

Wehrlitesedés folyamatának nyomonkövetése a nógrád-gömöri felsőköpenyben

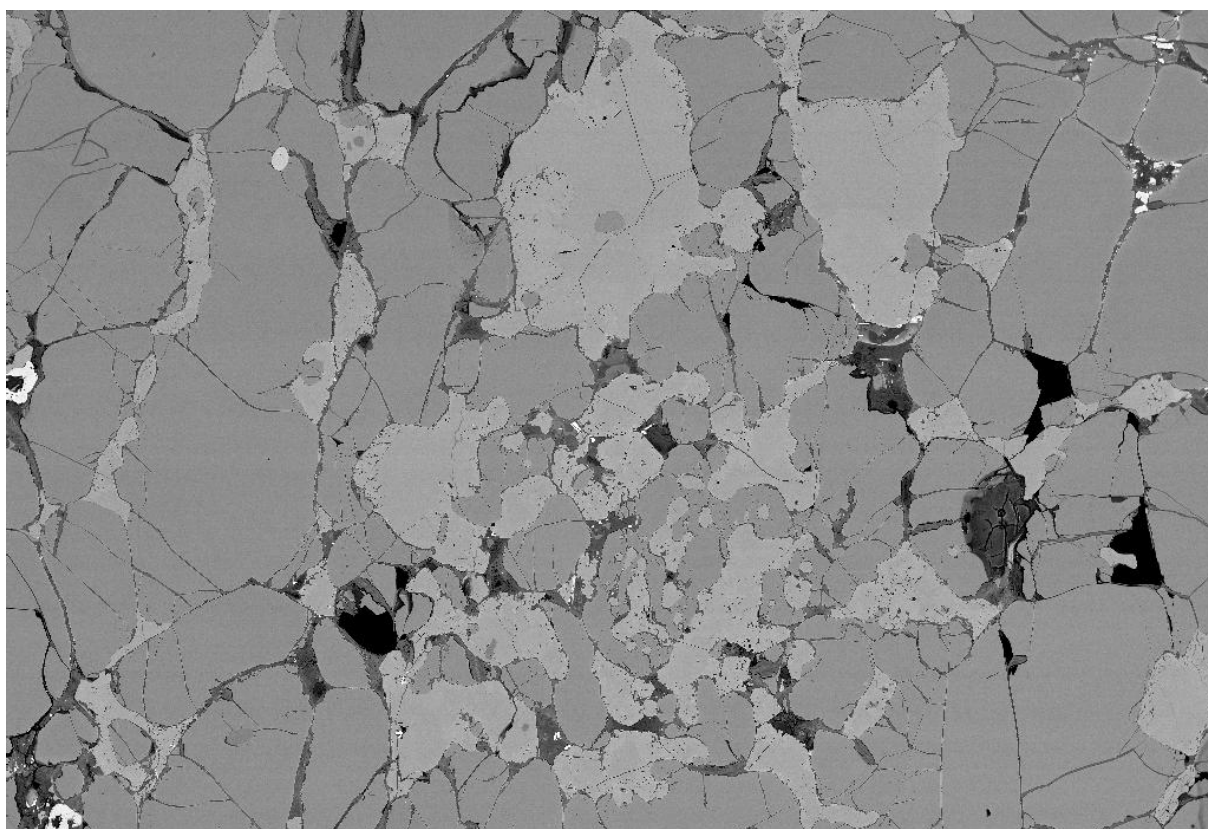
Patkó Levente

2. évf. Geológus M.Sc.

Aradi László

1. évf. Geológus M.Sc.

Témavezető: Szabó Csaba, Ph.D. (ELTE TTK, Litoszféra Fluidum Kutató Labor)



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földrajz-és Földtudományi Intézet
Kőzettani és Geokémiai Tanszék
Litoszféra Fluidum Kutató Labor



2012. december 3.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1 Dolgozat célja, problémafelvetés	3
1.2 Köpenymetaszomatózis	4
2. Geológiai háttér	5
3. Alkalmazott technikák	7
4. Mintakiválasztás szempontjai.....	8
5. Petrográfia	9
5.1 A xenolitok szöveti leírása	9
5.2 A xenolitok petrográfiai jellemzése.....	10
6. A wehrlit xenolitok ásványainak főelem összetétele.....	15
7. A kőzetek szulfidbeágyazódásai.....	20
7.1 A kőzetzárványokban található szulfidok petrográfiai leírása	20
7.1.1 Wehrlit xenolit sorozat	21
7.1.2 Lherzolit xenolit sorozat.....	25
7.2 Szulfidok kémiai összetétele	26
7.2.1 Az egyes szulfid fázisok kémiai összetétele.....	28
7.2.2 Szulfid szemcsék teljes kémiai összetétele.....	30
7.2.3 Xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetétel.....	31
8. Diskusszió	34
8.1 A wehrlitesedés kőzettani bizonyítékai	34
8.2 A wehrlitesedés geokémiai bizonyítékai	34
8.3 Szulfidok szerepe a köpenymetaszomatózisban.....	37
8.3.1 Wehrlit és lherzolit xenolitok összehasonlítása a Bábi-hegyről és Medves-fennsíkról.....	37
8.3.2 A tanulmányozott központi terület (Medves-fennsík és Bábi-hegy) összehasonlítása a NGVT északi és déli szegélyével	38
8.3.3 Wehrlitesedés hatása a szulfidokra.....	39
8.4 A metaszomatózist okozó fluidum kémiai jellegei, eredete	41
9. Összefoglalás	44
Köszönetnyilvánítás	45
Irodalomjegyzék	45

Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra (A) A Kárpát-Pannon régió vázlatos térképe a litoszféra vastagság adatokkal.....	6
2. ábra Egy típusos wehrlit xenolit (NMM111) sztereomikroszkópos képe	10
3. ábra Xenomorf klinopiroxénbe (cpx) beágyazott olivin	12
4. ábra Relikt ortopiroxén klinopiroxénben NFR1119B wehrlit xenolitban	13
5. ábra Féregszerű spinell megjelenése klinopiroxénben.	14
6. ábra A wehrlit xenolitok olivinjének Mn tartalma (kationszám) a mg# függvényében.....	16
7. ábra A wehrlit xenolitok olivinjének Ni tartalma (kationszám) a mg# függvényében.....	16
8. ábra Spinellek Al-Cr-Ti háromszöge.....	19
9. ábra Wehrlit xenolitokban megjelenő szulfidzárványok mikroszkópos felvételei ráeső fényben, egy nikollal	22
10. ábra Lherzolit (A, C) és wehrlit (B, D) xenolitokban található szulfidok pásztázó elektronmikroszkópos visszaszórt elektronképei (BSE).	24
11. ábra Az egyes szulfidfázisok ábrázolása atomszázalék (at %) szerint a Fe és Ni+Co függvényében	30
12. ábra A tanulmányozott wehrlit és a reprezentatív lherzolit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek a Cu-S-Fe-Ni(+Co) rendszerben.	33
13. ábra A tanulmányozott wehrlit és a reprezentatív lherzolit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek a Cu-Ni(+Co)-Fe rendszerben.....	33
14. ábra Az Al kationok megoszlása a hatos és négyes koordináció között	35
15. ábra A szulfidásványokban lévő Fe és Ni (m/m %) változása a koegzistens olivin és klinopiroxén egyes főelemeinek függvényében.....	41
16. ábra A tanulmányozott lherzolit és wehrlit xenolitok átlagos szulfidjainak Ni tartalmának változása a közzel egyensúlyban lévő olvadék MgO/FeO arányának függvényében.....	43
1. táblázat. Reprezentatív szulfidfázisok összetételei wehrlit xenolitokban. mss – monoszulfid szilárdoldat, cpy – kalkopirit, pn – pentlandit, po – pirrhotin, vi - violarit	27
2. táblázat. Lherzolit xenolitokban található szulfidfázisok reprezentatív kémiai összetételei. mss – monoszulfid szilárdoldat, pn – pentlandit, po – pirrhotin	27
3. táblázat. A tanulmányozott wehrlit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek.	32
4. táblázat. A területről származó reprezentatív lherzolit xenolitok szulfidjainak átlagos összetétele.....	32
5. táblázat. Számolt MgO/FeO aránya a metasztatizáló olvadékban, D-értékek Roeder (1970), Shaw et al. (2000) és Zajacz és Szabó (2003) után.	42

1. Bevezetés

1.1 Dolgozat célja, problémafelvetés

Világszerte ismertek alkáli bazalt, kimberlit és lamprofir lelőhelyek, amelyek felsőköpeny eredetű kőzetzárványokat (xenolitokat) szállítottak a felszínre. A Kárpát-Pannon régióban (KPR) öt helyen is előfordul, hogy a felsőköpenyt neogén alkáli bazalt olvadékok mintázták meg, előfordulásuk nyugatról keletre haladva a következők: Stájer-medence, Kisalföld, Bakony—Balaton-felvidék, Nógrád-Gömör, Persány-hegység (1. ábra). Ezek közül a legrészletesebben a Bakony—Balaton-felvidék felsőköpenye ismert kőzettani és geokémiai szempontból, amelyről az aktuális kutatási eredmények az 1970-es évektől kezdve folyamatosan jelentek meg hazai, majd egyre rangosabb külföldi folyóiratokban (pl. Embey-Isztin et al., 1989; 2001; Downes et al., 1992; Szabó et al., 1995a; 2004; Falus et al., 2000; 2007; Bali et al., 2002; 2008; Hidas et al., 2007; 2010; Dobosi et al., 2010; Berkesi et al., 2012). Ezzel szemben a Nógrád-Gömör kevésbé feldolgozott, ami a publikációk kisebb számában is megnyilvánul (pl. Embey-Isztin, 1978; Szabó és Taylor, 1994; Szabó és Bodnar, 1995; Konečný et al., 1995; Kovács et al., 2004; Zajacz et al., 2007). Mivel a köpenyxenolitok képesek megőrizni a felsőköpeny fizikai állapotát és geokémiai karakterét, így egyedülálló betekintést nyújtanak a köpeny korábbi fejlődési szakaszaiba, ezáltal a KPR kialakulásának történetébe is.

A diákköri dolgozatunkban szereplő xenolitok a Nógrád-Gömör Vulkáni Terület (NGVT) központi zónájából (Medves-fennsík és Bábi-hegy) származnak, ahonnan az egykori bazalt kőbányákból több száz xenolitot gyűjtöttünk be és végeztünk makroszkópos és mikroszkópos szelektálást és csoportosítást, majd részletes petrográfiai leírást adtunk egy korábbi diákköri dolgozatban (Liptai et al., 2011). Ismert, hogy a felsőköpeny legfelső részét legnagyobb tömegben spinell lherzolit képezi (pl. Downes, 1997), amit a korábban tanulmányozott xenolitok modális összetétele ez esetben is alátámasztott, azonban elkülönült egy, jelentős mintaszámmal jellemezhető és modális összetétele alapján wehrlitnek nevezhető xenolit sorozat is. Azt az elképzelést, hogy a klinopiroxénben és szulfidokban gazdag, ugyanakkor ortopiroxént lényegében nélkülöző, jellegzetes szövettel rendelkező wehrlit xenolitok köpeny metasomatózis során alakultak ki, már Liptai et al. (2011) is felvetette, azonban részletes vizsgálatra korábban nem került sor. Jelen dolgozat célja, hogy a petrográfiai elemzés

alapozva és azon egyben túlmutatóan a geokémiai eszköztárát segítségül hívva leírja és rekonstruálja az eddig ismeretlen köpeny folyamatot a nógrád-gömöri vulkáni terület alatt, ami a wehrlitesedést eredményezte, és aminek segítségével jobban megérthetjük a régió alatti köpenyrégió geokémiai folyamatait és fejlődéstörténetét. Ehhez a kőzetek szilikát-, valamint szulfidfázisainak részletes petrográfiai és főelemgeokémiai feldolgozását végeztük el.

1.2 Köpenymetaszomatózis

A metaszomatózis kifejezés korábban is ismert volt, azonban köpeny környezetre legelőször Lloyd és Bailey (1973) használta. Esetükben az ugandai és eifeli területek bazaltjainak nagy alkália tartalmát, ezen mobilis elemekben gazdagodott felsőköpeny részleges olvadása magyarázta.

Földköpeny környezetben kezdetben kétféle metaszomatózist definiáltak. Egyik, a mikroszkópban is meghatározható, ún. modális metaszomatózis, amelyet Harte (1983) vezetett be. Ennek eredményeképp a köpenybe eredetileg nem létező, illó-tartalmú szilárd fázis jelenik meg, ilyen például a flogopit és az amfibol. A másik Dawson (1984) által nevesített, mikroszkópban már nem nyomozható típus az ún. kriptikus (rejtett) metaszomatózis, amely a nyomelem koncentrációban okoz változást. Griffin és O'Reilly (2012) bevezetett egy harmadik kategóriát is, amit lopakodó metaszomatózisnak (stealth metasomatism) nevezett. Ebben az esetben a metaszomatózis a modális összetételt megváltoztatja, azonban mindez új, a köpenyre jellemző ásvány megjelenésével nem társul. Ezért azonosítása nem egyszerű.

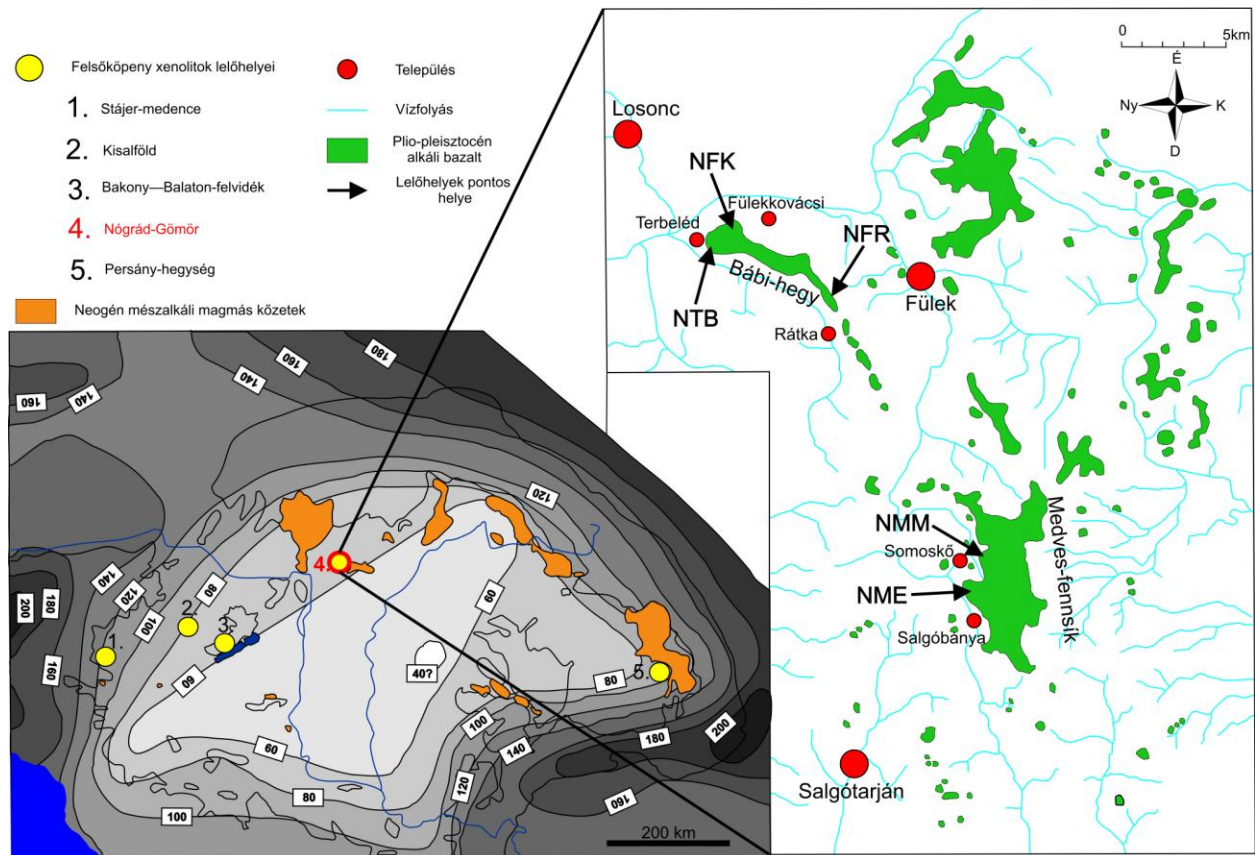
2. Geológiai háttér

Az Alpok, Kárpátok és Dinaridák által határolt Pannon-medence aljzatát két eltérő eredetű mikrolemez alkotja, az északnyugaton elhelyezkedő ALCAPA és a délkeleten elhelyezkedő Tisza-Dácia, amelyeket a Közép-Magyarországi Zóna választ el egymástól (Csontos, 1995). A térség szerkezeti fejlődését a terciérben Csontos et al. (1992) három tektonikai szakaszra tagolta. Az első szakaszt az afrikai eredetű ALCAPA mikrolemez Periadriai vonal menti jobbos elmozdulása jellemzi, amely az eocénben indult meg és az oligocénben teljesedett ki. Ennek folyamán az afrikai eredetű ALCAPA mikrolemez a Periadriai vonal mentén jobbos elmozdulást mutat. A második szakasz késő oligocén – kora miocén során zajlott le, amikor az alpi kollízió hatására az ütköző zónából az ALCAPA keleti irányba kiszökött (Kázmér és Kovács, 1985). A legújabb vizsgálatok eredményeként egyes kutatók azt feltételezik, hogy a mikrolemez mozgását egy kelet-nyugat irányú asztenoszféra áramlás is elősegítette (Kovács et al., 2011). A kiszökés (extrúzió) közben az ALCAPA és a Tisza-Dácia mikrolemezek egymással ellentétes irányú rotációt végeztek. A harmadik szakaszt jellemző kiterjedt medence extenzió két alfázisra osztható (Bada és Horváth, 2001; Huismans et al., 2001): a középső-miocénban (17-14 millió éve) zajlott aktív extenziós fázist a szubdukció visszagördülése segítette elő (Horváth, 1993; Csontos, 1995), amelynek hatására a litoszféra erőteljesen kivékonyodott a Pannon-medencében. A litoszféra elvékonyodása az asztenoszféra felboltozódását vonta maga után (Horváth, 1993). Az extenziós szakasz második, passzív fázisa a késő miocénben (12-8 millió éve) zajlott és a litoszféra termális erőzójával magyarázható (Huismans et al., 2001), ami a medence központi részét erőteljesebben érintette, ahol a litoszféra 50-60 km-re vékonyodott (Horváth, 1993; Lenkey, 1999).

Miocéntól kezdődően a Kárpát-Pannon régióban a változatos időbeli elterjedésű és kemizmusú vulkanikus tevékenység zajlott (Pécskay et al., 1995). Ezek közül a legfiatalabbak a plio-pleisztocén alkáli bazaltok, amelyek elszórtan jelentkeznek a Pannon-medencében (Szabó et al., 1992; Embey-Isztin et al., 1993; Harangi, 2001). Keletkezésük az asztenoszféra felemelkedés által előidézett nyomáscsökkenés hatására történő olvadás eredménye. Az azonos genetika ellenére mutatkozó változatos összetétel helyi sajátosságok és folyamatok következményének tudható be (Embey-Isztin et al., 1993).

A Nógrád-Gömör Vulkáni Területen elszórt kibukkanásokban Patakaljától Bárnáig (1. ábra) elsősorban bazanitok, alkáli bazaltok és nefelin-hawaiiitek találhatók (Dobosi et al., 1995),

amelyek a felsőköpeny gránát lherzolitos zónájának igen kis mértékű (max. 3 m/m %) parciális olvadásával keletkeztek. Az egész területre jellemzők a lávaközetek és piroklasztitok, amelyek számos helyen tartalmaznak felsőköpeny és kéreg eredetű xenolitokat és xenokristályokat. A terület legnagyobb kiterjedésű bazaltplatói a központi rész két egysége, a Babi-hegy és a Medves-fennsík (1. ábra), ahonnan a dolgozatban feldolgozat xenolitok származnak.



1. ábra (A) A Kárpát-Pannon régió vázlatos térképe a litoszféra vastagság adatokkal (Horváth, 1993 alapján), a neogén mészkáli vulkáni képződményekkel és az öt, ultrabázisos zárványt tartalmazó plio-pleisztocén alkáli bazalt lelőhelyével: 1 - Stájer-medence, 2 - Kisalföld, 3 - Bakony–Balaton-felvidék, 4 - Nógrád-Gömör, 5 - Persány-hegység (Harangi, 2001 alapján). (B) A nógrád-gömöri vulkáni terület központi részének áttekintő térképe. Medves-fennsík: NME - Eresztvény, NMM - Magyarbánya, Babi-hegy: NFR - Fülek-Rátka, NFK – Fülekkovácsi, NTB – Terbeléd (Jugovics, 1971 alapján).

3. Alkalmazott technikák

A mikroszkópos vizsgálatokat (áteső és ráeső fényben) Nikon Eclipse LV100 POL típusú kőzettani polarizációs mikroszkópon végeztük az ELTE Kőzettani és Geokémiai Tanszékén működő Litoszféra Fluidum Kutató Laboratóriumban. A vékonycsiszolatokról készült képek az említett polarizációs mikroszkópra szerelt Nikon CoolPIX E950 típusú digitális fényképezőgéppel készültek. A kőzetek modális összetételének meghatározásához a csiszolatokat HP Scanjet 2400 típusú scannerrel 1200 dpi felbontással digitalizáltuk. A képek kiértékeléséhez a Corel 14 szoftvercsomag Corel PhotoPaint 14 programját használtuk. A szulfidásványok modális összetételét ugyancsak a fenti programokkal végeztük el a ráeső fényvel készült fényképek alapján.

Az pásztázó elektronmikroszkóppal készült visszaszórt elektronképek (BSE) az ELTE Kőzettani és Geokémiai Tanszékén készültek egy EDAX PV 9800 energiadiszperzív röntgen spektrométerrel felszerelt AMRAY 1830 I/T6 típusú berendezéssel Bendő Zsolt segítségével. A mérés során 20 kV-os gyorsítófeszültséget használtunk, a primer elektronáram erőssége 1 nA volt.

A szelektált xenolitok elektronmikroszondás elemzését egy CAMECA SX-50 mikroszonda berendezéssel végeztük a Padovai Egyetemen Raúl Carampin és Anna Maria Fioretti közreműködésével. A készülék négy hullámhossz-diszperzív (WDX) detektorral felszerelt. A szilikátok méréséhez természetes, valamint mesterséges standareket használtunk. A vizsgált elemeket (Si, Ti, Al, Cr, Fe, Ni, Mn, Mg, Ca, Na, K) 15 és 40 másodperc közötti számlálási idővel mértük. A használt mintaáram 20 nA, a gyorsítófeszültség 20 kV volt a mérések során. A műszerrel szulfidok esetén természetes pirit standardot és fém Cu, Ni, Co-t használva öt elemet (S, Fe, Cu, Co, Ni) mértünk, egyenként 20 másodperces számlálási idővel. A műszer eredményeket ZAF korrekciót követően, atomos formában, tömegszázalékban határozta meg. A szulfidok esetében is a mintaáram 20 nA, a gyorsítófeszültség 20 kV volt.

