORF GRAFITTELEPEK

Metamorf grafittelep vagy a szén feldúsulásával és kikristályosodásával képződik (általában regionális) metamorfózis során (4A típus), vagy a kőzetekben lévő széntartalmú anyagok in-situ újrakristályosodásával (4B típusú metamorfizált telepek) (Kužvart, 1984).

3.4.1. 4A TÍPUSÚ METAMORF GRAFITTELEPEK

A szén jelen volt az eredeti üledékes kőzetben vagy szerves anyag maradványaként, vagy bitumenes és szenes anyagként, amelyet a fluidumok 650 °C körüli hőmérsékleten elbontottak. Az így képződött CO_x-ok 650 °C alatti hőmérsékleten reakcióba léptek a hidrogénnel, melyből grafit és víz képződött. Ilyen típusú telepeknél a kristályos palákban, gneiszekben, márványokban és kvarcitokban előforduló grafit megfigyelhető egyrészt pikkelyes formában, elszórtan a kőzetekben (1–2%), valamint rétegekben és lencsékben feldúsulva (akár 30% is) (Kužvart, 1984).

Ilyen típusú telepre példa az archaikumi ukrán pajzs, ahol a legtöbb kristályos pala 1% körüli grafitot tartalmaz, a legproduktívabb biotit-szericit és klorit gneiszek legalább 3% grafitot tartalmaznak, maximálisan akár 15%-ot is. A legdúsabb részek 15–250 m vastagságúak és 3 km hosszúak. A grafitot a felszínre kibukkanó gneiszből nyerik ki a Krivoi Rog területen (például Zavalev-telep), illetve az Azovi-tenger ÉNy-i partja mentén, továbbá az Urál-hegység keleti részén, illetve Madagaszkáron is (Kužvart, 1984).

3.4.2. 4B TÍPUSÚ METAMORFIZÁLT GRAFITTELEPEK

4B típusú metamorfizált grafittelepek vagy kontakt metamorfózis vagy regionális metamorfózis során képződnek szerves anyag tartalmú üledékekből. A legjobb grafit telepek (tömeges megjelenés, 60–95% grafit tartalom) nyilvánvalóan szénben gazdag üledékek metamorfózisával képződnek. Járulékos ásványként megfigyelhető pirit, kalcit, apatit, rutil és egyéb ásványok (Kužvart, 1984).

Trieben és Kaisersberg (Ausztria) közelében öt felső-karbon korú széntelep kontakt metamorfózisával grafittelepek jöttek létre, amelyek vastagsága eléri az 5 m-t, tisztaságuk pedig 55–80% közötti. Ilyen típusú telepek ismertek még Olaszországból és Dél-Koreából (Kužvart, 1984; Dill, 2010).

Széntelep metamorfózisánál (Kužvart, 1984; Kogel et al., 2006; He et al., 2017) a hő és nyomás hatására a kőszénből (szerves szén forrás) „amorf” típusú grafit képződik. Ez a folyamat a szennyeződések teljesen kiiktatja a kőszénből, elpárologtatva az oxigént,

hidrogént, nitrogént és a ként (Kimber és Gray, 1967; Solomon et al., 1988; Stiller et al., 1998). Ez az elpárolgotatás szinte teljesen tiszta grafitot eredményez (Jara et al., 2019).

Továbbá grafittelepek jönnek létre szerves anyag tartalmú, bitumenes vagy szenes anyagot tartalmazó, C-gazdag agyagos palák, mészkövek vagy homokkövek regionális metamorfózisával. A metamorfózissal ezekből a kőzetekből grafitos fillitek, csillámpalák, gneiszek, márványok vagy kvarcitok képződnek (Kužvart, 1984). A grafit kristályossága a metamorfózis fokával van kapcsolatban. A legkedvezőbbek az amfibolit és granulit fáciesű metamorf képződmények (Dill, 2010). Egy grafitos sorozat szénben szegényebb részeinél az uralkodó ásványok például a csillámok (amelyek párhuzamosan össze is nőhetnek a grafit pikkelyekkel), valamint a kvarc, földpátok, gránátok, magnetit, pirit és pirrotin. Az utolsó két ásvány jelenléte azt jelzi, hogy a kiindulási kőzet anaerob környezetben képződött, a biogén kén megkötésével. A grafit biogén eredetére pedig a S mellett a V és P jelenléte, valamint a szén izotópos összetétele utal (Kropotova et al., 1976; Kužvart, 1984).

Csupán néhány példa ilyen típusú telepre: Pargas, Finnország; Sierra de Aracena, Spanyolország; Québec és Ontario telepei, Kanada és New York állam, USA (Metzger, 1954; Rodas et al., 2000; De Boorder et al., 2006). A Cseh-masszívum DNy-i szélénél is számos ilyen grafittelep fordul elő: Kropfmühl-Pfaffenreuth, Németország; Mühlberg, Ausztria; Černa, Český Krumlov, Koloděje nad Lužnicí és Staré Město, Csehország (Dill et al., 2008).

3.5. REZIDUÁLIS GRAFITTELEPEK

Mállás és lepusztulás során az üledékes képződményekben feldúsuló anyag. Feltehetően a legnagyobb pikkelyes grafittelepek Madagaszkáron fordulnak elő (akár 3 mm-es átmérőjű pikkelyek), amelyek egy 640 km hosszú gneisz és csillámpala övben található. Ezeket a telepeket 1908 óta művelik, főképpen Tamatave és Marovintsy között. Vastagságuk 3–30 m között változik, 4–11% széntartalommal. A telepeket főként a felszínhez közeli részeken művelik, mivel azokat trópusi mállás érintette, és így reziduálisan grafitban dúsult (gránát, korund, turmalin és magnetit mellett) (Murdoch, 1967; Kužvart, 1984; Fogg és Boyle, 1987).

4. MAGYARORSZÁGI ÉS KÁRPÁT-ÖVEZETBELI LELŐHELYEK GENETIKAI ÉS MEGJELENÉSI TÍPUSAI

4.1. MAGYARORSZÁGI GRAFIT ELŐFORDULÁSOK

Az előző fejezetben ismertetett genetikai típusok alapján, Magyarországon grafit előfordulások főként a metamorf képződményeket hordozó hegységi területeken ismertek, akár felszínen, akár mélyfúrásból. Szerves anyag tartalmú üledékes kőzetek regionális metamorfózisával képződött grafit a Soproni-hegységben, a Kőszegi-hegységben, az Upponyi-hegységben, a Cserehátban és a Szendrői-hegység területén.

Kósa és Fazekas (1981) szerint a Soproni-hegység Fertőrákosi-palasziget csillámpalájában (Fertőrákosi Kristályospala Formációcsoport és Vöröshídi Csillámpala Formáció, mai elnevezéssel Fertőrákosi Metamorfit Komplexum) gyakori jelenség a szenesedés-grafitosodás, a szénülés foka az antracit állapotot el nem érő kőszéntől a grafitig terjed. Megfigyeléseik alapján az összetekben található grafit jelenléte minden esetben szerkezetileg erősen igénybevett zónákhoz, síkokhoz kapcsolódik, a grafitot tektonitnak tekintik.

Kőszeg, Velem és Cák térségében (Kőszegi-hegység) üledékes kőzetek kismélységi metamorfózisával fillit, mészfilit, kvarcfilit, kristályos mészkő és metakvarcit képződött, amelyekben néha grafitszerű (antracitnak, metaantracitnak is nevezett) anyag figyelhető meg (Szakáll et al., 2016). A fillitekben jól kristályos, hexagonális pikkelyekben megjelenő grafitot is kimutattott Demény (1986).

Az Upponyi-hegység paleozóos korú kőzeteit változó intenzitású, nagyon kismélységi (anchizónás) és kismélységi (epizónás) dinamotermális metamorfózis érte (Árkai et al., 1981). Fülöp (1994) szilur-karbon korú, anchizónás metamorfózist szenvedett sötétszürke, fekete agyagpala, kovapala és radioláriás lidit váltakozását írta le Nekézseny és Dédestapolcsány térségében (Tapolcsányi Formáció). Árkai et al. (1981) szerint az agyagpalában található grafitszerű szerves anyag a grafithez áll szerkezetileg a legközelebb, amely a palássági síkok mentén, a nyírt zónákban alakult ki.

A Cserehát és Szendrői-hegység paleozóos korú kőzeteit a nagyon kismélységi közepes fokozat alsó határáig terjedő metamorf hatás érte (Árkai, 1977). Raincsákné Kosáry (1978) a devon korú szürke, sötétszürke vagy fekete agyagpalában, kovapalában, fillitben és metahomokkőben (Szendrői Fillit Formáció) esetenként változó mennyiségű grafitszerű anyagot észlelt. 1990-ben folyt egy átfogó földtani-geofizikai kutatás a szendrői-hegységi

grafitos, metaantracitos palák vizsgálata céljából (Hermesz, 1990), amely során főként a Szendrőlád ÉK-i részén lévő Helle-patak menti kibúvásokat vizsgálták, de gyűjtöttek mintákat többek között a szendrői palabányából és Gadna környékéről is. Vizsgálataik alapján a kőzetekben észlelt szénült anyag átalakultsági foka a mérsékelten rendezetlen szerkezetű grafit állapotnak felelt meg (Hermesz, 1990).

Több fúrásos kutatást is végeztek a Cserehát és Szendrői-hegység területén. Árkai (1977), valamint Földvári M. (1973) vizsgálatai alapján a kőzetek fekete színét okozó, grafitszerűnek (grafitoidnak, metaantracitnak) nevezett anyag nem éri el a grafitra jellemző kristályossági fokot. Ők diszperz eloszlású, alapvetően gyengén rendezett szerkezetű, szénült anyagok keverékének írták le. Röntgendiffrakciós vizsgálattal azonban mégis sikerült újabban grafitot kimutatni kicsiny pikkelyes fészkek formájában a paragonittartalmú fillit kalcitos-kaolinites érkitöltéseiben (Szakáll et al., 2016). Továbbá a Szendrőlád-6 jelű fúrás mintáit (Szendrőládi Mészke Formáció) optikai mikroszkóppal vizsgálva szintén sikerült a grafit jelenlétét egy esetben igazolni, a többinél viszont csak a metaantracit állapotot elérő szerves anyagot (Hámorné Vidó, 2014).

Az előbb felsorolt, regionális metamorfózis során képződő grafit előfordulások mellett piroklasztitok és vulkanitok kőzetzárvényaiban is megfigyelhetők grafitszemcsék. Vásárosmiskén (Alpokalja, Kemenes-alja) egy felhagyott kőfejtőben például 1–2 mm-es, pikkelyes halmazokat alkotó grafitkristályok észlelhetők kvarc-xenolitban (3. ábra, Szakáll et al., 2016). Továbbá széntelepek kontakt metamorfózisa során képződő grafit nyomokat sejtenek a Mecsekben (például Magyarmecske közelében) (Bodoky et al., 2004; Földessy et al., 2013).



3. ábra: Grafitlemezek kalcitos érben. Képszélesség: 3 mm. Mesics Gábor gyűjteménye, Vásárosmiske, felhagyott kőfejtő (Szakáll et al., 2016)

4.2. KÁRPÁT-ÖVEZETBELI GRAFIT ELŐFORDULÁSOK

A Kárpát-övezetben is a metamorf képződményekben ismertek grafit előfordulások (Földvary, 1988), leggyakoribb a regionális metamorfózis során képződő genetikai típus. A grafit megjelenése, kristályossága és mennyisége a protolit kőzet szerves anyag tartalmától, illetve a metamorfózis fokától függ (Dill, 2010).

Csehországban (Uherský Brod közelében, Nezdenicénél és Ordějovnál) finomszemcsés grafit található andezit repedéseiben, lokálisan kalcittal társulva (Szakáll, 2002).

Szlovákiában technológiai szempontból két grafit típust különböztetnek meg, az egyik a mikrokristályos vagy „amorf” grafit, a másik a kristályos lemezes-pikkelyes grafit (Očenáš et al., 1992). Az első típusra a szén alacsony fokú grafitosodása jellemző, ilyen például a kadlubi telep (Sombathy, 1949), ahol a grafitpala-lencsék karbon korú fillitek és arkózák fedőjében alakultak ki (Zuberec et al., 2005). Ez a típus a Tátrikum, Veporikum és Gömörikum grafitos paláiban gyakori, a grafit kőzetalkotó komponensként mikrokristályos (0,001–0,1 mm-es pikkelyek), illetve kriptokristályos („amorf”, <0,001 mm-es szemcsenagyság) formában jelenik meg. Továbbá finom érkitöltések formájában magnezittelepekben is gyakran megfigyelhető (Bačo et al., 2015).

A második típusnál a kőzetet közepes vagy magas fokú metamorfózis érte, ilyen például a rimakokovai (Kokava nad Rimavicou) telep (Petro et al., 1998; Bačo et al., 2015). Ennél a grafit technológiai szempontból makrokristályos megjelenésű, akár 0,8 mm-es nagyságú pikkelyek is megfigyelhetők. Zuberec et al. (2005) szerint Rimakokovánál található az egyetlen, jelenleg potenciálisan gazdaságosnak tekinthető grafittelep, azonban előfordulások ismertek még többek között Kadlubnál, Murányhosszúrénél (Muránska Dlhá Lúka), Csavajónál (Čavoj), Gápelnél (Gápel’), Breznóbányán (Brezno) és Kozlovonál (Zuberec et al., 2005; Bačo et al., 2015).

Lengyelországban, a Chochołowska-völgyben néhány metamorf kőzetben (palákban és kvarcitokban) elszórva apró, <0,2 mm-es nagyságú grafit szemcsék figyelhetők meg (Kapera és Michalik, 1995). A Myślenice közeli fúrásnál pedig palákban is észlelhető volt grafit kvarccal, kaolinnal és vermikulittal társulva (Szakáll, 2002).

A Máramarosi kristályos masszívum metamorf kőzeteiben (Rahó/Rakhiv és Csivcsin-hegység térségében, Ukrajna) a grafitok és „grafititek” széleskörűen elterjedtek. A Csivcsin-hegységben palákból, kvarcitokból és kvarcitos palákból, valamint flis agyagjaiból „metaantracit” ismert. Továbbá grafitos kőzeteket találtak az Aľbin folyó környezetében, 1,5

km-es hosszön 12 pontnál. Ezeken kívül új grafit előfordulásokat figyeltek még meg Gyertyánligetnél (Kobiljetszka Poljana), valamint a Berlebashka-hegy és a Kvasna-hegy gerincén. A grafit általában vékony rétegeket, lencsákat és fészkeket alkotó, kisebb aggregátumokban észlelhető, amelyek vastagsága akár 20 cm-es is lehet (Szakáll, 2002).

A grafit szinte majdnem minden nagyobb metamorf sorozatban előfordul a romániai Kárpátokban, erre példa a Tulgheş Formáció-Csoport, Keleti-Kárpátok (Olaru, 2001). A formáció-csoportot a kambrium során zöldpala fáciesű metamorfózis érte (Bercia et al., 1976), Vodă (2000) szerint polimetamorfózis. Nem ritkák a grafitpalák, grafit-szericit palák, fekete kvarcitok a formáció-csoportban. A kőzetek fekete színét a grafit adja, amely az eredetileg üledékes kőzetekben lévő szerves anyag metamorfózisával képződött (Olaru, 2001).

A Déli-Kárpátokban Schelánál, a Zsil-völgye mentén (Schela Formáció) a kőzeteket kisméretű metamorfózis érte (zöldpala fácies), amely metakonglomerátumok, metahomokkövek, pirofillit palák, kloritoid palák, antracit-tartalmú kvarcitok és grafit-tartalmú palák képződéséhez vezetett (Mutihac és Popescu, 1982; Barzoi és Guy, 2002). A metamorfózisnak el lehet különíteni egy progresszív állapotát a nyírési zónákhoz kötődő (Berza et al., 1983) kloritoid-pirofillit-klorit és meta-antracit/pre-grafit paragenezisekkel (Mutihac és Popescu, 1982; Iancu et al., 1984), amelyet az agyagásványok enyhe retrográd újrakristályosodása követett (Iancu et al., 2005; Ciulavu et al., 2008).

Iparilag fontos dúsulásai a grafitnak azonban csupán az Olt völgye (Cătălinul, Ungurelaş; Déli-Kárpátok) mentén ismertek (USGS, 1985; Szakáll, 2002; Ion et al., 2017).

5. A VIZSGÁLT TERÜLETEK BEMUTATÁSA, TEREPEBJÁRÁS ÉS MINTAGYŰJTÉS

Ebben a fejezetben ismertetem az egyes kiválasztott lelőhelyeket. Egy-egy alfejezetben bemutatom röviden a vizsgált területek földtanát, a terepi észleléseket (ahol lehetséges), valamint a minták makroszkópos vizsgálatát. Célom, hogy egy átfogó képet adjak az egyes lelőhelyekről a későbbi vizsgálatokhoz és az eredmények értelmezéséhez.

5.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

A terepebjárás és mintagyűjtés során az Upponyi-hegységben található, Dédestapolcsány település melletti Rágyincs-völgyből gyűjtöttem kőzetmintákat (I. melléklet). Három felszíni feltárásból történt a mintagyűjtés, azonban az első és harmadik feltárási kőzetanyagának hasonlósága miatt csak az első két feltárásból származó mintákat vizsgálom dolgozatomban részletesen (4. ábra).

Az első feltárási patak bal partjától kb. 2 m-re található, pontos koordinátái: EOVS X: 317 255 és EOVS Y: 755 665. A második feltárási patak jobb partján található, kb. 2 m-re, az első feltárástól folyásirányban kb. 10 m-re. A mintagyűjtés során különösen a nyírási zónákból származó metamorfizált, fekete kőzetek gyűjtésére törekedtem.

A feltárási megtalálása mellett fontos feladat még azok földtani környezetének megismerése és leírása, az észlelések pontos földtani dokumentációja. A terepi földtani dokumentáció során szintén az első két feltárási, és azok szűk környezetének a vizsgálata került előtérbe. A dokumentálás során használt eszközök a mérőszalag és a geológuskompasz volt. A földtani dokumentáció részletes leírása a 2017-es TDK dolgozatomban (Majoros, 2017) olvasható.

DTAP-1 minta: Az 1. feltárásból származó kézipéldányokon (4. ábra bal oldali képe) kiváló palás elválás észlelhető. A kőzet színe fekete, puha, körömmel is karcollható vékony repedéskitöltésekkel. A repedéskitöltésekben szabad szemmel nem láthatóak szemcsék, átlátszatlan, fénytelen, lemezes szerkezetű. Ezüstösen csillogó pikkelyek is megfigyelhetők a kőzetmintákon (csillámok) (Majoros, 2017).

DTAP-2 minta: A 2. feltárásból származó kézipéldányokon (4. ábra jobb oldali képe) fekete színűek, fémes fényűek, palás elválásuk síkok mentén kiváló. Az 1. feltárási mintájához hasonlóan jellemző a puha fekete lemezes vékony repedéskitöltések jelenléte. A kőzeteken észrevehetőek továbbá szabálytalanul elszórt fehér, porszerű szemcsék, illetve rozsdabarna foltok (vas-oxidok) (Majoros, 2017; Leskóné Majoros et al., 2022a).



4. ábra: A dédestapolcsányi 1. feltárás (balra fent) és 2. feltárás (jobbra fent) és az azokból gyűjtött kőzetminták (DTAP-1 és DTAP-2) (Majoros, 2017)

5.1.1. TAPOLCSÁNYI FORMÁCIÓ

A Tapolcsányi Formáció valószínűleg késő ordóvícium – kora devon korú (O_3 – D_1), ősmaradványok alapján a szilur kor igazolt (Babinszki et al., 2023). Az Upponyi-hegységben, illetve a Rudabányai-hegység DK-i peremén (az Upponyi-hegység ÉK-i folytatásában) jelenik meg, ahol mindenütt ÉK–DNY-i csapású, max. 1 km széles, tektonikai síkokkal határolt sávban érintkezik környezetével (Szentpétery és Less, 2006). A formáció szürke, sötétszürke, fekete agyag- és kovapala, valamint fekete lidit (átkristályosodott radiolarit) általában vékony rétegeinek váltakozásából áll bázisos metavulkanit betelepülésekkel (Fülöp, 1994; Gyalog, 2005; Less et al., 2005; Szentpétery és Less, 2006). Az agyagpala–kovapala–lidit összlet korrelálható a Karni-Alpok ordóvícium–szilur határtól a variszkuszi flisstádium kezdetéig (Ausztriában tournaisi–viséi határ, az olasz oldalon késő-viséi) terjedő korú Bischofalmi fáciesével (Pelikán et al., 2006). A formáció az üledékképződési térség jelentős kimélyülésére utal. A bázisos vulkanitok közbetelepülései a riftesedés megindulását jelzik, a vulkáni működés maximumát a devon középső részében érthette el (Pelikán et al., 2006). Fülöp (1994) szerint a kovapala az eredetileg agyagos üledék másodlagos kovásodása révén keletkezett.

A pala ásványos összetételében uralkodó a kvarc, jelentős a szericit és helyenként a pirit, alárendelt a kalcit és a sziderit. Fedőjében (más vélemények szerint vele összefogazódva) a Strázsahegyi Formáció települ, amelynek olisztosztrómái (és maguk a schalstein típusú vulkáni törmelékfolyások is) az aljzat erős tagoltságáról, a vulkáni működést kísérő intenzív fenékmozgásokról tanúskodnak. Az ofiolitsorozat típusos tagjai hiányoznak, vagyis a riftesedés során valódi óceáni aljzat nem keletkezett (Pelikán et al., 2006). A formáció euxin mélyvízi fáciesű, változó grafit- és pirittartalommal, vasas-mangános ércesedéssel. Mélytengeri medencében, időszakos törmelékanyag-behordással képződött karbonát-kompenzációs szint alatti üledékekből áll, átalakultsági foka anchimetamorf, vastagsága kb. 100 m, max. 400 m (Fülöp, 1994; Gyalog, 2005; Less et al., 2005; Szentpétery és Less, 2006).

Árkai et al. (1981) vizsgálatai alapján háromféle szenesedett növénymaradvány található a Tapolcsányi Formáció agyagos és aleuritos paláiban, illetve kovapaláiban: antracit, metabituminit (mozaik reflexióval) és grafit. Az antracit legnagyobb része gyűrt grafit sávokká alakult át a nyírt palássági síkok mentén (átlagos szemcse szélesség: <1 µm, maximum: 40 µm), ugyanakkor a nyírési szalagok között, a nyomásmentes részeken az antracit megőrződött. A grafit képződését elsősorban a nyírófeszültség lokális emelkedése okozta, amely már az anchi- és epizóna határán játszódhatott le kb. 300 °C-on (Winkler, 1976 alapján). XRD mérésekkel igazolták, hogy a mikroszkópban megfigyelt jól kristályos grafit mellett, a grafit-d₂ (mérsékelten rendezetlen szerkezetű grafit) állapotú anyag mennyisége is figyelemre méltó (Árkai et al., 1981).

5.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD

A Szendrői-hegységből egyrészt a Szendrőlád-6 jelű földtani alapfúrás kőzetanyagának három különböző mélységből vett kőzetmintáit vizsgálom, valamint a Szendrőlád település ÉK-i részén, a Helle-patak menti felszíni feltárásból gyűjtött kőzetmintákat (5. ábra, II. melléklet). A feltárás pontos adatai: EOY X: 335 730, EOY Y: 776 319. A szálfeltárás a Helle-patak bal partján kb. 2 m-re található, 2–5 méteres magasságban és 15 m hosszan (Majoros és Kristály, 2020). Dolgozatomban a feltárás három különböző részéből vett mintaanyagát vizsgálom (továbbiakban SZL-1A, SZL-1B és SZL-1C).

A Szendrőlád Szl-6 jelű földtani alapfúrás, amely a Mészégető-völgyben mélyült (a fúrás pontos adatai: EOY X: 334 774, EOY Y: 774 145, EOY Z: 224, mélység: 300 m; az SZTFH adatai alapján) a Szendrőládi Mészke Formációt harántolja (II-IV. mellékletek).

Mivel a fúrás rétegsora alapján (IV. melléklet) a sötétszürke-fekete sávós, erősen pirites agyagpala-fillit 278–297,5 m-es mélységben található (Fülöp, 1994), ezért a fúrás 278–295 m közötti szakaszát vizsgálom a grafit szempontjából (Majoros, 2018).

SZL-1A minta: A kőzet sötétszürke színű, lemezesen-levelesen elváló, irányított szövetű. Szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék, fémes fénye van. Fehér erek (kalcit) járják át a mintát, valamint felületén rozsdabarna foltok láthatóak (vas-oxid).

SZL-1B minta: A kőzet leveles-lemezes elválású, irányított szövetű, sötétszürke színű. Szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék, fémes fénye van. Az elválási síkok mentén 0,5–1 mm vastag fehér erek (kalcit), 0,5 mm-es nagyságú, fehér, becsillanó kristályok (kalcit), valamint sárgásbarna foltok (vas-oxid) figyelhetők meg.

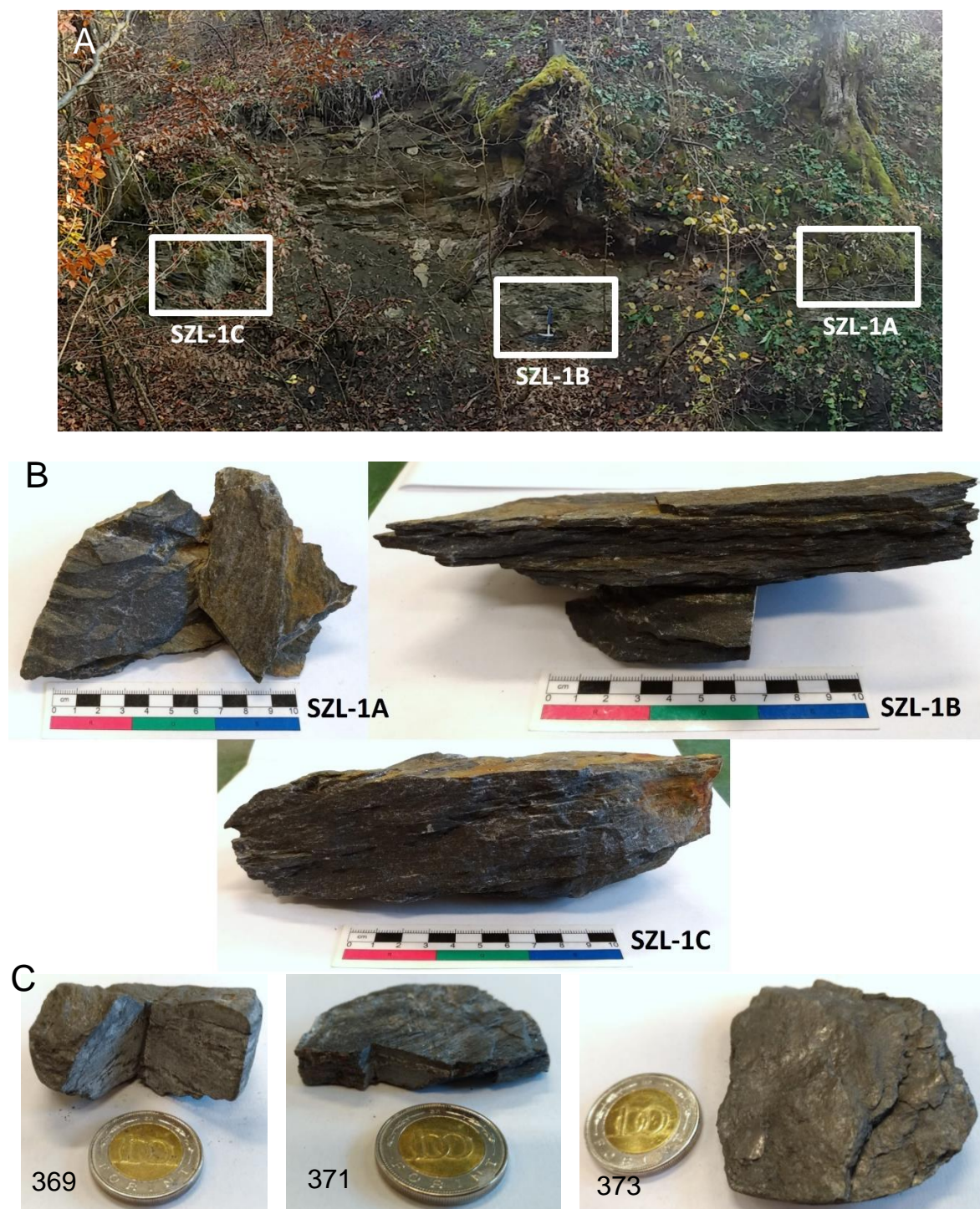
SZL-1C minta: A kőzet leveles-lemezes elválású, de kompaktabb, mint az előző két minta. Sötétszürke színű, szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék. Irányítottan elhelyezkedő, 0,5–1 mm vastag fehér erek járják át a mintát (kalcit). Jól hasadó, fekete, üvegfényű, 1–2 cm-es nagyságú fészkek észlelhetőek a kőzetben. Továbbá vörösesbarna foltok (vas-oxid); finomszemcsés, fehér, matt halmazok; illetve finomszemcsés, zöld, matt halmazok figyelhetők meg.

SZL-6, 369-es minta: 278–295 m-es mélységből vett minta. A mintazacskón feltüntetett mélységköz bár 17 m, pontosabb mélységadat nem adható, mert benne csupán kőzetmorzsalék és nagyjából 10–15 darab jelöletlen kőzetminta található, a legnagyobb minta nagysága ~5×3 cm (5. ábra, C része). A kőzet világosszürke színű, finomszemcsés, irányítottság és lemezes elválás figyelhető meg rajta. Az irányítottsággal párhuzamosan elhelyezkedő, sötétszürke, deformált (redőzött), tized mm-es vastagságú, finomszemcsés anyaggal kitöltött erek jelennek meg. Ezek gyakran meg is szakadnak. Továbbá mm-es méretű piritek, valamint egy helyen borvörös színű, mm alatti szemcse is megfigyelhető (Majoros, 2018).

SZL-6, 371-es minta: 288 m-es mélységből vett minta. A kőzet közepszürke színű, fémes fényű, lemezesen elváló (palás). Az elválási síkokon lineáció figyelhető meg, a szemcsék szabad szemmel nem láthatóak. A palássággal párhuzamosan 1 mm széles, matt, fehér erek figyelhetők meg, amelyekben szabad szemmel látható, az akár mm-es méretet is elérő pirit hexaéderek jelennek meg. A fehér erek környezetében 0,1 mm-es, borvörös becsillanó kristályok is előfordulnak halmazokban (Majoros, 2018).

SZL-6, 373-as minta: 291 m-es mélységből vett minta. A kőzet közepszürke színű, fémes fényű, finomszemcsés, lemezesen elváló, irányított szövetű. Az elválási síkokkal

párhuzamosan matt, fehér, pár mm-es halmazok figyelhetők meg, továbbá tized mm-es pirítókristályok (Majoros, 2018).



5. ábra: A – A szendrőládi terepbejárás során észlelt felszíni feltárás a Helle-patak mentén, fehér téglalapokkal jelölve a mintagyűjtés helyeit. B – A Helle-patak mentén felszíni feltárásból gyűjtött kőzetminták (SZL-1A, SZL-1B és SZL-1C). C – A szendrőládi Szl-6 jelű földtani alapfúrás különböző mélységeiből vett kőzetpéldányok: 369 (balra), 371 (középen), 373 (jobbra). Szendrőlád (Majoros, 2018; Majoros és Kristály, 2020 nyomán)

5.2.1. SZENDRŐLÁDI MÉSZKŐ FORMÁCIÓ

A Szendrőládi Mészke Formáció ($^sD_{2-3}(^sD)$) a Szendrői-hegység déli részének egyik legnagyobb elterjedésű képződménye. Középső-késő-devon korú, vastagsága legalább 400 m, fekszik az Irotai Formációra. A Szendrőládi Mészke Formációra települ, illetve azzal részben összefogazódik a Bükkhegyi Márvány Formáció (Fülöp, 1994; Gyalog, 2005; Pelikán et al., 2006).

Pelikán et al. (2006) szerint a formáció üledékképződési térsége törmelékes selfterület volt, foltzátanyokkal és köztük levő medencékkel, jelentős előtéri törmelékbeszállítással. Uralkodóan sötétszürke-fekete, rétegzett vékonypados finomkristályos medence fáciesű mészkeből és sötétszürke aleuritből, valamint finomhomok rétegeket tartalmazó finomkristályos mészkeből áll. A helyenként betelepülő világosszürke-szürke durvakristályos, zátony fáciesű (korallós bioherma) mészke viszonylag jó megtartású tabulata korallokat tartalmaz. Előfordulnak tisztán törmelékes (fillit-metahomokkő) szakaszok is. Megfigyeléseik alapján négy, egymással összefogazódó litológiai, valamint fácies típus jellemző a formációra: (1) kékesszürke, fehér sávós, durvakristályos márvány (bioherma fácies); (2) sötétkékesszürke, finomabb kristályos mészke (medence fácies); (3) kékesszürke, homokos mészke (medence fácies); (4) világosszürke metahomokkő és sötétszürke fillit (medence fácies) (Fülöp, 1994; Gyalog, 2005; Pelikán et al., 2006).

Az érett törmelékanyag hosszabb folyóvízi szállításról és kis reliefenergiájú, viszonylag lapos szárazföldi előtérről tanúskodik. Kapcsolatai, megfelelői a kelet-alpi grazi paleozoikum korallós, karbonátos-törmelékes, középső-devon formációiban található (Barrandenkalk, Hubenhalkalk, Quadrigenumkalk, Calceolaschichten) (Hermesz, 1990; Pelikán et al., 2006).

Fülöp (1994) megemlíti, hogy helyenként grafit is előfordulhat, például Szendrőlád ÉK-i részén, a Közép-bérc DK-i oldalán lévő Helle-patak bevágásában. Az észlelt ásványgyűttes, illetve a szericit, illit és grafit kristályossági foka alapján a metamorfózis a zöldpala fácies kvarc-albit-muskovit-klorit alfáciesébe sorolható (Fülöp, 1994).

5.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ

A terepbejárás és mintagyűjtés során a Szendrői-hegységben található, Szendrő település melletti egykori palabányából gyűjtöttem kőzetmintákat (6. ábra, V. melléklet). A palabánya pontos adatai: EOY X: 340 264, EOY Y: 775 494. A mintagyűjtés a nyírási zónában elhelyezkedő kőzetekre koncentrált, mivel csak itt fordul elő fekete (potenciálisan grafittartalmú) fillit.



6. ábra: A szendrői terepbejárás során észlelt felszíni feltárás az egykori palabányában, valamint az onnan gyűjtött kőzetminták (SZ-1, SZ-2 és SZ-3) (a szerző saját szerkesztése)

Sz-1 minta: Sötétszürke színű, selymes fényű, finomszemcsés kőzet, pora barnásszürke színű. Irányított szövetű, foliált, lemezesen elváló. Elvértve mm-es nagyságú fehér és rozsdabarna (vas-oxidos) halmazok figyelhetők meg rajta.

Sz-2 minta: Középszürke színű, selymes fényű, finomszemcsés kőzet. Irányított szövetű, foliált, lemezesen elváló. Elvértve mm-es nagyságú fehér és rozsdabarna (vas-oxidos) halmazok észlelhetők rajta.

Sz-3 minta: Sárgás világosszürke színű, selymes fényű, finomszemcsés kőzet. Irányított szövetű, foliált, lemezesen elváló. Barnássárga finomszemcsés sávokkal váltakozik mm-enként.

5.3.1. SZENDRŐI FILLIT FORMÁCIÓ

Sötétszürke vagy fekete fillit összlet (Babinszki et al., 2023). Alsó részében gradált homokkő-, homokkőpala-, mészkő-olisztosztróma és allodapikus mészkőrétegek települnek (Meszesi Tagozat). A mészkő-olisztosztrómák anyaga uralkodóan a Verebeshegyi Mészkőből és a Rakacai Márványból származik. Középső részét disztális homokkőturbiditek jellemzik (Pestavölgyi Tagozat), felső részét pedig csaknem monoton fillit alkotja (Palabányai Tagozat). A mélytengeri turbidit (variszkuszi flis) összlet alpi, kistokú metamorfózist szenvedett. Vastagsága kb. 500–600 m, karbon korú (^{sd}C) az olisztolitból és allodapikus mészkövekből leírt conodonták alapján (Babinszki et al., 2023).

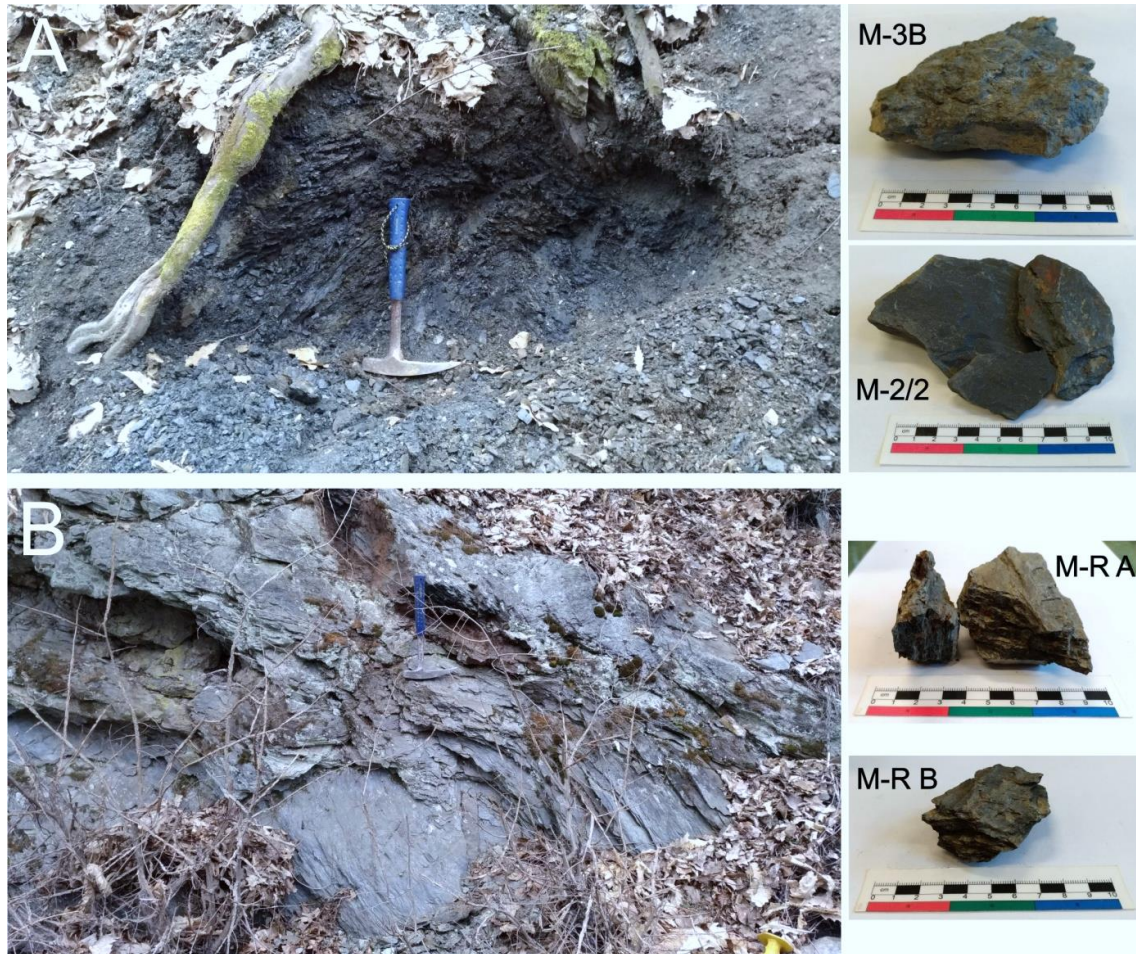
5.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES

A terepbejárás és mintagyűjtés során a Szendrői-hegységben található Meszes és Rakacaszend települések között elhelyezkedő Vasbánya-hegyről, valamint a két település közötti útbevágásból származó felszíni feltárásokból gyűjtöttem kőzetmintákat (7. ábra, VI. melléklet).

A vasbánya-hegyi feltárás 170 m-re található a műúttól, pontos EOV koordinátái: EOV X: 345 884, EOV Y: 781 018. A feltárás a vízmosás jobb partján helyezkedik el, kb. 4 m széles és 3 m magas. Erősen gyűrt, töredezett, aprózódott az itt található kőzetanyag. Kb. 10 cm-enként barna és fekete színű rétegek váltakoznak, de a feltárás alsó részén a fekete színű réteg vastagabb (>30 cm).

A Meszes és Rakacaszend települések közötti útbevágás a 7. ábra B részén látható. A feltárás pontos adatai: EOV X: 346 753, EOV Y: 782 342. A szálfeltárás az út mellett található, a műúttól kb 3 m-re, ~10 m széles és 2 m magas.

Mind a két feltárás a Szendrői Fillit Formációba tartozik.



7. ábra: A – A vasbánya-hegyi feltárás, mellette a vizsgált kőzetminták (M-3B és M-2/2),
 B – a Meszes és Rakacaszend települések közötti útbevágás, mellette a vizsgált
 kőzetminták (M-R A és M-R B) (Leskóné Majoros et al., 2021 nyomán)

M-2/2 minta: A kőzet finomszemcsés, szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék, fekete színű, pora is fekete. Irányított szövetű, levelesen-lemezesen elváló, az elválási felületek fémes fényűek. Vékony (<1 mm-es) fehér erek és 2–3 mm átmérőjű fehér fészkek (kalcit), valamint rozsdabarna foltok (vas-oxid) figyelhetők meg.

M-3B minta: A kőzet sötétszürke színű, fémes fényű, finomszemcsés (nem láthatóak szabad szemmel a szemcsék). Irányított szövetű, levelesen elváló, kézzel könnyen morzsolható. Körömmel karcollható, porszíne fekete/sötétszürke. Elvértve mm-es fehér halmazok figyelhetők meg, valamint cm-es nagyságú rozsdabarna foltok (vas-oxid).

M-R A és M-R B minta: A kőzetek fekete színűek, finomszemcsés, szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék. Lemezes-leveles elválásúak, viszont tömörök, nem szedhetők szét kézzel. 1–2 mm vastag fehér erek (kvarc) járnak át a kőzeteket, valamint rozsdabarna foltok (vas-oxid) figyelhetők meg.

5.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND

A terepbejárás és mintagyűjtés során a Szendrői-hegységben található Rakacaszend település melletti Délő-völgyből gyűjtöttem kőzetmintákat felszíni feltárásból (8. ábra, VII. melléklet). A feltárás pontos koordinátái: EOVS X: 347 805, EOVS Y: 784 726. A mintagyűjtés a mészkőben található fillit lencséből történt, amely a patak bal partján található, kb. 3–4 m hosszan, kb. 3–4 m magasságig. A feltárás a Szendrői Fillit Formációba tartozik.



8. ábra: A rakacaszendi terepbejárás során észlelt felszíni feltárás, és az onnan gyűjtött kőzetminták (RSZ-1, RSZ-2 és RSZ-3) (a szerző saját szerkesztése)

RSZ-1 minta: A kőzet fekete színű, finomszemcsés, szabad szemmel nem láthatóak a szemcsék. Irányított szövetű, foliált, fekete-fehér sávok váltakoznak, a fekete sáv körömmel karcolható. Rozsdabarna foltok (vas-oxid) figyelhetők meg.

RSZ-2 minta: A kőzet fekete színű, puha, körömmel karcolható, porszíne is fekete. Finomszemcsés, leveles-lemezes elválású, könnyen szétesik lemezekre. A lemezek között fehér, becsillanó ásványok figyelhetők meg (csillámok), valamint rozsdabarna foltok (vas-oxid).

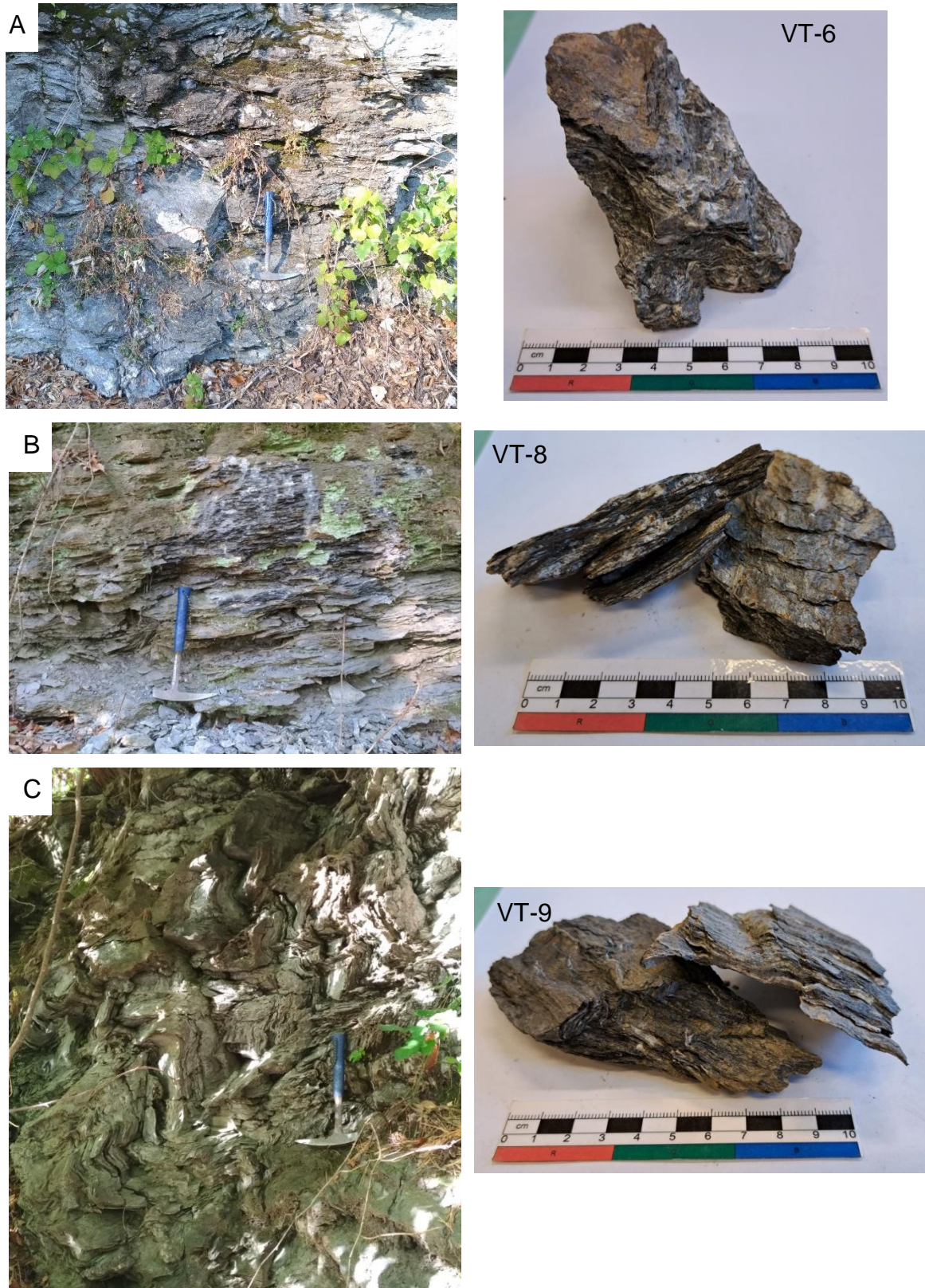
RSZ-3 minta: A kőzet lemezes-leveles elválású, könnyen szétválk lemezekre. Fekete színű, körömmel karcolható, pora is fekete. Fehér erek figyelhetők meg benne (kvarc), valamint rozsdabarna foltok (vas-oxid).

5.6. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM

A terepbejárás és mintagyűjtés során a Kőszegi-hegységben található Velem településtől É-ra elhelyezkedő Tervút mentén, összesen 11 felszíni feltárásból gyűjtöttem kőzetmintákat. A vizsgált szakasz pontos koordinátái: EOY X₁: 226 391, EOY Y₁: 456 575, valamint EOY X₂: 226 653, EOY Y₂: 455 916 (VIII. melléklet). A mintagyűjtés a velemi Tervút mentén történt, a műút melletti szálfeltárásokból. A minták hasonlósága miatt a dolgozatomban csak 6 feltárásból származó mintával foglalkozom részletesebben (a 2., 3., 6., 8., 9. és 10.-es feltárások kőzetanyagával, a továbbiakban a mintajelölések: VT-2, VT-3, VT-6, VT-8, VT-9 és VT-10) (9–11. ábrák).



9. ábra: A velemi terepbejárás során észlelt felszíni feltárások, és az onnan gyűjtött kőzetminták. A – 2. feltárás, VT-2 minta; B – 3. feltárás, VT-3 minta
(a szerző saját szerkesztése)



10. ábra: A velemi terepbejárás során észlelt felszíni feltárások, és az onnan gyűjtött kőzetminták. A – 6. feltárás, VT-6 minta; B – 8. feltárás, VT-8 minta; C – 9. feltárás, VT-9 minta (a szerző saját szerkesztése)



11. ábra: A velemi terepbejárás során észlelt 10. felszíni feltárás, és az onnan gyűjtött kőzetminta (VT-10 minta) (a szerző saját szerkesztése)

VT-2 minta: A kőzet erősen gyűrt, sötétszürke és fehér sávok váltakozásából áll. A sötétszürke sávok körömmel nem karcolhatók. A fehér sávok szabálytalan vastagságúak (mm-es nagyságtól cm-es nagyságig), valamint lencséket is alkotnak. Zsírfenyű szemcsék (kvarc), illetve fehér becsillanó ásványok (csillámok) építik fel. A fehér sávok aránya nagyobb, mint a sötétszürke sávoké (kb. 60–40%).

VT-3 minta: A kőzet enyhén gyűrt, lemezes-leveles elválású, fekete-fehér-sárga sávok építik fel. A fekete sávok körömmel karcolhatók. A fehér sávok zsírfenyű (kvarc) ásványokból állnak, valamint kb. 1 cm-es lencséket is alkotnak. A sárga sávok becsillanó ásványokból (csillámok) állnak.

VT-6 minta: A kőzet gyűrt szerkezetű, fekete és fehér sávok váltakozásából áll. A fekete sávok körömmel karcolhatók. A fehér sávokat zsírfenyű (kvarc) és becsillanó (csillámok) ásványok alkotják. Változó vastagságúak a fehér sávok (mm-es nagyságtól 0,5 cm-es nagyságig), valamint lencséket is alkotnak. Továbbá rozsdabarna foltok (vas-oxid) észlelhetők a kőzetben.

VT-8 minta: A kőzet leveles-lemezes felépítésű, gyűrt, fekete-fehér-szürkéssárga sávok építik fel. A fekete sáv puha, körömmel karcolható. A fehér sáv becsillanó (csillámok) és zsírfenyű (kvarc) ásványokból áll, továbbá 2×10 mm-es nagyságú fehér lencsék

figyelhető meg. A szürkéssárga sáv lemezes, becsillanó ásványokból (csillámok) áll. Továbbá rozsdabarna foltok (vas-oxid) figyelhető meg a kőzetben.

VT-9 minta: A kőzet erősen gyűrt, lemezes-leveles felépítésű, a redőcsuklónak egy része. Fekete-fehér sávok építik fel. A fekete sáv puha, körömmel karcolható, fémes fényű. A fehér sáv zsírfényű (kvarc) ásványból áll. Továbbá rozsdabarna foltok (vas-oxid) észlelhetők a mintán.

VT-10 minta: A kőzet lemezes-leveles felépítésű, fekete-fehér-szürkéssárga sávokból áll. A fekete sáv puha, körömmel karcolható. A fehér sávot zsírfényű (kvarc) és becsillanó (csillámok) ásványok építik fel, illetve 5×10 mm-es nagyságú fehér lencsék is megfigyelhetők. A szürkéssárga sávot lemezes, becsillanó ásványok (csillámok) alkotják. Továbbá rozsdabarna foltok (vas-oxid) észlelhetők a kőzetben.

5.6.1. KŐSZEGI METAMORFIT KOMPLEXUM

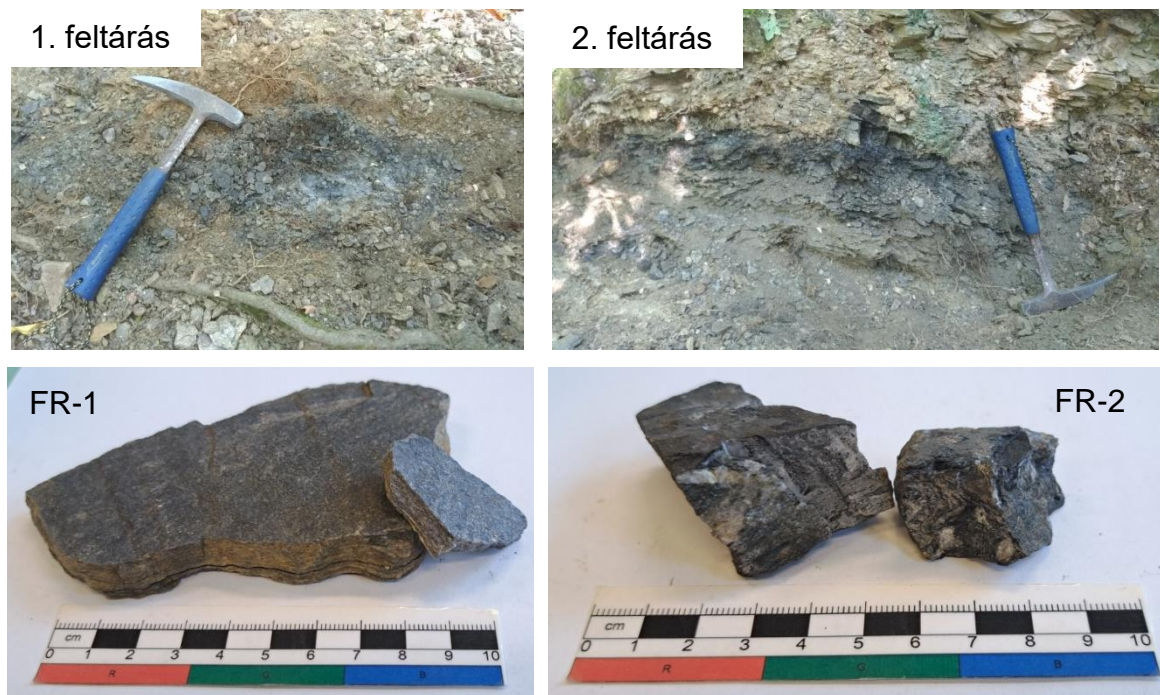
A korábban önálló formációba sorolt Felsőcsatári Zöldpala, Vashegyi Szerpentinit, Velemi Mészfillit és a Kőszegi Kvarcfillit alkotja a pennini komplexumot. Magyarországon a Kőszegi-hegységben fordul elő. Kora bizonytalan: kora jura – késő kréta (K_{J1}–K₂) (esetleg paleogén?) lehet (Babinszki et al., 2023).

A Velemi Mészfillit karbonátos és törmelékes üledék zöldpala fáciesű átalakulása során, teljes egészében átkristályosodott mészkő (márvány), mészfillit, dolofillit, dolomit és metakonglomerátum kőzettípusokból áll. Ásványos összetétele: kalcit, kvarc, muszkovit, klorit, néhol grafitoid (metaantracit), albit és paragonit. A metakonglomerátum (korábban Cádi Konglomerátum) összetétele: dolomit, kalcit, kvarc, muszkovit, grafitoid. Az osztrák oldalon néhány felső kréta szivacsstűt találtak benne. Vastagsága: 200–500 m (Babinszki et al., 2023).

A Kőszegi Kvarcfillit törmelékes eredetű, zöldpala fáciesű, klorit–albit szubfáciesű, monomineralikus metakvarcit, szericit–kloritfillit kőzettípusokból áll. Ásványos összetétele: kvarc, muszkovit, klorit, esetenként paragonit, grafitoid (metaantracit), albit és kalcit. Vastagsága: 800–1000 m, kora bizonytalan, nagyrészt kora–középső jura lehet (Babinszki et al., 2023).

5.7. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS

A terepbejárás és mintagyűjtés során a Soproni-hegységben található Fertőrákos településtől 3 km-re északra elhelyezkedő Újhegy déli lejtőjéről gyűjtöttem kőzetmintákat felszíni feltárásokból (12. ábra, IX. melléklet). A pontos koordináták: EOY X: 268 936, EOY Y: 470 099. Az első feltárás (FR-1) gyökerek által bolygatott, talajosodott rész, törmelékben, aprózódva található a kőzetanyag. A második feltárás (FR-2) kb. 20 m-re található DNy-ra az első feltárástól. A grafítos csillámpala lencseszerűen helyezkedik el a sárga csillámpalában. Ennek a kőzetanyaga is szétmállott, talajosodott, gyökerek által bolygatott (Leskóné Majoros et al., 2025a).



12. ábra: A fertőrákosi terepbejárás során észlelt 1. feltárás (balra) és 2. feltárás (jobbra), és az onnan gyűjtött kőzetminták (FR-1 és FR-2) (Leskóné Majoros et al., 2025a nyomán)

FR-1 minta: A kőzet lemezes-leveles elválású, finomszemcsés, fekete-fehér sávok váltják egymást. Körömmel nem karcolható. Becsillanó fehér ásványok (csillámok) észlelhetők a fekete sávokban, illetve a fehér sávok is főként ebből állnak.

FR-2 minta: A kőzet szintén fekete-fehér sávos felépítésű, azonban erősen gyűrt szerkezetű. A fekete sávok puhák, körömmel karcolhatók, valamint fognak a papírra. A fehér sávok zsírfényűek (kvarc), illetve fehér, zsírfényű lencsék (kvarc) is észlelhetők 3×5 mm-es méretben.

5.7.1. FERTŐRÁKOSI METAMORFIT KOMPLEXUM

Megfelel a korábbi Fertőrákosi Kristályospala Formációcsoportnak. A Soproni-hegység K-i részén található („Fertőrákosi-palasziget” néven is ismert). Kora karbon – kora perm korú ($F_{C_1-P_1}$), a Fertőrákos Fr–1004 fúrás 1200 m vastagságban harántolta. Közettanilag grafitos fillit, paragneisz amfibolpalatestekkel, gyakori, nagy apatittartalmú (70–80%) pegmatitlencsékkel. Szerkezetileg a Keletalpi-takarórendszer része, felette tektonikus határral a Soproni Metamorfit Komplexum települ. Néhány feltárásból és nagyszámú nyersanyagkutató-fúrásból ismert. A komplexumon belül két fő litosztratigráfiai egység különíthető el: a Gödölyebérci Amfibolit és a Fertőrákosi Paragneisz (Babinszki et al., 2023).

A Gödölyebérci Amfibolit intermedier és bázisos összetételű magmatit átalakulásával képződött. Az amfibolit, majd zöldpala fáciesű, retrográd átalakulás során erősen saussuritesedett, tömeges, amfibolos biotitgneisz jött létre. Titanitban és gránátban dús, az amfibolit fáciesű metamorfózis reliktumaként hornblendét is tartalmaz (Babinszki et al., 2023).

A Fertőrákosi Gneisz arkóza eredetű, zöldpala fáciesű metamorfit, helyenként albit–klorit–muszkovitpala, másutt klorit–muszkovit–albitgneisz vagy kétsillámú plagioklászgneisz. Közbetelepülésként apatitdús pegmatitlencsét, illetve amfibolpala-közzestesteket is tartalmaz. A Soproni-hegységből ismert Sopronbánfalvai Ortogneiszhez és Vöröshídi Csillámpalához hasonló kőzetek a „Fertőrákosi-palasziget” területén is megjelennek, ezek besorolása azonban nem tisztázott. Koradatok vannak durvaszemcsés fehércsillámból (Rb–Sr-kor: 339 ± 4 és 287 ± 3 millió év), a muszkovit és biotit Ar–Ar kora (170–220 millió év), valamint cirkonból és apatitból hasadványnyomkor alapján a kiemelkedés kora ($43 \pm 2,3$ millió év) ismert (Babinszki et al., 2023).

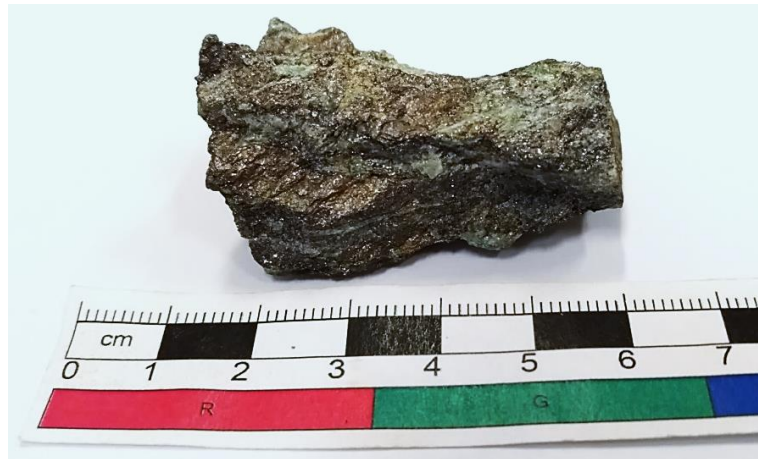
5.8. RIMAKOKOVA (SZLOVÁKIA)

Amint a 4.2. alfejezetben olvasható, Szlovákiában számos helyen van grafit előfordulás, azonban Zuberec et al. (2005) szerint Rimakokovánál található az egyetlen grafittelep, amelyet ráadásul kitűnő technológiai tulajdonságokkal rendelkező kristályos grafit alkot. Az átlagos grafittartalom 3,4% körüli, az átlagos pikkelyméret 0,085 mm, amely lokálisan akár 0,4 mm is lehet. Méréseik szerint flotációval könnyen dúsítható 85%-ra a grafit, de savas közegben ez elérheti akár a 99%-ot is. Jelenleg a becsült készleteket potenciálisan gazdaságosnak tekintik (Zuberec et al., 2005). Ezek alapján esett a választás a

kárpáti összehasonlításhoz a rimakokovai grafitra, amely a Dél-Veporikumi Kristályos Aljzatban található (Kováčik, 2003; Bačo et al., 2015) (X. melléklet).

Dolgozatomban a miskolci Herman Ottó Múzeum Ásványtárából származó példányt vizsgálom (leltári száma 2017.343, átadója Rudolf Ďud'a), azonban pontos koordináták nem állnak rendelkezésemre a begyűjtött példány lelőhelyéről (13. ábra).

Rimakokovai minta: A kőzet alapanyaga halványszürke – fehér színű, finomszemcsés (a szemcsék mérete átlagosan 0,5 mm), körömmel nem karcolható, törési felülete zsírfényű. Ebben helyezkednek el a több irányban orientált, üvegfényű, halványzöld színű, nyúlt oszlopos kristályok, amelyek mérete 10 mm × 2 mm, de elérhetik az akár 10 mm × 5 mm nagyságot is. Az alapanyagban szintén észlelhetők orientáltan elhelyezkedő, lencséket, sávokat alkotó közepszürke színű, fémfényű, körömmel karcolható, pikkelyes megjelenésű ásványok, amelyek 0,5 mm – 1 cm-es nagyságú halmazokat alkotnak. A zöld nyúlt oszlopos kristályok és szürke pikkelyek között megfigyelhetők még narancsos barna színnel megjelenő, matt, finomszemcsés halmazok is (Majoros, 2019).



13. ábra: A miskolci Herman Ottó Múzeum Ásványtárának példánya (Majoros, 2019)

5.8.1. DÉL-VEPORIKUMI KRISTÁLYOS ALJZAT, SZLOVÁKIA

Grafitos metakvarcit és metamorfizált vasas palarétegek Rimakokovától kb. 3 km-re nyugatra fordulnak elő (Šuf, 1938; Zoubek és Nemčok, 1951; Korikovskij et al., 1989). Számos típusú gránát-biotit gneisszel, granitoiddal, tiszta kvarcittal, migmatittal és alárendelten amfibolitos kőzettel társulnak. A metamorfózis foka az amfibolit fáciesbe esik (kb. 600 ± 50 °C, 400–500 MPa; Ghent és Stout, 1981; Fonarev, 1985; Miyano és Klein, 1986), amely a herciniai regionális metamorfózis (karbon-perm) során zajlott le. Magmás

beolvasztás történt helyenként, így a gránitos kőzetekben grafitos anyagok orientált reliktumai is előfordulhatnak (Kováčik, 2003).

A grafitos metakvarcitok 90–95 térfogat%-ban tartalmaznak kvarcot, valamint változó mennyiségben grafitot, muszkovitot (fengitet) és plagioklászot. A grafit többé-kevésbé egyenletesen fordul elő a kőzetben, nagy mennyiségű kristálycsíra-képződési centrumot jelezve. Legtöbbször véletlenszerűen nőtt a kvarc szemcsék határai mentén. Az átlagos pikkelyméret 0,2–0,3 mm, de lokálisan elérheti az 1 mm feletti értéket is főként csillámokkal érintkezve (Kováčik, 2003). Az átlagos grafit tartalom 3,4% körüli, amely flotációval könnyen dúsítható 85%-ra, de savas közegben elérheti akár a 99%-ot is (Zuberec et al., 2005). Figyelemre méltók a néhány kvarc szemcsében megfigyelt, nagyon finomszemcsés széntartalmú pigmentek jelenléte. Ez a szöveti jelenség olyan szerves anyag relikviumaira utal, amely a metamorfózis során nem migrált (Kováčik, 2003).

A grafitos anyag felhalmozódásában két fontos tényező említhető meg (Kováčik, 2003), egyik a primer szerves anyag, amely elsődlegesen a kvarcit rétegekben, laminákban, illetve a muszkovitok érintkezésénél halmozódott fel; a másik a képlékeny nyírás (nyomás hatására a kvarc szemcsék részleges oldódása), amely a grafit kristályok párhuzamos elhelyezkedéséhez és emelkedett mennyiségéhez vezetett. Sem a metamorfózis, sem a lokális gránitos intrúziók nem változtattak a $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ arányokon. Az izotópos adatok (Hoefs, 1973; Hladíková, 1988) és a kőzetszövetek alapján a legvalószínűbb szén protolit kőzet plankton eredetű bitumenes anyag (Kováčik, 2003).

5.9. CĂTĂLINUL-PARENG (ROMÁNIA)

PhD dolgozatom számára a kárpáti kitekintéshez a romániai Kárpátokból is szerettem volna egy grafitos példányt megvizsgálni. Tekintve, hogy a grafit szinte majdnem minden nagyobb metamorf sorozatban előfordul a romániai Kárpátokban, viszont iparilag fontos dúsulásai csupán az Olt völgye mentén (Cătălinul, Ungurelaș; Déli-Kárpátok) ismertek (Szakáll, 2002), így az onnan származó mintákat célszerű vizsgálnom.

Ambrus Zoltán bányageológus (Parajd) közvetítésével a Miskolci Egyetem Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszéke reprezentatív, a parengi grafitos külfejtésből származó mintákat kapott vizsgálatra. Más kutatási vonalon a grafit mellett megjelenő járulékos ásványok U- és Th-tartalmát vizsgálják (Ion et al., 2017, 2023). Ion et al. (2017) tanulmánya szerint minden radioaktív fázis a meddőásványokhoz kötődik, a fő urán-tartalmú ásványoknak a monacitot, cirkont, uraninitot, urano-toritot és rutilt észlelték.

Így esett a választás Parengre, amely lényegében a Cătălinul-bánya (Pareng-hegység, Déli-Kárpátok, XI. melléklet). A grafitbánya, amely a Lainici Păiuș Formáció-Csoport pre-alpi aljzatában (Ion et al., 2017; XI. melléklet), Baia de Fier-től 19 km-re északra található, a pontos koordinátái (WGS84): É45,23194 és K23,75191 (14. ábra). Bányászata 1962-1985(?) között zajlott, kb. 6000 t éves termeléssel (a USGS 1985-ös adatai szerint). A grafittest 400 m hosszúságú és átlagosan 12 m vastag, területe 3200 m² (USGS, 1985). A nyírási zónában található, lencse alakú grafittelep grafitos palában jelenik meg, amelyet paragneisz-csillámpala határol a fedőben (Ion et al., 2017). A grafittelep egy kőszéntelep regionális metamorfózisa révén keletkezett, amelyet a gránit intrúziók révén utólagosan kontakt metamorfózis is érintett (Ion et al., 2023).

Ásványos összetételében uralkodó a grafit (33 tömeg%, amely kristályos, a pikkelyek hintetten figyelhetők meg a kőzetben), mellette pirit (5 tömeg%), magnetit (1 tömeg%), szericit (mikrokristályos muszkovit), muszkovit, kvarc, valamint kis mennyiségben amfibolok, piroxén és zoisit észlelhető (USGS, 1985). Panu et al. (1967) a grafitot a mikrokristályos típusba sorolta be, amely a kereskedelmi osztályozás szerint az „amorf” kategóriának felel meg. A képződmény grafitizációs indexe magas, főleg pikkelyes, szórványosan azonban masszív aggregátumos formában is megfigyelhető (Ion et al., 2017).



14. ábra: Piros mutatóval jelölve a Catalinul grafitbánya helye (Google Maps)³

Parengi minta (15. ábra): A kőzet középszürke színű, fémes fényű, finomszemcsés, körömmel karcolható. A kézipéldány lemezes elválású, könnyen morzsolható. A friss elválási felületeken középszürke színű, fémes fényű, körömmel karcolható, átlagosan 1–3

³ Google Maps <https://www.google.hu/maps> [Utoljára frissítve: 2019.05.08.]

mm-es nagyságú pikkelyes megjelenésű szemcsék észlelhetők. A kőzet feltehetően nyírási zónából származik, mert sima és fényes csúszási felületek vannak rajta, amelyeken karcok figyelhetők meg. A palássági síkokkal párhuzamosan fehér színű (halványzöld árnyalattal), törési felületén zsírfényű, átlagosan 2–3 mm-es (de akár 5 mm-es) szemcsék láthatók. A nem friss elválási felületeken halványsárga színű, porszerű, finomszemcsés vékony bevonat észlelhető. A kőzetet üregek és vékony repedések is jellemzik. Az egyik üreg falán 1 mm-es nagyságú, szürkészöld színű, átlátszatlan, vékonyoszlopos fenn-nőtt kristályok láthatók (Majoros, 2019).



15. ábra: A parengi külfejtésből származó egyik kézipéldány (Majoros, 2019)

5.9.1. LAINICI PĂIUȘ FORMÁCIÓ-CSOPORT

A Lainici Păiuș Formáció-Csoport (Manolescu, 1937) kvarcitból, biotitból, gneiszből, márványból és grafitos gneiszből áll, amelynek grafitban dúsabb részeit bányászták (Liégeois et al., 1996). Kevés amfibolit szintén jelen van. A formáció-csoportot kis nyomású, nagy hőmérsékletű amfibolit fáciesű metamorfózis érte (Savu, 1970; Berza, 1978). A gyakran megjelenő migmatitos zónák ebben az amfibolit fáciesű, pre-ordovíciumi regionális metamorfózis során képződtek (Liégeois et al., 1996). Két formációt különböztetnek meg a csoporton belül (Berza, 1978; Schuster, 1980): a Karbonát-Grafitos Formációt, amely kristályos mészkőből és dolomitból, szillimanit-andaluzit-kordierit-grafit-csillám gneiszből, amfibolitból, mészsilikát gneiszből és biotitos gneiszből áll; valamint a Kvarcitos és Biotitos Gneisz Formációt, amely különféle kvarcitokból áll biotit ± amfibol gneisz közberéteggel, illetve kis mennyiségű amfibollal, márvánnyal és szillimanit gneisszel társulva. A formáció-csoport jellegzetes tulajdonsága, hogy a metaszedimenteket bőségesen átjárják a leukogranitoid testek és dájkok (Berza, 1978).

6. MINTA-ELŐKÉSZÍTÉS, APRÍTÁSI ÉS SZEPARÁLÁSI KÍSÉRLETEK

Az előző fejezetben ismertetett lelőhelyekről származó mintákat elő kellett készítenem a különböző vizsgálati módszerekre. Így egyrészt polírozott felületi és vékonycsiszolatokat készítettem az optikai, elektronmikroszkópos (SEM-EDX) és Raman-spektroszkópos vizsgálatokra, másrészt porítottam röntgen-pordiffrakciós (XRD), transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM), termogravimetriai (DTA-TG-DTG), röntgen-fluoreszcens spektrometriai (XRF), valamint induktív csatolású plazma tömegspektrometriai (ICP-MS) vizsgálatokra. A minta-előkészítéseken túl aprítási, szeparálási, frakcionálási és dúsítási módszerek kísérleti alkalmazását is végrehajtottam, amelyeket a következő alfejezetekben ismertetek.

6.1. POLÍROZOTT FELÜLETI ÉS VÉKONYCSISZOLAT KÉSZÍTÉSE

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszék laboratóriumában, Bulátkó-Debus Délia felügyelete mellett készítettem elő az optikai, a pásztázó elektronmikroszkópos (SEM-EDX) és Raman-spektroszkópos vizsgálatokra a mintákat. A palássági síkokra merőlegesen levágott kőzetmintákat Araldite 2020 kétkomponensű műgyantával ágyaztam be, majd a három napos száradási idő után a megszilárdult minták felületét 320-as, 500-as, 800-as, 1200-as és 2400-as Si-karbid csiszolópapíron csiszoltam meg.

A vékonycsiszolatok esetében az előzőleg ismertetett módszerrel elkészített felületeket vékony üveglapokra (tárgylemez) ragasztottam fel. A ragasztó megszáradása és a minták levágása után újabb csiszolással (240-es, 400-as és 600-as csiszolópor, valamint 1200-as és 2400-as csiszolópapír) ~30 µm vastagságra vékonyítottam a preparátumokat. A mintákat kiultrahangoztam és desztillált vízben megmostam minden egyes váltásnál.

Az elkészített felületi és vékonycsiszolatok esetében a polírozás RotoPol-35 gépen történt 6 µm-es, 3 µm-es, 1 µm-es, valamint ¼ µm-es gyémánt szemcséket tartalmazó polírozó anyagokkal. A polírozókendő nedvesítése vízbázisú kenőanyaggal történt, az egyes polírozó anyagok váltásánál a mintákat ultrahangos fürdőben tisztítottam, és desztillált vízzel lemostam.

Összesen 42 darab polírozott felületi csiszolatot, valamint két darab vékonycsiszolatot készítettem (1-1 darab a dédestapolcsányi 1. és 2. feltárásból).

Minden mintánál a kőzetszövet és annak ásványos összetételének pontos észlelése volt a cél az optikai mikroszkópos vizsgálatok során. Azonban a dédestapolcsányi 1. és 2.

feltárásból származó minták esetében azért készítettem polírozott vékonycsiszolatokat felületi csiszolatok helyett, mivel a kovapala mintát az optikai mikroszkóp áteső és ráeső fényében is szerettem volna megvizsgálni, hogy el tudjam különíteni a polikristályos kvarcot a monokristályostól (Majoros, 2017). Továbbá ez a fajta vékonycsiszolat alkalmas a SEM-EDX vizsgálatra is, így részletesebb képet adott a minta szövet-szerkezetéről, valamint az alkotók kémiai összetételéről.

A rimakokovai minta esetében, mivel ez a miskolci Herman Ottó Múzeum Ásványtárának egyetlen onnan származó grafitos példánya, sem csiszolatot, sem porítást nem készítettem. A SEM-EDX vizsgálatnál csak egy kis letört darabkáját vizsgáltam, az XRD mérésnél pedig a példány legsíkabb részéről készült felületi mérés (Majoros, 2019).

6.2. HAGYOMÁNYOS PORÍTÁSI ELJÁRÁS

A röntgen-pordiffrakciós, röntgen fluoreszcens spektrometriai, TEM, szimultán DTA-TG-DTG és ICP-MS vizsgálatokra a kiválasztott kőzetmintákat megfelelő szemcseméretűre kellett porítani (<63 μm az XRF, <75 μm az ICP-MS, valamint <1 μm az XRD, TEM, DTA-TG-DTG vizsgálatokra). A kiszárított mintákat a Miskolci Egyetem Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszék laboratóriumában először az acélbetétes mozsárban kb. 1 mm alá letörtem. Ezután a hagyományos porítási folyamatot alkalmaztam a dédestapolcsányi mintákon. A megtört mintákat porcelán mozsárban porítottam, majd a megfelelő minőség elérése után vettem ki az achát-mozsárba, amelyben 1 μm alá leporítottam a mintákat. Az így elkészített porminták XRD vizsgálatokra kerültek.