4. Mintakiválasztás szempontjai

Vizsgálatokra a legnagyobb méretű és legüdébb xenolitokat választottunk ki. Tekintettel a dolgozat célkitűzéseiben megfogalmazott wehrlitesedés folyamatának megértésére, leőhelyenként két-két reprezentatív wehrlit xenolitot (NTB1109, NTB1120, NFK1110, NFK1137A, NFR1117A, NFR1119B, NMM1114, NMM1129, NME1129D, NME1110) úgy választottuk ki polarizációs mikroszkóp segítségével, hogy köztük egyaránt szerepelnek kevésbé és erőteljesen wehrlitesedett kőzetek az átalakulási folyamat jobb megértése és modellezése érdekében. Szempont volt továbbá, hogy a xenolitok bazaltkontaminációtól érintetlenek legyenek és a kőzetalkotó ásványok tartalmazzanak szilikátolvadék- és fluidumzárványokat a jövőbeni kutatási céljainknak megfelelően. A szelektált wehrlit xenoliton részletes mikroszkópos, pásztázó elektronmikroszkópos és elektronmikroszondás vizsgálatokat végeztünk.

5. Petrográfia

5.1 A xenolitok szöveti leírása

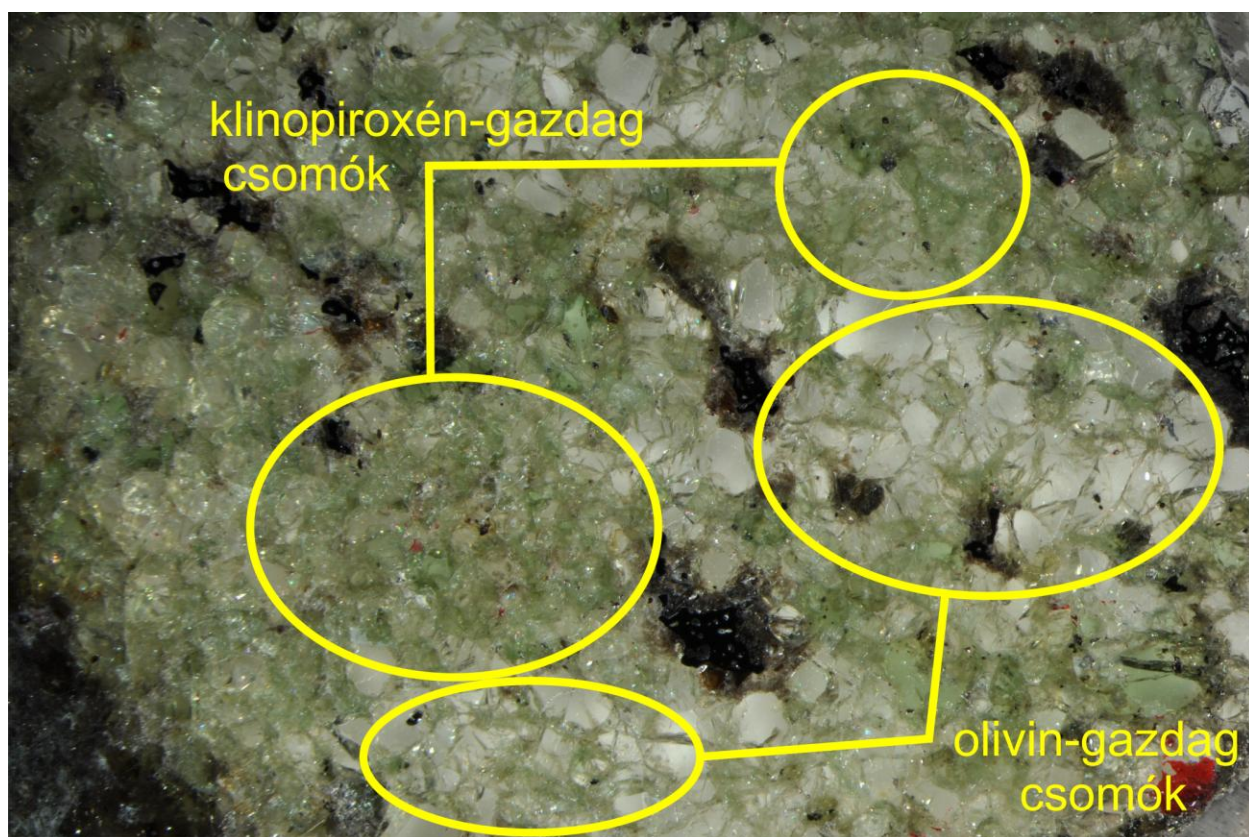
Az ultramafikus kőzetek szöveteinek vizsgálatára többféle tanulmány is született (pl. Mercier és Nicolas, 1974; Harte, 1977; Pike és Schwarzman, 1977). Dolgozatunkban az általunk vizsgált xenolitok szöveti besorolásához a Mercier és Nicolas (1974) által közölt rendszert vettük alapul, mert az irodalom a szerzőpáros munkáját a legteljesebb, legalaposabb szöveti osztályzásnak tekinti és évtizedek óta használja.

A megfigyelések alapján a befogadó bazalt csak a xenolit peremével került fizikai és kémiai kölcsönhatásba xenolitokkal nem ritkán reakciókoronát létrehozva, azonban teljes zárványt átjáró beszüremkedések nem ismertek.

A szelektált wehrlit xenolitok (NTB1109, NTB1120, NFK1110, NFK1137A, NFR1117A, NFR1119B, NMM1114, NMM1129, NME1129D, NME1110) (I. tablazat) szöveti leírása és osztályozása némi nehézségbe ütközött, ugyanis az eredeti szövetet a wehrlitesedés folyamata felülírta. A korábbi szövetet az olivin-gazdag foltok alapján igyekeztük meghatározni.

A wehrlitesedett részekben a xenomorf, lekerekített olvineket hajladozó szemcsehatárral rendelkező klinopiroxének ölelik körül (3. ábra). Az klinopiroxén-gazdag ásványhalmazok elhelyezkedésében irányítottságot nem lehet felfedezni.

A klinopiroxén gazdagodás mértékétől függően egyes wehrlit xenolitok alig (pl. NFR1117A, NFR1119B, NMM1114), mások bőven (NTB1109, NTB1120, NMM1129, NME1129D, NME1110) tartalmaznak olivin-gazdag halmazokat. A meghatározott szövet három wehrlit xenolittól (NTB1109, NFR1117A, NFR1119B) eltekintve - porfiroklasztos. A porfiroklasztos szövetben a szemcsék két populációra különülnek el: nagyméretű porfiroklasztokra (0,7-1,3 mm) és uralkodóan 0,1-0,5 mm-es neoblasztokból álló mátrixra. A három kivétel közül két wehrlit xenolitot (NTB1109, NFR1117A) ekvigranuláris szövet jellemzi. Ezek egy mérettartományú szemcsepopulációval rendelkeznek (0,1-0,5 mm), amelyekben a szemcsehatárok többnyire egyenesek és jellemzők a 120°-ban összefutó hármaspontok. A maradék NFR1119B wehrlit xenolitban meghatározott szövet átkristályosodott. Ez deformációtól mentes, nyugodt (ún. relaxációs) környezetben, esetleg lassú, egyenletes hőmérsékletnövekedés hatására alakul ki (Mercier és Nicolas, 1974). Jellemzője a megnövekedett szemcseméret és az egyenes szemcsehatárvonal. Az olivinben gyakoriak a kerekded spinell zárványok.



2. ábra Egy típusos wehrlit xenolit (NMM111) sztereomikroszkópos képe. A kép szélessége 1,5 cm. A zöld ásványok klinopiroxének, a fekete és barna szemcsék spinellek, a színtelen metszetek olvinek.

5.2 A xenolitok petrográfiai jellemzése

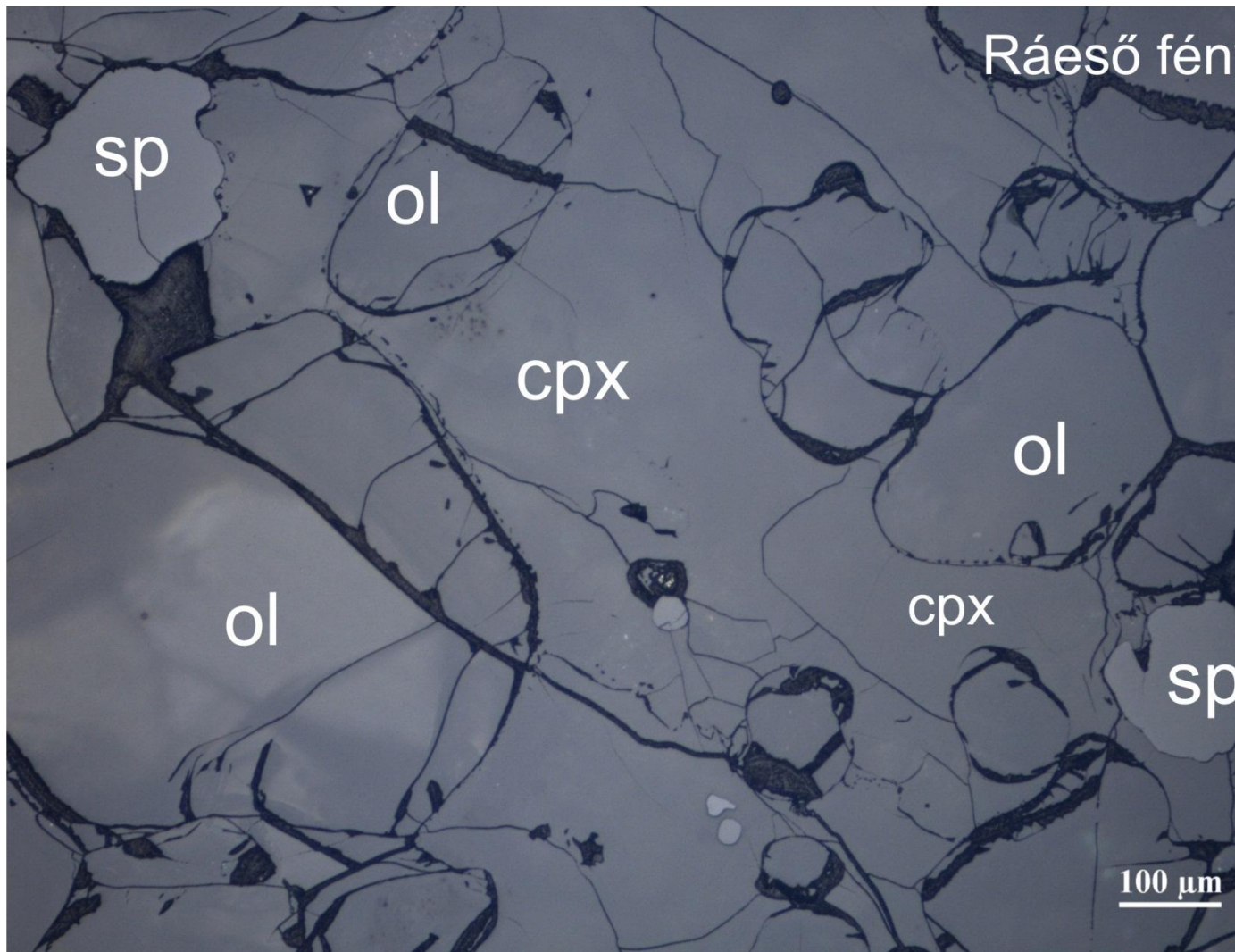
A vizsgált wehrlit xenolitokban (Függelék, I. táblázat) az olivin, klinopiroxén, spinell mindig jelen van. Ezzel szemben ortopiroxén maradványt csak két wehrlit xenolitban tapasztaltunk

Olivin

Mikroszkópos vizsgálatok alapján a wehrlitekben az olivin a leggyakoribb ásvány, amelynek jelenléte 65-85,5 v/v % között változik (Függelék, I. táblázat). Az olivin egyaránt előfordul a klinopiroxén-gazdag foltokban és az előbbiekkal határos, olivin-gazdag zónákban. A klinopiroxén-gazdag területeken az erősen kerekített olivin szemcsék kisméretűek (0,05-0,2 mm) és uralkodóan szabálytalan alakú klinopiroxénben fordulnak elő. Az olivin-gazdag

zónák olivinjei egyaránt előfordul finomszemcsés neoblasztok és nagyméretű porfiroklasztok formájában. Előbbiek mérete 0,1-0,8 mm utóbbiaké 1-2,5 mm között változik.

Az olivin-gazdag halmazokban nagy számban előfordulnak olyan olivin szemcsék, amelyek hullámos kioltást mutatnak és amelyeken esetenként megfigyelhető az alszemcsésedés folyamata is. Az olivin-gazdag zónákban a határvonal a szövet szerint változik, a porfiroklasztok esetében hajladozó, a kisméretű olivin neoblasztoké viszont többnyire egyenes. Valamennyi xenolitban találhatók olyan szemcsék, amelyekben világosbarna színű, kerekded alakú spinell zárványok fordulnak elő. Emellett kétgenerációs fluidum-, szilikátolvadék- és szulfidzárványok is jelentkeznek. Egyik generáció uralkodóan a xenolit peremén és repedések mentén jelentkezik. Ezek egyértelműen a xenolitot befoglaló bazalthoz köthetők. A második csoport tagjai ezzel szemben repedésektől és bazalttól távol a kristályokon belül csapdázódtak. Ezek segítségével a wehrlitesedéssel összefüggő olvadékvándorlási folyamatok és körülmények vizsgálhatók. Az uralkodóan közetüveget, klinopiroxént, amfibolt, csillámot, esetenként apatitot tartalmazó szilikátolvadék-zárványok általában 10-100 μm (4. ábra), a folyadék- és gázfázist tartalmazó fluidumzárványok 10-15 μm nagyságúak. A fluidumzárványok gyakran dekrepitálódtak. A dolgozatban részletesen tárgyalt szulfidolvadék zárványok megjelenhetnek zárványként és intersticiálisan is. Előbbiek mérete 5-80 μm , utóbbiaké 50-500 μm .

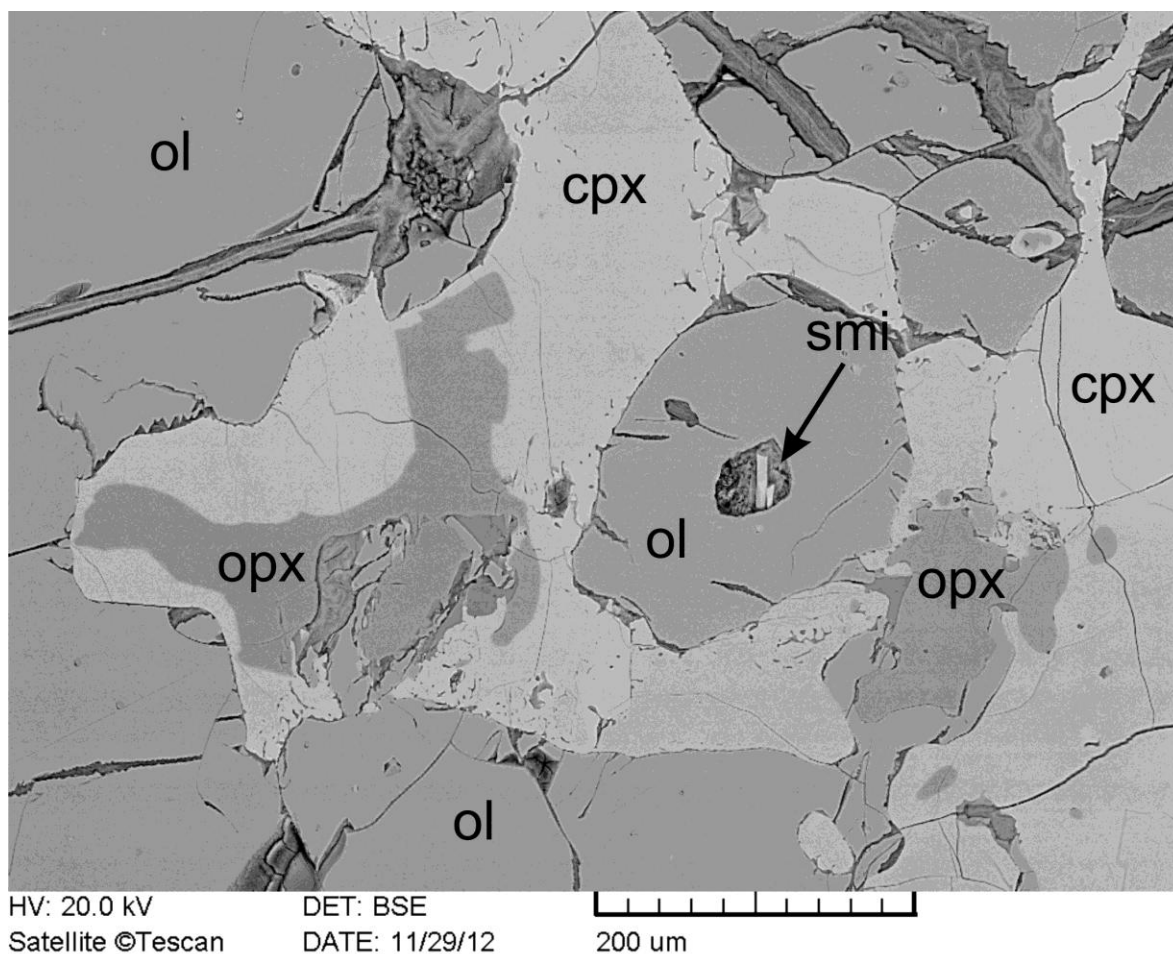


3. ábra Xenomorf klinopiroxénbe (cpx) beágyazott olivin (ol) szemcsék és kevés spinell (sp), NFR1117A wehrlit xenolit.

Klinopiroxén

A wehrlit xenolitok klinopiroxén tartalma a wehrlitesedés hatásának függvényében 9-35 v/v % között változik (Függelék, I. táblázat). Klinopiroxén szemcsék ritkán, de jelentkeznek az olivin-gazdag csomókban is, ahol méretük kisebb (0,1-0,4 mm), összehasonlítva a klinopiroxén-gazdag részek élénk fűzőld színű szemcséivel (0,3-0,6 mm). A klinopiroxén-gazdag foltok esetén a szabálytalan alakú, ívelt határokkal jellemezhető klinopiroxén szemcsék kerekded és kisméretű (0,05-0,2 mm) olivint és egy-egy spinellt fölynak körül (3. ábra), amivel szemben az olivin-gazdag foltok piroxénjei hipidiomorf, táblás megjelenésűek. Egy wehrlit xenolit (NFK1110) kivételével valamennyiben találhatók vermikuláris spinell szételegyedések. Ezek az uralkodóan megnyúlt alakú, 30-100 μm méretű, világosbarna

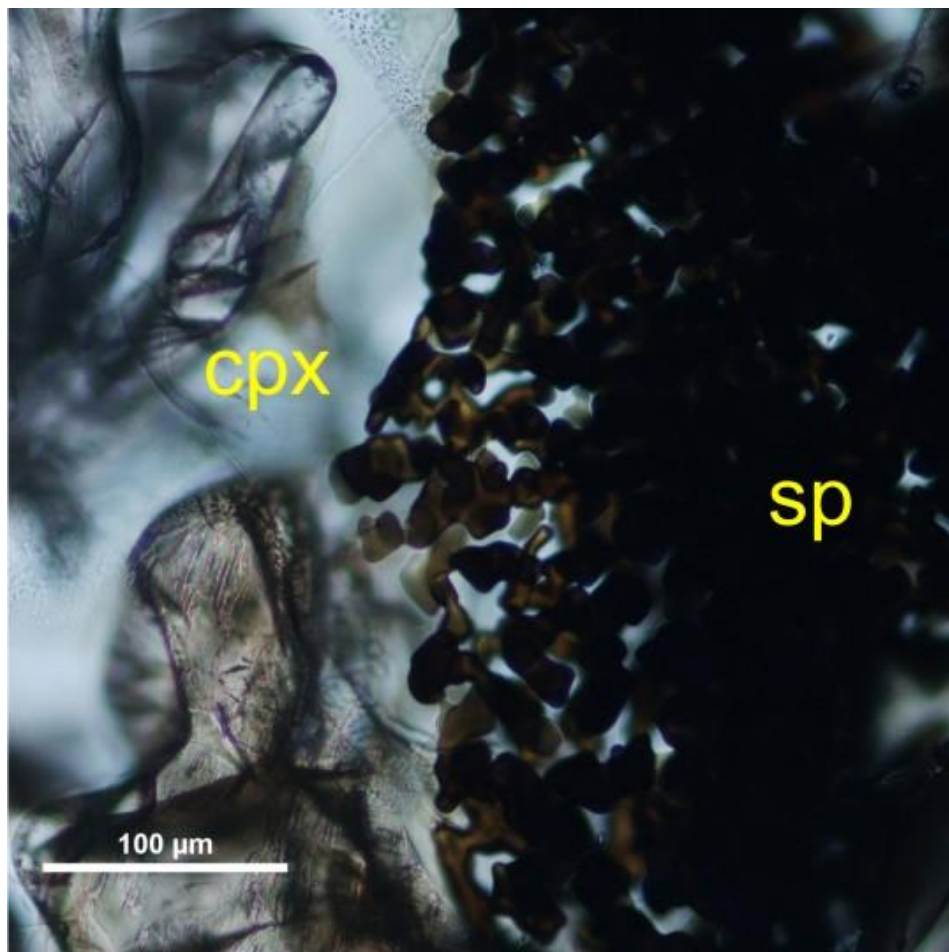
képletek egymás közelében csoportosan jelentkeznek és halmazokat formálnak. A klinopiroxén metszetek az olivineknél tapasztaltakhoz képest nagyobb számban tartalmaznak két generációs szilikátolvadék-, fluidum- és szulfidolvadék zárványokat. A xenolitok peremén előforduló zárványok a befoglaló bazalthoz köthetők, azonban a xenolitok belsejében előfordulók korábbi, köpeny folyamatokhoz köthetők. A szilikátolvadék-zárványok 5-80 μm nagyságúak és kőzetüvegből, klinopiroxénból, amfibolból, csillámból és esetenként apatitból állnak. A fluidumzárványok folyadék és gázfázist tartalmaznak és 10-15 μm nagyságúak. A dolgozatban részletesen tárgyalt szulfidbeágyazások megjelenhetnek zárványként és intersticiálisan is. Előbbiek mérete 5-80 μm , utóbbiaké 50-500 μm . A klinopiroxének több mintában jól megfigyelhető, szivacsos szegéllyel rendelkeznek, ami *in situ* olvadás bizonyítéka. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével két wehrliit xenolitban (NFR1117A és NFR1119B) a klinopiroxén magjában ortopiroxén maradványokat azonosítottunk (4. ábra).



4. ábra Relikt ortopiroxén klinopiroxénben NFR1119B wehrliit xenolitban. Visszaszórt elektronkép. opx - ortopiroxén, cpx - klinopiroxén, ol - olivin, smi —szilikátolvadék-zárvány.

Spinell

A spinell egyaránt előfordul az olivin- és a klinopiroxén-gazdag foltokban. Kis mennyiségben - 0,5-1,5 v/v %-ban - jelentkeznek a wehrlit xenolitokban, azonban egy esetben (NFR1119B) az 5,5 %-ot is eléri a modális részaránya. Méretük igen változatos, 0,05-2,5 mm közötti. Valamennyi xenolitban megjelennek zárványként és két wehrlit kivétellel (NTB1109, NFK1137A) intersticiálisan is. Az intersticiális szemcsék esetenként (NFR1119B, NMM1114) nagyméretűek (0,2-0,4 mm) és a szemcsehatáruk erősen kerekített. Egy wehrlit kivételével (NFK1110) a klinopiroxén-gazdag foltok klinopiroxénjeiben világosbarna színű, féregszerű (vermikuláris) spinellek is megjelennek (5. ábra). A kőzetalkotó ásványok közül a spinellen mutatkoztak meg leginkább az olvadás jegyei, amelyek minden mintában jelentkeznek



5. ábra Féregszerű spinell megjelenése klinopiroxénben NFK1137A wehrlit xenolitban. Áteső fényben, egy nikollal készült felvétel. sp – spinell, cpx – klinopiroxén.

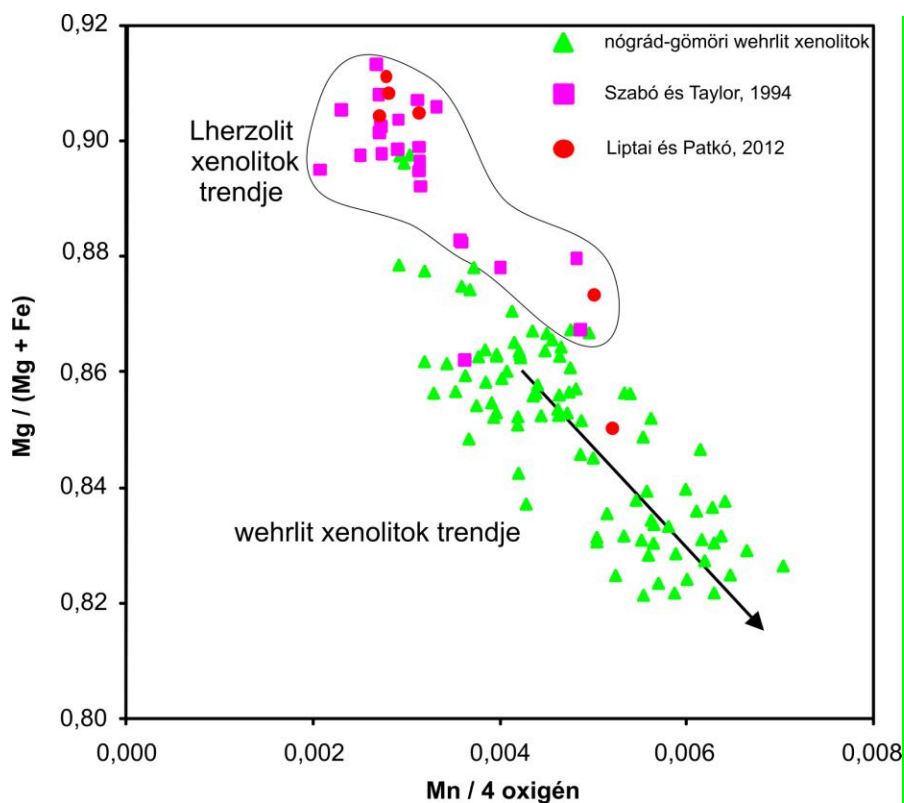
6. A wehrlit xenolitok ásványainak főelem összetétele

A xenolitokat felépítő ásványok főelem összetétele a tíz reprezentatív wehrlit xenolit mikroszondás elemzésén alapul, ami a petrográfiai leírásra támaszkodik.

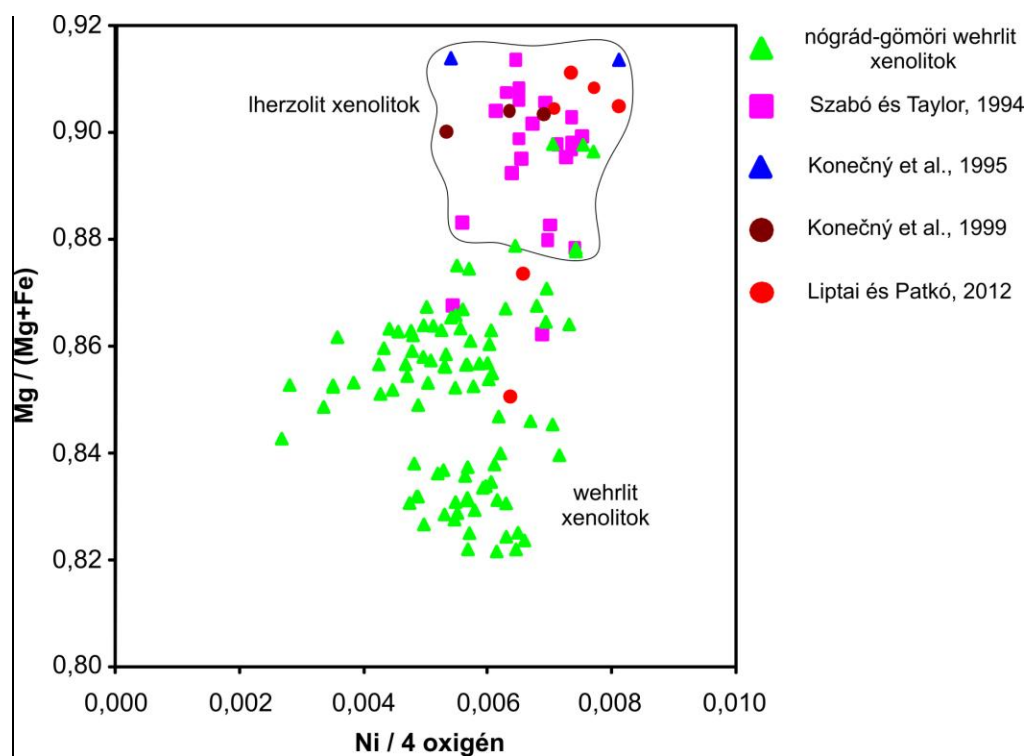
Olivin

Az olivin kémiai összetételét a Függelék, IV. táblázata mutatja. A vizsgált olivinek átlagos MgO-tartalma 46,1 m/m %, amelytől a minimális és maximális érték - 43,6 ill. 49,6 m/m % - jelentősen eltér. Az átlagos tartalom 14,4 m/m %, amelytől a minimális és maximális érték - 10,1 ill. 17,0 m/m % - szintén jelentősen eltér. A olivinek átlagos NiO-tartalma 0,27 m/m %, MnO-tartalma 0,22 m/m % és CaO-tartalma 0,16 m/m %, míg a tartományuk rendre 0,13-0,39 m/m %, 0,14-0,33 m/m % és 0,12-0,25 m/m % között változik a felsorolás sorrendjében. Az mg-szám ($mg\# = \frac{Mg}{Mg+Fe_t}$) 0,82-0,90 között változik (átlagos értéke 0,85), ami kisebb, mint a nógrád-gömöri vulkáni terület Cr-diopszid sorozatának tagjaiban tapasztalt értékek (Szabó és Taylor, 1994; Konečný et al., 1995; Konečný et al., 1999), azonban nagyobb, mint a kumulát xenolitokban mért értékek (Zajacz és Szabó, 2003; Kovács et al., 2004). Bizonyos xenolitokban (NTB1109, NTB1120, NFK1137A, NFR1119B) a Fe-tartalom mintán belül is változatos, amihez hasonló a többi elemnél nem tapasztaltunk. Az azonos lelőhelyekről származó két-két xenolit eredményei többnyire eltérnek egymástól.

Tanulmányozva az olivinek geokémiai tulajdonságait szembeötlő, hogy a wehrlit xenolitok olivinjeinek Mn-tartalma nagyobb, ezzel szemben mg-száma kisebb, mint a lherzolit xenolitokban (Szabó és Taylor, 1994; Liptai és Patkó, 2012) (6. ábra). Továbbá a wehrlit xenolitok olivinjei kisebb mg-számmal rendelkeznek és szegényebbek Ni-ben, mint a lherzolit xenolitok (Szabó és Taylor, 1994; Konečný et al., 1995; Konečný et al., 1999; Liptai és Patkó, 2012) (7. ábra).



6. ábra A wehrlit xenolitok olivinjének a Mn tartalma (kationszám) a mg# függvényében. A ábra nógrád-gömöri lherzolit xenolitok olivin adarait (NTB1124, NFK1123, NFR7, NFR1109, NMM1126, NME1122) adatait tartalmazza összehasonlítóképpen.

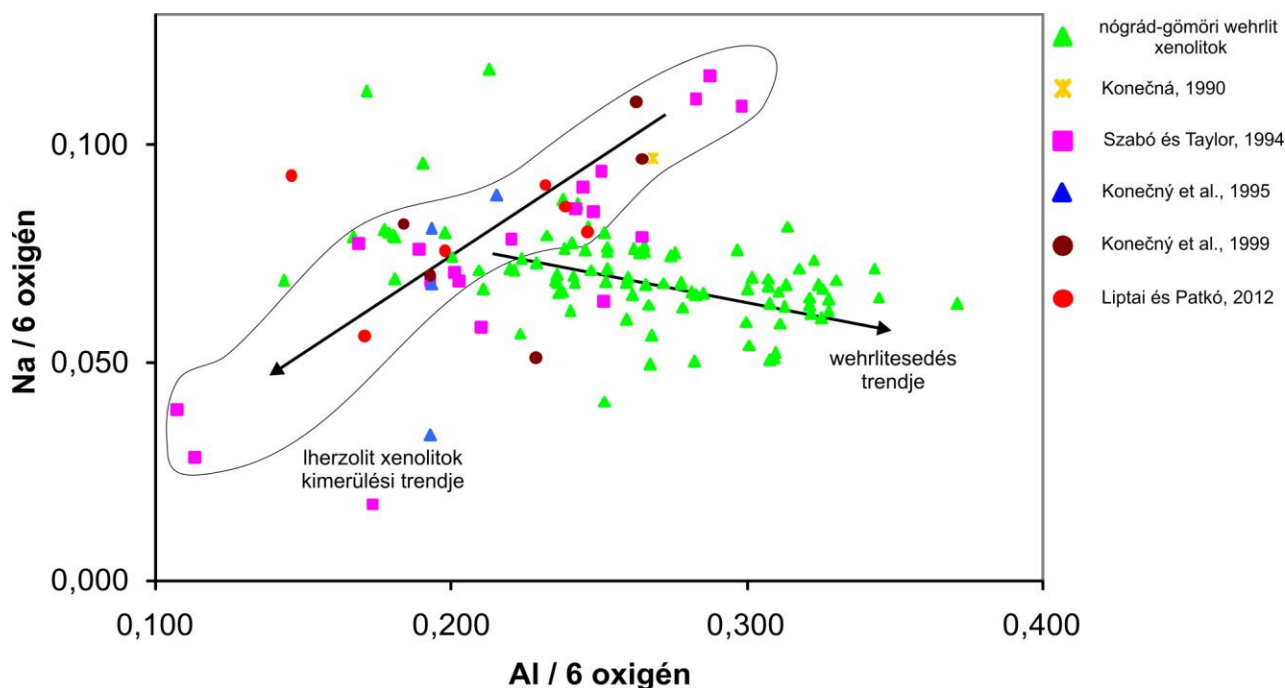


7. ábra A wehrlit xenolitok olivinjének a Ni tartalma (kationszám) a mg# függvényében. A ábra nógrád-gömöri lherzolit xenolitok olivin adarait (NTB1124, NFK1123, NFR7, NFR1109, NMM1126, NME1122) adatait tartalmazza összehasonlítóképpen.

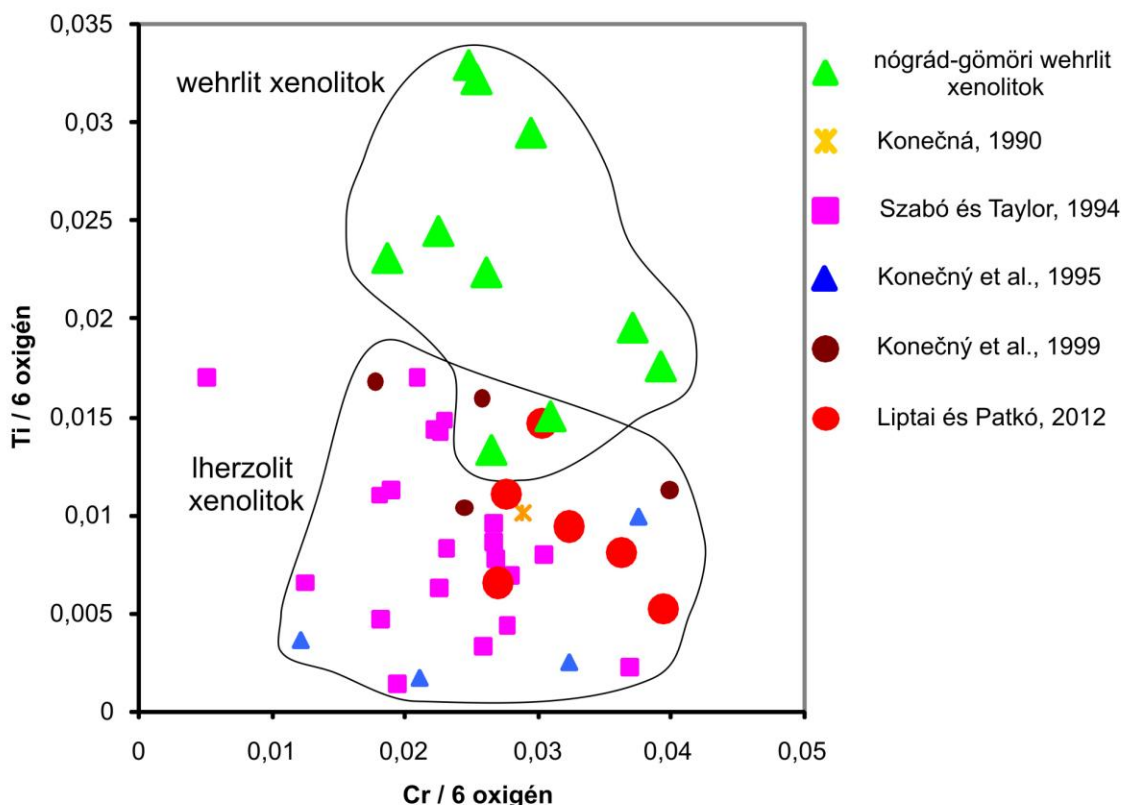
Klinopiroxén

A klinopiroxén kémiai összetételét a Függelék V. táblázat mutatja. A vizsgált klinopiroxének átlagos TiO_2 -tartama 0,86 m/m %, amelytől a minimális és maximális érték – 0,21 ill. 2,76 m/m % - jelentősen eltér. Az átlagos Cr_2O_3 -tartalom 0,98 m/m %, amelytől a minimális és maximális adat - 0,51 ill. 1,73 m/m % - ugyancsak nagymértékben eltér. A klinopiroxének átlagos Al_2O_3 -tartalma 6,15 m/m, FeO_t -tartalma 4,30 m/m %, Na_2O -tartalma 0,99 m/m % és CaO -tartalma 20,7 m/m %, míg a tartományuk rendre 3,30-10,7 m/m %, 2,77-5,87 m/m %, 0,71-1,72 m/m % és 19,64-22,89 m/m % között változik a felsorolás sorrendjében. Az mg-szám ($\text{mg}\# = \text{Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}_t]$) is nagy szórást mutat (0,80-0,90), az átlagos értéke (0,86), ezek a számok alig térnek el az olivinben tapasztaltaktól. Minden kiemelt elem koncentrációjában jelentős a mintán belüli változatosság.

Feltűnő a wehrilit xenolitok klinopiroxébjének jelentős Al-gazdagsága a nógrád-gömöri lherzolit xenolitok jellegzetes kimerülési trendjéhez képest (8. ábra). Ti - Cr összefüggésében a wehrilit xenolitok jelentős Ti gazdagodást mutatnak a lherzolit xenolitok klinopiroxénjeihez viszonyítva (Konečná, 1990; Szabó és Taylor, 1994; Konečný et al., 1995; Konečný et al., 1999; Liptai és Patkó, 2012) (9. ábra).



8. ábra A wehrilit xenolitok klinopiroxénjének Na és Al tartalmának (kationszámban) változása. A ábra nógrád-gömöri lherzolit xenolitok klinopiroxénjeinek (NTB1124, NFK1123, NFR7, NFR1109, NMM1126, NME1122) adatait tartalmazza összehasonlításképpen.



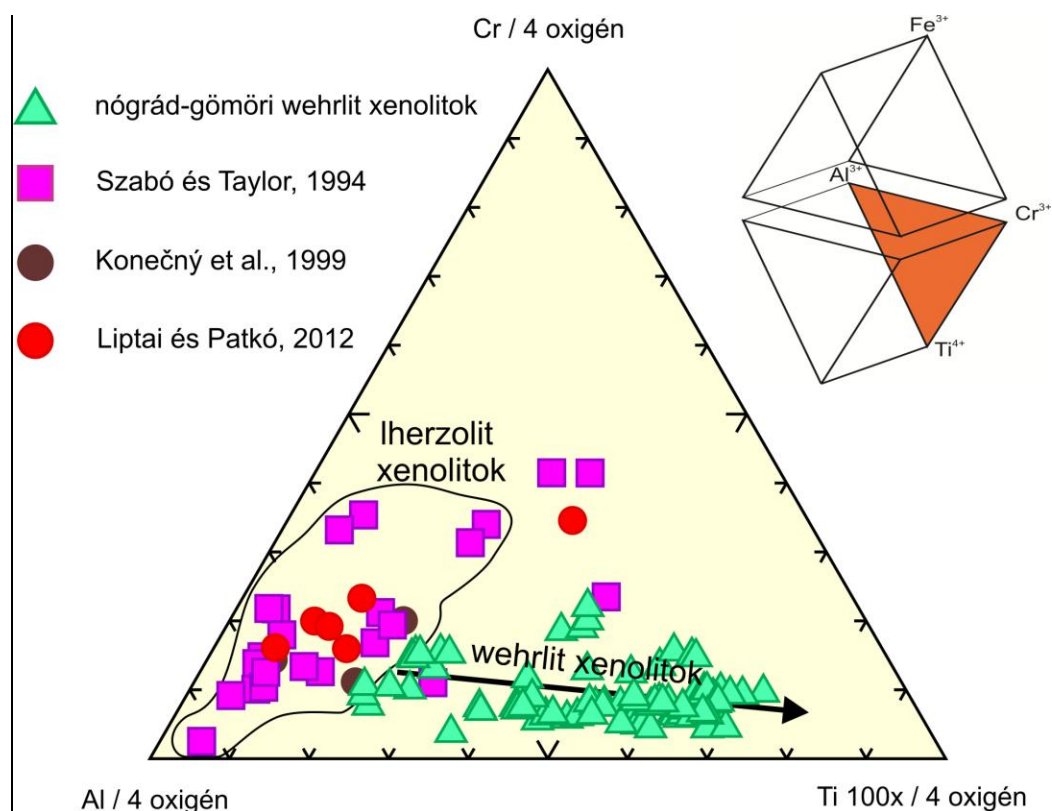
9. ábra Cr és Ti (kationszámban) alakulása a wehrlit xenolitok klinopiroxénekből (apfu - kationszám).

Spinell

A spinell kémiai összetételét a Függelék VI. táblázata mutatja. A spinell átlagos Al_2O_3 -tartalma 45,4 m/m és Cr_2O_3 -tartalma 16,1 m/m %, míg a tartományuk 31,9-57,0 m/m % és 5,28-31,4 m/m % között változik. Az átlagos MgO-tartalmuk 17,1 m/m % és FeO-tartalmuk 20,0 m/m %, míg a tartományuk 14,3-19,9 m/m % és 16,2-26,1 m/m %. A mg-szám ($\text{mg}\# = \text{Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}_t]$) tartománya 0,59-0,77, átlaga pedig 0,70, valamint a cr-szám ($\text{cr}\# = \text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Al}]$) tartománya 0,06-0,39 átlagos értéke 0,19. A spinellek átlagos TiO_2 -tartalma 0,66 m/m %, tartománya 0,26–1,11 m/m % között változik. Az $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ aránya átlagosan 2, de egy xenolitban (NFR1119B) a 3-szoros értéket is meghaladja.

A wehrlit xenolitokon belül a FeO-, Cr_2O_3 -, Al_2O_3 - és MgO-értékek változatosak, ami összefügg a szöveti helyzettel. A vermikuláris spinellek FeO-tartalma átlagosan 20,5 m/m % és Cr_2O_3 -tartalma átlagosan 19,0 m/m % szemben az intersticiális spinellek 19,2 m/m %-os FeO-tartalmával és 15,7 m/m %-os Cr_2O_3 -tartalmával. Ezzel szemben a főreg formák átlagos Al_2O_3 -tartalma 42,2 m/m % és MgO-tartalma 16,6 m/m %, ami kisebb a szemcseközi ásványok 46,3 m/m %-os Al_2O_3 -tartalmához és 17,4 m/m %-os Cr_2O_3 értékéhez viszonyítva.

A spinell vizsgálatok az Al^{3+} - Cr^{3+} - Ti^{4+} -rendszer érzékeny elemeiből áll, aminek köszönhetően a köpeny folyamatok jó indikátora. A wehrlit xenolitok spinelljei Ti-gazdagodást mutatnak a lherzolit xenolitokhoz viszonyítva (Szabó és Taylor, 1994; Konečný et al., 1999; Liptai és Patkó, 2012) (10. ábra).



8. ábra Spinellek Al-Cr-Ti háromszöge, ahol a Ti értékét a folyamat jobb szemléltetésének céljából százszoros mennyiségre növeltük. A wehrlit xenolitok a lherzolit xenolitokhoz képest Ti-ban gazdagabbak.

7. A kőzetek szulfidbeágyazódásai

A köpeny xenolitokban előforduló szulfidásványok megjelenésük alapján két csoportra oszthatók a korábbi munkák alapján (pl. Roedder, 1984; Lorand, 1989; Szabó és Bodnar, 1995; Falus, 2000). Elsődleges szemcsékre, amelyek szöveti helyzetük és ásványos összetételük alapján köpenykörülmények között képződtek még azelőtt, hogy a felszínre szállító magma megmintázta a felsőköpenyt; és másodlagos szulfidokra, amelyek repedések mentén, kőzetüveggel, vagy közvetlenül a szállító kőzettel érintkezve jelennek meg, keletkezésük a xenolit bezáródásához és felszínre emelkedéséhez kapcsolódik. Munkánk során az elsődleges szulfidszemcséket vizsgáltuk részletesen, mind petrográfiailag, mind ásványkémiailag.

Az elsődleges szulfidokat szöveti helyzetük alapján két csoportba lehet elkülöníteni:

- Szulfidolvadék-zárványok (e): Kőzetalkotó szilikátokban, valamint spinellekben jelennek meg. Méretük változatos: 5-80 μm közötti. Kerek vagy negatív kristály alakúak (11. ábra/B és C). Döntően klinopiroxénben és olivinben jelennek meg, egy xenolit esetében (NMM1129 wehrlit) spinell a befogadó ásvány.
- Intersticiális szemcsék (i): A xenolitot alkotó szilikátok közötti térben helyezkednek el. Méretük nagyobb a zárványokénál, elérheti a 200 μm -t is. A szemcsék határai egyenesek, de lekerekített szemcsehatárok is megjelennek. Gyakran felismerhető a szilikátásványokkal való hármaspontban történő érintkezés (10. ábra/F).

Egyes esetekben nem lehetett egyértelműen eldönteni, hogy az adott szulfid szemcse melyik csoportba tartozik. Ennek legtöbbször az az oka, hogy egyes zárványok dekrepitálódhatnak a felszínre emelkedés közben, ezért sok esetben intersticiálissá válik a helyzetük, de alakjuk még gömbölyded, ami utal zárvány eredetükre (e-i). Továbbá a felsőköpeny kőzeteinek átkristályosodása során az intersticiális szemcsék bezáródhatnak és zárványokká válhatnak.