A hagyományos porítási eljárás legfőbb hátránya, hogy mivel grafitos kőzeteket porítok, így a folyamat során jelentős mennyiségű grafit (grafitos anyag) kitapad a mintákból a porcelánmozsár falára. Ezzel meghamisítva a mérési eredményeimet, mivel kevesebb grafit tartalom jelentkezik, mint amennyi ténylegesen van a kőzetben. Így ezt a minta-előkészítési eljárást próbáltam más módszerekkel helyettesíteni, illetve kiváltani.

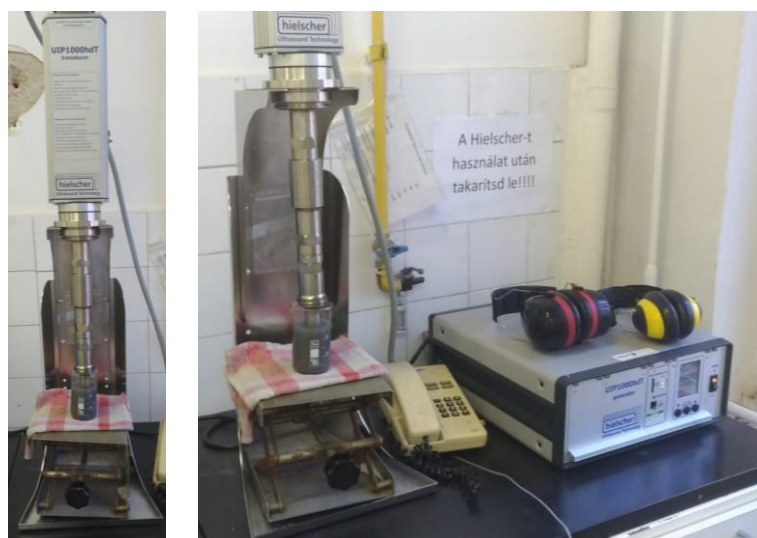
6.3. A HAGYOMÁNYOS PORÍTÁSI ELJÁRÁS TOVÁBBFEJLESZTÉSE, ULTRAHANGOS APRÍTÁS

A porcelánedény falára történő feltapadás kiküszöbölése érdekében más módszerek után kellett nézmem. Így először Yu és Qiang (2012) nyomán az acélbetétes aprítást követően az ultrahangos aprítást alkalmaztam. A dédestapolcsányi mintáknál a minták desztillált vizes szuszpenzióját ultrahangos medence segítségével apróztam az Alkalmazott Ásványtani

Intézeti Tanszék laboratóriumában (4×2 perces lépcsőkben), amellyel a minták szemcseméretét megfelelővé tudtam csökkenteni a röntgen-pordiffrakciós vizsgálatokhoz (Majoros, 2017).

A szendrőládi és parengi minták esetében pedig a Miskolci Egyetem Kémiai Intézet laboratóriumában lévő Hielscher homogenizátort (UIP1000hdT típusú; 260–270 W; 19,39 kHz) alkalmaztam (Dr. Vanyorek László és Dr. Sikora Emőke felügyelete mellett) a minták desztillált vizes szuszpenziójának ultrahangos aprításához (16. ábra). A minták előkészítése során észlelt veszteségeket ezzel a módszerrel jelentősen csökkenteni tudtam, illetve az ultrahangozás időtartamával szabályozni is lehetett az elérni kívánt szemcseméretet (<50 μm az XRF és <1 μm az XRD vizsgálatokhoz).

Az ultrahangos aprítást követően gravitációs ülepitésekre került sor, a kinyert anyagokat pedig 60 °C-on 12 órán át szárítottam. Így elkészültek az XRD és XRF vizsgálatokra a minták (Majoros, 2019).



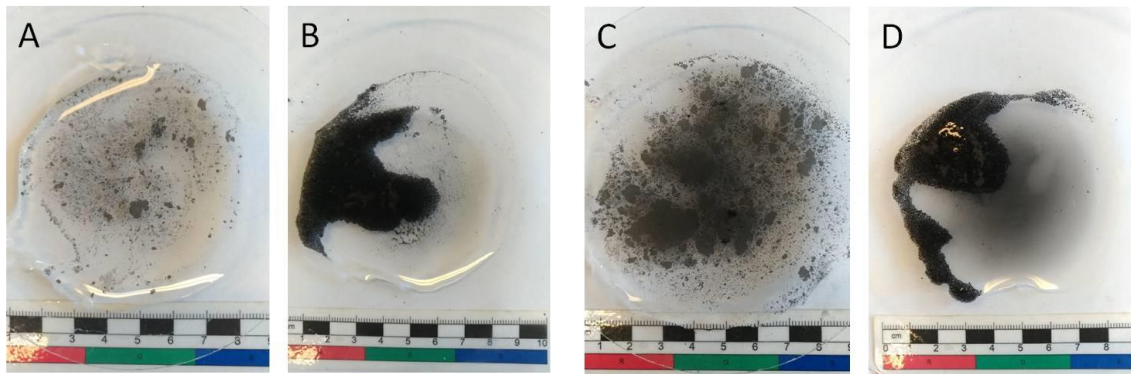
16. ábra: Az egyik szendrőládi minta ultrahangos aprítás közben
(a szerző saját szerkesztése)

Az ultrahangos aprítás alkalmazása mellett továbbfejlesztettem a hagyományos porítási eljárást is. Ennek során az acélbetétes aprításnál, dörzsölés nélkül törekedtem, hogy a minta porításánál minél kisebb szemcseméretet érjek el (<0,3 mm), majd a porcelánmozsaras porításnál acetont adtam a mintához, hogy kiküszöböljem a kitapadást. Ezután pedig az achátmozsaras porítás következett. Ekkor már nem kellett acetont adni a mintához, mert az achátmozsár falára nem tapadt ki a minta.

Ezzel a továbbfejlesztett minta-előkészítési eljárással készítettem elő XRD, XRF és ICP-MS, valamint DTA-TG-DTG vizsgálatokra a dédestapolcsányi, a szendrői, a meszesi, a rakacaszendi, a velemi és a fertőrákosi mintákat.

6.4. DÚSÍTÁSI KÍSÉRLET

A grafit, grafitos frakció kinyerése érdekében a dédestapolcsányi, szendrői, meszesi, fertőrákosi, velemi és parengi mintákon dúsítási kísérleteket végeztem. Ennek során az acélbetétes aprítást követően (<0,3 mm), a mintákat desztillált vízzel felöntöttem, a grafit (grafitos anyag) hidrofób természete miatt pedig felúszott a desztillált vizes szuszpenzió tetejére. Egymással nem keveredő, egymástól jól elkülönülő kétféle frakciót is észleltem némely minta esetében, amelyeket színük alapján „ezüstszürke” és „fekete” néven neveztem el. A szuszpenzió képződött hártákat pipettával szeparáltam le (17. ábra), és az így kinyert anyagokat 60 °C-on 12 órán át szárítottam. A kinyert frakciókat pedig XRD és TEM módszerekkel vizsgáltam meg.



17. ábra: A dédestapolcsányi minták dúsítási kísérlete során kapott frakciók. A – DTAP 1/1 minta „ezüstszürke”; B – DTAP 1/1 minta „fekete”; C – DTAP 2/1 minta „ezüstszürke”; D – DTAP 2/1 minta „fekete” (a szerző saját szerkesztése)

6.5. GRAVITÁCIÓS ÜLEPÍTÉS, AGYAGÁSVÁNY SZEPARÁLÁS

A szeparálási, fracionálási kísérletek során egyrészt a szendrői SZL-1A mintán és szendrői SZ-1 mintán agyagásvány szeparációt végeztem, másrészt a meszesi M-3B mintán 10 µm-es szemcseméretnél ülepitéses leválasztást hajtottam végre. Mindkét esetben az acélbetétes aprítást követően (<0,3 mm), a mintákat desztillált vízzel felöntöttem, és fél perces ultrahangos fürdőnek vettem alá. Ezután 2 perc ülepedési idő elteltével a szuszpenziók felső részét átöntöttem az ülepitő hengerekbe. Az előző lépéseket ismételve addig folytattam az eljárást, amíg a 2 perces ülepedésnél az összes anyag le nem ülepedett a

főzőpohár aljára. Ezután felráztam az üleptető hengert, és meghatározott ülepedési idő után a megfelelő szemcseméretnél leválasztottam a vizsgálni kívánt frakciókat. Az így kinyert anyagokat 60 °C-on 12 órán át szárítottam, és XRD módszerrel vizsgáltam meg őket.

6.6. SAVAZÁSI KÍSÉRLET

A szendrőládi Helle-patak völgyéből származó minták nagy részét kalcit alkotja, ezért savazási kísérletet is végeztem rajtuk. Ennek során mindhárom mintából (SZL-1A, SZL-1B, SZL-1C) 5-5-5 g-ot porítottam acélbetétes mozsárban, majd 5%-os ecet – 95% desztillált víz keverékkel savaztam őket. Miután az összes kalcit eltávozott a rendszerből, pH-ra mostam a mintákat (~5 pH feletti értékre). Külön frakcióként kezeltem a minták alját (~nehézasvány szeparálásnak tekinthető frakció) és a szuszpenzió részét. A kinyert anyagokat 60 °C-on 12 órán át szárítottam. A 3. táblázat tartalmazza a savazás utáni frakciók tömegeit, amelyből kiszámolható a minták kalcit tartalma. Az így nyert frakciókat szintén megvizsgáltam XRD módszerrel, valamint DTA-TG-DTG módszerrel.

3. táblázat: A szendrőládi minták savazási kísérlete során nyert mintatömegek és az ezekből számolt kalcit-tartalom (a szerző saját szerkesztése)

Mintaszám	Savazás előtti tömeg [g]	"Szuszpenzió" frakció tömege [g]	"Alsó" frakció tömege [g]	Savazás utáni tömeg [g]	Kalcit-tartalom [tömeg%]
SZL-1A	5	0,11	0,32	0,43	91,4
SZL-1B	5	0,13	0,31	0,44	91,2
SZL-1C	5	0,10	0,30	0,40	92

6.7. DEKANTÁLÁS

A fenti szeparációs módszereken kívül a dédestapolcsányi mintákon még dekantálást is végeztem, amellyel a filloszilikátok kinyerése volt a célom. Ennek során az acélbetétes aprítást követően (<0,3 mm), a nagyobb szemcséket desztillált vízben porcelán mozsárban szétnyomkodtam a pisztillussal. Ezután egy üvegbot segítségével végrehajtottam a dekantálást. A kinyert anyagokat 60 °C-on 12 órán át szárítottam. A dekantálás során kapott, a DTAP 1/1 minta frakcióinak tömegei: összes tömeg 4,72 g, kinyert frakció tömege 0,60 g, a fennmaradó frakció tömege 4,12 g. Az eljárás során kapott, a DTAP 2/1 minta frakcióinak tömegei: összes tömeg 3,07 g, kinyert frakció tömege 0,65 g, a fennmaradó frakció tömege 2,42 g. A dekantálás során kinyert filloszilikát frakciókat XRD módszerrel vizsgáltam meg.

7. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

7.1. OPTIKAI VIZSGÁLATOK

Átlátszó-áttetsző ásványok optikai vizsgálatához polarizációs mikroszkópot használunk, átlátszatlan (opak) ásványok esetén ércmikroszkópot (reflexiós mikroszkópot) (Kubovics, 1993). A grafit az opak ásványok közé tartozik. Reflexiós mikroszkópban vizsgálva a grafit enyhén barnásszürke színű, erős bireflexióval, anizotrópiával és pleokroizmussal figyelhető meg (Kubovics, 1993; Molnár és Szentpéteri, 2005).

Az optikai vizsgálatok fő célja elsődlegesen a grafit észlelése volt a mintákban. A grafit észlelésén túl, a vizsgálatok során egyrészt átfogó képet kaptam a minták szövet-szerkezetéről, ásványos összetételéről, másrészt, ki tudtam jelölni előre azokat a területeket, amelyeket érdemes a SEM-EDX módszerrel megvizsgálni.

Az optikai vizsgálatokat a Miskolci Egyetem Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszéken végeztem el Zeiss AxioCam MRc5 kamerával ellátott Zeiss Imager.A2m AXIO polarizációs mikroszkóppal, valamint Zeiss AxioCam MRc5 kamerával ellátott Zeiss SteREO Discovery.V20 sztereomikroszkóppal.

7.2. SEM-EDX VIZSGÁLATOK

A pásztázó elektronmikroszkópos vagy más néven a SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*, magyarul: pásztázó elektronmikroszkóp energiadiszerzív röntgenspektrométerrel) vizsgálat során szöveti képalkotás és kémiai összetétel-mérés is lehetséges. A gyorsított elektronnaláb gerjesztő hatására karakterisztikus röntgensugárzást bocsátanak ki az elemek, így az energiadiszerzív röntgenspektrométerrel (EDX) felvett spektrumok alapján a kémiai elemek azonosíthatók az egyes mérési pontokban, mennyiségük megállapítható (félmennyiségi elemzés), kémiai összetételük meghatározható (Hegman et al. 2011).

Továbbá nagy felbontású képek készítését is lehetővé teszi a SEM-EDX módszer, amelyeken átlagrendszám alapján a különböző elem-összetételű fázisok szürkeárnyalatos BSE (*back-scattered electron*, magyarul visszaszórt elektron) képen különülnek el. A pásztázó képalkotás és EDX mérés párhuzamos használatával pedig elemtérképek készíthetők, amelyek kiválóak egy-egy kémiai elem szövetbeli eloszlásának és az elemek kombinációjának tanulmányozására (Hegman et al. 2011).

Az upponyi- és szendrői-hegységi, valamint a velemi és fertőrákosi minták esetében a SEM-EDX vizsgálatok az Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszéken, JEOL JXA-8600 Superprobe elektronmikroszkóppal, 20 kV gyorsító feszültséggel, 20 nA mintaárammal és 60 s-os EDX mérésekkel történtek Dr. Kristály Ferenc segítségével. Az EDX rendszer kimutatási határa 0,1 tömegszázalék könnyűelemekre és 0,05 tömegszázalék nehézelemekre, a mérési hibahatár 5 relatív százalék. A meszesi minta esetében még ThermoFisher Helios G4 PFIB CXe műszeren is történtek vizsgálatok (20 kV gyorsító feszültség, 3.2 nA mintaáram, 50 s időtartamú EDX mérések) Dr. Leskó Máté Zsigmond segítségével. A parengi és rimakokovai minták esetében pedig a SEM-EDX mérések a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet Innovatív finomörlési-szemcsetervezési technológiák laboratóriumában, Phenom ProX asztali pásztázó elektronmikroszkóppal, 15 kV gyorsító feszültséggel, 2 mm munkatávval, csökkentett vákuumban történtek, Dr. Kristály Ferenc és Halyag Nóra segítségével. A JEOL és a ThermoFisher készülékek esetében C vezetőréteg felvitele szükséges, míg a Phenom ProX készüléknél nem szükséges, így a C jelenléte könnyebben kimutatható a mintákban.

A dolgozat hátralevő részében az EDX mérés mindig SEM-EDX mérést jelent.

7.3. TRANZMISSZIÓS ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATI MÓDSZER

A transzmissziós elektronmikroszkóp (angolul *transmission electron microscope*, röviden TEM) egy elektronsugaras anyagvizsgáló eszköz, amellyel kristályos anyagok szerkezetét, azok kémiai összetételét, vagy a nagy felbontást kihasználva az anyagok atomi szerkezetét lehet vizsgálni (Hegman et al., 2011).

Transzmissziós elektronmikroszkóppal a mintát átvilágítva alkotunk képet. Ez történhet a vizsgálni kívánt mintaterület párhuzamos elektronsugárral történő folytonos átvilágításával, vagy a mintaterületen pásztázó konvergens (összetartó) elektronsugárral is. A párhuzamos sugárral történő képalkotási módok közül a legegyszerűbb az amplitúdó kontrasztos képalkotás, azonban ilyen módon elkészíthetjük egy anyag szórási vagy más néven diffrakciós képét és fáziskontrasztos képét is. A pásztázó sugaras technikák segítségével pedig relatíve nagy mintaterületeken térképezhetjük az egyes anyagtulajdonságokat (Hegman et al., 2011).

A transzmissziós elektronmikroszkópos mérések a Miskolci Egyetemen, Karacs Gábor (Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet) segítségével történtek FEI TECNAI G² készüléken.

7.4. XRD VIZSGÁLATOK

A röntgendiffrakciós (angolul *X-ray diffraction*, röviden XRD) módszer a kristályos anyagok szerkezetének vizsgálatára, az alkotó fázisok (amorf anyagok is) mennyiségének meghatározására alkalmas. Két fajtáját különböztetik meg, az egyik a polikristályos vagy pordiffrakciós módszer, a másik az ún. egykristály módszer (Hegman et al. 2011).

Doktori kutatásom során a pordiffrakciós módszert alkalmazom, mivel célom a mintáimban lévő kristályos fázisok (különösen a grafit vagy szerves anyag kristályosságai fokának) azonosítása és vizsgálata. Ezzel a módszerrel nemcsak a kristályszerkezet és a fázisok azonosítása lehetséges, hanem a kristallitméret meghatározása is (Hegman et al. 2011).

Az Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszéken végzett XRD vizsgálatok egyrészt Bruker D8 Advance (Cu K-alfa sugárzás, 40 kV, 40 mA) műszerrel történtek, Göbel-tükörrel előállított párhuzamos nyaláb geometriával, Vantec-1 helyzetérzékelő detektorral (1° ablaknyílással, $0.007^\circ 2\theta/24\text{sec}$). Másrészt Bruker D8 Discover (Cu K-alfa sugárzás, 40 kV, 40 mA) műszerrel, Bragg-Brentano geometriával, LynxEye XE-T PSD detektorral (2° ablaknyílással, $0.007^\circ 2\theta/24\text{sec}$). A kiértékelést *DiffraCPlus* EVA szoftverében, Search/Match algoritmussal, az ICDD PDF2 2005 adatbázisa alapján végeztem. A Rietveld-illesztés TOPAS4 szoftverben, empirikus parametrizálással, NIST SRM640d Si standardon történt, a számításokhoz használt kristályszerkezetek az AMCSD (Downs és Hall-Wallace, 2003) adatbázisból származtak.

7.5. XRF VIZSGÁLATOK

A röntgen fluoreszcens spektrometriai (angolul *X-ray fluorescence spectrometry*, röviden XRF) módszer során röntgensugárzással gerjesztik a mintában lévő kémiai elemeket, és rögzítik a másodlagosan keltett, kilépő röntgensugárzás energiáját és intenzitását. Csak az elem rendszámától függ a rögzített karakterisztikus sugárzás energiája, így szilárd minták, esetleg vékonyrétegek, részecskék vagy hordozóra szárított oldatok kémiai összetételének meghatározására alkalmas a módszer (Beckhoff et al., 2006).

Kétféle XRF módszert különböztetnek meg a kilépő röntgen fotonok detektálásának függvényében, az egyik az energiadiszperzív XRF (ED-XRF vagy EDS), a másik a hullámhosszdiszperzív XRF (WD-XRF vagy WDS) módszer (Beckhoff et al., 2006).

CereOx porba préselt preparátumokon, Rigaku SuperMini200 WDS típusú (LiF200 / PET / XR25 kristályok), Pd-katóddal (200 W, 50 kV gyorsító feszültség, 4 mA

áramerősség) felszerelt készüléken végezte el a méréseket Dr. Móricz Ferenc az Alkalmazott Ásványtani Intézeti Tanszéken. Az elemek azonosítását teljes spektrum rögzítésén, a mennyiségi meghatározást az elemek kijelölt csúcsain végeztük.

Az XRF vizsgálattal bár nem lehet közvetlenül kimutatni a grafitot, mégis végeztem ilyen méréseket, hogy a minták fő- és nyomelem tartalmainak ismeretében kiegészítsem és alátámasszam a SEM-EDX és XRD mérések eredményeit. Dolgozatomhoz a rimakokovai múzeumi minta kivételével mindegyik lelőhelyről származó mintából porítottam, és vizsgáltam meg XRF módszerrel.

Minden főelem a karakterisztikus spektrum K-alfa vonalán lett meghatározva. A nyomelemeket tekintve a detektálási határ 10 ppm, kivéve a báriumnál, ahol 25 ppm volt. Továbbá az XRF mérés során lehetséges a mért minták fél-kvantitatív kiértékelése is.

7.6. ICP-MS vizsgálatok

Az induktív csatolású plazma tömegspektrometriai (angolul *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, röviden ICP-MS) vizsgálati módszer során induktív csatolású plazmaforrást alkalmazva atomizáció és mellette ionizáció zajlik le. Így nyomelemanalitikára, illetve izotópanalitikára alkalmas módszer.

Az ICP-MS vizsgálatok az ALS Global akkreditált laboratóriumában történtek.

7.7. SZIMULTÁN DTA-TG-DTG VIZSGÁLATOK

A termálanalízis több analitikai technikát foglal magába, amely során a hőmérséklet függvényében méri egy anyag fizikai tulajdonságait vagy kémiai reakcióit. A DTA (*Differential Thermal Analysis*) során a hőmérséklet függvényében méri a vizsgálni kívánt anyag és egy referencia anyag hőmérséklet különbségét, miközben a két anyag ugyanannak a hőmérsékletváltozásnak van kitéve. A TG (*Thermogravimetry*) során a vizsgálni kívánt anyag tömegét a hőmérséklet függvényében méri, miközben hőmérsékletváltozásnak van kitéve. A DTG (*Derivative Thermogravimetry*) során a TG görbe deriváltját kapjuk, amely nagyobb felbontással, sokkal pontosabban mutatja a különböző karakterisztikákat. Ha kettő vagy több termálanalitikai módszert egyszerre, egy időben alkalmazunk egy mintán, akkor szimultán technikáról van szó. Mindezek mellett mennyiségi kiértékelés is lehetséges a mért tömegváltozások alapján (Földvári, 2011).

Doktori kutatásom során azért esett a szimultán DTA-TG-TDG módszerre a választásom, mert bár tűzálló anyag a grafit (nem oxidáló környezetben 3550 °C-on olvad meg, párolgási hőmérséklete 4500 °C (Mitchell, 1993)), addig oxidáló környezetben jól

meghatározott termális reakciót mutat. Oxigénben történő vizsgálat során 700–800 °C között, levegőben történő vizsgálat során pedig 600–1000 °C között exoterm reakció (oxidáció: $C+O_2 \rightarrow CO_2\uparrow$) játszódik le (Földvári, 2011). Ráadásul a mintáimban lévő, a grafitosodás útjára lépő szerves anyag detektálása is lehetővé válik ezzel a módszerrel, ugyanis Földvári (2011) szerint a szerves anyagok egy folyamatos sort alkotnak a szénülési foknak megfelelően. A szénülési fok és a szerves anyag égési hőmérséklete között összefüggés figyelhető meg: a szénülési fok növekedésével nő az exoterm reakció hőmérséklete is. Égetésükkor erős exoterm reakció zajlik le, gyakran egy széles hőmérsékleti skálán (kb. 300–700°C között).

A termogravimetriai (szimultán DTA-TG-DTG) vizsgálatok a Miskolci Egyetem Energia és Minőségügyi Intézet laboratóriumában történtek Koós Tamás segítségével, MOM Derivatograph-C számítógép vezérlésű berendezésen, 10 °C/perc lineáris levegőn történő hevítéssel, korund tégelyben. Mindegyik minta esetében a mérés ~100 mg tömeggel történt, kivéve a szendrőládi Helle-patak menti feltárásból származó mintáknál, ahol ~30 mg (SZL-1A), illetve ~50 mg volt (SZL-1B és SZL-1C), valamint a parengi mintánál, ahol ~20 mg tömeggel ment le a mérés.

7.8. RAMAN-SPEKTROSKÓPOS VIZSGÁLATOK

A Raman-spektroszkópia egy gyors és roncsolásmentes módszer, amely kiegészíthet más vizsgálati módszereket vagy függetlenül, önállóan is használható (Sauerer et al., 2017; Schmidt et al., 2017; Henry et al., 2018, 2019a; Khatibi et al., 2018; Schito és Corrado, 2018; Wilkins et al., 2018). Egy spektroszkópiai módszerről van szó, azon belül is rezgési spektroszkópiáról, amellyel a kötések rezgései, periodikus oszcillációi vizsgálhatók. Definíciója szerint a Raman-effektus a látható fény rugalmatlan szóródása anyagi rezgéseken, a Raman-eltolódás pedig a gerjesztéshez viszonyított, relatív hullámszám (Hegman et al., 2011).

A Raman-spektroszkópiával a teljes spektrumok alapján, az alapvonal eltávolítása után, fázisazonosításra van lehetőség, illetve az egyes szórési sávok (Raman-sávok) spektrális paramétereiből fizikai vagy kémiai tulajdonságok azonosíthatók (például feszültség, hibasűrűség, kémiai helyettesítés stb.). Fontos spektrális paraméter a csúcspozíció, az intenzitás, az alapvonal feletti csúcsmagasság, a csúcs alatti terület, valamint a sáv félértékszélessége (Hegman et al., 2011).

A Raman-spektroszkópiai mérések a Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék laboratóriumában történtek, Dr. Fintor Krisztián

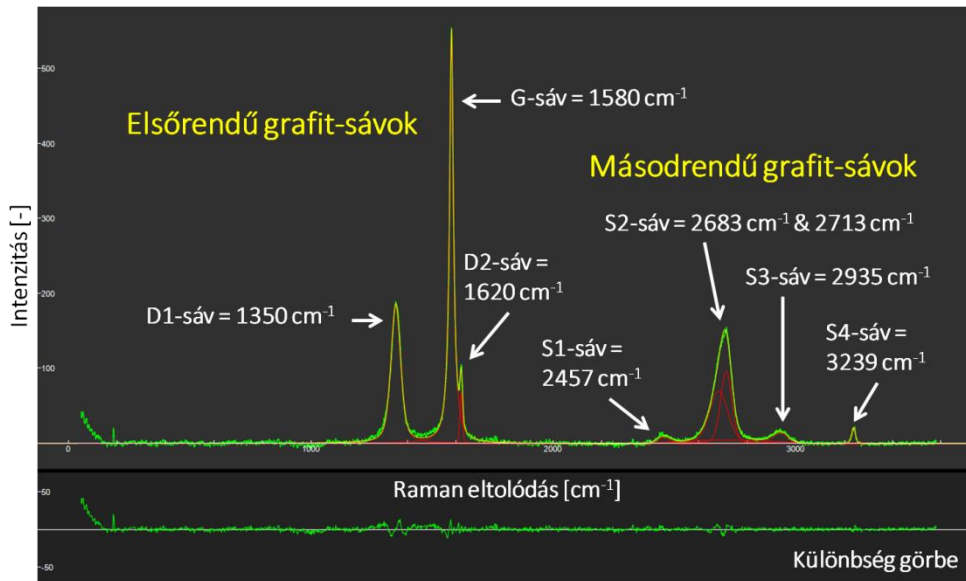
segítségével. A mérésekhez Thermo Scientific DXR Raman-mikroszkópot használtunk (532 nm hullámhosszúságú (zöld) lézer, 2 mW teljesítmény, 3×15 s expozíciós idő, $\sim 4 \text{ cm}^{-1}$ spektrális felbontás – FWHM, 100X objektív, 50 μm pinhole apertúra). A pontmérésekkel kapott Raman-spektrumok dekompozíciója Fityk 1.3.1 szoftverrel történt PseudoVoigt függvényt használva minden esetben.

7.8.1. GRAFIT GEOTERMOMETRIA

A szerves anyag Raman-spektruma elsőrendű ($1000\text{--}1800 \text{ cm}^{-1}$) és másodrendű ($2200\text{--}3500 \text{ cm}^{-1}$) Raman-szórás tartományokból áll (Henry et al., 2019b) (18. ábra). Az elsőrendű tartomány két fő sávból áll: a rendezetlen (D) sávból (kb. $1340\text{--}1360 \text{ cm}^{-1}$) és a grafit (G) sávból (kb. 1580 cm^{-1}). A G-sáv a grafén rétegekben lévő szénatomok síkban történő rezgése miatt alakul ki (Tunistra és Koenig, 1970; Jehlička és Beny, 1999). A grafitban ez az egyetlen fő sáv az elsőrendű tartományban (Henry et al., 2019b).

A rendezetlen, amorf szerves anyagban megjelenő D-sáv a heteroatomok és a szerkezeti hibák miatt alakul ki (Beny-Bassez és Rouzaud, 1985). A D-sávon belül további sávok azonosíthatók, mint kisebb púpok és aszimmetrikus sávok, azonban ezek száma, nomenklatúrája és eredete a dekonvolúció végrehajtása során sokszor ellentmondásos (Beysac et al., 2002; Li et al., 2006; Romero-Sarmiento et al., 2014; Ferralis et al., 2016; Schito et al., 2017; Henry et al., 2018). A leggyakrabban előforduló D-sávok a következők: D1-sáv (kb. 1350 cm^{-1}), D2-sáv (kb. 1610 cm^{-1}), D3-sáv (kb. 1500 cm^{-1}), D4-sáv (kb. 1200 cm^{-1}), D5-sáv (kb. 1260 cm^{-1}) és D6-sáv (kb. 1440 cm^{-1}).

A D2-sáv a grafit rácsában lévő rendezetlenség miatt alakul ki (Allwood et al., 2006), amely az érettség/grafitosodás során először csak vállként jelenik meg a G-sávon, majd elválik tőle és eltűnik (Buseck és Beysac, 2014). A D3-sáv a heteroatomok és rácshibák okozta síkon kívüli rezgés miatt jön létre, amely a grafitosodás során eltűnik (Wopenka és Pasteris, 1993; Beysac et al., 2002; Baludikay et al., 2018). A D4- és D5-sáv az alifás szénhidrogén láncokban lévő CH-típusok miatt alakul ki (Ferralis et al., 2016). A D6-sáv pedig a szerves anyagok mikropórusaiban csapdázódott szénhidrogénekhez kötődik (Romero-Sarmiento et al., 2014).



18. ábra: Szemléltetés a grafit első- és másodrendű sávjairól egy kiértékelt Raman-spektrum alapján. Fertőrákos (Leskóné Majoros et al., 2025a nyomán)

A másodrendű tartomány ($2200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$) 5 sávból áll, amelyek az elsőrendű sávok felhangjai, kombinációi és ezek keverékei (Wopenka és Pasteris, 1993; Beyssac et al., 2002; Childress és Jacobsen, 2017). A másodrendű tartomány sávjai csak az antracit állapottól kezdődően ($>2\%VR_0$ – vitrinit reflexió) válnak fokozatosan azonosíthatóvá: S1-sáv (kb. 2450 cm^{-1}), S2-sáv (kb. 2700 cm^{-1}), S3-sáv (kb. 2950 cm^{-1}) és S4-sáv (kb. 3200 cm^{-1}) (Pasteris és Wopenka, 1991; Wopenka és Pasteris, 1993; Cuesta et al., 1994; Spötl et al., 1998; Jehlička és Beny, 1999; Beyssac et al., 2002; Jehlička et al., 2003; Rantitsch et al., 2004; Zeng és Wu, 2007; Liu et al., 2013; Buseck és Beyssac, 2014; Pawlyta et al., 2015; Rantitsch et al., 2016; Yuman et al., 2018). A grafitosodás előrehaladtával az S2-sáv erősödik, míg az S1-, S3- és S4-sávok gyengülnek. A teljesen rendezett grafitban (nagyon magas hőmérsékleten és nyomáson, eklogit fáciesben) az S2-sáv két külön csúcsra válik szét: a G'_1 (kb. 2690 cm^{-1}) és a G'_2 (kb. 2735 cm^{-1}) csúcsokra (Lespade et al., 1982; Wopenka és Pasteris, 1993; Jehlička és Beny, 1999; Beyssac et al., 2002; Buseck és Beyssac, 2014; Rantitsch et al., 2016).

Beny-Bassez és Rouzaud (1985) használta először a Raman-spektroszkópiát a szenesedés és szerves anyag grafitosodási lépcsőfokainak meghatározására, majd Wopenka és Pasteris (1993) demonstrálta, hogy a D és G sávok területi aránya alkalmas a metamorf kőzetek metamorf fokának a meghatározására. Beyssac et al. (2002) alkották meg az első empirikus egyenletet, amellyel kvantitatívan meg lehet határozni a metamorfózis csúcshőmérsékletét 330 és 650 °C között. Megjegyzendő, hogy az egyenlet a maximálisan

elért hőmérsékletet adja meg, bármilyen fennálló feszültség/nyomás figyelembe vétele nélkül.

Beyssac et al. (2002) egyenlete fordulópontot jelentett, mert ekkortól kezdve kezdték a Raman-spektroszkópiát geotermométerként használni (Henry et al., 2019b).

Geotermométerként a Raman-spektroszkópiának három fő alkalmazási területe van:

1. az anyakőzet érettségének megállapítása a szénhidrogén kutatás során (például Liu et al., 2013; Sauerer et al., 2017; Schito et al., 2017, Schito és Corrado, 2018; Wang et al., 2018; Wilkins et al., 2018; Henry et al., 2019a; Hou et al., 2019; Khatibi et al., 2019; Lupoi et al., 2019),
2. regionális és kontakt metamorfózis során elért maximális hőmérséklet meghatározása (például Wopenka and Pasteris, 1993; Beyssac et al., 2002; Jehlička et al., 2003; Lahfid et al., 2010; Chen et al., 2017; Beyssac et al., 2019; Zhang és Santosh, 2019),
3. a földrengések utáni vetőzónák mentén, a súrlódásból adódó maximális hőmérséklet meghatározása (például Furuichi et al., 2015; Kaneki et al., 2016; Mukoyoshi et al., 2018).

Ráadásul egyre gyakrabban alkalmazzák a Raman-spektroszkópiát a szerves anyag termikus érettségének és az ekvivalens vitrinit reflexió ($\%e_{VR_0}$) értékének a meghatározására is (Henry et al., 2019b).

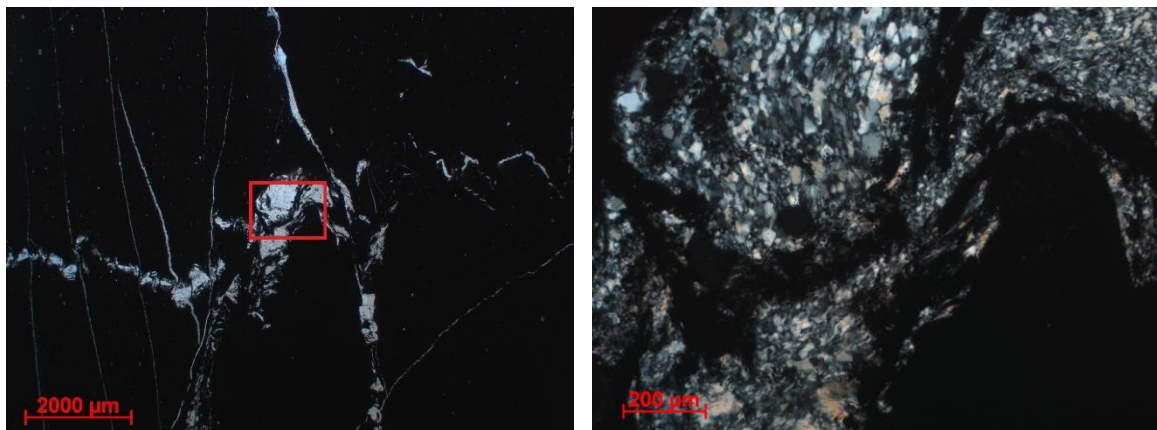
8. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

Ebben a fejezetben a különböző vizsgálati módszerek szerint csoportosítva mutatom be az egyes lelőhelyekről származó minták eredményeit.

8.1. OPTIKAI ÉS SEM-EDX VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

8.1.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

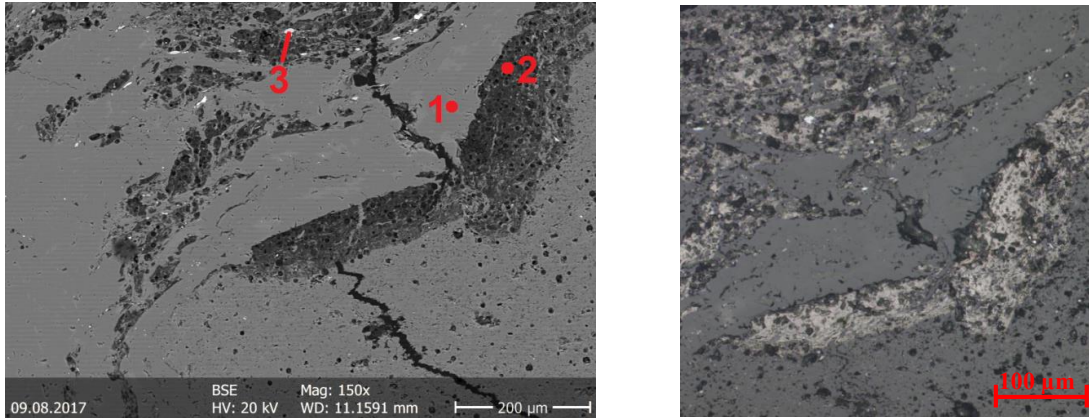
Az optikai és SEM-EDX vizsgálatok alapján a minták főként kvarcból állnak, amely megjelenik egyrészt mikrokristályos formában alapanyagként, másrészt polikristályos repedéskitöltőként a mintákat átjáró erekben (19. ábra). Áteső fényben vizsgálva a mintát, a mikrokristályos kvarc majdnem átlátszatlaná teszi az alapanyagot (ezért is látszik feketének áteső fénynél az alapanyag a 19. ábrán), valamint jól megfigyelhető, hogy a polikristályos repedéskitöltő kvarckristályok a kőzetet ért deformáció irányát veszik fel (19. ábra). Továbbá mikrokristályos muszkovit (szericit) is azonosítható a mintákban, amely 10–40 μm -es pikkelyekként figyelhető meg elszórtan az alapanyagban és a kvarc erekben (20. ábra), valamint akár 100 μm -es nagyságú szemcséket is alkot. Az EDX mérések alapján a szericit gyakran Mg- és Fe-tartalmú, amelyben Ca-, Na-, Ti- és V-tartalom is észlelhető (XII. melléklet) (Majoros, 2017).



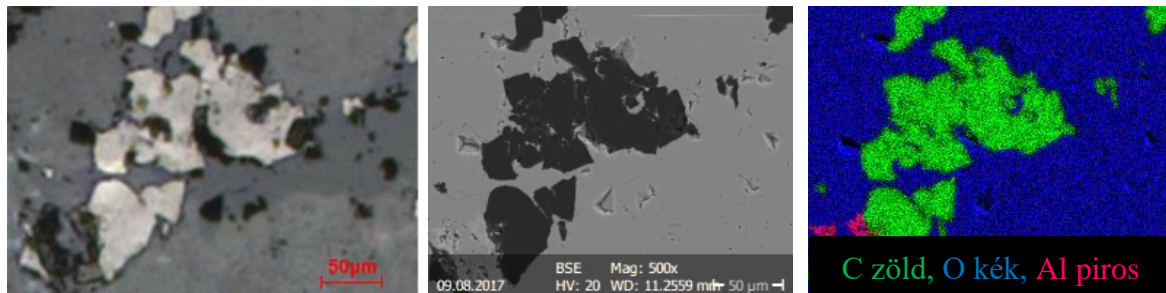
19. ábra: Polikristályos kvarcerek a mikrokristályos kvarc alapanyagban, a bekeretezett részről nagyított felvétel (áteső fény, balra 1N, jobbra XN) (Majoros, 2017)

A mintákban a grafit előfordul egyrészt nagyobb (akár 50–100 μm -es nagyságú) szemcsék formájában a kvarcerekben (20–22. ábrák), másrészt kisebb pikkelyekként (a pár μm -es nagyságtól a 10–20 μm -es nagyságig) elszórtan az alapanyagban (20. ábra), valamint akár 300 μm -es, a deformáció irányát követő grafitos-szericites-kvarcos aggregátumokat

alkotva (20. és 22. ábra). Mindhárom esetben a grafithoz kevés S-tartalom kötődik az EDX mérések alapján. A 20. és 22. ábrákon jól megfigyelhető, hogy a grafitosodás a szerkezeti elemeket követi (Majoros, 2017).



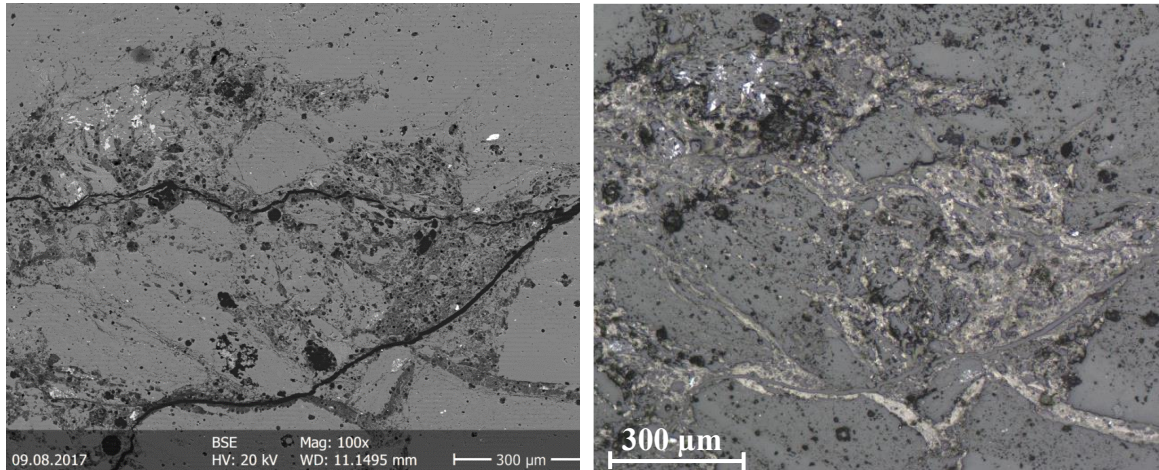
20. ábra: Kvarc alapanyagban és érben (középszürke) V- és Ti-tartalmú szericit pikkelyek (világosszürke, 1. mérési pont), anatóz szemcsék (fehér, 3. mérési pont), illetve grafit-kvarc-szericit keverékű aggregátumok (sötétszürke, 2. mérési pont). Visszaszórt elektronkép (balra), polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N (jobbra) (Majoros, 2017)



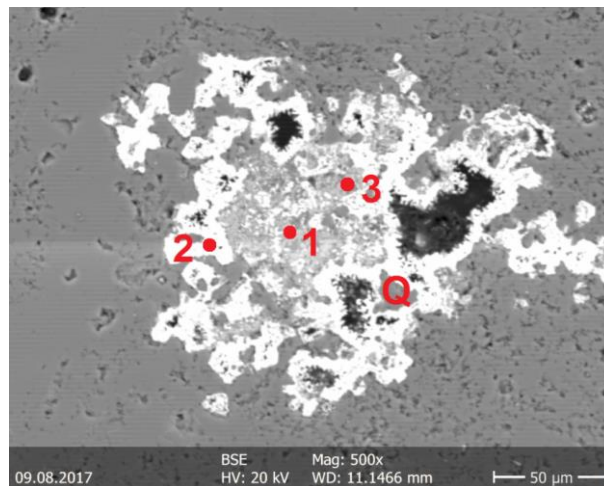
21. ábra: Grafit pikkelyek (barnásszürke) kvarcban (középszürke), 2. feltárás. Polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N (balra), visszaszórt elektronkép (középen), és az arról készült elem térkép (jobbra). A színeknek megfeleltethető fázisok: zöld – grafit, kék – kvarc, piros – muszkovit (Majoros, 2017)

A SEM-EDX mérések során, járulékos ásványként észlelhető helyenként pirit, magnetit, cirkon, monacit-(Ce) (amely leggyakrabban a deformációs zónákban csoportosul), xenotim, valamint anatóz, ez utóbbit optikai tulajdonságok alapján határoztam meg. Reflexiós mikroszkópban vizsgálva az anatóz a rutilhoz hasonlóan szürke reflexiós szint mutat, azonban az anatóz belső reflexiója fehér-kékesszürke, míg a rutilé narancssárga-vörös színű (Bowles, 2021). Az anatóz leggyakrabban pár µm-es átmérőjű szemcsék formájában jelenik meg elszórtan az alapanyagban, de szemcsehalmazokat is alkot (22. ábra). Gyakran

Nb- és V-tartalmú az EDX mérések alapján (XII. melléklet). Továbbá As- és Cu-tartalmú vas-oxidos szemcsék és ér, kaolinit, valamint agyagásvány aggregátum fordul elő a mintákban. APS (alumínium-foszfát-szulfát) ásványok is észlelhetők a mintákban, például goyazit-gorceixit elegykristályok (23. ábra) figyelhetők meg, vas-oxidos (goethites) bekérgeződéssel. A XII. melléklet ezen ásványok kémiai összetételét tartalmazza EDX-elemzés alapján a mért pontokban (Majoros, 2017).

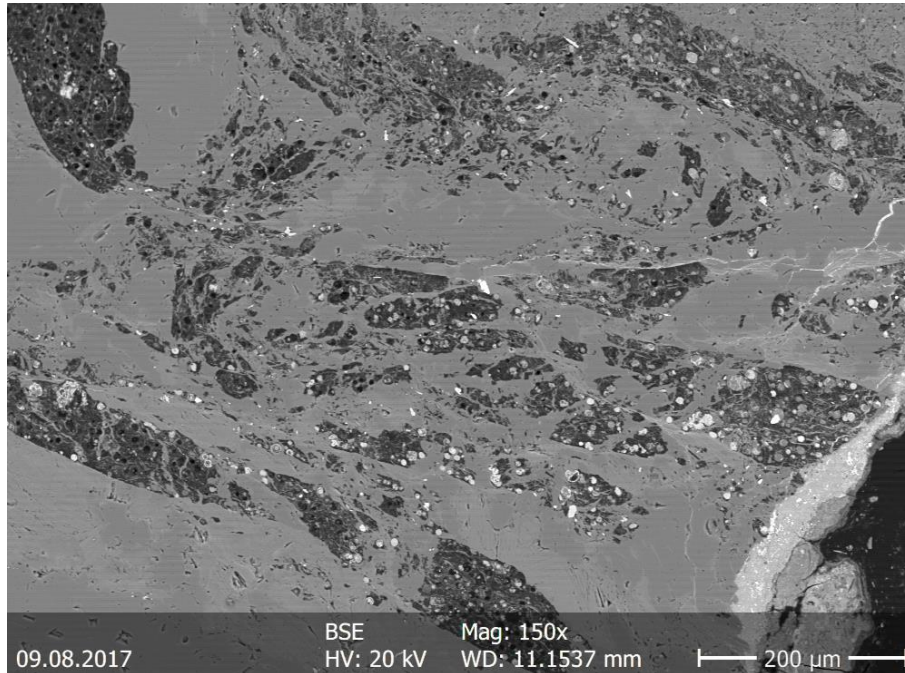


22. ábra: Grafitos aggregátumok (grafit-szericit-kvarc keverék, sötétszürke) kvarc szemcsék között (világos szürke), elszórtan anatózzal (fehér), 2. feltárás. Balra visszaszórt elektronkép; jobbra polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N (Majoros, 2017)



23. ábra: APS-ásványok (goyazit-gorceixit elegykristályok, 1. és 3. mérési pont) vas-oxidos (goethites, 2. mérési pont) bekérgeződéssel kvarcban (közép szürke), 2. feltárás. Visszaszórt elektronkép (Majoros, 2017)

Az APS-ásványok megfigyelhetőek egyrészt mintegy kéregszerűen a (feltehetően deformáció hatására kialakult) repedések mentén, másrészt a grafitos szemcsékhez, fészkekhez kötődő gömböcskék formájában is (24. ábra) (Majoros, 2017).

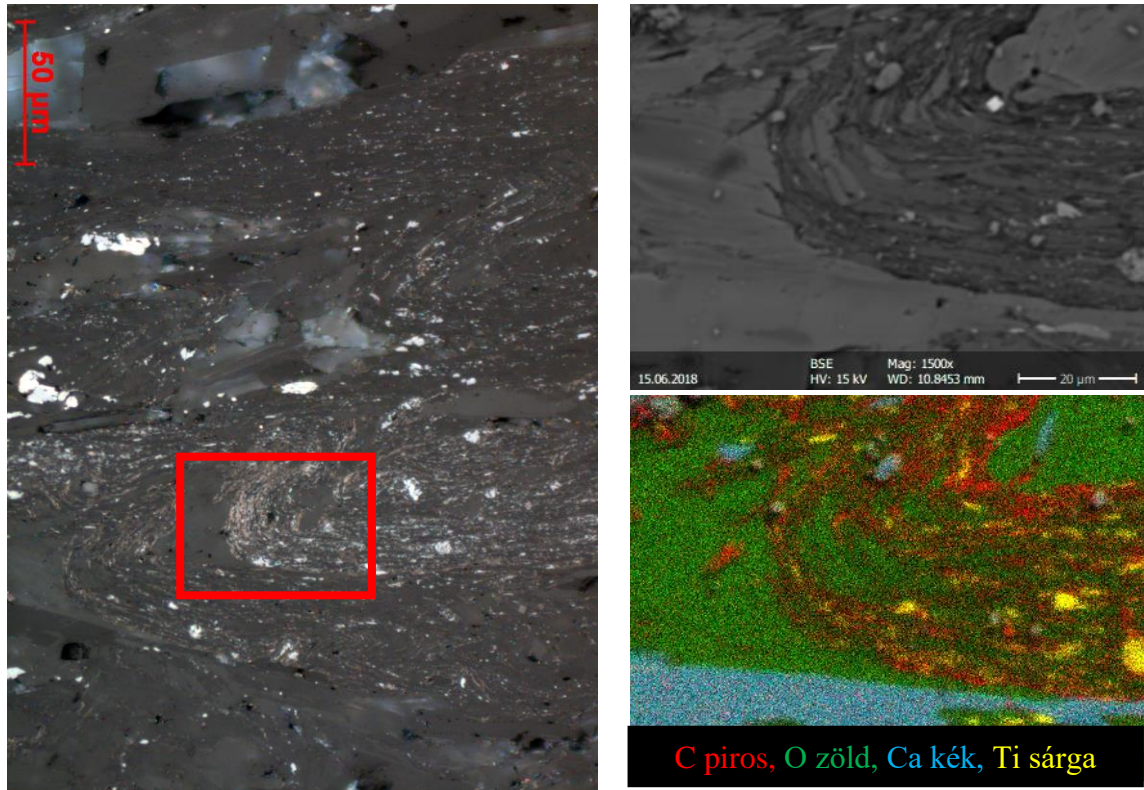


24. ábra: V-tartalmú APS-ásványok (fehér) grafit fészkekhez (sötétszürke) kötődve kvarcban (középszürke). 1. feltárás, visszaszórt elektronkép (Majoros, 2017)

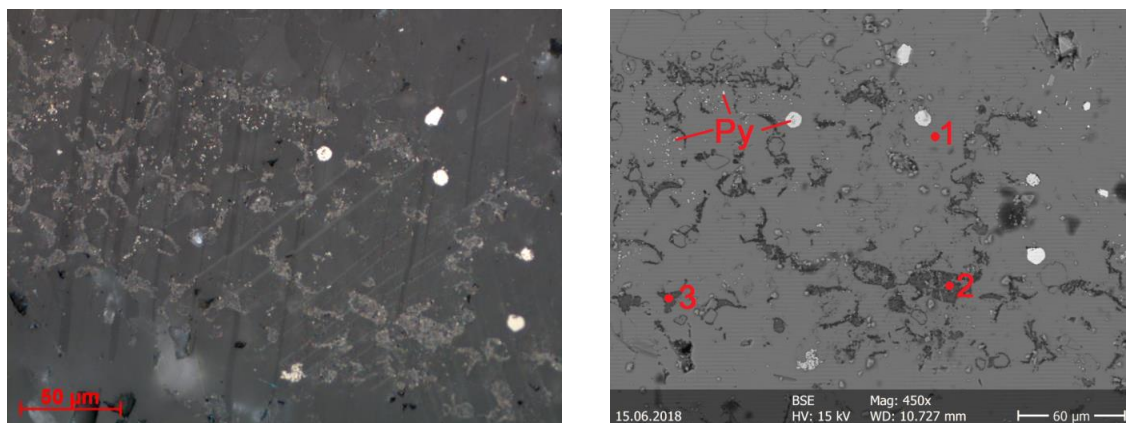
8.1.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS

A 369. számú (278–295 m mélységből származó) minta alapanyagát csillám lemezek (főként muszkovit, amely paragonitosodott és fengitesedett), valamint kalcit alkotják. A muszkovitban kevés Ti-, Fe- és V-tartalmat is lehet észlelni az EDX mérések alapján. A kalcit gyakran alacsony Mg- és Fe-tartalmú (Majoros, 2018).

A grafit 20–30 μm -es nagyságú pikkelyekként észlelhető, amelyek 300 μm -nél nagyobb nagyságú, lemezszerű aggregátumokba rendeződnek. Jól megfigyelhető főleg az optikai képeken, hogy a kőzetet ért deformációk hatására ezek a grafitos aggregátumok mikroredőket formálnak (25. ábra). A mintában nemcsak önállóan fordulnak elő a grafit pikkelyek, hanem keveréket is alkotnak muszkovittal és kalcittal (26. ábra). Ezek a $\sim 30 \mu\text{m}$ -es nagyságú lencse- és pikkelyszerű képződmények elszórtan jelennek meg a kalcit alapanyagban. Ritkán kevés kéntartalom is kötődik a grafithez (Majoros, 2018).



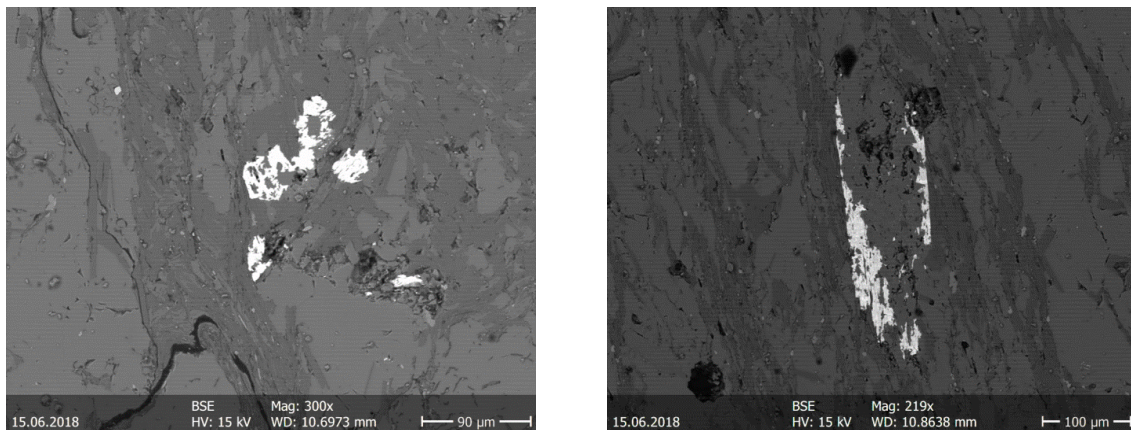
25. ábra: Mikroredőket formáló grafitos aggregátumok. Polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N (balra), a bekeretezett területről visszaszórt elektronkép (jobbra fent) és az arról készült elemtérkép (jobbra lent). A színeknek megfeleltethető fázisok: piros – grafit, zöld – csillám, kék – kalcit, sárga – TiO_2 . Szendrőlád – 369 (Majoros, 2018)



26. ábra: Kalcit alapanyagban (1. mérési pont) grafitos aggregátumok (grafit-muskovit-kalcit keverék, 2. és 3. mérési pont), elszórtan pirit szemcsékkel. Balra polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N; jobbra visszaszórt elektronkép. Szendrőlád – 369 (Majoros, 2018)

A 369. számú mintában járulékos ásványként észlelhető klorit, cirkon, pirit (26. ábra), kalkopirit, Fe-tartalmú szfalerit (kevés kadmiummal) és kvarc is. A pirit megfigyelhető egyrészt 100–400 μm -es szemcsékként, amelyekben zárványok is előfordulnak (~ 20 μm -es Ca-, Mg-tartalmú sziderit zárvány és ~ 5 μm -es Pb-szulfosó zárvány); másrészt pár μm -es hintésként (26. ábra) és ~ 10 μm átmérőjű framboidális piritként (26. ábra) a kalcit alapanyagban. A kalciton kívül más karbonát-ásvány (dolomit és sziderit) is előfordul a mintában. 10 μm -es szemcsék formájában TiO_2 is megfigyelhető, néhol alacsony Nb-tartalommal az EDX mérések alapján (Majoros, 2018).

150–200 μm -es nagyságú, mállott, sajátalakú, La-, Nd-, Gd-, Th- és U-tartalmú RFF-karbonát kristályok (bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristályok) is észlelhetőek a mintában (27. ábra, XIII. melléklet), amelyek néhol kémiai zónásságot is mutatnak (Majoros, 2018).



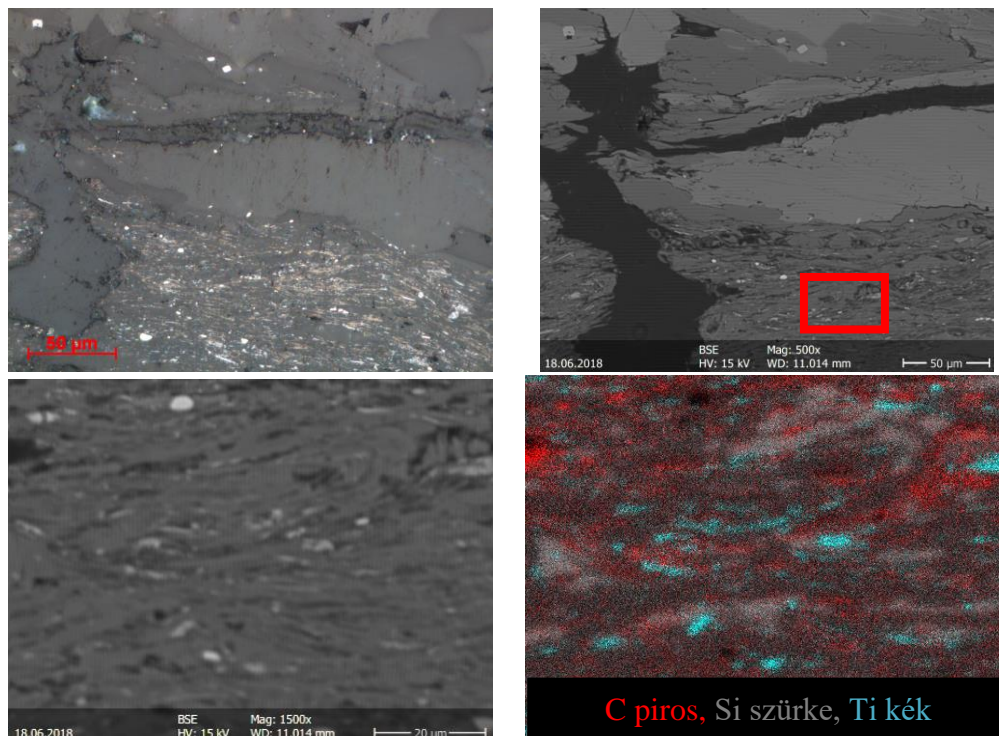
27. ábra: Bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristályok (fehér) muszkovit és klorit alapanyagban, visszaszórt elektronképek. Szendrőlád – 369 (Majoros, 2018)

A 371. számú (288 m mélységből származó) minta alapanyagát is, a 369-es mintához hasonlóan, muszkovit és kalcit alkotja. Jól észlelhető főként az optikai képeken a minta irányított szövete (28. ábra), valamint a kőzetet ért deformációk hatására kialakult mikroredők. A muszkovitban gyakran kevés Na-, Fe- és Ti-tartalmat is lehet észlelni az EDX mérések alapján. A kalcit előfordul egyrészt alapanyagként durvakristályos formában, másrészt ~ 50 μm -es elnyúlt szemcsékként a muszkovitos-kloritos alapanyagban. Mindkét esetben kevés Fe- és Mg-tartalommal észlelhető az EDX mérések alapján (Majoros, 2018).

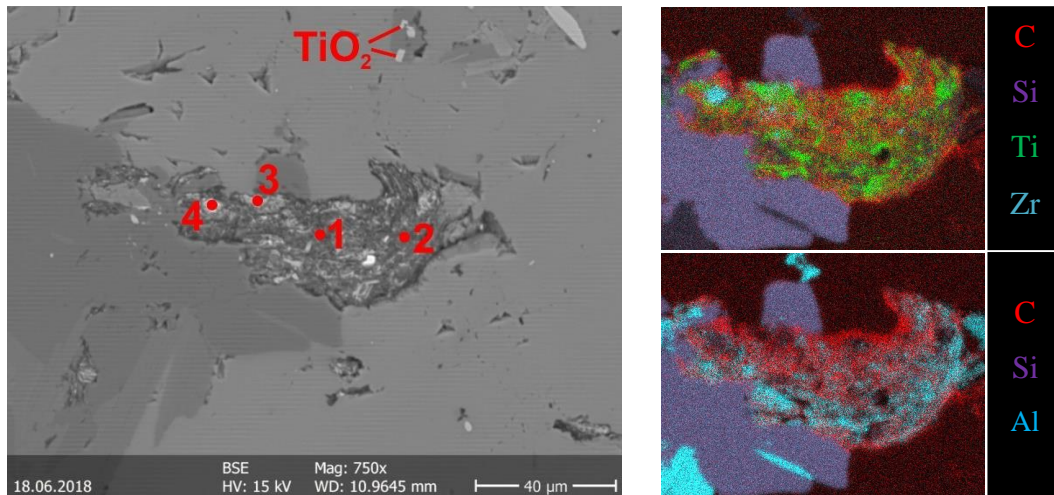
A grafit a minta irányított szövetében általában ~ 20 μm -es pikkelyek formájában figyelhető meg (28. ábra), de nagyobb, akár 80 μm -es nagyságú grafitos aggregátum is megfigyelhető. A kalcitérben megjelenő, lefűződés szerű relikv szemcsében a grafit Ti és Zr

ásványokkal keveréket alkotva jelenik meg (29. ábra), ezek az EDX mérések alapján cirkon és Zr-tartalmú TiO_2 , valamint illit zárványok is előfordulnak (29. ábra) (Majoros, 2018).

Számos járulékos ásvány megfigyelhető a 371. számú mintában, egyrészt szulfidásványok: pirit (a szemcsék mérettartománya a pár μm -estől a 200 μm -esig terjed, továbbá framboidális alakban is előfordul), molibdenit ($5 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ -es szemcse) és szfalerit; másrészt oxidok: kvarc, TiO_2 (általában pár μm -es szemcsék, de a grafitos aggregátumban észlelhető egyrészt keverékként, másrészt zárványként Zr-tartalommal) és vas-oxid (Majoros, 2018).



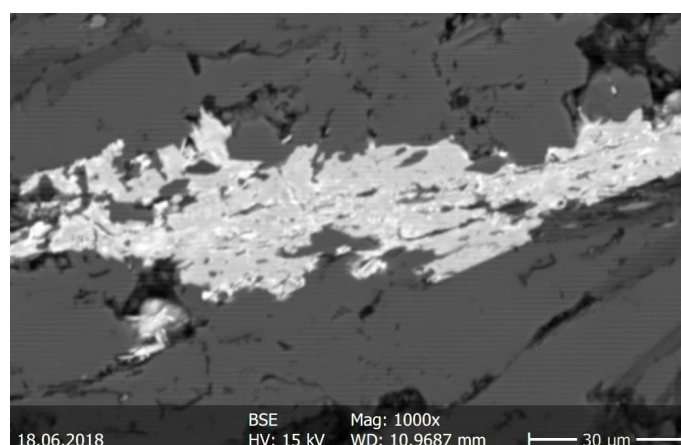
28. ábra: Irányítottan elhelyezkedő grafit pikkelyek és anatóz szemcsék csillám alapanyagban. Balra fent polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N; jobbra fent visszaszórt elektronkép. A piros téglalappal jelölt területről visszaszórt elektronkép (balra lent), és az arról készült elem térkép (jobbra lent). A színeknek megfeleltethető fázisok: piros – grafit, szürke – csillám, kék – TiO_2 . Szendrőlád – 371 (Majoros, 2018)



29. ábra: Zr-tartalmú grafit-TiO₂ keverékű szemcsében (1. és 2. mérési pont) Zr-tartalmú TiO₂ (3. mérési pont) és cirkon (4. mérési pont) zárványok. Visszaszórt elektronkép (balra) és az arról készült elemtérképek (jobbra fent és lent). Szendrőlád – 371 (Majoros, 2018)

A karbonátok közül sziderit (helyenként az eltérő Mg-, Ca- és Fe-tartalom kémiai zónásságot eredményez) és RFF-karbonát (bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály) fordul elő a mintában (30. ábra). A bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály főleg 25–50 µm-es szemcsék formájában figyelhető meg irányítottan a szövetben. Azonban egy ~200 µm-es nagyságú, kémiai zónásságot mutató példánya is észlelhető (30. ábra), amelynek a világosabb részei kevesebb kalciumot, valamint több uránt és tóriumot tartalmaznak (Majoros, 2018).

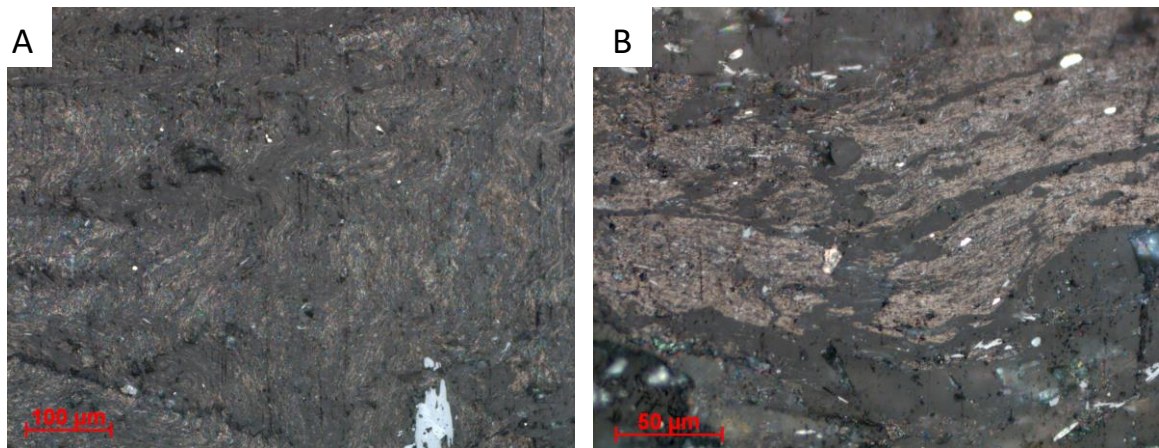
Járolékos ásványként ezeken kívül még törmelékes albit maradvány, illit, valamint pár µm-es nagyságú cirkon szemcsék is megfigyelhetőek a mintában (Majoros, 2018).



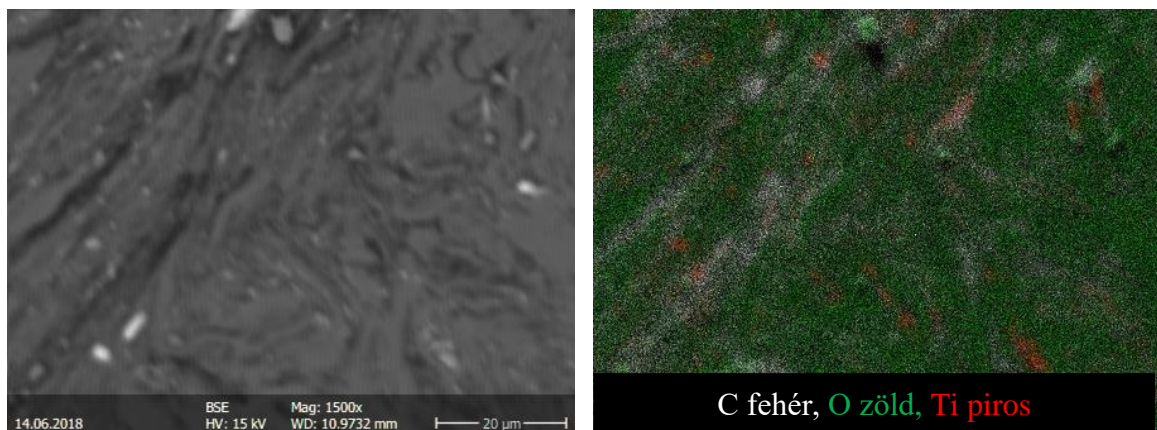
30. ábra: Kémiaileg zónás bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály visszaszórt elektronképe. A szegélyi részén (világosszürke) több kalciumot, míg a magjában (fehér) kevesebb kalciumot és több uránt és tóriumot tartalmaz. Szendrőlád – 371 (Majoros, 2018)

A 373. számú (291 m mélységből származó) minta alapanyagát kvarc, illetve 50–100 μm -es nagyságú csillámlemezek alkotják, főként muszkovit (kevés Ti- és V-tartalommal), amely paragonitosodott és fengitesedett (Majoros, 2018).

Az optikai felvételeken (31. ábra) jól észlelhető a minta deformációs hatásra kialakult, mikroredőket is formáló, irányított szövete, amelyben a grafit halvány barna színnel figyelhető meg. Az átlagosan 30–50 μm -es nagyságú grafit pikkelyek (32. ábra) 300 μm -nél nagyobb lamellákat és lemezszerű aggregátumokat formálnak (31. ábra). A grafitban kéntartalmat nem lehetett mérni az EDX mérések során (Majoros, 2018).



31. ábra: A – Mikroredőket formáló, irányítottan elhelyezkedő grafit pikkelyek (világos barna). B – Lencseszerű aggregátumokban irányítottan elhelyezkedő grafit pikkelyek (világos barna). Polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N. Szendrőlád – 373 (Majoros, 2018)

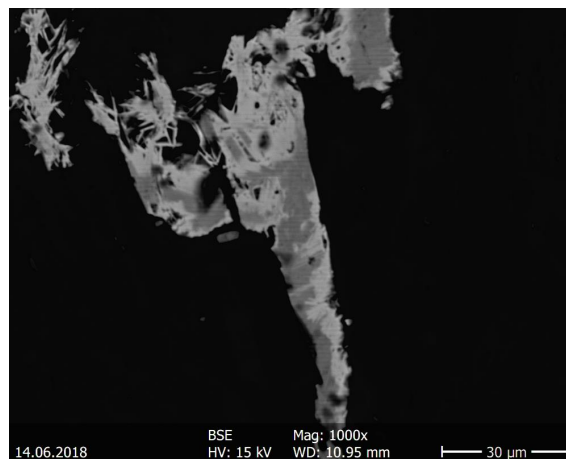


32. ábra: Grafit pikkelyekről visszaszórt elektronkép (balra), és az arról készült elemtérkép (jobbra). Szendrőlád – 373 (Majoros, 2018)

A 373. számú mintában számos járulékos ásvány figyelhető meg. A TiO_2 , amely optika alapján anatáznak mondható, észlelhető egyrészt $\sim 80 \mu\text{m}$ -es nagyságú szemcsékként, másrészt $10\text{--}20 \mu\text{m}$ -es tűk formájában elszórtan a mátrixban, a szövet irányítottságának megfelelően beforgatva. Ritkán Nb-tartalom is mérhető a TiO_2 -ban (XIII. melléklet). A pirit a pár μm -es szemcséktől, az akár $100\text{--}600 \mu\text{m}$ -es nagyságú, sajátalakú kristályokig megfigyelhető a mintában. Egy helyen Ni-tartalom is észlelhető az EDX mérések alapján. A pirit mellett megjelenik még galenit ($3\text{--}4 \mu\text{m}$ -es szemcse), szfalerit, valamint piritben és annak repedéseiben $10\text{--}20 \mu\text{m}$ -es Pb-szulfosó szemcsék is (Majoros, 2018).

A 373. számú mintában továbbá észlelhető még fluorapatit ($30\text{--}80 \mu\text{m}$ -es szemcsék), monacit ($\sim 300 \mu\text{m}$ -es relikum), cirkon (általában relik, de van sajátalakú prizmás kristály is) és klorit (megjelenik egyrészt a redőződéssel irányítottan, $20 \mu\text{m}$ -es, orsó alakú szemcsékként, másrészt $100 \mu\text{m}$ -es aggregátumként is). A fluorapatitban $20 \mu\text{m}$ -es, La-, Ce-, Nd-tartalmú RFF-szilikát zárvány is megfigyelhető. Ezeken kívül még Ca-szulfát és kaolinit keveréke is észlelhető a mintában (Majoros, 2018).

Az előző két szendrőládi mintához képest a kalcit nem alapanyag alkotóként, hanem csak járulékos ásványként figyelhető meg a 373. számú mintában, néhol kevés Mg-tartalommal. Azonban a RFF-karbonát (bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály) ebben a mintában is észlelhető, amely ráadásul kémiai zónásságot mutat (33. ábra, XIII. melléklet). A kb. $100 \mu\text{m}$ -es szemcse magja a visszaszórt elektronképeken középszürkével, míg a szegélye világosszürkével figyelhető meg az eltérő Ca- és RFF-tartalom miatt (Majoros, 2018).

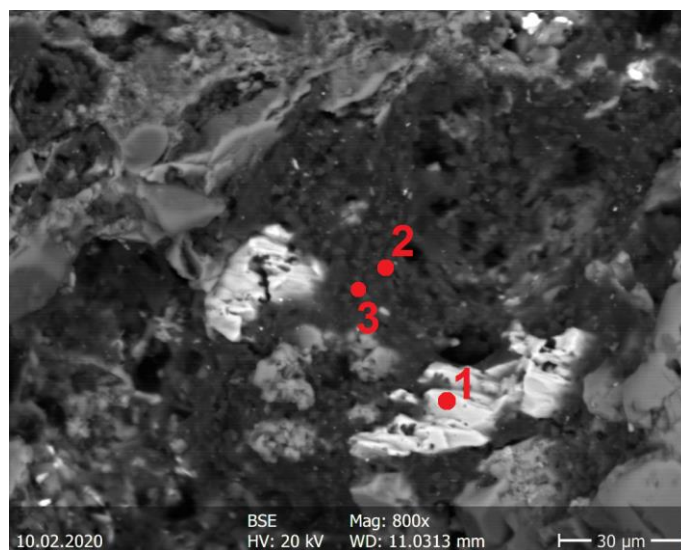


33. ábra: Kémiaileg zónás bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály visszaszórt elektronképe. A magjában (középszürke) több kalciumot, míg a szegélyi részén (világosszürke) kevesebb kalciumot tartalmaz. Szendrőlád – 373 (Majoros, 2018)

8.1.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK

A megfigyelések alapján a minták metamorf szövetűek és porózusak. A minták alapanyaga orientált kalcit kristályokból áll (gyakran alacsony Mg- és Fe-tartalommal), amelyek gyakran poliszintetikusán ikresedtek. A durvább szemcsés kalcit érkítőlként is megfigyelhető. Erek és finom repedések közelében, a deformált zónákban 50–100 µm-es csillám lemezek (muszkovit, Na-tartalmú muszkovit és fengit), valamint 50–200 µm-es kvarc szemcsék találhatóak. Járulékos ásványként megjelenik többek között pirit, vas-oxidok (néhol alacsony Zn-, Mn- és As-tartalommal), arzenopirit, szfalerit, xenotim (XIV. melléklet), RFF-tartalmú allanit (XIV. melléklet), albit és dolomit. Továbbá egy Cu-Sb-szulfid ásvány, illetve bastnäsit-(Ce) tük (XIV. melléklet) is észlelhetők a TiO₂ ásványok (optika alapján rutil és anatáz), cirkon, monacit (XIV. melléklet) és fluorapatit mellett (Majoros és Kristály, 2020).

Az OM és SEM-EDX vizsgálatok során nem lehetett önálló grafit pikkelyeket észlelni, mert olyan kisméretűek és vékonyak, hogy a minta-előkészítés során kiperegtek a mintákból (csak a megmaradt helyeiket lehetett látni). Csupán a nagyobb méretű (50–300 µm), deformált zónákhoz kötődő, a foliációval párhuzamosan elhelyezkedő grafitos-rétegszilikátos keverékek figyelhetők meg (34. ábra). Ezek gyakran alacsony S- és As-tartalommal jelennek meg az EDX mérések alapján. Az optikai mikroszkópos észlelések során ezek a keverékek halvány barnás rózsaszínűek 1N-nál és anizotrópok ×N-nál (Majoros és Kristály, 2020).

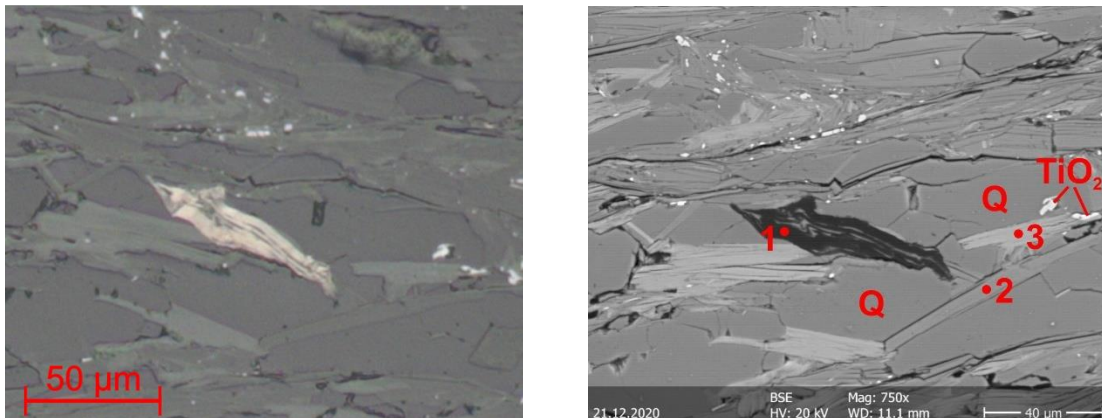


34. ábra: Allanit (1. mérési pont) és grafitos-rétegszilikátos keverék (2. és 3. mérési pont) visszaszórt elektronképe. Szendrőlád, Helle-patak (Majoros és Kristály, 2020)

8.1.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ

A szendrői minták metamorf szövetűek, erősen irányítottak, alapanyagukat kvarc szemcsék és 20–50 µm-es filloszilikát lemezek (fengitesedett muszkovit, klorit) alkotják. A fengitesedett muszkovit gyakran kevés Na- és Ti-tartalmat mutat az EDX mérések alapján.

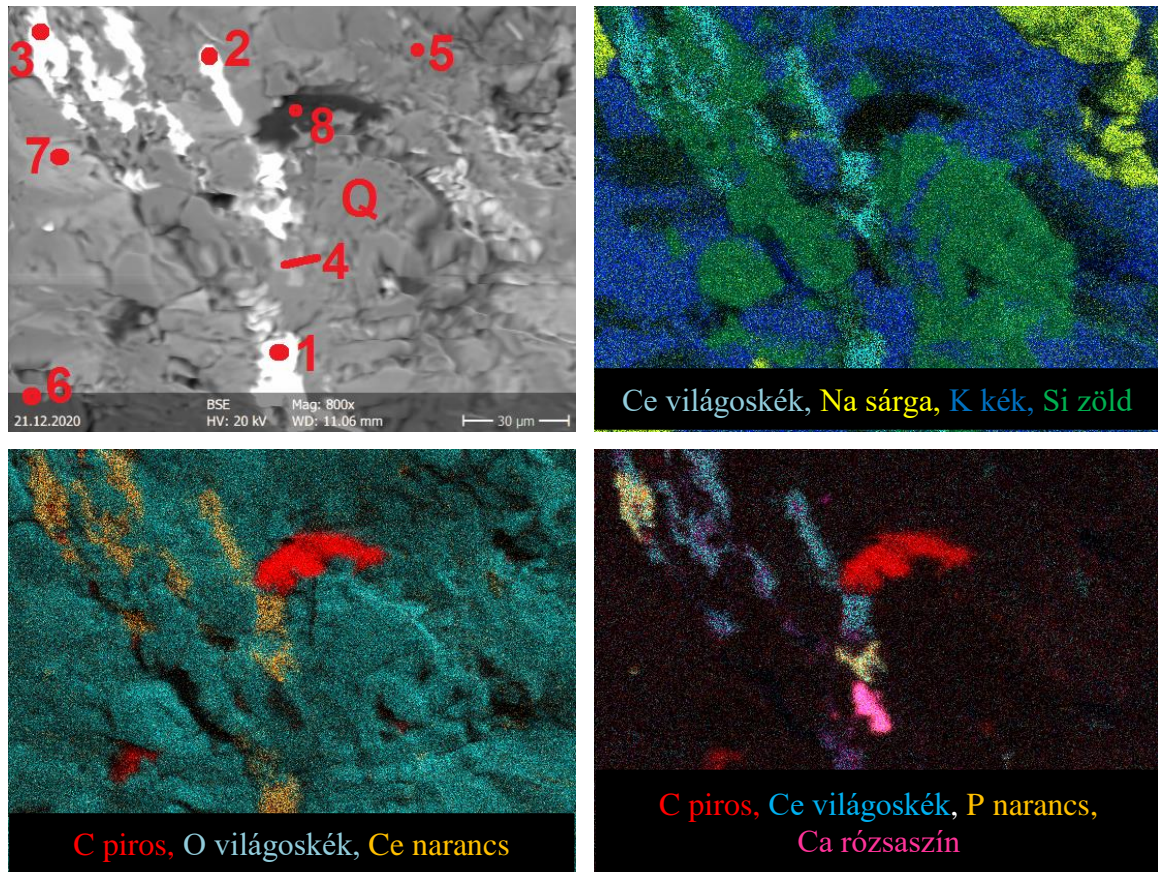
A megfigyelések alapján a grafit 30–150 µm-es nagyságú, deformált pikkelyek formájában, irányítottan helyezkedik el a minták szövetében (35. ábra). Az optikai észlelések során anizotrópiával, erős bireflexióval, pleokroizmussal és unduláló kioltással figyelhetők meg a deformált grafit pikkelyek. Az EDX mérések nem mutatnak kéntartalmat a grafitban.



35. ábra: Deformált grafit pikkely az irányított szövetben TiO_2 szemcsékkel. Balra – optikai kép, 1N; jobbra – visszaszórt elektronkép. Grafit – 1. mérési pont, muszkovit – 2. mérési pont, klorit – 3. mérési pont, Q – kvarc. Szendrő (a szerző saját szerkesztése)

Számos járulékos ásvány megfigyelhető a mintákban. Az oxidok közül TiO_2 észlelhető, amely megjelenik egyrészt 10–20 µm-es nagyságú tűk formájában, másrészt 20–40 µm-es xenomorf szemcsékként (35. ábra), illetve 100 µm-es nagyságú szagenit rácsozalmazokként. Gyakran kevés Nb-tartalmat is mutatnak az EDX mérések alapján (XV. melléklet).

Ezen kívül észlelhetők még a mintákban 5–10 µm-es xenotim szemcsék, 50 µm-es nagyságú RFF-karbonátok (bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegykristályok), 50–80 µm-es fluorapatit szemcsék (XV. melléklet), pár µm-es nagyságtól a 10–20 µm-es nagyságig sajátalakú, illetve xenomorf cirkon szemcsék, 20–80 µm-es allanit kristályok, valamint 20–40 µm-es monacit szemcsék (36. ábra, XV. melléklet). Továbbá kaolinit, valamint 40–60 µm-es idiomorf és hipidiomorf albit kristályok figyelhetők meg a mintákban.



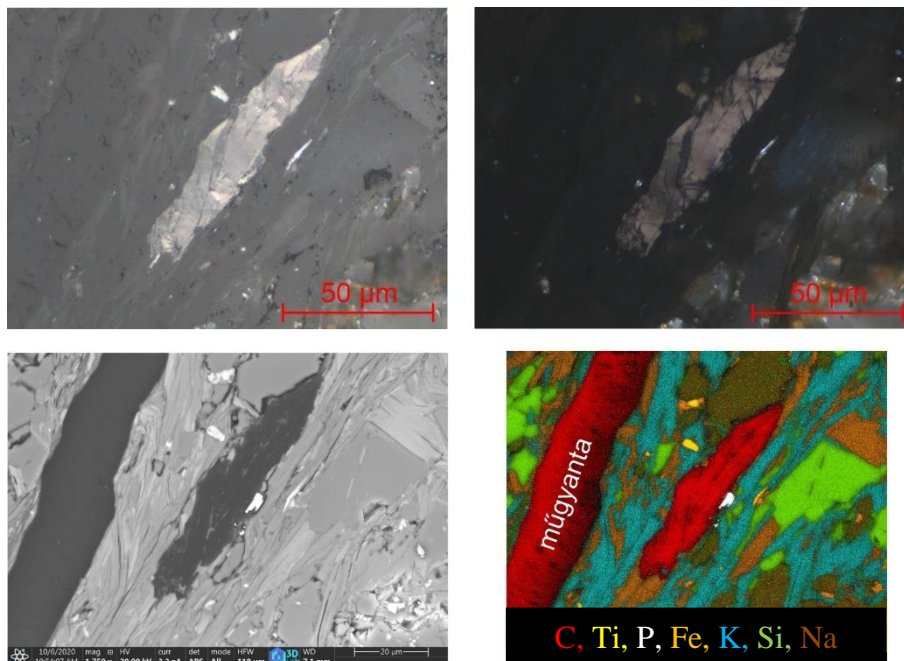
36. ábra: Bastnäsit elegykristályok (1. pont), allanit (2. pont), monacit (3. pont) és fluorapatit (4. pont) szemcsék muszkovit (5. pont) és klorit (7. pont) alapanyagban. Mellettük albit (6. pont) és kvarc szemcsék (Q), valamint grafit pikkely (8. pont). Balra fent – visszaszórt elektronkép; balra lent, jobbra fent és lent – elemterképek. Szendrő (a szerző saját szerkesztése)

8.1.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES

Az optikai és SEM-EDX megfigyelések alapján a minták szövete erősen irányított, foliált, amelyben nyírási zónára jellemző deformációs elemek figyelhetők meg, például krenulációs palásság, mikroredőzöttség, kalcit kristályok deformációs ikresedése, nyomásárnyék rutil szemcsék körül, valamint grafit kristályok unduláló kioltása (Leskóné Majoros et al., 2021).

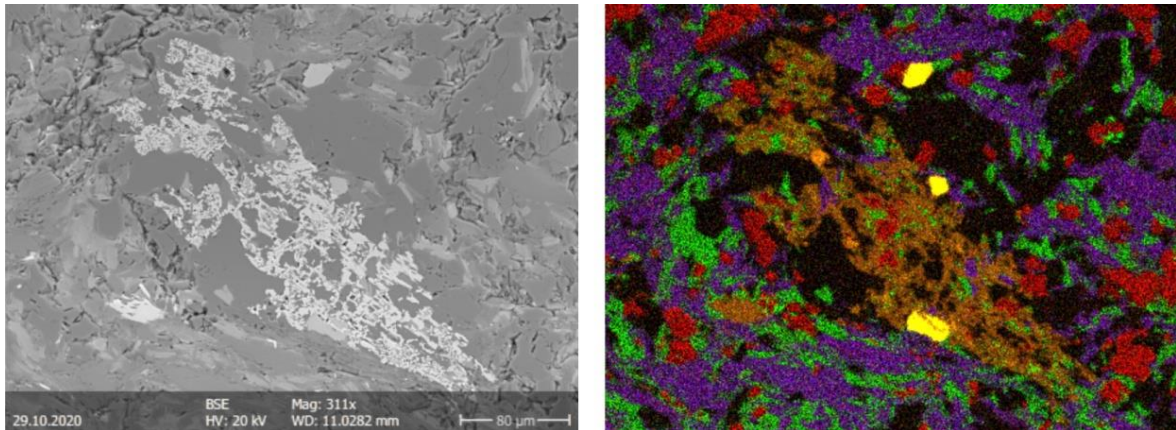
A minták alapanyagát 20–50 µm-es nagyságú kvarc szemcsék és filloszilikát lemezek (klorit, muszkovit, fengit) alkotják. A kvarc gyakran unduláló kioltással jelenik meg, a fengitben pedig gyakran kevés Ti-tartalom is jelentkezik az EDX mérések során. A klorit pikkelyekben az EDX mérések alapján nagyobb a Fe-tartalom, mint a Mg, így a vasgazdag klinoklór típusba sorolható (Leskóné Majoros et al., 2021).

A minták számos járulékos ásványt tartalmaznak. Az észlelések alapján a grafit egyrészt 50–150 μm -es deformált pikkelyes formában, másrészt 30–100 μm -es nem deformált pikkelyek formájában irányítottan helyezkedik el a minták szövetében (37. ábra). Továbbá 10–30 μm -es nagyságú szemcsés halmazokat is alkot. Az optikai megfigyelések során tökéletes anizotrópiával, erős bireflexióval, pleokroizmussal és unduláló kioltással figyelhető meg. Az EDX mérések nem mutatnak kéntartalmat a grafit pikkelyekben (Leskóné Majoros et al., 2021). A grafit minden morfológiai típusára jellemzőek a csillám-tartalmú zárványok, amelyek a SEM-EDX mérések alapján fengitesedett muszkovit és/vagy illit zárványok (Leskóné Majoros et al., 2025b).



37. ábra: Grafit pikkely az irányított szövetben. Balra fent – optikai kép, 1N; jobbra fent – optikai kép, xN; balra lent – visszaszórt elektronkép; jobbra lent – elemtérkép. A színeknek megfelelő fázisok: piros – grafit, sárga – TiO_2 , fehér – monacit, narancs – klorit, kék – muszkovit, zöld – kvarc, barna – albit. Meszes (Leskóné Majoros et al., 2021)

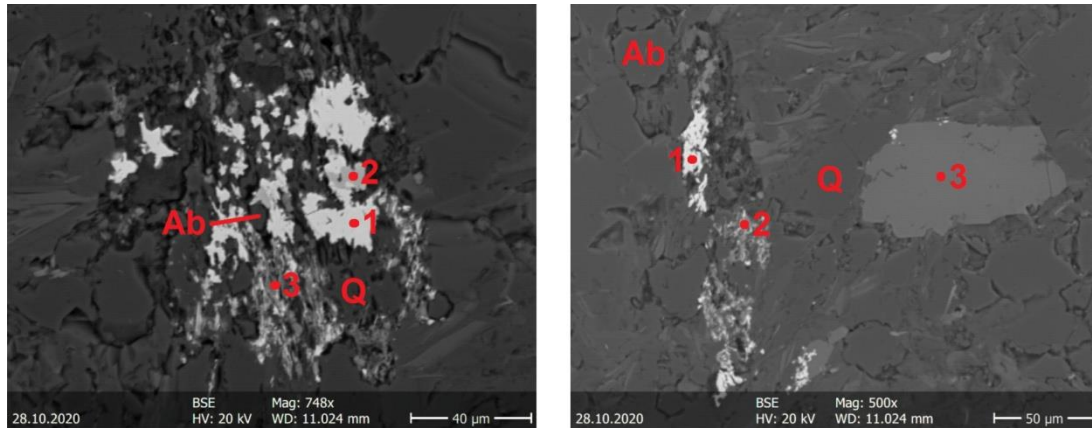
Ti-tartalmú ásványként főként TiO_2 -ok észlelhetők a mintákban (rutil és anatóz is azonosítható az optikai vizsgálatok alapján). A TiO_2 -ok 10–20 μm -es nagyságú tűk formájában jelennek meg, amelyek gyakran 200–400 μm -es fészkekbe, halmazokba rendeződnek (38. ábra). Ritkán kevés Nb-tartalmat is lehet mérni bennük. A TiO_2 -ok mellett elvétve ilmenit is azonosítható a mintákban ~ 10 μm -es nagyságban (Leskóné Majoros et al., 2021).



38. ábra: TiO_2 halmaz fluorapatit szemcsékkel kvarc és csillám mátrixban. Balra – visszaszórt elektronkép, jobbra – fázistérkép (az elem térkép fázisokat is azonosít). Kvarc – fekete, apatit – sárga, kalcit – narancs, rutil – barna, fengit – lila, klorit – zöld, albit – piros. Meszes (Leskóné Majoros et al., 2021)

RFF-eket tartalmazó ásványként egyrészt azonosítható a mintákban xenotim, amely a nehéz RFF-eket, másrészt monacit-(Ce), amely pedig a könnyű RFF-eket tartalmazza (XVI. melléklet). A xenotim $\sim 20 \mu\text{m}$ -es nagyságú szemcsékként fordul elő, néha összenőve a monacittal (39. ábra). A monacit legtöbbször fluorapatit (XVI. melléklet), klorit, illetve TiO_2 mellett figyelhető meg, gyakran több száz μm -es nagyságú halmazokat alkotva, azonban fluorapatit szegélyi részén is észlelhető $< 10 \mu\text{m}$ -es nagyságban. Ezekon kívül még azonosítható a mintákban könnyű RFF-eket megkötő goethit is (39. ábra) (Leskóné Majoros et al., 2021).

A cirkon szintén gyakran megfigyelhető a mintákban, főként $10\text{--}30 \mu\text{m}$ -es méretű idiomorf és hipidiomorf szemcsékként. A szilikátok közül megjelenik még albit, amely a repedésekhez és érhálózatokhoz kötődve bontott szemcsés sávokat alkot, valamint illit és kaolinit is. A járulékos ásványok közül észlelhető még kalcit, egyrészt poliszintetikus ikresedett szemcsékként, másrészt érköltőként, harmadrészt pedig fenn-nőtt kristályokként az üregek falán (Leskóné Majoros et al., 2021).



39. ábra: RFF-eket tartalmazó halmazok (fehér) visszaszórt elektronképe albit (Ab) és kvarc (Q) szemcsék között. Balra – monacit (1. mérési pont), xenotim (2. mérési pont) és RFF-eket megkötő goethit (3. mérési pont). Jobbra – monacit (1. mérési pont), RFF-eket megkötő goethit (2. mérési pont) és fluorapatit (3. mérési pont). Meszes

(Leskóné Majoros et al., 2021)

8.1.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND

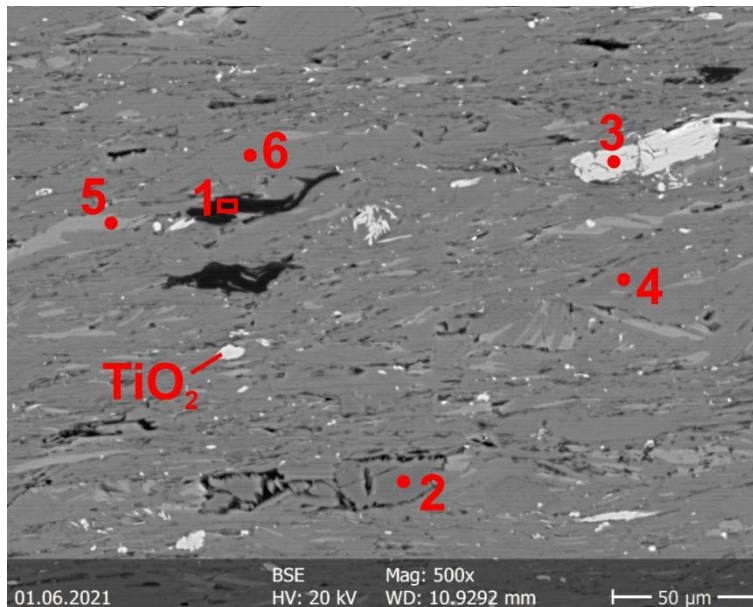
A minták alapanyagát az optikai és SEM-EDX mérések alapján 20–50 µm-es nagyságú filloszilikát lemezek alkotják: Fe-dús klorit és fengitesedett muszkovit kevés Na- és Ti-tartalommal (40. ábra).

Az észlelések alapján a grafit 20–150 µm-es nagyságú, enyhén deformált, pikkelyes formában, irányítottan helyezkedik el a minták szövetében (40. ábra). Az optikai megfigyelések során anizotrópiával, erős bireflexióval és némely szemcsénél unduláló kioltással figyelhető meg. Az EDX mérések nem mutatnak kéntartalmat a grafit pikkelyekben.

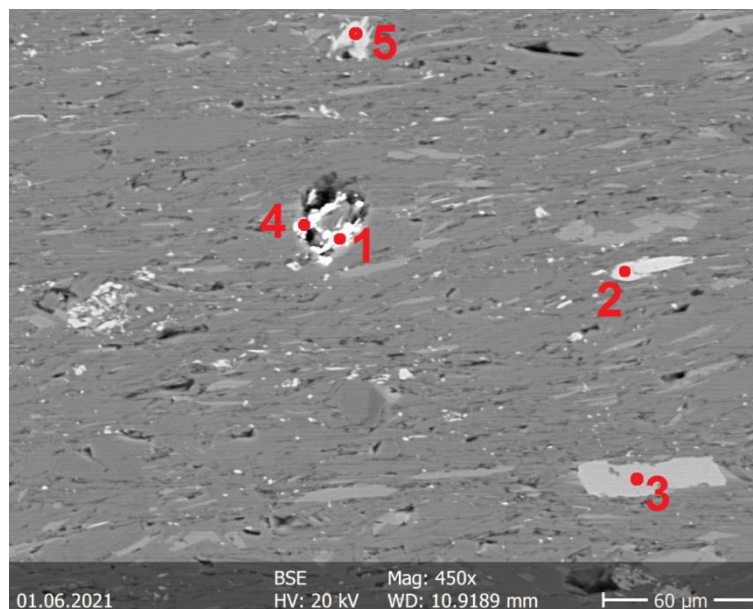
A mintákban számos járulékos ásvány észlelhető. Az oxidok közül főként 40–80 µm-es nagyságú kvarc szemcsék és TiO₂-ok észlelhetők a mintákban (rutil és anatáz is azonosítható az optikai vizsgálatok alapján). A TiO₂-ok egyrészt 10–20 µm-es nagyságú tűk formájában jelennek meg, amelyek néhol fészkekbe, halmazokba rendeződnek, másrészt 30–50 µm-es xenomorf szemcsékként észlelhetők (40–42. ábrák). Gyakran kevés Nb-tartalmat is lehet mérni bennük.

Ezeken kívül észlelhetők még a mintákban 10–30 µm-es xenotim szemcsék, 20–30 µm-es RFF-karbonátok (bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegykristályok), 40–50 µm-es monacit kristályok (XVII. melléklet), 30–60 µm-es fluorapatit szemcsék, 30–50 µm-es

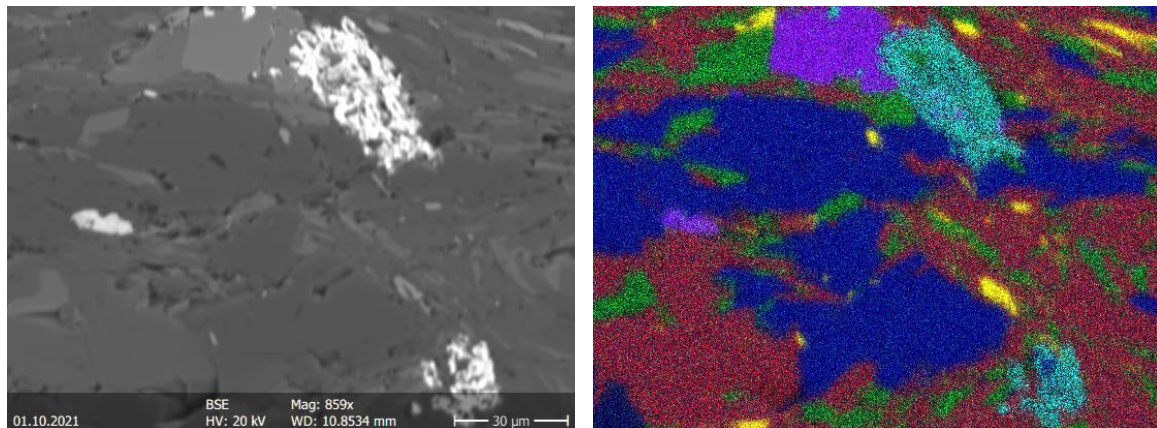
idiomorf és hipidiomorf albit kristályok, valamint pár μm -es nagyságtól a 20–30 μm -es nagyságig sajátalakú, illetve xenomorf cirkon szemcsék (40–42. ábrák).



40. ábra: Grafit pikkelyek (1. mérési pont), albit kristályok (2. mérési pont), valamint TiO_2 tűk és szemcsék (3. mérési pont) fengitesedett muszkovit (4. és 6. mérési pont) és klorit (5. mérési pont) alapanyagban. Visszaszórt elektronkép. Rakacaszend (a szerző saját szerkesztése)

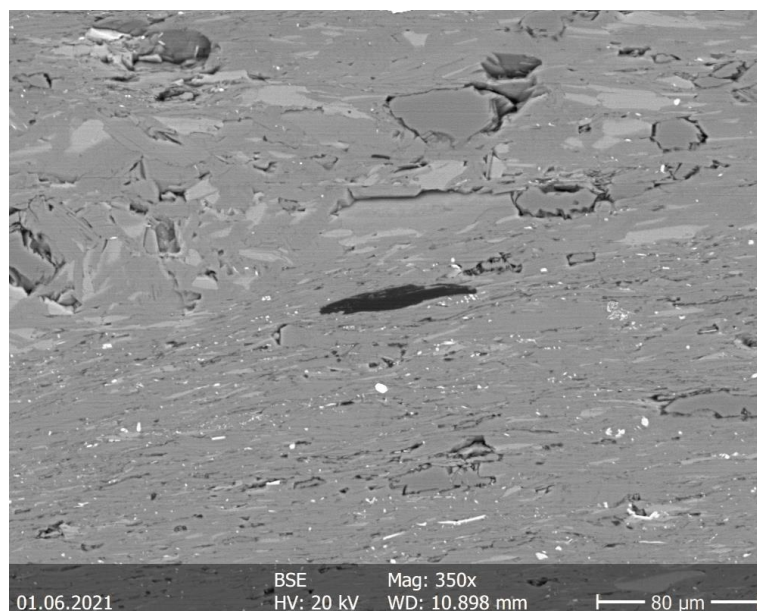


41. ábra: RFF-karbonát (bastnäsit-(Ce)) szemcsék (1. és 4. mérési pont) TiO_2 -dal (2. és 5. mérési pont) és fluorapatittal (3. mérési pont) filloszilikát alapanyagban. Visszaszórt elektronkép. Rakacaszend (a szerző saját szerkesztése)



42. ábra: RFF-karbonát ásványok és fluorapatit kristályok TiO_2 szemcsékkel, kvarc, muszkovit és klorit mellett. Balra – visszaszórt elektronkép, jobbra – fázistérkép (az elem térkép fázisokat is azonosít). Klorit – zöld, kvarc – sötétkék, fluorapatit – lila, muszkovit – piros, TiO_2 – sárga, RFF-karbonát ásványok – világoskék. Rakacaszend (a szerző saját szerkesztése)

A minta bizonyos részein sávozottság figyelhető meg (43. ábra): a durvaszemcsés sávban együtt kristályosodott albit és fluorapatit jelenik meg klorittal és TiO_2 -okkal, míg a finomszemcsés sávban filloszilikátok észlelhetők cirkonnal.



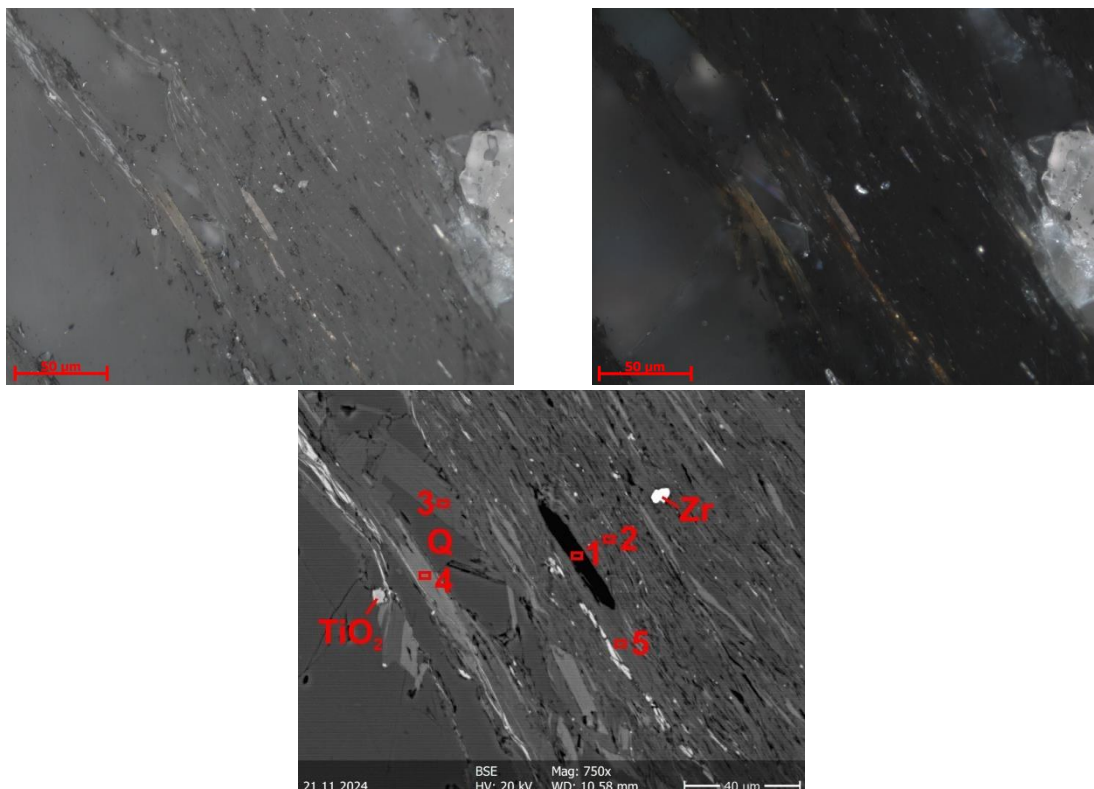
43. ábra: A rakacaszendi mintában megfigyelhető sávozottság, határán egy grafit pikkellyel (fekete). Visszaszórt elektronkép. Rakacaszend (a szerző saját szerkesztése)

8.1.7. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM

Az optikai és SEM-EDX észlelések alapján a minták szövete erősen irányított, foliált, amelyben nyírási zónára jellemző deformációs elemek figyelhetők meg, például krenulációs palásság, mikroredőzöttség, grafit kristályok unduláló kioltása.

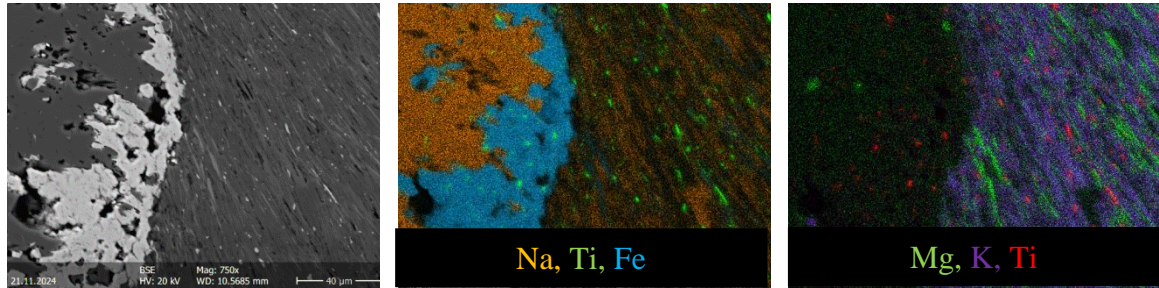
A minták alapanyagát 50–400 μm -es nagyságú kvarc szemcsék és 30–100 μm -es nagyságú filloszilikát lemezek (klorit, muszkovit, fengit) alkotják. A muszkovit gyakran paragonitosodott, fengitesedett, a VT-3 és VT-10/1 minták esetében paragonit is előfordul a muszkovit mellett. A muszkovitban, paragonitban és fengitben az EDX mérések során kevés Ti-tartalom is jelentkezik, míg a kloritban kevés Mn-tartalom mutatkozik. A klorit pikkelyekben az EDX mérések alapján nagyobb a Fe-tartalom, mint a Mg, így a vasgazdag klinoklór típusba sorolható.

A megfigyelések alapján a grafit pikkelyek 20-50 μm -es nagyságban, irányítottan helyezkednek el a mintákban (44. ábra). Az optikai észlelések során anizotrópiával, erős bireflexióval és unduláló kioltással figyelhetők meg. Az EDX mérések nem mutatnak kéntartalmat a grafit pikkelyekben.



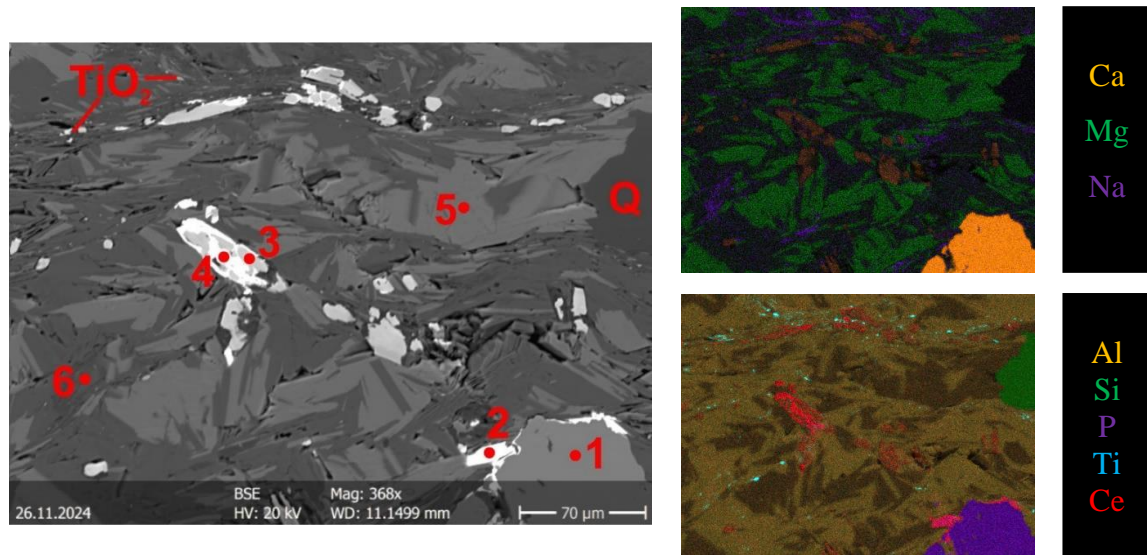
44. ábra: Grafit pikkely az irányított szövetben. Balra fent – optikai kép, 1N; jobbra fent – optikai kép, $\times N$; lent közepén – visszaszórt elektronkép. Grafit – 1. mérési pont, fengit – 2., 3. és 5. mérési pont, klorit – 4. mérési pont, Zr – cirkon, Q – kvarc. Velem (a szerző saját szerkesztése)

A mintákban számos járulékos ásvány észlelhető. Az oxidok közül TiO_2 és Fe-oxid figyelhető meg a mintákban. A TiO_2 egyrészt 10–20 μm -es nagyságú szemcsék és tűk formájában jelenik meg elszórtan az alapanyagban, másrészt 50 μm -es nagyságú szagenit rácsos xenomorf szemcsékként észlelhető (44–46. ábrák). A Fe-oxid megjelenik egyrészt érkítőlként, másrészt bekéregződésként (45. ábra), illetve önálló, akár 300 μm -es nagyságú halmazokként. Gyakran kevés Ti- és Mn-tartalmat lehet mérni a Fe-oxidban.



45. ábra: Albit fenokristály vas-oxidos bekéregződéssel csillám alapanyagban (muszkovit és klorit), elszórtan TiO_2 szemcsékkal. Balra – visszaszórt elektronkép, középen és jobbra – elemtérképek. Velem (a szerző saját szerkesztése)

Ezekon kívül észlelhetők még a mintákban 20–40 μm -es xenotim szemcsék, 50 μm -es RFF-karbonátok (bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegykristályok, XVIII. melléklet), 50–100 μm -es fluorapatit szemcsék, 5–10 μm -es nagyságtól a 40 μm -es nagyságig sajátalakú, illetve xenomorf cirkon szemcsék, 10–30 μm -es monacit-(Ce) kristályok (XVIII. melléklet), valamint 20–50 μm -es allanit szemcsék (46. ábra, XVIII. melléklet). A monacit-(Ce) szemcsék leggyakrabban fluorapatit vagy allanit szemcsék szegélyi részén helyezkednek el, és kevés Th-tartalmat mutatnak az EDX mérések során (XVIII. melléklet). Továbbá megfigyelhetők a mintákban még illit, kaolinit, valamint akár 200 μm -es albit kristályok (45. ábra).



46. ábra: Apatit (1. pont) szegélyi részén monacittal (2. pont), valamint allanit szemcsék (3. pont), mellettük bastnäsit elegykristályok (4. pont) a csillám alapanyagban (klorit – 5. pont, és Na-tartalmú muszkovit – 6. pont), elszórtan TiO_2 szemcsékkel és kvarccal (Q). Balra – visszaszórt elektronkép, jobbra – elemtérképek. Velem (a szerző saját szerkesztése)

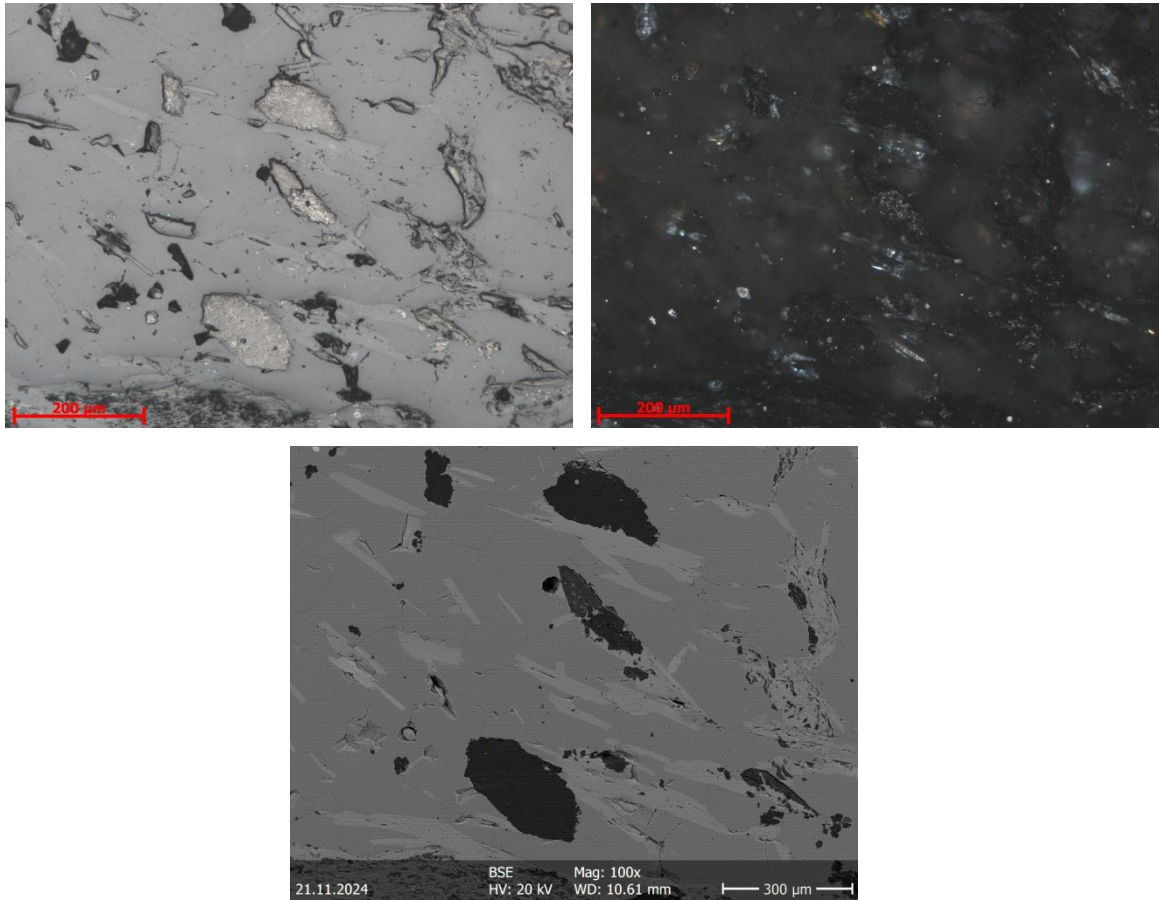
8.1.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS

Az optikai és SEM-EDX megfigyelések alapján a minták szövete irányított, erősen deformált, gyűrűt, illetve sávos szerkezetet mutat: fekete és fehér sávok váltják egymást. A minták alapanyagát 100–300 μm -es nagyságú kvarc szemcsék és 50–100 μm -es nagyságú filloszilikát lemezek (klorit és muszkovit) alkotják. A muszkovit gyakran paragonitosodott, fengitesedett, az EDX mérések alapján kevés Ti-tartalom is kötődik a muszkovithoz (Leskóné Majoros et al., 2025a).

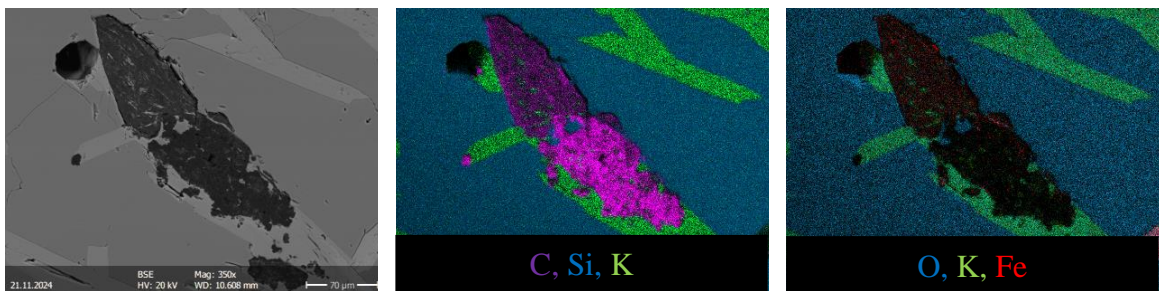
Az észlelések alapján a grafit megjelenik egyrészt ~ 50 μm -es nagyságú pikkelyekként, másrészt 50–300 μm -es nagyságú szemcsés halmazokat, lencsét alkotva (47–48. ábrák). Ezek a grafitos masszák a fekete sávokhoz (azon belül is a deformált részekhez) kötődnek, de elszórtan egy-egy nagyobb halmaz a fehér sávokban is előfordul. Az EDX mérések nem mutatnak kéntartalmat a grafitos halmazokban (Leskóné Majoros et al., 2025a).

A minták számos járulékos ásványt tartalmaznak. Az oxidok közül 5–10 μm -es nagyságú TiO_2 szemcsék figyelhetők meg elszórtan az alapanyagban, egy helyen pedig repedéskitöltő szmektitbe ágyazódva. Ezen kívül észlelhetők még a mintákban pár μm -es nagyságtól a 30 μm -es nagyságig cirkon szemcsék, 10–20 μm -es nagyságú monacit-(Ce)

kristályok, valamint kaolinit. A monacit-(Ce) szemcsék gyakran kevés Th-tartalmat mutatnak az EDX mérések alapján (XIX. melléklet) (Leskóné Majoros et al., 2025a).



47. ábra: Grafitos halmazok (világos barna) kvarc (középszürke) és csillám (világosszürke) alapanyagban. Balra fent – optikai kép, 1N; jobbra fent – optikai kép, xN; lent közepen – visszaszórt elektronkép. Fertőrákos (a szerző saját szerkesztése)

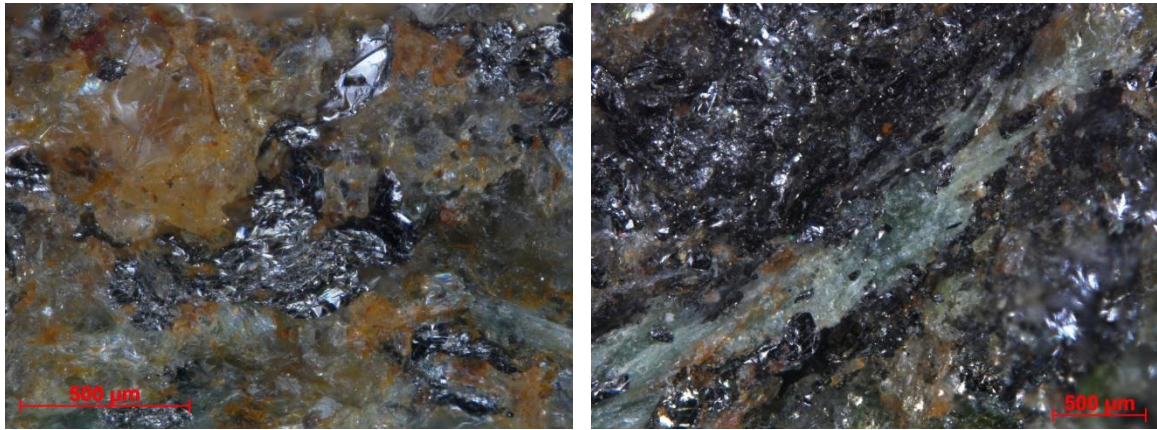


48. ábra: Grafitos halmaz (sötétszürke) kvarcban (középszürke), mellette muszkovit és klorit lemezekkel (világosszürke). Balra – visszaszórt elektronkép, közepén és jobbra – elemterképek. Fertőrákos (a szerző saját szerkesztése)

8.1.9. SZLOVÁKIA, NYUGATI-KÁRPÁTOK, RIMAKOKOVA

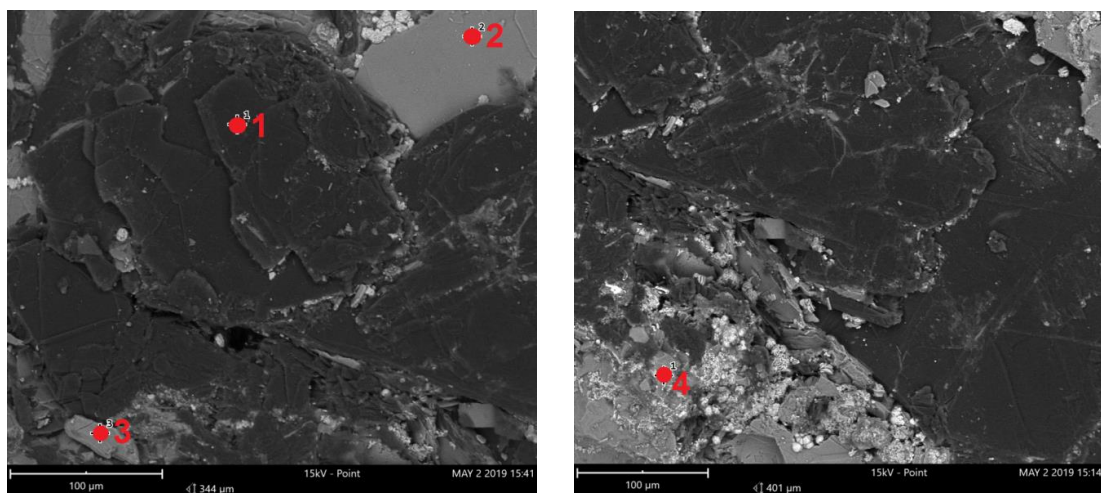
A rimakokovai múzeumi példány alapanyagát az optikai és SEM-EDX mérések alapján 30–100 μm -es nagyságú kvarc alkotja (49–51. ábrák). Ebben helyezkednek el az 50–100 μm -es nagyságú, Ti- és V-tartalmú muszkovit lemezek (49–51. ábrák, XX. melléklet), amelyek irányítottan elhelyezkedő, zöld színű, több cm-es hosszúságú, nyúlt oszlopos halmazokat alkotnak (49. ábra) (Majoros, 2019).

A mintában a grafit >100 μm -es pikkelyek formájában jelenik meg (49–51. ábrák), azonban nem ritkák a több 100 μm -es egybefüggő pikkelyek-lemezek is, amelyek akár cm-es nagyságú halmazokat is alkotnak. A grafitban néhol kevés kéntartalmat lehet mérni az EDX mérések alapján (Majoros, 2019).



49. ábra: Grafit pikkelyek kvarcban (balra), illetve zöld színű muszkovit mellett (jobbra).

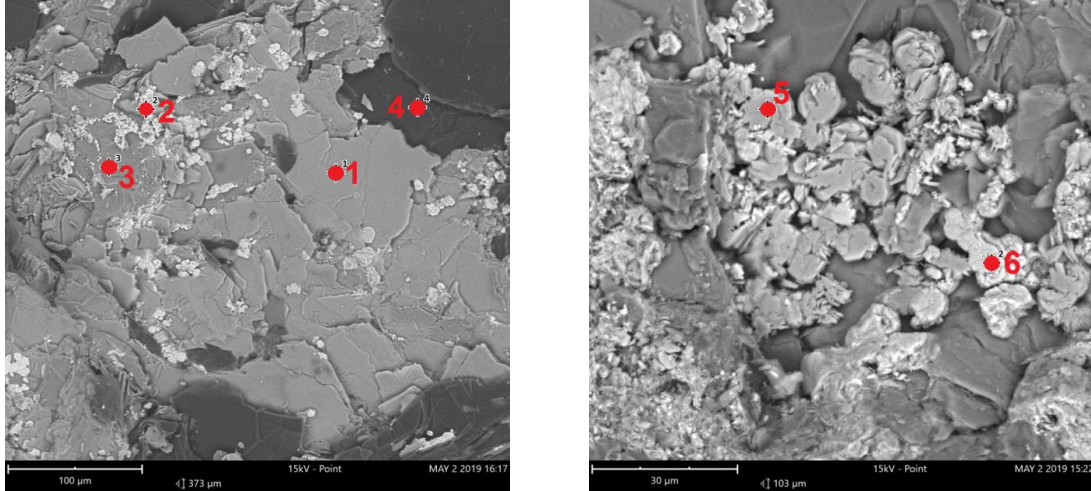
Sztereomikroszkóp, ráeső fény. Rimakokova (Majoros, 2019)



50. ábra: Grafit pikkelyek (fekete, 1. mérési pont) V-tartalmú muszkovit lemezek mellett (2. és 3. mérési pont), elszórta vas-oxid (fehér) szemcsékkel kvarcban (4. mérési pont).

Visszaszórt elektronkép. Rimakokova (Majoros, 2019)

Járolékos ásványként észlelhetők a mintában 5–10 μm -es nagyságú, lemezes megjelenésű vas-oxid szemcsék a grafit és muszkovit pikkelyek között (50–51. ábrák). Továbbá egy helyen megfigyelhető egy ~ 5 μm -es galenit szemcse, illetve egy 10 μm -es monacit-(Ce) szemcse is (Majoros, 2019).

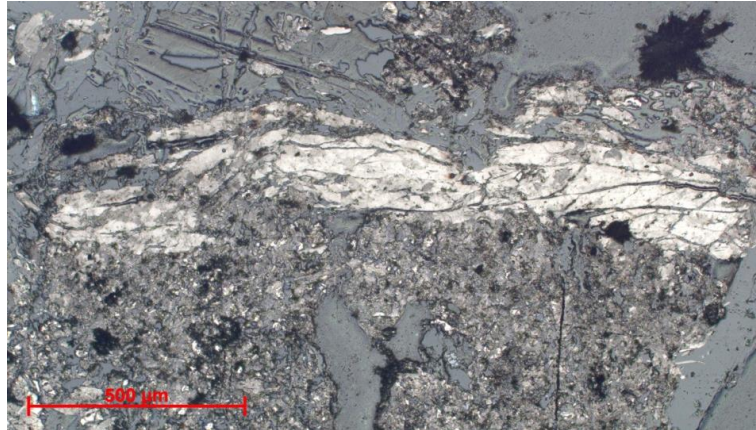


51. ábra: Grafit pikkelyek (fekete, 4. mérési pont) és V-tartalmú muszkovit lemezek (világosszürke, 1. mérési pont) kvarcban (közép szürke, 3. mérési pont) elszórtan vas-oxid szemcsékkal (fehér, 2., 5. és 6. mérési pont). A vas-oxidok árnyalatbeli eltérése a változó Fe-tartalom miatt van. Visszaszórt elektronkép. Rimakokova (Majoros, 2019)

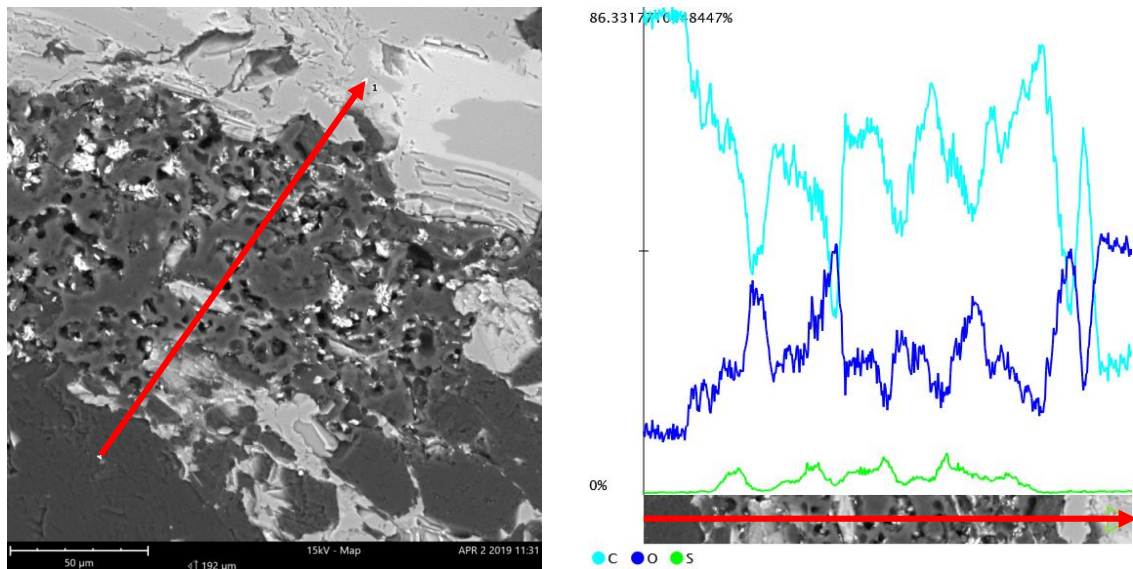
8.1.10. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG

A minta alapanyagát 30–200 μm -es nagyságú muszkovit lécek alkotják, amelyek gyakran paragonitosodottak, illetve fengitesedettek. Néhol kevés Ti-tartalmat is lehet mérni bennük (Majoros, 2019).

Már az optikai és SEM-EDX mérések alapján is észlelhető a grafit uralkodó mennyisége a mintában (átlagosan 70–80%). Az optikai felvételeken szürkésbarna (krém) színnel és anizotrópiával jelenik meg a grafit. Megjelenését tekintve kétféle típus különböztethető meg (52. ábra), az egyik 10–20 μm -es nagyságú, finomszemcsés pikkelyes megjelenésű, amely aggregátumszerűen, a deformáció hatására beforgatódva jelenik meg a mintában. Néhol muszkovittal és kénnel (természen?) összenőve figyelhető meg (53. ábra). A másik típusnál a grafit szintén pikkelyes megjelenésű. A pikkelyek 50 μm -nél nagyobbak, méretük az akár több száz μm -es egybefüggő nagyságot is elérhetik. A legnagyobb pikkely elérte a 800 μm -t (52. ábra). A pikkelyek a deformáció hatására irányítottan helyezkednek el a mátrixban, illetve mikroredőket formálnak. Ennél a típusnál kén nem vagy alig kötődik a grafithez (53. ábra, a vonalmérés eleje) (Majoros, 2019).

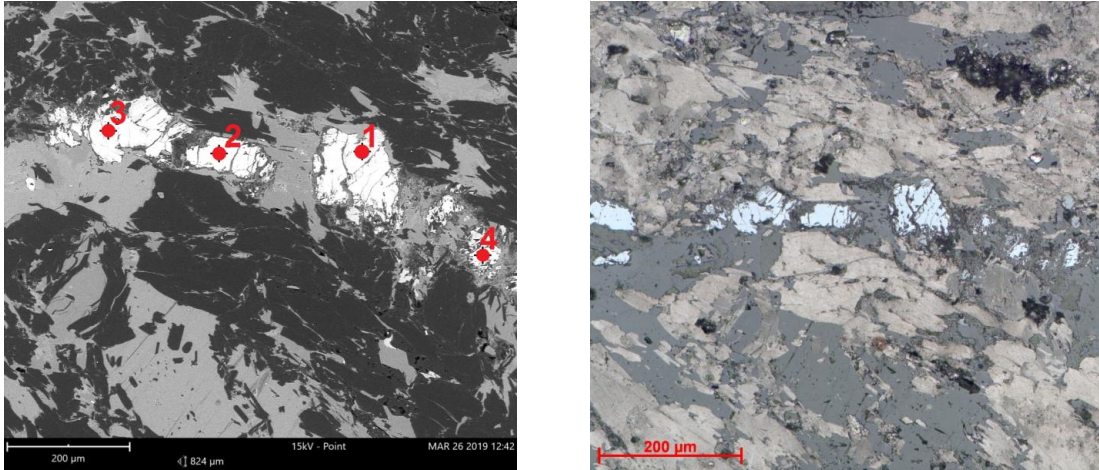


52. ábra: Több száz μm -es nagyságú grafit pikkely és finomszemcsés grafitos aggregátum (szürkésbarna) muszkovit alapanyagban (középszürke). Polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N. Pareng (Majoros, 2019)



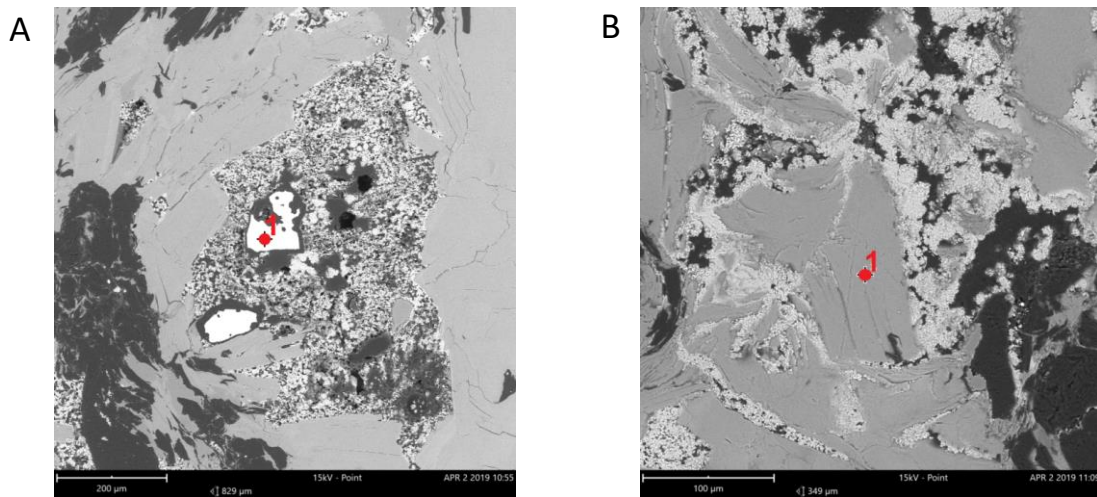
53. ábra: Grafitos aggregátum (grafit-muskovit-termékén(?)) keverék, sötétszürke) grafit pikkelyek (fekete) és muszkovit lemezek (világosszürke) között. Balra visszaszórt elektronkép, jobbra a vonalmérés eredménye. Pareng (Majoros, 2019)

Ami a járulékos ásványokat illeti, az oxidok közül megfigyelhetők a mintában 5–30 μm -es nagyságú kvarc szemcsék, valamint 50–100 μm -es TiO_2 ásványok (54. ábra) néhol kevés Nb-tartalommal, amelyek az optikai vizsgálatok alapján rutil és anatáz. A szilikátok közül megjelennek cirkon szemcsék (általában $10 \times 20 \mu\text{m}$ -es nagyságúak, néha Nb-tartalmúak), 30–50 μm -es albit lécek (néha K-, illetve Ca-tartalmú), titanit szemcsék (általában 20 μm -es nagyságúak), illetve 10 μm -es Ti-Zr-szilikát ásványok (Majoros, 2019).



54. ábra: Nb-tartalmú TiO_2 szemcsék (fehér, 1.-4. mérési pontok) grafit pikkelyekkel (fekete) muszkovit léces alapanyagban (középszürke). Balra visszaszórt elektronkép, jobbra polarizációs mikroszkóp ráeső fény, 1N. Pareng (Majoros, 2019)

Továbbá észlelhetők még a mintában elszórtan $\sim 80 \mu\text{m}$ -es nagyságú pirit szemcsék (55. ábra), illetve a minta szegélyi (felszín közeli) részéhez közel akár $200 \mu\text{m}$ -nél is nagyobb jarositos póruskitöltő halmazok (55. ábra). A szivacsos szövetű halmazokban a jarosit megfigyelhető egyrészt lemezes-táblás, másrészt gömbös formában. Mindkét esetben a jarosit szemcsék nagysága $5 \mu\text{m}$ körüli. Egy helyen terméskén? kiválás is megfigyelhető a grafitos aggregátumban. Az erről készült vonalmérés látható az 53. ábrán (Majoros, 2019).



55. ábra: A – Pirit szemcsék (fehér, 1. mérési pont) szivacsos szövetű jarositban (világosszürke), grafit pikkelyekkel (fekete) muszkovit léces alapanyagban (középszürke). Visszaszórt elektronkép, Pareng. B – Grafit pikkelyek (fekete) és muszkovit lécek (középszürke, 1. mérési pont) jarosittal (világosszürke). Visszaszórt elektronkép. Pareng

(Majoros, 2019)

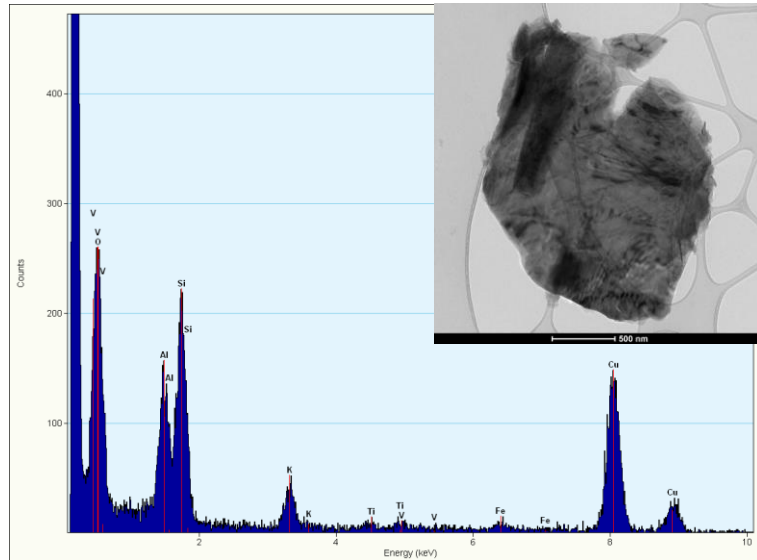
8.2. TRANZMISSZIÓS ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A következő alfejezetekben a transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok eredményeit ismertetem mintánkénti sorrendben. Minden esetben a minták dúsítási kísérlete során kapott frakcióit vizsgáltam Cu griden készített preparátumon. A mintatartón lévő karbon (Lacey) hártya nem teszi lehetővé a grafit kémiai azonosítását TEM-EDX méréssel, így azt csak az elektrondiffrakciós felvételek kiértékeléséből lehet azonosítani. A vizsgálatok során elsődlegesen kellően vékony szemcséket kerestem a mintán az átvilágításhoz, hogy világos látóterű képeket, elektrondiffrakciót és TEM-EDX méréseket lehessen végezni. A TEM-EDX mérések során a mért réz a gridből származik, mivel a dúsítási kísérlet során elkülönített frakciókban réz-tartalmú fázis egyik mintában sem található.

8.2.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

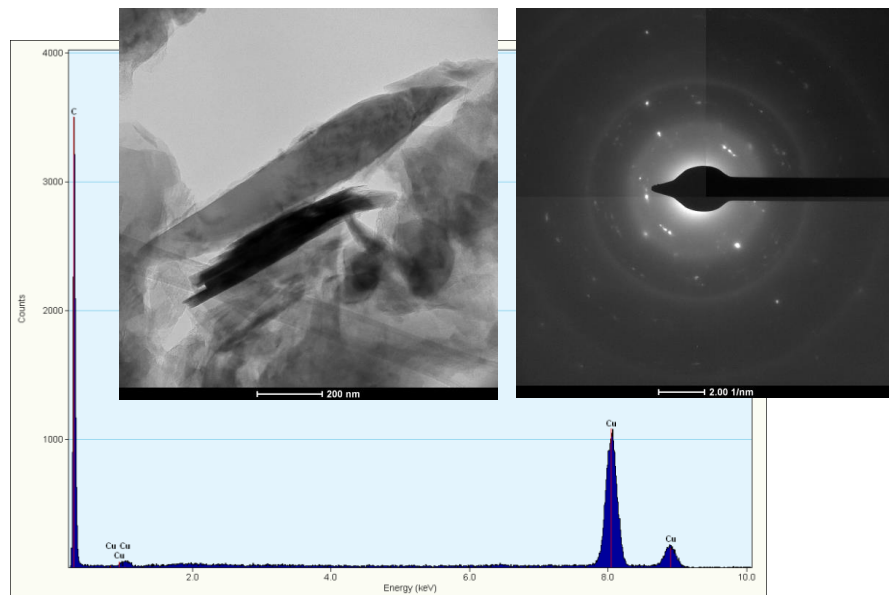
A mérések során a dédestapolcsányi 2. feltárásból származó minta dúsítási kísérlete során nyert frakcióit vizsgáltam (a korábban színük alapján „ezüstszürke” és „fekete” névvel elkülönített frakciókat). Mind a két frakció esetében észleltem a mintákban kvarcot, valamint V- és Ti-tartalmú muszkovitot (56. ábra). Az „ezüstszürke” frakcióban ezeken kívül megfigyeltem még grafitot is, amely megjelent egyrészt 400–600 nm-es nagyságú, hatszöges alakú, idiomorf-hipidiomorf szemcsékként, illetve $100 \times 600\text{--}800$ nm-es nagyságú elnyúlt pikkelyekként (57. ábra).

A „fekete” frakció esetében 400–600 nm-es nagyságú, (ál)hatszöges alakú, idiomorf-hipidiomorf szemcséket észleltem részleges rendezettséggel. A TEM-EDX mérések alapján a szemcsék széntartalmúnak mutatkoznak, elektrondiffrakciós felvétele gyűrűs (58. ábra).



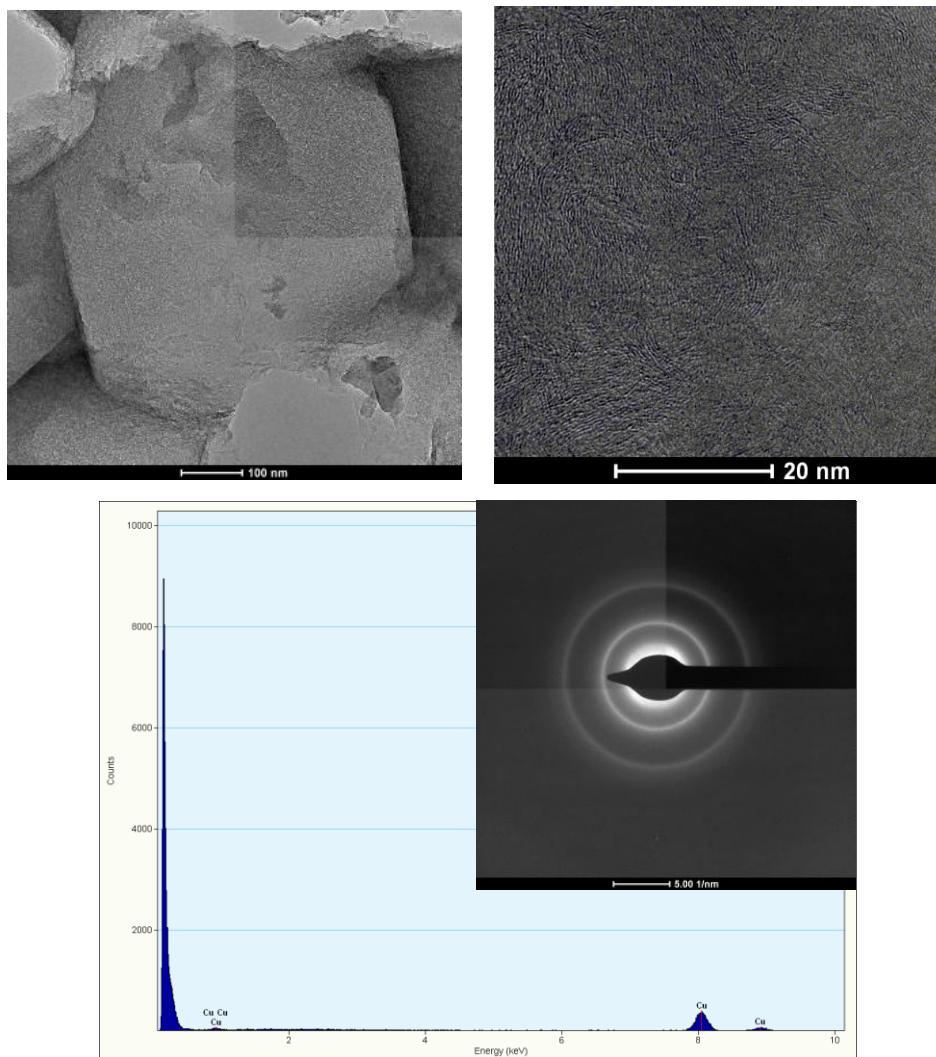
56. ábra: V- és Ti-tartalmú muszkovit lemezekből álló aggregátum világos látóterű képe (jobb felső sarokban) és TEM-EDX spektruma (középen). A mért réz a gridből származik.

Dédestapolcsányi 2. minta „ezüstszürke” frakció (a szerző saját szerkesztése)



57. ábra: Grafit pikkelyek világos látóterű képe (balra fent), TEM-EDX spektruma (lent középen) és az alsó pikkely jobb széléről készült elektrondiffrakciós felvétele (jobb felső sarokban). A mért réz a gridből származik. Dédestapolcsányi 2. minta „ezüstszürke”

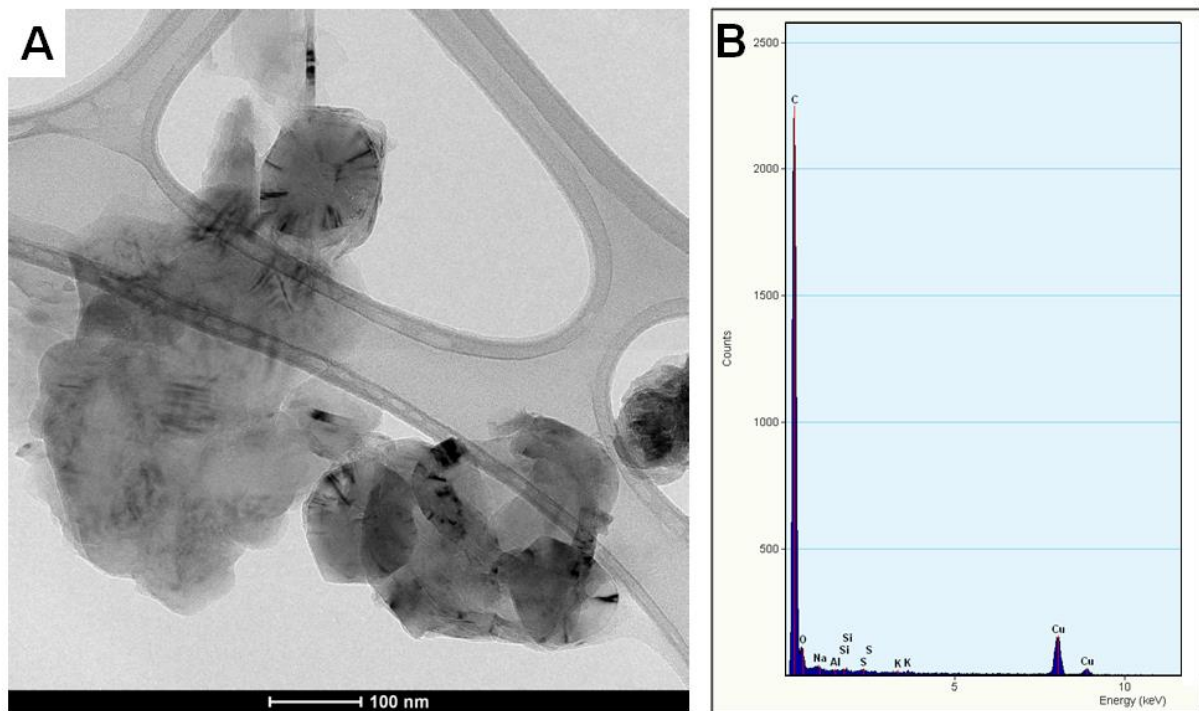
frakció (a szerző saját szerkesztése)



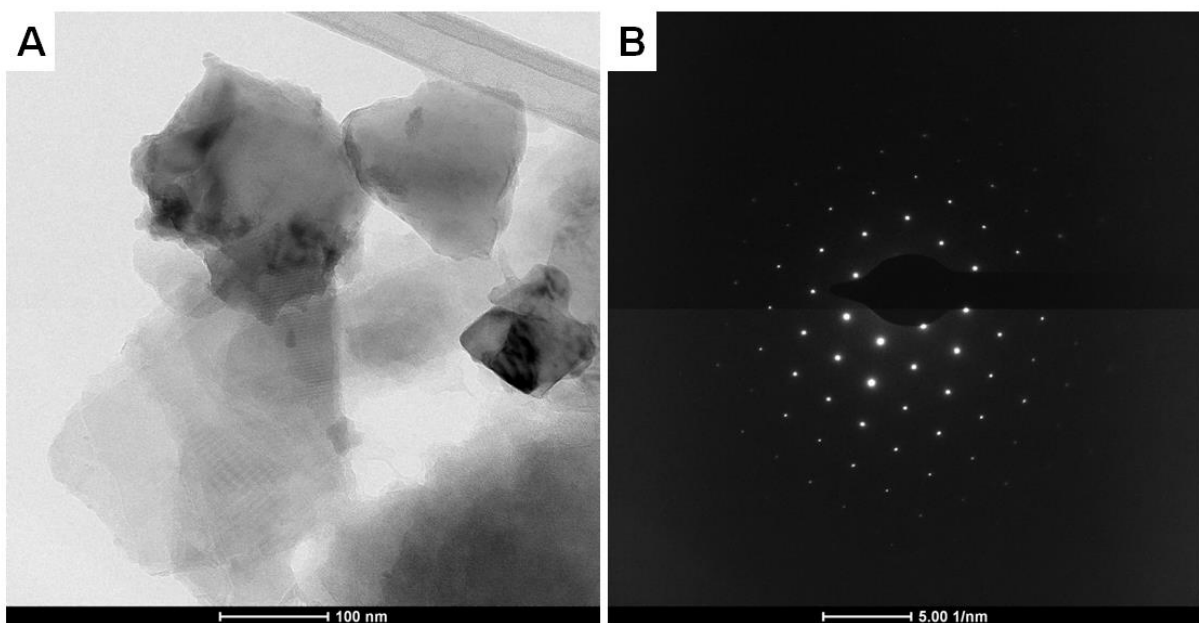
58. ábra: Egy szemcse világos látóterű képe (balra fent), nagy felbontású képe (jobbra fent), TEM-EDX spektruma (balra lent) és elektrondiffrakciós felvétele (jobbra lent). A mért réz a gridből származik. Dédestapolcsányi 2. minta „fekete” frakció (a szerző saját szerkesztése)

8.2.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK

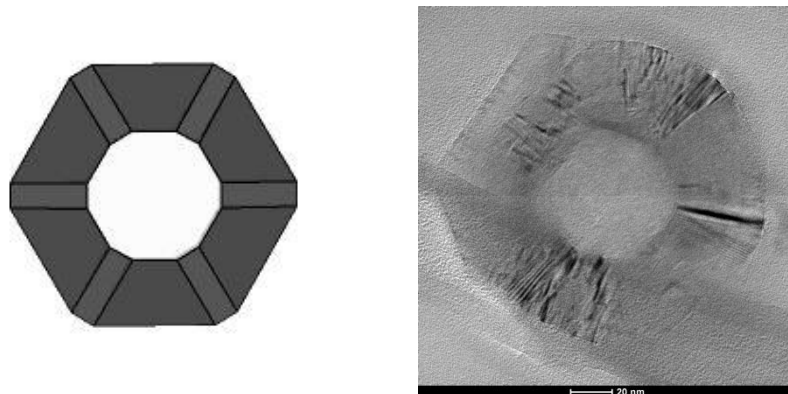
A mérések során az SZL-1A minta dúsítási kísérleténél nyert frakciót vizsgáltam. Észleléseim során megfigyeltem kalcitot, rétegszilikátokat (Na-tartalmú muszkovitot és illitet), valamint 80–200 nm-es nagyságú, rendezett kristályszerkezettel rendelkező szemcséket (grafit) (59–61. ábrák). Ezek a szemcsék nagy mennyiségben fordultak elő a mintában, akár önálló szemcsékként, akár aggregátumokat alkotva (59. ábra). A TEM-EDX mérések alapján ezek széntartalmúak (59. ábra). Megjelenésük a hexagonális dipiramisos grafitnak felel meg c tengely szerinti nézetben (61. ábra) (Palache et al., 1944).