7.1 A kőzetzárványokban található szulfidok petrográfiai leírása

A szulfidok mikroszkópos vizsgálatát és meghatározását ráeső fényvel végeztük el a 10 wehrlit xenoliton, valamint összehasonlítás céljából az öt lelőhelyről származó korábban már tanulmányozott lherzoliton (Szabó és Taylor, 1994; Liptai és Patkó, 2012; Szabó és Kovács,

nem publikált adatok). A mikroszkópos képek alapján négy különböző fázist – MSS-t (monoszulfid szilárdoldat), pentlanditot, kalkopiritet, és másodlagos oxidásványokat – különítettünk el. A pirrhotin megnevezést csak abban az esetben használtuk, ahol látszódik a pentlandit és pirrhotin szételegyedése és a pirrhotin anizotrópiája egyértelműen észlelhető. A mikroszkópos vizsgálatokat pásztázó elektronmikroszkópos felvételekkel egészítettük ki. Ennek során további szulfidfázisokat, így Pt- és As-tartalmú – vélhetően sperrylitet – (NFK9 lherzolit, 11/A. ábra), valamint Co-tartalmú violaritot (NME1110 lherzolit) sikerült meghatározunk.

7.1.1 Wehrlit xenolit sorozat

NTB1109

A xenolitban döntően olivinben lévő zárványként vannak jelen a szulfidok. A vizsgált szemcsék a a kőzet relikv részén találhatók, nem kapcsolódnak a wehrlites csomókhoz. Méretük 7 és 18 μm között változik. Alakjuk kerekded, vagy negatív kristály alakú, egyes esetekben a zárványok széle nem ép. Két zárvány (3. és 4.) egy beforrt repedés mentén jelenik meg. Egy intersticiális szemcse is található a wherlitben. Háromszögletesen érintkezve jelenik meg a kőzetalkotó fázisok között és egy fázisból (MSS) áll.

NTB1120

A wehrlitben intersticiális szulfidok jelennek meg, méretük 35-150 μm . Döntően kétfázisúak (MSS+pentlandit), egy szemcse esetében kalkopirit-lamella is megfigyelhető. A pentlandit a szulfid szemcsék szélén, valamint lencséként jelenik meg az MSS mátrixban (10/A. ábra). Alakjuk gömbölyded, vagy elnyúlt, szögletes.

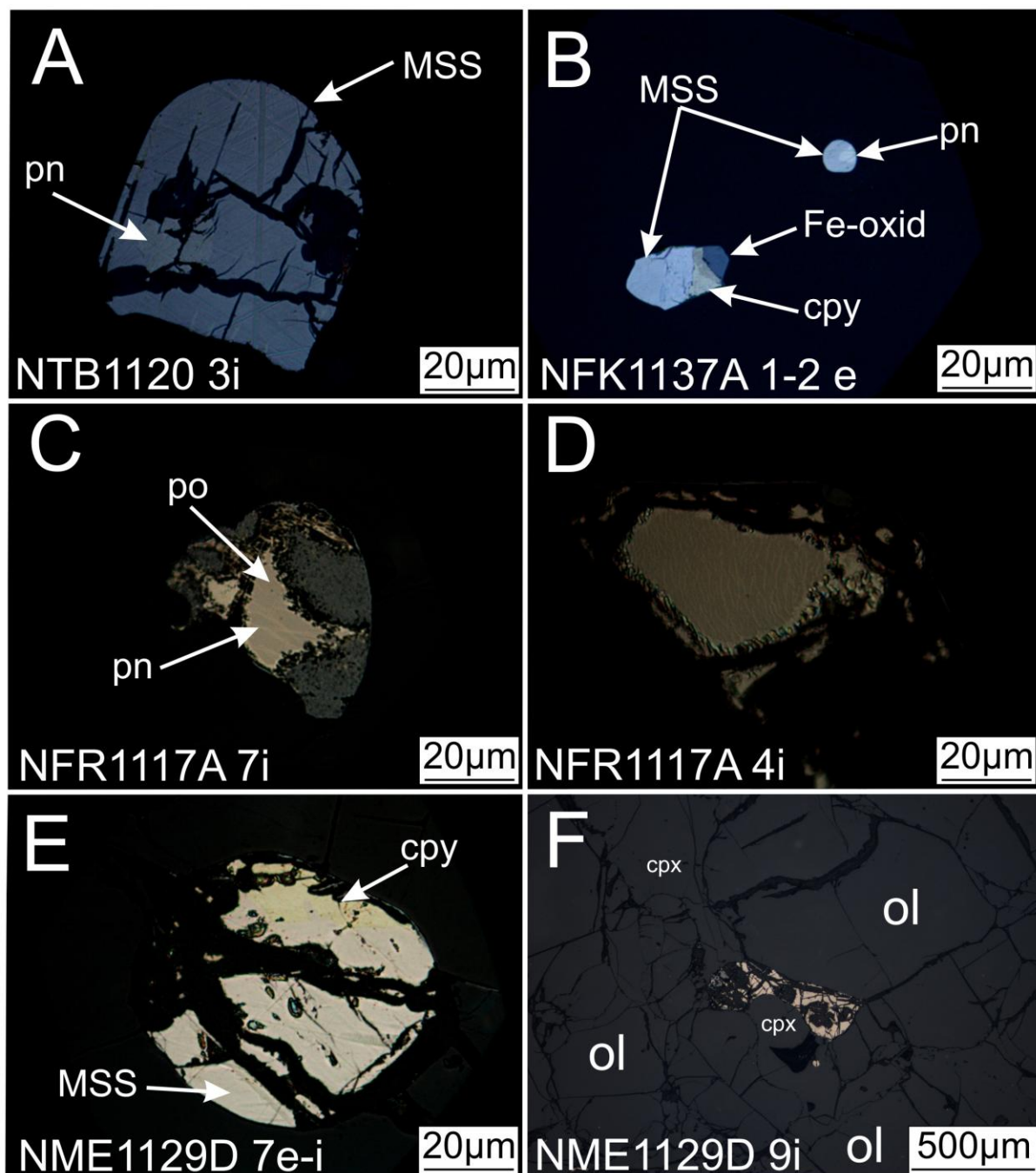
NFK1110

A xenolitban elsősorban zárványokként jelennek meg a szulfidásványok beforrt repedések mentén olivinben szilikátolvadék-zárványokkal társulva. Méretük 5-7 μm , alakjuk szögletes, negatív kristályra emlékeztet. Kétfázisúak, az alapanyagként szolgáló MSS-ben szögletes szemcsékként jelenik meg a pentlandit. Egy intersticiális zárvány is található a kőzetben. Repedés mentén helyezkedik el, alakja megnyúlt. Háromfázisú, közel azonos mennyiségű MSS és kalkopirit, valamint kisebb mennyiségű pentlandit alkotja.

NFK1137A

Egy szulfid szemcse intersticiálisan jelenik meg a xenolitban. Mérete 80 μm , azonban jelentős része oxidálódott, valamint kipergett a kőzetből a csiszolás és polírozás során. Mikroszkópban egyfázisú MSS-nek határozható meg. További szulfidok zárványként

jelennek meg olivinben (10/B. ábra), valamint klinopiroxénben (4.). Az olivinben lévő zárványok (1. és 2.) esetén három fázis figyelhető meg, míg a piroxénben lévő zárvány egyfázisú MSS.



9. ábra Wehrilit xenolitokban megjelenő szulfidzárványok mikroszkópos felvételei ráeső fényben, egy nikollal. A: Kerekded alakú, kétfázisú, repedések mentén átalakult szulfidszemcse, NTB1120 xenolit. B: Kerekded és negatív kristály alakú szulfidzárványok olivinben. Két ill. háromfázisúak, a bal oldali részben oxidálódott, NFK1137A xenolit. C: Részben átalakult, pirrhotin és pentlandit lángnyelvszerű szételegyedését mutató szulfidszemcse, NFR1117A xenolit. D: Monoklin pirrhotin-pirrhotin szételegyedést mutató szulfidásvány, NFR1117A xenolit. E: Dekrepitálódott kétfázisú szulfidzárvány olivinben. Repedések mentén átalakult, NME1129D xenolit. F: A kőzetalkotó szilikátokkal hármaspontban érintkező egyfázisú szulfidszemcse, NME1129D xenolit. MSS – monoszulfid szilárdoldat, po – pirrhotin, pn – pentlandit, cpy – kalkopirit, ol – olivin, cpx – klinopiroxén

NFR1117A

A közetben megjelenő intersticiális zárványok gömbölydedek, nem mutatnak egyensúlyi szövetet. Döntően kétfázisú MMS-pentlandit anyagú szemcsék, egy azonosítható kalkopirit lamellaként szételegyedve. A pentlandit néhány esetben lángnyelv-szerű szételegyedésként (10/C. ábra); egy-egy esetben pedig az MSS szegélyén, valamint benne diszkrét szemcséként jelenik meg. A pirhotin egyedül ebben a xenolitban mutat monoklin-pirhotin szételegyedést (10/D. ábra). Egy olivinben megjelenő szulfidzárvány alakja gömbölyded, a domináns MSS fázis szélén orientált, a zárvány belseje felé elvégződő lamellákban látható a pentlandit.

NFR1119B

A xenolitban kizárólag olivinben jelennek meg a szulfidokszemcsék zárványként, amelyek háromfázisúak, a legnagyobb részüket MSS alkotja. A pentlandit szögletes szemcsékként, vagy orientált lencséként jelenik meg. A kalkopirit a zárványok szélén, valamint az MSS-be behatolva jelenik meg, azzal íves határvonallal érintkezve.

NMM1114

A xenolitban kizárólag intersticiális szulfidok találhatók, méretük 30 és 120 μm között változik. Döntően egyfázisú MSS képletek, egy szemcse esetében nagyobb mennyiségű kalkopirit és pentlandit lamellák is megjelennek. Alakjuk igen változatos, előfordulnak zárványokhoz hasonló negatív kristály alakban, valamint hármaspontban érintkezve a szilikátfázisokkal.

NMM1129

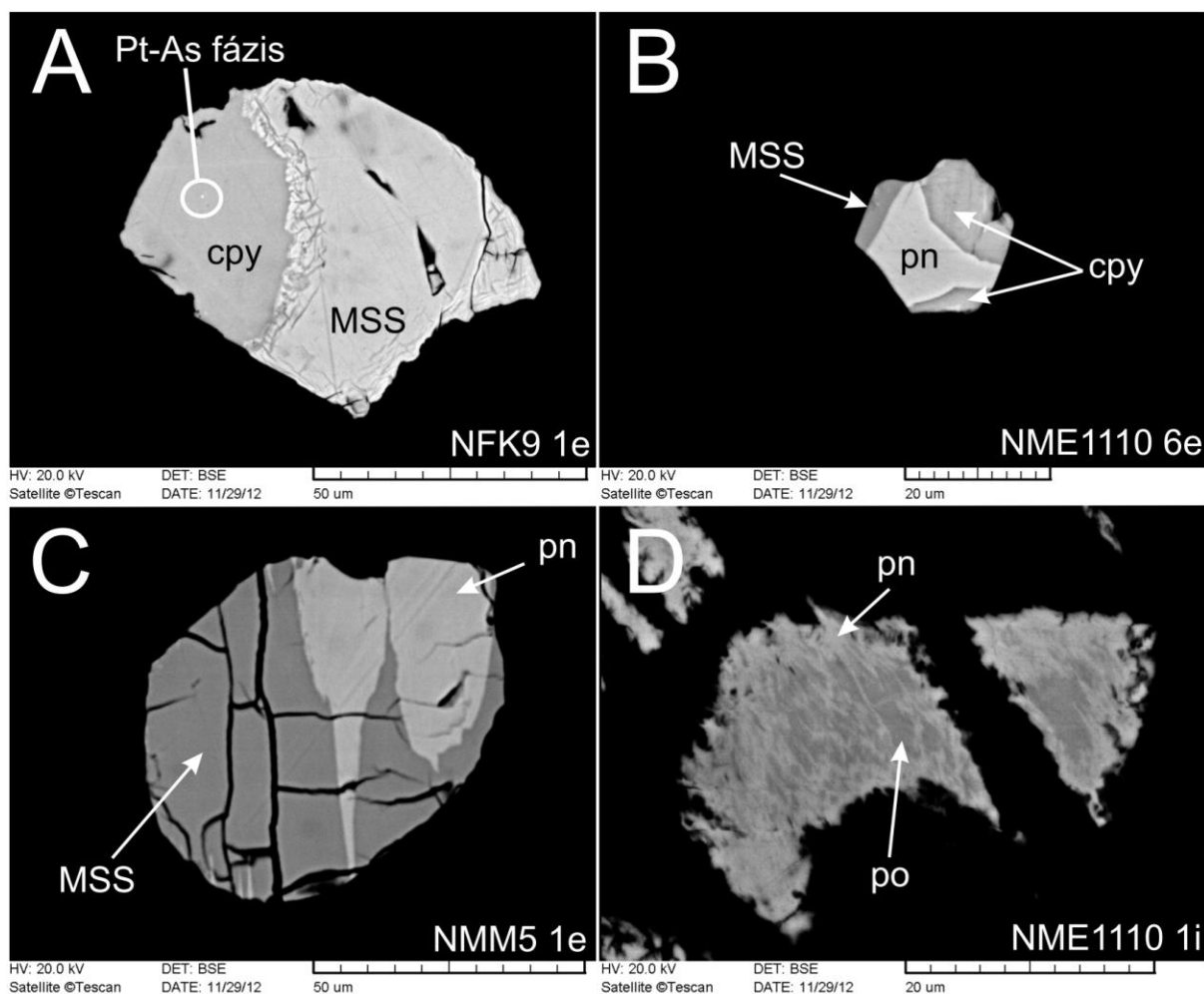
A közetben lévő intersticiális zárványok háromfázisúak, döntően MSS-ből állnak, aminek a szegélyén kismennyiségű pentlandit és kalkopirit jelenik meg. A klinopiroxénben található zárvány háromfázisú, a spinellben található szulfid kétfázisú MSS-pentlandit.

NME1110

A xenolitban a részletesen vizsgált szulfidok a közet relikta szöveti jellegeket mutató részein találhatók, a wehrlicsomókhoz közvetlenül nem kapcsolódnak. A közetben zárványok és intersticiális szemcsék egyaránt megjelennek. A 20-50 μm méretű szemcsék között megjelenő szulfidok háromfázisúak. A pirhotin és pentlandit egyes esetekben lángnyelv-szerű szételegyedést mutat (11/D. ábra). A zárványok olivinben jelennek meg, méretük kisebb az intersticiális szulfidokhoz képest (10-20 μm). Alakjuk negatív kristály formára emlékeztet (11/C. ábra). Háromfázisúak, elsősorban pentlanditból állnak, ami az MSS és kalkopirit fázisokkal ívelt szemcsehatárok mentén érintkezik.

NME1129D

Intersticiális helyzetű szulfidjai kerekded alakú, valamint megnyúlt, a szilikátokkal hármaspontokban érintkező formában is megjelennek (10/F. ábra). Kétfázisúak, nagymennyiségű MSS mellett lamellákban kalkopirit jelenik meg (10/E. ábra). Erősen átalakultak. A zárványok piroxénekben található, alakjuk kerekded, fázisösszetételük és a szulfidfázisok viszonyai megegyeznek az intersticiális zárványokéval.



10. ábra Lherzolit (A, C) és wehrlit (B, D) xenolitokban található szulfidok pásztázó elektronmikroszkópos visszaszórt elektronképei (BSE). A: Kétfázisú szulfidzárvány ortopiroxénben. A kalkopiritben néhány mikrométeres Pt és As tartalmú fázis jelenik meg, NFK9 xenolit. B: Negatív kristály alakú, háromfázisú szulfidzárvány olivinben, NMM5 xenolit. C: Kétfázisú, kerekded szulfidzárvány olivinben. A pentlandit orientált szételegyedésként jelenik meg a monosulfid szilárdoldatban, NME1110 xenolit. D: Lángnyelv szerű pirrotin-pentlandit szételegyedést mutató intersticiális szulfidszemcse NME1110 xenolit. MSS – monosulfid szilárdoldat, po – pirrotin, pn – pentlandit, cpy – kalkopirit

7.1.2 Lherzolit xenolit sorozat

NTB7 lherzolit (Kovács és Szabó, nem publikált)

A xenolitban az 1. szemcse nagyméretű (80 μm), intersticiális helyzetű, kőzetüveggel és olvadt szilikátásványokkal együtt jelenik meg. MSS alkotja, a szemcse egyik fele átalakult Fe-oxid ásványokká. A 2. zárvány olivinben jelenik meg, repedés mentén dekrepitálódott. Nagyobb részét MSS alkotja, amiben orientált pentlandit lécek jelennek meg.

NFK9 lherzolit (Kovács és Szabó, nem publikált)

A xenolitban 6 szulfid szemcse található, de négyet tanulmányoztunk részletesen. Az 1. zárvány anyaga MSS és kalkopirit, befogadó ásványa ortopiroxén. Ez a zárvány tartalmazza a legnagyobb méretű kalkopiritet a dolgozatban tárgyalt xenolitok közül (30*40 μm). A kalkopirit és pentlandit határa egyedi textúrát mutat, a pentlandit anyagában mikrométer alatti vastagságú kalkopirit-lécek találhatók. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat során nagy rendszámú, Pt- és As-tartalmú szemcsét sikerült azonosítani a kalkopiritben (11/A. ábra). A 2. zárvány intersticiális helyzetű és részben megolvadt. Nagy mérete (200 μm), valamint a szilikátokkal való hármaspontban való érintkezésre elsődleges zárványra utal. Anyagát elsősorban MSS alkotja, aminek egy része oxidokká alakult. A szemcsében egy körülbelül 10 μm nagyságú kalkopirit metszet látható. Az 5. zárvány olivinben található, alakja szögletes. Háromfázisú, az MSS-ben szételegyedett pentlanditon kívül kalkopirit is található a szemcse peremén. A 6. szulfid szemcseközi helyzetben van. Elsősorban MSS-ből áll, a szemcse szélein kalkopirit is megfigyelhető. Repedések mentén erősen mállott a szemcse.

NFR1109 lherzolit (Liptai és Patkó, 2012)

A xenolitban három szulfid beágyazás található, kettő olivinben (1. és 2.), egy ortopiroxénben (3.). Az 1. zárvány kerek, egyfázisú, MSS és átalakulási termékként oxid alkotja. A 2. zárvány egy olivin repedésében jelenik meg. A szemcse közepén MSS, a szélén pentlandit azonosítható. A két fázis határán lángnyelv-szerűen behatol a pentlandit az MSS-be. A 3. zárványt MSS alkotja, valamint a szélén orientált szételegyedésként megjelenő pentlandit. Alakja kissé szögletes, negatív kristály formára emlékeztet.

NMM5 lherzolit (Kovács és Szabó, nem publikált)

A xenolitban három nagyméretű szulfidzárvány figyelhető meg. Az 1. zárvány olivinben jelenik meg kerekded beágyazásként. Fő tömegét MSS alkotja, amiben nagyméretű orientált pentlandit szételegyedések találhatók (11/B. ábra). A zárványt átjáró repedések mentén

másodlagos oxidfázisok jelentek meg. A 2. és 3. szemcse mind szöveticen, mind összetételileg nagy hasonlóságot mutat. Intersticiális helyzetűek, méretük igen nagy (75 és 135 μm). Háromfázisúak, nagy részüket MSS alkotja, amiben néhány μm széles kalkopirit lamellák találhatók. Másodlagos oxid mindkét szemcse esetében felismerhető.

NME23 Iherzolit (Szabó és Taylor, 1994)

A xenolitban előforduló mindkét szulfid szemcse intersticiálisan jelenik meg. Az 1. szemcse helyzete egyensúlyi szövetre utal, azonban az ásvány egy része kipattogott a kőzetből csiszolás során. A megmaradt szemcse MSS, amiben néhány μm széles és hosszú lángnyelv-szerű szételegyedés figyelhető meg, ami a pirrhotin és pentlandit szételegyedésére jellemző. A 2. szemcsében szintén MSS szolgáltatja a szulfid mátrixát, amiben 2-3 μm széles és 10 μm hosszú pentlandit lemezek jelennek meg. A pentlandit lemezek nem irányítottak, repedések mentén erősen átalakultak.

7.2 Szulfidok kémiai összetétele

A szulfidásványok fázisainak kémiai összetételének meghatározását elektronmikroszondával végeztük. Az elemzésre elsősorban szöveti jellegeik alapján elsődlegesnek vélt szulfidokat választottunk ki. A legkisebb elemzett szemcse átmérője 7 μm . Az 5 μm -nél kisebb ásványfázisok esetében nem volt lehetőségünk azok összetételét pontosan meghatározni, mivel – kis méretük miatt – átfedtek a szomszédos fázisokkal. Ezek esetében az adott mintára vagy területre jellemző reprezentatív értékkel számoltunk (1. és 2. táblázat).

1. táblázat. Reprezentatív szulfidfázisok összetételei wehrlit xenolitokban. mss – monoszulfid szilárdoldat, cpy – kalkopirit, pn – pentlandit, po – pirrhotin, vi - violarit

Xenolit	Zárvány	Fázis	S	Fe	Co	Ni	Cu
(m/m %)							
NTB1109	3e	po	37,9	57,1	0,04	2,35	0,06
NTB1120	8i	pn	33,3	31,2	0,67	34,2	0,03
NTB1120	7i	po	38,7	56,6	0,00	3,90	0,00
NFK1110	1e	pn	35,5	39,8	0,55	22,4	0,10
NFK1137A	3i	mss	39,7	49,5	0,17	9,67	0,01
NFK1137A	1e	po	39,4	59,6	0,00	0,36	0,00
NFR1117A	1i	mss	38,8	49,0	0,20	10,7	0,04
NFR1117A	3e	po	38,3	56,5	0,01	3,67	0,00
NFR1119B	2e	po	38,9	58,5	0,13	1,54	0,02
NMM1114	6i	mss	39,4	44,9	0,16	14,6	0,01
NMM1129	7e	pn	33,6	32,8	0,81	31,7	0,12
NMM1129	2e	po	38,4	58,2	0,00	1,69	0,04
NME1110	2i	mss	39,1	50,3	0,20	8,56	0,02
NME1110	6e	pn	33,0	30,8	0,37	34,8	0,05
NME1110	7i	pn+vi	39,7	17,7	6,83	33,2	1,11
NME1129D	2i	cpy	34,8	32,2	0,00	0,34	31,3
NME1129D	7 e-i	cpy	34,9	31,3	0,01	0,34	32,0
NME1129D	2i	po	39,5	55,2	0,02	4,61	0,05

2. táblázat. Lherzolit xenolitokban található szulfidfázisok reprezentatív kémiai összetételei. mss – monoszulfid szilárdoldat, pn – pentlandit, po – pirrhotin

Xenolit	Zárvány	Fázis	S	Fe	Co	Ni	Cu
(m/m %)							
NTB7	2e	mss	39,4	50,2	0,10	9,37	0,00
NTB7	1i	pn	39,3	35,2	0,38	24,3	0,04
NFK9	2i	mss	39,9	45,5	0,15	13,5	0,02
NFK9	6i	po	39,8	53,7	0,03	5,81	0,01
NFR1109	1e	mss	39,3	48,6	0,18	11,0	0,01
NFR1109	3e	pn	40,0	25,6	0,95	32,0	0,03
NMM5	2i	mss	39,5	49,1	0,15	10,9	0,01
NME23	1i	mss	39,9	44,4	0,28	14,9	0,01

7.2.1 Az egyes szulfid fázisok kémiai összetétele

Wehrlit xenolitok szulfidásványai

Monoszulfid szilárdoldat

Minden szulfid szemcsében jelenlévő fázis (Függelék, II. táblázat). Kémiai összetétele igen tág határok között változik (12. ábra). A mikroszkópos megjelenés alapján minden izotróp, a pirrhotin jellegzetes rózsaszín, dohánybarna színt mutató képletet MSS-nek határoztunk meg. Kémiai elemzések alapján azonban csak azt tekintjük MSS-nek, amiben a Ni koncentrációja eléri az 5 tömegszázalékot (Szabó és Bodnar, 1995). A fázis kémiai összetétele 47,0-54,9 m/m % S, 41,8-53,1 m/m% Fe, 6,8-19,5 m/m% Ni, 0-0,06 m/m% Cu, és 0,04-0,35 m/m% Co.