59. ábra: A – Hatszöges alakú szemcsékből álló aggregátum (grafit) világos látóterű képe;
 B – egy ilyen szemcse TEM-EDX spektruma (a szerző saját szerkesztése)



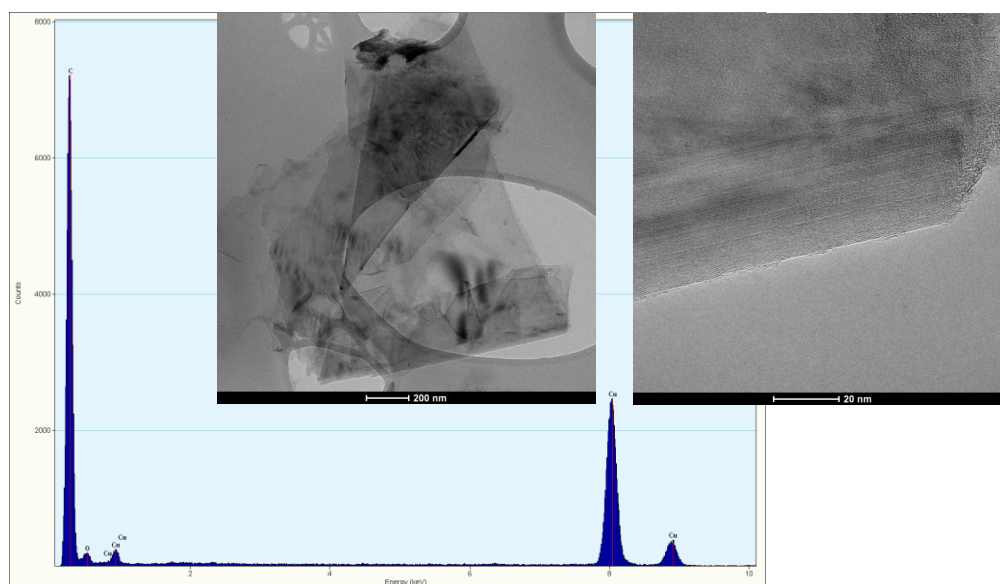
60. ábra: A – Szemcsék világos látóterű képe; B – a bal felső szemcse elektrondiffrakciós felvétele (a szerző saját szerkesztése)



61. ábra: Hexagonális dipiramisos megjelenésű, rendezett kristályszerkezettel rendelkező grafit szemcse c tengely szerinti nézetben (elméleti modell⁴ – balra, szendrőládi minta – jobbra) (a szerző saját szerkesztése)

8.2.3. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG

A mérések során a parengi minta dúsítási kísérleténél nyert frakciót vizsgáltam. Megfigyeléseim során észleltem kvarcot, rétegszilikátokat (fengitesedett muszkovitot) és jarositot, valamint 400–800 nm-es nagyságú, lemezes megjelenésű, rendezett kristályszerkezettel rendelkező szemcséket (grafit) (62. ábra). A TEM-EDX mérések alapján ezek dominánsan széntartalmúak (62. ábra).



62. ábra: Egy lemezes megjelenésű aggregátum világos látóterű képe (balra fent), nagy felbontású képe (jobbra fent) és TEM-EDX spektruma (lent). A mért réz a gridből származik. Pareng (a szerző saját szerkesztése)

⁴Elméleti modell: <https://www.mindat.org/min-1740.html>. Utoljára frissítve: 2025.03.29.

8.3. RÖNTGEN-PORDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

Az XRD vizsgálatok eredményeit lekövetkező alfejezetekben.

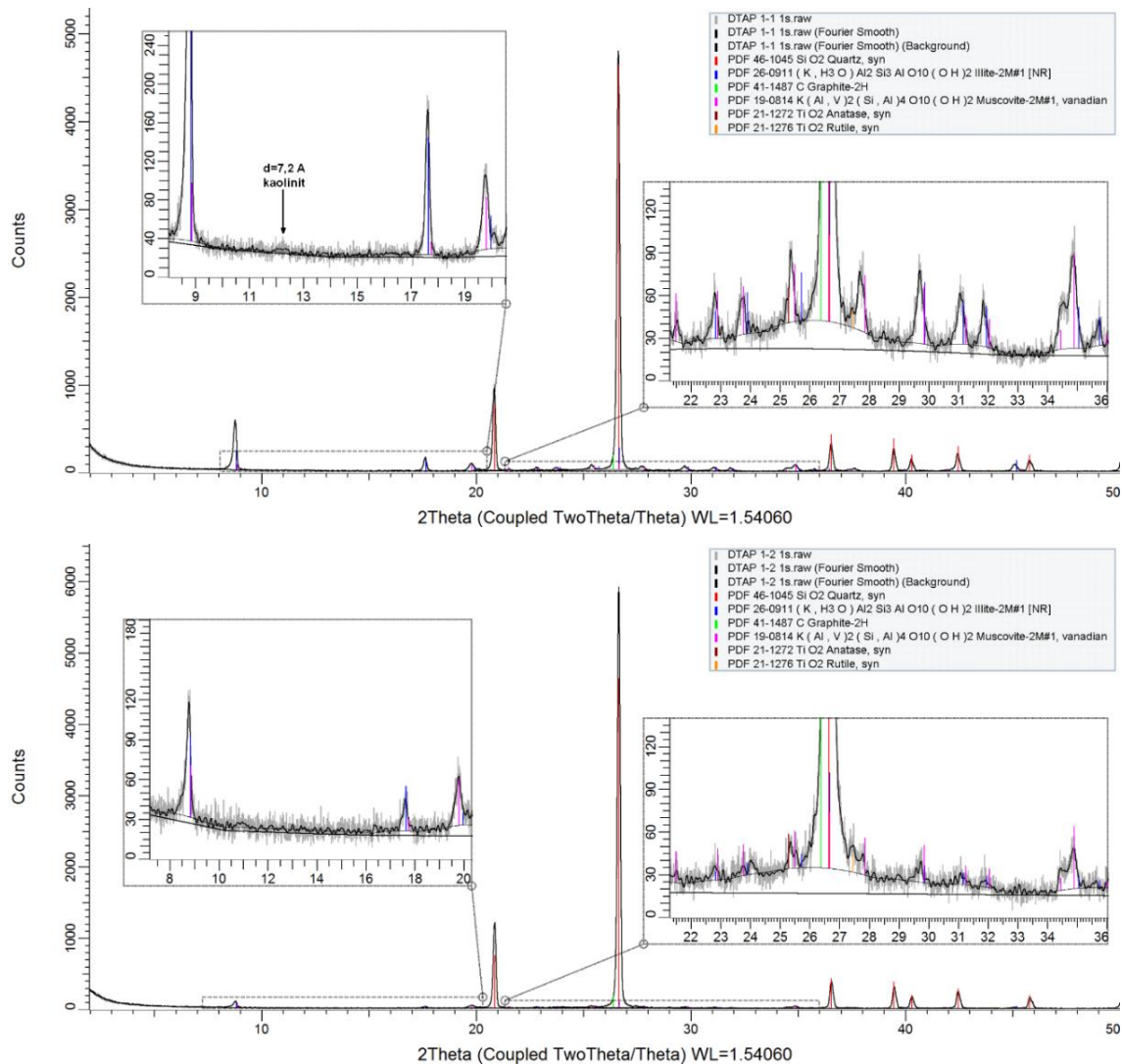
8.3.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

A dédestapolcsányi 1. és 2. feltárásokból származó mintákról készült XRD felvételeken uralkodó fázisként a kvarc figyelhető meg (63. ábra), mellette muszkovit (V-tartalmú), illit, kaolinit, anatóz, rutil, grafit és röntgenamorf anyag reflexiói jelennek meg. A grafit 26° - $27^{\circ}(2\theta)$ érték közötti csúcsa ($hkl = 002$) majdnem egybeesik a kvarc csúcsával, így ezek aszimmetrikus csúcsot eredményeznek a kvarc $\sim 26,7^{\circ}(2\theta)$ csúcsának bal oldali vállán (63. ábra). A többi grafit csúcs pedig a kitüntetett orientáció miatt nem jelenik meg a felvételeken (a nm-es grafit lemezek párhuzamosak a mintasíkkal). Az illit és muszkovit esetében a mért és elméleti csúcspozíciók közötti különbség a vanádium mellett a Mg- és Na-tartalomból is adódhat (63. ábra) (Majoros, 2017).

Az XRD felvételeken a SEM-EDX vizsgálatokkal kimutatott járulékos ásványokat (például xenotim, monacit és APS-ásványok) kis mennyiségük miatt nem lehetett azonosítani (Majoros, 2017).

A repedések menti vékony, puha bevonat lekaparási porának diffraktogramja a XXI. mellékletben látható. Az XRD-felvételen megjelenő púp röntgenamorf anyagra utal, vagyis ez már nem szerves anyag, de még nem is kristályosodott ki. A kaolinit széles csúcsa láthatóbban jelenik meg, amely a grafitos anyagban való dúsulására utal. A lekapart bevonat esetében a rutil tartalom jelentősebb, mint a teljes közet felvételen, ezzel szemben a többi ásvány a teljes közet mintájának megfelelően észlelhető (Majoros, 2017).

A DTAP 1/1 minta dekantálással kinyert frakciójának XRD-felvételén is uralkodó mennyiségben a kvarc jelenik meg, mellette vanádiumos muszkovit, anatóz és grafit figyelhető meg (XXI. melléklet).

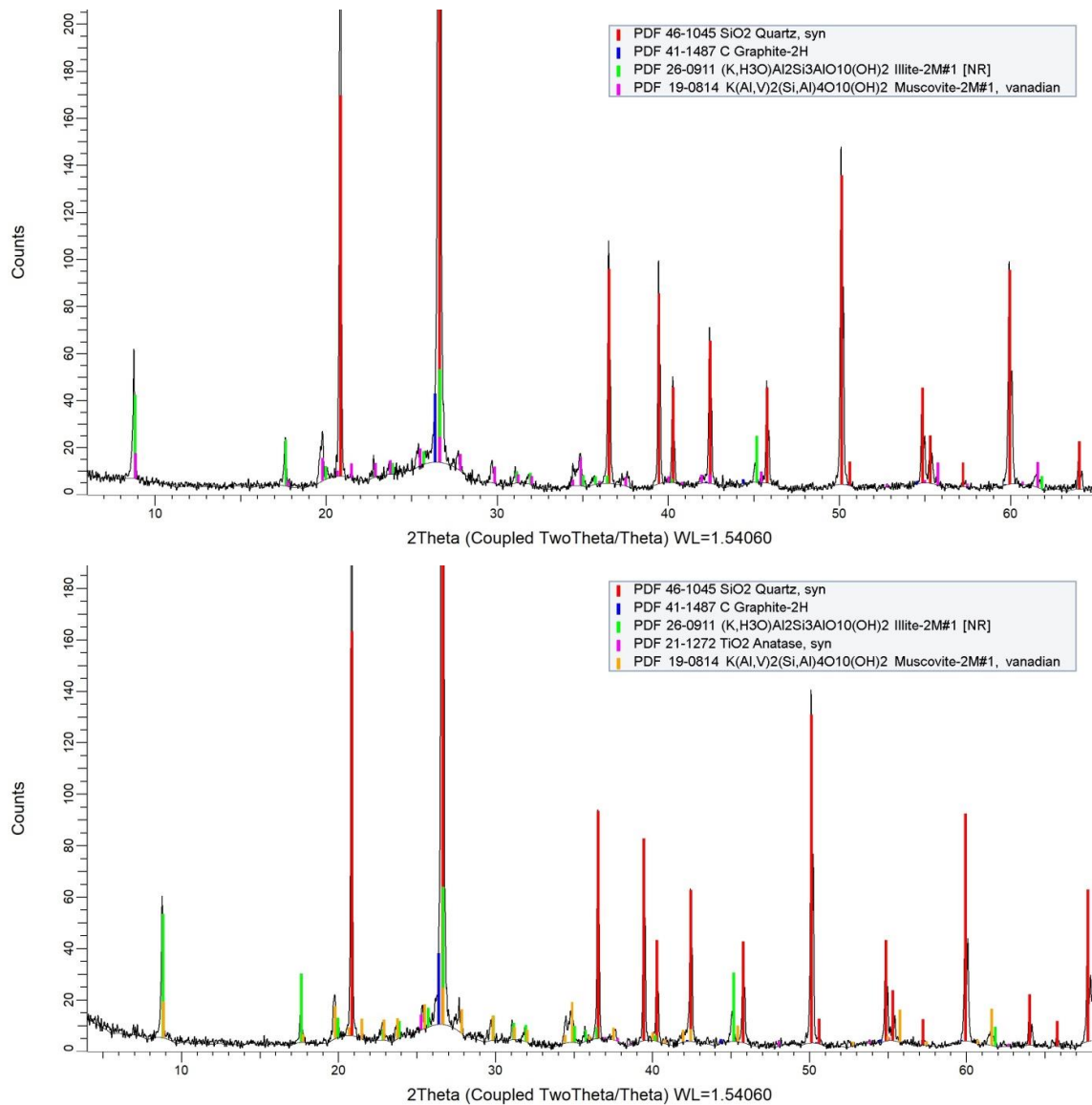


63. ábra: A dédestapolcsányi 1. feltárásból (fent) és 2. feltárásból (lent) származó minta diffraktogramja (Majoros, 2017)

A DTAP 2/1 minta dúsítási kísérlete során kapott frakció XRD-felvételein is uralkodó mennyiségben a kvarc jelenik meg, mellette vanádiumos muszkovit, illit és grafit figyelhető meg (64. ábra, XXII. melléklet).

A minták ultrahangos medencével történő aprítása során nem sikerült a kristályos grafit pontos kimutatása, csupán a muszkovit és kvarc aránya változott (továbbra is kvarc az uralkodó, XXIII. melléklet). Bár a grafit különálló csúcsait nem sikerült meghatározni, de a kvarc $\sim 26,7^\circ(2\theta)$ csúcsának bal oldali vállán megjelenő aszimmetriát grafitnak értelmezem (XXIII. melléklet) (Majoros, 2017).

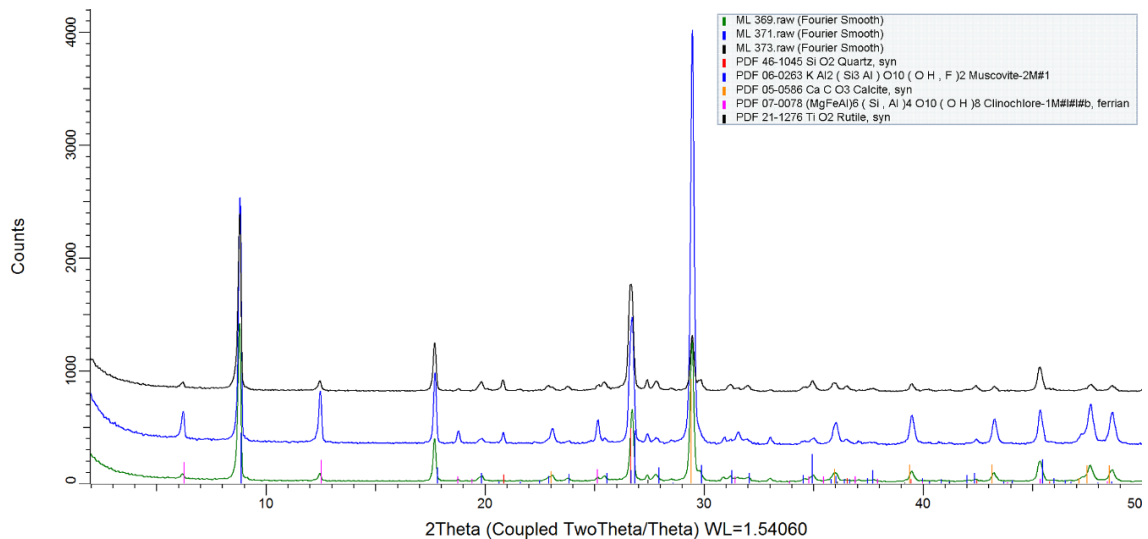
A dédestapolcsányi minták felszínén lévő zöld színű bevonat lekaparási porának XRD-felvételén uralkodó mennyiségben egy Cu-vanadát ásvány – volborthit figyelhető meg, mellette pedig kvarc észlelhető (XXIII. melléklet).



64. ábra: A DTAP 2/1 minta dúsítási kísérlete során kapott frakcióinak diffraktogramjai
 (fent – „fekete” színű frakció; lent – „ezüstszürke” színű frakció)
 (a szerző saját szerkesztése)

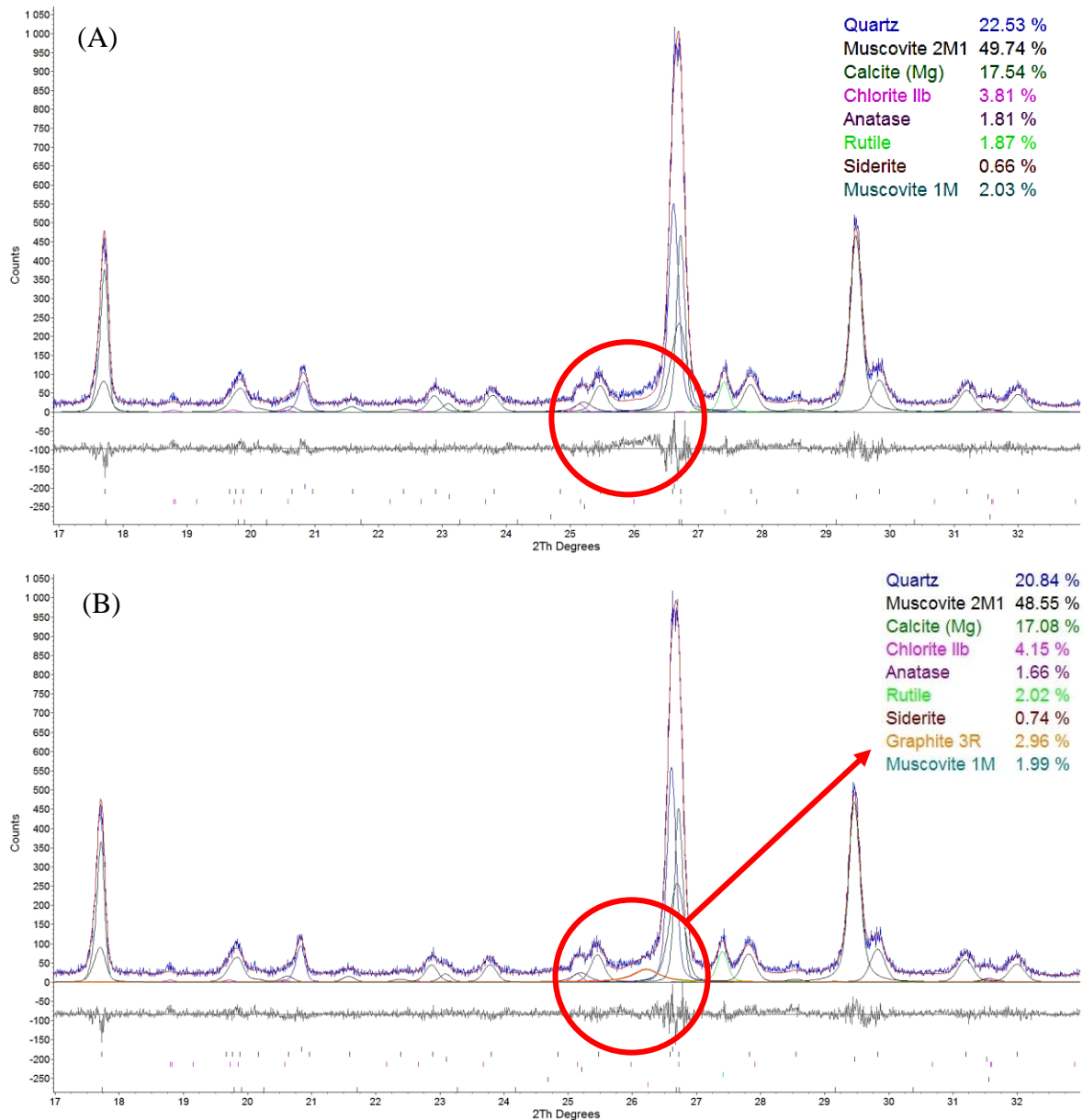
8.3.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS

A 65. ábrán látható a szendrőládi 6. fúrás mintáinak diffraktogramjai (369: zöld, 371: kék, 373: fekete). A dédestapolcsányi mintával ellentétben, ezeknél a muszkovit és kalcit reflexiói figyelhetők meg uralkodó alkotóként, a kvarc már kisebb intenzitású csúccsal jelenik meg (kivéve a 373-as mintát). Ezek mellett a klinoklór és rutil reflexiói észlelhetők még (Majoros, 2018).



65. ábra: A szendrőládi fúrómagminták diffraktogramjai (369: zöld, 371: kék, 373: fekete) (Majoros, 2018)

Bár XRD módszerrel nehéz azonosítani a grafitot kis mennyisége és nanokristályos természete miatt, azonban Rietveld-illesztéssel mégis lehetséges lehet. Egy ilyen módszerrel történő próbálkozást mutatok be a 66. ábrán: a Szendrőlád – 373-as minta Rietveld-illesztéssel kapott eredményei láthatók grafitmentes (A), illetve grafitmentes (B). Jól megfigyelhető, hogy az illesztés hibája (szürke görbe a diffraktogram alatt) sokkal kisebb, ha a grafit jelenlétét is elfogadjuk az illesztésben (piros körrel kiemelt rész). Ez a meghatározás sajnos mégis bizonytalan, mert egyrészt az elemzett por főleg nanokristályos a különleges minta-előkészítési eljárás miatt, másrészt a grafit 26° - 27° (2θ) érték közötti csúcsa ($hkl = 002$) majdnem átfedésben van a kvarc ($hkl = 101$) és ($hkl = 110$) csúcsaival, amely pedig aszimmetrikus csúcsot eredményez. Ráadásul a többi grafit csúcs meg sem jelenik a felvételeken a kitértetett orientáció miatt (Majoros, 2018).



66. ábra: Próbálkozás a grafit tartalom meghatározására Rietveld-illesztéssel. Az illesztés eredménye grafit tartalom nélkül (A) és grafit tartalommal (B). Szendrőlád – 373

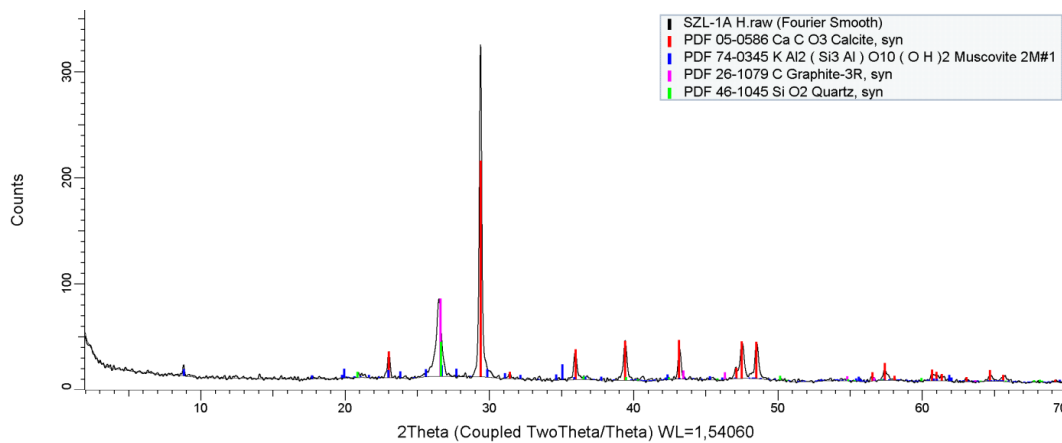
(Majoros, 2018)

8.3.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK

Az ultrahangos aprítással kapott minták XRD-felvételein a kalcit reflexiói jelennek meg uralkodó mennyiségben, mellette muszkovit, kvarc, albit és pirit reflexiói figyelhetők meg (XXIV–XXV. mellékletek).

Az SZL-1A minta agyagásvány szeparációja során nyert <5 µm szemcseméretű frakciójának XRD-felvételén is a kalcit figyelhető meg uralkodó mennyiségben, mellette nyomokban kvarc, muszkovit és goethit jelenik meg (XXVI. melléklet). Az SZL-1A minta

dúsítási kísérleténél kapott frakció XRD-felvételén szintén a kalcit reflexiói jelennek meg uralkodó mennyiségben, mellette megfigyelhető a muszkovit, kvarc és a grafit reflexiói is (67. ábra, XXVII. melléklet).



67. ábra: Az SZL-1A minta dúsítási kísérleténél kapott frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

A savazási kísérlet során kapott frakciók XRD-felvételein a kvarc reflexiói uralkodnak, mellette muszkovit, albit, grafit, rutil és pirit észlelhető (XXVI–XXVIII. mellékletek).

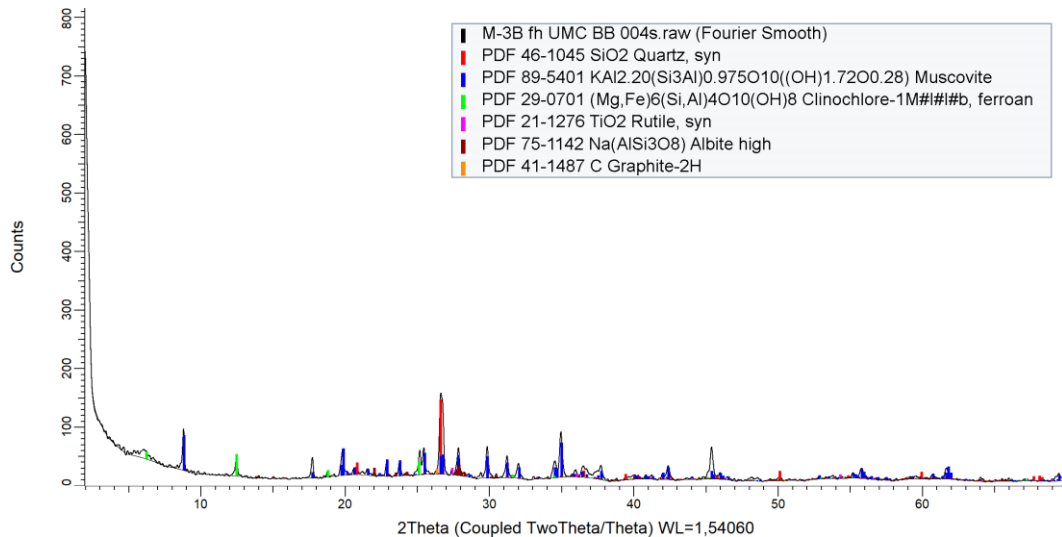
8.3.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ

A szendrői minták XRD-felvételein az uralkodó kvarc és muszkovit reflexiók mellett megfigyelhetők még klinoklór, rutil, anatáz és albit reflexiói (XXIX–XXXI. mellékletek). A diffraktogramokon egy agyagásványszerű fázis is látható, amelynek 16 Å-nél ($hkl = 001$) és 8 Å-nél ($hkl = 002$) figyelhető meg nagy intenzitású csúcsa (XXIX. melléklet). Bár végeztem agyagásvány leválasztást, abban nem jelent meg ez a fázis, így nem sikerült pontosan azonosítanom (XXIX. melléklet).

8.3.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES

A meszesi minták XRD-felvételein a kvarc, muszkovit és klinoklór reflexiói jelennek meg uralkodó mennyiségben, mellettük albit és rutil reflexiói figyelhetők meg (XXXII–XXXIII. mellékletek).

A meszesi M-3B minta dúsítási kísérleténél kapott frakció XRD-felvételén is uralkodó mennyiségben a kvarc, muszkovit és klinoklór figyelhető meg, mellette nyomokban rutil, albit és grafit jelenik meg (68. ábra, XXXIV. melléklet).



68. ábra: Az M-3B minta dúsítási kísérleténél kapott frakciójának diffraktogramja
(a szerző saját szerkesztése)

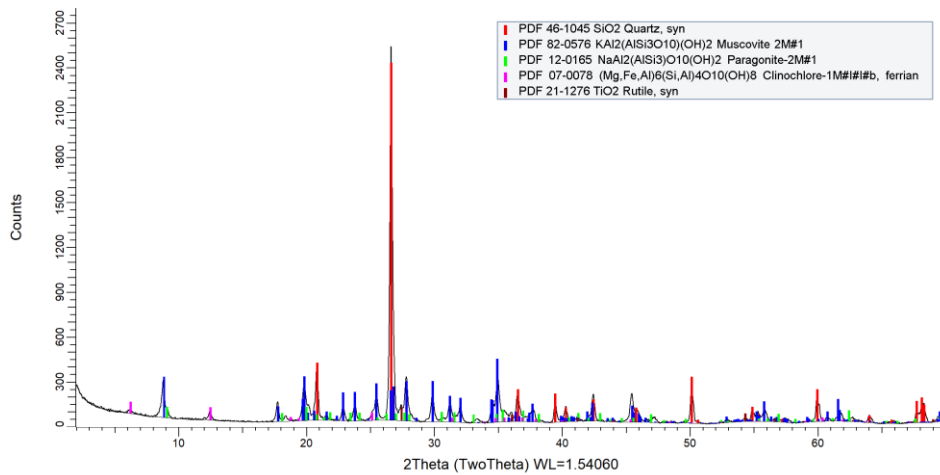
Az M-3B minta $<10\ \mu\text{m}$ -es szemcsenagyságú frakciójának XRD-felvételén szintén uralkodó mennyiségben a kvarc, muszkovit és klinoklór reflexiói figyelhetők meg, mellettük rutil, albit, cirkon és nontronit jelenik meg (XXXV. melléklet). A minta $>10\ \mu\text{m}$ -es szemcsenagyságú frakciójának XRD-felvételén pedig uralkodó mennyiségben a kvarc, muszkovit, klinoklór és albit reflexiói jelennek meg, mellettük rutil és cirkon reflexiói figyelhetők meg (XXXV. melléklet).

8.3.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND

A rakacaszendi minták XRD-felvételein a kvarc, muszkovit és klinoklór reflexiói jelennek meg uralkodó mennyiségben, mellettük albit és rutil reflexiói figyelhetők meg (XXXVI–XXXVII. mellékletek).

8.3.7. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM

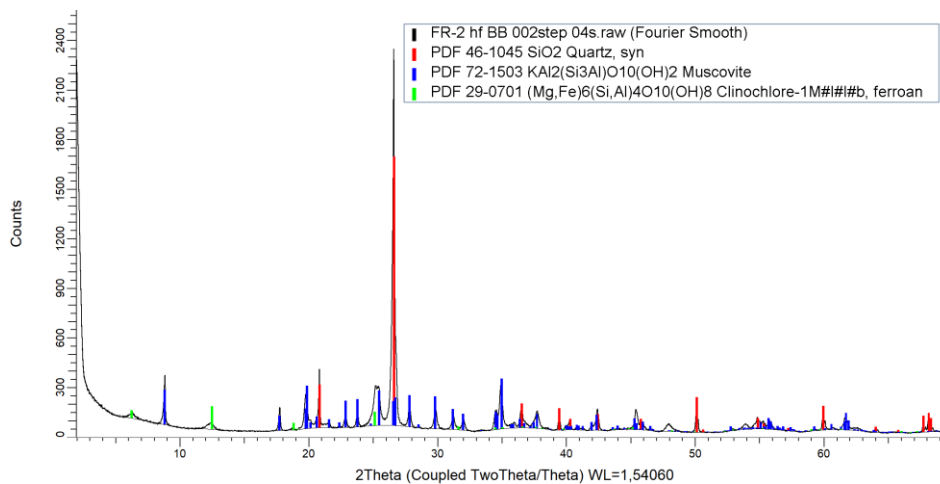
A velemi minták XRD-felvételein a kvarc, muszkovit és klinoklór reflexiói jelennek meg uralkodó mennyiségben, mellettük rutil, paragonit, anatóz, kalcit és allanit reflexiói észlelhetők (XXXVIII–XXXIX. mellékletek). A velemi VT-9/2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakció XRD-felvételén uralkodó mennyiségben a kvarc jelenik meg, mellette muszkovit, paragonit, klinoklór és rutil reflexiói figyelhetők meg (69. ábra, XL. melléklet).



69. ábra: A velemi VT-9/2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

8.3.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS

A fertőrákosi minták XRD-felvételein uralkodó mennyiségben a kvarc jelenik meg, mellette muszkovit és albit reflexiói figyelhetők meg (XLI–XLII. mellékletek) (Leskóné Majoros et al., 2025a). A fertőrákosi FR-2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakció XRD-felvételén is uralkodó mennyiségben a kvarc jelenik meg, mellette muszkovit és klinoklór reflexiói észlelhetők (70. ábra; XLII. melléklet).

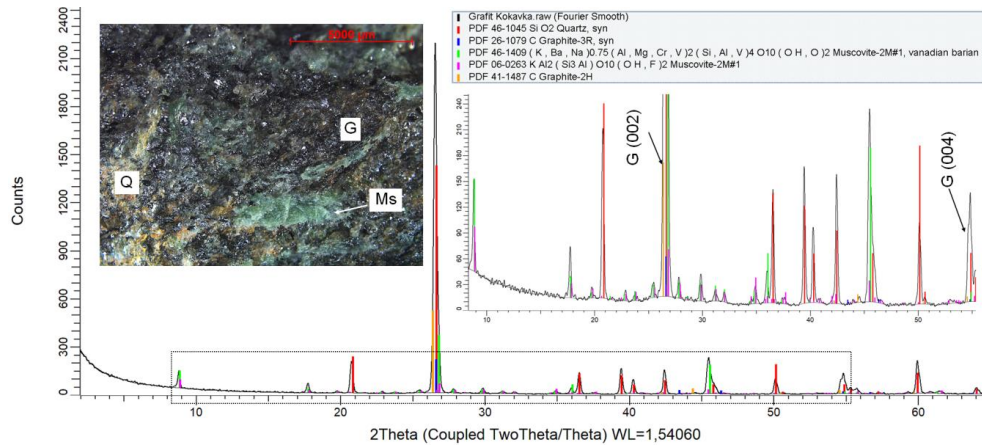


70. ábra: Az FR-2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

8.3.9. SZLOVÁKIA, NYUGATI-KÁRPÁTOK, RIMAKOKOVA

Tekintve, hogy az XRD módszer egy roncsolásmentes vizsgálati módszer, így a múzeumi példány legsíkabb részéről történt felületi mérés, mivel a rimakokovai példányból

nem készülhetett porminta. Ennek eredménye látható a 71. ábrán. A diffraktogramon az uralkodó kvarc és V-tartalmú muszkovit reflexiói mellett azonosíthatók a grafit csúcsai (2H és 3R) is (Majoros, 2019).

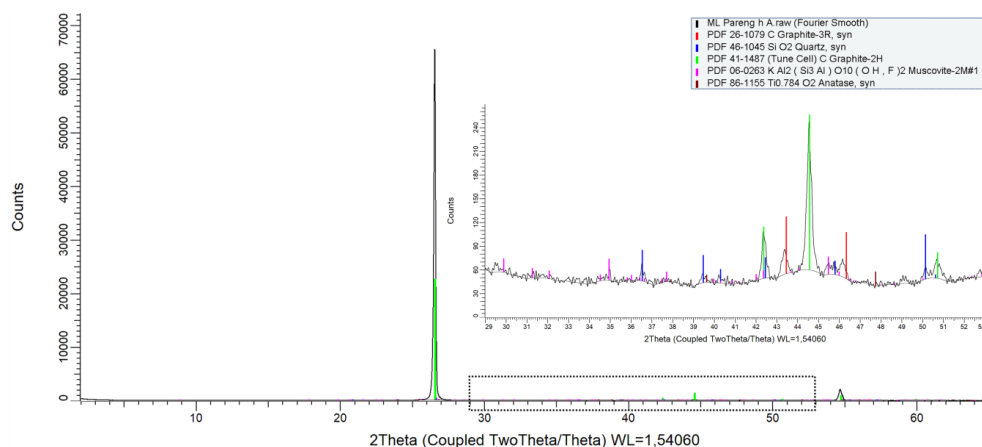


71. ábra: A rimakokovai múzeumi példányról készült diffraktogram. Balra közepén a mért felület, jobbra közepén a bekeretezett rész kinagyítása (Majoros, 2019)

8.3.10. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG

A parengi minta diffraktogramja a XLIII. mellékletben látható. Az uralkodó muszkovit és grafit (2H és 3R politípus is) reflexiók mellett a kvarc, albit, titanit, valamint anatóz és rutil (Nb-tartalmú) reflexiói jelennek meg (Majoros, 2019).

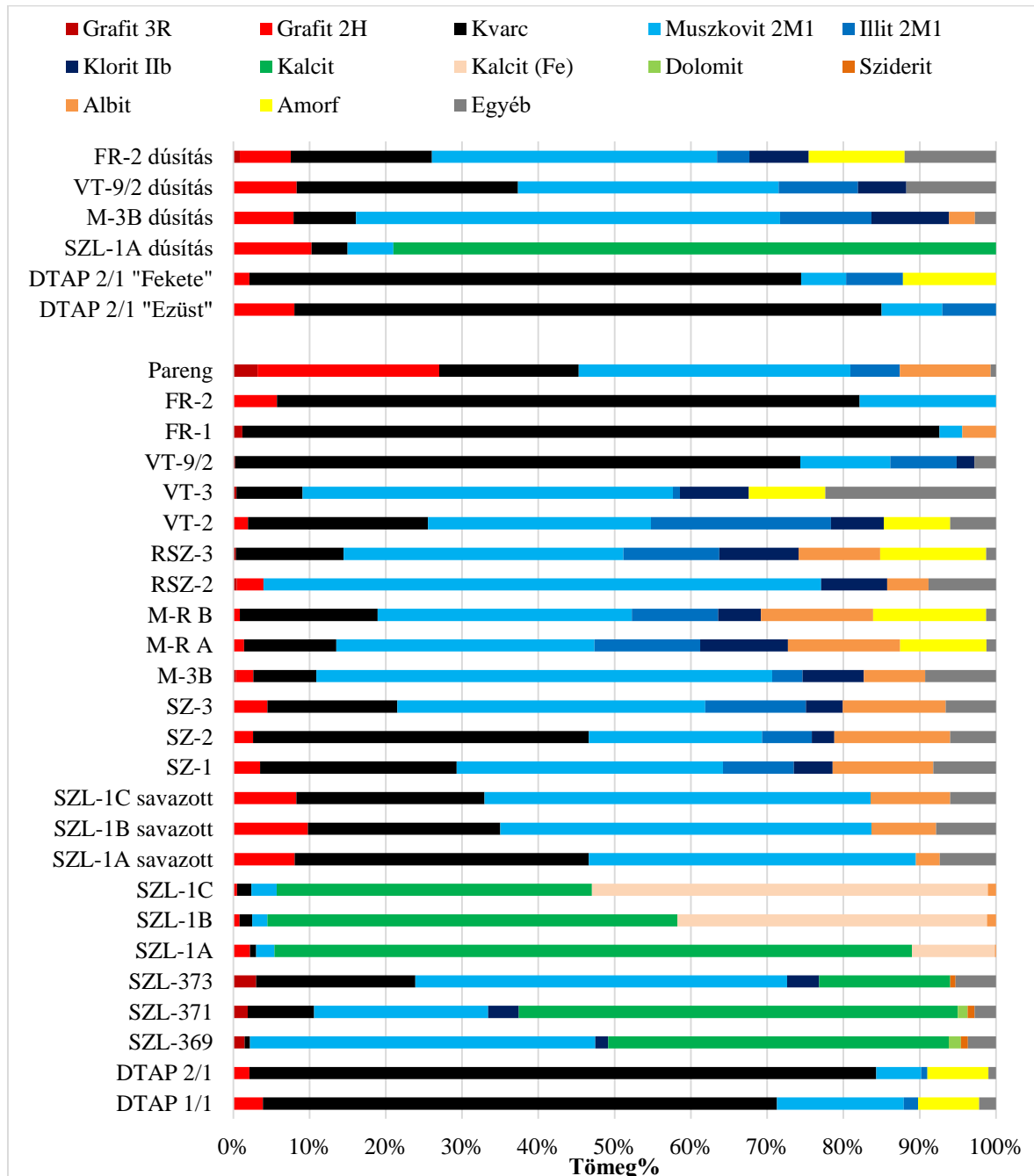
A parengi minta dúsítási kísérleténél kapott frakció XRD-felvételén uralkodóan a 2H és 3R grafit-reflexiók (~65 000 beütés) figyelhetők meg, mellettük kis mennyiségben még a kvarc, muszkovit és anatóz reflexiói azonosíthatók (72. ábra). Tekintve, hogy a leválasztott frakció lényegében >95% grafit, ezért mennyiségi kiértékelésével nem foglalkoztam (Majoros, 2019).



72. ábra: A parengi minta dúsítási kísérleténél kapott frakciójának diffraktogramja. A nagyított felvétel (jobbra közepén) a bekeretezett részről készült (Majoros, 2019)

8.3.11. A RIETVELD-ILLESZTÉS EREDMÉNYE

A mintákban észlelt kristályos fázisok Rietveld-illesztéssel számolt kvantitatív kiértékelésének eredményei a XLIV–XLV. mellékletekben láthatók. Az eredmények tömegszázalékban vannak megadva, egy tizedesjegyre kerekítve. A jobb szemléltetés végett sávdiaagrammon is ábrázoltam a kapott eredményeket (73. ábra).



73. ábra: A Rietveld-illesztés során kapott kvantitatív eredmények sávdiaagramon ábrázolva. Az egyéb kategóriát muszkovit 1M, kaolinit, illit/szmektit 11Å, szmektit 15 Å, biotit 1M, fengit 2M1, paragonit 2M, agyagásványszerű ásvány, anatóz, rutil, pirit és titanit ásványok alkotják (a szerző saját szerkesztése)

8.3.12. AZ XRD KIÉRTÉKELÉS ÉS RIETVELD-ILLESZTÉS SORÁN ÉSZLELTEK

A rétegszilikátok megkülönböztetése a csúcspozíciók és a csúcsokhoz tartozó intenzitások arányai alapján lehetséges. Például szinte minden mintámnál 10 Å körül jelentkezett egy relatíve nagy intenzitású csúcs ($hkl = 001$), 5 Å-nél pedig egy ennél kisebb intenzitású csúcs ($hkl = 002$). Ezek a csúcsok csillámok jelenlétére (T-O-T-I felépítésű rétegszilikátokra) utaltak a mintákban. A di- és trioktaéderes változatok megkülönböztetését a ($hkl = 002$) csúcs ($hkl = 001$) csúcsához viszonyított aránya alapján lehetett megtenni: dioctaéderes esetben (muszkovitnál) kb. a fele, míg trioktaéderes esetben (biotitnál) kb. a tizede a ($hkl = 002$) csúcs ($hkl = 001$) csúcsnak.

Ugyanígy, a csúcspozíciókkal lehetett azonosítani a mintáimban például az illitet (a ($hkl = 001$) csúcsa $\sim 10,5$ Å-nél, a ($hkl = 002$) csúcsa $\sim 5,1$ Å-nél található), valamint a kloritot (a ($hkl = 001$) csúcsa ~ 14 Å-nél, a ($hkl = 002$) csúcsa ~ 7 Å-nél található).

A karbonátok és a rétegszilikátok esetében gyakran megfigyelhető volt, hogy a csúcsok egyformán el voltak tolódva az elméleti csúcspozíciókhoz képest az x tengely mentén. A kalcitnál például a nagyobb szögértékek felé voltak gyakran eltolódva a csúcsok, amely a Mg Ca helyére történő beépülésének (elemhelyettesítésnek) tudható be (Mg-tartalmú kalcit). A sziderit esetében pedig a kisebb szögértékek felé voltak gyakran eltolódva a csúcsok, amelyet szintén elemhelyettesítés okozott, a Fe helyére Mg épült be (Mg-tartalmú sziderit).

A muszkovit szerkezetében szintén gyakran előfordult elemhelyettesítés, amely a csúcsok pozícióit megváltoztatta. Ha például Na-tartalmú volt a muszkovit (paragonitosodott), akkor a csúcsok a nagyobb szögértékek felé tolódtak el (például a ($hkl = 002$) már 4,3 Å-nél jelent meg). Előfordult még V-, Mg- és Fe-helyettesítés is a muszkovitban (V-tartalmú muszkovit, fengitesedett muszkovit, fengit).

Az elemhelyettesítés okozta csúcseltolódást a *DiffraCPlus* EVA szoftverben akkor lehetett teljesen megoldani, hogy ha volt erre külön kártya az adatbázisban (például Mg-tartalmú kalcitra a PDF 43-0697 számú kártya vagy a V-tartalmú muszkovitra a PDF 19-0814 számú kártya). Ha viszont nem szerepelt ilyen kártya, akkor a Rietveld-illesztés során kellett külön figyelmet fordítani rá. Tekintve, hogy a TOPAS4 szoftverben lehetőség van arra, hogy az elemhelyettesítéseket kezeljük és modellezzük, így pontosan meg lehetett határozni, hogy az adott fázisban mely elemek milyen mértékben helyettesítenek.

Rostos vagy lemezes termetű, illetve jól hasadó ásványok esetén a diffraktogramok kiértékelésekor eltérés figyelhető meg a mért és az elméleti intenzitás értékek között. Ez a

probléma a porpreparátum sík felületének létrehozásakor alakul ki, és egy korrekciós együttható segítségével lehet a kiválasztott hkl csúcsok mért intenzitását korrigálni a Rietveld-illesztés során (Young, 1993; Pecharsky és Zavalij, 2003; Hegman et al., 2011). A mintáim esetében legtöbbször a kalcit (hkl = 104) csúcsát, a rétegszilikátok (hkl = 001) csúcsát, illetve a grafit (hkl = 002) csúcsát kellett korrigálnom egy 0,1-1 érték közötti korrekciós együtthatóval.

A grafit esetén a kitüntetett orientáció miatt a (hkl = 002) csúcson kívül a többi grafit csúcs nem is volt észlelhető az XRD-felvételeken. Ráadásul ez a 26° - 27° (2θ) érték közötti (hkl = 002) csúcsa majdnem mindig átfedésben volt a kvarc (hkl = 101) és (hkl = 110) csúcsaival, amely így aszimmetrikus csúcsot eredményezett, és nem tette lehetővé a grafit egyértelmű beazonosítását a *DiffraPlus* EVA kiértékelések során. A mintákban lévő grafit pontos azonosítása csak Rietveld-illesztéssel volt lehetséges. A kitüntetett orientáció használata jelentősen befolyásolta a grafit számolt mennyiségét a mintákban, ugyanis akár az eredeti érték 20–50%-ával is képes volt megváltoztatni az értékeket.

A Rietveld-illesztés során külön figyelmet kellett még fordítani a rácsszerkezetben fellépő feszültségekre, mivel ezek módosíthatják a diffrakciós csúcsok magasságát, helyzetét és kiszélesedését is (Pecharsky és Zavalij, 2003; Hegman et al., 2011). Tekintve, hogy vizsgálataim során metamorf mintákkal foglalkoztam, így szinte mindig figyelembe vettem a kiértékeléseknél a maradék feszültséget. Ha az adott ásványos fázisban volt belső feszültség, akkor a krisztallitméret értéke mindig nőtt.

A mintákban lévő rendezetlen szerkezetű anyagok, illetve a nanokristályos (röntgenamorf) anyagok úgynevezett „amorf púpként” jelennek meg a diffraktogramokon (Hegman et al., 2011), amely púpot a Rietveld-illesztés során jellemezni lehet. A szoftverben a *Peak Phase* funkcióval megkaphatjuk az amorf tartalom mennyiségét, krisztallitméretét, a csúcs alatti területet, valamint a csúcs maximum értékét Å-ben. Ha két mintánál máshol van az amorf púp, akkor más az amorf anyag összetétele.

A minta mennyiségi kiértékelésénél figyelembe kell venni az amorf tartalom mennyiségét, és át kell normálni vele a kristályossági fok értéke szerint. Például, hogy ha meghatároztam, hogy a minta 11,6 tömeg% amorf anyagot tartalmaz, akkor a 100% kristályosnak számított fázisok 88,4 tömeg%-ot tesznek ki. Így az egyes fázisok értékeit be kellett szoroznom 0,884-el, hogy a tényleges mennyiségeket megkapjam.

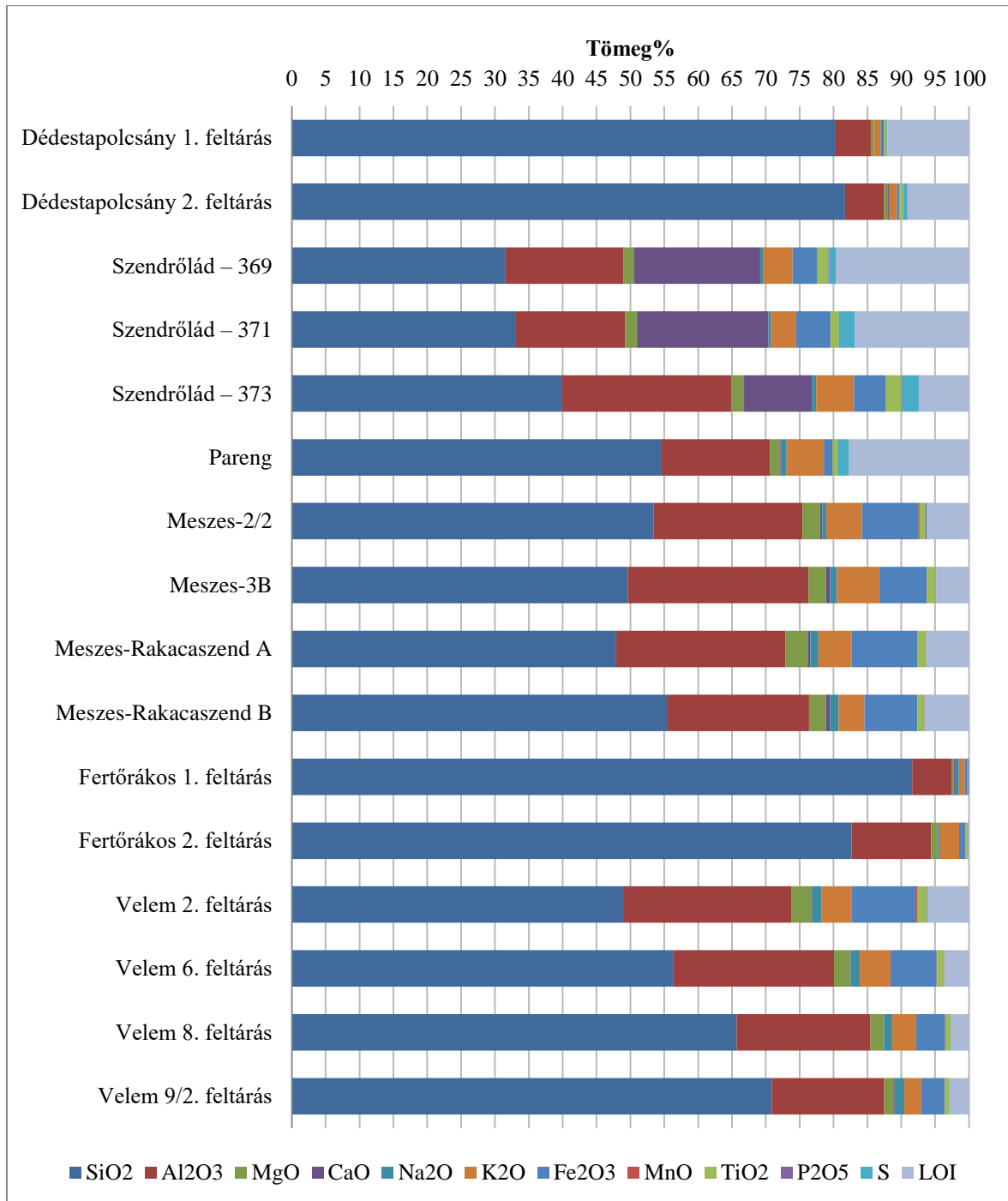
8.4. RÖNTGEN FLUORESZCENS SPEKTROMETRIAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

Bár az XRF vizsgálattal nem lehet közvetlenül kimutatni a grafitot, mégis végeztem ilyen méréseket, hogy a minták fő- és nyomelem tartalmainak ismeretében kiegészítsem és alátámasszam a SEM-EDX és XRD mérések eredményeit. A rimakokovai múzeumi minta és a szendrői minták kivételével mindegyik lelőhelyről származó mintából porítottam, és vizsgáltam XRF módszerrel.

A mintákon végzett főelem tartalom meghatározás eredményeit a XLVI. melléklet tartalmazza. Minden főelem a karakterisztikus spektrum K-alfa vonalán lett meghatározva. A jobb szemléltetés végett a kapott eredményeket sávdigramon is ábrázoltam (74. ábra), hogy könnyebben össze lehessen hasonlítani az egyes mintákat.

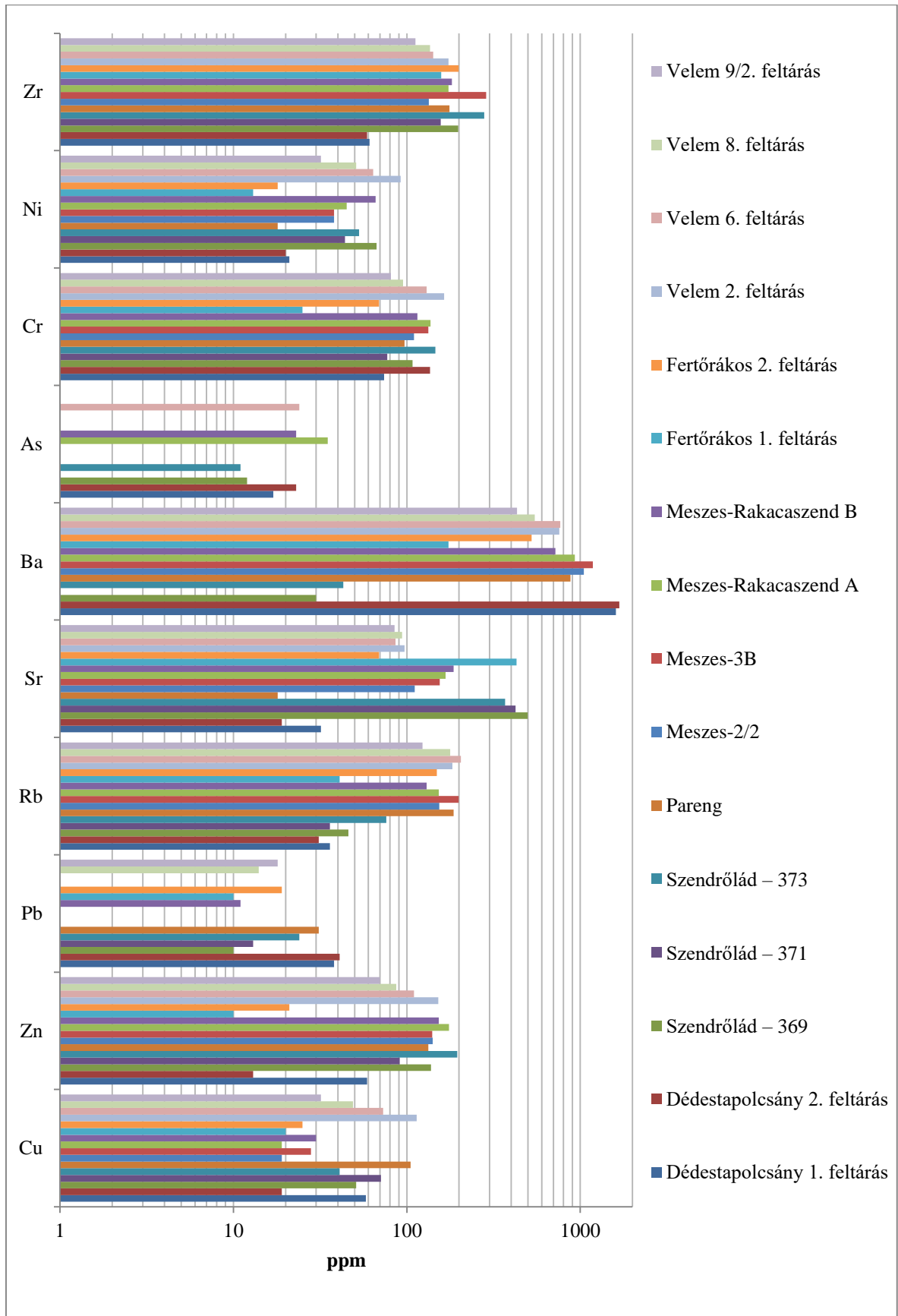
A mérések alapján a minták főelemei egyértelműen a Si és az Al. Ez egybevág a SEM-EDX és XRD módszerekkel kapott eredményekkel, ugyanis a minták alapanyaga főként kvarc a dédestapolcsányi minták esetében, illetve csillámok a többi esetben, amelyek szintén tartalmaznak kvarcot. A szendrőládi mintáknál megfigyelhető jelentős Ca-tartalom az alapanyagban megjelenő kalcit miatt van. A Mg-, Na- és K-tartalom, valamint a Fe-tartalom egy része a rétegszilikátokhoz kötődik minden mintánál, a Fe-tartalom másik része feltehetőleg szulfidokhoz (pirit, kalkopirit) vagy Fe-oxidhoz kapcsolódik. Jelentősnek mondható még a minták (főleg a szendrőládi, meszesi, meszes-rakacaszendi és veleimi minták) TiO_2 tartalma (>1 tömeg%), amelynek nagy része önállóan kristályos formában, rutil és anatázként van jelen az optikai megfigyelések alapján. A parengi minta esetében a Ti-tartalom titanithoz is kötődik. A mintákban megfigyelhető S-tartalom szulfidokhoz (például pirithez a szendrőládiaknál és a parenginél), szulfátokhoz (például jarosithoz a parenginél), illetve kis mennyiségben a grafithez is kötődik.

Ha mintánként összegzem a főelem tartalmakat, és 100%-hoz viszonyítom, akkor megkapom a nem mért elemek mennyiségét (LOI: Loss On Ignition, 74. ábra). Ezek feltehetően a karbonátok CO_2 -tartalmának, a rétegszilikátok (OH)-tartalmának, valamint a minták grafittartalmának a mennyiségei.



74. ábra: A mintákon végzett főelem arány meghatározás eredménye sávdiaagramon szemléltetve (a szerző saját szerkesztése)

A minták nyomelem tartalmát a XLVII. melléklet tartalmazza ppm-ben kifejezve. A báriumnál a detektálási határ 25 ppm, a többi nyomelemnél 10 ppm. A mért eredményeket a jobb szemléltetés végett szintén sávdiaagramon ábrázolom (75. ábra), azonban mivel több nagyságrendben jelennek meg az értékek, ezért logaritmikus skálát alkalmazok.



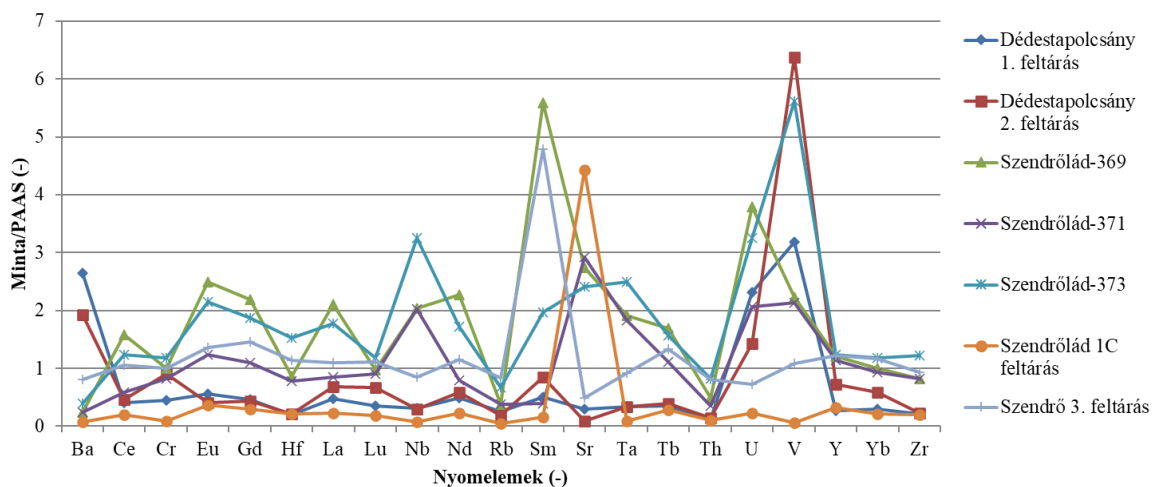
75. ábra: A mintákon végzett nyomelem tartalom meghatározás eredménye logaritmikus sávdiaqramon szemléltetve (a szerző saját szerkesztése)

Az adatok közül kitűnik a magas Ba- (a dédestapolcsányi mintáknál >1600 ppm, a parenginél >850 ppm, a meszesi mintáknál >900 ppm, a velemi mintáknál >400 ppm), Sr- (a szendrőládiaknál >350 ppm, a fertőrákosi 1. feltárásnál >400 ppm) és Zr-tartalom (a szendrőládi, parengi, meszesi, meszes-rakacaszendi, fertőrákosi és velemi mintáknál >150 ppm). Ezekon kívül kiugró értéknek számít még a parengi, a meszesi és a velemi mintáknál észlelt magas Rb-tartalom (>150 ppm). Az XRF mérés során meghatározott nyomelem tartalmak egybevágnak a SEM-EDX mérés során tapasztaltakkal.

Az XRF mérés során továbbá lehetséges a mért minták fél-kvantitatív kiértékelése is (XLVIII. melléklet). Az adatok közül kitűnik a dédestapolcsányi, szendrőládi, velemi, fertőrákosi és parengi minták magas V-tartalma (~200–700 ppm), amely összhangban van a SEM-EDX és XRD mérések során észleltekkal.

8.5. ICP-MS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

Az ICP-MS vizsgálatok során kapott nyomelem tartalom meghatározás eredményeit a XLIX. melléklet tartalmazza. A 76. ábrán a PAAS-ra normalizált nyomelem tartalom eredményei láthatók (PAAS értékek Taylor és McLennan (1985) után).



76. ábra: Az ICP-MS vizsgálatok során kapott, PAAS-ra normalizált nyomelem tartalmak eredményei (PAAS értékek Taylor és McLennan (1985) után) (a szerző saját szerkesztése)

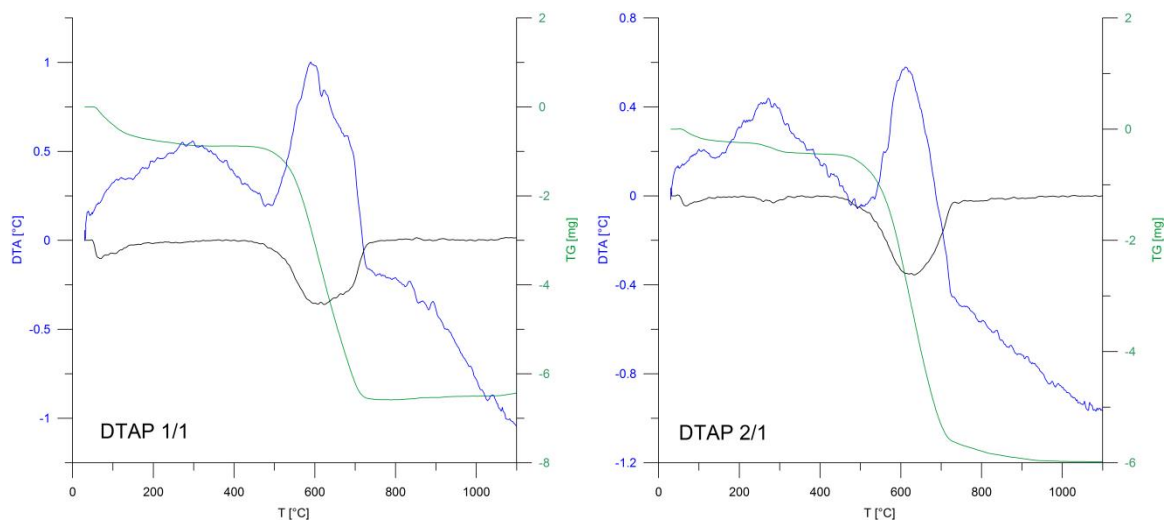
A kapott adatok közül kitűnik a magas V- (a dédestapolcsányi és a szendrőládi fűrómag mintáknál), Sm- (a szendrőládi fűrómag mintáknál és a szendrői mintánál), Sr- (a szendrőládi mintáknál), U- (a dédestapolcsányi és a szendrőládi fűrómag mintáknál), Nb- (a szendrőládi fűrómag mintáknál) és Ba-tartalom (a dédestapolcsányi mintáknál). Negatív anomália figyelhető meg a Rb és a Th esetében az összes mintánál.

8.6. SZIMULTÁN DTA-TG-DTG VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A termogravimetriai (szimultán DTA-TG-DTG) vizsgálatok eredményeit mintánkénti sorrendben ismertetem a következő alfejezetekben. Az egyes ábrákon a DTG görbékhez nem rendeltem külön tengelyt, hanem a DTA tengelyen ábrázoltam őket, mert megegyezik az adattartományuk. A DTG adatok mértékegysége mg/perc, de a kiértékelés során nem használtam fel az eredményeket.

8.6.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott eredmények a 77. ábrán láthatók. Mindkét dédestapolcsányi minta esetében ~150–480 °C között szerves anyag/részlegesen grafitosodott anyag termális reakciója, míg ~600 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója figyelhető meg. Az L. melléklet foglalja össze a grafit és a szerves anyag oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakciókhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést mintánként.



77. ábra: A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredményei (1. feltárás – balra, 2. feltárás – jobbra, kék – DTA, zöld – TG, fekete – DTG) (a szerző saját szerkesztése)

8.6.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS

A szendrőládi SZL-6 fúrómagok esetében mindegyik mintában megfigyelhető a grafit exoterm reakciója ~650°C körüli hőmérsékleten, míg szerves anyag/részlegesen grafitosodott anyag termális reakciója ~430–580 °C között észlelhető (kivéve az SZL-369 mintánál, ahol ez a reakció nem figyelhető meg) (Majoros et al., 2022). A grafit és szerves anyag mellett szmektit, vermikulit, pirit, sziderit illit, kvarc, muszkovit (szericit) és Mg-

tartalmú kalcit reakciói is megfigyelhetők az SZL-369, SZL-371 és SZL-373 minták esetében (LI. melléklet). Az L. mellékletben látható a grafit és a szerves anyag oxidációjának részletei, a DTA csúcs hőmérséklet és a reakciókhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztés mintánként. Az LII. melléklet pedig a szendrőládi fűrőmagok termogravimetriai vizsgálatai során észlelt termális reakciókat foglalja össze (Majoros et al., 2022).

8.6.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD, HELLE-PATAK

A szendrőládi Helle-patak menti feltárásokból a savazott minták kerültek termogravimetriai vizsgálatokra. Mindegyik minta görbéjén azonosítható a grafit exoterm reakciója ~700 °C körüli hőmérsékleten, valamint a szerves anyag/részlegesen grafitosodott anyag termális reakciója ~160–380 °C között (LIII. melléklet). A grafit és a szerves anyag mellett észlelhető még szmektit és muszkovit (szericit). Az L. mellékletben látható a grafit és a szerves anyag oxidációjának részletei, a DTA csúcs hőmérséklet és a reakciókhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztés mintánként.

8.6.4. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐ

A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott eredmények a LIV–LV. mellékletekben láthatók. A szendrői 1. feltárásból származó minta esetében ~510 °C körül klorit OH-vesztése miatti endoterm reakció, ~180–400 °C között szerves anyag/részlegesen grafitosodott anyag termális reakciója, míg ~650 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója figyelhető meg. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit és a szerves anyag oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakciókhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést.

8.6.5. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES

A meszesi M-3B mintán végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott eredmények a LVI. mellékletben láthatók. ~650 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója figyelhető meg. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakcióhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést.

8.6.6. SZENDRŐI-HEGYSÉG, RAKACASZEND

A rakacaszendi 2. feltárásból származó mintán végzett termogravimetriai mérések során kapott eredmények a LVII. mellékletben láthatók. ~650 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója figyelhető meg. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakcióhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést.

8.6.7. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM

A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott eredmények a LVIII. mellékletben láthatók. Mindkét velemi minta esetében ~300 °C körül goethit endoterm reakciója, míg ~600–700 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója figyelhető meg. A VT-9/2 számú minta esetében ~570 °C körül klorit OH-vesztése miatti endoterm reakció is észlelhető. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakcióhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést mintánként.

8.6.8. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS

A fertőrákosi minták termogravimetriai vizsgálatai során kapott eredmények a LIX. mellékletben láthatók. Mindkét minta esetében megfigyelhető ~650–700 °C körüli hőmérsékleten a grafit exoterm reakciója. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakcióhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést mintánként.

8.6.9. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG

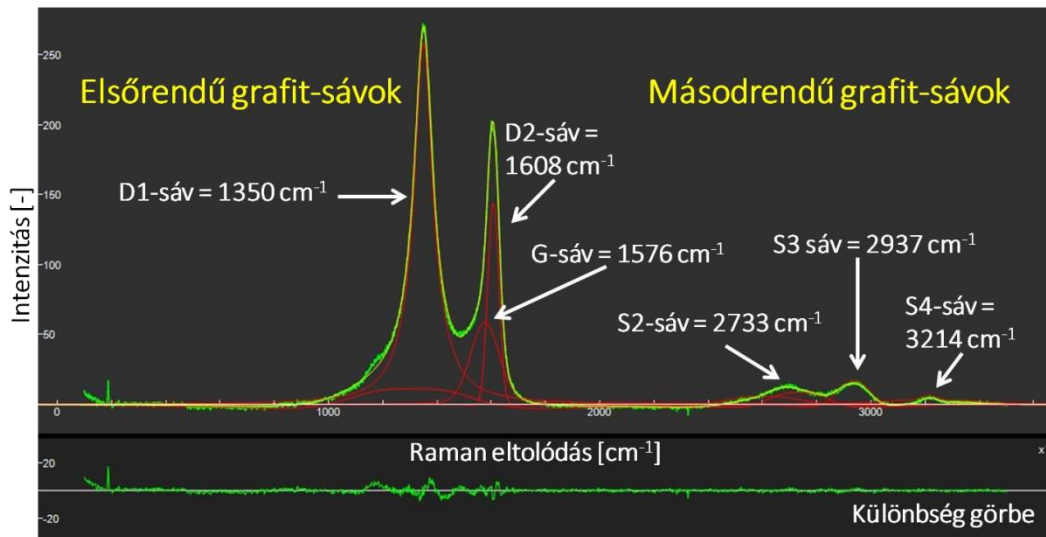
A parengi minta termogravimetriai vizsgálata során kapott eredmények a LX. mellékletben láthatók. A grafit exoterm reakciója ~800 °C körüli hőmérsékleten figyelhető meg. A LIV. melléklet foglalja össze a grafit oxidációjának részleteit, a DTA csúcs hőmérsékletet és a reakcióhoz kapcsolódó hozzávetőleges tömegvesztést.

8.7. RAMAN-SPEKTROSKÓPOS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A Raman-spektroszkópos vizsgálatok eredményeit a következő alfejezetekben ismertetem mintánként.

8.7.1. UPPONYI-HEGYSÉG, DÉDESTAPOLCSÁNY

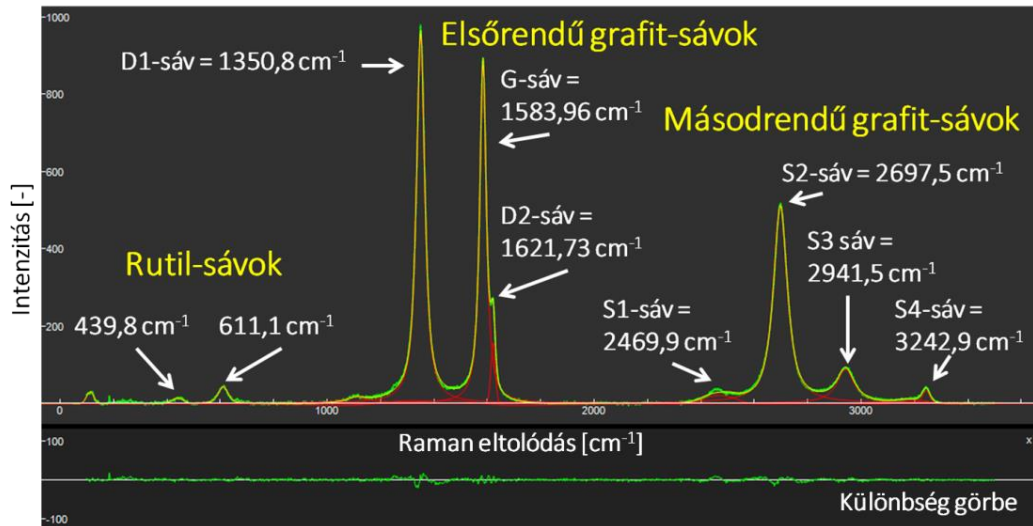
Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles, nagy intenzitású sáv azonosítható, az egyik $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv), a másik $\sim 1610 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv), valamint egy szélesebb, kisebb intenzitású sáv $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv). A másodrendű tartományt tekintve három, kis intenzitású, széles sáv azonosítható (S2-, S3- és S4-sávok). A 78. ábra egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival (Leskóné Majoros et al., 2022b).



78. ábra: Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival. Dédestapolcsány (Leskóné Majoros et al., 2022b nyomán)

8.7.2. SZENDRŐI-HEGYSÉG, SZENDRŐLÁD-6 FÚRÁS

Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles sáv azonosítható, egy nagyobb intenzitású sáv $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv), és egy annál alacsonyabb intenzitású sáv $\sim 1583 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv). A G-sáv jobb oldali vállaként megjelenik még egy alacsony intenzitású sáv is $\sim 1622 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv). A grafit másodrendű tartományánál négy sáv azonosítható; közülük három sáv alacsony intenzitással (S1-, S3- és S4-sáv) és egy sáv (S2-sáv) nagy intenzitással jelenik meg. A 79. ábra egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival, valamint rutil sávjait (Majoros et al., 2022).



79. ábra: Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival, illetve a mellette előforduló rutil sávjaival. Szendrőlád, SZL-6 jelű fúrás
(Majoros et al., 2022 nyomán)

8.7.3. SZENDRŐI-HEGYSÉG, MESZES

Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles sáv azonosítható, egy nagyobb intenzitású sáv $\sim 1583 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv), és egy alacsonyabb intenzitású sáv $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv). A G-sáv jobb oldali vállaként egy alacsony intenzitású, keskeny sáv is megfigyelhető $\sim 1622 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv). A másodrendű tartományt tekintve, négy sáv jelenik meg; három sáv alacsony intenzitással (S1-, S3- és S4-sáv), és egy sáv nagy intenzitással (S2-sáv). Továbbá az S2-sáv két külön sávra való kezdeti szétválása is megfigyelhető (G'_1 és G'_2 sávok). A LXI. melléklet egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival (Leskóné Majoros et al., 2022b).

8.7.4. KŐSZEGI-HEGYSÉG, VELEM

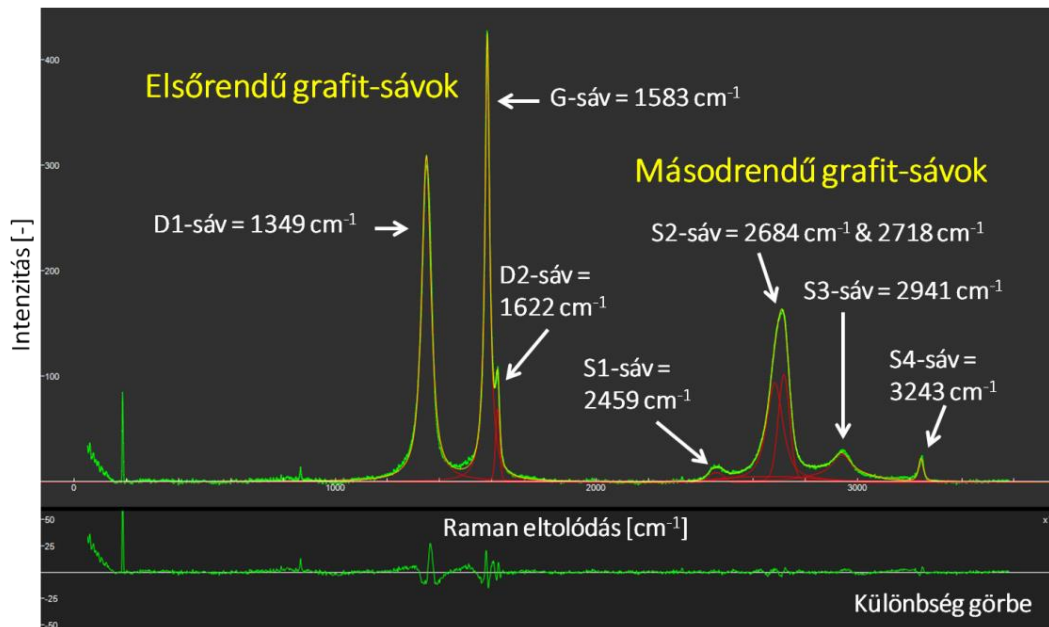
Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles sáv azonosítható, egy nagyobb intenzitású sáv $\sim 1582 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv), és egy alacsonyabb intenzitású sáv $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv). A G-sáv jobb oldali vállaként egy alacsony intenzitású, keskeny sáv is megfigyelhető $\sim 1621 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv). A másodrendű tartományt tekintve, négy sáv jelenik meg; három sáv alacsony intenzitással (S1-, S3- és S4-sáv), és egy sáv nagy intenzitással (S2-sáv). Továbbá az S2-sáv két külön sávra való kezdeti szétválása is megfigyelhető (G'_1 és G'_2 sávok). A LXI. melléklet egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival.

8.7.5. SOPRONI-HEGYSÉG, FERTŐRÁKOS

Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles sáv azonosítható, egy nagyobb intenzitású sáv $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv), és egy alacsonyabb intenzitású sáv $\sim 1349 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv). A G-sáv jobb oldali vállaként egy alacsony intenzitású, keskeny sáv is megfigyelhető $\sim 1620 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv). A másodrendű tartományt tekintve, négy sáv jelenik meg; három sáv alacsony intenzitással (S1-, S3- és S4-sáv), és egy sáv nagy intenzitással (S2-sáv). Továbbá az S2-sáv két külön sávra való kezdeti szétválása is megfigyelhető (G'_1 és G'_2 sávok) (Leskóné Majoros et al., 2025a). A LXII. melléklet egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival.

8.7.6. ROMÁNIA, DÉLI-KÁRPÁTOK, PARENG

Az elsőrendű Raman-spektrumnál két éles sáv azonosítható, egy nagyobb intenzitású sáv $\sim 1583 \text{ cm}^{-1}$ -nél (G-sáv), és egy alacsonyabb intenzitású sáv $\sim 1349 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D1-sáv). A G-sáv jobb oldali vállaként egy alacsony intenzitású, keskeny sáv is megfigyelhető $\sim 1621 \text{ cm}^{-1}$ -nél (D2-sáv). A másodrendű tartományt tekintve, négy sáv jelenik meg; három sáv alacsony intenzitással (S1-, S3- és S4-sáv), és egy sáv nagy intenzitással (S2-sáv). Továbbá az S2-sáv két külön sávra való kezdeti szétválása is megfigyelhető (G'_1 és G'_2 sávok). A 80. ábra egy kiértékelt Raman-spektrumot mutat, a grafit első- és másodrendű sávjaival.



80. ábra: Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival. Pareng (a szerző saját szerkesztése)

9. DISZKUSSZIÓ

A következő alfejezetekben a különböző mérések során kapott eredményekből levonható következtetéseket ismertetem témakörök szerint csoportosítva a jobb átláthatóság és értelmezhetőség érdekében.

9.1. A GRAFIT KIMUTATÁSA

A kőzetekben lévő grafit kimutatására bár sok módszer létezik (például optikai mikroszkópia, XRD, TEM, termogravimetria, Raman-spektroszkópia), megoszlanak a vélemények, hogy a grafitosodási folyamat végső termékeként mit is tekintenek és neveznek ténylegesen grafitnak. Például Landis (1971) szerint 450 °C-nál nagyobb hőmérsékleteken képződik jól kristályosodott grafit, míg Buseck és Beyssac (2014) szerint teljesen rendezett szerkezetű grafit csak nagyon magas hőmérsékleten és nyomáson, eklogit fáciesben képződik. Ezért is vezették be a rendezett szerkezetű (angolul „*well-ordered*”) és a rendezetlen szerkezetű (angolul „*disordered*”) grafit elnevezéseket (Henry et al., 2019b). Szigorúan tekintve csak a teljesen rendezett szerkezetű grafitot lehet grafitnak nevezni (ahol csak a G-sáv jelenik meg a Raman-spektrum elsőrendű tartományában), és a többi esetben, ahol megjelennek a D-sávok a Raman-spektrumban már csak grafitosodott anyagnak, esetleg rendezetlen szerkezetű grafitnak lehet hívni (Beyssac et al., 2002; Buseck és Beyssac, 2014).

A Raman-spektroszkópos mérések során a mintáimban minden esetben a G-sáv mellett megjelentek a D-sávok is az elsőrendű tartományban, így rendezetlen szerkezetű grafitról van szó, de a továbbiakban egyszerűen csak grafitként, esetleg grafitosodott anyagnaként hivatkozom rá.

Tehát ami a mintákban lévő grafit kimutatását illeti, a SEM-EDX vizsgálatokkal mindegyik mintánál (kivéve a szendrőládi Helle-patak menti feltárásokból származó minták) egyértelmű volt egy széntartalmú anyag jelenléte, amelyet az optikai megfigyelések erősítettek meg, hogy a grafitosodás útjára léptek. Szinte minden esetben unduláló kioltás, bireflexió és anizotróp viselkedés jellemezte a grafitosodott anyagot.

Az XRD vizsgálatokkal a magyarországi lelőhelyekről származó minták esetében nem lehetett egyértelműen azonosítani a grafitot a nagy átfedéssel elhelyezkedő grafit- és kvarc-reflexiók miatt. A grafit 26°–27°(2 θ) érték közötti csúcsa (hkl = 002) majdnem egybeesik a kvarc csúcsával, így ezek együttes megjelenése aszimmetrikus csúcsot eredményez. A többi grafit csúcs pedig a grafit kis mennyisége és a kitüntetett orientáció miatt nem jelenik meg a felvételeken. A rimakokovai múzeumi példánynál és a parengi

mintánál viszont már az XRD vizsgálatnál is egyértelmű volt a grafit jelenléte, ráadásul mindkét politípus is megfigyelhető volt (Majoros, 2019). Tekintve, hogy a 3R módosulat egy metastabil forma (Kwiecińska és Petersen, 2004), így az együttes jelenlétük úgy lehetséges, hogy a szerves anyag grafitosodása során feltehetően 3R is képződött, amely fokozatosan alakul át a stabilabb 2H politípussá.

Legtöbbször Rietveld-illesztéssel csak akkor lehetséges a mintákban lévő grafit mennyiségi számolása, ha annak jelenlétét legalább optikai mikroszkópos és Raman-spektroszkópos módszerekkel bizonyítottuk. A kapott eredményeket viszont így is szükséges termogravimetriával ellenőrizni és korrigálni, a magas hibalehetőség miatt. Míg egy egyszerű alapanyagban, például kalcit esetén (ahol nincs csúcsátfedés), a mintában lévő grafit tartalom kimutatási határa körülbelül 0,5 tömeg% lehet, addig kvarc alapanyagban ez az érték ~1 tömeg%. Ezzel szemben egy összetettebb mintában, amely filloszilikátokat és kvarcot is tartalmaz, akár ~5 tömeg% is lehet a grafit kimutatási határa. Ezért szükséges a vizuális megerősítés az XRD kiértékelés előtt, mivel a Rietveld-illesztés dekonvolúciós eljárásai lehetővé teszik az egyes fázisok mennyiségének kiszámítását még csúcsátfedés és 1–5 tömeg%-os mennyiség esetén is, feltéve, hogy az adott fázis valóban jelen van a mintában (Leskóné Majoros et al., 2025b).

A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálat szintén alkalmas a mintákban lévő grafit- és szervesanyag-tartalom kimutatására és mennyiségi meghatározására, azonban a grafit szerkezetének rendezettségi állapotára nem ad információt, erre a Raman-spektroszkópia és a TEM nyújt megoldást. A termogravimetriai vizsgálatok minden esetben igazolták a grafit jelenlétét a mintákban, a TEM mérések során pedig egy-egy grafit szemcse rácsszerkezete, rendezettségi állapota is feltárásra került.

9.2. A GRAFIT-KRISTÁLYOSODÁS GENETIKAI VISZONYAI

Az alacsony fokú metamorf geotermométerek általában illit (Kübler-index; Kübler, 1967, 1968, 1984) és klorit (Árkai-index; Árkai, 1991) kristályossági indexekre támaszkodnak, amelyek egyre növekvő kritikát kapnak a módszerek szubjektivitása és a standardizálatlan minta-előkészítés, műszerbeállítás és kiértékelési eljárások miatt (például Warr, 2018). Ezért ha a vizsgálni kívánt kőzet tartalmaz grafitot, grafitosodott anyagot vagy erősen grafitizált vitrinitet, más mikroanalitikai technika alkalmazásával (például Raman-spektroszkópia) pontosabb adatok nyerhetők (például Beyssac et al., 2002; Aoya et al., 2010; Baludikay et al., 2018).

Amint azt a 7.8.1. alfejezetben említettem, a grafit Raman-spektrumát felhasználva alkalmas a képződési csúcshőmérséklet meghatározására (Henry et al., 2019b). Ehhez szükséges egyik paraméter az R2 területarány érték, amely kiszámítása az alábbi egyenlet alapján lehetséges:

$$R2 = D1 / (G + D1 + D2), \text{ ahol}$$

G = G-sáv alatti terület,

D1 = D1-sáv alatti terület,

D2 = D2-sáv alatti terület.

Elsőként Beyssac et al. (2002) formuláját alkalmaztam a képződési csúcshőmérséklet kiszámításához: $T (^{\circ}\text{C}) = -445 \cdot R2 + 641 (\pm 50 ^{\circ}\text{C})$. Ez az egyenlet 330 és 650 °C között adja meg a maximális hőmérsékletet. Bár regionális metamorfózis során képződött grafitra van az egyenlet kidolgozva, azonban 514,5 nm-es lézer alkalmazásával. A méréseim viszont 532 nm-es lézerrel történtek, ezért egy másik egyenletet is kerestem, amely szintén 532 nm-es lézert használ. Így Aoya et al. (2010) formuláját is alkalmaztam: $T (^{\circ}\text{C}) = 221 \cdot (R2)^2 - 637,1 \cdot R2 + 672,3 (\pm 50 ^{\circ}\text{C})$. Az utóbbi egyenlet 340 és 655 °C között érvényes, és kontakt metamorf kőzetekre fejlesztették ki. A mérési körülményeket (eltérő hullámhosszúságú lézer alkalmazása), illetve a különböző metamorfózison átesett kőzeteket tekintve Aoya et al. (2010) megállapításai alapján bármely egyenlet alkalmazható, hiszen a képződési csúcshőmérsékletre számolt különbség minden esetben kisebb 10 °C-nál (méréseik szerint 5–10 °C közé esnek), amely bőven benne van a hibatarományban ($\pm 50 ^{\circ}\text{C}$).

Ez összhangban van Lünsdorf et al. (2014) megállapításaival, akik minden torzító tényezőt megvizsgáltak, hogy a geotermometriai adatok összehasonlíthatóbbak legyenek. Tanulmányuk alapján a képződési hőmérséklet értékeket három fő forrás módosíthatja: a Raman-rendszer konfigurációja, a kapott spektrumok feldolgozása, valamint maga a kőzetminta heterogenitása. Minden torzító tényezőt figyelembe véve, Lünsdorf et al. (2014) szerint az összes hiba együttes eltérése ~10–30 °C, amely alacsonyabb, mint a Beyssac et al. (2002) és Aoya et al. (2010) által megadott $\pm 50 ^{\circ}\text{C}$ -os hibataromány.

A 4. táblázat tartalmazza az R2 értékeket és a kétféle formulával számított képződési hőmérséklet eredményeket lelőhelyenként. A dédestapolcsányi eredményeket tekintve, a Beyssac-formulával számolt hőmérséklet érték pont beleesik az alkalmazhatósági intervallumba, azonban az Aoya-formulával számolt éppen hogy nem, mivel az 340 °C-tól érvényes. Ezért lehetséges, hogy a kétféle érték közötti különbség negatív (az Aoya-féle hőmérséklet a nagyobb), és a többi esetben pedig pozitív (a Beyssac-féle hőmérséklet a nagyobb).

4. táblázat: Lelőhelyenként a számolt átlagos R2 területarány érték, a kétféle formulával számított átlagos képződési csúcshőmérséklet eredmények (± 50 °C), valamint a kapott hőmérséklet eredmények közötti különbség (a szerző saját szerkesztése)

	R2 érték [-]	Beysac et al. (2002)-féle hőmérséklet [°C]	Aoya et al. (2010)-féle hőmérséklet [°C]	Különbség [°C]
Dédestapolcsány	0,69	334	338	-4
Szendrőlád, SZL-6	0,53	408	400	8
Meszes	0,48	425	417	8
Velem	0,54	401	394	7
Fertőrákos	0,44	443	434	9
Pareng	0,56	390	384	6

A dédestapolcsányi minták átlagos képződési hőmérséklete ~ 335 °C (± 50 °C). A kapott érték összhangban van korábbi kutatások eredményeivel, ugyanis Árkai (1983) mérései alapján a Szendrő–Upponyi-egységet kistektonikus metamorfózis érte (300–450 °C és 200–300 MPa). A metamorfózis foka az upponyi paleozoikum területén kisebb volt (nagyon kistektonikus / kistektonikus határa), mint a szendrői paleozoikumban (kistektonikus, helyenként neomorf biotittal) (Árkai et al., 1981). Winkler (1976) megállapításai alapján a grafit képződését elsősorban a nyírófeszültség lokális emelkedése okozta, amely már az anchi- és epizóna határán lejátszódhatott kb. 300 °C-on.

A szendrői SZL-6 jelű fúrásból származó minták átlagos képződési csúcshőmérséklete ~ 405 °C (± 50 °C) (Majoros et al., 2022), míg a meszesi minták átlagos képződési csúcshőmérséklete ~ 420 °C (± 50 °C) (Leskóné Majoros et al., 2025b). Ezen hőmérséklet értékek egybevágóak Árkai (1983) megfigyeléseivel, miszerint a Szendrői-hegységet kistektonikus metamorfózis érte (300–450 °C és 200–300 MPa). Fülöp (1994) szerint a szendrői minta esetében az észlelt ásványegyüttes, illetve a szericit, illit és grafit kristályossági foka alapján a metamorfózis a zöldpala fácies kvarc-albit-muskovit-klorit alfáciesébe sorolható.

A meszesi minták magasabb képződési hőmérséklete a dédestapolcsányi és szendrői mintákhoz képest a grafit Raman-spektrumán is látszik, ugyanis nagyobb az I_G/I_D (vagyis a G-sáv és a D1-sáv) intenzitás aránya, valamint az S2-sáv kezdeti szétválása is megfigyelhető a dekonvolúció során. Ez a szétválás csak a teljesen rendezett grafit állapotra jellemző: nagyon magas hőmérsékleten és nyomáson, eklogit fáciesben képződött

grafitra (Lespade et al., 1982; Wopenka és Pasteris, 1993; Jehlička és Beny, 1999; Beyssac et al., 2002; Buseck és Beyssac, 2014; Rantitsch et al., 2016).

A velemi minták átlagos képződési csúcshőmérséklete ~ 400 °C (± 50 °C), ezzel szemben a fertőrákosi mintáké ~ 440 °C (± 50 °C) (Leskóné Majoros et al., 2025a). Mindkét lelőhelyről származó minták esetében észlelhető volt a dekonvolúció során az S2-sáv kezdeti szétválása, valamint a nagyobb I_G/I_D intenzitás arány (ez a fertőrákosi mintáknál sokkal nagyobb volt). A grafit geotermometriával kapott képződési hőmérséklet értékek beleillenek a területek ismert földtani hátterébe, ugyanis a Kőszegi Metamorfit Komplexum és a Fertőrákosi Metamorfit Komplexum is zöldpala fáciesű metamorfózison esett át (Babinszki et al., 2023).

A kárpáti kitekintéshez a Déli-Kárpátokból származó parengi minták átlagos képződési csúcshőmérséklete a grafit geotermometria alapján ~ 390 °C (± 50 °C). Bár a Cătălinul-bánya a Lainici Păiuș Formáció-Csoportban helyezkedik el, amelyet kis nyomású, nagy hőmérsékletű amfibolit fáciesű metamorfózis ért (Savu, 1970; Berza, 1978), a mérések során kapott képződési csúcshőmérséklet ennél alacsonyabb. Ezt azzal lehet magyarázni, hogy mivel széntelep metamorfózisa során (regionális, utána kontakt metamorfózis is lejátszódott) képződött a grafittelep (Ion et al., 2023), így a szélein vagy bizonyos részein a telepnek az amfibolit fáciesnél kisebb fokú metamorfózis is lehetséges volt. Ráadásul a kapott minta bányán belüli (telepen belüli) származási helye bizonytalan, így magyarázható az amfibolit fáciesnél kisebb (zöldpala fáciesű) képződési hőmérséklet érték.

Fontos megemlíteni, hogy a grafit geotermometria során használt egyenletek nem veszik figyelembe a fennálló feszültséget és nyomást, pedig ezek is fontos szerepet játszanak a grafit képződése során (Beyssac et al., 2002). Tekintve, hogy már a mintavételezés is mindegyik lelőhely esetében nyírási zónákból történt, a minták szövete jól tükrözi a deformáció hatására kialakult irányított szövetet, amelyben a nyírási zónára jellemző deformációs elemek is jól megfigyelhetők voltak: krenulációs paláság, mikroredőzöttség, kalcit kristályok deformációs ikresedése, nyomásárnyék rutil szemcsék körül, valamint grafit kristályok unduláló kioltása.

A grafit minden vizsgált lelőhely esetében a metamorfózissal szingenetikus képződésű; a regionális metamorfózis során, nyírás hatására a kőzetekben lévő szerves anyag a grafitosodás útjára lépett. A szerves anyag eredetre utal többek között a grafitokban észlelt kevés kéntartalom (Dédestapolcsány, Szendrőlád, Rimakokova), a TiO_2 -okban és muszkovitban (szericitben) megfigyelt V-tartalom (Dédestapolcsány, Szendrőlád,

Rimakokova), valamint a kísérő ásványokban megfigyelt U-, Th- és RFF-tartalom. Jól ismert ugyanis ezen elemek szerves anyaghoz való affinitása (Dill, 2010).

A kőzetekben lévő szerves anyag a dédestapolcsányi mintáknál az euxin mélyvízi fáciesben, a szendrőládiaknál a foltzátonyokkal és köztük levő medencékkel szabdaltnál, törmeléken selfterületen halmozódhatott fel (Fülöp, 1994; Pelikán et al., 2006; Gyalog, 2005; Less et al., 2005). A szendrői, meszesi és rakacaszendi mintáknál szintén a mélytengeri környezetben (Fülöp, 1994), a veleimi mintáknál tengeri környezetben (Babinszki et al., 2023) halmozódhatott fel a szerves anyag, ezzel szemben a fertőrákosi minták esetében ez nem tisztázott (Babinszki et al., 2023). A Rimakokováról származó mintánál Kováčik (2003) szerint a legvalószínűbb szén protolit kőzet plankton eredetű bitumenes anyag lehetett, a parengi minta esetében pedig egy széntelep grafitosodott (Ion et al., 2023).

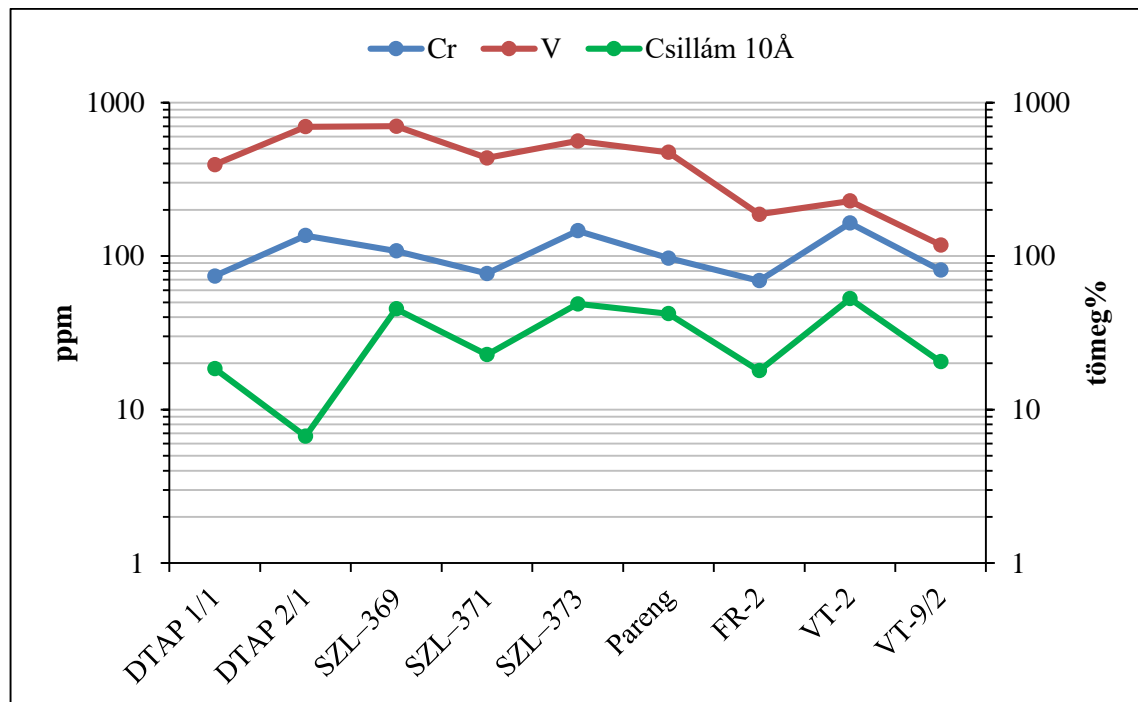
Ami a teleptani besorolást illeti, az általam vizsgált grafit lelőhelyek genetikailag a 4B típusú metamorfizált grafittelepek (Kužvart, 1984) kategóriába illenek. A magyarországi és a rimakokovai előfordulások a regionális metamorfózis során képződő, míg a parengi a regionális, majd kontakt metamorfózis során képződő grafittelep alkategóriába esik bele.

A dédestapolcsányi, szendrőládi, parengi és rimakokovai mintáknál kiemelkedően magas a V-tartalom. Utóbbinál ez okozza a muszkovitok makroszkóposan is megfigyelhető világoszöld színét. A dédestapolcsányi és szendrőládi minták V-tartalma 300–1000 ppm ICP-MS mérés alapján, a parengi mintánál pedig ~500 ppm XRF mérés alapján. A dédestapolcsányi minták felszínén lévő zöld színű bevonat XRD mérés alapján pedig egy Cu-vanadát ásvány (volborthit). Ez azonban nem az első leírása ennek az ásványnak Dédestapolcsányról, mert már korábban megemlítették erről a lelőhelyről (Szakáll és Sajó, 2003).

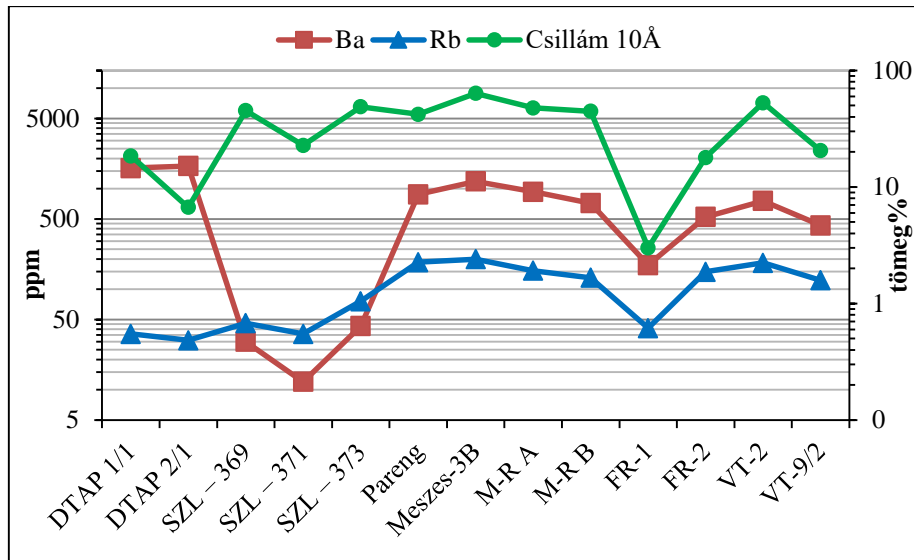
Breit és Wanty (1991) állított fel egy modellt, amelyben a V szingenetikus felhalmozódását ismertetik. Modelljük szerint a széntartalmú üledékekben a vanádium (főként mint vanadil-ion) alapvetően a szerves vegyületekhez kötődik (például karbonsavakhoz). A pórusvizekben lévő H₂S pedig redukálhatja a V(IV)-et V(III)-má, amely beépülhet agyagásványok szerkezetébe (az oktaéderes rétegben az alumíniumot helyettesítve) (Maylotte et al., 1981; Premovic, 1984; Wanty et al., 1990). A kőzet összetételétől függően a vanádium legnagyobb része a kőzetben marad, mivel beépül az agyagásványokba (Norrish és Patterson, 1976; Zhang, 1985; Coveney et al., 1987). A metamorfózis előrehaladtával míg a kőzetben lévő szén grafittá alakul át, addig a vanádium a szilikát ásványokba (csillámokba) épül be a V-tartalmú agyagásványok újrakristályosodásakor (Pallister és Thoenen, 1948; Breit és Wanty, 1991).

Geokémiailag a vanádium mellett a króm dúsulása várható (például Brumsack, 1983; Brumsack és Gieskes, 1983; Wanty, 1986, Breit és Wanty, 1991; Dill, 2010), azonban a mintákban a magas vanádium-tartalmat nem kíséri jelentős króm dúsulás. Ráadásul az EDX mérések során egyetlen króm-tartalmú fázist sem sikerült azonosítani. A 81. ábrán azonban jól megfigyelhető, hogy a minták Cr-tartalma hasonló tendenciát mutat a V-tartalommal.

A dédestapolcsányi és szendrőládi mintáknál ICP-MS alapján magas az U-tartalom (4–12 ppm), a szendrőládi, szendrői, velemi és fertőrákosi mintáknál pedig emelkedettebb Th-tartalmat lehetett mérni ICP-MS és XRF alapján. Összehasonlítva az XRF mérés során kapott Ba- és Rb-tartalmakat, megállapítható, hogy a szendrőládi (karbonátos) minták kivételével hasonló tendenciát mutatnak (82. ábra). Az EDX mérések során viszont egyedül a dédestapolcsányi mintákban sikerült Ba-tartalmú fázist azonosítani (goyazit-gorceixit elegy, Majoros, 2017).



81. ábra: Az XRF mérés során, a mintákban mért Cr- és V-tartalom (ppm), valamint a Rietveld-illesztés során meghatározott 10Å csillámtartalom (tömeg%) logaritmusos skálán ábrázolva (a szerző saját szerkesztése)



82. ábra: Az XRF mérés során, a mintákban mért Ba- és Rb-tartalom (ppm), valamint a Rietveld-illesztés során meghatározott 10Å csillámtartalom (tömeg%) logaritmusos skálán ábrázolva (a szerző saját szerkesztése)

9.3. KRISTÁLYOSODÁSI FOLYAMATOK

A különböző lelőhelyekről származó mintákban a grafit eltérő morfológiával, nagyságban és rendezettségi szerkezettel volt megfigyelhető (néha egy mintán belül is). Ez főként függ a rendelkezésre álló szerves anyag mennyiségétől és eloszlásától a kőzetben, valamint a grafitosodást okozó deformációs (nyírási) hatásoktól (Buseck és Beyssac, 2014).

Morfológia alapján hat csoportot lehet megkülönböztetni, amelyeket két fő alaptípusba lehet sorolni: pikkelyes megjelenés (1–3.) és aggregátumos megjelenés (4–6.):

1. Kőzetszínező pikkely (1–20 μm -es nagyságban, a kőzet alapanyagában elszórva, például Dédestapolcsány és Pareng)
2. Nem deformált pikkely (20–100 μm -es nagyságban, például Dédestapolcsány, Szendrőlád, Meszes, Velem, Fertőrákos, valamint 100–1000 μm -es nagyságban Rimakokovánál)
3. Deformált pikkely (kinkesedett, 20–150 μm -es nagyságban, például Szendrő, Meszes, Rakacaszend, valamint 100–800 μm -es nagyságban Parengnél)
4. Szemcsés halmaz (10–30 μm -es nagyságban Meszesnél, valamint 50–300 μm -es nagyságban Fertőrákosnál)
5. Aggregátum (grafitos keverék, 30–300 μm -es nagyságban, például Dédestapolcsánynál grafit-szericit-kvarc, Szendrőládnál grafit-muskovit-kalcit vagy grafit-Ti-Zr keverék)

6. Mikroredő, lencseszerű aggregátum (a 20–50 μm -es nagyságú pikkelyek >300 μm -es nagyságú lemezszerű aggregátumokba rendeződnek, mikroredőket formálnak, például Szendrőlád)

A grafit pikkelyekben (akár deformáltak, akár nem deformáltak) gyakran csillám zárványokat lehetett észlelni, amelyek a SEM-EDX mérések alapján fengitesedett muszkovit és/vagy illit zárványok (Leskóné Majoros et al., 2025b). Ez nem meglepő, ugyanis Kužvart (1984) megállapításai alapján a regionális metamorfózis során képződő grafittelepek esetében a csillámok párhuzamosan össze is nőhetnek a grafit pikkelyekkel.

Ami a grafit kristályosságát, kristályszerkezeti rendezettségét illeti, a Raman-spektroszkópos eredményeket kiegészítik a TEM mérések során kapott eredmények. Ugyanis $\sim 100\text{--}800$ nm-es nagyságú, rendezett kristályszerkezettel rendelkező, széntartalmú, hatszöges megjelenésű, elektrondiffrakciót mutató, idiomorf-hipidiomorf szemcséket lehetett észlelni a dédestapolcsányi, szendrőládi és parengi minták dúsítási kísérleténél kinyert frakciókban.

A dédestapolcsányi „fekete” frakcióban észlelt 400–600 nm-es nagyságú, (ál)hatszöges alakú, idiomorf-hipidiomorf, részleges rendezettséggel rendelkező szemcsék pedig a grafitosodás útjára lépett szerves anyag (Buseck és Beyssac, 2014). Bár már kéntartalmat nem lehetett benne mérni a TEM-EDX mérés során, és makroszkóposan hatszöges megjelenésű, a nagy felbontású TEM felvételen jól megfigyelhető a hullámos, rövidtávon rendezett szerkezetet mutató, gyengén kristályos szerkezet, amely gyűrűs elektrondiffrakciós képet ad (58. ábra).

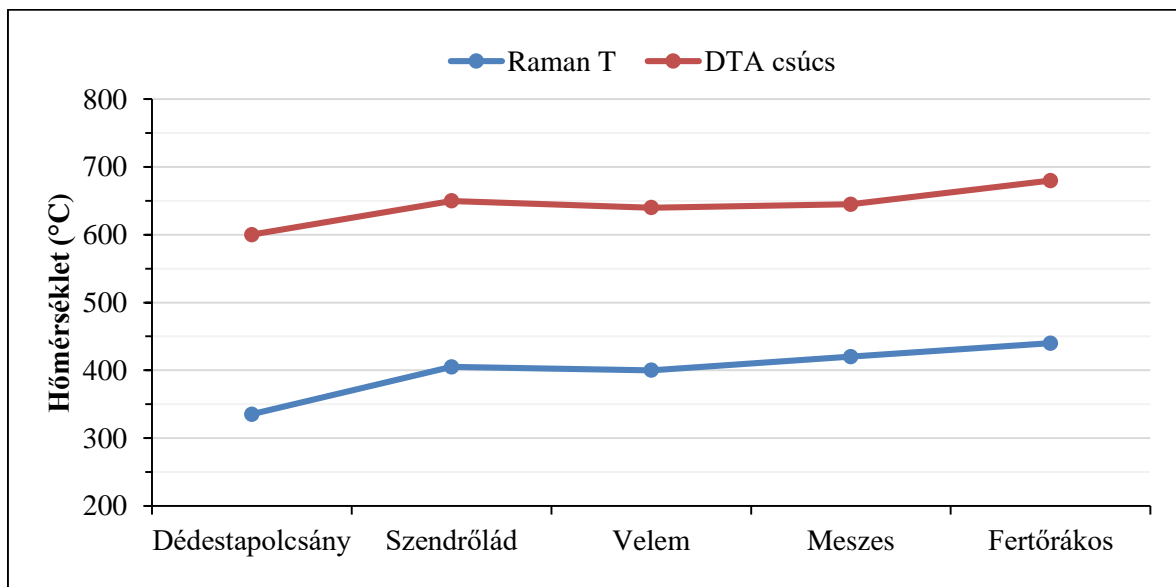
Az optikai megfigyelések, a TEM mérések során észlelték és a Raman-spektroszkópos eredmények alapján lehetővé vált, hogy az egyes lelőhelyeket hordozó formációkat a grafit, grafitos anyag kristályossága alapján sorrendbe lehessen állítani. Ezek alapján a következő sorrendet állítottam fel az általam vizsgált magyarországi minták esetében a kisméretűtől a nagyobb fokú kristályszerkezeti rendezettséget mutató R1 ($R1 = D1 / G$ intenzitás arány) és G_{FWHM} (G-sáv félértékszélessége) kristályossági fok alapján:

1. Tapolcsányi Formáció ($R1=4,34$ és $G_{FWHM}=126$)
2. Szendrőládi Mészke Formáció ($R1=0,94$ és $G_{FWHM}=30$)
3. Kőszegi Metamorfit Komplexum ($R1=0,77$ és $G_{FWHM}=22$)
4. Szendrői Illit Formáció ($R1=0,57$ és $G_{FWHM}=21$)
5. Fertőrákosi Metamorfit Komplexum ($R1=0,44$ és $G_{FWHM}=20$)

Kárpát-övezetbeli kitekintésként, illetve összehasonlításként, a Déli-Kárpátokból a Schela Formáció kőzeteiben található grafitos anyag kristályossági foka (Barzoi, 2015) hasonló a Tapolcsányi Formációban észlelt grafitosodott anyagéhoz. Ugyanis a Schela Formáció kőzeteit kisfokú metamorfózis érte a zöldpala fácies legalacsonyabb részén, amely metakonglomerátumok, metahomokkövek, pirofillit palák, kloritoid palák, antracit-tartalmú kvarcitok és grafit-tartalmú palák képződéséhez vezetett (Mutihac és Popescu, 1982; Barzoi és Guy, 2002). Továbbá a metamorfózisnak el lehet különíteni egy prograd állapotát a nyírási zónákhoz kötődő (Berza et al., 1983) kloritoid-pirofillit-klorit és meta-antracit/pre-grafit paragenézisekkel (Mutihac és Popescu, 1982; Iancu et al., 1984).

Ugyancsak a Déli-Kárpátokból, az általam vizsgált parengi minta kristályosságát tekintve a velemi minta (vagyis a Kőszegi Metamorfit Komplexum) grafitos anyagához hasonló.

Összehasonlítva a magyarországi minták grafit geotermometriával számított képződési hőmérséklet értékeit a termogravimetriai vizsgálatok során kapott DTA csúcshőmérséklet eredményekkel, megállapítható, hogy minél rendezettebb a kristályrács, annál magasabb az oxidációs hőmérséklet (83. ábra).



83. ábra: A grafit geotermometriával számított képződési hőmérséklet értékek és a termogravimetriai vizsgálatok során kapott DTA csúcshőmérséklet eredmények vonaldiagramon ábrázolva (a szerző saját szerkesztése)

Továbbá összevetve a szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott szerves anyag és grafit tartalom arányát, valamint grafit és összes szént tartalmú anyag (szerves anyag és grafit) mennyiségének arányát (LXIII. melléklet), megállapítható, hogy nincs összefüggés sem az egyes lelőhelyek, sem a formációk között, sem a metamorfózis fokával nincsenek kapcsolatban. Ez valószínűleg a minták heterogenitásával magyarázható, vagyis, hogy nincs szabályszerűség a minták szerves anyag és grafit tartalmában.

9.4. KÖZETALKOTÓ ÉS JÁRULÉKOS ÁSVÁNYOK

Az egyes lelőhelyekről származó mintákban számos ásvány megfigyelhető volt a grafit mellett. Ezek közül kiemelném elsőként a muszkovitot (szericitet), amely a dédestapolcsányi, szendrőládi és rimakokovai mintákban V- és Ti-tartalmú (Majoros, 2019), a többi minta esetében pedig Ti-tartalmú, valamint gyakran paragonitosodott, illetve fengitesedett az EDX mérések alapján. A velemi mintákban paragonit is előfordul a muszkovit mellett, amely szintén Ti-tartalmú. A muszkovitok V-tartalmáról a 9.2. alfejezetben már részletesebben írtam.

Szintén minden minta tartalmaz (kivéve a rimakokovai múzeumi példány) TiO_2 -ot, amely az optikai megfigyelések, valamint az XRD eredmények alapján anatáz és rutil. A dédestapolcsányi mintákban észlelt TiO_2 -ok Nb- és V-tartalmúak, a szendrőládi, szendrői, meszesi, rakacaszendi és parengi mintákban megfigyelt TiO_2 -ok pedig Nb-tartalmúak az EDX mérések alapján. Ilmenit egyedül a meszesi mintákban volt megfigyelhető kis mennyiségben.

Bár a zöldpala fáciesben az ilmenit lenne a domináns ásvány a fázisdiagram alapján (Oalman et al., 2011), Luvizotto et al. (2009) ezt úgy magyarázzák, hogy egy progresszív metamorfózis során, a kezdetben Ti- és Nb-hordozó ilmenit a metamorfózis előrehaladtával bontódni kezd. Az ilmenit helyére polikristályos rutil növekszik, amely szerkezetébe Nb épül be. Az ilmenit bontódásából felszabaduló Fe-tartalom (és kis mennyiségben a Ti-tartalom is) pedig a környező rétegszilikátokba épül be, kloritot és (Ti-tartalmú) fengitet eredményezve (Luvizotto et al., 2009). Ezeket a megfigyeléseket az EDX méréseink is alátámasztják.

A dédestapolcsányi mintákban észlelt, különböző elem-összetételű APS (alumínium-foszfát-szulfát) ásványok feltehetően másodlagos folyamatok során képződhettek (a vanádium ekkor épülhetett be a szerkezetükbe), amelyekhez az elsődleges foszfátok adhatták a foszfort (Majoros, 2017). APS-ásványok megjelenése grafit mellett nem meglepő jelenség,

viszont Dill (2001) szerint inkább az U- és RFF-tartalmú woodhouseit-crandallit sorokhoz tartoznak a megfigyelt APS-ásványok.

A szendrőládi, szendrői, rakacaszendi és velemi mintákban megfigyelt RFF-karbonát ásványok (bastnäsit-(Ce)-parisit-(Ce), bastnäsit-(Ce)-parisit-(La), illetve bastnäsit-(Ce)-bastnäsit-(La) elegykristályok) az EDX mérések alapján La-, Nd-, Gd-, Th- és U-tartalmúak, és a szendrőládi minták esetében (Majoros, 2018) gyakran kémiai zónásságot is mutatnak. Ezek az észlelt RFF-karbonát ásványok vagy diagenetikus vagy alacsony hőmérsékletű hidrotermás eredetűek.

További RFF-tartalmú ásványként megfigyelhető volt még a mintákban xenotim (Dédestapolcsány, Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Velem), monacit-(Ce) (Dédestapolcsány, Szendrőlád, Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Velem, Fertőrákos, Rimakokova), és allanit (Szendrőlád, Szendrő, Velem). A RFF-ek forrása nem tisztázott, valószínűleg szerves anyag eredetű, de kicsapódásuk szerkezeti elemekhez kötött és fluidumok jelenlétére utal.

Végül a járulékos ásványok közül megemlíteném még a parengi mintában megfigyelhető jarositot (jarositos póruskitöltő halmazokat), amely valószínűleg pirit mállásából képződött (Majoros, 2019), valamint a fluorapatitot (Szendrőlád, Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Velem), amely néha Sr-tartalmú és monacittal gyakran összenőve található.

9.5. LELŐHELYRŐL ÚJ ÁSVÁNY LEÍRÁS

Az Upponyi-hegységből elsőként írtam le goyazit-gorceixit összetételű elegysort a dédestapolcsányi mintákból az EDX mérések alapján (Majoros, 2017). A Szendrői-hegységből (Szendrőládról) szintén elsőként írtam le molibdenit ásványt, valamint bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegysort (Majoros et al., 2022). A Kőszegi-hegységből ugyancsak új ásványként írtam le allanitot, valamint bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegysort a velemi mintákból az EDX mérések alapján. Ezeket az ásványokat eddig nem ismerték ezekről a területekről (Szakáll et al., 2016).

Korábban Demény (1986) optikai mikroszkópos vizsgálattal mutatott ki apatitot Velem környékéről (Kőszegi-hegység), azonban az EDX méréseim során pontosítani tudtam, hogy minden apatit fluorapatit.

9.6. GAZDASÁGFÖLDTANI ÉRTÉKELÉS

A grafit gazdaságföldtani értékeléséhez figyelembe kell venni a szemcseméretét (felhasználás szempontjából fontos), a kőzetekben lévő mennyiségét, valamint a kinyerhetőségét.

A nyersanyag kereskedelem osztályozása szerint (Mitchell, 1993) az általam vizsgált mintákban lévő grafit két kategóriába sorolható be:

1. „Amorf” (kriptokristályos, szemcsék $<70\ \mu\text{m}$): a dédestapolcsányi és parengi minták mátrixában elszórt, 1–20 μm -es, közetszínező pikkelyes grafit (Majoros, 2019); a szendrőládi mintákban észlelt 20–50 μm -es pikkelyek (Majoros et al., 2022); 10–50 μm -es pikkelyek a meszesi (Leskóné Majoros et al., 2021), velemi és fertőrákosi (Leskóné Majoros et al., 2025a) mintákban.
2. „Lemezes-pikkelyes grafit” (finomszemcsés 70–150 μm -es és durvaszemcsés $>150\ \mu\text{m}$ pikkelyek): dédestapolcsányi, szendrői, meszesi (Leskóné Majoros et al., 2021), rakacaszendi, fertőrákosi (Leskóné Majoros et al., 2025a), rimakokovai és parengi mintákban észlelt $>70\ \mu\text{m}$ -es grafit pikkelyek.

Ami a grafit mennyiségét illeti, erre a szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatokból és a Rietveld-illesztéssel számolt grafittartalmakból lehet következtetni. Ezek együttes használata jó becslést ad ugyanis a mintákban lévő szerves és grafitosodott anyag mennyiségéről (Majoros et al., 2022). Összevetve a két módszerrel kapott eredményeket (LXIV. melléklet), megállapítható, hogy $\sim 2\text{--}3$ tömeg%-os eltéréssel hasonló eredmények születtek. A különbséget egyrészt a röntgenamorf szénformák (pl. vitrinit) adhatják (Majoros et al., 2022), másrészt $26^\circ\text{--}27^\circ(2\theta)$ érték közötti átlapoló kvarc és muszkovit csúcsok okozta többértelműség, amely nem teszi lehetővé a grafit egyértelmű kvantifikálását a Rietveld-illesztés során.

A magyarországi mintákat tekintve mindenhol ~ 5 tömeg%-nál kisebb a grafit, grafitosodott anyag mennyisége. A szendrőládi Helle-patak menti feltárásból származó mintákban azért látszólag több, mert a savazott minták kerültek termogravimetriai vizsgálatra. Azonban visszaszámolható az eredeti, savazatlan mintákra a grafit mennyisége a 2. táblázat eredményeit felhasználva. Így az SZL-1A minta grafitartalma 0,95 tömeg%, az SZL-1B minta grafitartalma 1,47 tömeg%, az SZL-1C minta grafitartalma pedig 1,14 tömeg%. Ezek az eredmények összhangban vannak a Rietveld-illesztés során kapott eredményekkel (XLIV. melléklet).

A grafit hidrofób természetét kihasználva viszont fel lehetett dúsítani a mintákat ~10 tömeg%-os grafit tartalomra. Ennek az eredményét mutatja be az 5. táblázat.

5. táblázat: Összefoglaló táblázat a mintákban lévő eredeti grafit tartalomról (Rietveld-illesztéssel számolt), a dúsítási kísérlet során kinyert frakció grafit tartalmáról (Rietveld-illesztéssel számolt), valamint a dúsítás mértékéről (a szerző saját szerkesztése)

Minta	Eredeti grafit tartalom [tömeg%]	Kinyert frakció [tömeg%]	Dúsulás mértéke [-]
DTAP 2/1	2,1	10,1	4,8
SZL-1A	2,2	10,3	4,7
M-3B	2,7	7,9	2,9
VT-9/2	0,3	8,3	33,2
FR-2	5,7	7,6	1,3

Az általam vizsgált hazai lelőhelyek átlagos ~2–5 tömeg%-os grafit tartalma a jelenlegi technológiával nem tekinthető gazdaságosan kinyerhetőnek. Ráadásul a grafitban jelentkező kevés kéntartalom (például a dédestapolcsányi és szendrőládi minták esetében; Majoros, 2019), illetve a grafitban zárványként megfigyelhető meddő ásványok (például csillámok a meszesi mintánál; Leskóné Majoros et al., 2025b) csökkentik a grafit tisztaságát, amely a felhasználás szempontjából fontos (Jara et al., 2019). Azonban a grafit jelenléte a kőzetekben és dúsíthatósága a jövőben felértékelődhet. Kárpát-övezetbeli kitekintésként jó példa erre a hasonló genetikájú rimakokovai grafittelep, amelynek átlagos grafit tartalma 3,4% körüli, de flotációval könnyen dúsítható 85%-ra, és jelenleg a becsült készleteket potenciálisan gazdaságosnak tekintik (Zuberec et al., 2005). Bár más genetikájú a kanadai Zenyatta grafittelep, de annak is az átlagos grafit tartalma 2–4% körüli, és kb. 20 Mt-ra becsülik a készleteket (Conly és Moore, 2015).

Az XRF és ICP-MS eredményeket tekintve azonban jelentősnek mondható a szendrőládi, meszesi, rakacaszendi és veleimi minták TiO_2 értéke (>1 tömeg%), valamint a dédestapolcsányi, szendrőládi, szendrői, veleimi és fertőrákosi minták V-tartalma (~200–1000 ppm). Ezekon kívül említésre méltó még a dédestapolcsányi minták magas Ba-tartalma (1200–1700 ppm), valamint a szendrőládi és szendrői minták emelkedett RFF-tartalma (>200 ppm). A mai nyersanyagpolitikai viszonyokat tekintve, a területek jövőbeni nyersanyagföldtani potenciálja felértékelődhet.

10. TÉZISEK

1) Röntgen-pordiffrakciós vizsgálatokhoz kapcsolódó új eredmények:

- a) Megállapítottam, hogy az általam vizsgált magyarországi potenciálisan grafit tartalmú minták átlagkövet röntgen-pordiffrakciós vizsgálata során nem lehet egyértelműen kimutatni a grafitot (átlapoló csúcsok, kitüntetett orientáció és kis mennyisége miatt). A grafit tartalom meghatározásához Rietveld-illesztés szükséges, de optikai mikroszkópia és Raman-spektroszkópia, valamint termogravimetria nélkül nem oldható meg.
- b) A Rietveld-illesztés során, míg egy egyszerű alapanyagban, például kalcit esetén (ahol nincs csúcsátfedés), a mintában lévő grafit tartalom kimutatási határa körülbelül 0,5 tömeg% lehet, addig kvarc alapanyagban ez az érték ~1 tömeg%. Ezzel szemben egy összetettebb mintában, amely filloszilikátokat és kvarcot is tartalmaz, akár ~5 tömeg% is lehet a grafit kimutatási határa (Leskóné Majoros et al., 2025b).

2) A Raman-spektroszkópos eredmények alapján, meghatároztam grafit geotermometriával a grafit átlagos képződési csúcshőmérsékletét Beyssac et al. (2002) és Aoya et al. (2010) formuláit alkalmazva. A számolt átlagos képződési hőmérséklet:

- a) az Upponyi-hegység területéről (Dédestapolcsány, Rágyincs-völgy): ~335 °C (± 50 °C),
- b) a Szendrői-hegység területéről (Szendrölád és Meszes): ~405 °C (± 50 °C) (Majoros et al., 2022) és ~420 °C (± 50 °C) (Leskóné Majoros et al., 2025b),
- c) a Kőszegi-hegység területéről (Velem): ~400 °C (± 50 °C),
- d) a Soproni-hegység területéről (Fertőrákos): ~440 °C (± 50 °C) (Leskóné Majoros et al., 2025a).

3) A grafit morfológiájához kapcsolódó megállapításaim:

- a) A grafit morfológiája és szöveti bélyegei alapján két alaptípust határoztam meg az általam vizsgált magyarországi mintákat tekintve:
 - Pikkelyes megjelenés: közetszínező pikkely (1–20 μm -es nagyságban, a közet alapanyagában elszórva, Dédestapolcsány), nem deformált pikkely (20–100 μm -es nagyságban, például Dédestapolcsány, Szendrölád, Meszes, Velem, Fertőrákos), valamint deformált pikkely (kinkesedett, 20–150 μm -es nagyságban, például Szendrő, Meszes, Rakacaszend).

- Aggregátumos megjelenés: szemcsés halmaz (10–30 μm -es nagyságban Meszesnél, valamint 50–300 μm -es nagyságban Fertőrákosnál), aggregátum (grafitos keverék, 30–300 μm -es nagyságban, például Dédestapolcsányánál grafit-szericit-kvarc, Szendrőládnál grafit-muszkovit-kalcit vagy grafit-Ti-Zr keverék), valamint mikroredő, lencseszerű aggregátum (a 20–50 μm -es nagyságú pikkelyek >300 μm -es nagyságú lemezszerű aggregátumokba rendeződnek, mikroredőket formálnak, például Szendrőlád).
- b) Magyarországi lelőhelyről (Szendrőlád, Helle-patak, Szendrői-hegység) először találtam és írtam le hexagonális dipiramisos morfológiájú grafitot.
- 4) A magyarországi lelőhelyekről származó minták esetében megállapítottam, hogy az általam vizsgált kőzetekben található grafit a metamorfózissal szingenetikus képződésű; a grafit regionális metamorfózis során, nyírozónákban keletkezett.
- 5) A grafit kristályszerkezeti rendezettségét érintő megállapításaim:
- a) Sorrendbe állítottam a magyarországi formációkat a bennük található grafitosodott anyag $R1$ ($R1=D1/G$ intenzitás arány) és G_{FWHM} (G-sáv félértékszélessége) kristályosság foka alapján. A kisméretűtől a nagyobb méretű kristályszerkezeti rendezettséget mutatva az alábbi sorrendet állapítottam meg:
- Tapolcsányi Formáció ($R1=4,34$ és $G_{FWHM}=126$)
 - Szendrőládi Mészke Formáció ($R1=0,94$ és $G_{FWHM}=30$)
 - Kőszegi Metamorfit Komplexum ($R1=0,77$ és $G_{FWHM}=22$)
 - Szendrői Fillit Formáció ($R1=0,57$ és $G_{FWHM}=21$)
 - Fertőrákosi Metamorfit Komplexum ($R1=0,44$ és $G_{FWHM}=20$)
- b) Megállapítottam a grafit geotermometriával számított képződési hőmérséklet értékek és a termogravimetriai vizsgálatok során kapott DTA csúcshőmérséklet eredmények alapján, hogy a magyarországi mintákban található grafitnak minél rendezettebb a kristályrácsa, annál magasabb az oxidációs hőmérséklete.
- 6) Meghatároztam, hogy a grafithez társult kritikus elemeket hordozó ásványok közül a TiO_2 fázisok (>1 tömeg%), helyettesítő elemként pedig a V dúsulása jelentős (~200–1000 ppm) az általam vizsgált mintákban. A nyomelemtartalom értelmezésével az alábbi geokémiai trendeket észleltem:
- A dédestapolcsányi, szendrőládi, parengi és rimakokovai mintáknál kiemelkedően magas a V-tartalom. Utóbbinál ez okozza a muszkovitok makroszkóposan is megfigyelhető világoszöld színét (Majoros, 2019).

- A mintákban a magas vanádium-tartalmat nem kíséri jelentős króm dúsulás. Bár a SEM-EDX mérések során egyetlen króm-tartalmú fázist sem sikerült azonosítanom, azonban megfigyeltem, hogy a minták Cr-tartalma hasonló tendenciát mutat a V-tartalommal.
- 7) Magyarországi lelőhelyről új ásvány leírás:
- a) Az Upponyi-hegységből elsőként írtam le goyazit-gorceixit összetételű elegysort a dédestapolcsányi mintákból (Majoros, 2017).
 - b) A Szendrői-hegységből (Szendrőládról) elsőként írtam le molibdenit ásványt, valamint bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegysort (Majoros et al., 2022).
 - c) A Kőszegi-hegységből új ásványként írtam le allanitot, valamint bastnäsit-(Ce) és bastnäsit-(La) elegysort a velemi mintákból. Korábban Demény (1986) optikai mikroszkópos vizsgálattal mutatott ki apatitot erről a területről, de a SEM-EDX méréseim során pontosítani tudtam, hogy minden apatit fluorapatit.
- 8) Az általam vizsgált magyarországi lelőhelyekről származó grafit nyersanyag kereskedelmi osztályozását elvégeztem Mitchell (1993) alapján. Az alábbi kategóriákba tudtam besorolni a mintákban észlelt grafit szemcséket:
- „Amorf” (kriptokristályos, szemcsék $<70 \mu\text{m}$): a dédestapolcsányi minták alapanyagában elszórt, 1–20 μm -es, közetszínező pikkelyes grafit (Majoros, 2019); a szendrőládi mintákban észlelt 20–50 μm -es pikkelyek (Majoros et al., 2022); 10–50 μm -es pikkelyek a meszesi (Leskóné Majoros et al., 2021), velemi és fertőrákosi (Leskóné Majoros et al., 2025a) mintákban.
 - „Lemezes-pikkelyes grafit” (finomszemcsés 70–150 μm -es és durvaszemcsés $>150 \mu\text{m}$ pikkelyek): dédestapolcsányi, szendrői, meszesi (Leskóné Majoros et al., 2021), rakacaszendi és fertőrákosi (Leskóné Majoros et al., 2025a) mintákban észlelt $>70 \mu\text{m}$ -es grafit pikkelyek.
- 9) Elvégeztem a vizsgált magyarországi lelőhelyek esetében a grafit dúsíthatósági kísérletét. A kísérlet sikeres volt, a mintákban lévő grafit tartalmat átlagosan 3–5-szörösére tudtam dúsítani a grafit hidrofób természetét kihasználva.

11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretném kifejezni köszönetem konzulensemnek, Dr. Kristály Ferencnek, hogy végig segített a doktori kutatásom alatt. Köszönöm az élménydús terepbejárásokat, a labormunkákhoz adott hasznos tanácsokat, a műszeres vizsgálatok során nyújtott segítségét, valamint a kiértékeléseknél és az eredmények értékelésénél a hasznos észrevételeket. Köszönöm rendkívül alapos munkáját, bizalmát, és hogy bármilyen kérdéssel nyugodtan fordulhattam hozzá. Hálás vagyok az elmúlt 6 év közös munkájáért.

Köszönöm Dr. Szakáll Sándornak, hogy már az MSc tanulmányaim alatt is bármikor fordulhattam hozzá. Köszönettel tartozom hasznos tanácsaiért és témavezetéséért a 2017-es és 2018-as TDK dolgozatomnál, valamint a 2019-es diplomamunkámnál, mert ezek adták a kiindulópontjait a PhD kutatásomnak.

Köszönöm Tóth Szabolcsnak, hogy kétszer is elvitt minket Dédestapolcsányba, és hogy építő ötleteivel végig támogattott a munkám során. Köszönöm Dr. Németh Norbertnek a szerkezetföldtani észleléseknél, a mért adatok feldolgozásánál, illetve a dédestapolcsányi földtani értelmezésnél nyújtott segítségét.

Hálás vagyok Bulátkó-Debus Déliának a gondos felügyeletéért a tanszéki laboratóriumban végzett minta-előkészítések során. Köszönöm Dr. Móricz Ferencnek az XRF mérési eredményeket, illetve Halyag Nórának a SEM-EDX mérések során nyújtott segítségét. Továbbá köszönöm Dr. Vanyorek László és Dr. Sikora Emőke segítségét az ultrahangos homogenizátor alkalmazásánál. Köszönöm Karacs Gábornak a TEM méréseket, Koós Tamásnak a termogravimetriai méréseket, valamint Dr. Fintor Krisztiánnak a Raman-spektroszkópos méréseket.

Továbbá szeretném megköszönni az intézet összes dolgozójának, hogy végig támogattak engem és a munkámat.

Végül szeretném megköszönni a családomnak, elsősorban a szüleimnek, a bátyámnak, a férjemnek és a kisfiámnak, hogy végig támogattak engem ezen az úton. Köszönöm végtelen szeretetüket, türelmüket és gondoskodásukat. Külön köszönöm férjemnek, Máténak, hogy aktívan segített a terepbejárásoktól kezdve, a labormunkákon és SEM-EDX méréseken át, egészen az eredmények kiértékeléséig. Köszönöm továbbá hasznos és építő tanácsait.

12. IRODALOMJEGYZÉK

- Akçay M., Özkan H. M., Spiro B., Wilson R. és Hoskin P. W. O. (2003): Geochemistry of a high-T hydrothermal dolostone from the Emirli (Ödemiş, western Turkey) Sb–Au deposit. *Mineralogical Magazine*, 67, 671–688.
- Akçay M., Özkan H. M., Moon C. J. és Spiro, B. (2006): Geology, mineralogy and geochemistry of the gold-bearing stibnite and cinnabarite deposits in the Emirli and Haliköy areas (Ödemiş, Izmir, West Turkey). *Ore Geology Review*, 29, 19–51.
- Allwood C. A., Walter M. R. és Marshall C. P. (2006): Raman spectroscopy reveals thermal palaeoenvironments of c.3.5 billion-year-old organic matter. *Vibrational Spectroscopy*, 41, 190–197.
- Aoya M., Kouketsu Y., Endo S., Shimizu H., Mizukami T., Nakamura D. és Wallis S. (2010): Extending the applicability of the Raman carbonaceous material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 28, 895–914.
- Árkai P. (1977): Low-grade metamorphism of Paleozoic sedimentary formations of the Szendrő Mts. (NE-Hungary). *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 21, 53–80.
- Árkai P. (1983): Very low- and low-grade Alpine regional metamorphism of the Paleozoic and Mesozoic formations of the Bükkium, NE-Hungary. *Acta Geologica Hungarica*, 26 (1–2), 83–101.
- Árkai P. (1991): Chlorite crystallinity: an empirical approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Palaeozoic and Mesozoic rocks of northeast Hungary. *Journal of Metamorphic Geology*, 9, 723–734.
- Árkai P., Horváth Z. A. és Tóth M. (1981): Transitional very low- and low-grade regional metamorphism of the Paleozoic formations, Uppony Mountains, NE-Hungary: mineral assemblages, illite-crystallinity and – bo and vitrinite reflectance data. *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 24, 265–294.
- Babinszki E., Piros O., Budai T., Gyalog L., Halász A., Király E., Koroknai B., Lukács R. és M. Tóth T. (szerk.) (2023): Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása I. Prekainozoos képződmények. Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, 275 p.

- Bačo P., Bačová Z., Németh Z. és Repčiak M. (2015): 5. Potential Occurrence of Selected, Mainly Critical Raw Materials at the Territory of the Slovak Republic in Respect to EU Countries Needs. *Slovak Geological Magazine*, 15, 87–120.
- Baludikay B., François C., Sforza M., Beghin J., Cornet Y., Storme J., Fagel N., Fontaine F., Littke R., Baudet D., Delvaux D. és Javaux E. (2018): Raman microspectroscopy, bitumen reflectance and illite crystallinity scale: comparison of different geothermometry methods on fossiliferous Proterozoic sedimentary basins (DR Congo, Mauritania and Australia). *International Journal of Coal Geology*, 191, 80–94.
- Barrenechea J. F., Rodas M. és Arche A. (1992): Relation between graphitization of organic matter and clay mineralogy, Silurian black shales in central Spain. *Mineralogical Magazine*, 56, 477–485.
- Barzoi S. C. (2015): Shear stress in the graphitization of carbonaceous matter during the low-grade metamorphism from the northern Parang Mountains (South Carpathians) – Implications to graphite geothermometry. *International Journal of Coal Geology*, 146, 179–187.
- Barzoi S. C. és Guy B. (2002): Role of metamorphic strain in the crystallinity of graphite: the example of the graphitic schists from the Lotru valley (Carpathians, Romania). *Comptes Rendus Geoscience*, 334, 89–95.
- Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N., Wedell R. és Wolff H. (szerk.) (2006): *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Springer Berlin, Heidelberg, pp. 863.
- Beny-Bassez C. és Rouzaud J. N. (1985): Characterization of carbonaceous materials by correlated electron and optical microscopy and Raman microspectroscopy. *Scanning Electron Microscopy*, 1, 119–132.
- Bercia I., Krautner H. G. és Muresan M. (1976): Pre-Mesozoic Metamorphites of the East Carpathians. *Anuarul Institutului de Geologie si Geofizica, Bucharest*, 50, 37–70.
- Berza T. (1978): Studiul mineralogic si petrografic al masivului granitoid de Tismana. *Anuarul Institutului de Geologie si Geofizica*, 53, 5–176.
- Berza T., Krautner H. és Dimitrescu R. (1983): Nappe structure in the Danubian window of the Central South Carpathians. *Anuarul Institutului de Geologie si Geofizica*, 60, 31–39.
- Beyssac O., Goffé B., Chopin C. és Rouzaud J. N. (2002): Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 859–871.

- Beysac O., Pattison D. R. M. és Bourdelle F. (2019): Contrasting degrees of recrystallization of carbonaceous material in the Nelson aureole, British Columbia and Ballachulish aureole, Scotland, with implications for thermometry based on Raman spectroscopy of carbonaceous material. *Journal of Metamorphic Geology*, 37, 71–95.
- Bodoky T., Kummer I., Kloska K., Fancsik T. és Hegedűs E. (2004): A Magyarmecskői tellurikus vezetőképesség-anomália: eltemetett meteoritkráter? *Magyar Geofizika*, 45 (3), 96–100.
- Bonijoly M., Oberlin M. és Oberlin A. (1982): A possible mechanism for natural graphite formation. *International Journal of Coal Geology*, 1, 283–312.
- Bowles J. F.W. (2021): Oxides. In: Alderton D. és Elias S. A. (szerk.): *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. Academic Press, 428–441.
- Breit G. N. és Wanty R. B. (1991): Vanadium accumulation in carbonaceous rocks: A review of geochemical controls during deposition and diagenesis. *Chemical Geology*, 91, 83–97.
- Brumsack H. J. (1983): A note on Cretaceous black shales and recent sediments from oxygen deficient environments: Paleooceanographic implications. In: Sucss, E., Theide, J. (szerk.): *Coastal Upwelling, Its Sedimentary Record, Part A*. Plenum Press, New York, N.Y., 471–483.
- Brumsack H. J. és Gieskes J. M. (1983): Interstitial water trace-metal chemistry of laminated sediments from the Gulf of California, Mexico. *Marine Chemistry*, 14, 89–106.
- Brumsack H. J. és Lew M. (1982): Inorganic geochemistry of Atlantic Ocean sediments with special reference to Cretaceous black shales. In: U. von Rad, K. Hinz, M. Sarnthein, E. Seibold (szerk.): *Geology of the Northwest African Continental Margin*. Springer-Verlag, New York, N.Y., 661–685.
- Bugge J. A. W. (1978): Norway. In: Bowie, S. H. U., Kvalheim, A., Haslam, H. W. (szerk.): *Mineral Deposits of Europe, Vol. I, Northwest Europe*. Institute of Materials, Minerals and Mining, London, 199–249.
- Buseck P. R. és Huang Bo-Jun (1985): Conversion of carbonaceous material to graphite during metamorphism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2003–2016.
- Buseck P. R. és Beysac O. (2014): From organic matter to graphite: Graphitization. *Elements*, 10, 421–426.
- Bustin R. M., Ross J. V. és Rouzaud J. N. (1994): Experimental evidence for the mechanisms of graphite formation from an anthracite – a STEM investigation. *Proceedings of the International Symposium on Coal and Organic Petrology, Fukuoka*.

- Carraro F. és Charrier G. (1972): Paleontological evidence for the late Carboniferous age of the volcano detrital cover of the “micascisti eclogitici” (Sesia-Lanzo Zone Western Alps). *Bollettino della Società geologica italiana*, 91, 185–194.
- Chehreh Chelgani S., Rudolph M., Kratzsch R., Sandmann D. és Gutzmer J. (2016): A review of graphite beneficiation techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37 (1), 58–68.
- Chen S., Wu D., Liu G. és Sun R. (2017): Raman spectral characteristics of magmatic – contact metamorphic coals from Huainan Coalfield, China. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 171, 31–39.
- Childress L. B. és Jacobsen S. D. (2017): High-pressure high-temperature Raman spectroscopy of kerogen: Relevance to subducted organic carbon. *American Mineralogist*, 102, 391–403.
- Ciulavu M., Mahlmann R. F., Schmid S. M., Hofmann H., Seghedi A. és Frey M. (2008): Metamorphic evolution of a very low-to low-grade metamorphic core complex (Danubian window) in the South Carpathians. In: Siegesmund, S., Fugenschuh, B., Froitzheim, N. (szerk.): *Tectonic Aspects of the Alpine-Dinaride-Carpathian System*. Geological Society, London, Special Publications, 298, 281–315.
- Conly A. G. és Moore L. C. (2015): Geology, ore characteristics, and origin of the Albany graphite deposit. In: Simandl, G. J., Neetz, M. (szerk.): *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper, 2015-3, 173–185.
- Coveney R. M. Jr., Leventhal J. S., Glascock M. D. és Hatch J. R. (1987): Origins of metals and organic matter in the Mecca Quarry Shale Member and stratigraphically equivalent beds across the midwest. *Economic Geology*, 82, 915–933.
- Coveney R. M. Jr. és Nansheng C. (1991): Ni–Mo–PGE–Au rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States. *Mineralium Deposita*, 26, 83–88.
- Cuesta A., Dhamelincourt P. és Laureyns J. (1994): Raman microprobe studies on carbon materials. *Carbon*, 32, 1523–1532.
- De Boorder H., Zeylmans van Emmichoven M. J. és Privalov V. A. (2006): Distribution of Precambrian iron and gold deposits on the southwestern East European Platform reflected in underlying transcrustal structure and current river systems. *Ore Geology Reviews*, 29, 242–259.

- Demény A. (1986): A Kőszegi-hegység parametamorfitjainak kőzettani-geokémiai vizsgálata. Szakdolgozat, ELTE Kőzettan-Geokémiai Tanszék, Budapest.
- Dickson J. S. (2014): Talga eyes graphene potential. *Industrial Minerals*, 567, 35–36.
- Diessel C. F. K. és Offler R. (1975): Change in physical properties of coalified and graphitized phytoclasts with grade of metamorphism. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1, 11–26.
- Diessel C. F. K., Brothers R. N. és Black P. M. (1978): Coalification and graphitization in high-pressure schists in New Caledonia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68, 63–78.
- Dill H. G. (1986): Metallogenesis of the Early Paleozoic Graptolite Shales from the Graefenthal Horst. *Economic Geology*, 81, 889–903.
- Dill H. G. (2001): The geology of aluminium phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review. *Earth-Science Reviews*, 53, 35–93.
- Dill H. G. (2010): The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100, 1–420.
- Dill H. G., Techmer A., Weber B. és Fuessl M. (2008): Mineralogical and chemical distribution patterns of placers and ferricretes in Quaternary sediments in SE Germany: the impact of nature and man on the unroofing of pegmatites. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 1–24.
- Dobner A., Graf W., Hahn-Winheimer P. és Hirner A. (1978): Stable carbon isotopes of graphite from Bogala Mine, Sri Lanka. *Lithos*, 11, 251–255.
- Downs R. T. és Hall-Wallace M. (2003): The American Mineralogist Crystal Structure Database. *American Mineralogist*, 88, 247–250.
- Erdosh G. (1972): Geology of the Bogala Mine, Ceylon, and the origin of vein-type graphite. *Mineralium Deposita*, 5, 375–382.
- Eskenazy G. M. (1998): Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: an experimental approach. *International Journal of Coal Geology*, 38, 285–295.
- Ferralis N., Matys E. D., Knoll A. H., Hallmann C. és Summons R. E. (2016): Rapid, direct and non-destructive assessment of fossil organic matter via micro-Raman spectroscopy. *Carbon*, 108, 440–449.
- Fogg C. T. és Boyle Jr. E. H. (1987): Flake and high-crystalline graphite availability – market economy countries: a mineral availability appraisal. *US Bureau of Mines*, 9122, 1–40.

- Fonarev V. I. (1985): Experimental study of equilibria involving Fe-Mg solid solutions, geological thermo-baro-oxometry. *Geologický Zborník – Geologica Carpathica*, 36, 597–617.
- Földessy J., Horváth A., Tompa R. és Molnár J. (2013): Grafit. In: Less, Gy. (szerk.): Stratégiai fontosságú ásványi nyersanyagok I. CriticEl Monográfia sorozat 1. Milagrossa Kft., Miskolc, 105–125.
- Földvári M. (1973): Metamorf kőzetek szervesanyag tartalmának vizsgálata derivatográffal szénültési fok szempontjából. *Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1971. évről*, 297–301.
- Földvári M. (2011): Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Budapest: Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary; 2011; vol. 213.
- Földvay G. Z. (1988): Geology of the Carpathian Region. World Scientific Publishing Company, 584 p.
- Furuichi H., Ujiie K., Kouketsu Y., Saito T., Tsutsumi A. és Wallis S. (2015): Vitrinite reflectance and Raman spectra of carbonaceous material as indicators of frictional heating on faults: Constraints from friction experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 424, 191–200.
- Fülöp J. (1994): Magyarország geológiája, Paleozoikum II. Akadémiai Kiadó, Budapest, 9–118.
- Galopin R. és Henry N. F. M. (1972): Microscopic Study of Opaque Minerals. Heffer, Cambridge, 322 p.
- Galvez M. E., Beyssac O., Martinzer I., Benzerara K., Chaduteau C., Malvoisin B. és Malavieille J. (2013): Graphite formation by carbonate reduction during subduction. *Nature Geoscience*, 6, 473–477.
- Ghent E. D. és Stout M. Z. (1981): Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76, 92–97.
- Grew E. S. (1974): Carbonaceous material in some metamorphic rocks of New England and other areas. *The Journal of Geology*, 82, 50–73.
- Gyalog L. (2005): Magyarázó Magyarország fedett földtani térképéhez (az egységek rövid leírása) 1:100 000. A Magyar Állami Földtani Intézet Térképmagyarázói. Budapest. 35–37.

- Gyalog L. és Síkhegyi F. (sorozatszerk.) (2005): Magyarország földtani térképe, M=1:100 000. A Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, Budapest.
<https://map.hugeo.hu/fdt100/> [Utoljára frissítve: 2025.04.11.]
- Hamilton L. H., Ramsden A. R. és Stephens J. F. (1970): Fossiliferous graphite from Undercliff, New South Wales. *Journal of the Geological Society of Australia*, 17, 31–37.
- Hámorné Vidó M. (2014): Zárójelentés a Felsővadász 1. és Szendrőlád 6. sz. fúrásokban végzett szerves kőzettani vizsgálatok eredményéről a grafit kutatás támogatására. Kutatási jelentés, Kézirat. Miskolci Egyetem.
- He L., Baiquan L., Yidu H., Yabin G., Wei Y., Tong L., Rui W. és Zhanbo H. (2017): Effects of insitu stress on the stability of a roadway excavated through a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, 917–927.
- Hegman N., Pekker P., Kristály F. és Váczi T. (2011): Nanometrológia. Miskolci Egyetem, Miskolc.
- Heier K. S. (1975): The movement of uranium during higher grade metamorphic processes. *Theoretical and Practical Aspects of Uranium Geology: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 291, No. 1381, 413–421.
- Henry D. G., Jarvis I., Gillmore G., Stephenson M. és Emmings J. (2018): Assessing low-maturity organic matter in shales using Raman spectroscopy: Effects of sample preparation and operating procedure. *International Journal of Coal Geology*, 191, 135–151.
- Henry D. G., Jarvis I., Gillmore G. és Stephenson M. (2019a): A rapid method for determining organic matter maturity using Raman spectroscopy: Application to Carboniferous organic-rich mudstones and coals. *International Journal of Coal Geology*, 203, 87–98.
- Henry D. G., Jarvis I., Gillmore G. és Stephenson M. (2019b): Raman spectroscopy as a tool to determine the thermal maturity of organic matter: Application to sedimentary, metamorphic and structural geology. *Earth-Science Reviews*, 198, 102936, pp. 19.
- Hermesz M. (szerk.) (1990): A Szendrői-hegység grafit tartalmú képződményeinek földtani, geofizikai és minőségi vizsgálata. TIT. Nógrád megyei Szervezete Környezetvédelmi és Műszaki Szakszolgálat Munkacsoportja. Jelentés. Kézirat. Országos Földtani és Geofizikai Adattár, Budapest, 200 p.