Pirrhotin

Mikroszkóposan nem sikerült meghatározni, mivel jellegzetes anizotrópiája nem volt észlelhető. Egy esetben lángnyelv-szerű szételegyedése volt megfigyelhető pentlandittal a NFR1117A xenolit 7i szulfid szemcséjében (11/C. ábra). A mikroszondás elemzések alapján azonban a szulfid szemcsék jelentős részében - több mint harmadában - a pirrhotin jelenlévő fázis. Kémiai összetétele: 37,6-40,49 m/m % S, 52,6-60,1 m/m % Fe, 0,36-4,75 m/m % Ni, max. 0,13 m/m % Co és max.0,13 m/m% Cu.

Pentlandit

A szulfid szemcsék jelentős részében - több mint 50 százalékában - van jelen (Függelék, II. táblázat). Az MSS-hez hasonlóan nagy változékonyságot mutat a kémiai összetétele: 32,8-39,5 m/m % S, 28,0-39,8 m/m % Fe, 22,4-38,0 m/m % Ni, 0,25-1,05 m/m % Co és max. 0,82 m/m % Cu.

Kalkopirit

A legritkábban előforduló ásvány, a vizsgált szulid ásványok között, azonban még így is a xenolitok harmadában megjelenik (Függelék, II. táblázat). A kalkopirit jellemzően a szemcsék szélén található igen kis méretben (<5 µm), ugyanakkor ez az elegyrész mutatja a legnagyobb fokú átalakulást. Kémiai összetétele: 34,8-34,9 m/m % S, 31,3-32,2 m/m % Fe, max. 0,34 m/m % Ni, max 0,12 m/m % Co és 31,3-32,0 m/m % Cu.

Violarit

Mikroszkóposan nem azonosított szulfid elegyrész. Összetételét önálló fázisként sem sikerült meghatározni, a mért adat (1. táblázat) valószínű, hogy pentlandit és violarit keveréke, a területről már közölt (Szabó és Bodnar, 1995) violarit összetételek és az SEM

felvételek alapján. Átlagos kémiai összetétele: 39,7 m/m % S, 17,7 m/m % Fe, 33,2 m/m % Ni, 6,81 m/m % Co és 1,11 m/m % Cu.

Lherzolit xenolitok szulfidásványai

Monoszulfid szilárdoldat

Lherzolit xenolitokban is a leggyakoribb elegyrész az MSS, minden szulfidszemcsében előfordul. Kémiai összetételük nagy szórást mutat (12. ábra). Összetételük: 38,7-39,9 m/m % S, 42,6-53,7 m/m % Fe, 5,81-17,2 m/m % Ni, 0,03-0,28 m/m % Co és max 0,03 m/m % Cu.

Pirrhotin

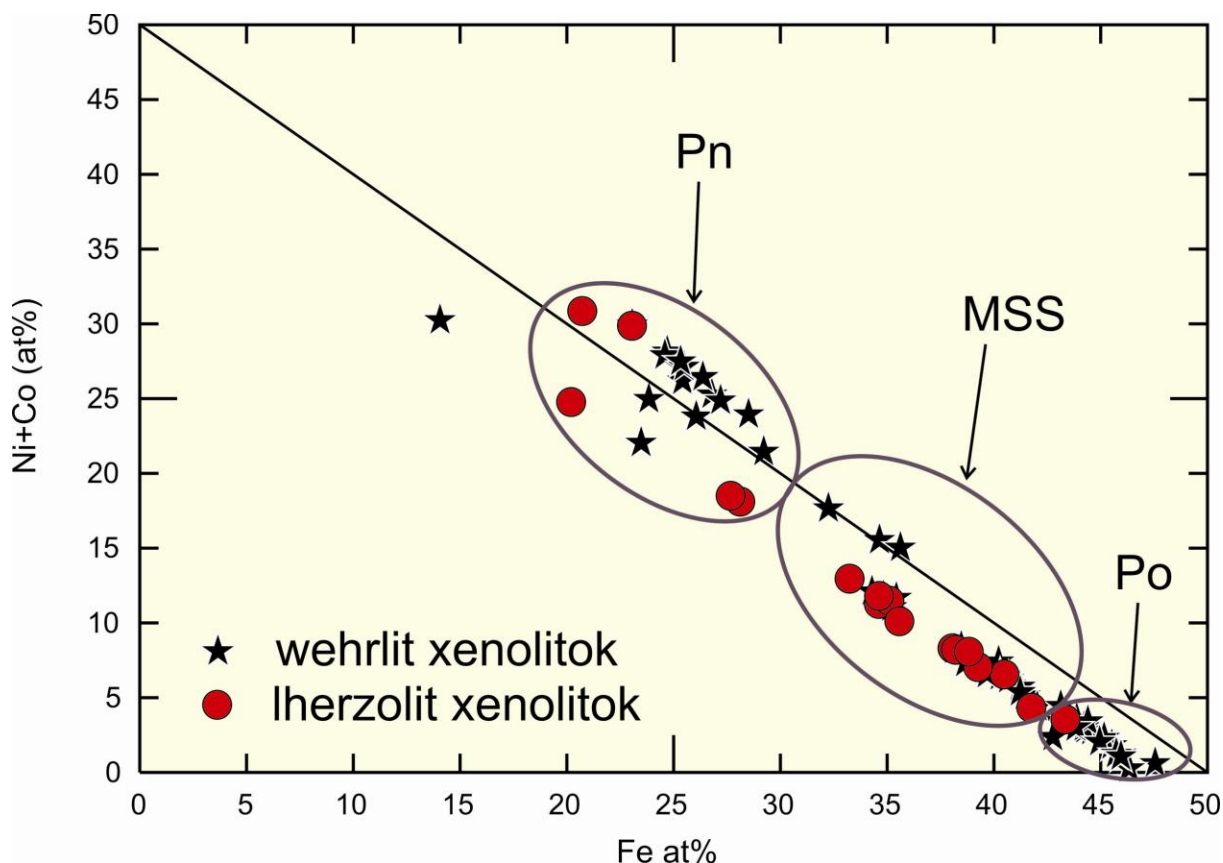
A pirrhotin csak egy lherzolit xenolitban jelenik meg elemezhető méretben (NFR1109 lherzolit). A többi szemcsében néhány μm -es szételegyedési lamellaként látható pentlanditban. Kémiai összetétele: 39,1 m/m % S, 55,6 m/m % Fe, 4,71 m/m % Ni, 0,05 m/m % Co és 0,03 m/m % Cu.

Pentlandit

A lherzolitokban található szulfidszemcsék több mint felében megjelenő fázis. Kémiai összetétele: 33,1-40,0 m/m % S, 25,5-35,7 m/m % Fe, 23,8-39,6 m/m % Ni, 0,31-0,95 m/m % Co és max. 0,11 m/m % Cu.

Kalkopirit

A xenolitok felében megjelenő szulfidfázis, az NFK9 lherzolitban nagy modális részaránnyal jelentkezik (Függelék, III. táblázat). Lherzolitos kőzetben nem sikerült kalkopiritet elemezni, így a számoláshoz a Szabó és Bodnar (1995) közlemény adatait használtuk fel.



11. ábra Az egyes szulfidfázisok ábrázolása atomszázalék (at %) szerint a Fe és Ni+Co függvényében a pirrhótin (Po), monosulfid szilárdolat (MSS) és pentlandit (Pn) mező megjelölésével.

7.2.2 Szulfid szemcsék teljes kémiai összetétele

A szulfidok teljes kémiai összetételét az egyes fázisok kémiai összetételéből (1. és 2. táblázat), valamint az adott ásvány részarányából (Függelék, II. és III. táblázat) számítottuk ki tömegegyensúly számolással. Az egyes fázisok modális mennyiségét mikroszkópos fényképek digitális feldolgozásával számítottuk ki. Azokban az esetekben, ahol a szemcsékben szereplő szulfidok kémiai összetételét nem sikerült meghatározni (leggyakrabban azok kis mérete miatt), reprezentatívnak tekintett szulfidfázis összetételekkel számoltunk (1. táblázat). Leggyakrabban ez a kalkopiritet érintette. Mivel a szulfidzárványok feltáródása véletlenszerű, ezért ez a módszer csak egy becslést ad a szulfid teljes kémiai összetételére, nem bizonyos, hogy a számolt értékek minden esetben jól reprezentálják az adott szulfid összetételét.

Wehrlit sorozat

Az egyes szulfidok kémiai összetétele igen nagy változatosságot mutat. Kéntartalmuk 32,8 és 40,4 m/m %, Fe és a Ni koncentrációja 20,5-57,7 m/m % és 1,39-38,0 m/m % között változik. A Co mennyisége 0,02-0,39 m/m % egy minta kivételével (NME1110 7i), amiben a violarit-tartalmú fázis Co-tartalma meghaladja az 5 m/m %-ot. A Cu koncentrációja szintén erősen változik (0-7,26 m/m %), kettő szulfidzárvány esetében (NME1110 6e és NTB1109 1e) pedig meghaladja a 12 m/m %-ot.

Lherzolit sorozat

Összetételük a felsőköpeny-eredetű xenolitokra jellemző 1000 °C-on stabilis (Kullerud et al, 1969). MSS tartományba esik. Az összetételeik $S=34,4-39,9$ m/m %, $Fe=42,5-49,8$ m/m %, $Ni=9,81-19,6$ m/m %, $Co=0,10-0,38$ m/m %, $Cu=0-1,91$ m/m % közé esik két szulfidszemcse (NFK9 1e és az NTB7 1i) kivételével. E két szemcsében nagyobb a pentlandit részaránya, továbbá az NFK9 1e szemcse kalkopiritben is gazdag.

Elmondható mindkét peridotit sorozatra, hogy a szulfidbeágyazódások szöveti helyzete (i vagy e típus), lelőhelye és a számolt kémiai összetétele között kapcsolat nem fedezhető fel.

7.2.3 Xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetétel

A tíz tanulmányozott wehrilit xenolitra, és a referenciaként használt öt lherzolit xenolitra kiszámítottunk egy becsült átlagos szulfidösszetételt. Alapvető feltételezésünk az volt, hogy a feltárt zárványok együttesen reprezentatívan tükrözik a közet átlagos szulfidösszetételét, így az egyes szemcsékre számolt összetételek egyszerű számtani átlagát tekintjük a xenolitok becsült szulfid összetételének, amint az a korábbi irodalmak is alkalmazták (pl. Szabó és Bodnar, 1995; Falus, 2000; Zajacz és Szabó, 2003; Wang et al., 2009). A becslés hibáját statisztikus úton lehet javítani, azaz minél több szemcse áll rendelkezésre, annál pontosabb lesz az átlagos összetétel.

A lherzolit xenolitok esetében az átlagos értékek nem mutatnak jelentős szórást (4. táblázat, 13. és 14. ábra). A wehrilit xenolitok közül azonban az NME1110 és NTB1109 minta kis Fe (35,2 és 37,6 m/m %) és nagy Ni+Co koncentrációjuk (21,2 és 21,8 m/m %) miatt jól elkülönülnek a Fe-S-Ni(+Co) rendszerben (Kullerud et al, 1969) a többi wehrilittől (13. ábra). A wehrilit xenolit sorozat döntő része 46,7-52,1 m/m % Fe és 5,4-14,2 m/m % Ni tartalommal jellemezhető, ami az 1100 °C-on stabilis MSS tartományba esik. A Cu-S-Fe (Kullerud et al,

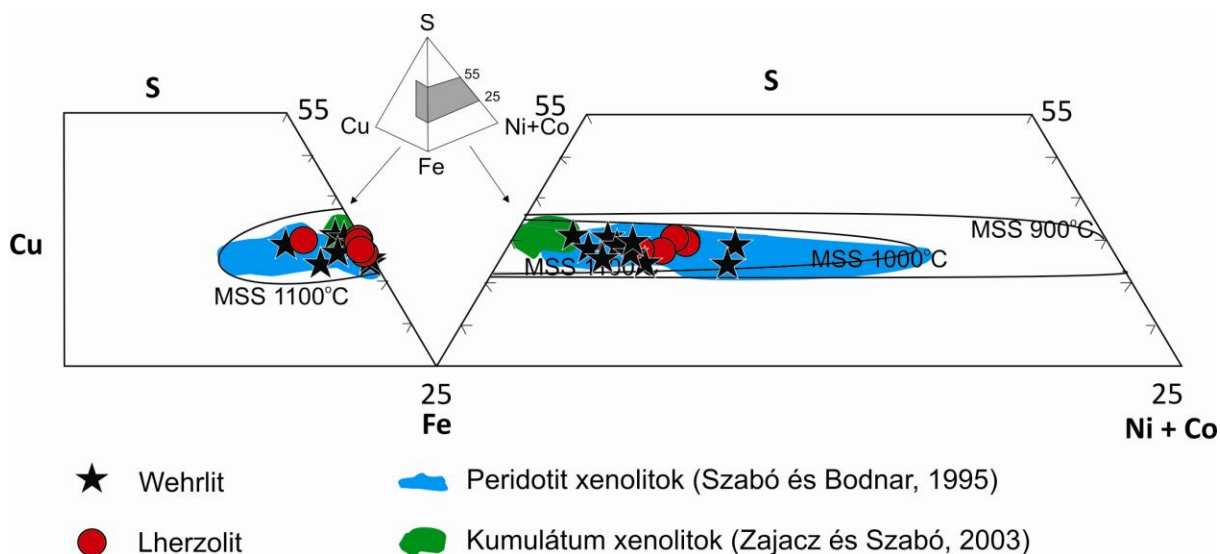
3. táblázat. A tanulmányozott wehrlit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek.

Xenolit	S	Fe	Co	Ni	Cu
(m/m %)					
NTB1109	34,9	37,6	0,19	21,7	3,89
NTB1120	37,3	51,6	0,13	9,87	0,08
NFK1110	36,5	47,3	0,25	14,2	0,12
NFK1137A	39,0	48,7	0,21	8,85	2,32
NFR1117A	38,4	48,8	0,15	10,8	0,57
NFR1119B	37,1	47,4	0,20	12,0	2,68
NMM1114	39,0	46,7	0,24	11,5	1,44
NMM1129	38,3	52,1	0,17	7,76	0,60
NME1110	36,7	35,2	1,53	19,6	5,81
NME1129D	39,2	51,9	0,10	5,40	2,30

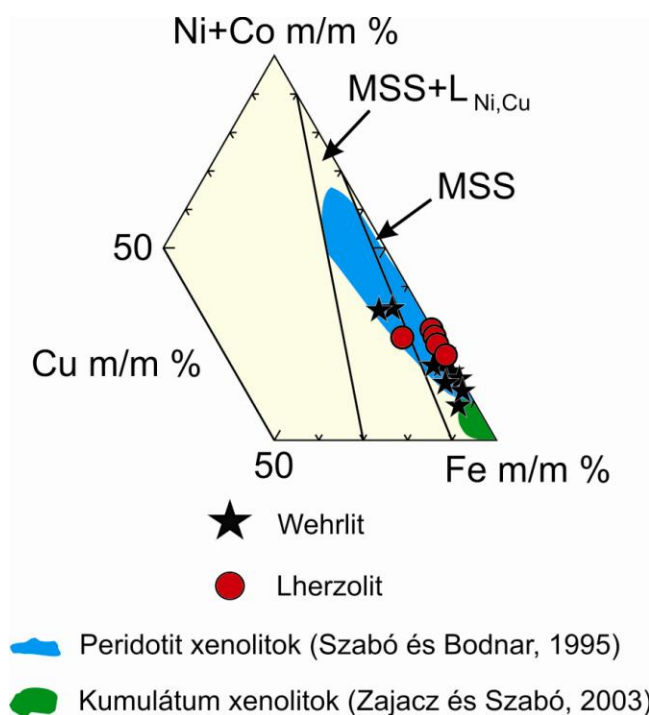
4. táblázat. A területről származó reprezentatív lherzolit xenolitok szulfidjainak átlagos összetétele

Xenolit	S	Fe	Co	Ni	Cu
(m/m %)					
NFK9	37,8	40,3	0,15	16,3	4,71
NFR1109	38,2	47,3	0,22	13,3	0,13
NME23	39,7	43,4	0,25	16,0	0,17
NMM5	38,5	45,2	0,23	15,2	0,43
NTB7	39,4	42,5	0,25	17,1	0,02

1969) rendszerben a közetsorozat szerinti elkülönítés nem lehetséges, kettő wehrlit (NTB1109 és NME1110) és egy lherzolit (NFK9) xenolitban megemelkedett Cu koncentráció látható (13. ábra), ami azonban még így is beleesik az 1100 °C-on stabil MSS összetételi tartományába. A Cu-(Ni+Co)-Fe (Craig és Kullerud, 1969) rendszerben ez a három minta szintén elkülönülve, az MSS + Ni és Cu gazdag likvid fázis stabilitási tartományába esik, míg a többi kőzet szulfid összetétele az MSS stabilitási tartományában jelenik meg (1000 °C felett, 14. ábra) a Fe-S-Ni(+Co) rendszerhez hasonlóan (13. ábra).



12. ábra A tanulmányozott wehrlit és a reprezentatív lherzolit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek a Cu-S-Fe-Ni(+Co) rendszerben. A stabilitási tartományok Kullerud et al. (1969) alapján.



13. ábra A tanulmányozott wehrlit és a reprezentatív lherzolit xenolitokra számolt átlagos szulfidösszetételek a Cu-Ni(+Co)-Fe rendszerben. A stabilis fázisok 1000°C-on Craig és Kullerud (1969) kísérleti munkája alapján. MSS – monoszulfid szilárdoldat, L_{Ni+Cu} – Ni és Cu gazdag likvid fázis

8. Diszkusszió

8.1 A wehrlitesedés kőzettani bizonyítékai

Az általunk vizsgált wehrlit xenolitokban a klinopiroxén gazdag részek nem ereket, hanem csomókat formálnak (3. ábra), ami egy hosszabb ideig tartó olvadék-falkőzet kölcsönhatásra utal, ami arra utal, hogy az eredetileg jelenlévő ortopiroxéneknek volt ideje klinopiroxénné alakulni a wehrlitesedési folyamat során. Két wehrlit xenolitban (NFR1117A és NFR1119B) megfigyeltük a klinopiroxének magjában előforduló ortopiroxént (4. ábra), ami egyrészt utal arra, hogy a folyamat nem minden esetben tudott teljesen végbemenni, másrészt bizonyítja, hogy az ortopiroxén eredetileg jelen volt.

A wehrlitek xenolitokban átalakulást nem szenvedett részek ásványkapcsolatai esélyt adnak az eredeti szövet meghatározására. A klinopiroxénben gazdag csomók között előforduló porfirokласztos és ekvigranuláris szöveti elemek megnövekedett deformációra utalnak. Több esetben megfigyeltük a porfirokласztok alszemcsésedését is, ami az ekvigranuláris szövettípusba való átmenet egy bizonyítéka (Mercier és Nicolas, 1974).

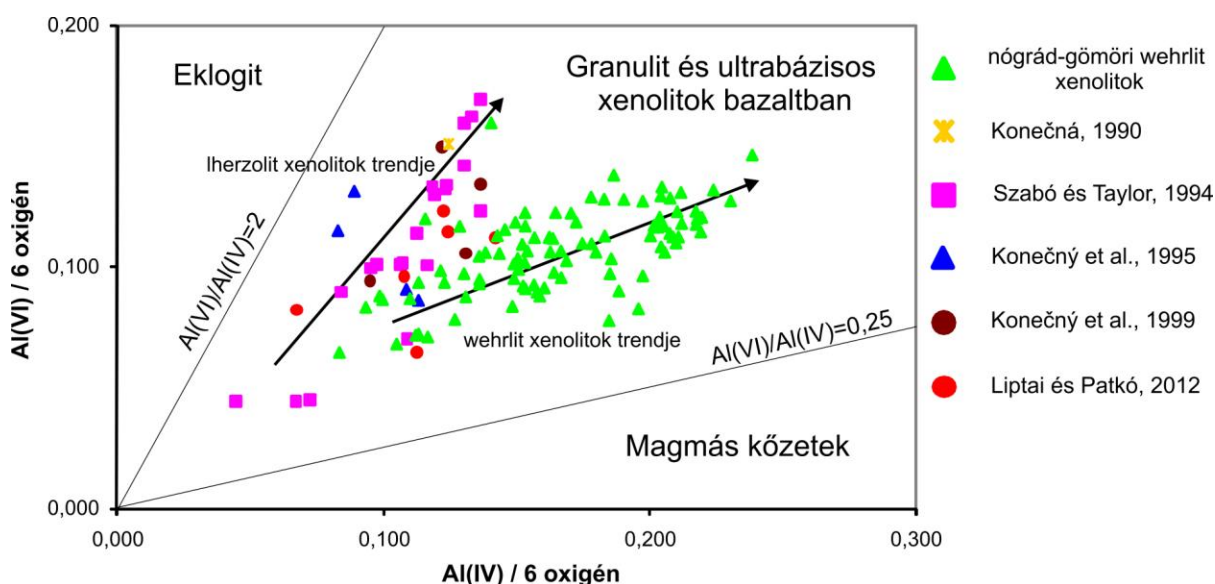
8.2 A wehrlitesedés geokémiai bizonyítékai

A felsőkőpenyt alkotó ásványok szemcsehatárai mentén mozgó, átalakulást eredményező fluidum vagy olvadék összetételét közvetlen és közvetett módon becsülhetjük. Előbbire lehetőséget nyújt a köpeny ásványokban található fluidum- és olvadékszárványok vizsgálata, ami egy későbbi kutatás része. Míg a közvetett becslésre az ásványok főelem összetételének ismerete ad esélyt. Az általunk elvégzett főelem geokémiai elemzések eredményei minden ásványban – olivin, klinopiroxén, spinell, szulfid – mutattak különbséget az eredetinek (kiindulási anyagnak) vélt lherzolit xenolitok és az átalakuláson átesett wehrlit xenolitok között. A wehrliteket felépítő ásványok – olivin, klinopiroxén, spinell és (szulfid) – összetételei változatos és széles tartományban mozognak (6., 7., 9-11., 13., 14. ábra), ami azzal magyarázható, hogy a főelem geokémiai vizsgálatok gyengébben és erősebben átalakult wehrlit xenolitokat egyaránt érintettek. Ezáltal a fejlődés különböző szintjeit jelentik az egyensúlyi rendszernek tekintett lherzolitokkal szemben.

A lherzolitok főelem geokémiai tulajdonságát vizsgálva feltűnő, hogy a két fűlek-rátkai xenolit (NFR1109, NFR7) olivinje (6. és 7. ábra) a wehrlitek területére esik, míg a

klinopiroxénje (9. és 10. ábra) a lherzolitokkal mutat egyezést. Ebből arra következtetünk, hogy ez a két lherzolit xenolit ténylegesen a wehrlit és a lherzolit sorozat közötti átmeneti tagot képez, amely egyes elemekben (Fe és Mn) már gazdagodott másokban (Al, Ti) viszont még nem.

A klinopiroxének tetraéderez és oktaéderez koordinációban megjelenő Al megoszlása szerint (18. ábra) - ami a képződési nyomással arányos (Aoki és Shiba, 1973) – a vizsgált xenolitok a bazaltokban előforduló granulit és ultrabázisos xenolitok mezején jelennek és önálló trendet alkotnak mind a tanulmányozott wehrlit és a lherzolit xenolitokban. Ez fontos geokémiai bizonyíték arra, hogy a wehrlitesedés nem a bezáró és felszínre szállító bazalttal való kölcsönhatás eredményeként alakul ki, hanem egy mélybeli, korábbi folyamat.



14. ábra Az Al kationok megoszlása a hatos és négyes koordináció között, ami a piroxének képződési körülményeire utal. A legnagyobb mélységből származó eklogitok piroxénjeiben az Al oktaéderez pozíciója, míg a magmás kőzetek klinopiroxénjeiben (alapanyag és fenokristály) az Al tetraéderez pozíciója dominál (Aoki és Shiba, 1973).

Az olivin a wehrlitekben kisebb mg-számmal és Ni-tartalommal rendelkezik, mint a lherzolitokban (7. ábra). A felsőköpenyben nagy nyomáson és hőméreketen kompatibilis Mg és Ni valószínűleg, hogy az olvadékkal történő kölcsönhatás eredményeként elhagyta volna az olivin szerkezetét. Ezáltal a Ni és Mg koncentrációjának a változása (7. ábra) relatív csökkenés, azaz a többi alkotó elem pl. Fe, Mn gazdagodásával (6. ábra) magyarázható. Az eredeti felsőköpeny ásványokkal kölcsönható olvadékból feltételezhetően Fe- és Mn-gazdag perem kristályosodhatott, amely az olivin modális növekedését is eredményezhette a xenolitokban. Feltételezhető, hogy a kristályosodást követően a koncentrációkülönbségek

által vezérelt diffúzió következtében a Fe és Mn az olivinkristály belseje felé, míg a Ni és Mg a peremek felé migrált. Az ortopiroxén rovására létrejött, megnövekedett méretű olivin, így Fe-ban és Mn-ban gazdagabbá (átlagosan 14,4 és 0,23 m/m %-ra nőtt 10,9 és 0,18 m/m %-ról), ezzel szemben Ni-ben és Mg-ban szegényebbé vált (átlagosan 0,28 és 46,0 m/m %-ra csökkent 0,36 és 48,6 m/m %-ról). Az olivin esetében az $mg\#$ a wehrlitekben kisebb (átlagosan 0,85), ami jóval alatta marad a lherzolitokra számolt értékeknek (átlagosan 0,90). Ez az petrogenetikai paraméter - a köpenyanyag geokémiai állapotának (és történetének) egy fokmérője - jól mutatja, hogy a lherzolit adatai nem térnek el az átlagos köpenyértéktől (Griffin et al., 1999; Downes, 2001), szemben a jelentős kémiai és szöveti változást szenvedett wehrlit xenolitok mg -számától.

A wehrlitesedés folyamán a klinopiroxén részaránya a tíz vizsgált xenolitokban legalább a háromszorosára emelkedett (7 v/v %-ról 21 v/v %-ra) (Függelék, 1. táblázat). Akárcsak az olivinek esetében, a folyamat jelentős Fe gazdagodást eredményezett a vizsgált xenolitok klinopiroxénjeiben is (átlagosan 1 m/m %-kal nőtt az FeO). A klinopiroxén TiO_2 - és Al_2O_3 -gazdagodása is számottevő (átlagosan 0,85 és 6,15 m/m %-ra nőtt 0,35 és 4,69 m/m %-ról), amit az inkompatibilis Ti - kompatibilis Cr (10. ábra) és a parciális olvadás okozta kimerülést ábrázoló Na-Al kapcsolat (10. ábra) is igazol. Az eddigiekkel összhangban a Na és Al (10. ábra) részleges olvadásra utaló pozitív korrelációja nem jelenik meg (nem is vártuk), sőt a jelentős Al növekedéssel az enyhe (minden bizonnyal relatív) Na szegényedés párosul. A wehrlit xenolitok klinopiroxénjeinek Na tartalma kisebb (átlagosan 0,99 m/m %), mint a lherzolitoké (átlagosan 1,17 m/m %, Függelék V. a és c. táblázat).

A wehrlit xenolitok spinelljeiben a TiO_2 , FeO_t és Al_2O_3 gazdagodást mutat (míg a Cr_2O_3 és MgO relatív szegényedést jelez), ami nem meglepő az előbbiekről ismeretében. A TiO_2 , FeO_t , Al_2O_3 átlagos értékei rendre 0,67, 20,0 és 45,4 m/m %-ra nőttek 0,18, 14,6, 22,3 m/m %-ról (Függelék, 6. táblázat, 11. ábra). Ezzel szemben a wehrlitek kis $mg\#$ - és $cr\#$ -mal jelentkeznek (átlagosan 0,70- és 0,19-re csökkentek 0,75- és 0,26-ról (Függelék 6. táblázat, 11. ábra). Kiemelendő, hogy a Fe-gazdagodás egyben jelentős Fe^{3+} növekedést eredményezett, azonban a mg -számot a relatív csökkenést mutató Fe^{2+} -ból számoltuk. A spinell esetén hasonlóképp Fe-Ti-Al-gazdag szegélyképződés játszódhatott le a wehrlitesedés során, amit szemcsén belüli Fe-Ti-Al és ellentétes irányú Mg-Cr diffúzió követett.

A vizsgált összetételekből következik, hogy a wehrlitesedést okozó olvadék a lherzolitos köpeny ásványait bazaltos elemekben (Al, Ti, Fe, Mn) gazdagította, ami mafikus olvadék kölcsönhatására utal, aminek a forrása asztenoszféra lehetett. Új ásványfázisok azonban nem jelentek meg wehrlitekben, az eredetileg is jelenlévő fázisok megváltozott kémiai összetétellel

jelennek meg. Ezek alapján a wehrlitesedés folyamata kimeríti a lopakodó („stealth”) metasomatózis fogalmát (Griffin és O'Reilly, 2012). A mafikus olvadék hatása petrográfiai megfigyelésekkel egyértelműen elkülöníthető a xenolitokat felszínre szállító magmától. Megfigyelések alapján a befogadó bazalt csak a xenolit peremével került fizikai és kémiai kölcsönhatásba, azonban teljes zárványt átjáró beszüremkedéseket nem ismertünk fel.

8.3 Szulfidok szerepe a köpenymetasomatózisban

A wehrlitesedés folyamata nemcsak a kőzetalkotó ásványokban okozott kémiai változásokat, hanem nagymennyiségű szulfiddal is gazdagította az átalakuló köpeny szegmenst, ezért ezek vizsgálatával is többletinformációt nyerhetünk a metasomatizáló fluidum eredetéről, összetételéről. A felsőköpeny szulfidjai igen érzékenyen reagálnak az oladási és metasomatikus eseményekre (pl. Lorand, 1989; Szabó és Bodnar, 1995; Falus, 2000; Zajacz és Szabó, 2003), ezért jól használhatók a fenti folyamatok leírására, modellezésére.

A wehrlitesedés jobb megértésének érdekében összehasonlítottuk a Nógrád-Gömör területén tanulmányozott tíz wehrlit xenolit, és a referenciaként használt öt lherzolit xenolit szulfidjait, valamint ezeket, a területről már leírt felsőköpeny és alsókéreg eredetű zárványok szulfidjaival, hogy megbecsüljük a wehrlitesedés során kialakult geokémiai változásokat.

8.3.1 Wehrlit és lherzolit xenolitok összehasonlítása a Babi-hegyről és Medves-fennsíkről

Az intersticiális szulfidásványok (i típus) petrográfiai jegyeiben nincs különbség a két kőzetsorozat – wehrlit és lherzolit – között. A szulfid beágyazódások mindkét xenolit sorozatban igen változatos szemcsehatárral és szövettel jelennek meg (10. és 11. ábra). A szulfidzárványok (e típus) esetében elsősorban morfológiai különbségek észlelhetők. Míg a wehrlitekben leggyakrabban negatívkristály formára emlékeztető metszetek láthatók, addig a lherzolitokban elsősorban gömbölyded szulfidzárványok jelennek meg (10/B. ábra, 11/B. ábra). Ez arra utal, hogy a szulfidok egy időben, a wehrlitesedés során létrejövő új szilikát fázisokkal (klinopiroxén, olivin) egyensúlyban formálódtak.

A xenolitokban megjelenő egyedi szulfidfázisok összetétele között jelentős eltérések mutatkoznak (12. ábra). A wehrlit xenolitok szulfid szemcséiben nagy mennyiségű pirrotin jelenik meg. Ezzel szemben a lherzolit xenolitokban az egyes szulfidfázisok összetétele a

pentlandit, valamint az MSS mezejében látható, mindössze egy szemcse esik a pirrhotin területére (NFR1109 2e). Ennek a lényeges különbségnek az lehet a magyarázata, hogy a teljes kémiai összetételek eltérése miatt (13. és 14. ábra) a Fe-ban szegényebb Iherzolit xenolitban - a felszínre emelkedés során - nem tudott a pirrhotin tiszta fázisként szételegyedni az eredeti MSS-ből, csak Ni-tartalmú MSS-re és pentlanditra. Ezzel szemben nagyobb Fe-tartalmú wehrlit xenolitban a pirrhotin önálló fázisként is megjelenik, sőt több esetben a kezdeti monoszulfid-szilárdoldat teljes mértékben szételegyedett pirrhotinra és pentlanditra. Ez a különbség azonban a felemelkedés során lezajló hűlés okozta szételegyedés bizonyítja, a szulfidolvadék genetikájára nem utal.

A xenolitokra számolt teljes szulfidösszetételek alátámasztják az egyedi fázisok alapján felvázolt képet, miszerint a Nógrád-Gömör vulkáni terület általunk vizsgált központi részéről származó wehrlit xenolitok nagyobb Fe és kisebb Ni tartalommal jellemezhetők, mint a Iherzolit xenolitok (13. és 14. ábra). Ez alól két wehrlit xenolit (NME1110 és NTB1109) kivétel, amelyek teljes szulfidösszetételei nagy Ni és Cu tartalmat mutatnak (17. ábra). E jelenség a szulfidásványok petrográfiája alapján magyarázható. Az NME1110 és NTB1109 wehrlit xenolitokban a szulfidásványok egy része olyan olivin-gazdag részekből származik, ahol a wehrlitesedés folyamata nem érvényesült. Ezen felül az NME1110 wehrlitben erősen átalakult violaritet tartalmazó szemcse is megjelenik, ami felszínközeli mállás okozta kénvesztéssel jön létre Fe-Ni szulfidokból (Craig és Kullerud, 1969; Szabó és Bodnar, 1995). A szulfidok mállása során a Fe mobilisabban viselkedik a Ni-nél, ezért a visszamaradó violarit relatíve több Ni-t és Co-t tartalmaz, mint Fe-t (Szabó és Bodnar, 1995), ezért is tapasztalható nagyobb Ni és Co koncentráció ebben a xenolitban. A Cu-Ni(+Co)-Fe rendszerben (17. ábra) a fent említett két minta mellett az NFK9 Iherzolit esik 1000 °C-on a $MSS + L_{Ni+Cu}$ stabilitási mezejébe (Craig és Kullerud, 1969). Ezt a rézben való gazdagságot sem szöveti, sem ásványkémia jellemzők nem magyarázzák.

8.3.2 A tanulmányozott központi terület (Medves-fennsík és Babi-hegy) összehasonlítása a NGVT északi és déli szegélyével

A nógrád-gömöri vulkáni területről korábbi munkák (Szabó és Bodnar, 1995; Zajacz és Szabó, 2003.) alapján rendelkezésre áll nagyszámú szulfidelemzés, amelyektől a jelen dolgozatban tárgyalt szulfidbeágyazódások lényegesen eltérnek, különösen a wehrlit xenolitokban megjelenő szulfidok. A Iherzolit minták szulfidbeágyazódásainak petrográfiai jegyei általánosnak tekinthetők a teljes vulkáni területen, hiszen Szabó és Bodnar (1995)

adataiban eltérések nem tapasztalhatók az általunk vizsgált szemcsékhez képest. Intersticiális szulfidszemcsék és -zárványok egyaránt előfordulnak, a szulfidok fázisösszetétele is azonos (MSS, pirrotin, pentlandit, kalkopirit, violarit). Ezzel szemben a kumulátum eredetű Al-augitos xenolitok szulfidzárványai mind petrográfiai megjelenésben, mind összetételben erősen különböznek. Zajacz és Szabó (2003) által leírt szulfidok elsősorban mafikus olvadékból kristályosodott szulfidzárványok, valamint alsókéreg metasomatózis eredményeképp kialakult intersticiális szulfidokszemcsék. A szulfidszemcsék ásványai szintén eltérnek az általunk azonosított fázisoktól, pentlandit nem jelenik meg bennük, azonban pirit és kubanit igen. Továbbá a kalkopirit részaránya is jelentősen nagyobb, mint amit az általunk vizsgált szulfidszemcsékben tapasztaltunk.

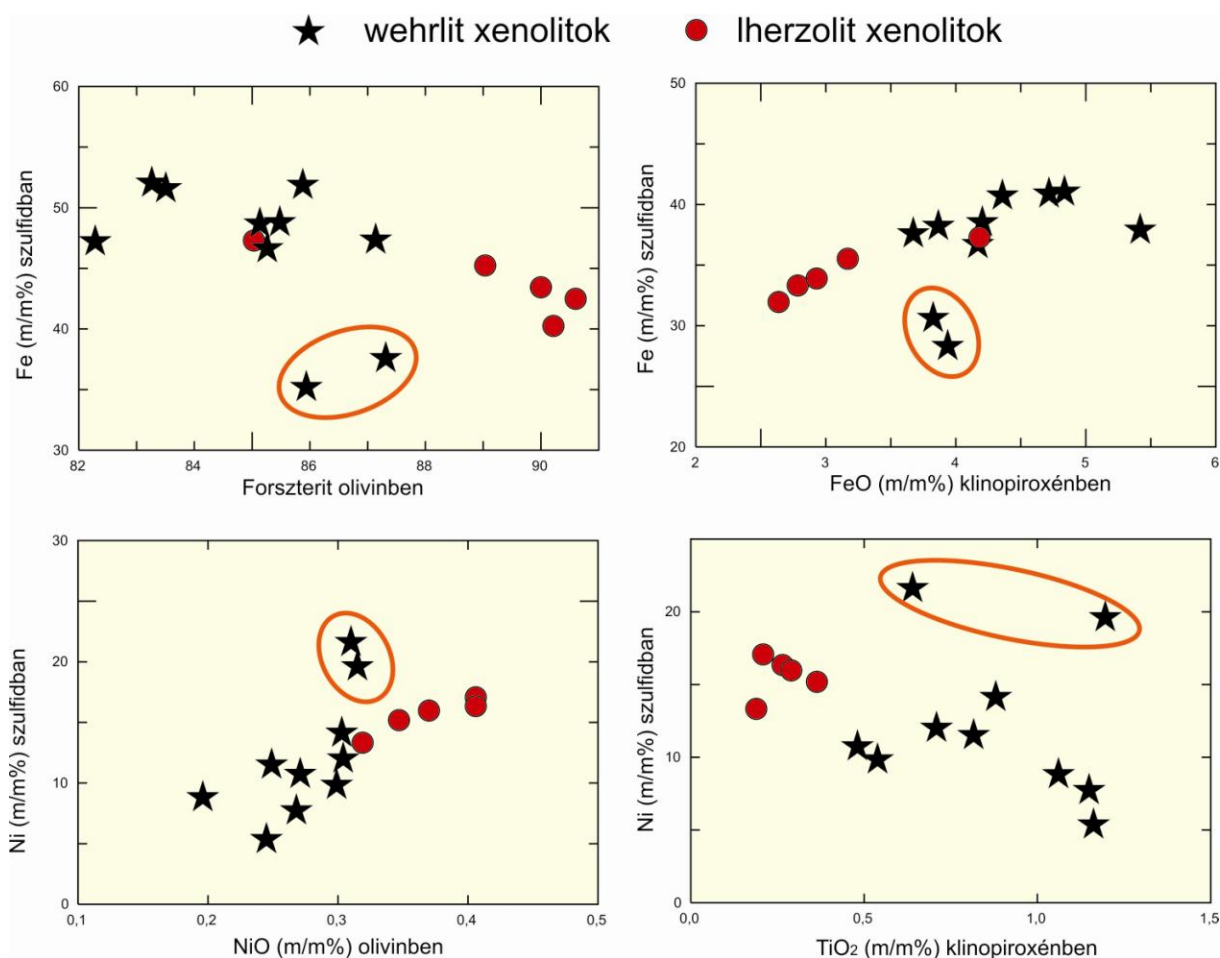
A Fe-S-(Ni+Co) (Kullerud et al, 1969) rendszerben összehasonlítva az adatokat a korábban vizsgált Iherzolit (Szabó és Bodnar, 1995), valamint alsókéreg eredetű kumulát xenolitokban leírt szulfidokkal (Zajacz és Szabó, 2003) különbségeket fedezhetünk fel (16. ábra). A kumulát xenolitok Fe koncentrációja meghaladja mind a wehrlitből, mind a Iherzolitból származó szulfidokét és a teljes összetételek az MSS 1100 °C-on meghatározott stabilitási tartományába esnek (16. ábra, Kullerud et al, 1969). A Iherzolitok szulfidjai nagyobb szórást mutatnak Fe és Ni tartalomban és az 1100 °C-on stabilis összetételtől egészen a teljes 1000 °C-os stabilis tartományig terjednek. Ezzel szemben a wehrlit xenolitok - két kiugró xenolit kivételével - egy átmenetet képviselnek a Iherzolitok és a kumulát-zárványok között, az 1100 és 1000 °C-on stabil MSS tartományának határán helyezkednek el. A Cu-Ni(+Co)-Fe rendszerben (1000 °C felett, Craig és Kullerud, 1969) szintén jól elkülönülnek a wehrlit xenolitokban található szulfidok, hasonló módon köztes állapotot képviselnek a két csoport között (17. ábra).

8.3.3 Wehrlitesedés hatása a szulfidokra

A wehrlit xenolitok klinopiroxén-gazdag csomóiban nagyobb (két-háromszorosa) a szulfidszemcsék gyakorisága a területen jellemző Iherzolit xenolitokhoz képest, azaz a wehrlitesedést okozó fluidumból jelentős mennyiségben csapódtak ki szulfidok is. A szulfidok többségében szövetük is erre utal, a zárványok negatívkristály alakúak (13/B. ábra, 14/C. ábra), az intersticiális beágyazások gyakran hármaspontokban érintkeznek a szilikátos fázisokkal (13/F. ábra).

A fentebb tárgyalt, relikts ("lherzolitos") szulfidokat is tartalmazó NTB1109 és NME1110 wehrli xenolitok kivételével a szulfidok és a metasomatózis során képződő új fázisok - elsősorban a klinopiroxén és az olivin átlagos összetétele is kapcsolatot jelez: a Fe tartalom szulfidban és klinopiroxénben erős pozitív korrelációt ($R^2=0,80$) mutat a lherzolit és wehrli xenolitok esetében is (15. ábra), valamint erős negatív korrelációt az olivinek forszterit tartalmával ($R^2=-0,81$) (15. ábra). A klinopiroxénre kimutatott jelentős TiO_2 gazdagodás (8. ábra) jól korrelál negatívan a szulfidbeágyazódások Ni tartalmával ($R^2=-0,82$) (15. ábra). A szulfidszemcsékben a Fe gazdagodás egy viszonylagos Ni szegényedéssel párosult, amit alátámaszt az átlagos szulfidösszetételek atomszázalékos Fe/Ni aránya, ami jól követi a klinopiroxén, valamint az olivin főelemgeokémiai változásait (19. ábra), azaz az előbbiben a TiO_2 , Al_2O_3 és FeO, utóbbiban a FeO koncentrációjának növekedését és NiO tartalom csökkenését.

A Cu koncentrációja a szulfidokban nem mutat ilyen egyértelmű kapcsolatot a befogadó kőzetek főelemgeokémiájával. Az értékek viszonylagosan nagy szórásának oka az lehet, hogy a kalkopirit a legritkábban és a legkisebb mennyiségben előforduló fázis a szulfidokban, ezért a Cu koncentrációja van a legnagyobb bizonytalansággal terhelve a szulfidok véletlenszerű feltáródása miatt. Ezen felül a kalkopirit általában a szemcsék szélén található sok esetben, ahol a mállás a leggyakrabban éri a szemcséket.



15. ábra A szulfidásványokban lévő Fe és Ni (m/m %) változása a koegzistens olivin és klinopiroxén egyes főelemeinek függvényében. A megjelölt két wehrlit xenolit (NTB1109, NME1110) esetében a szulfidok reliktszöveti részen találhatóak, összetételük inkább lherzolitos szulfidjaira jellemző, ezért eltérnek a trendtől.

8.4 A metasomatózist okozó fluidum kémiai jellegei, eredete

A metasomatózis jobb megértése érdekében számításokat végeztünk a kölcsönható olvadék MgO/FeO arányáról. Ennek segítségével becslést adhatunk a metasomatizáló olvadék összetételére. Fontos hangsúlyozni, hogy a wehrlit xenolitokban megjelenő klinopiroxén gazdag csomók nem egyensúlyi kristályosodás során jöttek létre a kölcsönható olvadékból, hanem a lherzolitos összetételű köpennyel lépett reakcióba az olvadék, azaz metasomatózis termékei. Az olvadékösszetétel becslését az olvinek és klinopiroxének átlagos összetételéből, valamint az ásványokkal egyensúlyban lévő olvadék és az ásványok közötti megoszlás hányadosból, az $(\text{MgO/FeO})_{\text{olvadék}} = D(\text{megoszlási hányados}) / (\text{FeO/MgO})_{\text{cpx/ol}}$ egyenlet alapján végeztük el (Shaw et al., 2000). Az olvinek esetében a $D=0,30$ (Roeder, 1970), klinopiroxének esetében Shaw and Eyzaguirre (2000) módszerével becsült $D=0,28$ ásvány-olvadék megoszlási együtthatókkal számoltunk Zajacz és Szabó (2003) eljárásához hasonlóan. A kapott MgO/FeO értékek a wehrlit xenolitok esetében

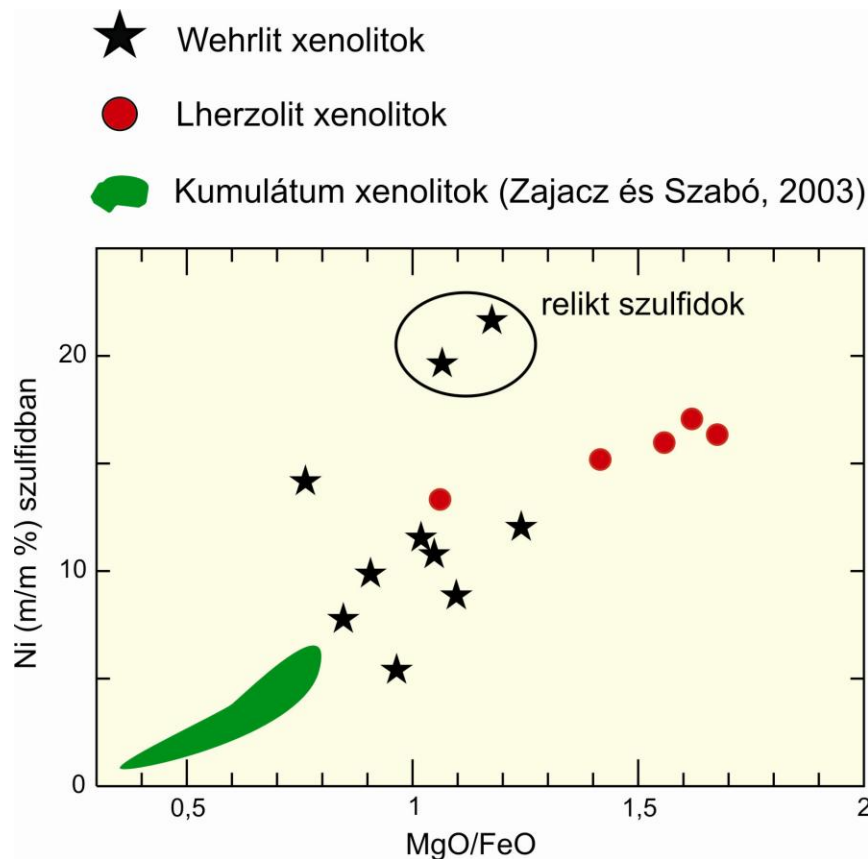
klinopiroxénből számolva 0,76 és 1,24, olivinból számolva pedig 0,82 és 1,16 közé estek. A lherzolit xenolitokra nagyobbak az MgO/FeO értékek: klinopiroxénből számolva 1,06-1,67 és olivinból 1,36-1,62 közötti értékeket kaptunk (5. táblázat). Ez a jelentős eltérés a két kőzetcsoporthoz utal, hogy az eredeti köpeny lherzolitot egy kis MgO/FeO arányú (azaz Fe-ban gazdag) olvadék metasztatizálta, ami a szilikátok és szulfidok összetételét megváltoztatta, többek között FeO-ban gazdagította. A számolt MgO/FeO értékeket ábrázolva a wehrilit xenolitok szulfidjainak Ni és Fe koncentráció függvényében feltételezhető, hogy a változó metasztatizáló olvadék és a lherzolit közötti kémiai kölcsönhatás során alakult ki a klinopiroxén gazdag csomók jelenlegi összetétele (8. ábra).