- Hladíková J. (1988): ABC geochemistry of light elements stable isotopes. Textbook, J. E. Purkyně University, Faculty of Science, 96.
- Hoefs J. (1973): Stable Isotope Geochemistry. Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 135 p.
- Holland H. D. (1979): Metals in black shales – a reassessment. *Economic Geology*, 74, 1676–1679.
- Hou Y., Zhang K., Wang F., He S., Dong T., Wang C., Qin W., Xiao Y., Tang B., Yu R. és Du X. (2019): Structural evolution of organic matter and implications for graphitization in overmature marine shales, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 109, 304–316.
- Iancu V., Udubasa G., Radan S. és Visarion A. (1984): Complex criteria of separating weakly metamorphosed formations. An example: the South Carpathians. *Anuarul Institutului de Geologica si Geofizica*, 64, 51–60.
- Iancu V. és Mărunțiu M., (1994): Pre-Alpine Litho-tectonic Units and Related Shear Zones in the Basement of the Getic-Supragetic Nappes (South Carpathians). *Romanian Journal of Tectonics and Regional Geology*, 75 (2), 87–92.
- Iancu V., Berza T., Seghedi A., Gheuca I. és Hann H. P. (2005): Alpine polyphase tectono-metamorphic evolution of the South Carpathians: A new overview, *Tectonophysics*, 410, 337–365.
- Ion A., Ciobotea-Barbu O. és Birgauanu D. (2017): Geochemistry and mineralogy of uranium in graphite deposit from Catalinul, Baia de Fier, Romania. Conference Paper. https://www.researchgate.net/publication/319456326_Geochemistry_and_mineralogy_of_uranium_in_graphite_deposit_from_Catalinul_Baia_de_Fier_Romania [Utoljára frissítve: 2025.04.10.]
- Ion A., Cosac A. és Ene V. V. (2023): Natural radioactivity level in graphite samples from the Cătălinul deposit, Parâng Mountains, Romania: sources identification and radiological risk assessment. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 84 (3), 245–248.
- Jara A. D., Betemariam A., Woldetinsae G. és Kim J. Y. (2019): Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29 (5), 671–689.
- Jaszczak A., Dimovski S., Hackney S. A., Robinson G. W., Bosio P. és Gogotsi Y. (2007): Micro- and nano-scale graphite cones and tubes from Hackman Valley, Kola Peninsula, Russia. *Canadian Mineralogist*, 45, 379–389.

- Jehlička J. és Beny C. (1999): First and second order Raman spectra of natural highly carbonified organic compounds from metamorphic rocks. *Journal of Molecular Structure*, 480–481, 541–545.
- Jehlička J., Urban O. és Pokorný J. (2003): Raman spectroscopy of carbon and solid bitumens in sedimentary and metamorphic rocks. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 59, 2341–2352.
- Kaneki S., Hirono T., Mukoyoshi H., Sampei Y. és Ikehara M. (2016): Organochemical characteristics of carbonaceous materials as indicators of heat recorded on an ancient plate-subduction fault. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, 2855–2868.
- Kapera A. és Michalik M. (1995): Skaly metamorficzne zawierające grafit w Tatrách Zachodnich. [Graphite-bearing metamorphic rocks of the Western Tatra Mountains]. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne – Prace Specjalne*, 6, 54–56. (in Polish)
- Kavanagh A. és Schlögl R. (1988): The morphology of some natural and synthetic graphites. *Carbon*, 26 (1), 23–32.
- Kenan W. (1991): Annual minerals review. Graphite. *Bulletin of the American Ceramic Society*, 70 (5), 865–866.
- Khatibi S., Ostadhassan M., Tuschel D., Gentzis T. és Carvajal-Ortiz H. (2018): Evaluating molecular evolution of kerogen by Raman spectroscopy: Correlation with optical microscopy and Rock-Eval pyrolysis. *Energies*, 11, 1406.
- Khatibi S., Ostadhassan M., Hackley P., Tuschel D., Abarghani A. és Bubach B. (2019): Understanding organic matter heterogeneity and maturation rate by Raman spectroscopy. *International Journal of Coal Geology*, 206, 46–64.
- Kimber G. és Gray M. (1967): Rapid devolatilization of small coal particles. *Combust Flame*, 11 (4), 360–362.
- Kogel J. E., Trivedi N. C., Barker J. M. és Krukowski S. T. (2006): *Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets and Uses*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 7th edition, 507–518.
- Korikovskij S. P., Dupej J. és Boronichin V. A. (1989): High Fe metasediments from Kokava nad Rimavicou (Veporicum, Central Slovakia). *Mineralia Slovaca*, 21, 251–258. (in Slovak, English summary)
- Kósa L. és Fazekas V. (1981): A fertőrákosi kristályospala összlet földtani-kőzettani felépítése. *Földtani Közlöny*, 111, 424–452.
- Kováčik M. (2003): Petrogenesis of Associated Metaferrolites and Graphitic Metaquartzites (Southern Veporicum Basement, Slovakia). *GeoLines*, 16, 58.

- Kropotova D. I., Milovskij A. V. és Cech F. (1976): Isotopic composition of carbon in some graphites. (In Russian). Vestnik Moskovskogo Universiteta, 2, Moscow, 66–71.
- Kubovics I. (1993): Kőzetmikroszkópia I-II. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Kužvart M. (1984): Industrial minerals and rocks. Elsevier, Prague, 18, 454 p.
- Kübler B. (1967): La cristallinité de l'illite et les zones tout a fait superieures du métamorphisme. In: Étages Tectoniques. Colloque de Neuchâtel 1966, A La Baconnière, Neuchâtel, Switzerland, 105–121.
- Kübler B. (1968): Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité d l'illite. Bulletin du Centre de recherches, Pau – S.N.P.A., 2, 385–397.
- Kübler B. (1984): Les indicateurs des transformations physiques et chimiques dans la diagenèse, température et calorimétrie. In: Lagache M. (szerk.): Thermobarométrie et Barométrie Géologiques. Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, Paris, France, 489–596.
- Kwiecińska B. (1980): Mineralogy of natural graphites. Prace Mineralogiczne, vol. 67. PAN, Kraków, 1–87.
- Kwiecińska B. és Petersen H. I. (2004): Graphite, semi-graphite, natural coke, and natural char classification – ICCP system. International Journal of Coal Geology, 57, 99–116.
- Lahfid A., Beyssac O., Deville E., Negro F., Chopin C. és Goffé B. (2010): Evolution of the Raman spectrum of carbonaceous material in low-grade metasediments of the Glarus Alps (Switzerland). Terra Nova, 22, 354–360.
- Landis C. A. (1971): Graphitization of dispersed carbonaceous material in metamorphic rocks. Contributions Mineralogy Petrology, 30, 34–45.
- Leskóné Majoros L., Leskó M. Zs., Szakáll S. és Kristály F. (2021): Kritikus ásványok és elemek a Szendrői Fillit Formációban (Szendrői-hegység, ÉK-Magyarország), Multidiszciplináris tudományok, 11 (1), 90–97.
- Leskóné Majoros L., Szakáll S. és Kristály F. (2022a): Analysis of critical elements from the Tapolcsány Formation (NE-Hungary). In: Fehér, B., Molnár, K., Lukács, R., Czuppon, Gy., Kereskényi, E. (szerk.): Calce et malleo – Mésszel és kalapáccsal, 12. Kőzettani és Geokémiai Vándorgyűlés, 89–92.
- Leskóné Majoros L., Leskó M. Zs., Fintor K., Szakáll S. és Kristály F. (2022b): Graphite Occurrences in NE-Hungary. In: Szabó N. P. és Virág Z. (szerk.): Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2022. Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 49–56.

- Leskóné Majoros L., Leskó M. Zs., Fintor K., Bulátkó-Debus D., Móricz F., Szakáll S. és Kristály F. (2025a): Analyses of graphite-bearing schists from Fertőrákos, Sopron Mts., NW-Hungary. *Geosciences and Engineering*, 12 (2), 86–97.
- Leskóné Majoros L., Leskó M. Zs., Fintor K., Móricz F., Bulátkó-Debus D., Szakáll S. és Kristály F. (2025b): Accessory graphite in phyllites as indicator of metamorphic grade and stage (Szendrő Mts., NE-Hungary). *Geosystems and Geoenvironment*, 4, 100431.
- Less Gy., Kovács S., Pelikán P., Pentelényi L. és Sásdi L. (2005): A Bükk hegység földtana – Geology of the Bükk Mountains. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Lespade P., Al-Jishi R. és Dresselhaus M. S. (1982): Model for Raman scattering from incompletely graphitized carbons. *Carbon*, 20, 427–431.
- Lewan M. D. (1984): Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel; ratios in crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2231–2238.
- Lexa J., Bezák V., Elečko M., Eliáš M., Konečný V., Less Gy., Mandl G.W., Mello J., Pálenský P., Pelikán P., Polák M., Potfaj M., Radócz Gy., Ryľko W., Schnabel G. W., Stráník Z., Vass D., Vozár J., Zelenka T., Biely A., Császár G., Čtyroký P., Kaličiak M., Kohút M., Kovács S., Mackiv B., Maglay J., Nemčok J.†, Nowotny A., Pentelényi L., Rakús M. és Vozárová A. (2000): Geological map of Western Carpathians and adjacent areas, 1:500 000. Ministry of the Environment of Slovak Republic, Geological Survey of Slovak Republic, Bratislava.
- Lexa J., Bačo P., Hurai V., Chovan M., Koděra P., Petro M., Rojkovič I. és Tréger M. (2007): Vysvetlivky k metalogenetickej mape Slovenskej republiky (Explanatory notes to the metallogenic map of the Slovak Republic). SGIDŠ, Bratislava, 178. (In Slovak).
- Li X., Hayashi J.-I. és Li C.-Z. (2006): FT-Raman spectroscopic study of the evolution of char structure during the pyrolysis of a Victorian brown coal. *Fuel*, 85, 1700–1707.
- Liégeois J. P., Berza T., Tatu M. és Duchesne J. C. (1996): The Neoproterozoic Pan-African basement from the Alpine Lower Danubian nappe system (South Carpathians, Romania). *Precambrian Research*, 80, 281–301.
- Liu D., Xiao X., Tian H., Min Y., Zhou Q., Cheng P. és Shen J. (2013): Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: Methodology and geological applications. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1285–1298.
- Loukola-Ruskeeniemi K. és Heino T. (1996): Geochemistry and genesis of the black shale-hosted Ni–Cu–Zn deposit at Talivaara, Finland. *Economic Geology*, 91, 80–110.

- Lupoi J. S., Hackley P. C., Birsic E., Fritz L. P., Solotky L., Weislogel A. és Schlaegle S. (2019): Quantitative evaluation of vitrinite reflectance in shale using Raman spectroscopy and multivariate analysis. *Fuel*, 254, 115573.
- Luvizotto G. L., Zack T., Triebold S. és von Eynatten H. (2009): Rutile occurrence and trace element behavior in medium-grade metasedimentary rocks: example from the Erzgebirge, Germany. *Mineralogy and Petrology*, 97, 233–249.
- Lünsdorf N. K., Dunkl I., Schmidt B. C., Rantitsch G. és von Eynatten, H. (2014): Towards a Higher Comparability of Geothermometric Data obtained by Raman Spectroscopy of Carbonaceous Material. Part I: Evaluation of Biasing Factors. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 38 (1), 73–94.
- Majoros L. (2017): A dédestapolcsányi grafit ásványtani jellemzése és genetikája. TDK-dolgozat, Miskolci Egyetem, Ásványtani-Földtani Intézet, Miskolc.
- Majoros L. (2018): Grafitos képződmények vizsgálata észak-magyarországi feketepalákban. TDK-dolgozat, Miskolci Egyetem, Ásványtani-Földtani Intézet, Miskolc.
- Majoros L. (2019): Upponyi- és Szendrői-hegységi feketepalákban lévő grafitos anyagok ásvány- és kőzettani vizsgálata, illetve kárpáti kapcsolataik. MSc diplomamunka, Miskolci Egyetem, Ásványtani-Földtani Intézet, Miskolc.
- Majoros L. és Kristály F. (2020): Mineralogical characterization of graphitic materials in black schists from Szendrő Mts (NE-Hungary). *Doktoranduszok Fóruma Szekciókiadvány*, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 29–42.
- Majoros L., Fintor K., Koós T., Szakáll S. és Kristály F. (2022): Metamorphic graphite from Szendrőlád (Szendrő Mts., NE-Hungary) detected by simultaneous DTA-TG. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 3417–3425.
- Manolescu G. (1937): Étude géologique et pétrographique dans les Muntii Vulcan (Carpathes méridionales, Roumanie). *Anuarul Institutului Geologic al Romaniei*, 18, 79–172.
- Maylotte D. H., Wong J., St. Peters R. L., Lytle F. W. és Greeger R. B. (1981): X-ray absorption spectroscopic investigation of trace vanadium sites in coal. *Science*, 214, 554–556.
- Metzger A. A. T. (1954): The Deposit of Crystalline Limestone of Pargas–Parainen. In: Aurola E. (szerk.): *The Mines and Quarries of Finland*. Geological Survey of Finland, Helsinki, 53–58.
- Mitchell C. J. (1993): *Industrial Minerals Laboratory Manual: Flake Graphite*. BGS Technical Report, Keyworth, Nottingham, WG/92/30.

- Miyano T. és Klein C. (1986): Fluid behavior and phase relations in the system Fe-Mg-Si-C-O-H – application to high-grade metamorphism of iron-formations. *American Journal of Science*, 286, 540–575.
- Molnár F. és Szentpéteri K. (2005): *Opak ásványok mikroszkópos vizsgálata*. Hantken Kiadó, Budapest
- Mukoyoshi H., Kaneki S. és Hirono T. (2018): Slip parameters on major thrusts at a convergent plate boundary: Regional heterogeneity of potential slip distance at the shallow portion of the subducting plate. *Earth, Planets and Space*, 70, article number 36.
- Murdoch M. T. (1967): Mineral industry of the Malagasy Republic. US Bureau of Mines, 8196, 112–121.
- Mutihac V. és Popescu G. C. (1982): Sur le caractère anchimétamorphique de la formation de Schela des Carpathes Meridionales centrales. *Revue Roumaine de Géologie, Géophysique et Géographie*, 26, 47–56.
- Norrish K. és Patterson J. H. (1976): Characterization of vanadiferous clays, Julia Creek, Queensland. *International Geological Congress, Abstracts*, 25 (3), 756–757.
- Oalmann J. A. G., Barnes C. G. és Hetherington C. J. (2011): Geology of the island of Ylvingen, Nordland, Norway: Evidence for pre-Scandian (~475 Ma) exhumation in the Helgeland Nappe Complex. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 91, 77–99.
- Očenáš D., Derco J. és Čechovská K. (1992): Slovensko – grafit, štúdia. Záverečná správa, surovina: grafit, vyhl'adávací prieskum, stav k 30.11.1992. *Archive of State Geological Institute of Dionýz Štúr*, Bratislava, 44.
- Olaru L. (2001): New palynological and palynostratigraphical data about black quartzites and graphite schists of the Tulgheş Group (East Carpathians, Romania). *Acta Paleontologica Romaniaae*, 3, 299–307.
- Olson D. W. (2018): Graphite – 2015 (Advance release). U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook – 2015, June 2018, 32.1–32.13. [Utoljára frissítve: 2025.04.10.]
<https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/graphite/myb1-2015-graph.pdf>
- Palache C., Berman H. és Frondel C. (1944): *The system of mineralogy*. Vol I, 7th edition, John Wiley & Sons, New York.
- Pallister H. D. és Thoenen J. R. (1948): Flake-Graphite and Vanadium Investigation in Clay, Coosa and Chilton Counties, Alabama. U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations, 4366, 84 p.

- Panu I. H., Georgescu B. és Oprescu A. (1967): Research Work Regarding the Beneficiation of the Graphite-Bearing Rocks in Ribari and Ungurelu (Polovragi) Areas. *Dari de Seama ale Sedintelor*, 54 (3), 457–493.
- Pasteris J. D. és Wopenka B. (1991): Raman spectra of graphite as indicators of degree of metamorphism. *The Canadian Mineralogist*, 29, 1–9.
- Pawlyta M., Rouzaud J. N. és Duber S. (2015): Raman microspectroscopy characterization of carbon blacks: Spectral analysis and structural information. *Carbon*, 84, 479–490.
- Pecharsky V. K. és Zavalij P. Y. (2003): *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*. Kluwer, Dordrecht.
- Pelikán P., Filipović I., Jovanović D., Sudar M., Protić L., Hips K., Kovács S. és Less Gy.(2006): A Bükk-terrénum (É-Magyarország), a Jadari-terrénum (ÉNy-Szerbia) és a Sana–Unai-terrénum (ÉNy-Bosznia) karbon, perm és triász rétegsorainak összehasonlítása. *Magyar Állami Földtani Intézet Évi jelentése*, 59–75.
- Petro M., Radvanec M., Kováčik M., Mudráková Bezák V., Očenáš D., Tréger M., Mihálik F., Fiľo M. és Lukaj M. (1998): Kokava nad Rimavicou – grafit, vyhl'adávací prieskum, stav k 31.3.1998. (Kokava nad Rimavicou – graphite, a search survey, as of 31.3.1998). Manuscript. Geofond Archive, Bratislava. (In Slovak).
- Premovic P. I. (1984): Vanadyl ions in ancient marine carbonaceous sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 873–877.
- Raincsákné Kosáry Zs. (1978): A Szendrői-hegység devon képződményei. *Geologica Hungarica, Series Geologica*, 18, 1–113.
- Ramdohr P. (1980): *The Ore Minerals and their Intergrowth*. Pergamon, Oxford, UK.
- Rantitsch G., Grogger W., Teichert C., Ebner F., Hofer C., Maurer E. M., Schaffer B. és Toth M. (2004): Conversion of carbonaceous material to graphite within the Greywacke Zone of the Eastern Alps. *International Journal of Earth Sciences*, 93, 959–973.
- Rantitsch G., Lämmerer W., Fisslthaler E., Mitsche S. és Kaltenböck H. (2016): On the discrimination of semi-graphite and graphite by Raman spectroscopy. *International Journal of Coal Geology*, 159, 49–56.
- Rodas M., Luque F. J., Barrenechea J. F., Fernández-Caliani J. C., Miras A. és Fernández-Rodríguez C. (2000): Graphite occurrences in the low-pressure/high-temperature metamorphic belt of the Sierra de Aracena (southern Iberian Massif). *Mineralogical Magazine*, 64, 801–814.

- Romero-Sarmiento M. F., Rouzaud J. N., Bernard S., Deldicque D., Thomas M. és Littke R. (2014): Evolution of Barnett Shale organic carbon structure and nanostructure with increasing maturation. *Organic Geochemistry*, 71, 7–16.
- Rumble D. és Hoering T. C. (1986): Carbon isotope geochemistry of graphite vein deposits from New Hampshire, U.S.A. *Geochemica and Cosmochemica Acta*, 50, 1239–1247.
- Sadasivuni K. K., Ponnamma D., Thomas S. és Grohens Y. (2014): Evolution from graphite to graphene elastomer composites. *Progress in Polymer Science*, 39, 749–780.
- Săndulescu M., Krättner H., Borcos M., Năstăseanu S., Patrulius D., Ștefănescu M., Ghenea C., Lupu M., Savu H., Bercia I. és Marinescu F. (1978): Geological map of Romania, 1:1,000,000. Institute of Geology and Geophysics, Bucharest.
- Satish-Kumar M. és Santosh M. A. (1998): Petrological and fluid inclusion study of calc–silicate–charnockite associations from southern Kerala, India: implications for CO₂ influx. *Geological Magazine*, 135, 27–45.
- Sauerer B., Craddock P. R., Aljohani M. D., Alsamadony K. L. és Abdallah W. (2017): Fast and accurate shale maturity determination by Raman spectroscopy measurement with minimal sample preparation. *International Journal of Coal Geology*, 173, 150–157.
- Savu H. (1970): Structura plutonului granitoid de Susita si relatii le sale cu formatiunile autohtonului danubian (Carpatii Meridionali). *Dări de Seamă ale Ședințelor Institutului Geologic*, 56 (5), 125–153.
- Schito A., Romano C., Corrado S., Grigo D. és Poe B. (2017): Diagenetic thermal evolution of organic matter by Raman spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 106, 57–67.
- Schito A. és Corrado S. (2018): An automatic approach for characterization of the thermal maturity of dispersed organic matter Raman spectra at low diagenetic stages. In: Dowey P., Osborne M., Volk H. (szerk): *Application of Analytical Techniques to Petroleum Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 484, 107–119.
- Schmidt J. L., Hinrichs R. és Araujo C. V. (2017): Maturity estimation of phytoclasts in strew mounts by micro-Raman spectroscopy. *International Journal of Coal Geology*, 173, 1–8.
- Schuster A. C. (1980): *Geologische und petrographische Untersuchungen im Danubikum der Süd Karpaten, Paring-Gebirge, Rumänien*. Ph.D. dissertation. Technische Universität Clausthal, 178.
- Sedlak W. (1973): *U źródeł Nowej Nauki* (in Polish). *Paleobiochemia*, Warszawa. 123 p.
- Seredin V. V. és Finkelman R. B. (2008): Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 76, 253–289.

- Shaw S. (2013): Graphite demand and growth: the future of lithium-ion batteries in EVs and HEVs. Proceedings of 37th ECGA General Assembly.
http://www.saintjeancarbon.com/files/2513/7157/3343/Graphite_demand_Li-ions_April_2013.pdf [Utoljára frissítve: 2019.04.20.]
- Simandl G. J., Paradis S. és Akam C. (2015): Graphite deposit types, their origin, and economic significance. In: Simandl G. J. és Neetz M. (szerk.): Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia, British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, 163–171.
- Solomon P. R., Hamblen D. G., Carangelo R., Serio M. és Deshpande G. (1988): General model of coal devolatilization. *Energy Fuels*, 2 (4), 405–422.
- Soman K., Lobzova R. V. és Sivadas K. M. (1986): Geology, genetic types, and origin of graphite in South Kerala, India. *Economic Geology*, 81, 997–1002.
- Sombathy L. (1949): Ložisko grafi tu Kyjatice – Kadlub. (Graphite deposit Kyjatice – Kadlub). Manuscript, Geofond Archive, Bratislava. (In Slovak).
- Spötl C., Houseknecht D. W. és Jaques R. C. (1998): Kerogen maturation and incipient graphitization of hydrocarbon source rocks in the Arkoma Basin, Oklahoma and Arkansas: a combined petrographic and Raman spectrometric study. *Organic Geochemistry*, 28, 535–542.
- Šuf J. (1938): Report on geological setting and mineral deposits in the surroundings of Kokava in Slovakia. *Věstník Státního geologického ústavu, Praha*: 91–103. (in Czech).
- Stach E., Mackowsky M.-Th., Teichmüller M., Taylor G. H., Chandra D. és Teichmüller R. (1982): Stach's Textbook of Coal Petrology, 3rd ed. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart. 535 p.
- Stadler G., Teichmüller M. és Teichmüller R. (1976): Zur geothermischen Geschichte des Karbons von Manno bei Lugano und de "Karbons" von Falletti (Sesia Zone der Westalpen). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 152, 177–198.
- Stiller A. H., Zondlo J. W. és Stansberry P. G. (1998): Method of producing high quality, high purity, isotropic graphite from coal, USA: US5705139A, January 6, 1998.
- Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023. Final Report. European Commission. doi: 10.2873/725585.
- Syrett L. (2015): The black parade: graphite companies continue to put on a show. *Industrial minerals*, 578, 32–37.
- Szakáll S. (szerk.) (2002): Minerals of the Carpathians. Granit Publ. House, Prague.

- Szakáll S. (2005): Ásványrendszertan. Miskolci Egyetemi Kiadó.
- Szakáll S. és Sajó I. (2003): Volborthite, a hydrous copper-vanadate from phosphate-bearing argillites in Dédestapolcsány, Uppony Mts., N-Hungary. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Geologia, Special Issue*, p. 121.
- Szakáll S., Fehér B. és Tóth L. (2016): Magyarország ásványai. *GeoLitera*, SZTE TTK Földrajzi és Földtudományi Intézet, Szeged.
- Szentpétery I. és Less Gy. (szerk.) (2006): Az Aggtelek–Rudabányai-hegység földtana. Magyarország tájegységi térképsorozata. Magyarázó az Aggtelek–Rudabányai-hegység 1988-ban megjelent 1:25 000 méretarányú fedetlen földtani térképéhez. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Tatarinov P. M. (szerk.) (1969): Textbook of non-metallic mineral deposits. (In Russian). Nedra Moscow, 672 p.
- Taylor S. R. és McLennan S. M. (1985): *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, UK.
- Taylor G. H., Teichmüller M., Davis A., Diessel C. F. K., Littke R. és Robert P. (1998): *Organic Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart. 704 p.
- Tunistra F. és Koenig J. L. (1970): Raman spectrum of graphite. *Journal of Chemical Physics*, 53, 1126.
- United Nations (1999): Geology and minerals resources of Mongolia. *Atlas of mineral resources of the ESCAP region*, 14, 1–192.
- USGS (1985): Baia De Fier. [Utoljára frissítve: 2025.04.10.]
https://mrdata.usgs.gov/mrds/show-mrds.php?dep_id=10024384
- Vodă A. (2000): Sinteza zonei cristalino-mezozoice a Carpaţilor Orientali. Raport Tema V/15-1997, Arh. S.C. „Prospecţiuni” S. A. Bucureşti.
- Wadia D. N. (1943): A brief account of the mineralogy of graphite deposits of Ceylon: a note on the graphite. *Ceylon Department Mineral Resources Professional Paper* 1, 15–24.
- Wang Y., Qiu N., Borjigin T., Shen B., Xie X., Ma Z., Lu C., Yang Y., Yang L., Cheng L., Fang G. és Cui Y. (2018): Integrated assessment of thermal maturity of the Upper Ordovician–Lower Silurian Wufeng–Longmaxi shale in Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 100, 447–465.
- Wanty R. B. (1986): Geochemistry of Vanadium in an Epigenetic Sandstone-Hosted Vanadium-Uranium Deposit, Henry Basin Utah. Ph.D. thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado. (unpublished).

- Wanty R. B., Goldhaber M. B. és Northrop H. R. (1990): Geochemistry of vanadium in an epigenetic, sandstone-hosted vanadium-uranium deposit, Henry basin, Utah. *Economic Geology*, 85, 270–284.
- Warr L. N. (2018): A new collection of clay mineral ‘Crystallinity’ Index Standards and revised guidelines for the calibration of Kübler and Árkai indices. *Clay Minerals*. 53(3), 339–350.
- Wenger L. M. és Baker D. R. (1986): Variations in organic geochemistry of anoxic-oxic black shale-carbonate sequences in the Pennsylvanian of the Midcontinent, U.S.A.. *Organic Geochemistry*, 10, 85–92.
- Wilkins R. W. T., Sherwood N. és Li Z. (2018): RaMM (Raman maturity method) study of samples used in an interlaboratory exercise on a standard test method for determination of vitrinite reflectance on dispersed organic matter in rocks. *Marine and Petroleum Geology*, 91, 236–250.
- Wilks K. R., Mastalerz M., Bustin R. M. és Ross J. V. (1993): The effect of experimental deformation on the graphitization of Pennsylvania anthracite. *International Journal of Coal Geology*, 24, 347–369.
- Winkler H. G. F. (1976): *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer, New York, Heidelberg, Berlin.
- Wopenka B. és Pasteris J. D. (1993): Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: applicability of Raman microprobe spectroscopy. *American Mineralogist*, 78, 533–557.
- Young R. A. (szerk.) (1993): *The Rietveld Method*. Oxford University Press, Oxford.
- Yu X. J. és Qiang L. W. (2012): Preparation for Graphite Materials and Study on Electrochemical Degradation of Phenol by Graphite Cathodes. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2, 63–68.
- Yuman W., Xinjing L., Bo C., Wei W., Dazhong D., Jian Z., Jing H., Jie M., Bing D., Hao W. és Shan J. (2018): Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk. *Petroleum Exploration and Development*, 45, 402–411.
- Zeng Y. és Wu C. (2007): Raman and infrared spectroscopic study of kerogen treated at elevated temperatures and pressures. *Fuel*, 86, 1192–1200.
- Zhang A. (1985): Geochemistry of vanadium in the marine black rock sequence of Yanjaibao. *10th International Congress of Carboniferous Stratigraphy and Geology*, 23, 31–42.

- Zhang C. és Santosh M. (2019): Coupled laser Raman spectroscopy and carbon stable isotopes of graphite from the khondalite belt of Kerala, southern India. *Lithos*, 334–335, 245–253.
- Zhuang X., Querol X., Alastuey A., Juan R., Plana F., Lopez-Soler A., Du G. és Martynov V. V. (2006): Geochemistry and mineralogy of the Cretaceous Wulantuga high-germanium coal deposit in Shengli coal field, inner Mongolia, northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 66, 119–136.
- Zhuravlev A. Yu. és Wood R. A. (1996): Anoxia as the cause of the mid-Early Cambrian (Botomian) extinction event. *Geology*, 24, 311–314.
- Zoubek V. és Nemčok A. (1951): Report on magnetite deposit near Kokava n./Rim. Open-file report, record office GÚDŠ, Bratislava, 13 p. (in Slovak)
- Zuberec J., Tréger M., Lexa J. és Baláž P. (2005): Nerastné suroviny Slovenska (Mineral Resources of Slovakia – English resume). [Utoljára frissítve: 2025.04.10.]
https://www.researchgate.net/publication/279530898_Nerastne_suroviny_Slovenska_Mineral_Resources_of_Slovakia_-_English_resume

13. A DOKTORI TÉMÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK**TUDOMÁNYOS FOLYÓIRAT CIKK**

- Leskóné Majoros L.**, Leskó M. Zs., Szakáll S. és Kristály F. (2021): *Kritikus ásványok és elemek a Szendrői Fillit Formációban (Szendrői-hegység, ÉK-Magyarország)*, *Multidiszciplináris tudományok*, 11 (1), 90–97.
- Majoros L.**, Fintor K., Koós T., Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Metamorphic graphite from Szendrőlád (Szendrő Mts., NE-Hungary) detected by simultaneous DTA-TG*, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 3417–3425.
- Leskóné Majoros L.**, Leskó M. Zs., Fintor K., Bulátkó-Debus D., Móricz F., Szakáll S. és Kristály F. (2025a): *Analyses of graphite-bearing schists from Fertőrákos, Sopron Mts., NW-Hungary*, *Geosciences and Engineering*, 12 (2), 86–97.
- Leskóné Majoros L.**, Leskó M. Zs., Fintor K., Móricz F., Bulátkó-Debus D., Szakáll S. és Kristály F. (2025b): *Accessory graphite in phyllites as indicator of metamorphic grade and stage (Szendrő Mts., NE-Hungary)*, *Geosystems and Geoenvironment*, 4, 100431.

EGYÉB KONFERENCIA KIADVÁNYOK

- Majoros L.**, Kristály F. és Szakáll S. (2018): *Graphite in black schists from Dédestapolcsány (Uppony Mts.), Gadna and Szendrőlád (Szendrő Mts.) in NE-Hungary*. Joint 5th Central-European Mineralogical Conference and 7th Mineral Sciences in the Carpathians Conference, Banská Štiavnica, Slovakia, Book of abstracts, p. 69.
- Majoros L.**, Kristály F. és Fintor K. (2019): *Origin of graphite in black schists from Szendrő Mts (NE-Hungary)*. 1st International Student Conference on Geochemistry and Mineral Deposits, Prague, Czech Republic, Book of abstracts, 33–34.
- Majoros L.**, Kristály F. és Szakáll S. (2019): *ÉK-magyarországi, potenciálisan grafit tartalmú feketepalák vizsgálata*. *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 88 (2), 134–139.
- Majoros L.** és Kristály F. (2020): *Mineralogical characterization of graphitic materials in black schists from Szendrő Mts (NE-Hungary)*. *Doktoranduszok Fóruma Szekciókiadvány*, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 29–42.
- Leskóné Majoros L.**, Karacs G., Koós T. L., Szakáll S. és Kristály F. (2021): *Critical minerals in black schists from Szendrőlád (Szendrő Mts., NE-Hungary)*, *Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series*, Szeged, Vol. 11, p. 26.

- Leskóné Majoros L.**, Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Critical elements from the Tapolcsány Formation (Uppony Mts., NE-Hungary)*. In: Christie, A. B. (szerk.): Proceedings of the 16th SGA Biennial Meeting: The critical role of minerals in the carbon-neutral future. Rotorua, Új-Zéland: Society for Geology Applied to Mineral Deposits, p. 105.
- Leskóné Majoros L.**, Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Comparison of critical mineral and element content of black schists from NE-Hungary*. In: Fouillard G., Farhat M., Haider U. és Boddy M. (szerk.): 13th Annual PDAC-SEG Student Minerals Colloquium – Abstracts, 41–42.
- Leskóné Majoros L.**, Leskó M. Zs., Fintor K., Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Graphite crystallization in shear zones (Szendrő Mts., NE-Hungary)*. In: 23rd Meeting of the International Mineralogical Association (IMA 2022): Abstracts, p. 444.
- Leskóné Majoros L.**, Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Analysis of critical elements from the Tapolcsány Formation (NE-Hungary)*. In: Fehér B., Molnár K., Lukács R., Czuppon Gy. és Kereskényi E. (szerk.): Calce et malleo – Mésszel és kalapáccsal: 12. Közöttani és Geokémiai Vándorgyűlés. Budapest, Magyarország: Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, 89–92.
- Leskóné Majoros L.**, Leskó M. Zs., Fintor K., Szakáll S. és Kristály F. (2022): *Graphite Occurrences in NE-Hungary*. In: Szabó N. P. és Virág Z. (szerk.): Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2022. Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 49–56.

A DOKTORI TÉMÁHOZ KÖZVETLENÜL NEM KAPCSOLÓDÓ, DE A GRAFITHOZ KÖTHETŐ EGYÉB PUBLIKÁCIÓIM

- Leskó M. Zs., **Majoros L.**, Jakab G., Papp R. Z. és Kristály F. (2020): *How can universities and students increase domestic raw material knowledge to help production? Possibilities through examples*. European Geologist, 49, 19–22.
- Mohamed Badawi, **Leskóné Majoros Livia**, Evane César João De Cunha, Elyas Haddad, Ahmad Saifo, Samuel Ayipa Arthur, Rayhan Aldizan Farrenzo, Földessy János (2024): *A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből. 1. Az akkumulátor gyártáshoz használt kritikus ásványi nyersanyagok rövid áttekintése / From the Critical Raw Materials Marathon data collections. 1. Brief review of critical mineral raw materials for battery production*. Bányászati és Kohászati Lapok, 157 (1), 31–40.

14. MELLÉKLETEK

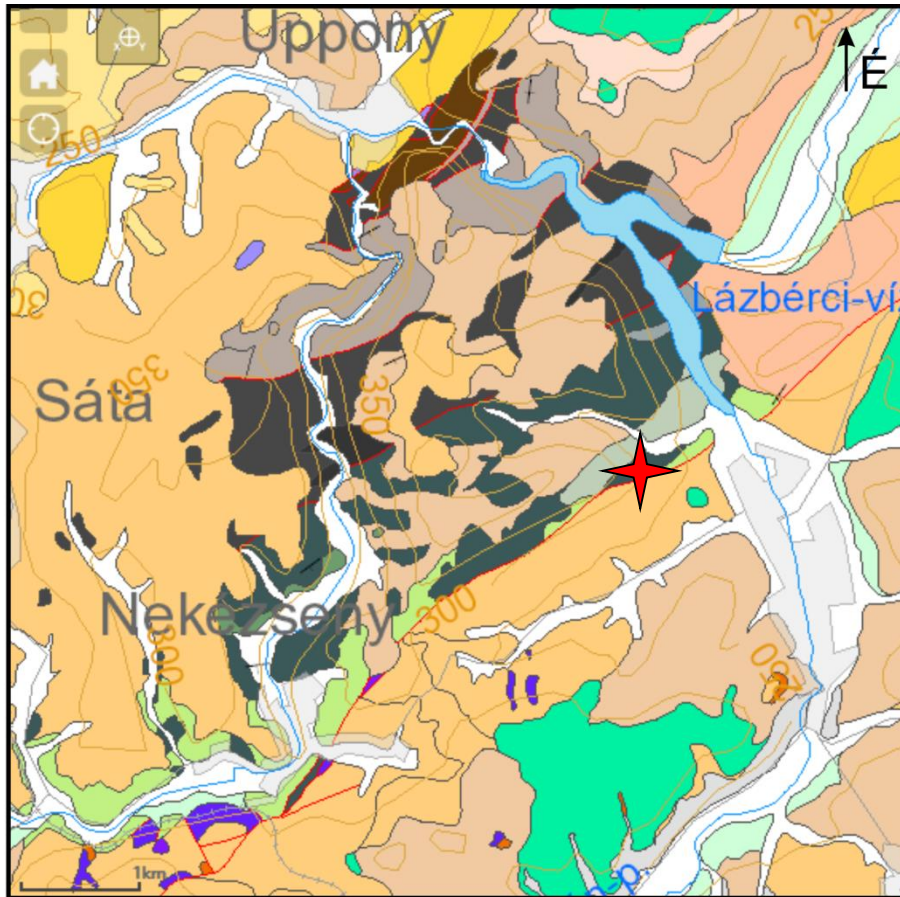
- I. melléklet:** Földtani térkép részlet Dédestapolcsány környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- II. melléklet:** Földtani térkép részlet Szendrőlád környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- III. melléklet:** A Szendrőládi Mészkö Formáció és a Bükhegyi Márvány Formáció típusterülete (Fülöp, 1994)
- IV. melléklet:** A szendrőládi Szl-6 jelű földtani alapfúrás rétegsora (Fülöp, 1994)
- V. melléklet:** Földtani térkép részlet Szendrő környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- VI. melléklet:** Földtani térkép részlet Meszes környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- VII. melléklet:** Földtani térkép részlet Rakacaszend környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- VIII. melléklet:** A Kőszegi-hegység vázlatos földtani térképe (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- IX. melléklet:** A Soproni-hegység vázlatos földtani térképe (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005)
- X. melléklet:** A Nyugati-Kárpátok Szlovákiába eső részének vázlatos földtani térképe (Lexa et al., 2000)
- XI. melléklet:** Románia és a Déli-Kárpátok egyszerűsített földtani térképei (Săndulescu et al., 1978; Iancu és Mărunțiu, 1994)
- XII. melléklet:** V-tartalmú muszkovit, Nb- és V-tartalmú anatáz, valamint goethit és goyazit-gorceixit elegykristályok kémiai összetétele, Dédestapolcsány (Majoros, 2017)
- XIII. melléklet:** Bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály, kémiaailag zónás bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály és Nb-tartalmú TiO₂ kémiai összetétele, Szendrőlád (Majoros, 2018)
- XIV. melléklet:** Xenotim, allanit, bastnäsit-(Ce) és monacit kémiai összetétele, Szendrőlád, Helle-patak (Majoros és Kristály, 2020)
- XV. melléklet:** Nb-tartalmú TiO₂ és monacit szemcsék kémiai összetétele, Szendrő
- XVI. melléklet:** Monacit szemcsék kémiai összetétele, Meszes
- XVII. melléklet:** Monacit, bastnäsit-(Ce) és xenotim kémiai összetétele, Rakacaszend

- XVIII. melléklet:** Monacit, allanit és bastnäsit-(Ce) kémiai összetétele, Velem
- XIX. melléklet:** Monacit kémiai összetétele, Fertőrákos
- XX. melléklet:** V-tartalmú muszkovitok kémiai összetétele, Rimakokova (Majoros, 2019)
- XXI. melléklet:** A dédestapolcsányi DTAP 1/1 mintán észlelhető, repedések menti vékony bevonat lekaparási porának (Majoros, 2017), valamint a DTAP 1/1 minta dekantálása során kinyert frakciójának diffraktogramjai
- XXII. melléklet:** A dédestapolcsányi DTAP 2/1 minta dúsítási kísérleténél kapott „ezüst” és „fekete” színű frakcióinak Rietveld-illesztése
- XXIII. melléklet:** A dédestapolcsányi minták ultrahangos aprózással kapott frakcióinak (Majoros, 2017), valamint a minták felszínén lévő zöld színű bevonat lekaparási porának diffraktogramjai
- XXIV. melléklet:** Az ultrahangos aprítással kapott szendrőládi minták diffraktogramjai, valamint az SZL-1A minta Rietveld-illesztése
- XXV. melléklet:** Az ultrahangos aprítással kapott szendrőládi SZL-1B és SZL-1C minták Rietveld-illesztése
- XXVI. melléklet:** A szendrőládi Helle-patak menti feltárásokból származó minták savazási kísérlete, valamint az SZL-1A minta agyagásvány szeparációja során nyert frakciójának diffraktogramjai
- XXVII. melléklet:** A szendrőládi SZL-1A minta dúsítási kísérleténél kapott frakció és az SZL-1A savazott minta Rietveld-illesztése
- XXVIII. melléklet:** A szendrőládi SZL-1B és SZL-1C savazott minták Rietveld-illesztése
- XXIX. melléklet:** A szendrői minták diffraktogramjai és az SZ-1 minta agyagásvány szeparálása során nyert frakció diffraktogramja
- XXX. melléklet:** A szendrői SZ-1 és SZ-2 minták Rietveld-illesztése
- XXXI. melléklet:** A szendrői SZ-3 minta Rietveld-illesztése
- XXXII. melléklet:** A meszesi minták diffraktogramjai (Leskóné Majoros et al., 2021 nyomán) és az M-3B minta Rietveld-illesztése
- XXXIII. melléklet:** A Meszes és Rakacaszend közötti útbevágás M-R A és M-R B jelölésű mintáinak Rietveld-illesztése
- XXXIV. melléklet:** A meszesi M-3B minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése























- XXXV. melléklet:** A meszesi M-3B minta szeparációja során nyert $<10\ \mu\text{m}$ és $>10\ \mu\text{m}$ szemcseméretű frakcióinak diffraktogramjai
- XXXVI. melléklet:** A rakacaszendi minták diffraktogramjai
- XXXVII. melléklet:** A rakacaszendi RSZ-2 és RSZ-3 minták Rietveld-illesztése
- XXXVIII. melléklet:** A velemi minták diffraktogramjai és a velemi VT-2 minta Rietveld-illesztése
- XXXIX. melléklet:** A velemi VT-3 és VT-9/2 minták Rietveld-illesztése
- XL. melléklet:** A velemi VT-9/2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése
- XLI. melléklet:** A fertőrákosi minták diffraktogramjai (Leskóné Majoros et al., 2025a) és az FR-1 minta Rietveld-illesztése
- XLII. melléklet:** A fertőrákosi FR-2 minta és a dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése
- XLIII. melléklet:** A parengi minta diffraktogramja (Majoros, 2019)
- XLIV. melléklet:** Rietveld-illesztéssel a dédestapolcsányi és szendrőládi minták részletes kvantitatív kiértékelése (tömegszázalék)
- XLV. melléklet:** Rietveld-illesztéssel a szendrői, meszesi, rakacaszendi, velemi, fertőrákosi és parengi minták részletes kvantitatív kiértékelése (tömegszázalék)
- XLVI. melléklet:** Az XRF mérés során, a mintákon végzett főelem arány meghatározás eredménye (tömegszázalék)
- XLVII. melléklet:** Az XRF mérés során, a mintákon végzett nyomelem tartalom meghatározás eredménye (ppm)
- XLVIII. melléklet:** Az XRF mérés során, a mintákon végzett szemi-kvantitatív kiértékelés eredménye (ppm)
- XLIX. melléklet:** Az ICP-MS mérés során, a mintákon végzett nyomelem tartalom meghatározás eredménye (ppm)
- L. melléklet:** A szerves anyag és grafit exoterm reakciói a hozzájuk kapcsolódó tömegvesztéssel (Dédestapolcsány, Szendrőlád)
- LI. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Szendrőlád, SZL-6 fűrómag minták (Majoros et al., 2022 nyomán)
- LII. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG mérés során észlelt termális reakciók a szendrőládi SZL-369, SZL-371 és SZL-373 minták esetében (Majoros et al., 2022)

- LIII. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Szendrőlád, Helle-patak
- LIV. melléklet:** A szerves anyag és grafit exoterm reakciói a hozzájuk kapcsolódó tömegvesztéssel (Szendrő, Meszes, Rakacaszend, Velem, Fertőrákos, Pareng)
- LV. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Szendrő
- LVI. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Meszes
- LVII. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Rakacaszend
- LVIII. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Velem
- LIX. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Fertőrákos
- LX. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Pareng
- LXI. melléklet:** Kiértékelt Raman-spektrumok a grafit első- és másodrendű sávjaival, Meszes (Leskóné Majoros et al., 2022b nyomán) és Velem
- LXII. melléklet:** Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival, Fertőrákos (Leskóné Majoros et al., 2025a)
- LXIII. melléklet:** A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott szerves anyag és grafit tömegének aránya, valamint grafit és összes széntartalmú anyag (szerves anyag és grafit) tömegének aránya
- LXIV. melléklet:** Összehasonlító táblázat a szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott és a Rietveld-illesztéssel számolt grafitartalmakról

I. melléklet

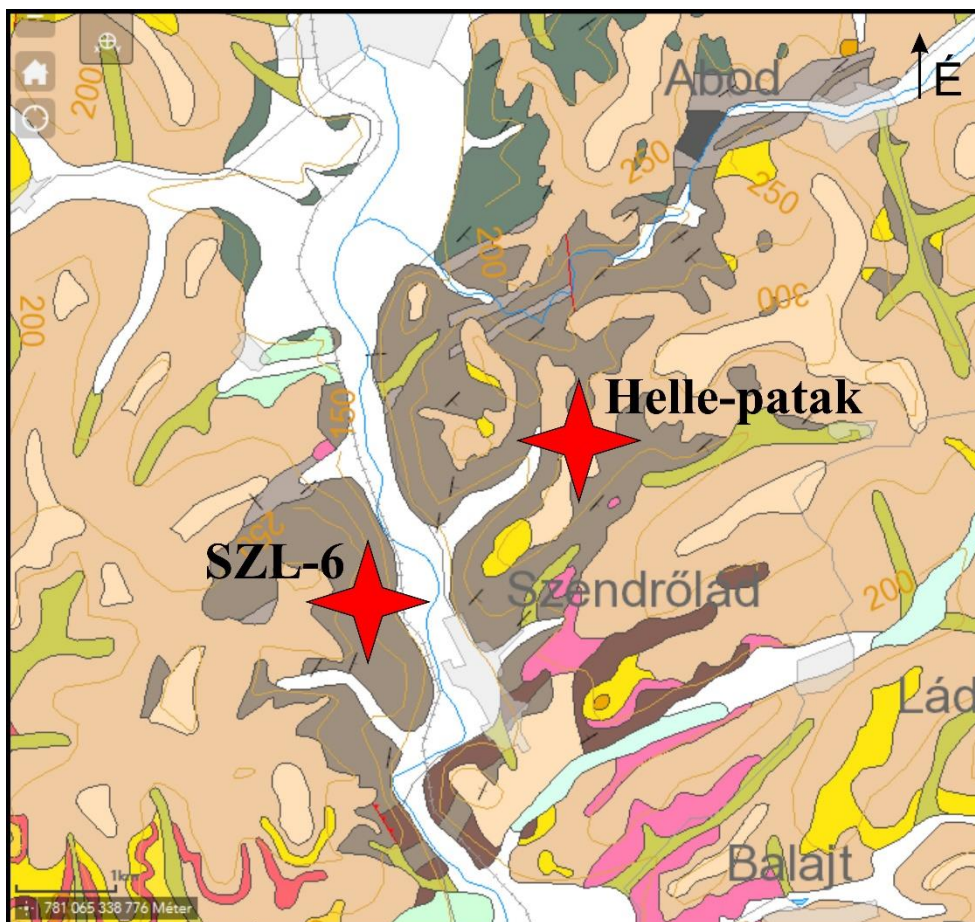


Jelmagyarázat:

	Antropogén képződmény		Abodi Mészke Formáció
	Folyóvízi üledék		Upponyi Mészke Formáció
	Folyóvízi üledék		Gerennavári Mészke Formáció
	Deluviális üledék		Gutensteini Formáció
	Garábi Slír Formáció		Salgótarjáni Barnakőszén Formáció
	Egyházasgergei Formáció		Felsőnyárádi Formáció
	Tapolcsányi Formáció		Dubicsányi Andezit Formáció
	Rágyincsvölgyi Homokkő Formáció		Bádeni Formáció
	Csernelyvölgyi Homokkő Formáció		Nagyvisnyói Mészke Formáció
	Lázbérci Formáció		Dedevári Mészke Formáció
	Nekézsenyi Konglomerátum Formáció		Darnó-zóna

Földtani térkép részlet Dédestapolcsány környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005). Piros csillaggal jelölve a mintagyűjtés helye

II. melléklet

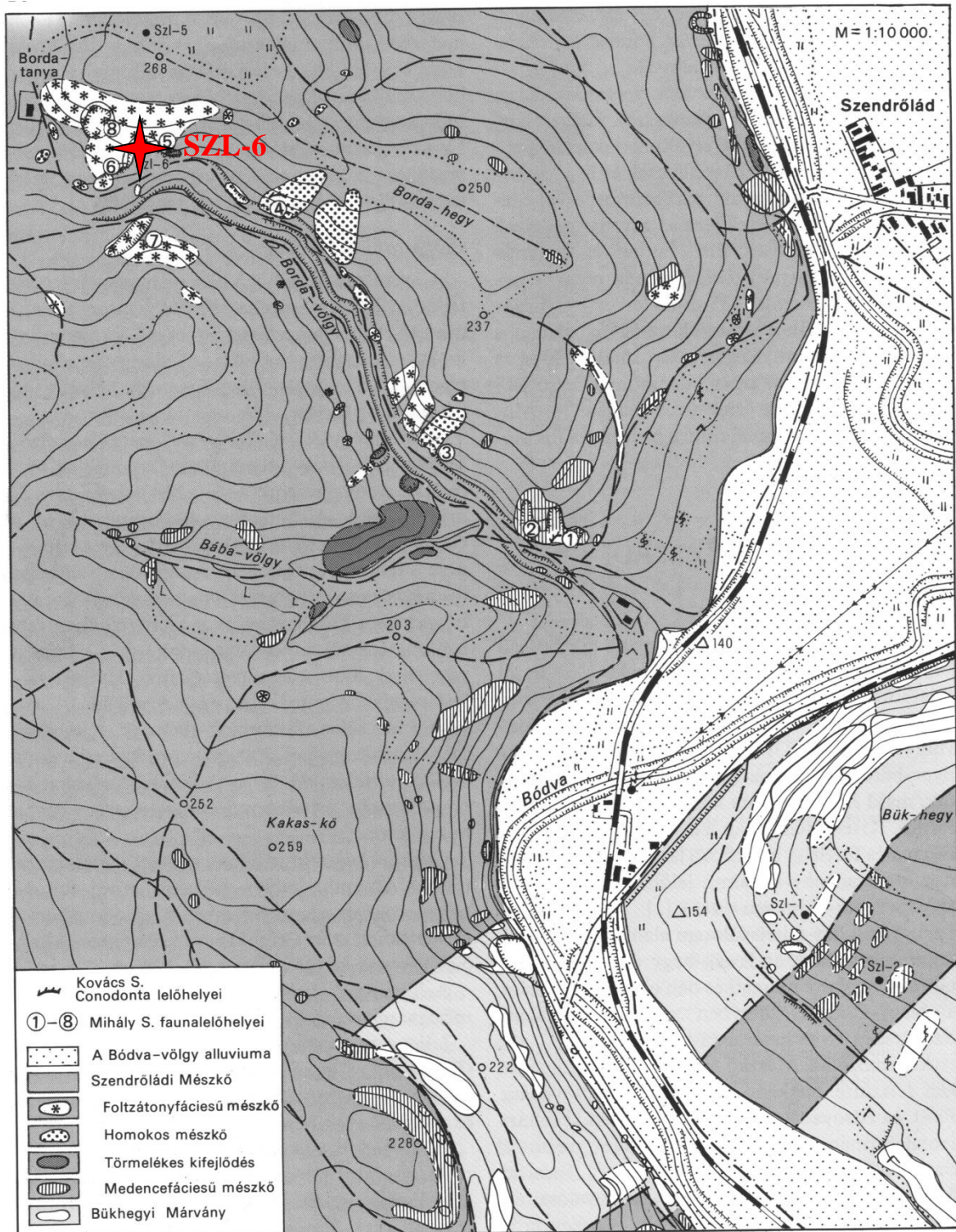


Jelmagyarázat:

 Deluviális üledék	 Szendrői Fillit Formáció
 Eluviális-deluviális üledék	 Galgavölgyi Riolituffa Formáció
 Edelenyi Tarkaagyag Formáció	 Bretkai Formáció
 Proluviális-deluviális üledék	 Abodi Mészke Formáció
 Szendrőládi Mészke Formáció	 Csereháti Riolituffa Formáció
 Bükhegyi Márvány Formáció	 Folyóvízi üledék
	 Folyóvízi üledék

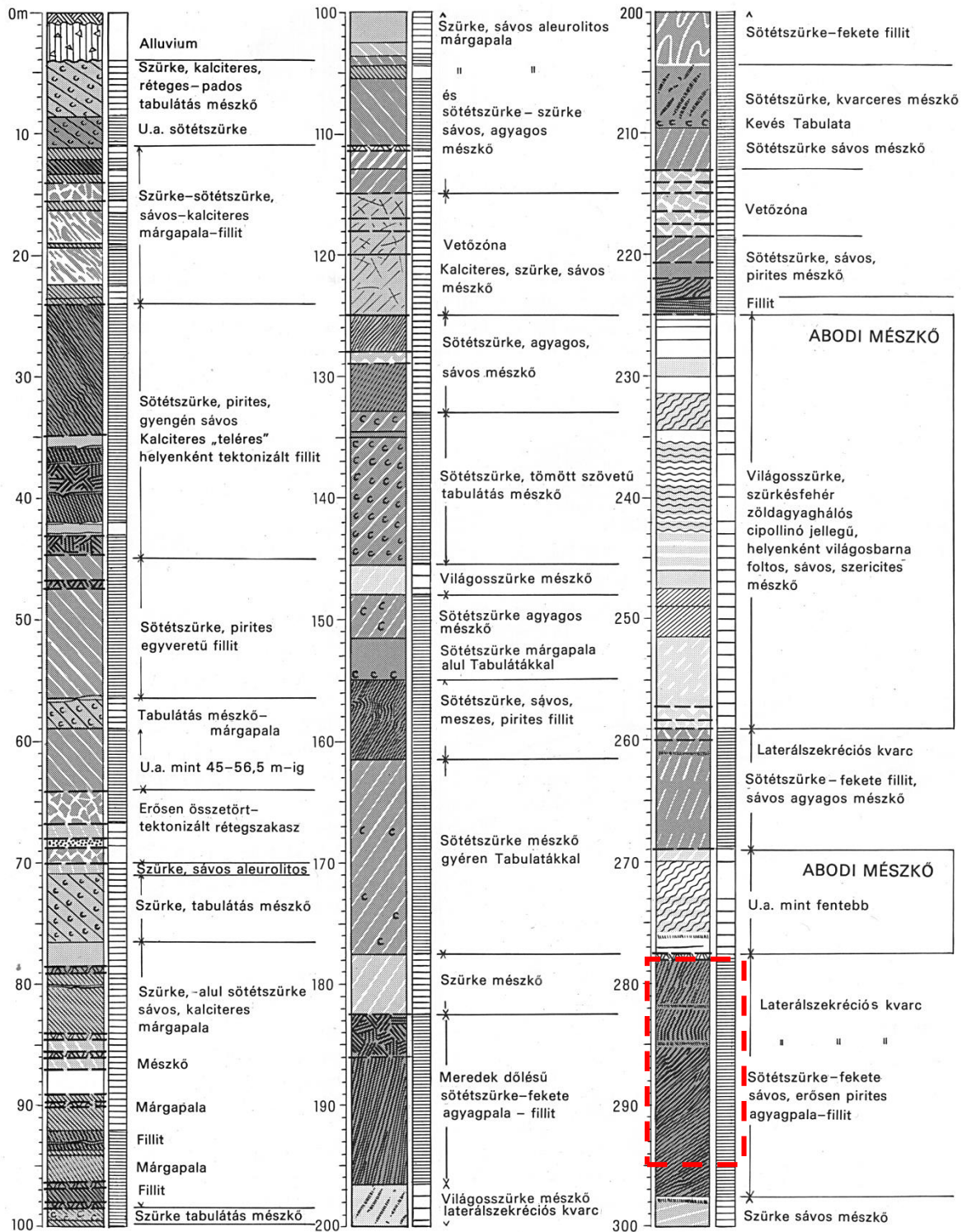
Földtani térkép részlet Szendrőlad környékéről (az SZTFH online földtani térképe)
 (Gyalog és Síkhegyi, 2005) Piros csillagokkal jelölve az SZL-6 földtani alapfúrás és a
 Helle-patak menti mintagyűjtés helye

III. melléklet



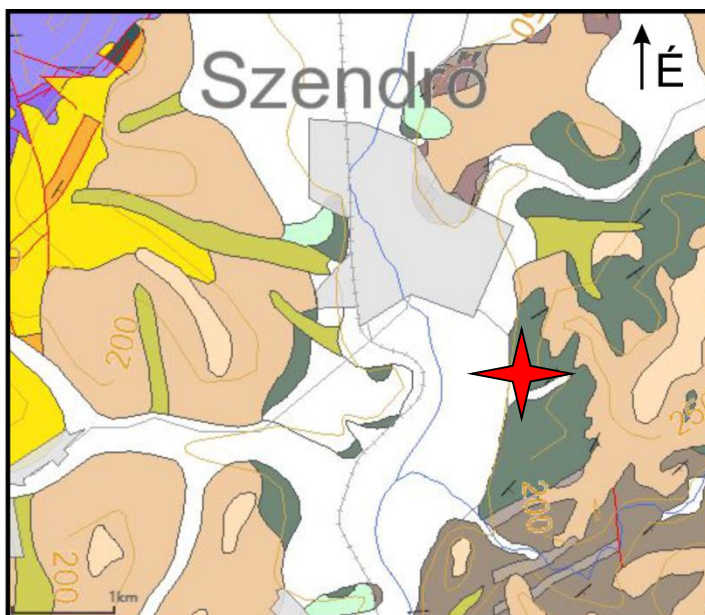
A Szendrőládi Mészke Formáció és a Bükhegyi Márvány Formáció típusterülete (Fülöp, 1994). Piros csillaggal jelölve a Szendrőládi-6 (Szl-6) jelű földtani alapfúrás helye

IV. melléklet





A szendrőládi Szl-6 jelű földtani alapfúrás rétegsora (Szendrőládi Mészkő Formáció és Abodi Mészkő Formáció) (Fülöp, 1994). Piros kerettel bejelölve az általam vizsgált mélységek (278-295 m)

V. melléklet

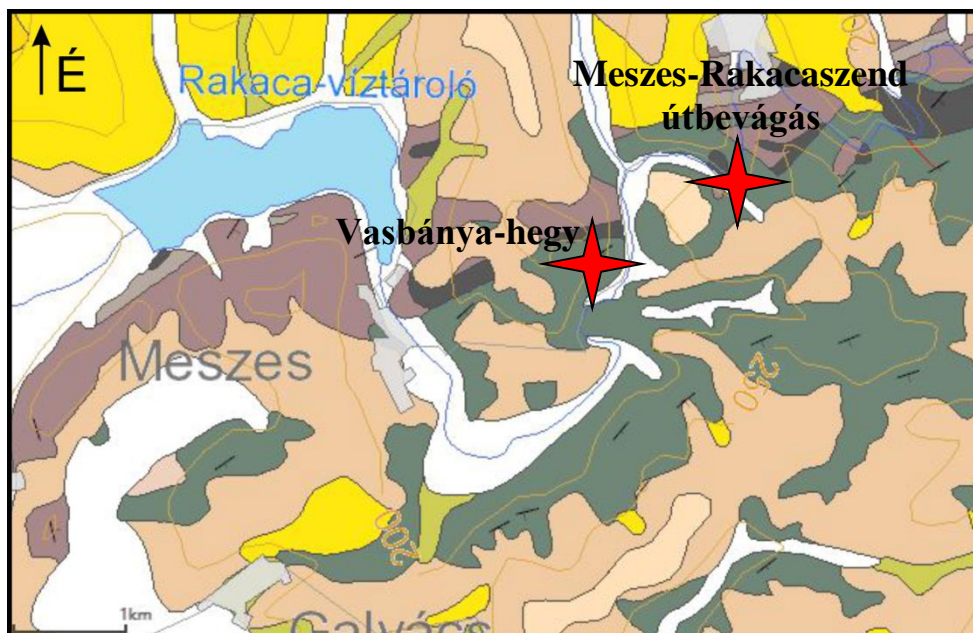


Jelmagyarázat:

 Deluviális üledék	 Tapolcsányi Formáció
 Eluviális-deluviális üledék	 Abodi Mészke Formáció
 Edelényi Tarkaagyag Formáció	 Folyóvízi üledék
 Proluviális-deluviális üledék	 Folyóvízi üledék
 Szendrőládi Mészke Formáció	 Szuhogyi Konglomerátum Formáció
 Szendrői Fillit Formáció	 Gutensteini Formáció
 Rakacaszendi és Rakacai Formáció összevontan	 Szini, Szinpetri és Gutensteini Formáció együttesen

Földtani térkép részlet Szendrő környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005) Piros csillaggal jelölve a mintagyűjtés helye

VI. melléklet

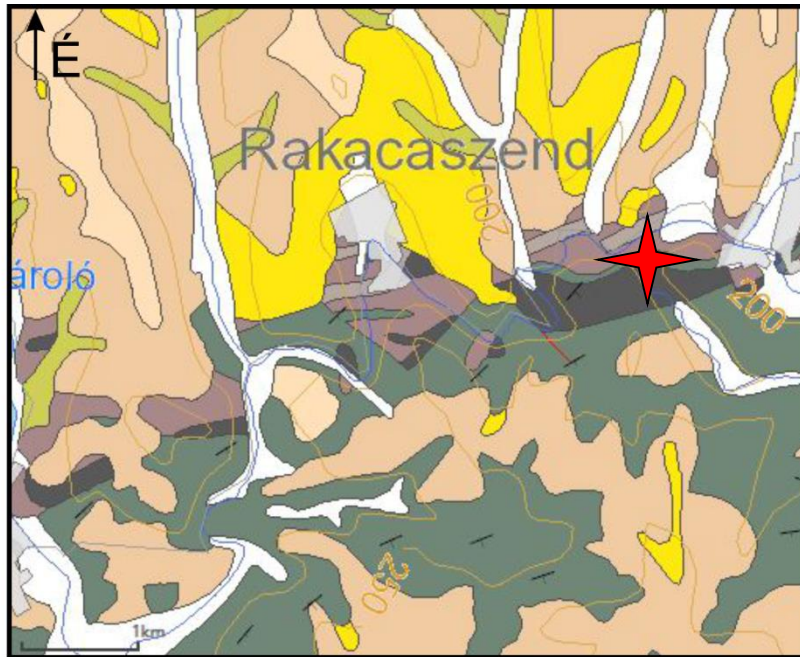


Jelmagyarázat:

	Deluviális üledék		Abodi Mésző Formáció
	Eluviális-deluviális üledék		Verebeshegyi Mésző Tagozat
	Folyóvízi üledék		Szalonnai Mésző Tagozat
	Edelényi Tarkaagyag Formáció		Szendrői Fillit Formáció
	Proluviális-deluviális üledék		Rakacaszendi és Rakacai Formáció összevontan

Földtani térkép részlet Meszes környékéről (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005) Piros csillagokkal jelölve a mintagyűjtés helyei

VII. melléklet

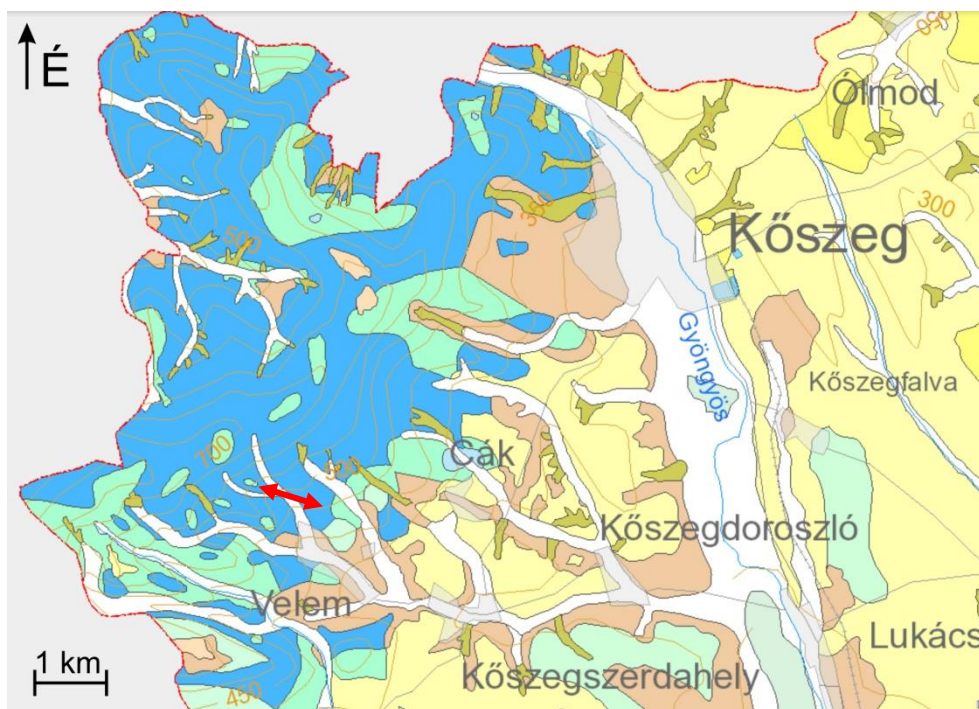


Jelmagyarázat:











	Deluviális üledék		Abodi Mészke Formáció
	Eluviális-deluviális üledék		Verebeshegyi Mészke Tagozat
	Folyóvízi üledék		Szendrői Fillit Formáció
	Edelényi Tarkaagyag Formáció		Rakacaszendi és Rakacai Formáció összevontan
	Proluviális-deluviális üledék		

Földtani térkép részlet Rakacaszend környékéről (az SZTFH online földtani térképe)
(Gyalog és Síkhegyi, 2005) Piros csillaggal jelölve a mintagyűjtés helye

VIII. melléklet

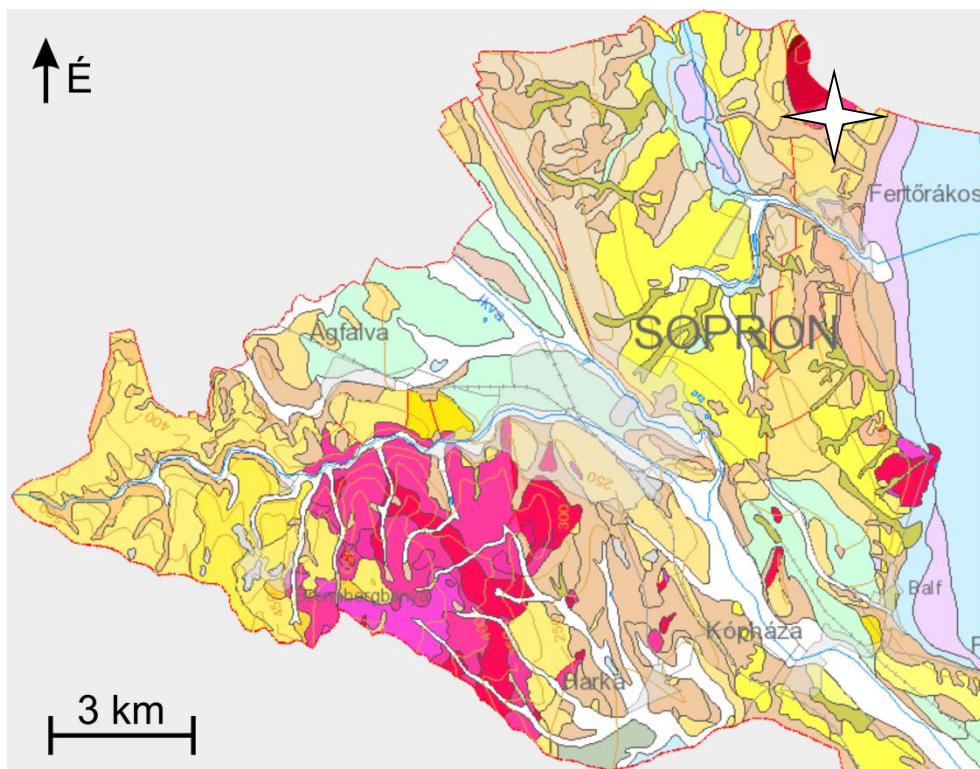


Jelmagyarázat:

	Kőszegi Kvarcfillit Formáció		Cáki Konglomerátum Tagozat
	Velemi Mészfillit Formáció		Homokos barna lösz
	Proluviális-deluviális üledék		Tihanyi Formáció
	Deluviális üledék		Folyóvízi aleurit
	Eluviális-deluviális üledék		Folyóvízi üledék

A Kőszegi-hegység vázlatos földtani térképe (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005). Piros nyíllal jelölve a vizsgált szakasz

IX. melléklet

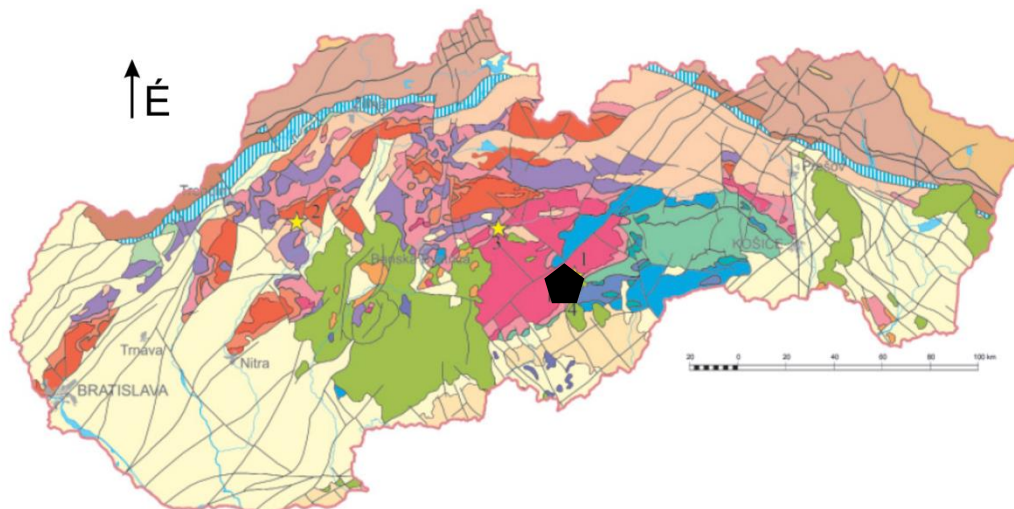


Jelmagyarázat:

 Vöröshídi Csillámpala Formáció	 Fertőrákosi Kristályospala Formációcsoport
 Sopronbánfalvi Gneisz Formáció	 Gödölyebérci Amfibolit Formáció
 Óbrennbergi Csillámpala Formáció	 Alsóligeterdői Kavics Tagozat
 Tolvajárki Leukofillit Tagozat	 Felsőligeterdői Kavics Tagozat
 Seprőkötőhegyi Kvarcit Tagozat	 Felsőtödli Kavics Tagozat
 Magasbérci Homok Tagozat	 Lejtő- és proluviális üledék
 Deluviális üledék	 Tavi-mocsári üledék
 Száki Agyagmárga Formáció	 Folyóvízi-proluviális üledék
 Bádeni Formáció	 Felsőligeterdői Kavics Tagozat
 Proluviális-deluviális üledék	 Kisbéri Kavics Formáció
 Tinnye Formáció	 Folyóvízi üledék
 Lejtőüledék: agyag	

A Soproni-hegység vázlatos földtani térképe (az SZTFH online földtani térképe) (Gyalog és Síkhegyi, 2005). Fehér csillaggal jelölve a mintagyűjtés helye

X. melléklet

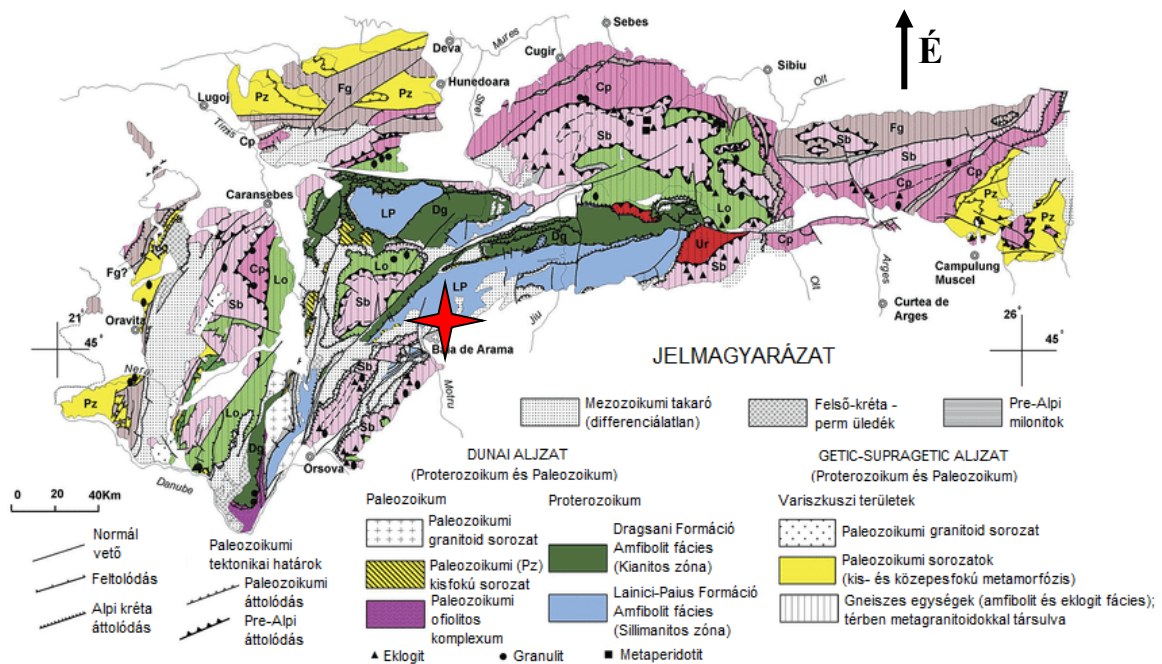
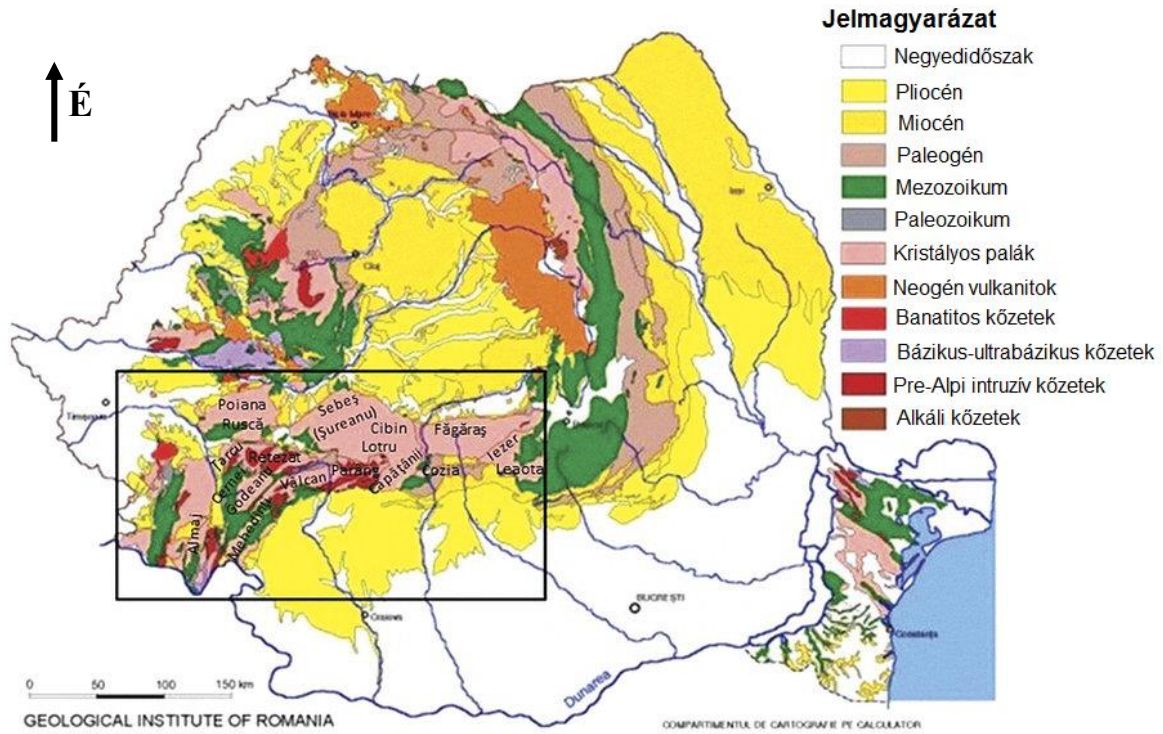


Jelmagyarázat:

- | | |
|---|---|
| Flis zóna: Kroznó takarórendszer | Felső-kréta-eocén üledékek (Myjava és Hričov Csoport) |
| Flis zóna: Elő-Magura egységek | Eocén-alsó-miocén üledékek (Budín-medence) |
| Flis zóna: Külső Magura-takarók | Hronikum |
| Flis zóna: Belső Magura-takarók | Gömörikum |
| Pieniny Klippen Öv | Meliatikum |
| Neogén-Negyedidőszaki medencék | Turnaikum |
| Alkáli bazaltok (Pannon-Negyedidőszaki) | Szilézikum |
| Andezites vulkanitok (Neogén) | Normál és transzform vetők |
| Riolitos vulkanitok (Neogén) | Takaró határok |
| Belső-kárpátoki paleogén üledékek | |
| Tátrikum: a) Kristályos aljzat; b) üledékkal fedettség | |
| Veporikum, Zemplénikum: a) Kristályos aljzat; b) üledékkal fedettség és Križna-takaró | |

A Nyugati-Kárpátok Szlovákiába eső részének vázlatos földtani térképe (Lexa et al., 2000). jel jelöli a rimakokovai grafit előfordulást (Lexa et al., 2007 alapján módosítva)

XI. melléklet



Románia egyszerűsített földtani térképe (fent). A bekeretezett részből (Déli-Kárpátok) nagyított földtani térkép (lent), amelyen ki vannak emelve a variszkuszi szerkezeti egységek, valamint piros csillaggal jelölve a Cătălinul grafitbánya helye (Săndulescu et al. (1978); valamint Iancu és Mărunțiu (1994) alapján módosítva)

XII. melléklet

V-tartalmú muszkovit kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, tömeg százalék),
Dédestapolcsány, 2. feltárás (Majoros, 2017)

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	V ₂ O ₅	FeO
V-tartalmú muszkovit	0,41	2,78	35,78	52,84	5,64	0,85	0,86	0,82

Az EDX mérésből a muszkovit anionvázra számolt képlete:



Nb- és V-tartalmú anatáz kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, tömeg százalék). A Si a környezetéből származik. Dédestapolcsány, 2. feltárás (Majoros, 2017)

	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅
Anatáz	5,17	93,31	1,27	0,25

Goethit és goyazit-gorceixit elegykristályok kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, tömeg százalék), Dédestapolcsány, 2. feltárás (Majoros, 2017)

	Goyazit-gorceixit		Goethit
	23. ábra 1. mérési pont	23. ábra 3. mérési pont	23. ábra 2. mérési pont
Na₂O	0,34	-	-
MgO	0,31	-	-
Al₂O₃	36,72	32,06	2,52
SiO₂	3	10,91	7,93
P₂O₅	33,18	28,73	1
SO₃	1,03	1,23	0,48
Cl	-	-	-
CaO	4,82	4,14	0,11
FeO	5,84	11,26	87,96
SrO	6,55	5,46	-
BaO	6	5,18	-
Ce₂O₃	0,68	1,03	-
Nd₂O₃	0,81	-	-
PbO	0,29	-	-
UO₂	0,43	-	-

Az EDX mérésből a goyazit-gorceixit elegykristályok anionvázra számolt képlete:



XIII. melléklet

Bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Szendrőlád – 369 (Majoros, 2018)

F	SiO₂	CaO	FeO	La₂O₃	Ce₂O₃	Nd₂O₃	ThO₂	UO₂
8,63	1,23	17,81	0,41	22,3	32,03	15,46	1,82	0,31

Az EDX mérésből nem tudtam képletet számolni, mert a széngőzölés miatt szenet nem lehet pontosan mérni.