5. táblázat. Számolt MgO/FeO aránya a metasztatizáló olvadékban, D-értékek Roeder (1970), Shaw et al. (2000) és Zajacz és Szabó (2003) után.

	MgO/FeO az olvadékban	
	piroxén	olivin
Wehrilit		
NFK1110	0,76	0,83
NFK1137A	1,10	0,99
NFR1117A	1,05	0,99
NFR1119B	1,24	1,17
NME1110	1,07	1,06
NME1129D	0,96	1,02
NMM1114	1,02	0,96
NMM1129	0,85	0,84
NTB1109	1,18	1,10
NTB1120	0,91	0,85
Lherzolit		
NFK9	1,67	1,55
NFR1109	1,06	0,96
NME23	1,56	1,44
NMM5	1,42	1,37
NTB7	1,62	1,62

A fenti megállapítások alapján kis tömegű, kis MgO/FeO arányú olvadék okozhatta a felsőköpeny metasztatizációját. A területen korábban leírtak hasonló kémiai karakterű olvadékot (Zajacz és Szabó, 2003), amely metasztatizálta a nógrád-gömöri régió alatti alsókérget. Az innen leírt Fe-gazdag (MgO/FeO=0,35-0,89) olvadék a kéreg alsó határán formálhatott magmakamrát. Az olvadék forrása a felsőköpeny parciális olvadása lehetett.

Feltételezésünk szerint ez a mafikus olvadék keletkezése után és felfelé áramlása során kölcsönhatásba lépett a felsőköpeny lherzolitjával és a nagy kőzet/olvadék térfogatarányú köpenyrészekben klinopiroxén gazdag csomókat - wehrlitet - formálhatott a lherzolitban, amit a későbbi alkáli bazalt a Bábi-hegy és a Medves-fennsík alatti köpenyrészben megmintázott és wehrlit xenolitiként nagy sebességgel a felszínre szállított kb. 2.2 millió évvel ezelőtt (Balogh et al., 1981).



16. ábra A tanulmányozott lherzolit és wehrlit xenolitok átlagos szulfidjainak Ni tartalmának változása a kőzettel egyensúlyban lévő olvadék MgO/FeO arányának függvényében, összehasonlítva Zajacz és Szabó (2003) által vizsgált kumulátum xenolitjainak értékeivel. A megjelölt két xenolitban (NTB1109, NME1110) a szulfidásványok nem köthetőek a wehrlitesedéshez.

Ezen eredmények alapján elmondható, hogy a wehrlitet létrehozó mafikus olvadék hosszabb ideig kölcsönhatott a lherzolitos falkőzettel, amelynek során lopakodó metasomatózist szenvedett a felsőköpeny eredeti kőzete. A folyamat során új ásványfázisok nem képződtek, az ortopiroxén helyén az eredetileg is jelenlévő klinopiroxén és jelentős mennyiségű szulfidásvány jelent meg, valamint a többi fázis (olivin, spinell) összetételében is jelentős kémiai változások történtek.

9. Összefoglalás

A Nógrád-Gömör Vulkáni Területen korábban felismert és leírt wehrlit xenolitok részletesen petrográfiai és főelemgeokémiai vizsgálatát végeztük el annak céljából, hogy a dolgozat által felvetett elképzelést – miszerint ezeket a kőzeteket felsőköpeny metasomatózis alakította ki – kidolgozzuk és becslést adjunk a metasomatizáló fluidum/olvadék kémiai jellegére.

Petrográfiai és elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján a wehrlitben egy olivin-klinopiroxén-spinell ásványtársulás jött létre az eredeti lherzolitos kőzetalkotók helyén. Ennek az átalakulásnak közvetlen bizonyítékát jelenti két wehrlit xenolitban is a klinopiroxének magjában reliktumként megmaradt ortopiroxének. Ezen felül a wehrlites csomókban nagymennyiségű szulfidásvány is megjelenik, amelyek szöveti bélyegeik alapján egyszerre keletkeztek a wehrliteket alkotó szilikátokkal.

A wehrlit xenolitok szilikát- és szulfidásványai mind jelentősen eltérnek a területről eddig leírtaktól. A wehrlitek olivinjei Fe-ban és Mn-ban gazdagodtak, klinopiroxénjeiben megnövekedett koncentrációjú Fe, Al és Ti jellemző. A szulfidásványok is jelentős Fe gazdagodáson estek át, ami erős kapcsolatot mutat a szilikátos fázisok hasonló tendenciájával, valamint átmenetet képeznek a NGVT-en eddig leírt lherzolitok és kumulátum (Al-augitos) xenolitok szulfidjai között.

A meglévő geokémiai adatok segítségével becslést adtunk a köpeny kőzetével (lherzolittal) kölcsönhatásba került olvadék MgO/FeO arányáról. Számításaink alapján a lherzolitot egy igen kis MgO/FeO arányú mafikus olvadék metasomatizálta. Modelünk alapján a wehrlit xenolitok geokémiaiilag átmenetet képeznek a lherzolitok és az alsókéreg-eredetű kumulátumok között.

Köszönetnyilvánítás

Nagyon köszönjük témavezetőnk, **Szabó Csaba** segítségét, aki nélkül ez a munka nem születhetett volna meg. Köszönettel tartozunk **Kovács Istvánnak** (MFGI), **Orlando Vasellinek** (Firenzei Egyetem) és **Bernardo Cesarenek** (Padovai Egyetem) az anyagi támogatásért, és az elektronmikroszkopos mérési lehetőség biztosításáért. **Anna Maria Fiorettinek** és **Raúl Carampinnak** a mikroszkopos, **Bendő Zsoltnak** az elektronmikroszkopos méréseknél nyújtott segítségükért. Köszönettel tartozunk **az LRG minden tagjának** különösen Liptai Nórának, Pintér Zsanettnek, Szabó Ábelnek és Völgyesi Petinek, akik a dolgozat elkészítése alatt nemcsak jó szakmai környezetet biztosítottak, hanem a munka rövid szüneteiben tartották bennünk a lelket. Köszönjük Családjaink megértését és biztatását.

A kutatás a 78425. számú **OTKA** pályázat (témavezető: Szabó Csaba) támogatásával valósulhatott meg.

Irodalomjegyzék

- Aoki, K., Shiba, I., 1973.** Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan. *Lithos*, 6, 41-51.
- Arai, S., 1987.** An estimation of the least depleted spinel peridotite on the basis of olivine-spinel mantle array, *N. Jb. Miner. Mh.*, 8, pp. 347-354.
- Bada, G., Horváth, F., 2001.** On the structure and tectonic evolution of the Pannonian basin and surrounding orogens. *Acta Geologica Hungarica*, 44, 301–327.
- Bali, E., Szabó, Cs., Vaselli, O., Török, K., 2002.** Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Western Hungary. *Lithos*, 61, 79–102.
- Bali, E., Zajacz, Z., Kovács, I., Szabó, Cs., Halter, W., Vaselli, O., Török, K., Bodnar, R.J., 2008a.** A quartz-bearing orthopyroxene-rich websterite xenolith from the Pannonian Basin, Western Hungary: evidence for release of quartz-saturated melts from a subducted slab. *Journal of Petrology*, 49, 421–439.
- Balogh, K. et al., 1981.** Radiometric dating of basalts in Southern and Central Slovakia. *Zapadné Karpaty, Ser. Geologia* 7. pp. 113-126
- Berkési, M.; Guzmics, T., Szabó, Cs., Dubessy, J., Bodnar, R.J., Hidas, K., Ratter, K., 2012.** The role of CO₂-rich fluids in trace element transport and metasomatism in the lithospheric mantle beneath the Central Pannonian Basin, Hungary, based on fluid inclusions in mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 331–332, 15, 8-20
- Craig, J.R., Kullerud, G., 1969.** Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their applications to magmatic ore deposits. In: *Magmatic ore deposits* (ed. H. D. B. Wilson). *Econ. Geol. Monogr.* 4, 343-358.
- Csontos, L., 1995.** Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. *Acta Vulcanol.*, 7, 1-13.

- Dawson, J.B. 1984.** Contrasting types of upper mantle metasomatism. In: Kornprobst, J. (ed) Kimberlites II: the mantle and crust-mantle relationships. Elsevier, Amsterdam
- Dobosi, G., Fodor, R.V., Goldberg, S.A., 1995.** Late-Cenozoic alkalic basalt magmatism in the northern Pannonian basin; eastern Europe: petrology; source compositions; and relationship to tectonics. *Acta Vulcanologica*, 7, 199-207.
- Dobosi, G., Jenner, G., Embey-Isztin, A., Downes, H., 2010.** Cryptic metasomatism in clino- and orthopyroxene in the upper mantle beneath the Pannonian region. In: Coltorti M (Ed) *Petrological Evolution of the European Lithospheric Mantle: From Archaean to Present Day*. Geological Society, London, Special Publication Vol.337.
- Downes, H., 1997.** Shallow continental lithospheric mantle heterogeneity - petrological constraints. In: Fuchs, K (ed.) *Upper Mantle Heterogeneities from Active and Passive Seismology*. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 295-308.
- Downes, H., Embey-Isztin, A., Thirlwall, M.F., 1992.** Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from the western Pannonian Basin (Hungary) – evidence for an association between enrichment and texture in the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109, 340–354.
- Embey-Isztin, A., 1978.** On the petrology of spinel lherzolite nodules in basaltic rocks from Hungary and Auvergne, France. *Annales. Hist.-Nat. Mus. Natn. Hung.* 70, 27-44.
- Embey-Isztin, A., Dobosi, G., Altherr, R., Meyer, H.P., 2001.** Thermal evolution of the lithosphere beneath the western Pannonian Basin: evidence from deep-seated xenoliths. *Tectonophysics*, 331, 285–306.
- Embey-Isztin, A., Downes, H., James, D.E., Upton, B.G.J., Dobosi, G., Ingram, G.A., Harmon, R.S. és Scharbert, H.G., 1993.** The petrogenesis of Pliocene Alkaline Volcanic Rocks from the Pannonian Basin. Eastern Central Europe. *J. Petrol.*, 34, 317-343.
- Embey-Isztin, A., Scharbert, H.G., Dietrich, H., Poulitidis, H., 1989.** Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from the Transdanubian Volcanic Region, West Hungary. *Journal of Petrology*, 30, 79–105.
- Falus, Gy., 2000.** Szulfid-beágyazódások geokémiai jelentősége a Belső-Kárpáti-medencék alkáli bazaltjaiban megjelenő Cr-diopszidos felsőköpeny xenolitokban, diplomadolgozat, ELTE Közettani és Geokémiai Tanszék, Budapest, (kézirat), p. 89.
- Falus, Gy., Szabó, Cs., Kovács, I., Zajacz, Z., Halter, W., 2007.** Symplectite in spinel lherzolite xenoliths from the Little Hungarian Plain, Western Hungary: A key for understanding the complex history of the upper mantle of the Pannonian Basin. *Lithos*, 94, 230–247.
- Falus, Gy., Szabó, Cs., Vaselli, O., 2000.** Mantle upwelling within the Pannonian Basin: evidence from xenolith lithology and mineral chemistry. *Terra Nova*, 12, 295–302.
- Fleet, M.E., Stone, W.E., 1990.** Nickeliferous sulfides in xenoliths, olivine megacrysts and basaltic glass. *Contrib. Mineral. Petrol.* 105, 629-636.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S.Y. & Ryan, C. G. 1999.** The composition and origin of subcontinental lithospheric mantle. In: Fei, Y., Bertka, C.M. & Mysen, B. O. (eds) *Mantle petrology: field observations and high pressure experimentation: a tribute to Francis F. (Joe) Boyd*. The Geochemical Society, pp. 13-45.
- Harangi, Sz., 2001.** Neogene magmatism in the Alpine-Pannonian Transition Zone a model for melt generation in a complex geodynamic setting. *Acta Vulcanol.*, 13, 15-39.

- Harte, B., 1977.** Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallisation textures in olivine-bearing xenoliths. *Journal of Geology*, 85, 279-288.
- Harte, B., 1983.** Mantle peridotites and processes: the kimberlite sample. In: Hawkesworth C.J., Norry, M.J. (ed). *Continental basalts and their xenoliths*. Shiva, Nantwich.
- Hidas, K., Falus, Gy., Szabó, Cs., Szabó, P.J., Kovács, I., Földes, T., 2007.** Geodynamic implications of flattened tabular equigranular textured peridotites from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field (Western Hungary). *Journal of Geodynamics*, 43, 484–503.
- Hidas, K., Guzmics, T., Szabó, Cs., Kovács, I., Bodnar, R.J., Zajacz, Z., Nédli, Z., Vaccari, L., Perucchi, A., 2010.** Coexisting silicate melt inclusions and H₂O-bearing, CO₂-rich fluid inclusions in mantle peridotite xenoliths from the Carpathian–Pannonian region (central Hungary). *Chemical Geology*, 274, 1–2, 1–18.
- Horváth, F., 1993.** Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 226, 333-357
- Huismans, R.S., Podladchikov, Y.Y., Cloetingh, S., 2001.** Dynamic modeling of the transition from passive to active rifting, application to the Pannonian basin. *Tectonics*, 20, 1021-1039.
- Jugovics, L., 1971.** Észak-magyarországi (Salgótarján környéki) bazaltterületek. *Földt. Int. Évi Jelentés 1968-ról*, pp. 145-165.
- Kázmér, M., Kovács, S., 1985.** Permian-Palaeogene palaeogeography along the eastern part of the Insubric-Periadriatic Linament system: evidence for continental escape of the Bakony-Drauzug Unit. *Acta Geologica Hungarica*, 28, 71–84.
- Konečná, M., 1990.** Fluidné inklúzie a termodynamické podmienky vzniku xenolitov spinelových lherzolitov v alkalických bazaltoch južného Slovenska. *Mineralia slovaca*, 22, 555-564.
- Konečný, P., Konečný, V., Lexa, J., Huraiová, M., 1995.** Mantle xenoliths in alkali basalts of Southern Slovakia. *Acta Vulcanol.*, 7, 241-247.
- Konečný, P., Huraiová, M., Bielik, M., 1999.** P-T-X/fO₂ conditions in upper mantle: evidence from lherzolitic xenoliths hosted by plio-pleistocene alkali basalts (Southern-Slovakia). *GeoLines*, 9, 59-66.
- Kovács, I., Falus, Gy., Stuart, G., Hidas, K., Szabó, Cs., Flower, M., Hegedűs, E., Posgay, K., Zilahi-Sebess, L., Fancsik, T., 2011.** Asztenoszféra-áramlás mint a terciér kilöködés és extenzió hajtóereje? *Magyar Geofizika*, 52, 79-87.
- Kovács, I., Zajacz, Z., Szabó, Cs., 2004.** Type-II xenoliths and related metasomatism from the Nógrád-Gömör Volcanic Field, Carpathian-Pannonian region (northern Hungary–southern Slovakia). *Tectonophysics*, 393, 139–161.
- Kullerød, G., Yund, R.A., Mohr, G., 1969.** Phase relations in the Cu-Fe-S and Cu-Ni-S systems. In: *Magmatic ore deposits* (ed. H.D.B. Wilson); *Econ. Geol. Monogr.* 4, 323-343.
- Lenkey, L., 1999.** Geothermics of the Pannonian Basin and its bearing on the tectonics of basin evolution. PhD Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, p. 215.
- Liptai, N., Patkó, L., 2012.** Deformációs vizsgálatok a Nógrád-Gömör Vulkáni Terület felsőköpeny eredetű ultramafikus xenolitjain. *ELTE, Közöttani és Geokémiai Tanszék, TDK (kézirat)*, p. 52.
- Liptai, N., Patkó, L., Aradi, L.E., 2011.** A Nógrád-Gömör Vulkáni Terület központi részéről (Medves-fennsík és Babi-hegy) származó felsőköpeny eredetű ultramafikus xenolitok petrográfiai vizsgálata. *ELTE, Közöttani és Geokémiai Tanszék, TDK (kézirat)*, p. 52.

- Lloyd, F.E., Bailey, D.K., 1973.** Light element metasomatism of the continental mantle: the evidence and the consequences. *Phys Chem Earth* 9:389–416.
- Lorand, J. P., 1989b.** Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic-type spinel peridotites of Ariège (Northeastern Pyrenees, France). *Earth Planet Sci. Lett.* 93, 50-64.
- Lorand, J.P., 1989.** Mineralogy and chemistry of Cu-Fe-Ni sulfides in mantle-derived spinel peridotite bodies from Ariège (Northeastern Pyrenees, France). *Contrib. Mineral. Petrol.* 103, 335-345.
- Mercier, J.C.C., Nicolas, A., 1974.** Textures and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Journal of Petrology*, 16, 454-487.
- O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., 2012.** Mantle metasomatism. In Harlov, D.E., Austrheim, H. (ed). *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock*. Springer 2012.
- Pécskay, Z., Lexa, J., Szakács, A., Balogh, Kad., Seghedi, I., Konečný, V., Kovács, M., Márton, M., Kaličiak, M., Széky-Fux, V., Póka, T., Gyarmati, P., Edelstein, O., Rosu, E., Žec, B., 1995.** Space and time distribution of Neogene-Quaternary volcanism in the Carpatho-Pannonian Region. *Acta Vulcanologica*, 7, 15-28.
- Pike, J.E.N., Schwarzman, E.C., 1977.** Classification of textures in ultramafic xenoliths. *Journal of Geology*, 85, 49-61.
- Putirka, K., Johnson, M., Kinzler, R., Longhi, J., Walker, D., 1996.** Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar. *Contr. Mineral. and Petrol.* 123, 92-108.
- Roedder, E., 1984.** Fluid Inclusions. *Reviews in mineralogy* (eds. P. H. Ribbe). Mineralogical Society of America, vol 12. 646 p.
- Roeder, P.L., Emsle, R. F., 1970.** Olivine-liquid equilibrium. *Contr. Mineral. and Petrol.* 29, 275-289.
- Shaw, C. S. J. Eyzaguirre J., 2000.** Origin of megacrysts in the mafic alkaline lavas of the West Eifel volcanic field, Germany. *Lithos.* 50, 75-95.
- Shaw, C.S.J., 1997.** Origin of sulfide blebs in variably metasomatized mantle xenoliths, quaternary West Eifel Volcanic Field, Germany. *Can. Mineral.* 35, 1453- 1463.
- Szabó, Cs., Bodnar, R.J., 1995.** Chemistry and origin of mantle sulfides in spinel peridotite xenoliths from alkaline basaltic lavas, Nograd-Gomor Volcanic Field, northern Hungary and southern Slovakia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 3917-3927.
- Szabó, Cs., Bodnár, R.J., 1996.** Changing magma ascent rates in the Nógrád-Gömör Volcanic Field Northern Hungary/Southern Slovakia: Evidence from CO₂-rich fluid inclusions in metasomatized upper mantle xenoliths. *Petrology* 4, 3, 221-230.
- Szabó, Cs., Falus, Gy., Zajacz, Z., Kovács, I., Bali, E., 2004.** Composition and evolution of lithosphere beneath the Carpathian-Pannonian Region: a review. *Tectonophysics*, 393, 119–137.
- Szabó, Cs., Harangi, Sz., Csontos L., 1992.** Review of Neogene and Quaternary volcanism of the Carpathian-Pannonian region. *Tectonophysics*, 208, 243-256.
- Szabó, Cs., Harangi, Sz., Vaselli, O., Downes, H., 1995a.** Temperature and oxygen fugacity in peridotite xenoliths from the Carpathian–Pannonian Region. *Acta Vulcanologica*, 7, 231–239.
- Szabó, Cs., Taylor, L., 1994.** Mantle petrology and geochemistry beneath the Nógrád-Gömör Volcanic Field, Carpathian-Pannonian Region. *Inter. Geol. Rev.* 6, 328-358.

Wang, K.L., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Pearson, N.J., Zhang, M., 2009. Sulfides in mantle peridotites from Penghu Islands, Taiwan: Melt percolation, PGE fractionation, and the lithospheric evolution of the South China block; *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4531–4557.

Zajacz, Z., Kovács, L., Szabó, Cs., Halter, W., Pettke, T., 2007. Evolution of Mafic Alkaline Melts Crystallized in the Uppermost Lithospheric Mantle: a Melt Inclusion Study of Olivine-Clinopyroxenite Xenoliths, Northern Hungary. *Journal of Petrology*, 48, 853-883.

Függelék

I. táblázat. A vizsgált xenolitok petrográfiai összefoglalója

Minta	Kőzet	Modális összetétel					Olivin			Ortopiroxén				Klinopiroxén		Spinell			szövet	o.cs.	b.b.
		ol	opx	cpx	sp	amf	1. popul.	2. popul.	def.	1. popul.	2. popul.	def.	széte.	méret	olv.	méret	verm.	olv.			
NFR1117A	wehrlit	80,5		18	1,5		0,1-0,3		x					0,1-0,4	x	0,1-0,8	x	x	ekvigranuláris		x
NFR1119B	wehrlit	85,5		9	5,5		0,1-0,2	1,5-2,5	x					0,1-0,8	x	0,2-2,5	x	x	átkristályosodott		
NTB1109	wehrlit	65		35	0,1		0,2-1		x					0,2-0,5	x	0,1-0,3	x		ekvigranuláris		
NTB1120	wehrlit	74		23	3		0,2-0,5	0,6-0,9	x					0,1-0,3	x	0,05-1	x	x	porfiroklasztos	x	
NFK1110	wehrlit	82		18	0,5		0,2-0,6	0,7-2	x					0,05-0,2	x	0,04-0,4		x	porfiroklasztos	x	
NFK1137A	wehrlit	84		15	1,5		0,1-0,6	0,5-1,4	x					0,05-1,2	x	0,05-1	x	x	porfiroklasztos		x
NME1129D	wehrlit	77		23	0,5		0,1-0,5	0,8-1,2	x					0,2-1	x	0,05-1	x	x	porfiroklasztos		x
NME1110	wehrlit	75		25	0,5		0,1-0,6	0,8-1,2	x					0,1-0,4	x	0,05-1,2	x		porfiroklasztos		
NMM1114	wehrlit	83		16	1		0,1-0,4	0,5-1,2	x					0,05-0,9	x	0,2-1,4	x	x	porfiroklasztos		x
NMM1129	wehrlit	67		31	2		0,05-0,5	0,5-0,8	x					0,1-0,2	x	0,05-0,4	x	x	porfiroklasztos		x
NFR1109	lherzolit	85	10	5	0,1		0,1-0,2	1-2,5	x	0,1-0,4	1-2,2	x	x	0,1-0,5		0,1-0,3			porfiroklasztos		x
NTB1124	lherzolit	75	18	6	1		0,5-0,8	1-1,8	x	0,1-1	1,4-3,2	x	x	0,2-1	x	0,1-1,5		x	porfiroklasztos		
NFK1123	lherzolit	64	31	5	0,5		0,1-0,7	0,7-1,2	x	0,1-0,4	2,2-5,5	x	x	0,1-0,6	x	0,05-0,7		x	porfiroklasztos		x
NME1122	lherzolit	88	5	7	0,5		0,4-0,8	1,0-3,0	x	0,1-0,8	1,0-3,0			0,1-1,1	x	0,05-1		x	porfiroklasztos		x
NMM1126	lherzolit	58	31	9	2		0,2-0,9	1-2-2,3	x	0,1-0,5	0,8-5,6		x	0,1-0,8	x	0,1-2,2		x	porfiroklasztos		
NFR7	lherzolit	79	8	10	2		0,5-0,9	0,9-1,2	x	0,1-0,7	0,7-0,9			0,1-0,6	x	0,1-1		x	porfiroklasztos		
NTB7	lherzolit	87	6	5	2		0,1-0,5	0,7-0,9	x	0,1-0,5	0,8-3,5	x	x	0,1-0,3	x	0,1-0,5		x	porfiroklasztos	x	x
NME23	lherzolit	81	11	6	2		0,1-0,5	1-1,7	x	0,1-0,5	1,5-4	x	x	0,2-0,7	x	0,05-1,7		x	ekvigranuláris	x	x
NMM5	lherzolit	83	9	7	1	0,1	0,2-0,5	0,8-1,3	x	0,2-0,6	1-2,5	x	x	0,2-0,5	x	0,1-0,5		x	porfiroklasztos	x	x
NFK9	lherzolit	87	7	5	1		0,1-0,3	0,7-1	x	0,1-0,5	1,0-2,0	x	x	0,1-0,5	x	0,05-2		x	porfiroklasztos	x	

ol-olivin
 opx-ortopiroxén
 cpx-klinopiroxén
 sp-spinell
 amf-amfibol

popul.-populáció
 def.-deformáció
 olv.-olvadás
 verm.-vermikuláris spinell struktúra
 o.cs.-olvadékcsomó
 b.b.-bazaltbeszüremkedés

II. táblázat. A tanulmányozott wehrlit xenolitokban található szulfidásványok petrográfiai jellemzői

Xenolit	Zárvány sorszáma	Méret (μm)	Szöveti helyzet	Bezáró ásvány	MSS	Po	Pn	Cpy
%								
NTB1109	1	18	e	ol	15		45	40
	2	15	e	ol			94	6
	3	12	e	ol	95		3	2
	4	7	e	ol	95		5	
	5	25	i		100			
NTB1120	1	50	i		95		5	
	2	100	i		100			
	3	55	i		91		8	1
	4	40	i		60		40	
	5	40	i		100			
	6	60	i		83		17	
	7	50	i		85		15	
	8	35	i		60		40	
NFK1110	1	7	e	ol	77		23	
	2	5	e	ol	72		28	
	3	6	e	ol	65		35	
	4	5	e	ol	100			
	5	10	i		40		20	40
NFK1137A	1	20	e	ol	30		49	21
	2	5	e	ol	80		20	
	3	80	i		100			
	4	8	e	cpx	100			
NFR1117A	1	75	i		88			12
	2	150	i		100			
	3	35	e	ol		92	8	
	4	60	i		100			
	5	25	e-i	cpx	100			
	6	100	i		100			
	7	45	i		100			
NFR1119B	1	7	e	ol		10	30	60
	2	55	e	ol	87		1	12
	3	25	e	ol	95		5	
NMM1114	1	35	i		100			
	2	85	i		100			
	3	45	i		100			
	4	120	i		100			
	5	80	i		100			
	6	70	i		82			18
	7	30	i		100			
NMM1129	1	65	i		100			
	2	15	e	cpx	78		16	6
	3	45	i		100			
	4	20	e	sp	92		8	
	5	45	i		97			3
	6	25	e-i	ol	99			1
	7	10	e	cpx	77		23	
	8	55	e-i	ol	96			4
	9	35	e-i	ol	98			2
	10	30	?		97			3

Folytatás az előző oldalról

Xenolit	Zárvány sorszáma	Méret (μm)	Szöveti helyzet	Bezáró ásvány	MSS	Po	Pn	Cpy
%								
NME1110	1	55	i		100			
	2	55	i		100			
	3	12	e	ol	37		60	3
	4	10	e	ol	25		65	10
	5	15	e	ol	45		40	15
	6	20	e	ol	50	10		40
	7	25	i		65	15		20
NME1129D	1	115	i		100			
	2	85	i		95			5
	3	80	e	cpx	99			1
	4	20	e	cpx	90			10
	5	40	i		100			
	6	60	i		95			5
	7	55	e-i	ol	80			20
	8	40	i		100			
	9	550	i		90			15

e - szilikát fázisba bezárt zárvány

i - intersticiális

ol – olivin

cpx – klinopiroxén

sp - spinell

MSS - monoszulfid szilárdoldat

Po - pirrhotin

Pn - pentlandit

Cpy - kalkopirit

III. táblázat. A vizsgált terület egy-egy jellegzetes lherzolit xenolitjában található szulfidásványok petrográfiai jellemzői

Xenolit	Zárvány sorszáma	Méret (μm)	Szöveti helyzet	Bezáró ásvány	MSS	Po	Pn	Cpy
NTB7	1	70	i		100			
	2	50	e	ol	97		3	
NFK9	1	75	e	opx	65			35
	2	200	i		97			3
	3	20	i		40		60	
	4	100	i		40		60	
	5	15	e	ol	51		33	16
	6	120	i		94			6
NFR1109*	1	20	e	ol	100			
	2	40	e-i	ol		55	45	
	3	30	e	opx	88		11	1
NMM5	1	70	e	ol	67		33	
	2	75	i		95		1	4
	3	135	i		100			1
NME23**	1	65	i		100			
	2	75	i		90		9	1

e-szilikát fázisba bezárt zárvány
i-intersticiális

* Liptai és Patkó (2012)

** - Szabó és Taylor (1994)

nem jelölt – Kovács és Szabó, nem publikált

MSS - monoszulfid szilárdoldat

Po - pirrotin

Pn - pentlandit

Cpy - kalkopirit

ol - olivin

opx - ortopiroxén

IV/a. táblázat. A wehrlit xenolitok olivinjének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NTB1109		NTB1120		NFK1110		NFK1137A		NFR1117A	
n	7		15		6		10		7	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
SiO₂	40,6	0,20	39,1	0,27	39,4	0,16	39,8	0,28	39,6	0,07
TiO₂	nd		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al₂O₃	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Cr₂O₃	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02
FeO	12,3	0,63	15,9	0,64	16,8	0,14	14,0	0,65	14,1	0,24
MnO	0,17	0,02	0,28	0,03	0,27	0,02	0,20	0,02	0,23	0,03
MgO	47,4	0,48	45,1	0,61	43,9	0,16	46,5	0,63	46,4	0,06
CaO	0,20	0,03	0,17	0,03	0,16	0,02	0,19	0,02	0,13	0,01
NiO	0,31	0,05	0,30	0,03	0,30	0,02	0,20	0,05	0,27	0,02
Totál	101,00		100,83		100,89		100,89		100,77	
Kationszámok 4 oxigénre számolva										
Si	0,999		0,983		0,993		0,989		0,987	
Fe	0,253		0,333		0,355		0,291		0,293	
Mn	0,004		0,006		0,006		0,004		0,005	
Mg	1,740		1,688		1,647		1,721		1,723	
Ca	0,005		0,005		0,004		0,005		0,003	
Ni	0,006		0,006		0,006		0,004		0,005	
Totál	3,001		3,016		3,006		3,011		3,012	
Mg/(Mg+Fe)	0,87		0,84		0,82		0,86		0,85	

a teljes vas FeO-ban van megadva

nd – nem detektált elem

IV/b. táblázat. A wehrlit xenolitok olivinjének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NFR1119B		NMM1114		NMM1129		NME1110		NME1129D	
n	9		6		13		9		9	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
SiO₂	40,2	0,51	39,9	0,30	39,1	0,23	40,0	0,18	40,1	0,16
TiO₂	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al₂O₃	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	nd	
Cr₂O₃	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
FeO	12,2	1,58	14,2	0,25	16,0	0,25	13,3	0,48	13,6	0,30
MnO	0,19	0,04	0,22	0,03	0,26	0,03	0,20	0,03	0,19	0,04
MgO	48,0	1,22	46,1	0,39	44,6	0,24	46,8	0,36	46,4	0,19
CaO	0,16	0,03	0,14	0,02	0,15	0,02	0,16	0,02	0,18	0,01
NiO	0,30	0,06	0,25	0,04	0,27	0,02	0,32	0,04	0,24	0,03
Totál	101,01		100,77		100,44		100,72		100,85	
Kationszámok 4 oxigénre számolva										
Si	0,989		0,992		0,986		0,992		0,995	
Fe	0,252		0,295		0,337		0,275		0,282	
Mn	0,004		0,005		0,006		0,004		0,004	
Mg	1,761		1,710		1,678		1,731		1,717	
Ca	0,004		0,004		0,004		0,004		0,005	
Ni	0,006		0,005		0,005		0,006		0,005	
Totál	3,011		3,007		3,013		3,008		3,004	
Mg/(Mg+Fe)	0,87		0,85		0,83		0,86		0,86	

a teljes vas FeO-ban van megadva

V/a. táblázat. A wehrlit xenolitok klinopiroxénjének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NTB1109		NTB1120		NFK1110		NFK1137A		NFR1117A	
n	9		12		7		10		13	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
SiO ₂	51,4	0,99	50,2	1,06	50,0	1,34	49,2	0,52	50,8	0,58
TiO ₂	0,64	0,24	0,54	0,29	0,88	0,43	1,06	0,17	0,48	0,15
Al ₂ O ₃	5,49	0,88	5,37	0,82	6,11	1,60	6,69	0,53	5,44	0,63
Cr ₂ O ₃	1,37	0,26	1,06	0,29	0,77	0,25	1,01	0,17	0,91	0,22
FeO	3,83	0,34	4,72	0,44	5,42	0,26	3,87	0,24	4,20	0,48
MnO	0,12	0,02	0,14	0,04	0,14	0,03	0,09	0,03	0,12	0,02
MgO	16,1	0,69	15,3	0,53	14,8	0,93	15,1	0,42	15,7	0,40
CaO	20,3	0,42	20,8	0,92	20,5	0,46	21,5	0,30	20,7	0,35
Na ₂ O	0,98	0,09	1,11	0,31	0,96	0,03	0,78	0,07	1,07	0,09
Totál	100,29		99,26		99,57		99,42		99,56	
Kationszámok 6 oxigénre számolva										
Si	1,868		1,858		1,845		1,813		1,866	
Al (iv)	0,132		0,142		0,155		0,187		0,134	
Al (vi)	0,104		0,092		0,111		0,104		0,101	
Fe	0,116		0,146		0,167		0,119		0,129	
Ti	0,018		0,015		0,024		0,029		0,013	
Cr	0,039		0,031		0,022		0,029		0,026	
Mg	0,870		0,843		0,812		0,832		0,861	
Mn	0,004		0,004		0,004		0,003		0,004	
Ca	0,790		0,823		0,809		0,851		0,816	
Na	0,069		0,079		0,069		0,056		0,076	
Totál	4,011		4,033		4,020		4,024		4,027	
Mg/(Mg+Fe)	0,88		0,85		0,83		0,87		0,87	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Al^(IV)-Al^(VI) elosztása Si+Al^(IV)=2 alapján történt

V/b. táblázat. A wehrlit xenolitok klinopiroxénjének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NFR1119B		NMM1114		NMM1129		NME1110		NME1129D	
n	9		6		5		9		14	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
SiO ₂	50,9	0,87	50,2	0,66	48,3	2,59	49,3	0,65	49,7	0,56
TiO ₂	0,71	0,27	0,82	0,16	1,15	0,90	1,20	0,22	1,16	0,18
Al ₂ O ₃	5,36	0,77	6,74	0,45	7,36	1,84	7,02	0,79	6,70	0,61
Cr ₂ O ₃	1,28	0,21	0,91	0,15	0,73	0,22	0,86	0,21	0,87	0,24
FeO	3,67	0,55	4,17	0,26	4,84	0,98	3,94	0,30	4,36	0,46
MnO	0,11	0,02	0,13	0,01	0,12	0,04	0,09	0,03	0,11	0,02
MgO	16,3	0,53	15,2	0,40	14,6	0,92	15,0	0,41	15,0	0,38
CaO	20,3	0,41	20,2	0,35	20,9	0,36	21,4	0,08	20,8	0,34
Na ₂ O	1,05	0,10	1,14	0,30	0,94	0,08	0,91	0,04	0,94	0,09
Totál	99,71		99,63		99,05		99,71		99,63	
Kationszámok 6 oxigénre számolva										
Si	1,861		1,840		1,825		1,810		1,825	
Al (iv)	0,139		0,160		0,175		0,190		0,175	
Al (vi)	0,092		0,131		0,117		0,114		0,115	
Fe	0,112		0,128		0,143		0,121		0,134	
Ti	0,020		0,022		0,023		0,033		0,032	
Cr	0,037		0,026		0,019		0,025		0,025	
Mg	0,887		0,829		0,820		0,821		0,823	
Mn	0,003		0,004		0,004		0,003		0,003	
Ca	0,795		0,794		0,833		0,842		0,817	
Na	0,074		0,081		0,069		0,065		0,067	
Totál	4,022		4,020		4,030		4,024		4,018	
Mg/(Mg+Fe)	0,89		0,87		0,84		0,87		0,86	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Al^(IV)-Al^(VI) elosztása Si+Al^(IV)=2 alapján történt

VI/a. táblázat. A wehrlit xenolitok spinelljének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NTB1109						NTB1120						NFK1110	
n	7						16						6	
Szöveti helyzet	intersticiális		vermerkikuláris		átlag		intersticiális		vermikuláris		átlag		intersticiális	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
TiO ₂	0,65	0,02	0,69	0,08	0,68	0,07	0,68	0,11	0,77	0,12	0,73	0,12	0,8	0,06
Al ₂ O ₃	46,8	1,4	36	4,23	39,1	6,32	44	0,8	40,2	3,34	42,1	3,05	49,4	0,6
Cr ₂ O ₃	16,1	1,33	26,8	3,72	23,7	6,08	16,2	0,66	18,4	3,11	17,3	2,45	9,59	0,67
FeO	17,4	0,17	17,8	0,57	17,7	0,5	22,4	1,37	24,4	1	23,4	1,56	22,9	0,33
MnO	0,2	0,01	0,17	0,02	0,18	0,02	0,24	0,04	0,25	0,04	0,24	0,04	0,19	0,01
NiO	0,28	0,01	0,25	0,03	0,26	0,03	0,29	0,03	0,27	0,03	0,28	0,03	0,32	0,05
MgO	18	0,41	16,4	0,39	16,9	0,84	15,7	0,82	15,2	0,56	15,5	0,73	16,8	0,16
Totál	99,38		98,12		98,48		99,54		99,51		99,52		99,88	
Kationszámok 4 oxigénre számolva														
Ti	0,014		0,015		0,015		0,015		0,017		0,016		0,017	
Al	1,526		1,244		1,325		1,474		1,377		1,426		1,612	
Cr	0,352		0,624		0,546		0,364		0,423		0,394		0,21	
Fe ³⁺	0,126		0,134		0,132		0,176		0,222		0,199		0,193	
Fe ²⁺	0,277		0,302		0,295		0,358		0,373		0,365		0,337	
Mn	0,005		0,004		0,004		0,006		0,006		0,006		0,004	
Ni	0,006		0,006		0,006		0,007		0,006		0,006		0,007	
Mg	0,742		0,72		0,726		0,667		0,659		0,663		0,692	
Totál	3,047		3,05		3,05		3,066		3,083		3,075		3,072	
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,73		0,7		0,71		0,01		0,01		0,01		0,67	
Cr/(Cr+Al)	0,19		0,33		0,29		0,2		0,24		0,22		0,12	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Fe²⁺ és Fe³⁺ számítása sztöchiometria alapján történt

VI/b. táblázat. A wehrliit xenolitok spinelljének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NFK1137A						NFR1117A					
n	9						6					
Szöveti helyzet	intersticiális		vermikuláris		átlag		intersticiális		vermikuláris		átlag	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
TiO ₂	0,72	0,08	0,78	0,03	0,75	0,06	0,34	0,04	0,31	0,01	0,33	0,03
Al ₂ O ₃	48,5	1,86	47,0	0,58	47,7	1,53	44,5	0,43	45,2	0,23	44,7	0,5
Cr ₂ O ₃	13,8	1,33	15,0	0,53	14,4	1,17	17,5	0,85	17	0,63	17,4	0,78
FeO	18,3	0,56	18,9	0,44	18,6	0,58	20	0,19	19,5	0,35	19,8	0,34
MnO	0,17	0,02	0,16	0,04	0,16	0,03	0,17	0,02	0,17	0,02	0,17	0,02
NiO	0,23	0,05	0,22	0,02	0,23	0,03	0,29	0,01	0,32	0,04	0,3	0,03
MgO	18,3	0,41	17,9	0,09	18,1	0,32	17,2	0,14	17,2	0,08	17,2	0,11
Totál	99,95		100,03		99,99		99,96		99,6		99,84	
Kationszámok 4 oxigénre számolva												
Ti	0,015		0,016		0,016		0,007		0,007		0,007	
Al	1,56		1,528		1,546		1,47		1,491		1,477	
Cr	0,304		0,328		0,315		0,389		0,376		0,385	
Fe ³⁺	0,141		0,149		0,145		0,169		0,159		0,166	
Fe ²⁺	0,278		0,288		0,283		0,3		0,297		0,299	
Mn	0,004		0,004		0,004		0,004		0,004		0,004	
Ni	0,005		0,005		0,005		0,007		0,007		0,007	
Mg	0,746		0,738		0,742		0,718		0,718		0,718	
Totál	3,053		3,056		3,054		3,064		3,06		3,062	
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,01		0,01		0,01		0,71		0,71		0,71	
Cr/(Cr+Al)	0,16		0,18		0,17		0,21		0,2		0,21	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Fe²⁺ és Fe³⁺ számítása sztöchiometria alapján történt

VI/c. táblázat. A wehrlit xenolitok spinelljének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NFR1119B						NMM1114		NMM1129					
n	9						6		10					
Szöveti helyzet	intersticiális		vermikuláris		átlag		intersticiális		intersticiális		vermikuláris		átlag	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
TiO ₂	0,76	0,13	0,96	0,11	0,83	0,15	0,31	0,05	0,68	0,11	0,85	0,13	0,73	0,14
Al ₂ O ₃	36,8	2,55	37,9	4,18	37,2	2,96	50,9	2,14	49,5	0,87	45,3	1,45	48,3	2,28
Cr ₂ O ₃	27,2	4,35	23,6	3,91	26	4,35	11,9	2,33	10,7	0,85	14,3	1,51	11,8	2,03
FeO	18,2	1,5	20,9	0,94	19,1	1,86	17,9	0,44	21,7	0,68	22,4	0,4	21,9	0,68
MnO	0,17	0,03	0,17	0,04	0,17	0,03	0,14	0,02	0,18	0,03	0,21	0,03	0,19	0,03
NiO	0,23	0,03	0,24	0,03	0,23	0,03	0,27	0,03	0,31	0,03	0,26	0,02	0,29	0,04
MgO	16,5	0,12	16,1	0,91	16,4	0,51	18,5	0,4	16,7	0,49	16,1	0,61	16,5	0,56
Totál	99,87		99,91		99,88		99,94		99,68		99,38		99,59	
Kationszámok 4 oxigénre számolva														
Ti	0,017		0,021		0,018		0,006		0,014		0,018		0,015	
Al	1,251		1,292		1,265		1,628		1,615		1,509		1,583	
Cr	0,621		0,541		0,595		0,256		0,233		0,321		0,26	
Fe ³⁺	0,126		0,167		0,139		0,138		0,165		0,179		0,169	
Fe ²⁺	0,314		0,34		0,322		0,268		0,336		0,35		0,34	
Mn	0,004		0,004		0,004		0,003		0,004		0,005		0,005	
Ni	0,005		0,006		0,005		0,006		0,007		0,006		0,007	
Mg	0,709		0,693		0,704		0,746		0,687		0,679		0,685	
Totál	3,047		3,063		3,052		3,052		3,062		3,067		3,063	
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,01		0,01		0,01		0,74		0,01		0,01		0,01	
Cr/(Cr+Al)	0,33		0,3		0,32		0,14		0,13		0,18		0,14	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Fe²⁺ és Fe³⁺ számítása sztöchiometria alapján történt

VI/d. táblázat. A wehrlit xenolitok spinelljének átlagos főelem összetétele tömeg %-ban (m/m%).

Xenolit	NME1110		NME1129D							
n	9		10							
Szöveti helyzet	intersticiális		intersticiális		vermikuláris		zárvány		átlag	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
TiO ₂	0,54	0,04	0,56	0,02	0,87	0,22	0,68	0,01	0,72	0,19
Al ₂ O ₃	48,7	1,07	54	2,61	43,8	7,04	50,7	0,47	48,9	6,29
Cr ₂ O ₃	14,4	1,19	8,59	2,89	17,9	6,43	11,2	0,33	13,1	5,82
FeO	17,7	0,77	16,5	0,3	19,2	1,64	18,2	0,19	18,1	1,52
MnO	0,15	0,02	0,12	0,03	0,17	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03
NiO	0,31	0,03	0,31	0,01	0,21	0,05	0,28	0,04	0,26	0,05
MgO	18,2	0,4	19,5	0,4	17,4	1,28	18,4	0,03	18,3	1,21
Totál	100,02		99,64		99,52		99,53		99,56	
Kationszámok 4 oxigénre számolva										
Ti	0,011		0,011		0,019		0,014		0,015	
Al	1,569		1,7		1,447		1,627		1,577	
Cr	0,312		0,182		0,402		0,24		0,287	
Fe ³⁺	0,13		0,128		0,153		0,14		0,142	
Fe ²⁺	0,275		0,241		0,301		0,273		0,275	
Mn	0,004		0,003		0,004		0,004		0,004	
Ni	0,007		0,007		0,005		0,006		0,006	
Mg	0,742		0,776		0,728		0,748		0,749	
Totál	3,049		3,048		3,057		3,053		3,053	
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,01		0,76		0,71		0,73		0,73	
Cr/(Cr+Al)	0,17		0,1		0,22		0,13		0,15	

a teljes vas FeO-ban van megadva

Fe²⁺ és Fe³⁺ számítása sztöchiometria alapján történt