Nb-tartalmú TiO₂ kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Az Al, Si és Ca a környezetéből származik. Szendrőlád – 373 (Majoros, 2018)

Al₂O₃	SiO₂	CaO	TiO₂	Nb₂O₅
0,3	0,44	0,29	98,55	0,42

A 30. ábrán látható kémiaileg zónás bastnäsit-parisit-(Ce) elegykristály kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Szendrőlád – 373 (Majoros, 2018)

	F	CaO	FeO	SrO	La₂O₃	Ce₂O₃	Nd₂O₃	Gd₂O₃	ThO₂
Mag része	4,02	21,48	1,1	0,91	19,08	30,44	16,59	1,81	4,58
Szegélyi része	6,61	4,75	0,28	1,05	27,39	41,04	16,25	0	2,63

Az EDX mérésből nem tudtam képletet számolni, mert a széngőzölés miatt szenet nem lehet pontosan mérni.

XIV. melléklet

Xenotim, allanit, bastnäsit-(Ce) és monacit kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). A Si, K és Ca a környezetéből származik. Szendrőlád, Helle-patak (Majoros és Kristály, 2020)

	Xenotim	Allanit	Bastnäsit-(Ce)	Monacit	
*CO ₂	-	-	42,02	-	-
F	-	-	7,8	-	2,66
Al ₂ O ₃	-	23,22	-	2,06	-
SiO ₂	1,66	35,63	0,28	3,32	-
P ₂ O ₅	42,52	-	-	28,14	34,88
CaO	0,6	12,54	3,02	6,68	0,43
SO ₃	-	-	-	0,35	-
K ₂ O	0,14	-	-	0,38	-
FeO	-	8,95	0,67	0,8	-
Y ₂ O ₃	34,36	-	-	-	-
La ₂ O ₃	-	4,24	11,69	13,31	20,24
Ce ₂ O ₃	-	9,61	25,04	31,92	34,34
Nd ₂ O ₃	0,17	4,56	8,74	11,1	6,53
Gd ₂ O ₃	2,95	-	-	0,66	-
Dy ₂ O ₃	8,34	-	-	0,65	-
Sm ₂ O ₃	0,74	1,25	-	-	-
Er ₂ O ₃	5,38	-	-	-	-
Yb ₂ O ₃	2,96	-	-	-	-
ThO ₂	0,17	-	0,74	0,65	0,92

*A széngőzölés miatt a szén mérése pontatlan.

Az EDX mérésből anionvázra számolt képletek:

Xenotim: $(Y_{0,57}Nd_{0,002}Sm_{0,01}Gd_{0,03}Dy_{0,08}Er_{0,05}Yb_{0,03}Th_{0,001})P_{1,13}O_4$

Allanit: $(Ce_{0,16}Ca_{0,61}La_{0,07}Nd_{0,08}Sm_{0,02})_2(Al_{0,82}Fe_{0,23})_3(Si_{1,07}O_4)_3(OH)$

Bastnäsit-(Ce): $Ce_{0,16}La_{0,08}Nd_{0,06}Th_{0,003}(C_{1,02}O_3)F_{0,44}$

Monacit: $(Ce_{0,47-0,51}La_{0,21-0,28}Nd_{0,09-0,17}Th_{0,01}Gd_{0-0,01}Dy_{0-0,01})P_{1,04}O_4F_{0-0,31}$

XV. melléklet

Nb-tartalmú TiO₂ kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). A Si és Fe a környezetéből származik. Szendrő

(a szerző saját szerkesztése)

SiO ₂	TiO ₂	FeO	Nb ₂ O ₅
0,5	97,22	0,83	1,45

Monacit szemcsék és fluorapatit kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Az Al, Si, S, K, Ti és Fe a környezetéből származik. Szendrő

(a szerző saját szerkesztése)

	Monacit		Fluorapatit
F	2,77	-	5,44
Al₂O₃	2,16	5,22	-
SiO₂	3,33	11,5	-
P₂O₅	33,46	21,63	47,33
SO₂	-	0,37	-
K₂O	0,27	1,14	-
CaO	1,53	1,47	46,5
TiO₂	2,27	13,7	-
FeO	0,68	3,53	-
SrO	1,98	-	0,73
La₂O₃	12,16	6,7	-
Ce₂O₃	27,07	17,78	-
Pr₂O₃	1,9	-	-
Nd₂O₃	8,62	6,47	-
Sm₂O₃	-	0,99	-
Gd₂O₃	-	0,23	-
ThO₂	1,81	9,25	-

Az EDX mérésből anionvázra számolt képletek:

Monacit:

(Ce_{0,39-0,40}La_{0,15-0,18}Nd_{0,12-0,14}Th_{0,02-0,12}Pr_{0-0,03}Sr_{0-0,05}Sm_{0-0,02}Gd_{0-0,004})P_{1,08-1,13}O₄F_{0-0,35}

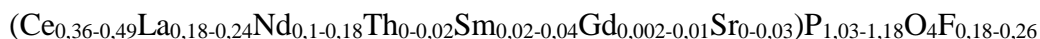
Fluorapatit: (Ca_{3,64}Sr_{0,03})(P_{0,98}O₄)₃F_{1,26}

XVI. melléklet

Monacit szemcsék kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Az Al, Si, Ca és Fe a környezetéből származik, Meszes (a szerző saját szerkesztése)

	Monacit						
F	1,05	1,13	0,88	0,61	2,33	1,52	1,7
Al₂O₃	-	0,47	-	-	-	-	0,94
SiO₂	0,7	1,25	-	-	1,29	-	6,89
P₂O₅	32,58	31,07	32,45	30,92	40,1	36,29	34,25
CaO	0,29	0,42	0,71	0,72	0,51	0,47	0,3
FeO	-	-	-	0,83	-	0,84	0,89
SrO	-	-	1,05	1,08	-	1,06	1,18
La₂O₃	16,68	15,29	17,01	14,41	14,89	15,97	12,7
Ce₂O₃	32,69	33,52	33,89	34,26	28,17	31,21	28,97
Nd₂O₃	11,48	12,6	10,88	11,84	8,1	9,97	9,74
Sm₂O₃	2,73	3,17	2,52	2,6	3,35	2,01	1,33
Gd₂O₃	0,74	0,15	0,61	0,44	1,25	0,65	-
ThO₂	1,05	0,93	-	2,3	-	-	1,11

Az EDX mérésből a monacit anionvázra számolt képlete:



Fluorapatit szemcsék kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék), Meszes (a szerző saját szerkesztése)

	Fluorapatit		
F	2,92	4,27	4,62
P₂O₅	44,26	43,64	46,38
CaO	51,83	51,01	48,46
SrO	0,99	1,08	0,54

Az EDX mérésből a fluorapatit anionvázra számolt képlete:



Mivel az EDX mérések klórtartalmat nem mutatnak az apatitban, ezért a fluor mellett hidroxilgyök valószínűsíthető.

XVII. melléklet

Monacit, bastnäsit-(Ce) és xenotim kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék), Rakacaszend (a szerző saját szerkesztése)

	Monacit			Bastnäsit-(Ce)			Xenotim		
F	-	-	-	9,02	5,58	8,61	-	-	-
MgO	-	-	0,8	-	-	-	-	-	-
Al₂O₃	-	2,71	12,59	3,22	6,48	5,85	-	-	-
SiO₂	-	3,6	30,32	17,5	15,44	10,06	4,02	2,42	-
P₂O₅	31,74	27,47	17,14	2,54	2,03	11,35	33,97	42,37	41,19
SO₂	0,89	-	-	-	-	0,55	-	-	-
K₂O	0,44	0,37	0,8	0,33	1,87	0,89	-	0,22	-
CaO	7,08	1,04	3,66	1,77	1,27	3,1	1,87	-	-
TiO₂	0,22	0,15	-	-	0,69	2,83	-	-	-
FeO	0,76	2,3	3,96	1,62	1,3	1	2,91	-	-
SrO	1,78	-	-	-	-	-	1,32	-	-
Y₂O₃	1,34	-	-	-	-	-	28,32	36,45	37,24
Nb₂O₅	0,39	-	-	-	-	-	0,56	-	-
La₂O₃	10,76	14,92	7,64	16,64	17,53	14,46	-	-	-
Ce₂O₃	21,76	32,56	14,62	34,74	33,35	26,55	-	-	-
Nd₂O₃	8,66	10,97	6,09	11,47	10,87	8,99	0,97	-	-
Sm₂O₃	1,86	2,07	1,04	-	2,01	1,38	1,15	-	0,35
Eu₂O₃	-	-	-	-	-	-	-	0,19	-
Gd₂O₃	-	0,17	-	-	-	-	3,76	2,47	3,77
Tb₂O₃	-	-	-	-	-	-	-	1,14	1,1
Dy₂O₃	-	-	-	-	-	-	8,34	7,44	8,81
Ho₂O₃	-	-	-	-	-	-	1,3	-	-
Er₂O₃	-	-	-	-	-	-	3,49	4,27	4,74
Yb₂O₃	-	-	-	-	-	-	1,21	3,03	2,81
ThO₂	12,3	1,68	1,34	1,16	1,56	4,38	6,83	-	-

Az EDX mérésből nem tudtam bastnäsit-(Ce) képletet számolni, mert a szengőzölés miatt nem lehet pontosan mérni a szenet.

Az EDX mérésből anionvázra számolt képletek:

Monacit: $(\text{Ce}_{0,32-0,52}\text{La}_{0,16-0,24}\text{Nd}_{0,13-0,17}\text{Th}_{0,02-0,11}\text{Sm}_{0,03}\text{Gd}_{0-0,002}\text{Y}_{0-0,03}\text{Sr}_{0-0,04})\text{P}_{1,01-1,1}\text{O}_4$

Xenotim: $(\text{Y}_{0,55-0,62}\text{Nd}_{0-0,01}\text{Sm}_{0-0,01}\text{Gd}_{0,03-0,05}\text{Dy}_{0,08-0,1}\text{Ho}_{0-0,02}\text{Er}_{0,04-0,05}\text{Yb}_{0,01-0,03}\text{Th}_{0-0,06}$

$\text{Eu}_{0-0,002}\text{Tb}_{0-0,01}\text{Sr}_{0-0,03}\text{Nb}_{0-0,01})\text{P}_{1,06-1,12}\text{O}_4$

XVIII. melléklet

Monacit, allanit és bastnäsit-(Ce) kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék), Velem (a szerző saját szerkesztése)

	Monacit				Allanit		Bastnäsit-(Ce)
F	-	-	1,84	-	-	-	8,02
Na₂O	-	0,41	-	-	-	-	-
MgO	-	0,74	-	-	-	-	-
Al₂O₃	1,28	13,06	0,63	0,63	22,07	21,82	1,42
SiO₂	2,27	12,74	0,92	1,88	34,03	34,08	1,71
P₂O₅	27,38	22,7	28,44	28,25	-	-	0,22
K₂O	-	0,22	-	-	0,14	-	-
CaO	1,05	2,68	1,68	1,41	10,91	9,79	1,47
MnO	-	-	-	-	1,48	1,62	-
FeO	2,77	1,03	-	0,8	9,56	13,11	-
ZrO₂	-	-	-	-	0,24	-	-
Y₂O₃	2,62	-	3,15	-	-	-	2,1
La₂O₃	13,44	10,31	14,04	13,51	3,49	2,51	21,51
Ce₂O₃	31,78	23,53	31,52	36,19	12,38	9,9	46,34
Pr₂O₃	2,16	0,8	1,42	2,04	-	-	2,15
Nd₂O₃	11,87	6,39	9,25	10,1	3,88	5,9	9,67
Sm₂O₃	0,98	0,76	2,06	1,06	0,55	-	1,87
Eu₂O₃	-	-	1,62	-	-	-	2,23
Gd₂O₃	0,56	0,09	-	-	-	-	-
Dy₂O₃	0,34	-	-	-	-	-	-
ThO₂	1,5	4,54	2,78	4,13	1,27	1,27	1,31
UO₂	-	-	0,64	-	-	-	-

Az EDX mérésből nem tudtam bastnäsit-(Ce) képletet számolni, mert a széngözölés miatt nem lehet pontosan mérni a szenet.

Az EDX mérésből anionvázra számolt képletek:

Monacit: $(\text{Ce}_{0,47-0,55}\text{La}_{0,21}\text{Nd}_{0,12-0,18}\text{Th}_{0,01-0,06}\text{Gd}_{0-0,01}\text{Sm}_{0,01-0,03}\text{Y}_{0-0,07}\text{Dy}_{0-0,005}\text{Pr}_{0,02-0,03}$

$\text{Eu}_{0-0,02}\text{U}_{0-0,01})\text{P}_{0,98-1,05}\text{O}_4\text{F}_{0,24}$

Allanit: $(\text{Ce}_{0,17-0,22}\text{Ca}_{0,49-0,55}\text{La}_{0,05-0,06}\text{Nd}_{0,07-0,1}\text{Sm}_{0-0,01}\text{Th}_{0,02})_2(\text{Al}_{0,8-0,81}\text{Fe}_{0,25-0,34})_3$

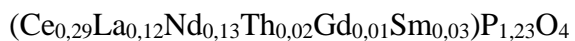
$(\text{Si}_{1,06}\text{O}_4)_3(\text{OH})$

XIX. melléklet

Monacit kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék). Az Al, Si, K, Ca, Ti és Fe a környezetéből származik. Fertőrákos (a szerző saját szerkesztése)

MgO	1,01
Al₂O₃	3,59
SiO₂	4,42
P₂O₅	24,52
K₂O	0,49
CaO	1,5
TiO₂	27,98
FeO	7,92
La₂O₃	5,49
Ce₂O₃	13,23
Nd₂O₃	6,25
Sm₂O₃	1,36
Gd₂O₃	0,59
ThO₂	1,65

Az EDX mérésből a monacit anionvázra számolt képlete:

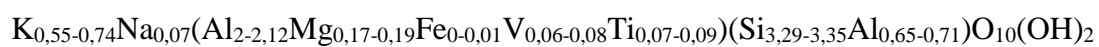


XX. melléklet

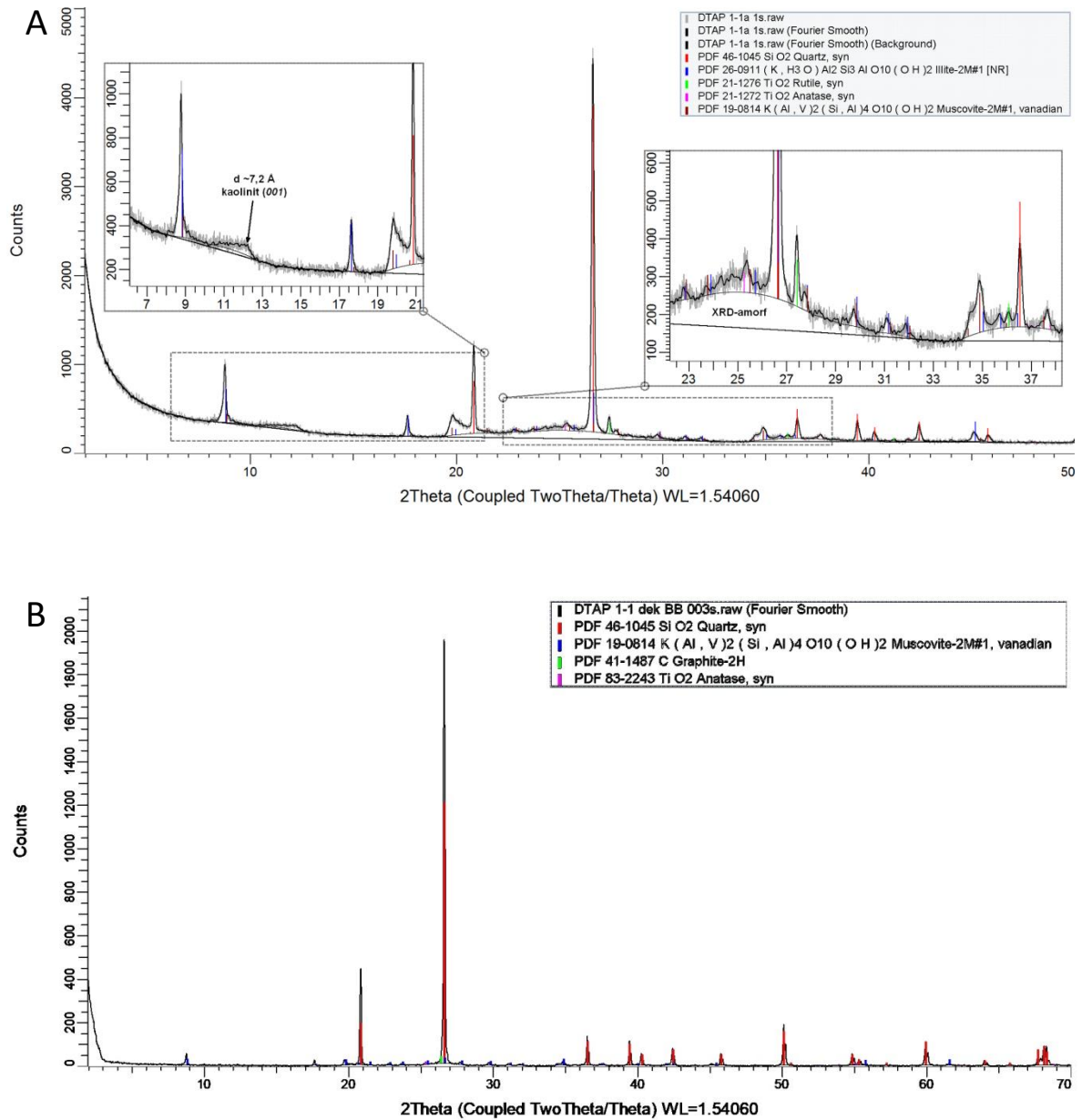
V-tartalmú muszkovitok kémiai összetétele (nem standardizált EDX mérés, oxidos tömegszázalék), Rimakokova (Majoros, 2019)

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	V ₂ O ₅	FeO
0,52	1,94	35,02	50,14	6,53	1,88	3,79	0,19
-	1,70	35,32	50,34	8,70	1,39	2,55	-

Az EDX mérésből a muszkovit anionvázra számolt képlete:



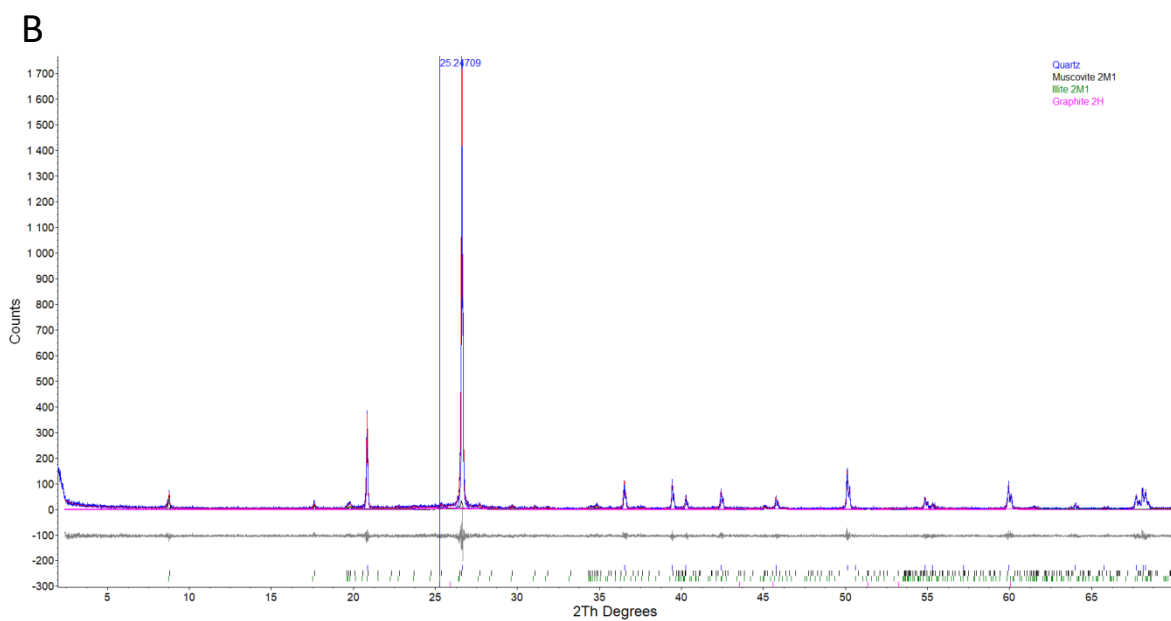
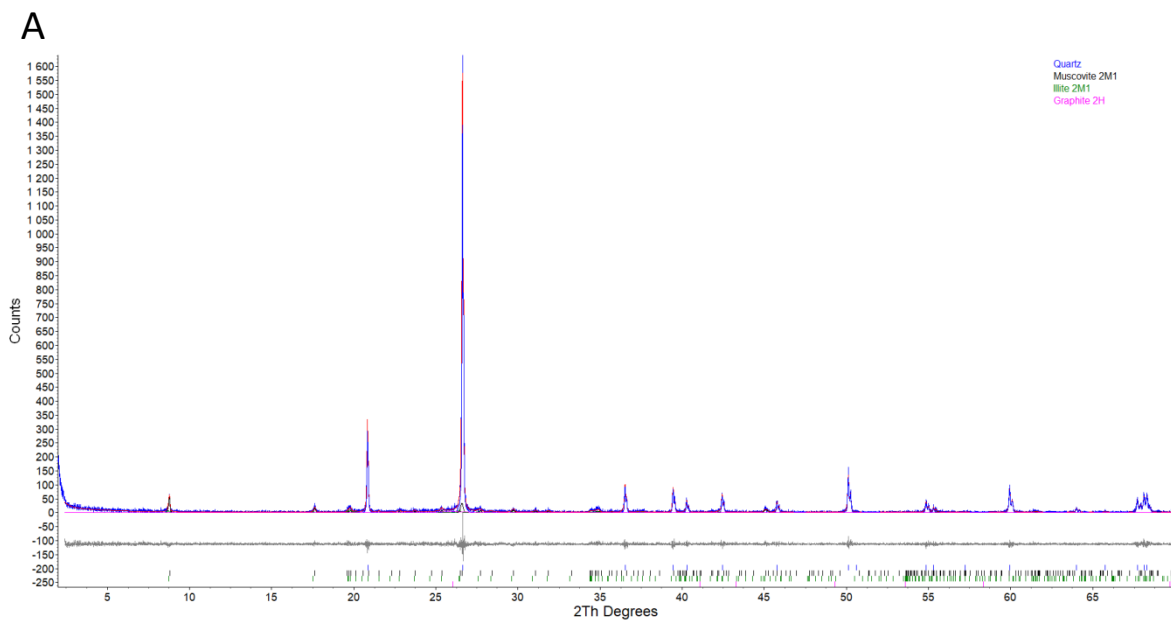
XXI. melléklet



A – A dédestapolcsányi DTAP 1/1 mintán észlelhető, repedések menti vékony bevonat lekaparási porának diffraktogramja (Majoros, 2017)

B – A DTAP 1/1 minta dekantálása során kinyert frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

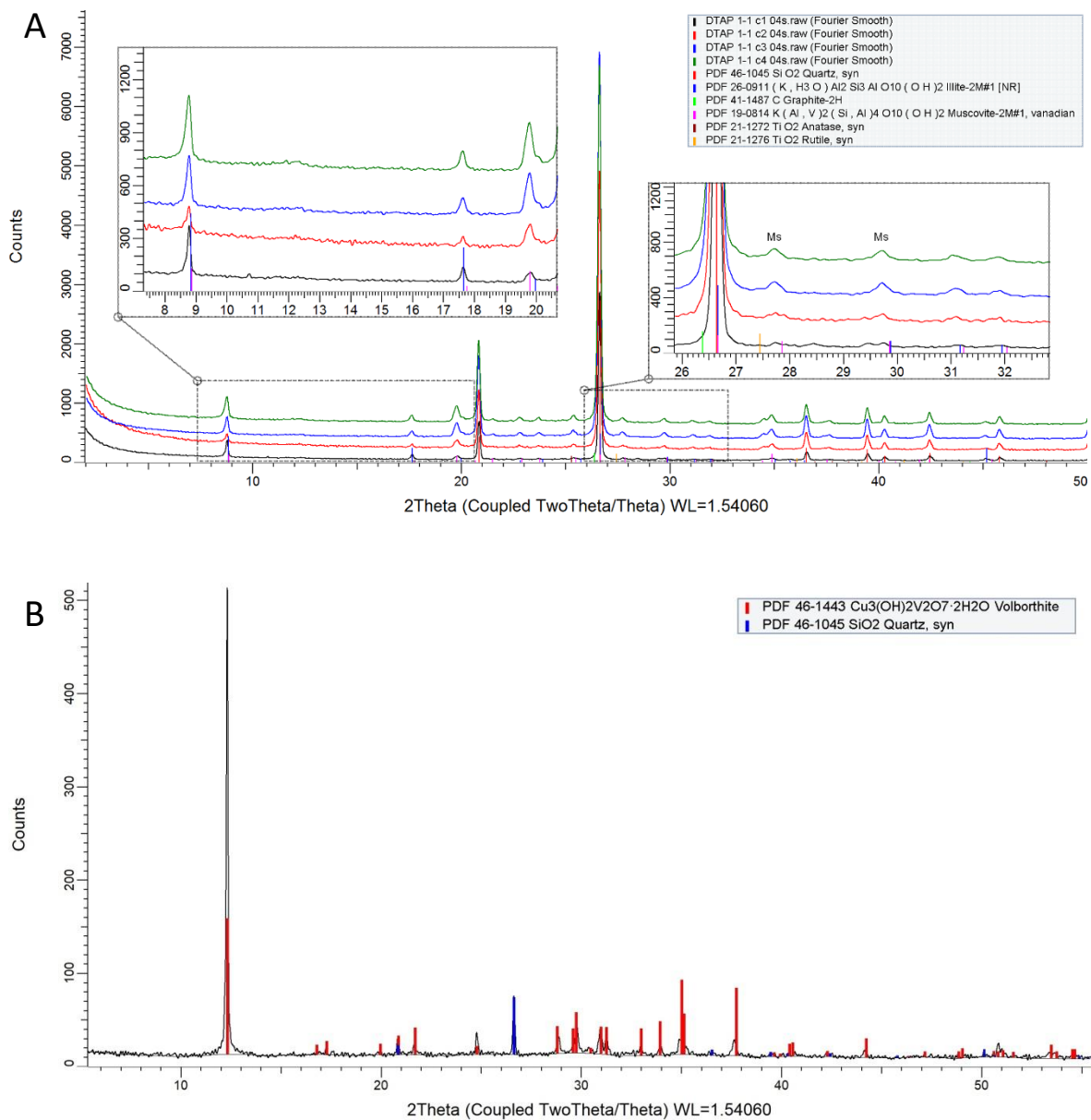
XXII. melléklet



A – A dédestapolcsányi DTAP 2/1 minta dúsítási kísérleténél kapott „ezüst” színű frakció kiértékelése Rietveld-illesztéssel (a szerző saját szerkesztése)

B – A dédestapolcsányi DTAP 2/1 minta dúsítási kísérleténél kapott „fekete” színű frakció kiértékelése Rietveld-illesztéssel (a szerző saját szerkesztése)

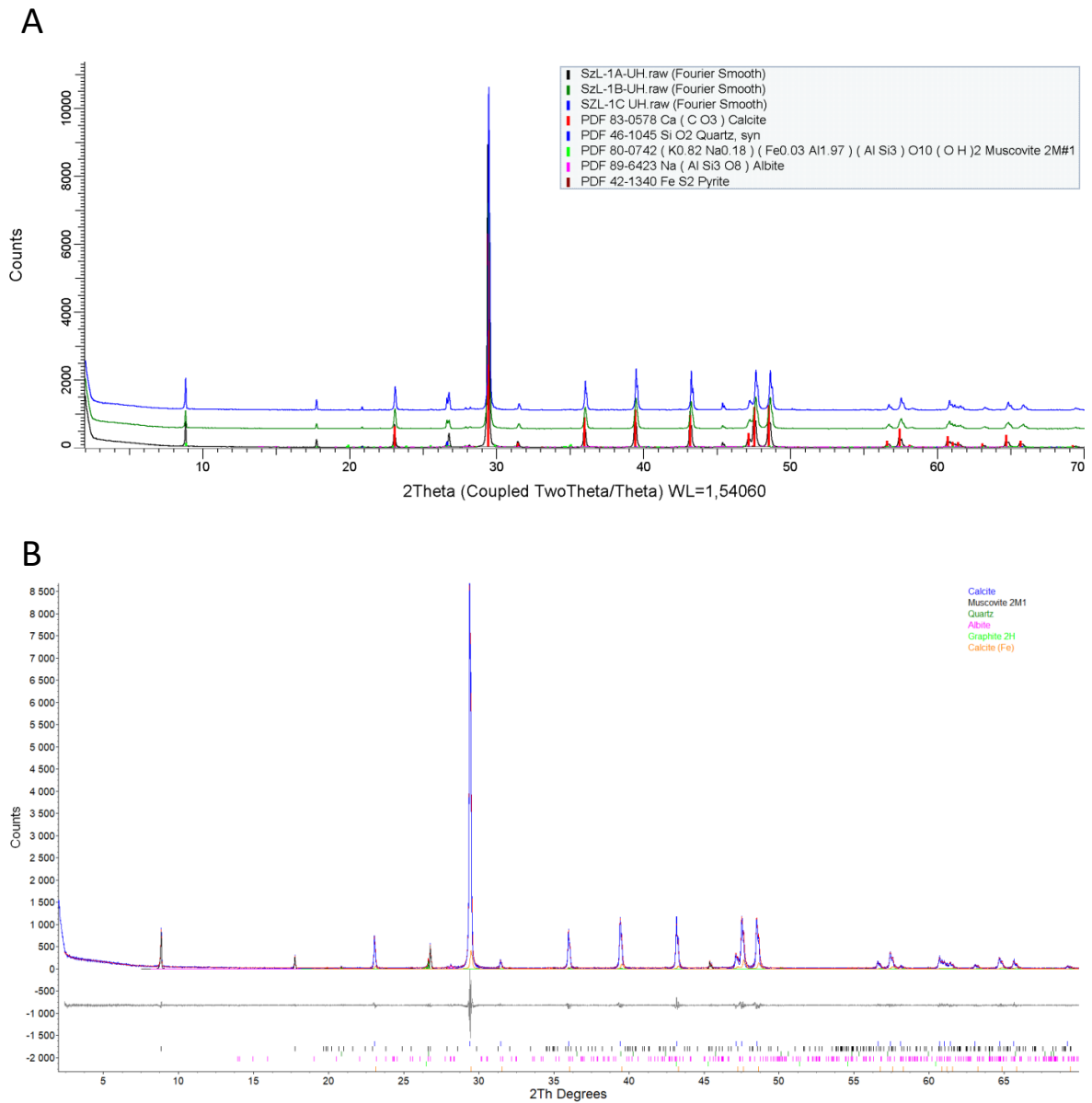
XXIII. melléklet



A – A dédestapolcsányi minták ultrahangos aprózással kapott frakcióinak diffraktogramjai, 1. feltárás (Majoros, 2017)

B – A dédestapolcsányi minták felszínén lévő zöld színű bevonat lekaparási porának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

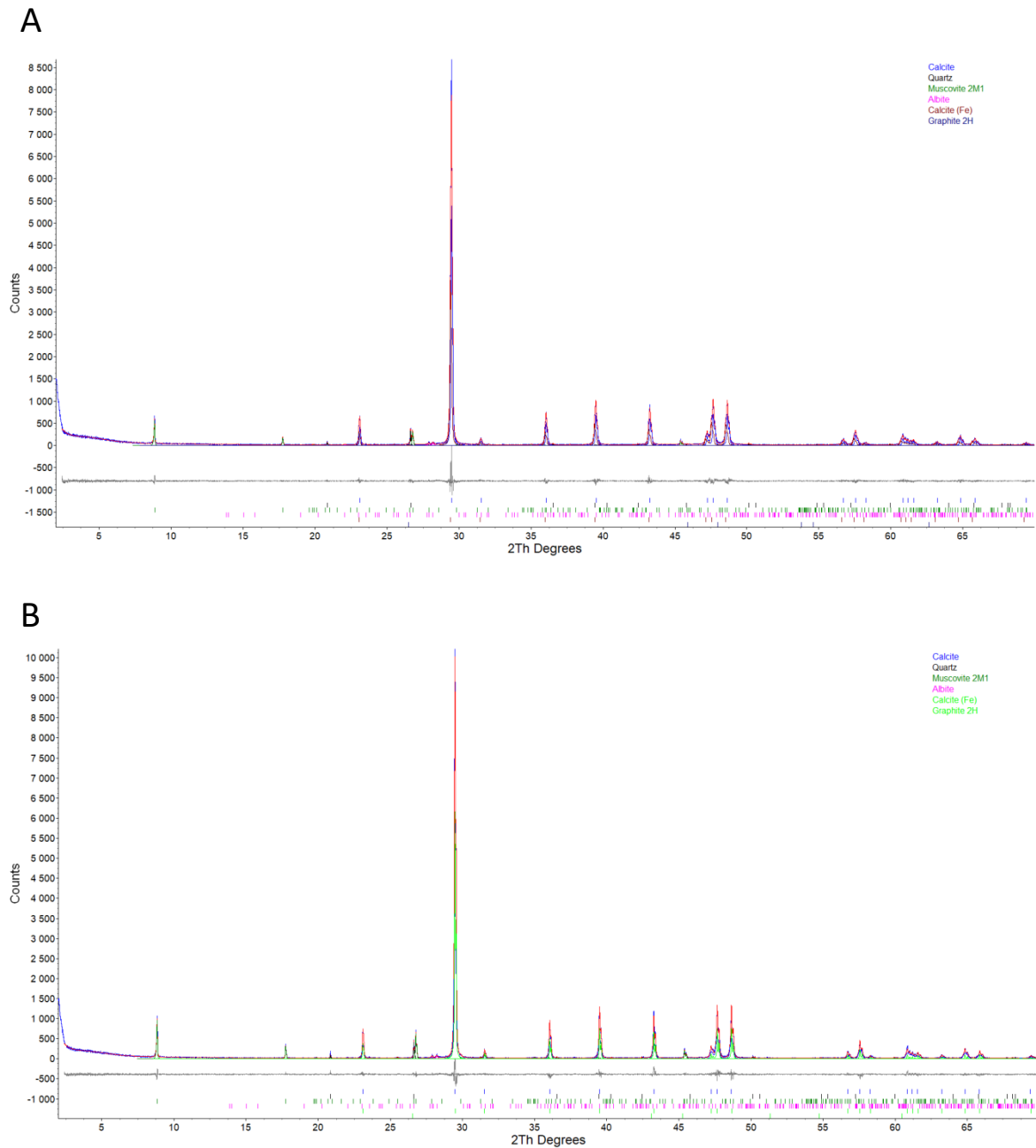
XXIV. melléklet



A – Az ultrahangos aprítással kapott minták diffraktogramjai. Szendrőlád, Helle-patak (a szerző saját szerkesztése)

B – Az ultrahangos aprítással kapott SZL-1A minta Rietveld-illesztése. Szendrőlád, Helle-patak (a szerző saját szerkesztése)

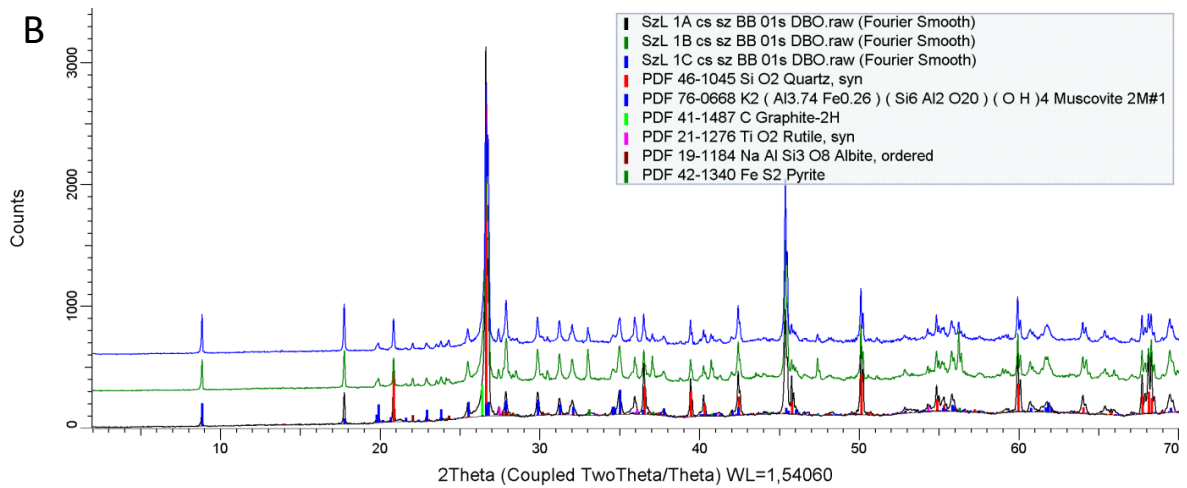
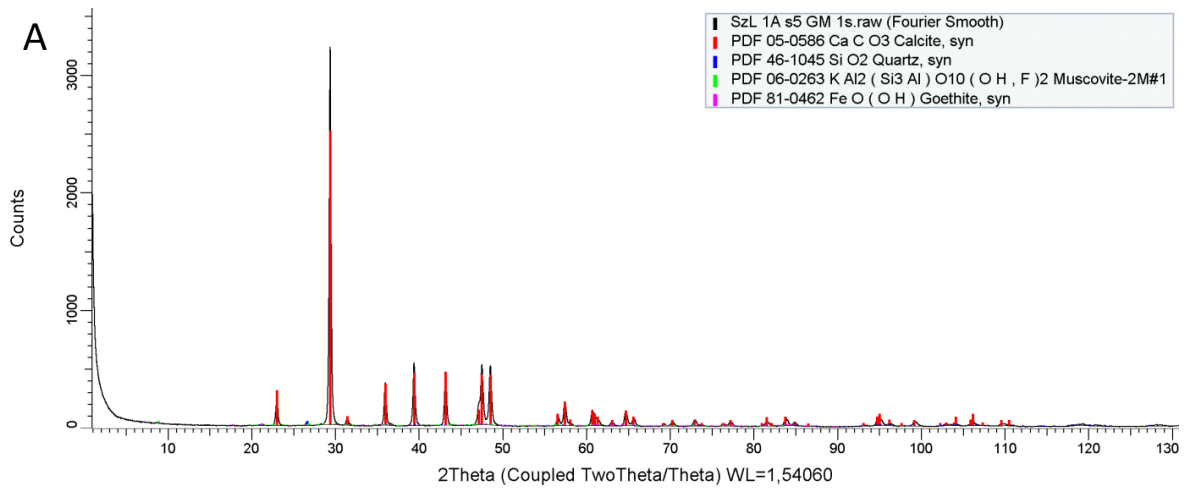
XXV. melléklet



A – Az ultrahangos aprítással kapott SZL-1B minta Rietveld-illesztése. Szendrőlád, Hellepatak (a szerző saját szerkesztése)

B – Az ultrahangos aprítással kapott SZL-1C minta Rietveld-illesztése. Szendrőlád, Hellepatak (a szerző saját szerkesztése)

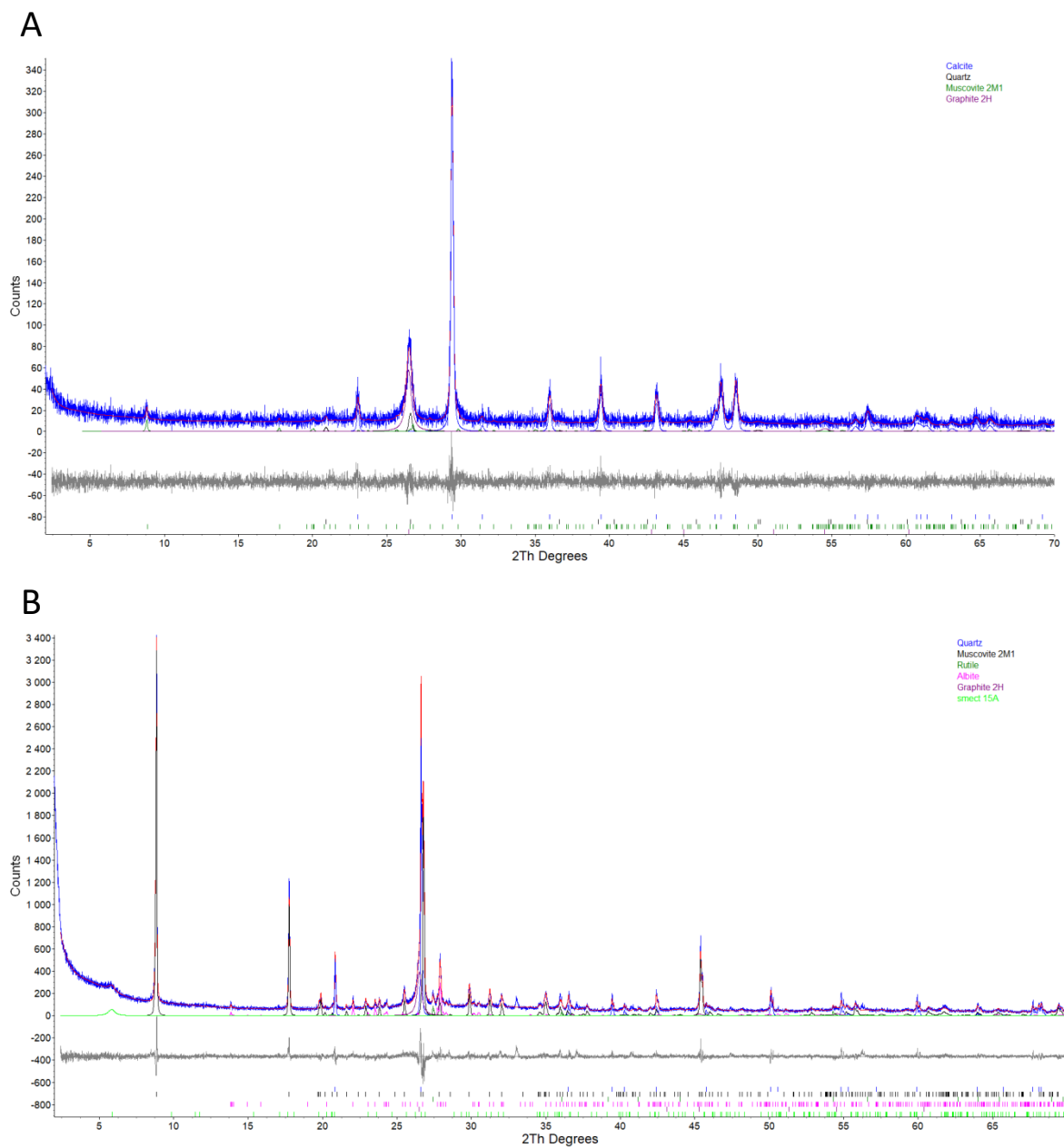
XXVI. melléklet



A – Az SZL-1A minta agyagásvány szeparációja során nyert $<5\ \mu\text{m}$ szemcseméretű frakciójának diffraktogramja. Szendrőlád, Helle-patak (a szerző saját szerkesztése)

B – A savazási kísérlet során kapott frakciók diffraktogramjai. Szendrőlád, Helle-patak (a szerző saját szerkesztése)

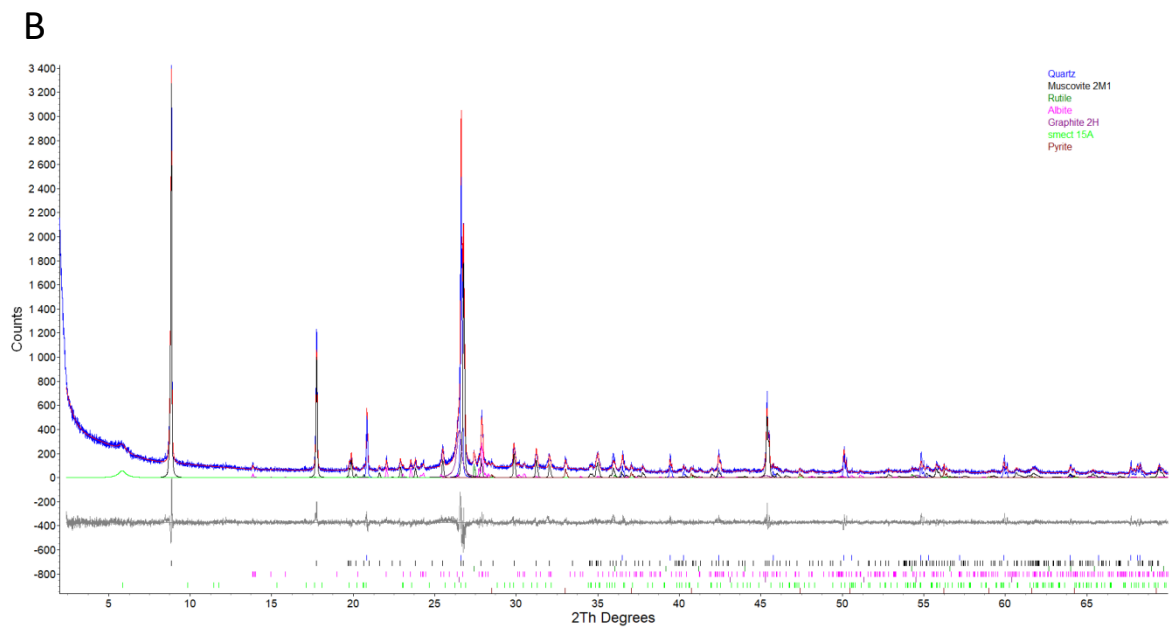
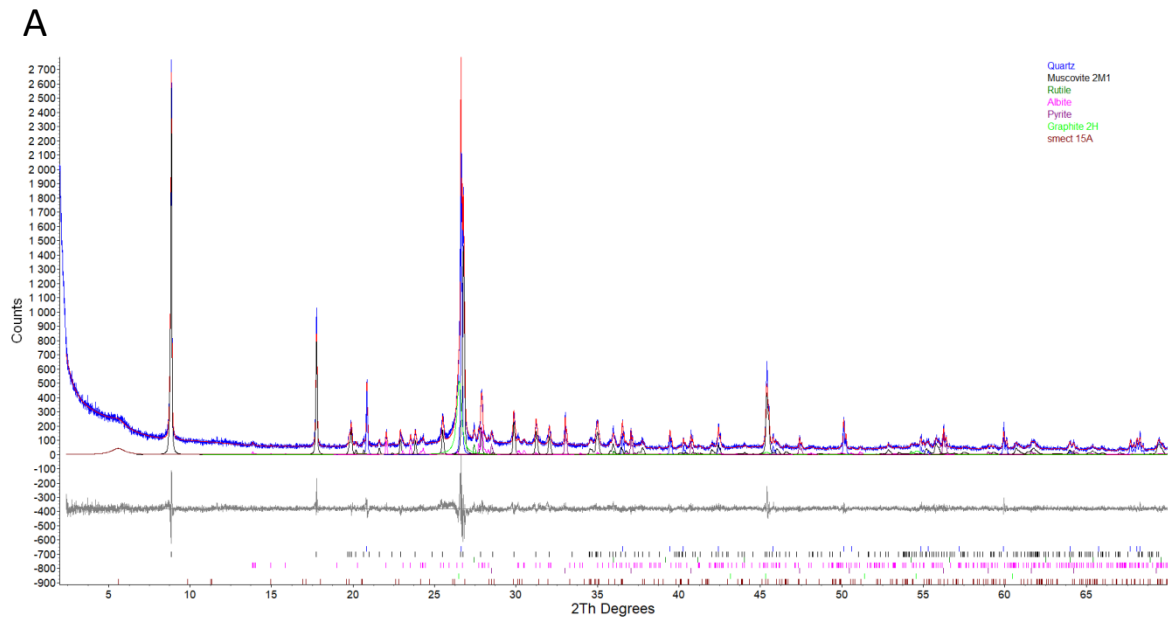
XXVII. melléklet



A – A szendrőládi SZL-1A minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

B – A szendrőládi SZL-1A savazott minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

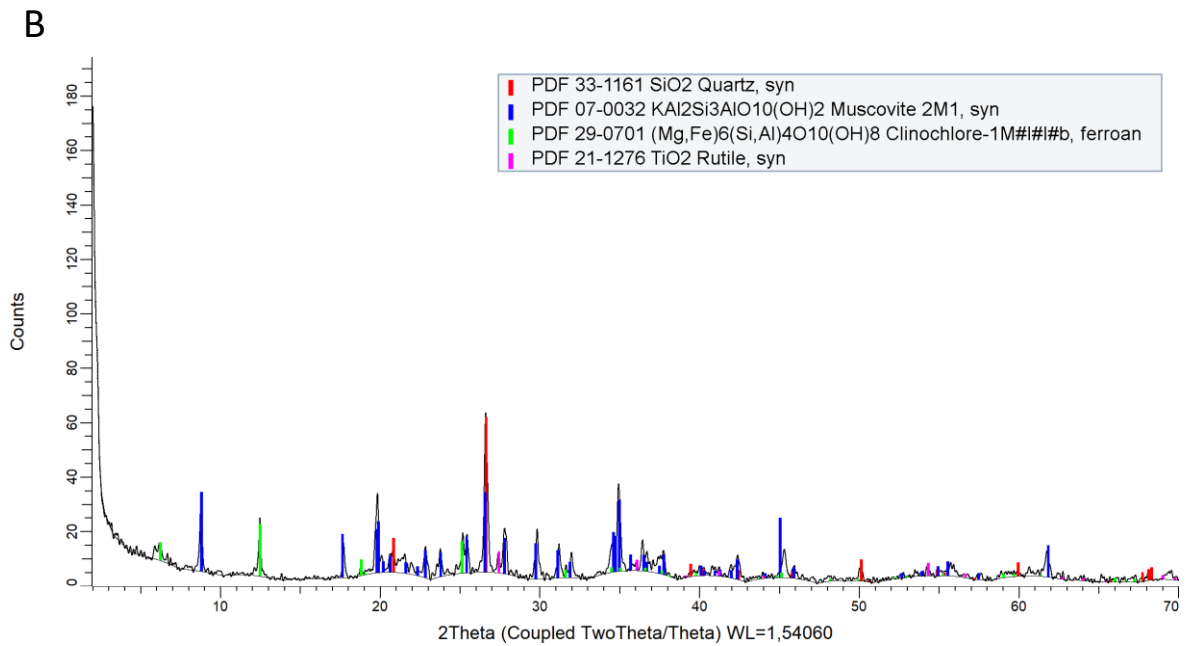
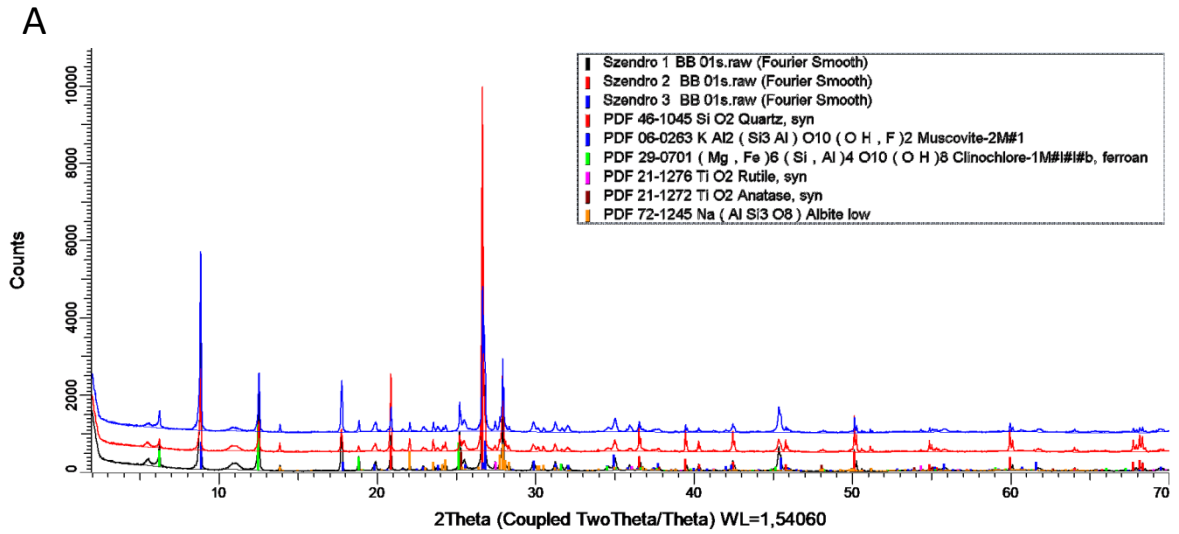
XXVIII. melléklet



A – A szendrőládi SZL-1B savazott minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

B – A szendrőládi SZL-1C savazott minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XXIX. melléklet

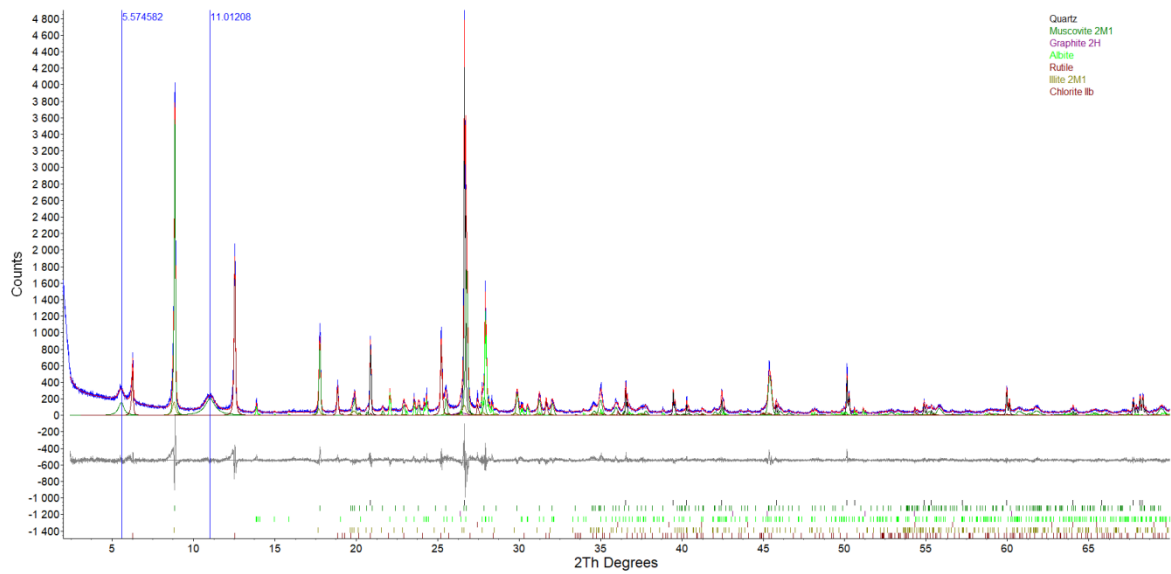


A – A szendrői minták diffraktogramjai (a szerző saját szerkesztése)

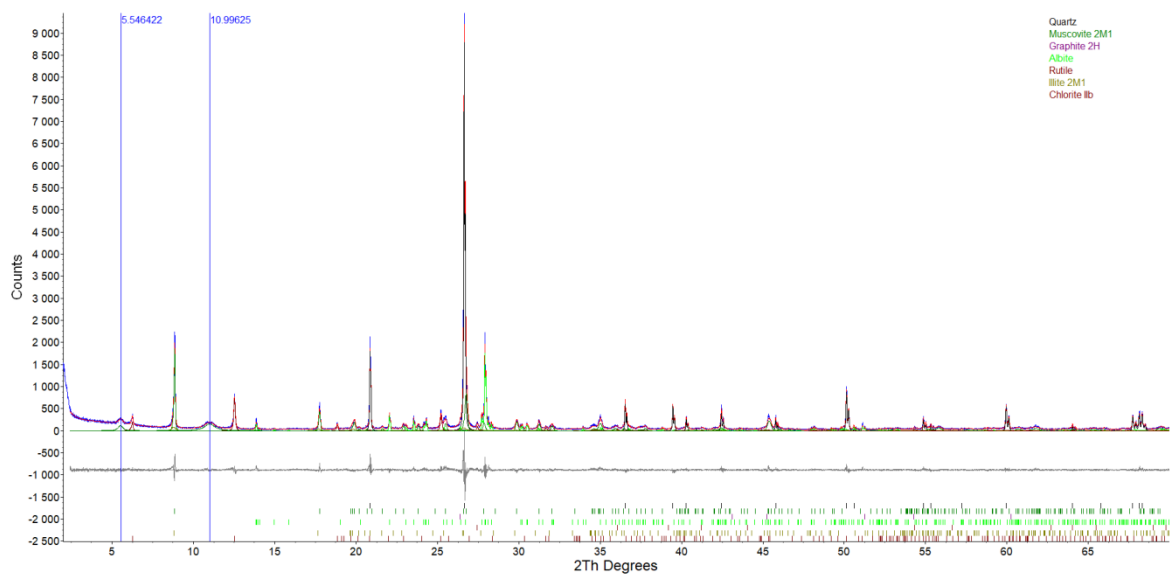
B – Az SZ-1 minta agyagásvány szeparálása során nyert frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

XXX. melléklet

A



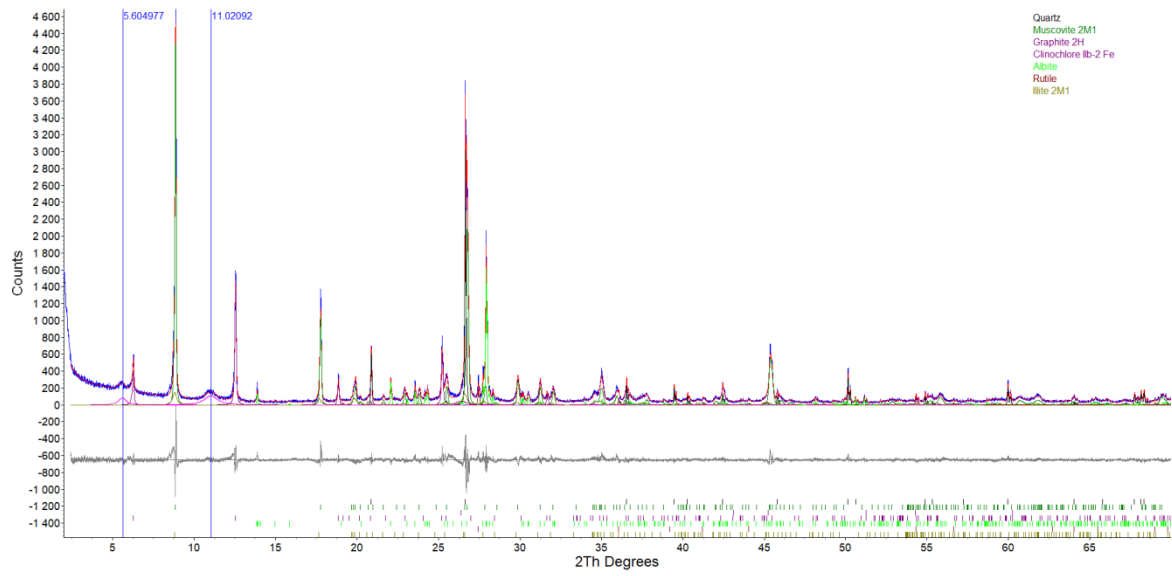
B



A – A szendrői SZ-1 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

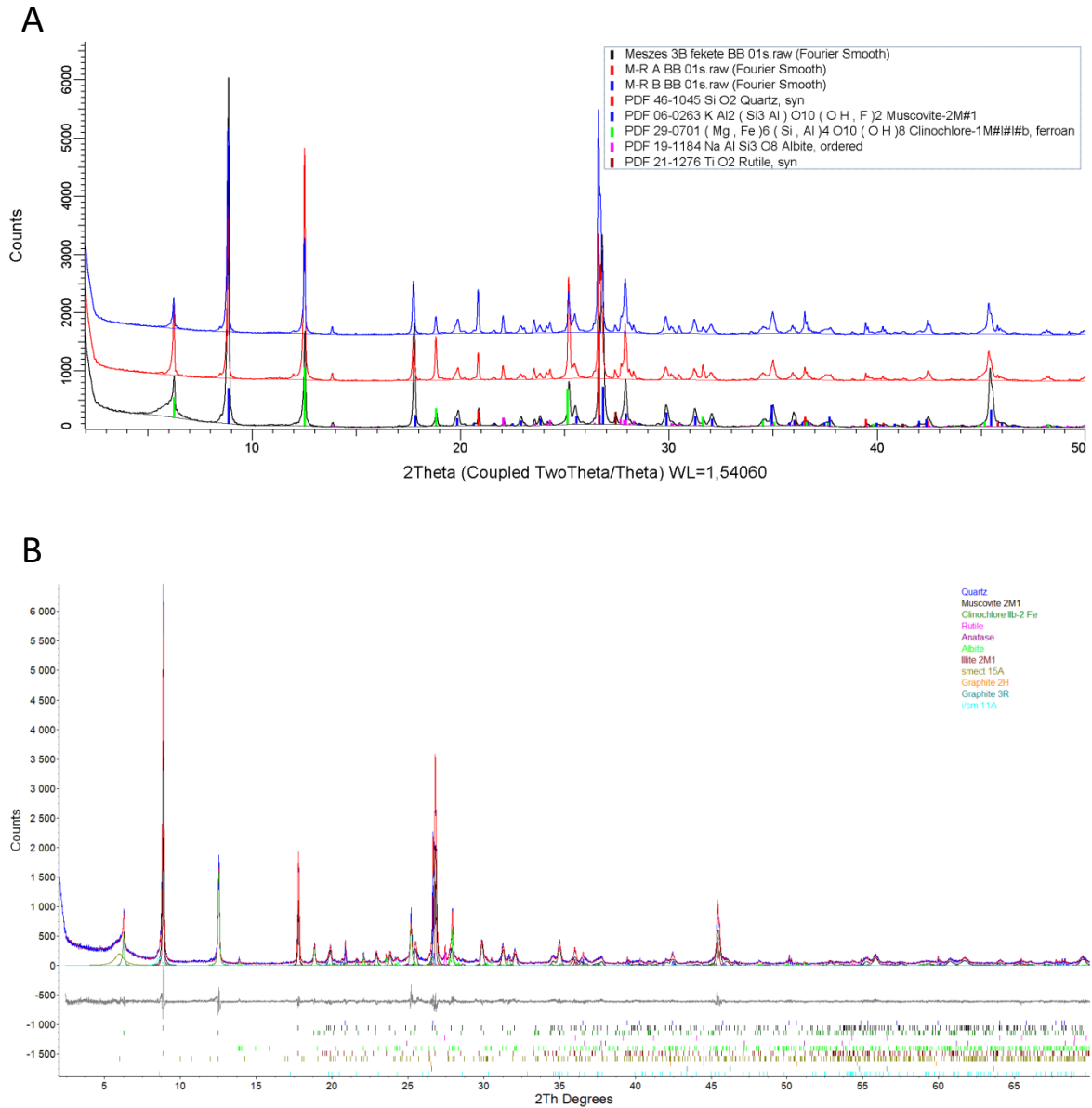
B – A szendrői SZ-2 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XXXI. melléklet



A szendrői SZ-3 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

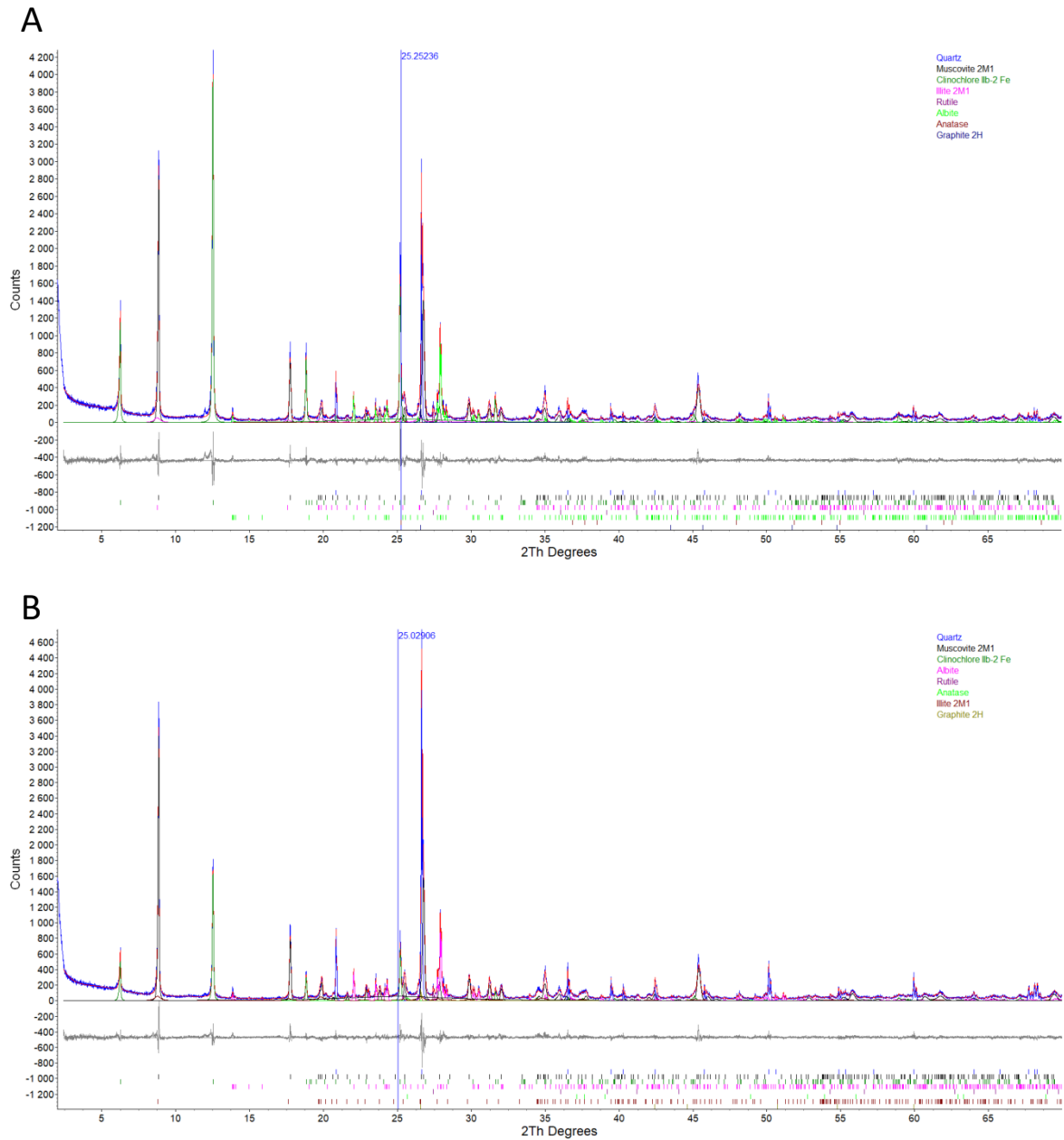
XXXII. melléklet



A – A meszesi minták diffraktogramjai. Leskóné Majoros et al. (2021) nyomán

B – A meszesi M-3B minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

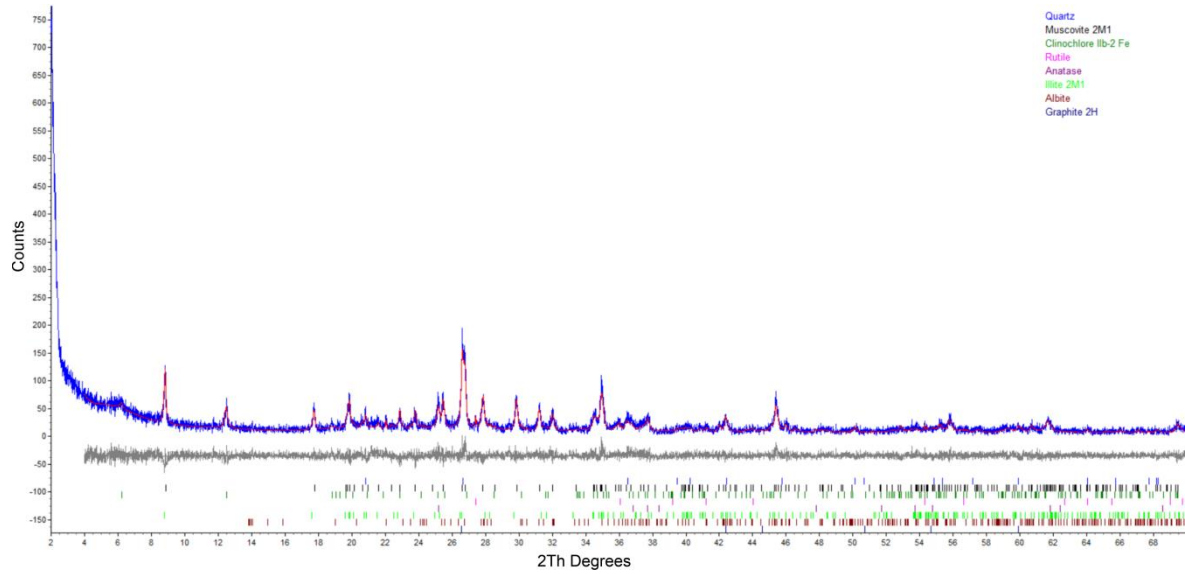
XXXIII. melléklet



A – A Meszes és Rakacaszend közötti útbevágás M-R A jelölésű mintájának Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

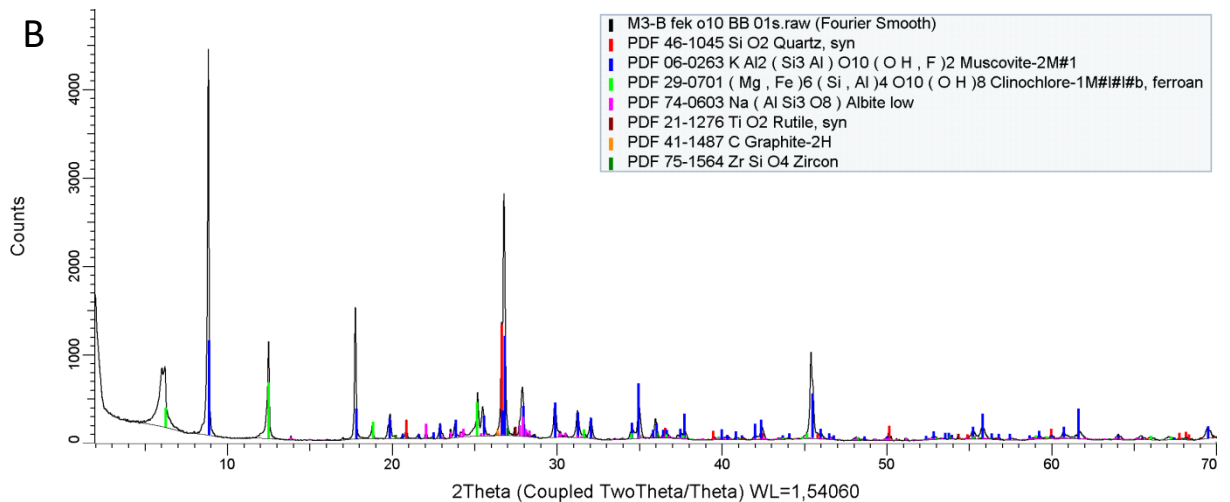
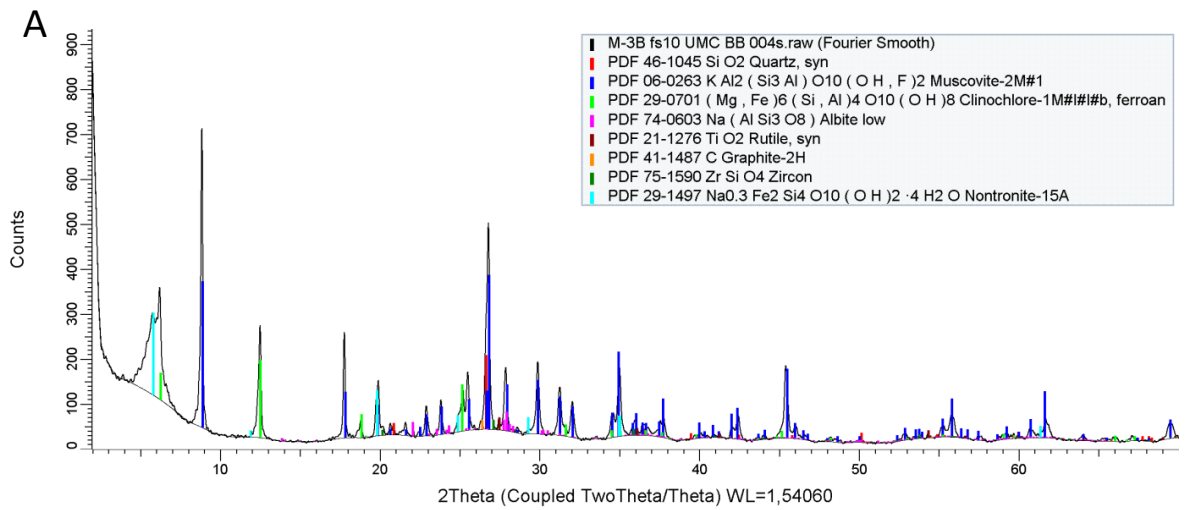
B – A Meszes és Rakacaszend közötti útbevágás M-R B jelölésű mintájának Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XXXIV. melléklet



A meszei M-3B minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

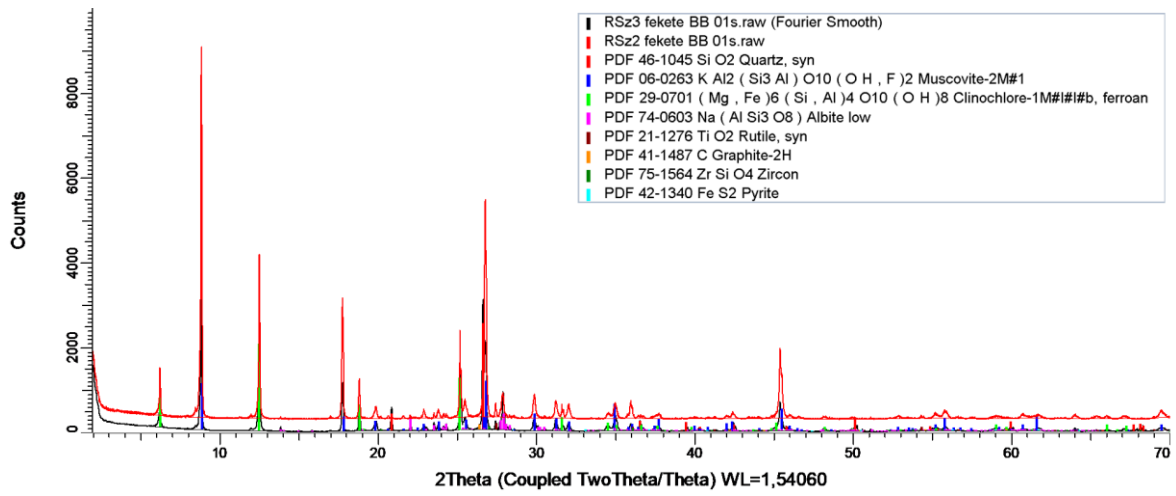
XXXV. melléklet



A – A meszesi M-3B minta szeparációja során nyert $< 10 \mu\text{m}$ szemcseméretű frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

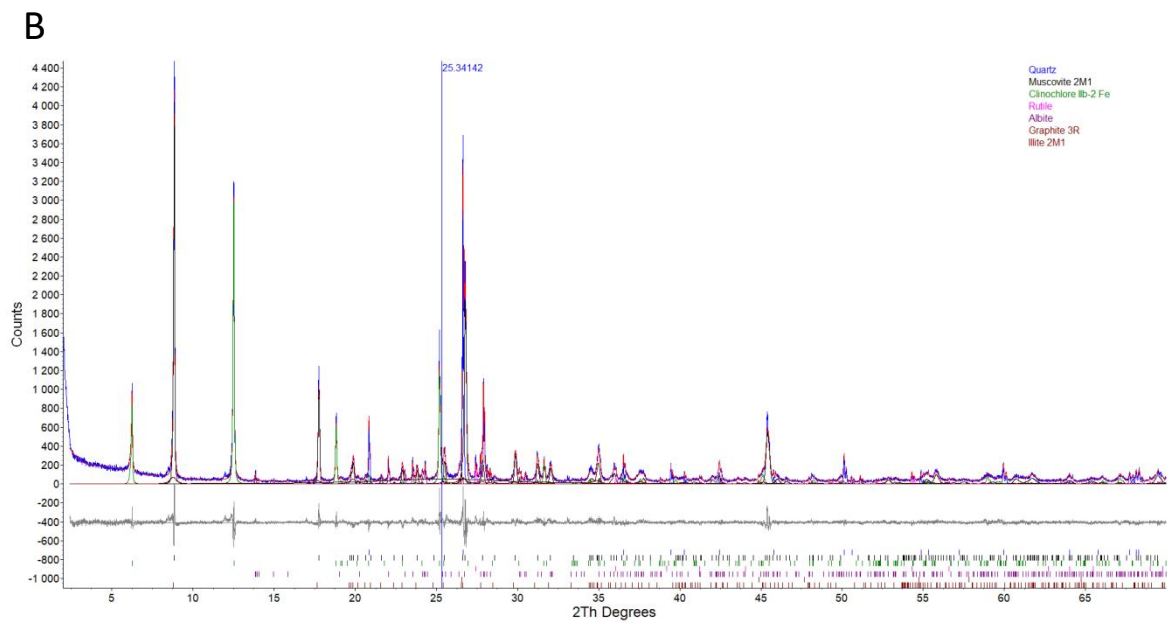
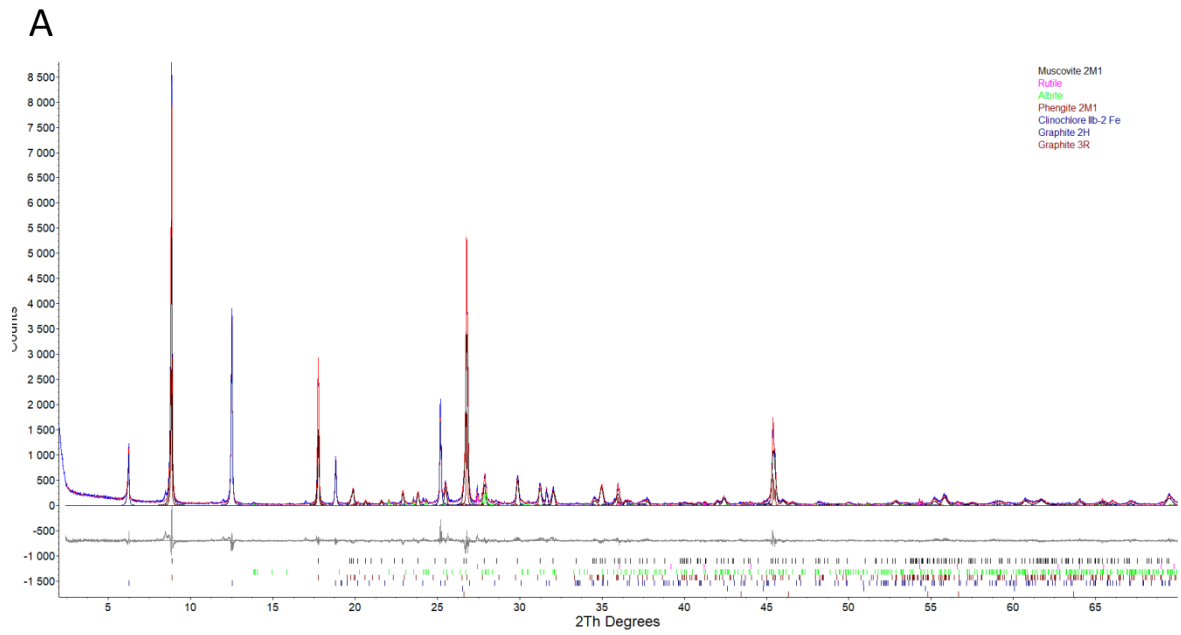
B – A meszesi M-3B minta szeparációja során nyert $> 10 \mu\text{m}$ szemcseméretű frakciójának diffraktogramja (a szerző saját szerkesztése)

XXXVI. melléklet



A rakacszendi minták diffraktogramjai (a szerző saját szerkesztése)

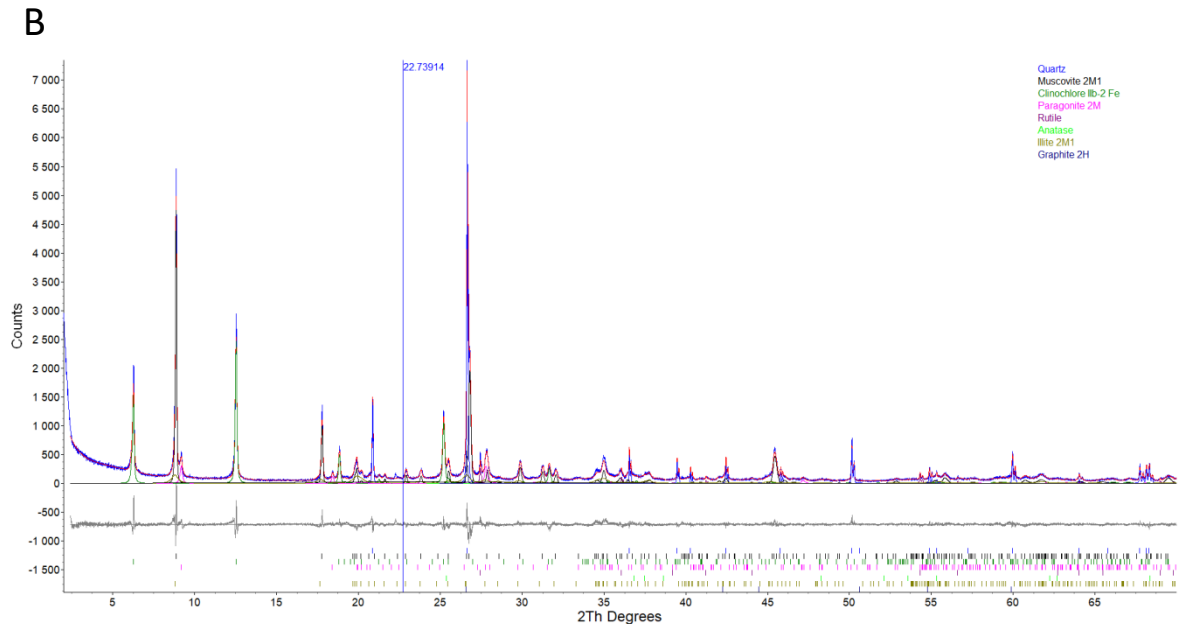
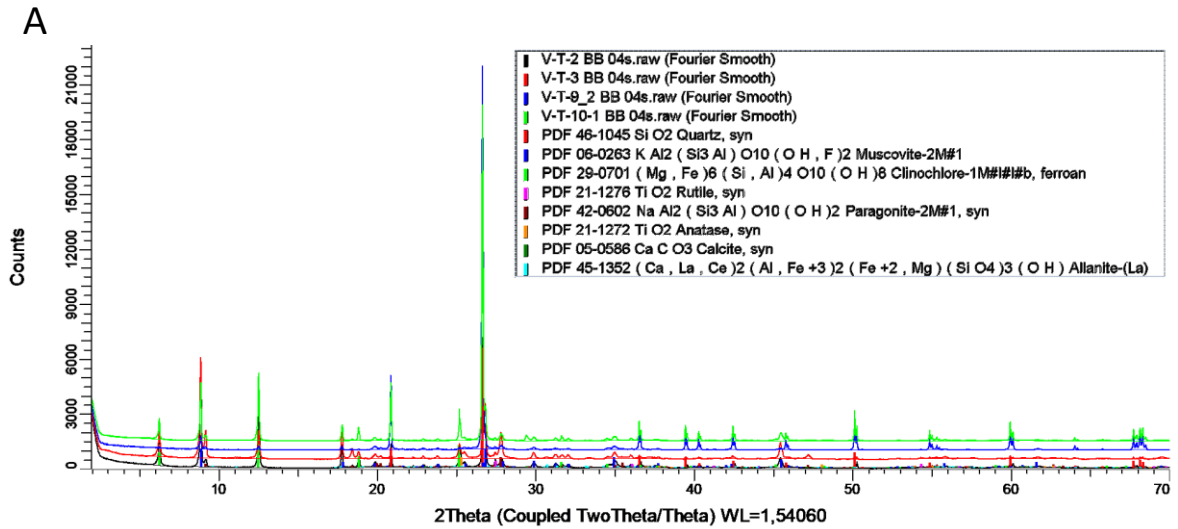
XXXVII. melléklet



A – A rakacaszendi RSZ-2 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

B – A rakacaszendi RSZ-3 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XXXVIII. melléklet

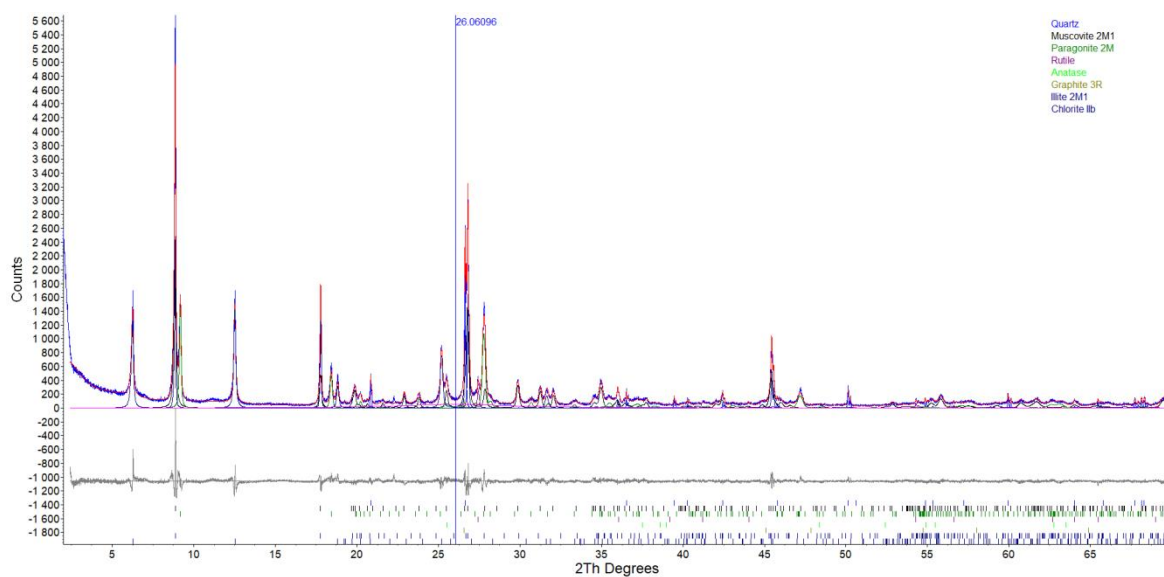


A – A velemi minták diffraktogramjai (a szerző saját szerkesztése)

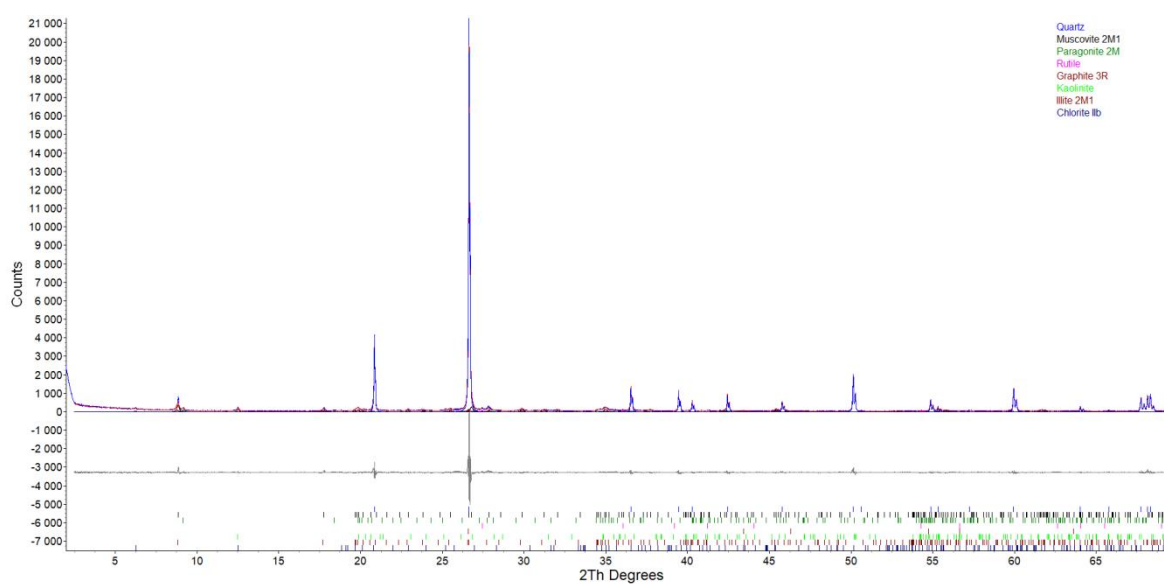
B – A velemi VT-2 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XXXIX. melléklet

A



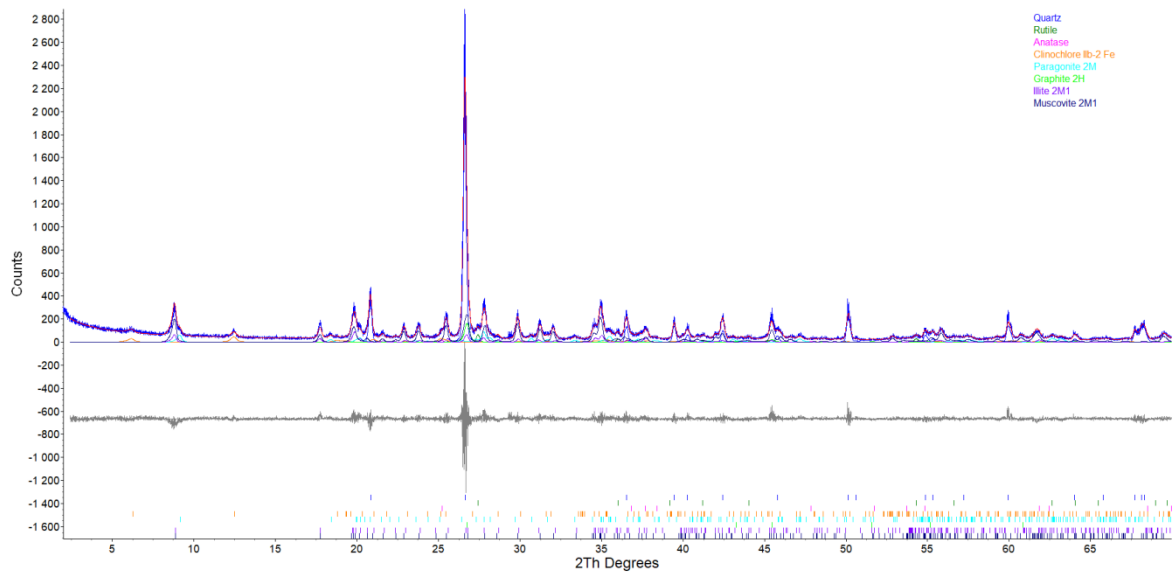
B



A – A velemi VT-3 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

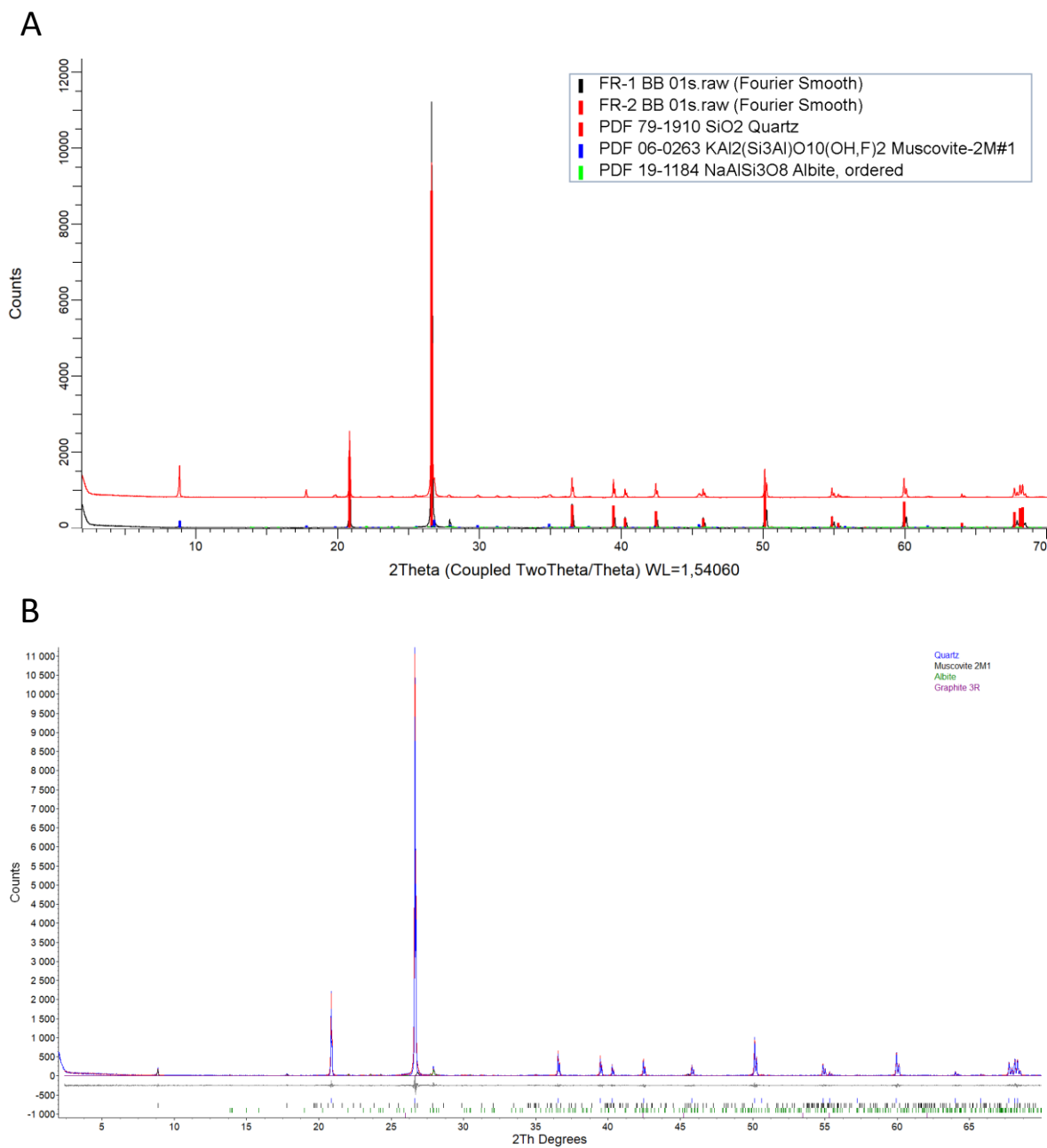
B – A velemi VT-9/2 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XL. melléklet



A velemi VT-9/2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

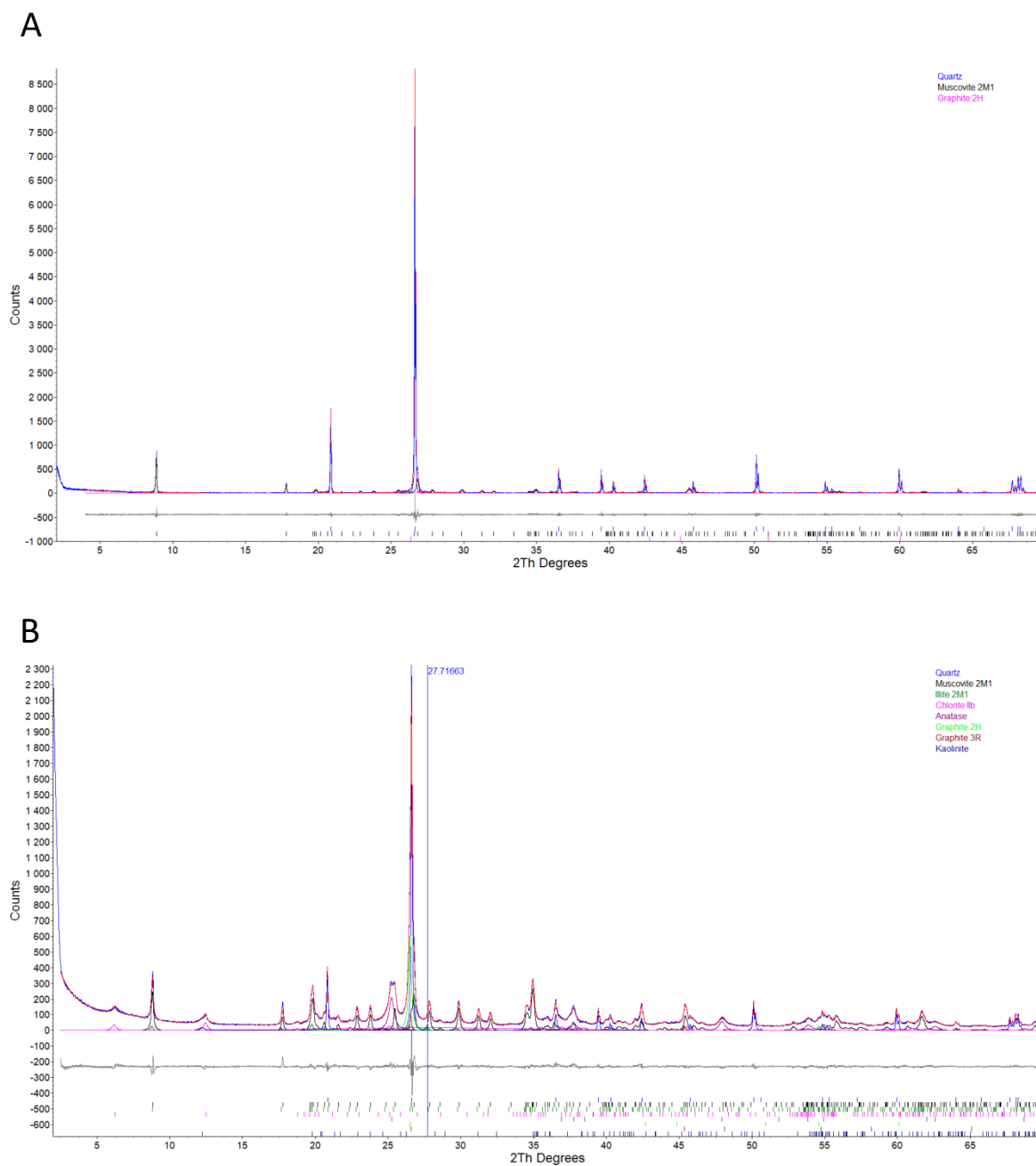
XLI. melléklet



A – A fertőrákosi minták diffraktogramjai (Leskóné Majoros et al., 2025a)

B – A fertőrákosi FR-1 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

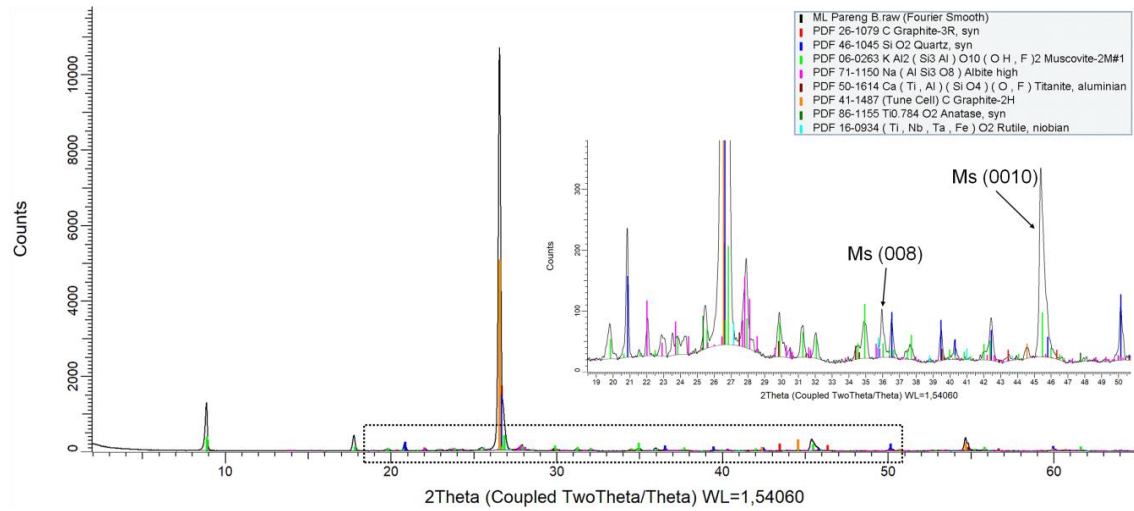
XLII. melléklet



A – A fertőrákosi FR-2 minta Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

B – A fertőrákosi FR-2 minta dúsítási kísérleténél kapott frakció Rietveld-illesztése (a szerző saját szerkesztése)

XLIII. melléklet



A páregi minta diffraktogramja. A nagyított felvétel (jobbra középen) a bekeretezett részből készült (Majoros, 2019)

XLIV. melléklet

Rietveld-illesztéssel a dédestapolcsányi és szendrői minták részletes kvantitatív kiértékelése (tömegszázalék) (a szerző saját szerkesztése)

		Dédestapolcsány				Szendrőlad										
		DTAP 1/1	DTAP 2/1	DTAP 2/1 „ezüst” frakció	DTAP 2/1 „fekete” frakció	SZL-369	SZL-371	SZL-373	SZL-1A	SZL-1B	SZL-1C	SZL-1A dúsítási frakció	SZL-1A savazott	SZL-1B savazott	SZL-1C savazott	
	Kvarc	67,4	82,2	77,0	72,3	0,7	8,7	20,9	0,8	1,6	1,9	4,7	38,6	25,2	24,7	
Rétegszilikátok	Muszkovit 2M1	16,6	5,9	8,0	5,9	45,3	22,8	48,8	2,4	2,0	3,3	6,0	42,9	48,7	50,6	
	Muszkovit 1M	-	-	-	-	-	-	1,6	-	-	-	-	-	-	-	
	Illit 2M1	1,9	0,8	7,0	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Kaolinit	1,3	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	I/Sm 11A	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Szmektit 15A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,3	2,8	2,5
	Klorit Iib	-	-	-	-	1,7	4	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Biotit 1M	0,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Karbonát	Kalcit	-	-	-	-	44,7	57,5	17,2	83,6	53,8	41,3	79,0	-	-	-	
	Kalcit (Fe)	-	-	-	-	-	-	-	10,8	40,6	51,9	-	-	-	-	
	Dolomit	-	-	-	-	1,6	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Sziderit	-	-	-	-	0,9	0,9	0,7	-	-	-	-	-	-	-	
TiO ₂	Anatáz	-	-	-	-	0,5	0,4	1,7	-	-	-	-	-	-	-	
	Rutil	0,2	0,2	-	-	1,3	0,9	2	-	-	-	-	1,1	1,0	1,4	
Grafit	Grafit 3R	-	-	-	-	1,5	1,9	3	-	-	-	-	-	-	-	
	Grafit 2H	3,9	2,1	8,0	2,1	-	-	-	2,2	0,8	0,5	10,3	8,0	9,8	8,3	
	Pirit	-	-	-	-	1,9	1,5	-	-	-	-	-	-	4,0	2,1	
	Albit	-	-	-	-	-	-	-	0,2	1,2	1,1	-	3,1	8,5	10,4	
	Amorf	8	8	-	12,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

XLV. melléklet

Rietveld-illesztéssel a szendrői, meszesi, rakacaszendi, velemi, fertőrákosi és parengi minták részletes kvantitatív kiértékelése (tömegszázalék) (a szerző saját szerkesztése)

		Szendrő			Meszes				Rakacaszend		Velem				Fertőrákos			Pareng	
		SZ-1	SZ-2	SZ-3	M-3B	M-R A	M-R B	M-3B dúsítási frakció	RSZ-2	RSZ-3	VT-2	VT-3	VT-9/2	VT-9/2 dúsítási frakció	FR-1	FR-2	FR-2 dúsítási frakció		
	Kvarc	25,8	44,0	17,0	8,3	12,1	18,1	8,2	-	14,1	23,6	8,6	74,0	29,0	91,4	76,4	18,5	18,3	
Rétegszilikátok	Muszkovit 2M1	34,9	22,7	40,4	59,7	33,8	33,3	55,6	73,1	36,7	29,2	48,6	11,8	34,2	3,0	17,9	37,4	35,6	
	Illit 2M1	9,3	6,5	13,2	4,0	13,9	11,3	12,0	-	12,5	23,6	0,9	8,7	10,4	-	-	4,2	6,5	
	Kaolinit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	-	-	-	3,5	-
	I/Sm 11A	-	-	-	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Szmektit 15A	-	-	-	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Klorit IIb	5,1	3,0	4,8	8,0	11,5	5,6	10,2	8,7	10,4	6,9	9,1	2,3	6,3	-	-	7,8	-	
	Fengit 2M1	-	-	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Paragonit 2M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,2	20,0	0,9	10,3	-	-	-	-	-
	Agyagásványszerű	7,0	5,2	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO₂	Anatáz	-	-	-	0,5	0,4	0,6	1,8	-	-	0,1	1,1	-	0,3	-	-	8,4	-	
	Rutil	1,2	0,8	1,6	0,9	0,9	0,7	0,9	1,7	1,3	1,8	1,3	1,2	1,2	-	-	-	-	
Grafit	Grafit 3R	-	-	-	0,4	-	-	-	0,5	0,4	-	0,4	0,3	-	1,2	-	0,9	3,2	
	Grafit 2H	3,5	2,6	4,5	2,3	1,4	0,9	7,9	3,5	-	1,9	-	-	8,3	-	5,7	6,7	23,8	
	Albit	13,2	15,2	13,5	8,0	14,7	14,7	3,4	5,4	10,7	-	-	-	-	4,4	-	-	11,9	
	Titanit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7	
	Amorf	-	-	-	-	11,3	14,8	-	-	13,9	8,7	10,0	-	-	-	-	12,6	-	

XLVI. melléklet

Az XRF mérés során, a mintákon végzett főelem arány meghatározás eredménye (tömegszázalék). Mindegyik főelem a K-alfa vonalon lett meghatározva (a szerző saját szerkesztése)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	LOI
<i>Detektálási határ</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,005</i>	<i>0,005</i>	<i>0,005</i>	<i>0,005</i>	
Dédestap. 1. feltárás	80,30	5,20	0,40	0,04	0,06	0,95	0,49	0,003	0,39	0,014	0,14	12,01
Dédestap. 2. feltárás	81,70	5,80	0,56	0,18	0,06	1,03	0,39	0,003	0,493	0,017	0,69	9,08
Szendrőlád-369	31,50	17,50	1,56	18,60	0,48	4,32	3,64	0,03	1,58	0,128	1,04	19,62
Szendrőlád-371	33,10	16,10	1,79	19,40	0,42	3,67	5,07	0,035	1,21	0,11	2,24	16,86
Szendrőlád-373	39,90	25,00	1,88	10,00	0,67	5,56	4,70	0,016	2,27	0,108	2,47	7,43
Pareng	54,50	16,10	1,51	0,09	0,87	5,52	1,27	0,016	0,755	0,025	1,64	17,70
Meszes-2/2	53,40	22,00	2,60	0,32	0,63	5,26	8,33	0,153	0,931	0,147	0,006	6,22
Meszes-3B	49,60	26,70	2,60	0,61	0,95	6,28	7,02	0,064	1,263	0,114	0,000	4,80
Meszes-Rakacaszend A	47,90	25,00	3,27	0,42	1,16	4,93	9,70	0,055	1,247	0,098	0,000	6,22
Meszes-Rakacaszend B	55,40	21,00	2,50	0,55	1,32	3,79	7,80	0,047	1,021	0,087	0,005	6,48
Fertőrákos 1. feltárás	91,63	5,90	0,28	0,14	0,60	0,83	0,41	0,015	0,082	0,133	0,008	0,01
Fertőrákos 2. feltárás	82,70	11,70	0,95	0,05	0,22	2,93	0,94	0,010	0,316	0,015	0,005	0,15
Velem 2. feltárás	48,90	24,80	3,07	0,05	1,39	4,45	9,41	0,236	1,437	0,068	0,007	6,15
Velem 6. feltárás	56,40	23,70	2,38	0,06	1,34	4,54	6,80	0,113	1,034	0,047	0,008	3,59
Velem 8. feltárás	65,70	19,80	1,94	0,11	1,18	3,54	4,26	0,065	0,751	0,052	0,007	2,65
Velem 9/2. feltárás	70,90	16,60	1,49	0,19	1,30	2,52	3,42	0,058	0,622	0,056	0,007	2,87

XLVII. melléklet

Az XRF mérés során, a mintákon végzett nyomelem tartalom meghatározás eredménye (ppm). A detektálási határ a báriumnál 25 ppm, a többi nyomelemnél 10 ppm (a szerző saját szerkesztése)

	Cu	Zn	Pb	Rb	Sr	Ba	As	Cr	Ni	Zr
<i>Mért vonal</i>	<i>Kα</i>	<i>Kα</i>	<i>Lβ_1</i>	<i>Kα</i>	<i>Kα</i>	<i>Lα</i>	<i>Kβ_1</i>	<i>Kα</i>	<i>Kα</i>	<i>Kα</i>
Dédestapolcsány 1. feltárás	58	59	38	36	32	1604	17	74	21	61
Dédestapolcsány 2. feltárás	19	13	41	31	19	1682	23	136	20	59
Szendrőlád – 369	51	138	10	46	497	30	12	108	67	198
Szendrőlád – 371	71	91	13	36	423	<25	<10	77	44	157
Szendrőlád – 373	41	195	24	76	369	43	11	146	53	279
Pareng	105	133	31	186	18	879	<10	97	18	176
Meszes-2/2	19	141	<10	154	111	1047	<10	110	38	134
Meszes-3B	28	140	<10	199	155	1183	<10	133	38	287
Meszes-Rakacaszend A	19	175	<10	153	167	932	35	137	45	174
Meszes-Rakacaszend B	30	153	11	130	186	720	23	115	66	182
Fertőrákos 1. feltárás	20	10	10	41	429	174	<10	25	13	158
Fertőrákos 2. feltárás	25	21	19	149	69	524	<10	69	18	199
Velem 2. feltárás	114	152	<10	183	97	756	<10	164	92	174
Velem 6. feltárás	73	110	<10	205	86	766	24	130	64	142
Velem 8. feltárás	49	87	14	178	94	547	<10	95	51	136
Velem 9/2. feltárás	32	70	18	123	85	432	<10	81	32	112

XLVIII. melléklet

Az XRF mérés során, a mintákon végzett szemi-kvantitatív kiértékelés eredménye (ppm)
(a szerző saját szerkesztése)

	V	Ga	Nb	Th
Dédestapolcsány 1. feltárás	394	14	-	-
Dédestapolcsány 2. feltárás	696	19	-	-
Szendrőlád – 369	700	27	64	48
Szendrőlád – 371	435	35	46	55
Szendrőlád – 373	561	42	82	54
Pareng	473	35	18	-
Meszes-2/2	-	32	16	-
Meszes-3B	-	45	18	-
Meszes-Rakacaszend A	-	45	26	-
Meszes-Rakacaszend B	-	31	24	-
Fertőrákos 1. feltárás	-	-	-	-
Fertőrákos 2. feltárás	187	26	13	28
Velem 2. feltárás	228	34	25	39
Velem 6. feltárás	150	30	18	39
Velem 8. feltárás	171	32	14	39
Velem 9/2. feltárás	118	21	17	27

XLIX. melléklet

Az ICP-MS mérés során, a mintákon végzett nyomelem tartalom meghatározás eredménye (ppm). A második oszlopban feltüntetve a PAAS értékek (PAAS értékek Taylor és McLennan (1985) után) (a szerző saját szerkesztése)

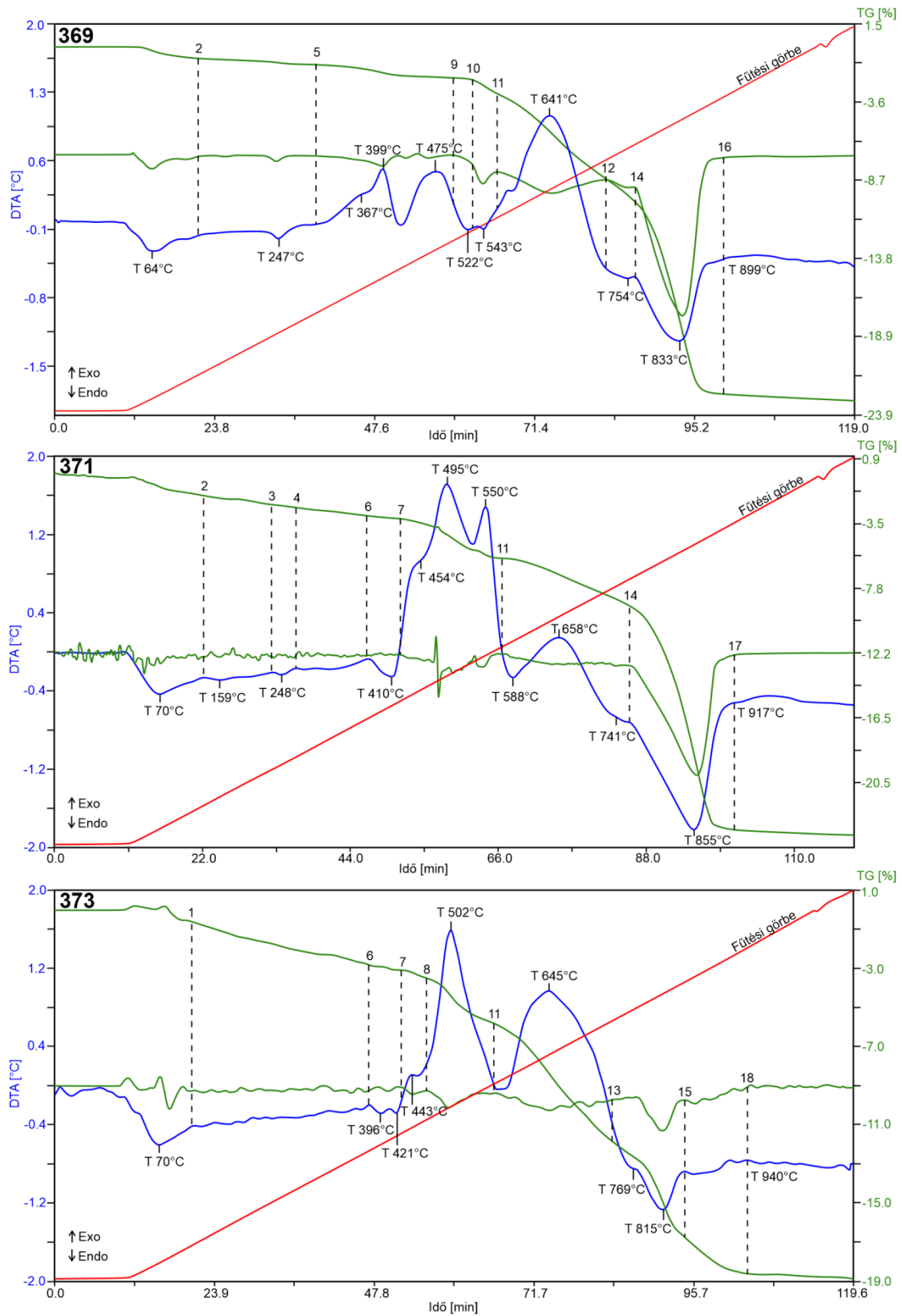
	PAAS	Dédestapolcsány 1. feltárás	Dédestapolcsány 2. feltárás	Szendrőlád 369	Szendrőlád 371	Szendrőlád 373	Szendrőlád 1C feltárás	Szendró 3. feltárás
Ba	650	1720	1255	158,5	154,5	259	46,4	521
Ce	80	32,6	36,8	126,5	47,4	98,4	15,7	84,3
Cr	110	50	100	110	90	130	10	110
Eu	1,1	0,62	0,44	2,75	1,36	2,36	0,4	1,5
Gd	4,7	2,17	2,07	10,3	5,13	8,79	1,38	6,86
Hf	5	1	1,1	4,3	3,9	7,6	1,1	5,7
La	38	17,9	26,2	79,8	32	67,6	8,7	41,8
Lu	0,43	0,15	0,29	0,42	0,39	0,51	0,08	0,48
Nb	19	5,9	5,5	38,7	38,5	61,9	1,3	16,1
Nd	32	15,7	18,7	72,8	25,6	55,1	7,3	36,9
Rb	160	40,7	29,4	61,2	61,5	107,5	8,2	134,5
Sm	5,6	2,79	2,37	13,25	5,2	10,2	1,55	7,42
Sr	200	59,2	18,4	549	584	482	886	96,9
Ta	1,2	0,4	0,4	2,3	2,2	3	0,1	1,1
Tb	0,77	0,27	0,3	1,3	0,86	1,21	0,22	1,03
Th	14,6	1,74	2,18	7,23	5,16	12	1,46	11,75
U	3,1	7,17	4,42	11,75	6,42	10,1	0,7	2,24
V	150	477	957	334	320	843	10	162
Y	27	7,2	19,4	32,8	30,9	33,3	8,6	33,1
Yb	2,8	0,82	1,66	2,81	2,61	3,32	0,58	3,27
Zr	210	44	48	171	171	257	42	196

L. melléklet

A szerves anyag és grafit exoterm reakciói a hozzájuk kapcsolódó tömegvesztéssel (SZL-369, SZL-371 és SZL-373 értékek Majoros et al. (2022) után)

Minta	Fázis	DTA csúcs [°C]	Hőmérséklet [°C]	Tömegvesztés [mg]	Tömegvesztés [%]
DTAP 1/1	Szerves anyag	320	201 – 478	-0,2	-0,19
	Grafit	590	492 – 752	-5,58	-5,35
DTAP 2/1	Szerves anyag	272	140 – 475	-0,3	-0,29
	Grafit	612	493 – 757	-5,12	-4,87
SZL-369	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	641	563 – 722	-5,53	-5,53
SZL-371	Szerves anyag	495	426 – 573	-2,64	-2,64
	Grafit	658	573 – 759	-3,18	-3,18
SZL-373	Szerves anyag	502	466 – 564	-2,32	-2,32
	Grafit	645	564 – 739	-6	-6
SZL-1A	Szerves anyag	298	167 – 372	-1,01	-3,36
	Grafit	696	597 – 750	-3,32	-11,05
SZL-1B	Szerves anyag	296	206 – 374	-1,42	-3
	Grafit	697	559 – 759	-7,89	-16,7
SZL-1C	Szerves anyag	282	220 – 384	-2,75	-5,57
	Grafit	678	579 – 787	-7,06	-14,31

LI. melléklet



A szendrőládi SZL-6 fűrómag mintákon végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredményei (Majoros et al., 2022 nyomán). A számokkal jelölt termális reakciók leírásai az

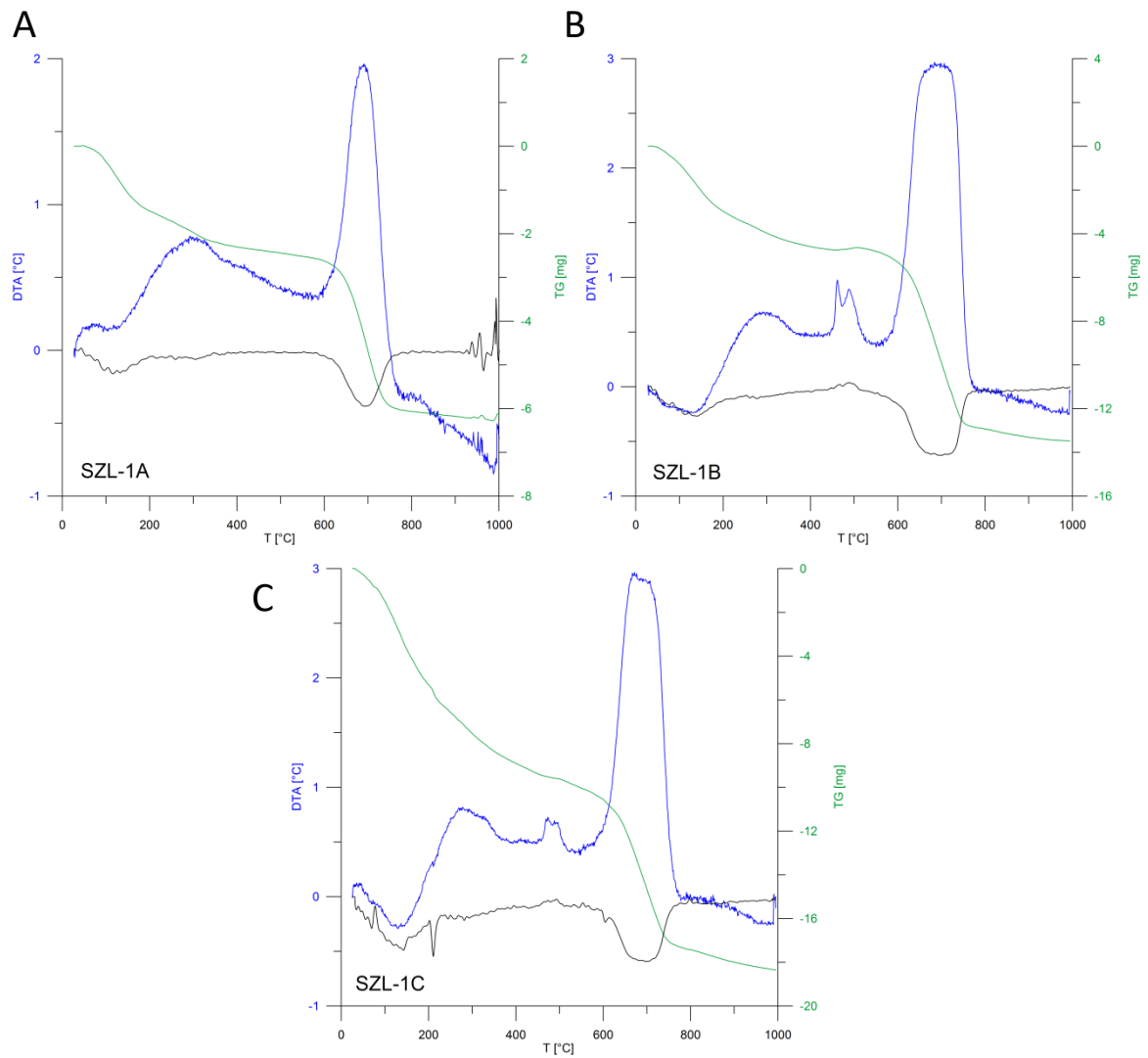
LII. mellékletben találhatóak

LII. melléklet

A szimultán DTA-TG-DTG mérés során észlelt termális reakciók a szendrőládi SZL-369, SZL-371 és SZL-373 minták esetében (°C, ↓ endo, ↑ exo, o.l. overlapped – átfedésben)
(Majoros et al., 2022 után)

Reakció	369	371	373	Fázis
1	64 ↓	70 ↓	70 ↓	Röntgenamorf szmektit, mállott
2	-	159 ↓	-	Röntgenamorf szmektit, mállott
3	247 ↓	248 ↓	-	Vermikulit nyomok
4	367 ↑	-	-	Pirit, mállott
5	-	-	396 ↓	Vermikulit nyomok
6	399 ↑	-	-	Pirit
7	-	410 ↓	421 ↓	Sziderit kalcináció
8	-	454 ↑	443 ↑	Fe ²⁺ oxidáció szideritből
9	475 ↑	-	-	Fe ²⁺ oxidáció szideritből
10	-	495 ↑	502 ↑	Részlegesen grafitosodott anyag
11	522 ↓	-	-	Illites muszkovit
12	543 ↓	-	-	Illites muszkovit
13	-	550 ↑	-	Részlegesen grafitosodott anyag
14	o.l.	588 ↓	o.l.	Kvarc
15	641 ↑	658 ↑	645 ↑	Grafit
16	754 ↓	741 ↓	769 ↓	Muszkovit, finomszemcsés, “szericit”
17	833 ↓	855 ↓	815 ↓	Mg-tartalmú kalcit

LIII. melléklet



A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredményei, Szendrőlád, Helle-patak menti feltárás (a szerző saját szerkesztése)

A – SZL-1A

B – SZL-1B

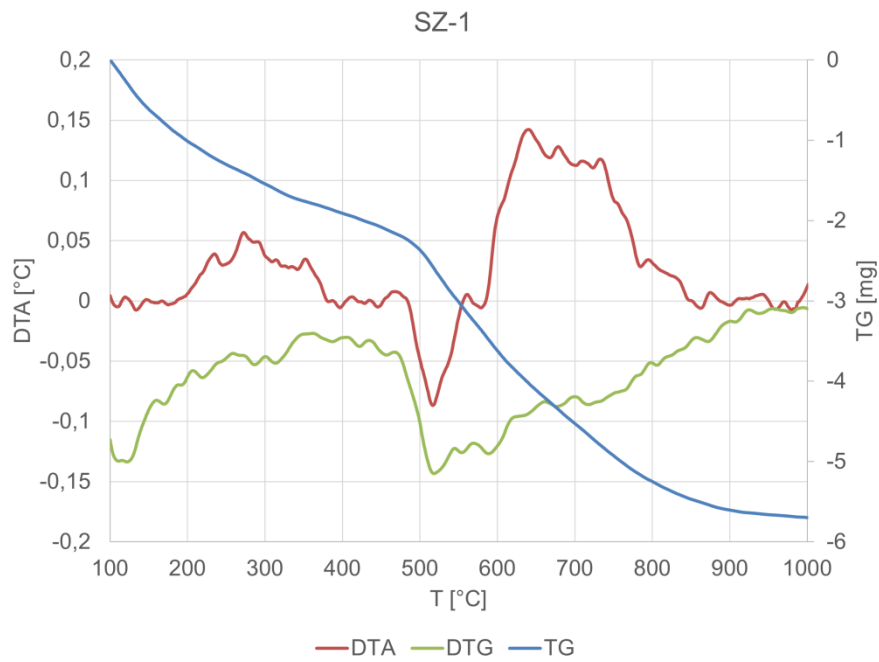
C – SZL-1C

LIV. melléklet

A szerves anyag és grafit exoterm reakciói a hozzájuk kapcsolódó tömegvesztéssel (a szerző saját szerkesztése)

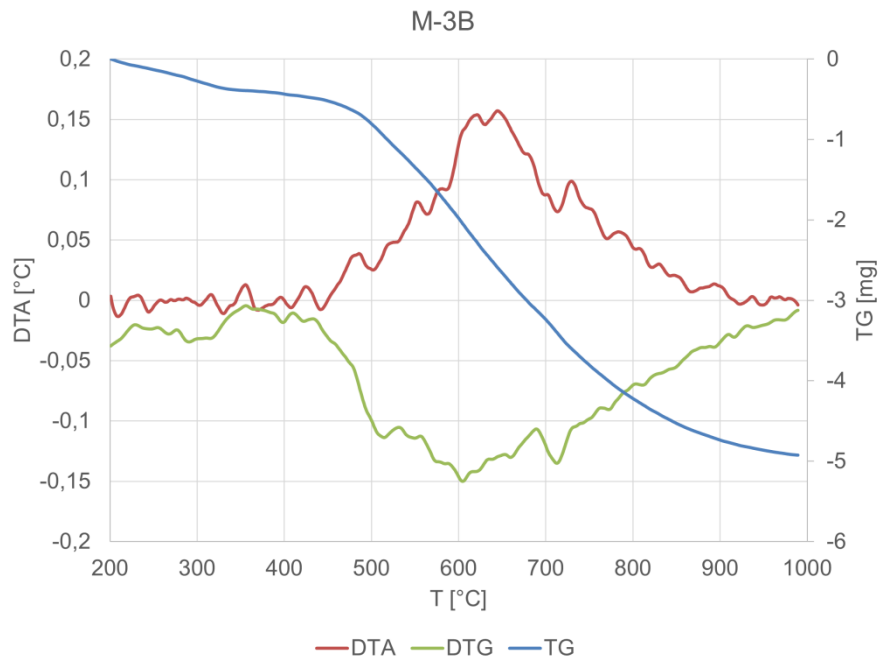
Minta	Fázis	DTA csúcs [°C]	Hőmérséklet [°C]	Tömegvesztés [mg]	Tömegvesztés [%]
Szendrő-1	Szerves anyag	273	180 – 397	-1,03	-1
	Grafit	641	579 – 863	-2,15	-2,1
M-3B	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	645	441 – 989	-4,92	-5
RSZ-2	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	658	475-960	-5,84	-5,79
VT-3	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	606	478 – 855	-4,49	-4,37
VT-9/2	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	675	494 – 925	-1,85	-1,8
FR-1	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	715	638 – 782	-0,77	-0,8
FR-2	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	650	570 – 749	-3,13	-3,09
Pareng	Szerves anyag	-	-	-	-
	Grafit	789	610 – 978	-6,96	-33,3

LV. melléklet



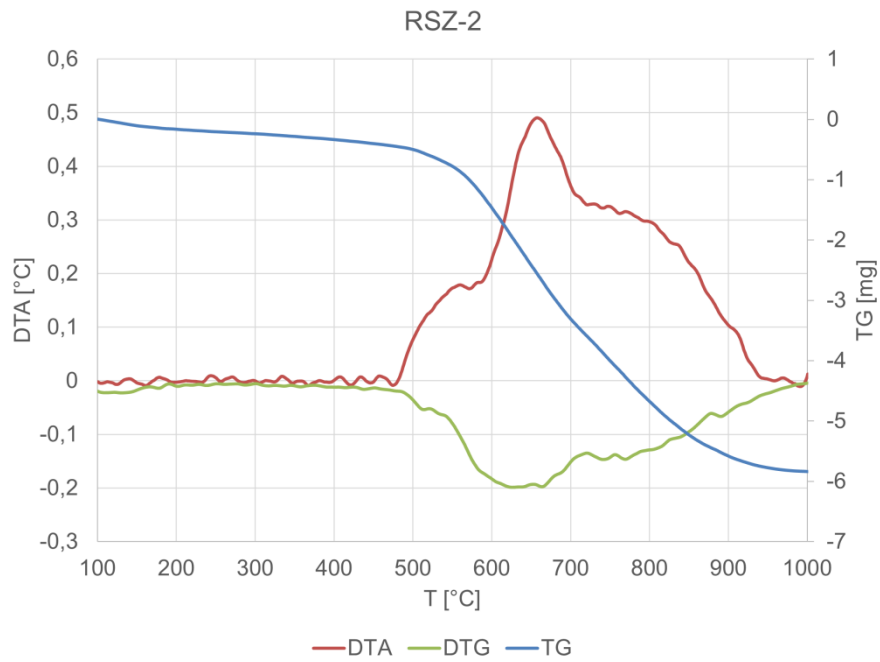
A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Szendrő 1. feltárásból származó minta
(a szerző saját szerkesztése)

LVI. melléklet



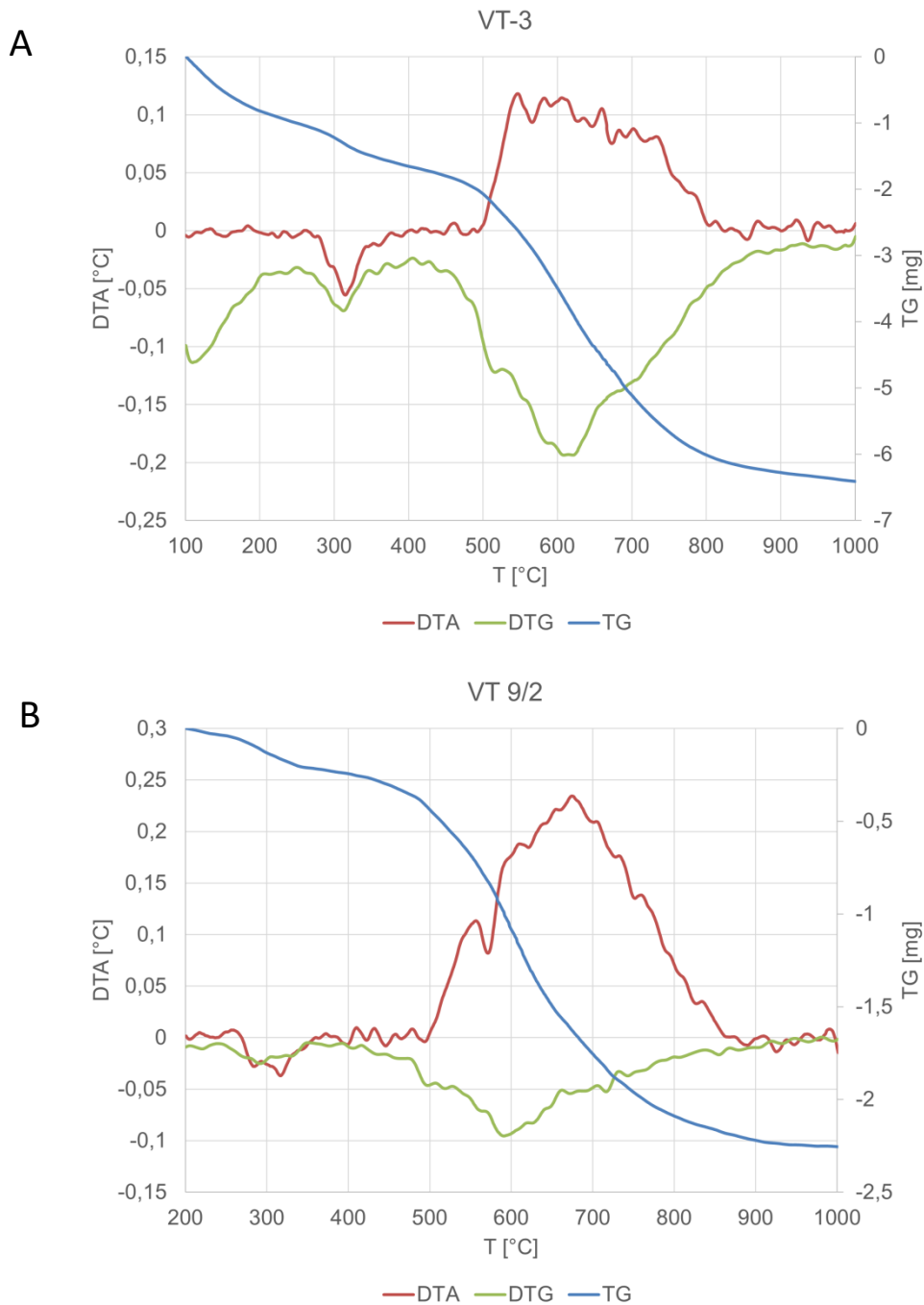
A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Meszes, M-3B feltárásból származó minta (a szerző saját szerkesztése)

LVII. melléklet



A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Rakacaszend 2. feltárásból származó minta (a szerző saját szerkesztése)

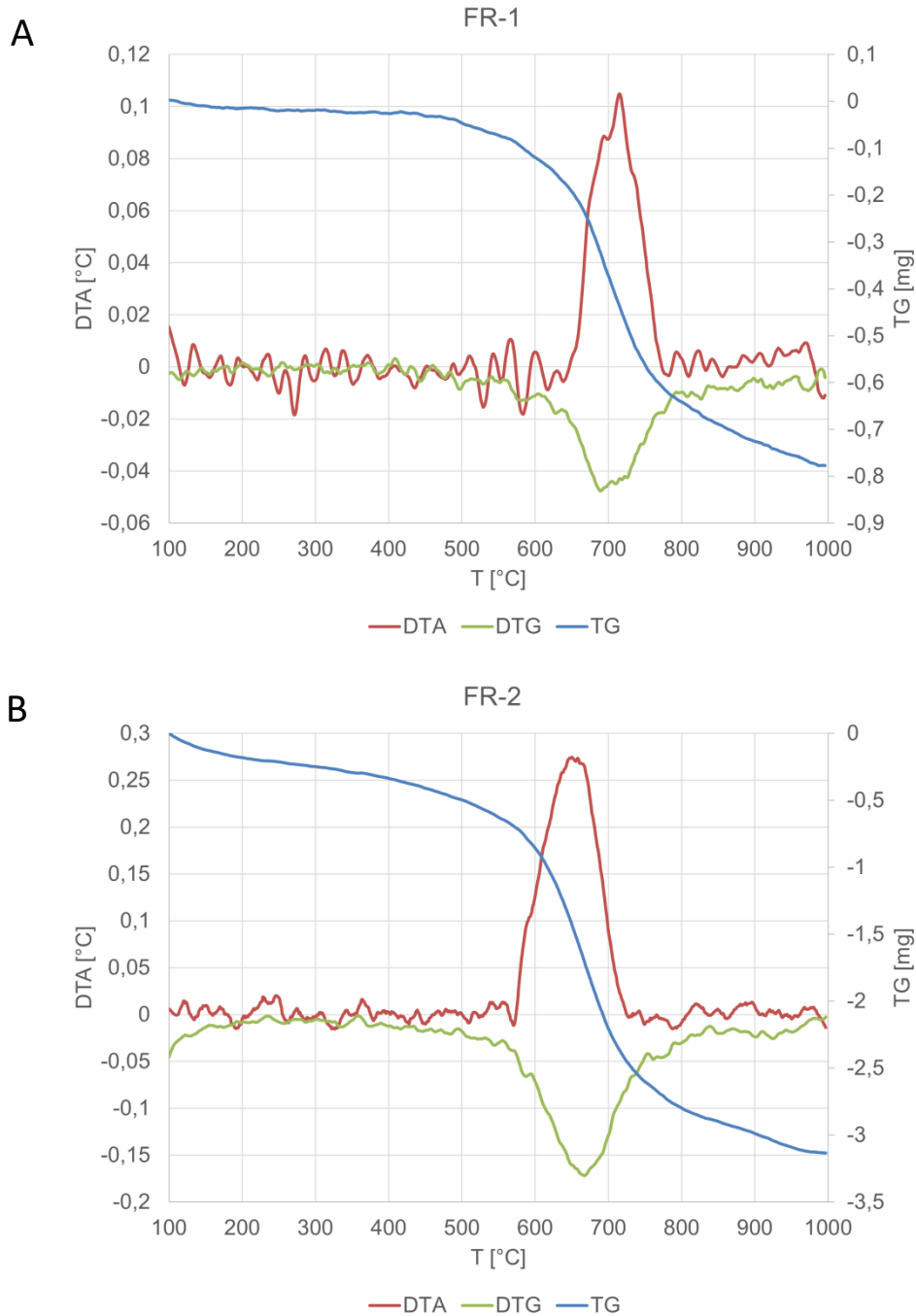
LVIII. melléklet



A – A velemi VT-3 mintán végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye (a szerző saját szerkesztése)

B – A velemi VT-9/2 mintán végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye (a szerző saját szerkesztése)

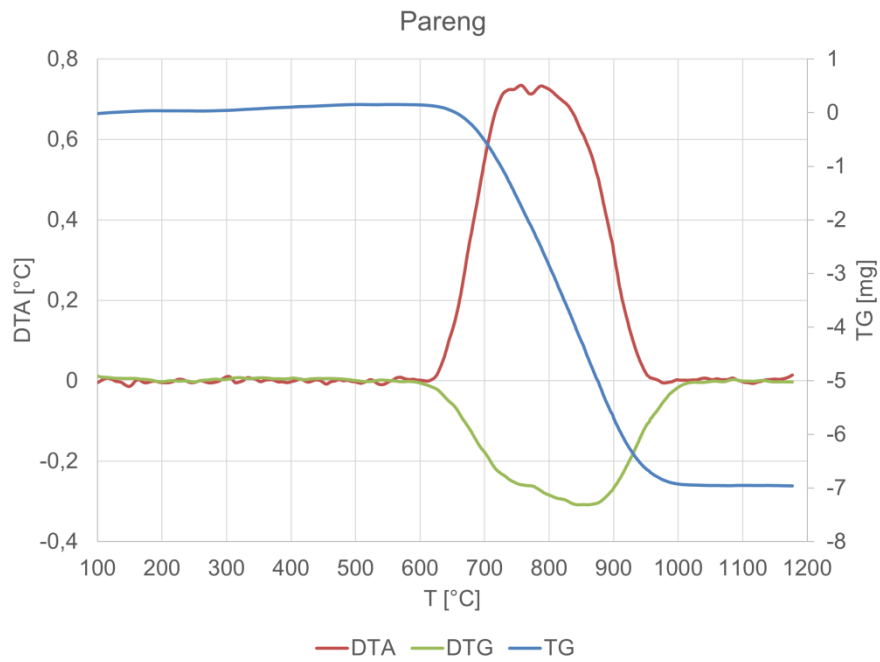
LIX. melléklet



A – A fertőrákosi FR-1 mintán végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye (a szerző saját szerkesztése)

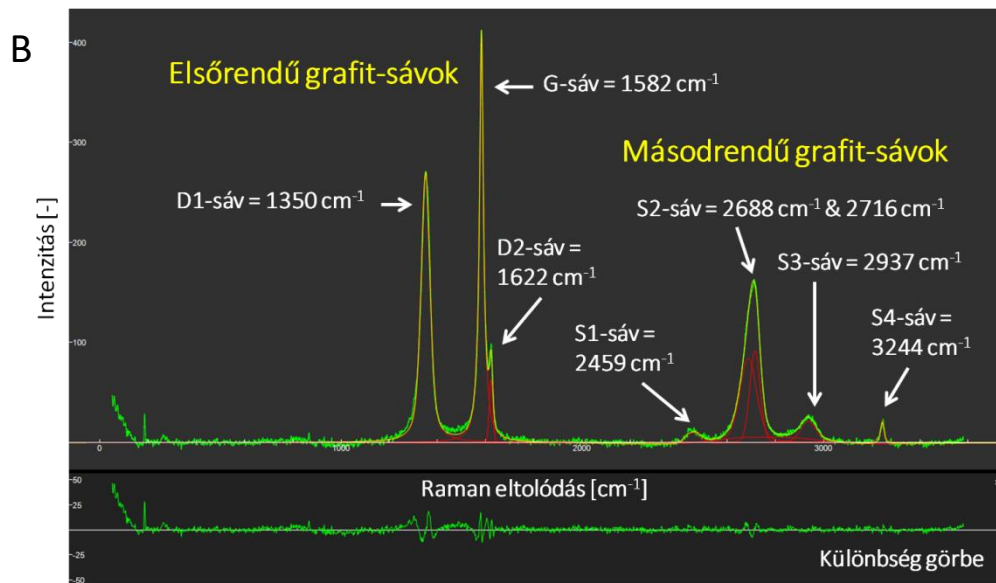
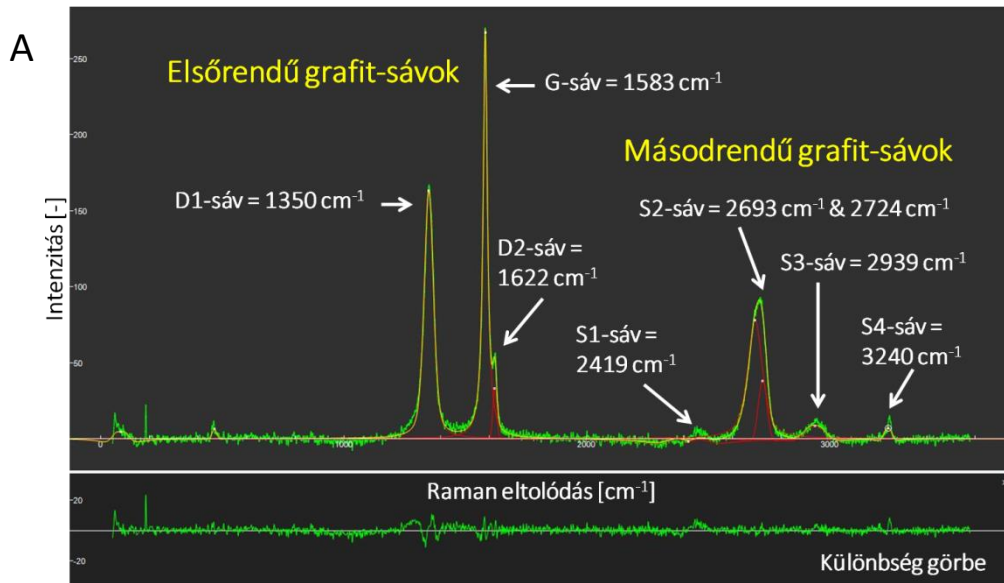
B – A fertőrákosi FR-2 mintán végzett szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye (a szerző saját szerkesztése)

LX. melléklet



A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok eredménye, Pareng (a szerző saját szerkesztése)

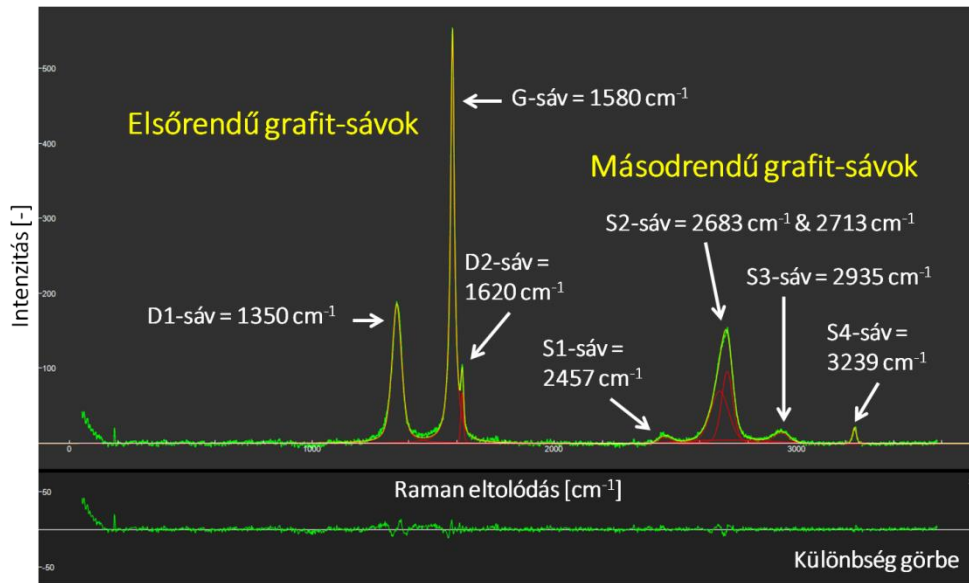
LXI. melléklet



A – Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival. Meszes (Leskóné Majoros et al., 2022b nyomán)

B – Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival. Velem (a szerző saját szerkesztése)

LXII. melléklet



Egy kiértékelt Raman-spektrum a grafit első- és másodrendű sávjaival. Fertőrákos
(Leskóné Majoros et al., 2025a nyomán)

LXIII. melléklet

A szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott szerves anyag és grafit tömegének aránya, valamint grafit és összes széntartalmú anyag (szerves anyag és grafit) tömegének aránya (a szerző saját szerkesztése)

	Szerves anyag / Grafit [-]	Grafit / Összes (Szerves anyag és grafit) [-]	Metamorfózis foka*
DTAP 1/1	0,04	0,97	Anchimetamorf
DTAP 2/1	0,06	0,94	
SZL-369	0	1	Zöldpala fácies
SZL-371	0,83	0,55	
SZL-373	0,39	0,72	
SZL-1A	0,30	0,77	
SZL-1B	0,18	0,85	
SZL-1C	0,39	0,72	
Szendró-1	0,48	0,68	
M-3B	0	1	
RSZ-2	0	1	
VT-3	0	1	
VT-9/2	0	1	
FR-1	0	1	
FR-2	0	1	
Pareng	0	1	

*Fülöp (1994), Babinszki et al. (2023) és Ion et al. (2023) alapján

LXIV. melléklet

Összehasonlító táblázat a szimultán DTA-TG-DTG vizsgálatok során kapott és a Rietveld-illesztéssel számolt grafittartalmakról (a szerző saját szerkesztése)

Minta	DTA-TG-DTG [tömeg%]	Rietveld-illesztés [tömeg%]
DTAP 1/1	5,4	3,9
DTAP 2/1	4,9	2,1
SZL-369	5,5	1,5
SZL-371	3,2	1,9
SZL-373	6	3
SZL-1A	11	8
SZL-1B	16,7	9,8
SZL-1C	14,3	8,3
Szendró-1	2,1	3,5
M-3B	5	2,7
RSZ-2	5,8	4
VT-3	4,4	0,4
VT-9/2	1,8	0,3
FR-1	0,8	1,2
FR-2	3,1	5,7
Pareng	33,3	27

Beadás dátuma:

.....

Leskóné Majoros Livia

Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola