

# **Mórági granitoidokban lévő cirkon változatok elkülönítése visszaszórt elektron és katódlumineszcens képek alapján**

TDK dolgozat

Geológus MSc

Ásvány-kőzettan-geokémia, Ásványi nyersanyagok, Archeometria szak

Készítette: Kis Annamária

Témavezetők: Dr. Buda György, Dr. Urs S. Klötzli



Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudomány Intézet  
Ásványtani Tanszék

**Budapest, 2011**

## **Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőim Dr. Buda György és Dr. Urs S. Klötzli Tanár Urak segítőkész, kitartó munkáját, észrevételeiket és tanácsaikat, mellyel segítették dolgozatom megírását. Továbbá köszönettel tartozom Dr. Weiszburg Tamás Tanár Úrnak a szakmai konzultációk során nyújtott segítségéért. A cirkonokról készült visszaszórt elektron képek készítéséért, illetve a zárványok méréséért az ELTE Kőzettani Tanszékéről Bendő Zsoltnak, és Kiss Balázsnak tartozom köszönöttel. Végül pedig szeretném megköszönni a TDK dolgozatom bírálását Dr. Váczi Tamásnak.

# **Tartalomjegyzék**

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Köszönetnyilvánítás.....                                                                                              | 2  |
| Célkitűzés .....                                                                                                      | 5  |
| Bevezetés.....                                                                                                        | 5  |
| 1. Rövid geológiai háttér és közettani áttekintés.....                                                                | 6  |
| 1.1. Mórágai granitoidok kőzetkémiája.....                                                                            | 7  |
| 1.2. A vizsgált kőzettípusok megfeleltetése a különböző, korábbi szakirodalmak alapján .....                          | 9  |
| 2. Minták .....                                                                                                       | 11 |
| 3. Mintaelőkészítés.....                                                                                              | 11 |
| 4. Anyagvizsgáló módszerek.....                                                                                       | 12 |
| 4.1. Sztereomikroszkóp.....                                                                                           | 12 |
| 4.2. Polarizációs mikroszkóp .....                                                                                    | 12 |
| 4.3. SEM-BSE, SEM-CL .....                                                                                            | 12 |
| 4.4. SEM-EDX .....                                                                                                    | 12 |
| 4.5. SEM-BSE és SEM-CL együttes alkalmazása .....                                                                     | 12 |
| 5. Mórágai granitoidokban megjelenő cirkonok morfológiája .....                                                       | 13 |
| 5.1. Vizsgált cirkon morfológiai típusok megfeleltetése a korábbi szakirodalmakkal .                                  | 15 |
| 6. Magmás cirkonok szöveti típusai a mórágai granitoidokban(CL) .....                                                 | 16 |
| 6.1. növekedési zónásság.....                                                                                         | 17 |
| 6.2. szektor zónásság .....                                                                                           | 19 |
| 6.3. xenokristályos mag.....                                                                                          | 20 |
| 6.4. szubsolidusz változás és a növekvő cirkon (konvolút zónásság).....                                               | 21 |
| 7. Cirkon szöveti vizsgálata vékonycsiszolatban (BSE) .....                                                           | 22 |
| 7.1. Mikroclin megakristályos granitoidban (kvarcmonzonit)megfigyelt cirkon morfológiai és szöveti típusok (BSE)..... | 25 |
| 7.1.1. Normál cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ ).....                                                                   | 25 |
| 7.1.2. Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) .....                                                                        | 26 |
| 7.1.3. Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ).....                                                                          | 26 |
| 7.2. Keverék kőzetben megfigyelt cirkon morfológiai és szöveti típusok (BSE) .....                                    | 28 |
| 7.2.1. Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ ).....                                                           | 28 |
| 7.2.2. Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) .....                                                                        | 29 |
| 7.2.3. Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ).....                                                                          | 29 |

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7.3. Mafikus kőzetzárványban ( melamonzonit, melaszienit) megfigyelt cirkon szöveti és morfológiai típusok (BSE).....</b>   | <b>31</b> |
| 7.3.1. Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ ).....                                                                    | 31        |
| 7.3.2. Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) .....                                                                                 | 31        |
| 7.3.3. Nem elkülönített morfológiájú, hanem lekerekített normál és táblás cirkonok..                                           | 32        |
| 7.3.4. Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ).....                                                                                   | 32        |
| <b>8. Értelmezések és következtetések a különböző kőzettípusokban megfigyelt eltérő morfológiájú cirkonok szövetéből .....</b> | <b>32</b> |
| <b>9. Cirkonokban megjelenő zárványok vizsgálata .....</b>                                                                     | <b>35</b> |
| 9.1. A mikroklin megakristályos granitoidok cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX).....                           | 36        |
| 9.2. A hibrid kőzet cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX) .....                                                  | 38        |
| 9.3. A mafikus zárvány cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX).                                                    | 41        |
| <b>10. Következtetések levonása a három kőzettípus cirkonjaiban megjelenő zárványok vizsgálatából.....</b>                     | <b>45</b> |
| <b>Összefoglalás .....</b>                                                                                                     | <b>49</b> |
| <b>Irodalomjegyzék .....</b>                                                                                                   | <b>51</b> |
| <b>Függelék.....</b>                                                                                                           | <b>54</b> |
| <b>LA-ICP-MS vizsgálatra kiválasztott cirkonszemcsék .....</b>                                                                 | <b>54</b> |
| Mikroklin megakristályos granitoid .....                                                                                       | 54        |
| Keverék kőzet.....                                                                                                             | 58        |
| Mafikus zárvány .....                                                                                                          | 62        |

## ***Célkitűzés***

Jelen TDK dolgozatom célja a Mórággyi Granitoid Komplexum cirkonkristályainak morfológiai, szöveti vizsgálata a későbbi kormeghatározás előkészítéseként. Emellett petrográfiai megfigyeléseket is végeztem, melyeket a korábbi szakirodalmakkal vetettem össze, annak érdekében, hogy pontosítsam a mikroklin megakristályos granitoid és a mafikus zárványok közötti szöveti kapcsolatot, az átmeneti zóna pontos közettani besorolását.

Munkám végső célja a Mórággyi Granitoid Komplexum mikroklin megakristályos granitoidjaiban gyakori mafikus lamprofir-jellegű zárványok eredetének, és a kálimetaszomatózis korának meghatározása cirkonból történő U-Pb, Th-Pb kormeghatározás segítségével, és korrelációja a variszkuszi moldanubikumi zóna (Bohémiai Masszívum, Vogézek, Fekete-erdő) hasonló képződményeivel.

## ***Bevezetés***

A Mórággyi granitoid komplexum a Tiszai Nagyszerkezeti Egység ÉNy-i övében kb. 150 x 30 km-es kiterjedésben ÉK-DNy-i csapásban a Mecsek-hegységtől a Duna-Tisza közéig nyomozható. Felszíni kibukkanások a K-Mecsekben (Erdősmecske, Feked, Kismórággy, Mórággy, Bátaapáti) jelennek meg, míg felszín alatt a Ny- és az É-Mecsekben, a Duna-Tisza közén fordulnak elő.

Az általam vizsgált kőzetminták a K-Mecsek felszíni előfordulásaiból és mélyfúrási magmintákból származnak. A mecseki variszkuszi granitoidok ( $354 \pm 5$  millió év,  $339 \pm 10$  millió év), I-típusúak, főleg metalumíniumos, mészkalkáli jellegűek, nagy K- és Mg-tartalommal, amiben lamprofir jellegű mafikus kőzetzárványok figyelhetőek meg (*Buda et al., 2004, Klötzli et al., 2004*). Vizsgálataim tárgyát az ezen kőzetekben járulékos elegyrészként előforduló cirkonok képezték. Dolgozatomban ismertetni fogom a cirkonásványok sztereomikroszkóppal történő morfológiai megfigyelését, elkülönítését, illetve a visszaszórt elektron (BSE) és katódlumineszcens (CL) képek segítségével végzett részletes szöveti értékelést. Ismertetem az ezen vizsgálati módszerekhez szükséges két mintaelőkészítési eljárást.

Vizsgálataim végső célja, a már meglévő geokémiai adatokból, illetve a cirkonok szöveti és morfológiai megfigyeléseiből, U-Pb, Th-Pb LA-ICP-MS-vel történő kormeghatározással a mórággyi granitoidban lévő mafikus zárványok eredetének pontos meghatározása (resztit (különböző kor) vagy „in situ unmixing” (azonos kor)). A jelen

dolgozat az izotóp kormeghatározáshoz szükséges cirkonok morfológiai, szöveti vizsgálatának eredményeiről számol be, jelölve azokat, melyek szöveti szempontból megfelelnek a kormeghatározás kritériumainak (zónás, nem metamiktisedett, nem zárványos).

## **1. Rövid geológiai háttér és kőzettani áttekintés**

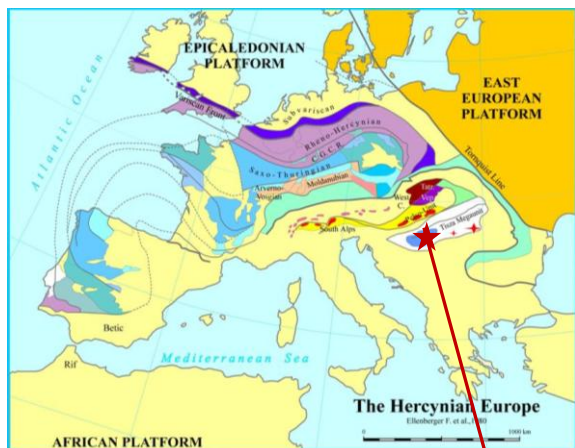
A mintáimat képező variszkuszi granitoidok felszínén, a Tiszai lemezen belül Dél-Magyarország területén, a Mecsek-hegységben, azon belül a Mórággyi-egységben fordulnak elő (1/b. ábra) (Buda et al., 2004). Ezen területen már makroszkóposan is, de konkrét mikroszondás elemzések alapján is négy kőzettípust különíthetünk el.

Az egyik, a fehér és rózsaszínű mikroklin megakristályokat tartalmazó granitoid, a másik az ebben megjelenő amfibol-biotit gazdag mafikus zárványok (néhány cm-től több száz méterig) (Buda Gy., Dobosi G., 2004). Harmadikként meg kell említenünk a kettő közötti átmeneti zónában megjelenő hibrid kőzeteket (Király E., Koroknai B., 2004), továbbá az egész granitoid masszívumot átszelő mikrogránit teléreket (fiatalabbak) (2. ábra). A mikroklin megakristályok három kőzettípusban (mikroklin megakristályos granitoid, hibrid kőzet, mafikus zárvány) jelennek meg. Bennük zárványként biotit (ritkábban plagioklász) kettős koszorú (Buda Gy. et al., 1999, Király E., Koroknai B., 2004) a zónássággal párhuzamosan helyezkedik el, és ezek mellett amfibol és kvarc is van.

Ezen kőzeteket közepes hőmérsékletű felső-zöldpala fáciesű metamorfózis érte (Buda Gy., Dobosi G., 2004). Bár nem minősül külön kőzettípusnak, de meg kell említenünk, hogy a mikrogránit telérek és a granitoidok között is van egy átmeneti zóna (Király E., Koroknai B., 2004).

Ezen K- és Mg-gazdag granitoidok nem csak hazánk területén találhatók meg, hanem mintegy a mórággyi granitoidok feltételezett folytatásaként, egy vonulatot képezve feltűnnek a Bohémiai Masszívumban, a Fekete-erdőben, a francia Vogézekben (1/a. ábra), illetve Korzikán is (Holub et al., 1997).

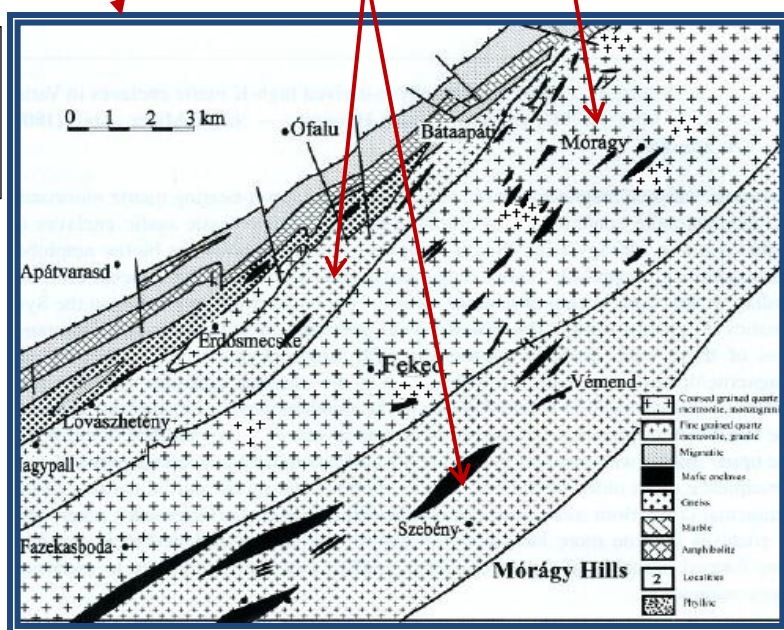
**1/a. ábra** Európai Variszkuszi orogén övek (Buda et al., 2004)



**2. ábra** Elkülönített kőzettípusok a Mórágysági egységben (Buda et al., 2004)



**1/b. ábra** A Mórágysági Granitoid Komplexum vázlatos földtani térképe (Buda et al., 2004)

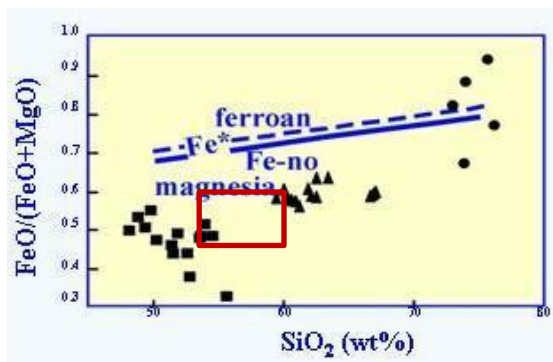


### 1.1. Mórágysági granitoidok kőzetkémiaiája

Ezen kőzetek többnyire Mg és K gazdag granitoidok. Az említett elemek eloszlása -

mely valószínűleg a lamprofir jellegű mafikus zárvány benyomulásához kötött - jól nyomon követhető a négy kőzetben, amelynek pontos kimérése mikroszondás vizsgálatok segítségével történt.

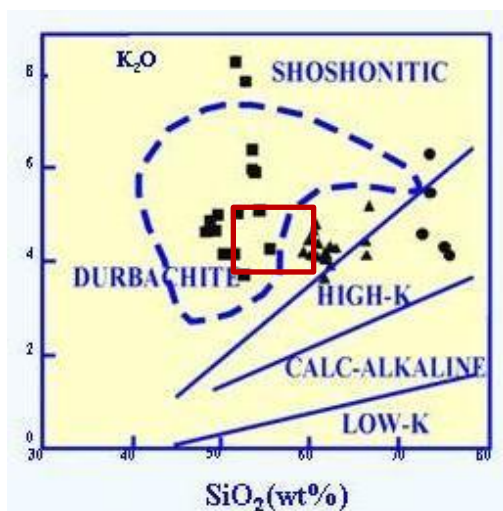
A magnézium-szám a  $\text{SiO}_2$ -tartalom növekedésével némi csökkenést mutat. Ami részben érthető, ugyanis a magma  $\text{SiO}_2$ -tartalmának fokozatos növekedésével nő az



**3/a. ábra** A magnézium-szám arányának változása a  $\text{SiO}_2$ -tartalom függvényében.  
● mikrogránit, ▲ mikroklin megakristályos granitoid, ■ mafikus zárvány, téglalap - hibrid kőzet  
(módosított Buda et al., 2004)

illók és alkáliák mennyisége is, ami eredményezi a magma kristályosodási hőmérsékletének csökkenését, így itt inkább az alacsonyabb olvadáspontú elemek fognak dominálni, mint például vas. A 3/a. ábra mutatja, hogy amíg a mafikus, bázisosabb jellegű zárványban még a magasabb olvadáspontú Mg jelenik meg pl.: csillámokban, addig a mikrogránit felé haladva a Mg helyettesítődik a vassal.

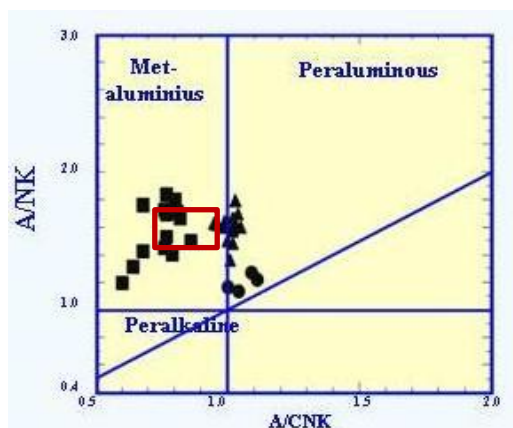
A második extrém dúsulású elem a kálium. Itt különösen kiemelendő, hogy a magmas K-tartalom egyaránt jellemző mind a négy kőzetre (3/b. ábra). A diagramon



3/b. ábra K-tartalom változása a  $\text{SiO}_2$ -tartalom függvényében. ● mikrogránit, ▲ mikroklin megakristályos granitoid, ■ mafikus zárvány, téglalap hibrid kőzet (módosított Buda et al., 2004)

feltűnik, hogy a mafikus zárványban, keverék kőzetben, granitoidban és a mikrogránitban is kb ugyanolyan magas a K mennyisége. Ez egyben azt jelenti, hogy a magma K-ban való dúsulása egyértelműen a bázisosabb és savanyú magma keveredését követően valósult meg. Habár a mikrogránit telér, ugyan jóval később (100 millió év) szelte át a három kőzettípust, a magas kálium tartalom itt is megmaradt (Buda et al., 2004).

Ahhoz, hogy a magas Mg-, K-tartalmú mórággyi granitoidokat pontosan be tudjuk határolni, (hogy M, A, S vagy I típusú granitoidokról beszélünk-e), fontos ismernünk az

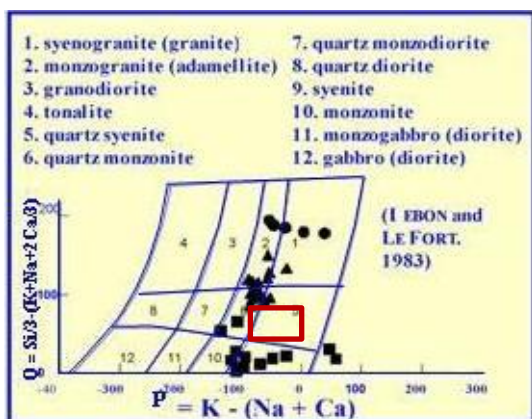


3/c. ábra Kőzetek alumínium-tartalmára vonatkozó diagram. ● mikrogránit, ▲ mikroklin megakristályos granitoid, ■ mafikus zárvány, téglalap hibrid kőzet (módosított Buda et al., 2004)

$\text{A/CNK}$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$  mol%-ban) arányt a kőzetekben. Az általam vizsgáltakra jellemző, hogy az  $\text{A/CNK} < 1,1$ , azaz I-típusú granitoidok, melyek elsősorban bázisos vagy intermedier összetételű magmás kőzetek parciális olvadásával keletkeznek. Esetenként előfordul, hogy  $\text{A/CNK} > 1,1$  azaz S-típusú granitoid is található, ami azt jelenti, hogy Mórággy környékén nem tisztán I-típusú granitoidok jelennek meg, hanem keverednek

S-típusúakkal is, melyek üledékes eredetű kőzetek parciális olvadásával keletkeznek (3/c.ábra). Ez a keveredés a Mórágynál is lehetséges, mert Dél-Magyarország területén Battonyán tipikusan S-típusú granitoidok dominálnak, míg Mórágynál inkább I-típusúak, de a keveredési zóna nem éles Mórágynál és Battonya között (Buda et al., 2004).

A Mórágynál Granitoid Komplexumban felszínre bukkanó kőzetek pontos besorolását a 3/d. ábra szemlélteti. Elkülöníthetünk melamonzonitot, melaszienitot (mafikus zárvány),



3/d. ábra a kőzettípusok (Mórágynál) ábrázolása a P-Q-diagramban.  
 ● mikrogránit, ▲ mikroklin megakristályos granitoid, ■ mafikus zárvány, téglalap hibrid kőzet (módosított Buda et al., 2004)

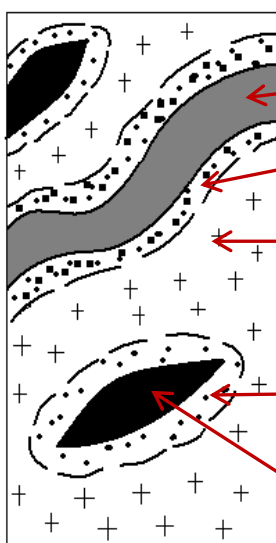
kvarcmonzonitot (granitoid), kvarcszenitot (hibrid kőzet) és mikrogránitot. A granitoidokban a plagioklászok („spike” zónásság) oligoklász-andezin összetételűek, a biotit pedig Fe-gazdag (mg#=39). A mafikus zárványban a plagioklászok andezin-labradorit összetételűek, míg a biotitok (mg#=53±4) és amfibolok (mg#=65) inkább Mg-gazdagok. Akcesszórius ásványok (allanit, cirkon, apatit, titanit, pirit, kalkopirit) mind a négy kőzettípusban előfordulnak. A zárványban, nyomokban, kromitot is találunk.

## 1.2. A vizsgált kőzettípusok megfeleltetése a különböző, korábbi szakirodalmak alapján

A korábbi irodalmak során már elkülönített négy kőzettípus kőzettani besorolásának pontosítása érdekében petrográfiai megfigyeléseket is végeztem dolgozatomban.

A mikroklin megakristályos granitoidot Buda et al. (2004) alapján kvarcmonzonitnak tekintem, mivel a SiO<sub>2</sub>-tartalma 60-70% közötti, így ez csak granitoid, habár a korábbi munkák Király E. és Koroknai B. (2004) monzogranitként sorolta be, ami magasabb, 70% fölötti SiO<sub>2</sub>-tartalmat követelne meg. Így tehát a Mórágynál Komplexumban előforduló kőzet granitoid ugyan, de gránitnak nem mondható. Igazi gránit a korábbi munkák (Buda et al., 2004) során említett mikrogránit, melynek SiO<sub>2</sub>-tartalma 70% - 80 % közötti. Megfigyeléseim alapján a mikroklin megakristályos granitoid és mafikus zárvány között folyamatos átmenetet képező hibrid kőzetet Király E. és Koroknai B. (2004)

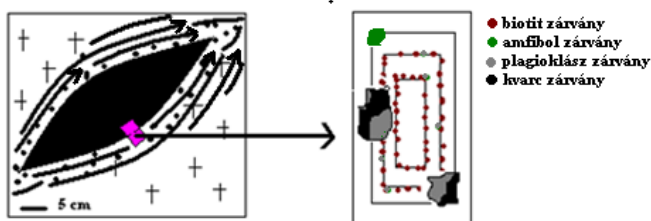
monzonitként sorolta be, addig én kvarcszienitnek határoztam meg. Ennek oka, hogy a keverék kőzetben a káliföldpátok mennyisége meghaladja a neutrális plagioklászok mennyiségét, továbbá a monzonit esetében akcesszóriák közül csak apatit, cirkon és magnetit jelenhet meg, azonban a hibrid vagy átmeneti kőzet jelentős mennyiségű titanitot is tartalmaz mindezek mellett. Így ezen két jelentős tulajdonság alapján a kőzet szienitnek határozható meg, de mivel  $\text{SiO}_2$ -tartalma magasabb, mint a szienitek közé tartozó kőzetek  $\text{SiO}_2$ -tartalma, így a helyes elnevezés a kvarcszienit (Erdey-Grúz T. és Fodorné Csányi P., 1974) (4/a.ábra).

|                                                                                    | Buda et al., 2004                                               | Király et al., 2004                                         | Jelen munka                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|  | mikrogránit (telérkőzet)                                        | mikrogránit (leukokrata telérkőzet)                         | mikrogránit (leukokrata telérkőzet)                            |
|                                                                                    |                                                                 | átmeneti zóna a mikrogránit és a granitoid kőzetek között   | átmeneti zóna a mikrogránit és a granitoid kőzetek között      |
|                                                                                    | mikroclin megakristályos granitoid (kvarcmonzonit, monzogranit) | mikroclin megakristályos granitoid (monzogranit)            | mikroclin megakristályos granitoid (kvarcmonzonit)             |
|                                                                                    |                                                                 | hibrid kőzet (monzonit)                                     | hibrid kőzet (kvarcszienit)                                    |
|                                                                                    | lamprofir-jelleghű mafikus zárvány (melamonzonit, melaszienit)  | mafikus mikrogranuláris zárvány (melamonzonit, melaszienit) | lamprofir-jelleghű mafikus zárvány (melamonzonit, melaszienit) |

4/a.ábra

További megfigyeléseim a három kőzetben megjelenő mikroclin megakristályokra terjedtek ki. A korábbi tanulmányok (Buda et al., 1999, Király E., Koroknai B., 2004) során már kiderült, hogy a megakristályos mikroclint vizsgálva nem csak a plagioklász és biotit kettős gyűrű jelenik meg a mikroclinben zárványként, hanem ezenkívül találunk még bennük amfibol, plagioklász és kvarc zárványokat is. A mikroclin megakristályok mind a mafikus zárványból (amfibol, biotit, plagioklász), mind a granitoidból (biotit, kvarc) származó ásványokat tartalmazzák zárványként. A mikroclin megakristályos granitoid és mafikus zárvány határán is éles, nem lekerekített határral és bontatlan zónassággal rendelkeznek a mikroclin megakristályok. További megfigyelés, hogy a mafikus zárványok körül (velük párhuzamosan) gyenge irányítottság figyelhető meg az esetek többségében (4/b.ábra).

4/b.ábra Mafikus zárvány és keverék kőzet határán megjelenő zónás mikroclin megakristály (rózsaszín téglalap) zárványokkal (→gyenge irányítottság)



## 2. Minták

A minták mind fúrómagból (1.táblázat), mind pedig felszíni feltárásokból származtak. A felszíni feltárásokból származó minták esetén különösen ügyeltem arra, hogy a vizsgálataim alapját képező minták friss törési felületről legyenek leválasztva.

*1.táblázat A minták pontos megnevezése, elhelyezése*

| Üveghutai fúrás | 48 m                                                                                 | 54 m                                                                                                           | 158 m                                                                               |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | mafikus zárvány<br>(porított<br>anyag→szeparált<br>szemcsék + 10<br>vékonycsiszolat) | mikroclin<br>megakristályos<br>granitoid<br>(porított anyag<br>→szeparált<br>szemcsék + 10<br>vékonycsiszolat) | keverék közet<br>(porított anyag<br>→szeparált<br>szemcsék + 10<br>vékonycsiszolat) |

## 3. Mintaelőkészítés

A cirkon morfológiai és szöveti vizsgálataihoz két mintaelőkészítési módszert alkalmaztam. Az egyik a szeparált cirkonszemcsék (CL) műgyantába ágyazása, majd felpolírozása volt. Ennek előnye, hogy az egyes közettípusokban megjelenő cirkonok morfológiáját jobban el tudtam különíteni, majd összehasonlítani, illetve elemzéseim során a zárvényaik minőségi vizsgálatának eredményeit pontosabban tudtam megadni. A második módszer pedig ezen közetekből polírozott vékonycsiszolat (BSE) készítése volt. Itt már a cirkonok morfológiájában, szövetében megjelenő változásokat tudtam értelmezni a cirkonokat bezáró közetalkotó ásványok szöveti megjelenése, módosulása révén, melyek egyben a földtörténet során a granitoidokban lejátszódó folyamatokat is reprezentálják.

Az első módszerrel 300 db szemcsét (100 — 200 µm) preparáltam, a közetminták (mafikus zárvány, keverék közet, granitoid) porítását, nehézasványos leválasztását, majd mágneses szeparálását követően, a visszamaradt frakcióból egyesével történő válogatással. Ahhoz, hogy a cirkonokat a lehető legtisztábban tudjam a többi ásványtól elkülöníteni, a végső frakció szemcséit etanolba áztattam. Mivel a cirkon sűrűsége nagyobb, mint az etanolé, így az lemerül az üvegedény aljára, viszont az etanolnál kisebb sűrűségű ásványok (pl.: csillám) a felszínen úsznak és nem ragadnak rá a cirkonszemcsére. A kiválogatott szemcséket ragasztópapírra helyeztem, de forrásközet és morfológia szerint elkülönítve. Ezt követően műgyantába ágyaztam (3 db szemcsepreparátum), és felpolíroztam (gyémánt paszta 1 — 3 µm). A ragasztásnál különös gondot kellett arra fordítani, hogy azonos

vastagságú cirkonokat helyezünk egy ragasztópapírra, mert ellenkező esetben az eltérő vastagságok miatt nem tudtuk volna kipolírozni a mintát, ez pedig a további vizsgálatok pontosságát rontotta volna.

A második módszerrel, a mintákból polírozott vékonycsiszolatot (30 — 60  $\mu\text{m}$ ) készítettem, ügyelve arra, hogy a minták későbbi LA-ICP-MS-vel történő vizsgálata során a lézer által mélyített lyuk mélysége ne haladja meg a csiszolat vastagságát. A vékonycsiszolatok polarizációs mikroszkóppal történő vizsgálata plusz információként az egész kőzet szövetéről adott átfogó képet, és így vizsgálhatóvá váltak a cirkont bennfoglaló ásványok és azok tulajdonságai, ezzel együtt az ásványok szövetében megőrződött geológiai folyamatok, melyeket a cirkon szövetében végbement változásokkal tudtam összevetni.

## 4. Anyagvizsgálati módszerek

**4.1. Sztereomikroszkóp:** A cirkon kristályok különválogatását és egyben a morfológiai csoportosítását is sztereomikroszkóppal végeztem.

**4.2. Polarizációs mikroszkóp:** A kőzetben lejátszódó geológiai folyamatokat, illetve a cirkont bennfoglaló ásványokat és azok tulajdonságait polarizációs mikroszkóppal vizsgáltam.

**4.3. SEM-BSE, SEM-CL:** A részletesebb szöveti megfigyelések érdekében a mérések pásztázó elektronmikroszkóppal történtek. A mintákat a mérés előtt arannyal vagy szénnel gőzöltem le. A elemzésekhez katódlumineszcens (CL) és visszavert elektron képeket (BSE) készítettem. Elsődleges célom volt a mórági granitoidban lévő cirkonok szövetének leírása, így CL képeket csak a műgyantába ágyazott cirkonszemcséről készítettem. Másodlagos cél a cirkonokról és azok környezetéről kapott információk voltak, melyeket BSE képek segítségével oldottam meg. A képek FEI Inspect S (10kV, 15-20 nA) (Bécs) és Amray 1830i (15 keV, 15-20 nA) (Budapest) típusú pásztázó elektronmikroszkópon készültek.

**4.4. SEM-EDX:** A cirkonzárványok minőségi és mennyiségi kémiai elemzését SEM-EDX-vel végeztem. A mérések 15 keV gyorsítófeszültséggel és 15-20 nA sugárárammal történtek, EDAX energia-diszperzív röntgenspektrométerrel felszerelt Amray 1830i típusú (Budapest) pásztázó elektronmikroszkópon készültek.

**4.5. SEM-BSE és SEM-CL együttes alkalmazása:** A CL és BSE képek ugyan egymás komplementerei, de mégis más fizikai jelenségen alapulnak. A visszaszórt elektron

kép (BSE) a felületre érkező elektronok visszaverődésével leképez. Nagyobb atomtömeg esetén a visszaverődés nagyobb, így ezek a részek világosabbak lesznek, míg a kisebbek sötétebbek, így láthatjuk a kontrasztot az eltérő atomtömegek között (*Hanchar J.M., Miller C.F., 1993*). A katódlumineszcens képek (CL) esetén ugyanúgy látjuk a kontrasztot, de ez elektron-gerjesztési jelenségen alapul, ami tulajdonképpen a nagy energiájú elektron sugárzás által előidézett fénykibocsátás. Ezen vizsgálatok azért fontosak, mert a lumineszcenciát okozó elemeloszlásból következtethetünk a kémiai összetételre. Cirkonok esetén a CL kép a szöveti hibákat is reprezentálja. E szöveti hibák a metamiktizációs folyamatok eredményeképpen jönnek létre és egyben kémiai összetételbeli változással járnak együtt. Egészen konkrétan a cirkon kristályosodása során radioaktív izotópok épülnek be a cirkon szerkezetébe, melyek elkezdnek bomlani ( $\alpha$ -emisszió), ezáltal megbontják a kristályszerkezetet (metamiktizáció). A BSE és CL képek segítségével ezek a metamiktizáció során bekövetkező szöveti hibák, továbbá a cirkon kristályosodása során létrejött nyomelem összetétel minőségi és mennyiségi változása - mely egyben a zónásságot okozza - nagyon jól elemezhető.

Ezen képalkotási módszerek a U-Pb, Th-Pb kormeghatározás elengedhetetlen elővizsgálatai, mivel kiszűrjük azon „ép” cirkonokat, melyek metamiktisedéstől, zárványoktól mentesek, ugyanakkor zónásak. Ezek az ép cirkonok egyúttal megközelítőleg zárt rendszert alkotnak a külső forrásból (pl.: utólagos hidrotermás hatás, labor szennyezés) származó Pb-ra nézve, így az kevésbé szennyezheti a mintát. Ez egyben azt jelenti, hogy az ilyen cirkonokban mérendő U-Pb, Th-Pb arányok nem módosulnak így pontosabb kor kisebb hibával adható meg a kőzetre.

## ***5. Mórági granitoidokban megjelenő cirkonok morfológiája***

Három kőzettípusban (1. mikroklin megakristályos granitoid 2. hibrid kőzet, a granitoid és a mafikus zárvány határán, 3. mafikus kőzetzárvány) figyeltem meg a cirkonok morfológiáját, és szöveti jellegét, és a Pupin-diagram (*Pupin, 1972*) szerint csoportosítottam az előforduló cirkonokat. A negyedik kőzettípust, a mikrogránit telért, mivel fiatalabb korú, illetve nem tartalmaz cirkonokat, és mivel végső soron a mafikus zárvány eredetének megválaszolása a cél, ezért a továbbiakban nem vizsgáltam.

A cirkonok morfológiáját megfigyelve feltűnik, hogy a mafikus zárványban, hibrid kőzetben és a granitoidban azonos morfológiát mutatnak a cirkonok, ebben különbséget

nem találtam. Az egyes típusok megnevezéséhez a Pupin-diagramot (6. ábra) használtam.

Segítségével elkülönítettem „normál” prizmás mészsalkáli jellegű cirkonokat, lapos prizmás és hosszú, nyúlt prizmás cirkonokat (2. táblázat) (5. ábra).

2. táblázat Cirkon morfológia elkülönítése és számszerűsítése a három közettípusban

|                                                                         | <b>mafikus zárvány</b><br>(melamonzonit,<br>melaszienit)                                                                                                              | <b>keverék közet</b><br>(kvarcszienit)                                                                                                                                | <b>mikroclin megakristályos<br/>granitoid</b><br>(monzonit, kvarc<br>monzonit)                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipológia<br/>(cirkon<br/>habitusa<br/>szerinti<br/>osztályozás)</b> | összesen <b>127</b> db<br><b>normál</b> ( $S_{24}, S_{25}$ )<br>(95db→75%),<br><b>lapos prizmás</b> ( $AB_5$ )<br>(29db→23%),<br>nyúlt, prizmás ( $P_5$ )<br>(3db→2%) | összesen <b>131</b> db<br><b>normál</b> ( $S_{24}, S_{25}$ )<br>(95db→73%),<br><b>lapos prizmás</b> ( $AB_5$ )<br>(34db→26%),<br>nyúlt, prizmás ( $P_5$ )<br>(2db→2%) | összesen <b>124</b> db<br><b>normál</b> ( $S_{24}, S_{25}$ )<br>(85db→67%),<br><b>lapos prizmás</b> ( $AB_5$ )<br>(35db→28%),<br>nyúlt, prizmás ( $P_5$ )<br>(4db→3%) |

Bár Finger et al. (1988) szerint a Pupin-diagram, mely a hőmérséklet függvényében mutatja cirkon-morfológiát elavult, ugyanis sok közet (pl.: dácit, riolit) esetén nem lehetett korreláltatni a cirkonok morfológiáját a kristályosodási hőmérséklethez, azonban az általam vizsgált variszkuszi granitoidok esetén Pupin-diagramja alkalmas arra, hogy a cirkon külső megjelenéséből a kristályosodási hőmérsékletre következtessünk, ugyanis

Pupin cirkonjai olyan variszkuszi granitoidokból származtak, mint a mórággyi granitoidok.

A három morfológiai típus (normál, lapos prizmás, nyúlt prizmás) között alapvető különbségek vannak (5. ábra). A jól ismert „normál” cirkonoknak azokat a cirkonokat nevezzük, melyeknél a prizma és piramis aránya



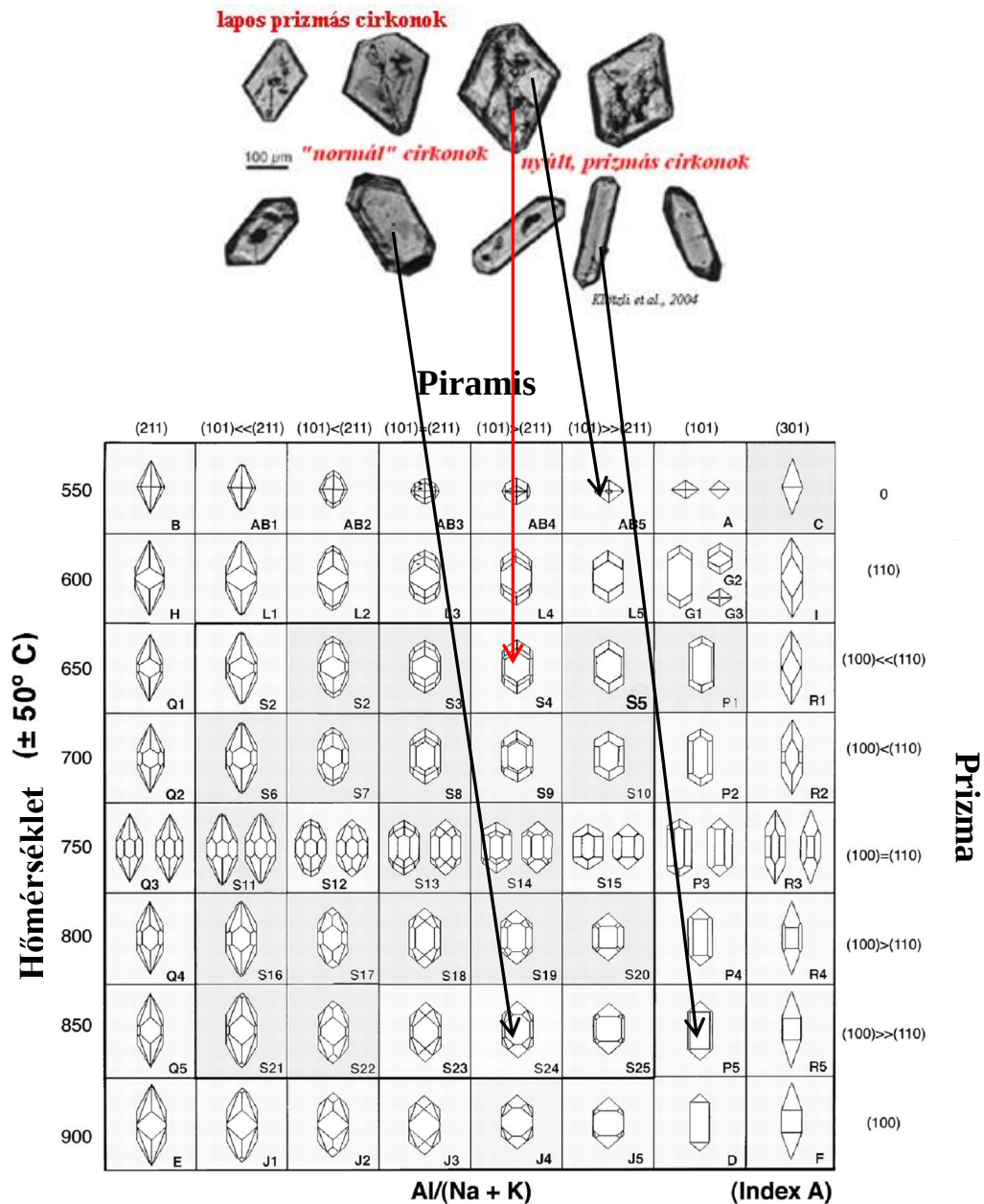
5. ábra

2:1, és a c-tengely a megnyúlás irányában helyezkedik el. A nyúlt prizmás cirkonok esetében a prizma és piramis aránya módosul (3:1, vagy 4:1), azonban hasonlóság a normálhoz képest, hogy a megnyúlási irányban helyezkedik el a c-tengely. A lapos prizmásnak nevezett cirkonok esetében a megnyúlási irányra merőlegesen helyezkedik el a c-tengely, a prizma a piramishoz képest alárendelt.

A korábbi tanulmány (Klötzli et al., 2004) átlagolt kormeghatározása alapján a lapos prizmás cirkonok ( $339 \pm 10$  millió év) fiatalabbak a normál és nyúlt prizmás cirkonoknál ( $354 \pm 5$  millió év).

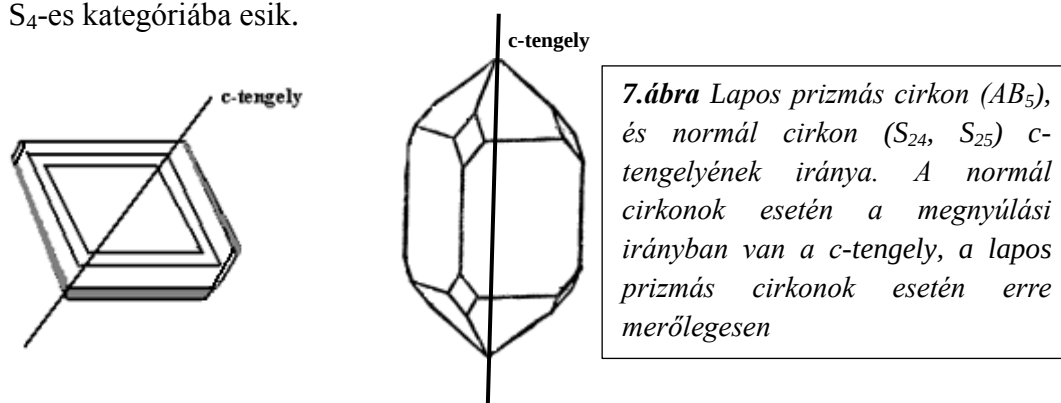
## 5.1. Vizsgált cirkon morfológiai típusok megfeleltetése a korábbi szakirodalmakkal

A korábbi cikk (Klötzli et al., 2004) is három morfológiai típust különített el. Az egyik a „normál” magmás mészkalkáli típusú cirkonok, melyek a Pupin-diagram szerint S<sub>24</sub>, S<sub>25</sub> kategóriába esnek, majd a nyúlt prizmás cirkonok, melyek a P<sub>5</sub>-ös elnevezésnek megfelelőek, és végül a lapos prizmás cirkonok, melyek korábban az S<sub>4</sub>-es (piros nyíl) kategóriába lettek besorolva, a jelen munka alapján meghatározott AB<sub>5</sub> kategória helyett (6.ábra).



**6.ábra** A mórági cirkonok eltérő morfológiai típusai és ezek elhelyezése a Pupin-diagramba (Pupin, 1972) (piros nyíl: korábbi osztályozás, fekete nyíl: jelen munka alapján történő osztályozás)

A lapos prizmás cirkonok morfológiai kategóriájának módosítására azért volt szükség, mert megfigyeléseim szerint a lapos prizmás cirkonok esetében látható, hogy a c-tengely a normál cirkonok c-tengelyéhez viszonyítva - ami párhuzamos a megnyúlási iránnyal - arra merőlegesen helyezkedik el. Itt a prizma alárendelten jelenik meg a piramishoz képest. Azonban az  $S_4$  kategóriába eső cirkonok esetén a c-tengely a normál cirkonoknak megfelelő megnyúlási irányban van, a prizma és a piramis aránya pedig 2:1-hez (7.ábra). A mórági granitoidokban előforduló lapos prizmás cirkonok esetében ez nem így van. Így a Pupin-diagram szerint, ezen cirkonok besorolása helyesen az  $AB_5$ -ös nem pedig az  $S_4$ -es kategóriába esik.



## 6. Magmás cirkonok szöveti típusai a mórági granitoidokban(CL)

Ahhoz, hogy a cirkonok belső, szöveti tulajdonságai – melyet az elemhelyettesítések okoznak - leírhatóak legyenek, egy kicsit bele kell látnunk kristályszerkezetükbe.

A cirkon ( $ZrSiO_4$ ) a neozilikátok közé tartozik, az álszabályos tetragonális rács tércentrált cellájában az  $R^{4+}$  és  $[SiO_4]^{4-}$ -tetraéderek jellemzik. A rács különlegessége, hogy az  $SiO_4$ -tetraédereken belül a szilícium körül elhelyezkedő oxigének kötéstávolsága kicsi, közelebb helyezkednek el egymáshoz, így a komplex anion szigetszerűen elkülönül. A Zr-atomokat 8 O veszi körül, egy sajátos formát alkotva, nagyobb kötéstávolsággal, amit kettős diszfenoidnak nevezünk (Sztrókay K., 1967).

A szerkezetbe Hf mindig beépül. Ha a Si foszforral, a Zr pedig ittriummal helyettesítődik, akkor átmenetet képezhet a xenotim felé ( $YPO_4$ ). Továbbá számos nyomelem (Rf, U, Th) épülhet be a kristályosodás során attól függően, hogy milyen geokémiai tulajdonságok jellemzik azt a magmát, melyből a cirkonásvány kikristályosodik.

Ezen elemhelyettesítések azok, melyek megadják a cirkonok belső szövetét. Ennek több változatát is ismerjük.

Korábbi tanulmányban (*Király E., Koroknai B., 2004*) már elkülönítették a mórági granitoidokban előforduló cirkonok egyes szöveti típusait, de a három közet cirkonjainak szövetében különbséget nem találtak. Vizsgálataim során ezen szöveti típusokat részleteiben elemeztem, mely alapján akadt (pl.: zónavastagság stb...) különbség. Továbbá, még ezen granitoidok cirkonjainak szöveti megfigyelése során egy korábban le nem írt szöveti típust ismertem fel (szektor zónásság).

A mórági granitoidok cirkonjaiban előforduló szöveti típusok a növekedési zónásságot, a konvolút zónásságot, a szektor zónásságot mutatóak, ugyanakkor számos esetben találkozhatunk idegen eredetű (xenokristályos) maggal is. Dolgozatomban ezeket fogom részletesen ismertetni egy-egy példával szemléltetve.

### **6.1. növekedési zónásság**

A magmás cirkonok egyik tipikus szöveti megjelenése a növekedési zónásság (*Corfu et al., 2003*). A zónásság, azért alakulhat ki a cirkon növekedése során, mert eltérő minőségű és mennyiségű nyomelemet épít be a szerkezetébe. Így például ha BSE képen nézzük, akkor az itt jelen lévő elemek (Hf, P, Y, RFF, U, Th) atomtömegükből és mennyiségükből adódóan nem ugyanolyan mértékben és intenzitással verik vissza az elektronokat, így lesznek területek, melyek világosabb sávokat alkotnak, míg mások sötétebbet. Ezen kontrasztok a BSE kép komplementereként említett CL képeken is láthatóak. Ez mutatja, hogy a nyomelem összetétel minősége és mennyisége a kristályosodás során hogyan változott (*8.ábra*).

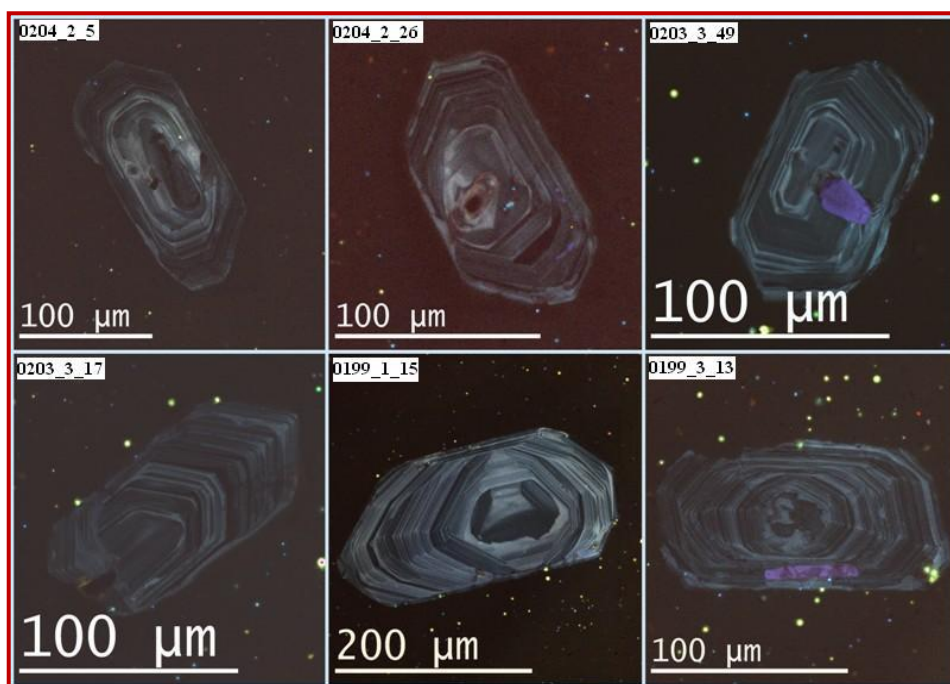
A zónák összetételére vonatkozóan két szélső esetet ismerünk. Az egyik, amikor nagyon kis mennyiségű nyomelem épül be a szerkezetbe a kristályosodás során, akkor úgynevezett tiszta cirkonokat látunk, zónásság nélkül. A másik esetben sok, de a kristályosodás folyamán változó mennyiségű nyomelem épül be, itt intenzív zónásság figyelhető meg (*Köppel V., Sommerauer J., 1974; Benisek A., Finger F., 1993; Hanchar J.M., Rudnick R.L., 1995; Fowler et al., 2002*).

Azonban nem csak a zónák összetétele változó, hanem a vastagságuk is. Oszcillációs zónásságnak nevezzük azt, ahol a zónák kb. egyenlő vastagságban követik egymást (*Pidgeon R.T., 1992*). Az oszcillációs zónásságon belül elkülöníthetünk szimmetrikus és nem szimmetrikus zónásságot, ezek vizsgálata c-tengelyre merőleges

metszetben történik (Paterson et al., 1992b). A nem oszcillációs növekedési zónás cirkont általában jelző nélkül, növekedési zónásnak nevezzük.

A magmás differenciáció és a zónák növekedése közötti korreláció összefügg a magma polimerizáltságával. Amikor a cirkon egy savanyú kiömlési kőzetben (pl.: riolitban) jelenik meg, a zónák sokkal halványabbak és vékonyabbak, ugyanis a gyors hűlés eredményeképpen a kristályok nem nőttek nagyra, és a belső szöveti változások is gyorsan mentek végbe. A mélységi magmás kőzetek cirkonjai esetén már más a helyzet, ott a kristályok is nagyobbak, a zónák is élesebbek és vastagabbak, hiszen a hűlés lassan ment végbe. Ezen kívül számos helyen megfigyelhetjük, hogy a növekedési zónásság megszakad, és fölülíródik, egy újabb növekedési zónássággal. A rezorpció, mint jelenség, lehet egy köztes állapot a magma Zr telítettségére nézve, ez keveredési vagy lokális kinetikus jelenséghez köthető.

A Mórággyi komplexum mindhárom kőzetében előforduló cirkonok mutatják ezt a szöveti megjelenést, rávilágítva arra, hogy a cirkon kristályosodása alatt igen sokat változott a nyomelemek mennyisége és minősége a magmában, ami egyben a geokémiai környezet heterogenitását bizonyítja.



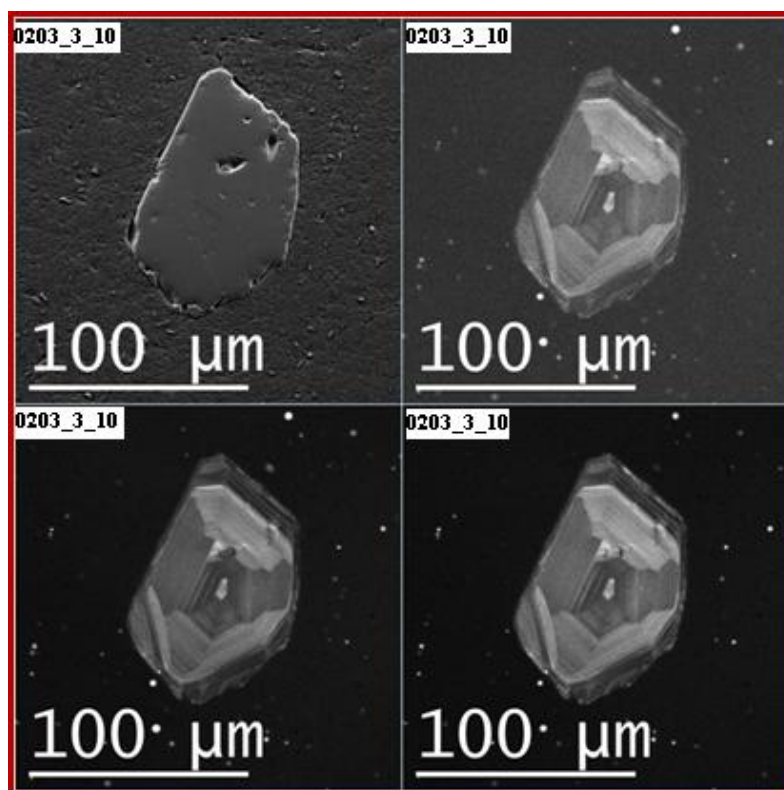
**8.ábra** Mágmas cirkonban lévő növekedési zónásság fajtái, melyeket helyenként káliföldpát (lila), kvarc (piros) zárvány szakít meg (0204 mafikus zárvány, 0203 keverék kőzet, 0199 granitoid, CL képek)

## 6.2. szektor zónásság

A zónásság egyik speciális esete a szektor zónásság (9.ábra). Itt a c-tengelyre merőleges metszetben láthatóan a cirkonkristály piramisa gazdagabb, a prizma szegényebb U-ban, de ennek ellenkezője is megfigyelhető (Krogh, 1982).

Az, hogy a cirkonban egyáltalán ilyen szövet előfordulhat, valamilyen kinetikus faktorhoz kötött, vagy a környezet gyors változásával magyarázható. Az is előfordul, hogy a szektor zónásság megjelenését a cirkonban végbemenő továbbnövekedési folyamatok változása, vagy a diffúziós folyamatok okozzák (Paterson B.A. et al., 1992a).

A cirkonok ezen szöveti megjelenése a mórági granitoidokban a keverék kőzetekre jellemző, a másik két kőzet cirkonjainak szövete nem mutatja ezt a tulajdonságot. A legerőteljesebb változások, mind fizikailag, mind kémiaiilag a két kőzet határán (mikroclin megakristályos granitoid, mafikus zárvány) mutatkoznak. Így itt a cirkonok azon szöveti típusa (szektor) is előfordul, mely ezen lokális változások eredményeképpen jöhet létre.



9.ábra Szektor zónásság megjelenése a keverék kőzetben (0203) (1. kép SE, 2. (red), 3. (green), 4. (blue) CL képek)

### 6.3. xenokristályos mag

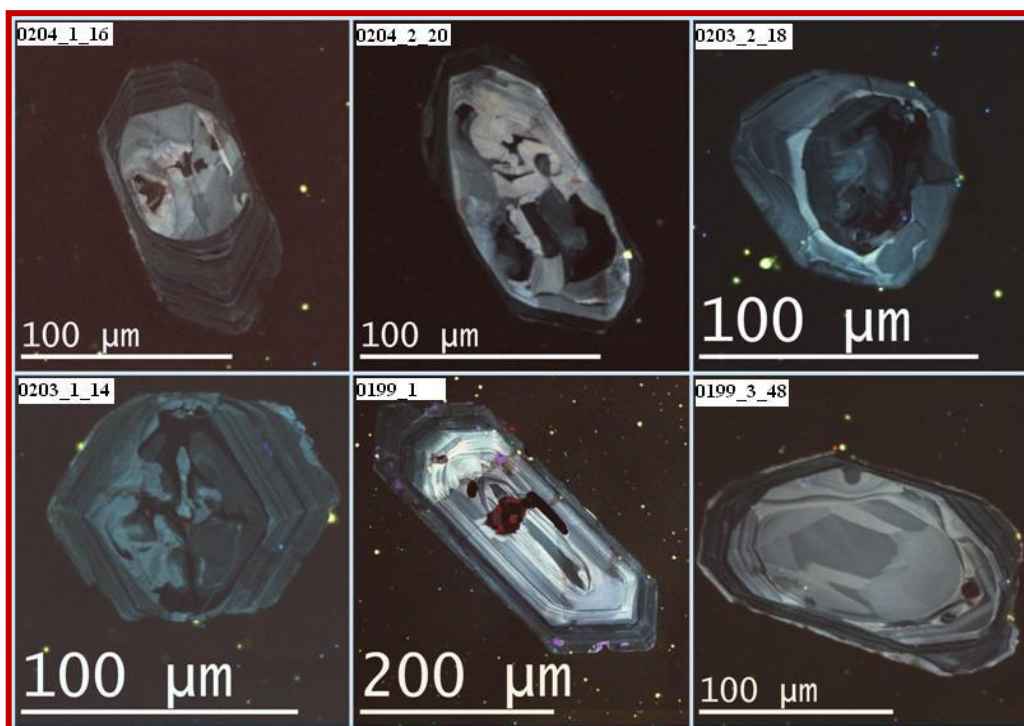
A cirkon xenokristályos magja megjelenhet úgy, hogy a magot magmás zónás cirkon veszi körül és egyszerűen lekerekített a szemcse, de akad a magban nagyon ritkán sajátalakú kristály is (10. ábra).

Néhány kőzetben egyszerű a felismerés, de van, ahol igen nehéz. Előfordul a mag és a gyűrű U-tartalmában nagy különbség. Láthatjuk, hogy a magban sugárirányú repedések keletkeznek, melyek feltörik a körülötte lévő gyűrűt. Ez arra utal, hogy a mag gazdagabb U-ban, mint a továbbnövekedési gyűrű, és a metamiktizáció következtében, ami térfogatnövekedéssel járhat, feltöri azt.

A xenokristályos mag általában differenciáltabb, eltér a geometriailag szabályos gyűrűtől, amely esetenként a mag belső zónásságát megcsonkíthatja (Daminen G. et al., 2010). Lehet még különvált lekerekített, nem zónás, vagy kaotikus belső zónás mag is, amely körül folyamatosan növekvő gyűrű jelenik meg (Corfu et al., 2003).

Speciális esetekben elég nehéz a xenokristályos magot elkülöníteni, pl.: az újrakristályosodás által okozott zónásságtól, a sajátos magmás növekedéstől, vagy abban az esetben, ha a nyomelem különbség kicsi, így a mag és a gyűrű közötti elkülönülés nem jól látható a CL képeken. A mag eredetének meghatározása is nehéz (Paterson et al., 1992a).

A Mórágai komplexum mindhárom kőzetének cirkonjai esetén találkozhatunk ezzel a szöveti megjelenéssel, ami mutatja, hogy lehet akár egy átöröklött mag is, mely ráadásul erősen metamiktesedett. Mivel a cirkon magok kerekítettek, és felülíródott, kaotikus szöveggel rendelkeznek, így eredetük akár üledékes is lehet. Ez itt azért is lehetséges, mert a Mórágai komplexumban esetenként S-típusú granitoid is megjelenik az I-típusú mellett, ami viszont az üledékes eredetű kőzetek parciális olvadása során keletkezik, így a cirkon magja akár onnan is megőrződhetett.



**10.ábra** Xenokristályos, metamiktisedett mag CL képen (0204 mafikus zárvány, 0203 keverék kőzet, 0199 granitoid, CL képek)

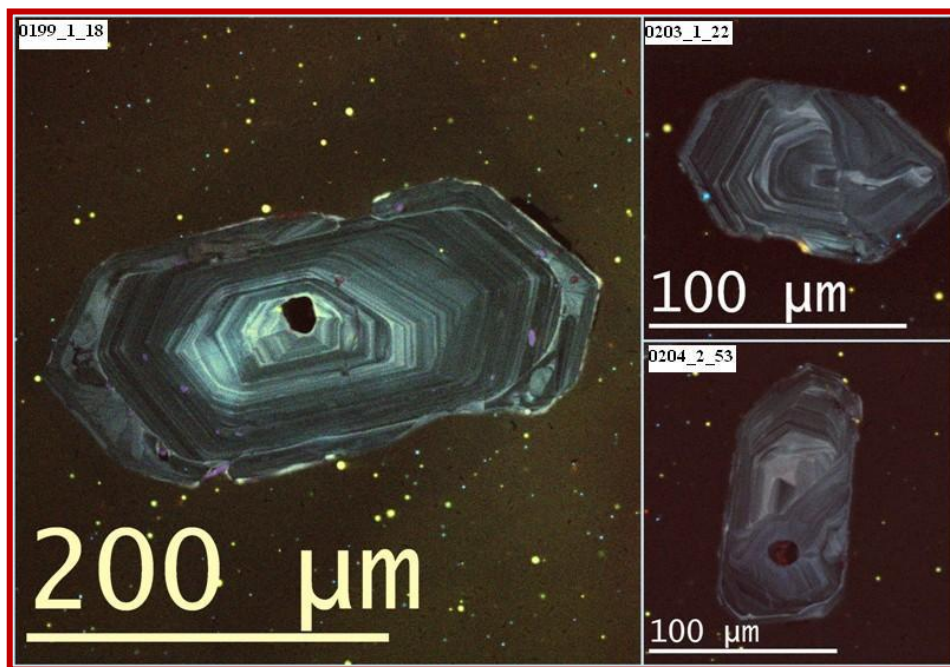
#### 6.4. Szubsolidusz változás és a növekvő cirkon (konvolút zónásság)

##### *Utómagmás kristályosodás*

A cirkonok zónásságai a kialakulásuk során, különböző, akár utólagos folyamatokat is jelezhetnek (Schaltegger U. et al., 1999), mint például: késői magmás kristályosodás, utólagos metamorf hatás (11.ábra). A magmás cirkonok zónássága az utómagmás hatások következtében módosul, ekkor pl.: az oszcillációs zónásság felbomolhat és helyette úgynevezett konvolút zónásság alakul ki (Corfu et al., 2003). A konvolút zónásság egy másodlagos szövet, ahol a zónák egymással nem párhuzamosak, esetenként az eltérő nyomelem összetételű zónák foltokban is megjelenhetnek. Ha a hőmérséklet nagy (500-600°C), akkor a szövettel együtt a cirkonkristályok morfológiája is módosulhat, ám kis hőmérséklet (100-300°C) esetén csak szöveti felülíródást láthatunk, egy másodlagos szövet megjelenéseként (Pidgeon et al., 1998).

A geológiai folyamat, mely a mórágyi granitoidok cirkonjainak szövetét felülírta, mindhárom kőzettípus cirkonjaiban látható. Ami jelzi azt, hogy ezen utólagos hatás akkor

következett be, mikor már mindhárom kőzet kialakult. Az utólagos hatás eredményeképpen a cirkon morfológiája nem változott, csak a szövet íródott felül, így kis hőmérsékletű folyamat kellett, hogy okozza a szöveti módosulást.



**11.ábra** Utólagos kristályosodás során kialakult cirkon szövettípus (konvolút zónásság). A nyomelemek progresszív vándorlását mutatja a zónák között (0204 mafikus zárvány, 0203 keverék kőzet, 0199 granitoid, CL

## 7. Cirkon szöveti vizsgálata vékonycsiszolatban (BSE)

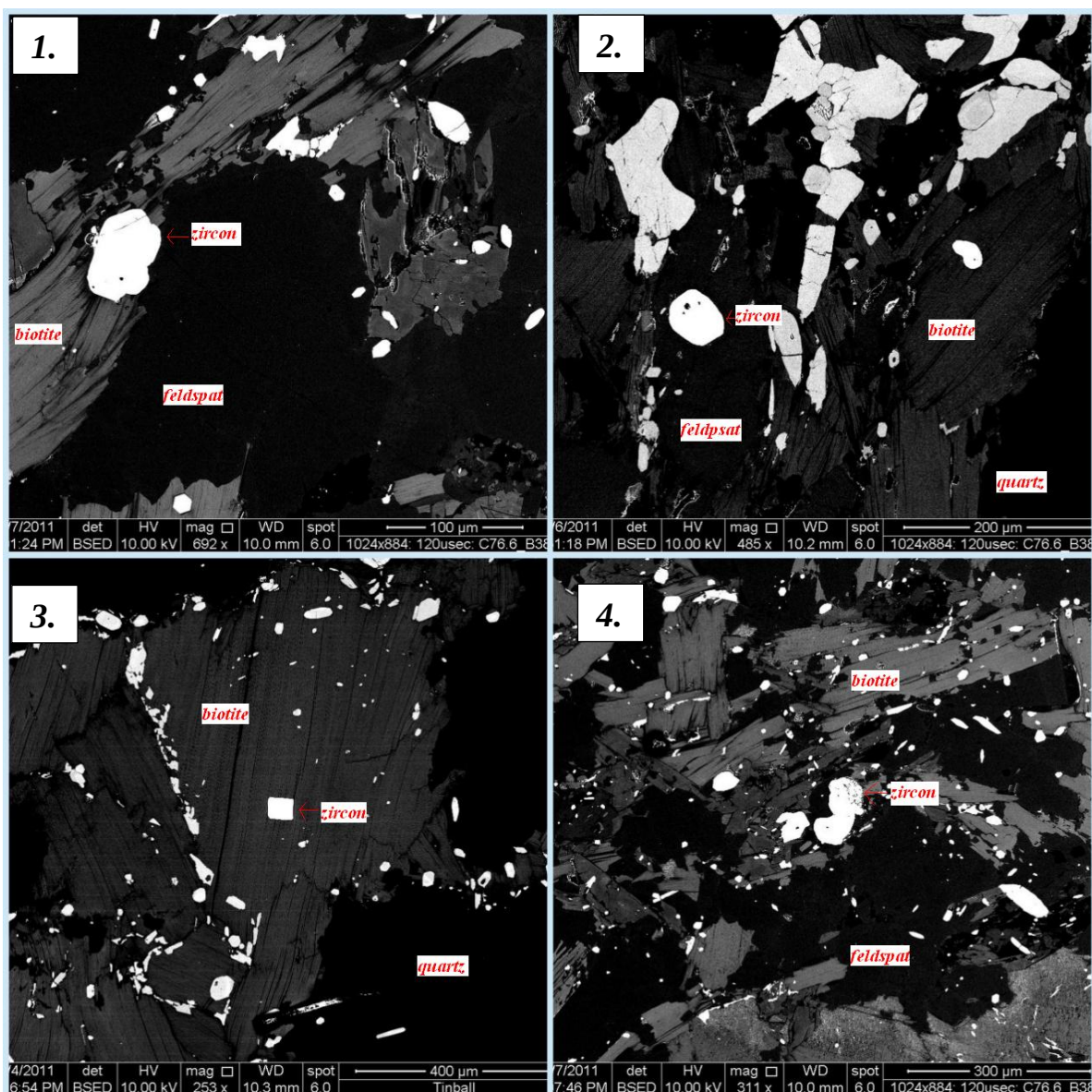
A mórággyi granitoidok szöveti (teljes kőzet) jellemzését a legjobban visszaszórt elektron képek segítségével adhatjuk meg. Három kőzettípust (12.ábra) vizsgáltam: granitoidot (13.ábra), keverék kőzetet (14.ábra) és a mafikus zárványt (15.ábra). Ezen átfogóbb elemzéseket már vékonycsiszolatok segítségével végeztem, melynek előnye, hogy a cirkonok morfológiai és szöveti jellegeit a cirkont bennfoglaló kőzetalkotó ásványokban közvetlenül tudtam vizsgálni (biotit, amfibol, földpát, kvarc).

A cirkonok lehetnek sajátalakúak és xenomorfok is. Általánosságban elmondható, hogy ott, ahol a cirkonok nem sajátalakúak, ott a környező ásványok is xenomorfok (12.ábra).

Mindhárom kőzetből készült vékonycsiszolatban egyértelműen látható, hogy a K-ban és Mg-ban gazdag ásványokon kívül még Ca-ban gazdag ásványok (titanit, apatit, scheelit, allanit) is megjelennek. A titanit, allanit, apatit sajátalakokkal rendelkeznek a

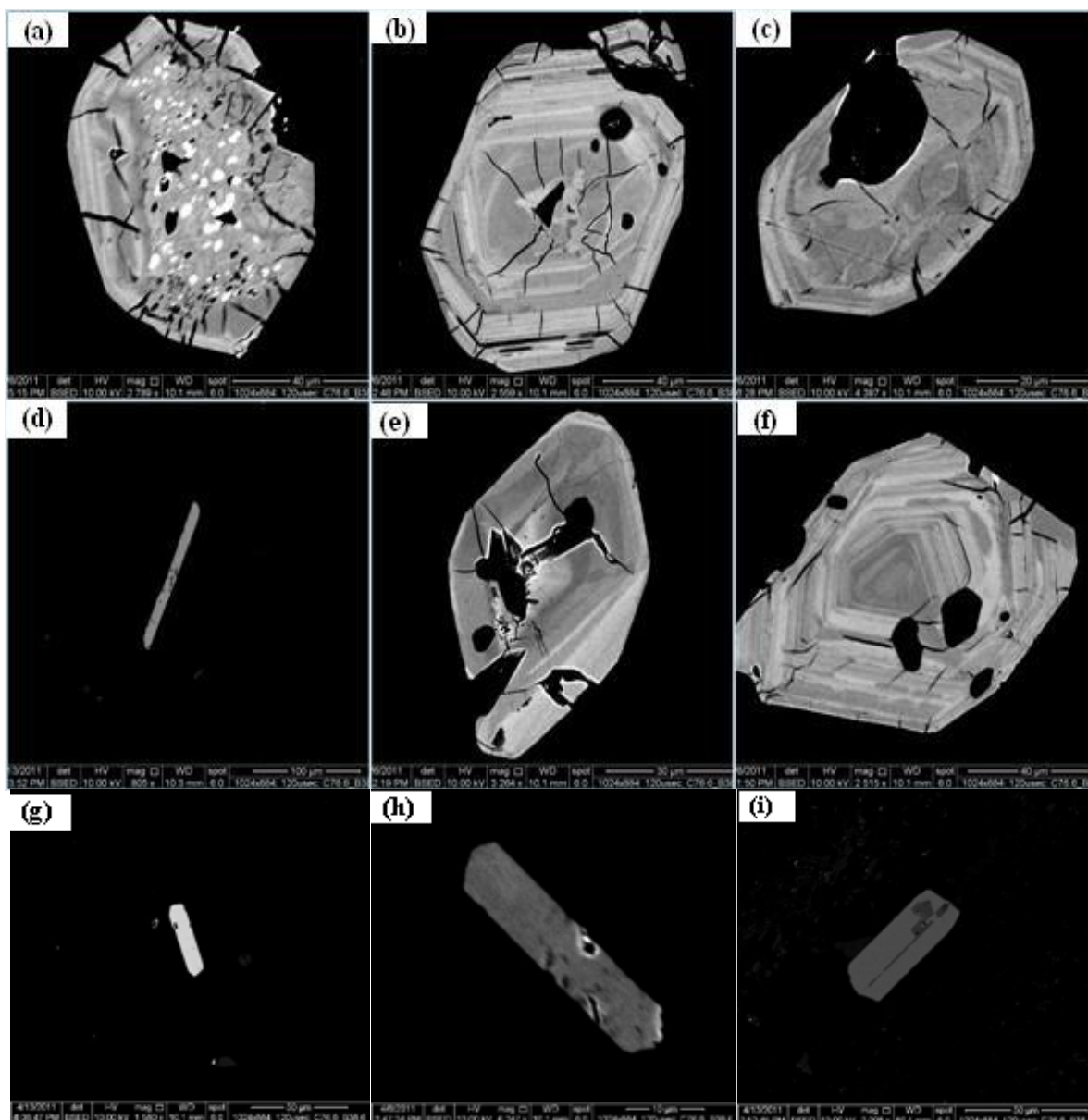
mafikus zárványban és a mikroklin megakristályos granitoidban is, azonban a keverék kőzetben többnyire xenomorfok, és a kőzetalkotó ásványok körül jelennek meg. Az, hogy az ásványok xenomorfok, magyarázható azzal, hogy a határon az idő nem volt elég az egyensúlyi kristályosodás létrejöttéhez.

Észleltem még azt, hogy gyenge irányítottság figyelhető meg a hibrid kőzet szövetében, ám ez a tulajdonság nincs meg sem a mikroklin megakristályos granitoidban sem pedig a mafikus zárványban. Ez arra utal, hogy ez a fajta szöveti irányítottság nem metamorf hatás eredményeként jött létre, hanem a savanyú és bázikusabb magma keveredésének szöveti bizonyítéka a kőzetben.



**12.ábra** Mórággyi granitoidok szöveti képe (BSE) 2. (54\_010), granitoid, 3. (158\_038), hibrid kőzet, 1. (48\_044), 4.(48\_046), mafikus zárvány) vékonycsiszolatban, ahol az ásványok, kiemelten a cirkonok alakja megfigyelhető az eltérő kőzetekben (2., 3., kép sajátalakú cirkon, 1., 4., xenomorf cirkon)

A továbbiakban a cirkonkristályok morfológiai és szöveti típusait nemcsak általánosságban (mórági granitoidokban), hanem részletesen, közettípusokhoz és bennfoglaló ásványokhoz kötve vizsgáltam, így végül ezeket összehasonlítva tudtam elemezni, értelmezni. Itt már a megfigyelések vékonycsiszolatban, visszaszórt elektron képek segítségével történtek.



**13. ábra** Mikroclin megakristályos granitoidban lévő cirkon szövetek visszaszórt elektron képen a; (54\_001) b;(54\_016) c;(54\_017) normál mészsalkáli magmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) földpátban és biotitban, d; 54\_054), e;(54\_002), f;(54\_013), lapos prizmás ( $AB_5$ ) cirkonok g;(2\_54\_022), h;(1\_54\_003), i;(2\_54\_004), biotitban, nyúlt, prizmás cirkonok ( $P_5$ ) földpátban, kvarcban

## **7.1. Mikroclin megakristályos granitoidban (kvarcmonzonit)megfigyelt cirkon morfológiai és szöveti típusok (BSE)**

*A morfológiailag eltérő cirkonszemcsék szöveti jellemzése: (13.ábra)*

Megfigyeléseim alapján a cirkonok mérete (50 — 100  $\mu\text{m}$ ) itt a legnagyobb, a zónák itt a legszélesebbek (3 — 6  $\mu\text{m}$ ) a hibrid közethez és a mafikus zárványhoz képest. Továbbá a szilikát (biotit, földpát) zárványok gyakorisága itt a legnagyobb.

### **7.1.1. Normál cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ )**

**(a)** A szemcse erősen rezorbeált, peremén sugárirányú törések vannak, melyek a mag térfogatátgulása következtében jöhettek létre, ez pedig a metamiktesedés eredménye. A magban az oszcillációs zónásságot megszakító tórit zárványok ülnek. A peremen oszcillációs zónásság látható. Észleltem „szivacsos” jelleget mutató szöveteket, melynek hézagjait tórit tölti ki, és mellettük lekerekített üregek láthatóak. Ezek kerekített alakja arra utal, hogy az üregeket vagy folyadék vagy gáz töltötte ki. Jelenlétük a cirkonban minden tekintetben hidrotermás fluidumok hatására engednek következtetni.

**(b)** A szemcse közepén sötét magot, a körülötte lévő gyűrűn sugárirányú töréseket látunk. Ezek a törések megszakadnak, és utána ép (törés nélküli) zóna következik, majd a cirkon szegélyén újabb sugárirányú töréseket észlelünk. Ezen sugárirányú törések a mag térfogatátgulása következtében alakulhattak ki, melyet az U-Th-tartalmú mag metamiktizációja okozott. Előfordulnak olyan más genetikájú „csatornák” is, melyek nem sugárirányúak, hanem a zónássággal párhuzamosak, vagy arra merőlegesek, ezekben a csatornában ásványkitöltés (káliföldpát, kvarc) van. Az ilyen csatornák, azért mondhatóak más genetikájúaknak, mert akkor is megjelennek cirkonokban, mikor nincs metamiktesedésre utaló jel (sugárirányú törés mag körül), vagy a cirkonnak egyáltalán nincs magja. Látható, hogy sugárirányú törések megszakadnak, így a cirkon mag metamiktesedése hamarabb kellett, hogy bekövetkezzen, mint a cirkon továbbnövekedése, majd a továbbnövekedés után újra sugárirányú törések vannak a peremen. Ez azt jelenti, hogy a továbbnövekedés előtt és után is volt egy metamiktizáció. A magot körülvevő peremen növekedési zónásság jellemzi a szövetet.

(c) sugárirányú törések vannak a peremen, melyek metamiktesedett magra utalnak + káliföldpát, kvarc zárvány (reziduális magma), mely megszakítja a peremen lévő növekedési zónásságot.

#### 7.1.2. *Lapos prizmás cirkonok (AB<sub>5</sub>)*

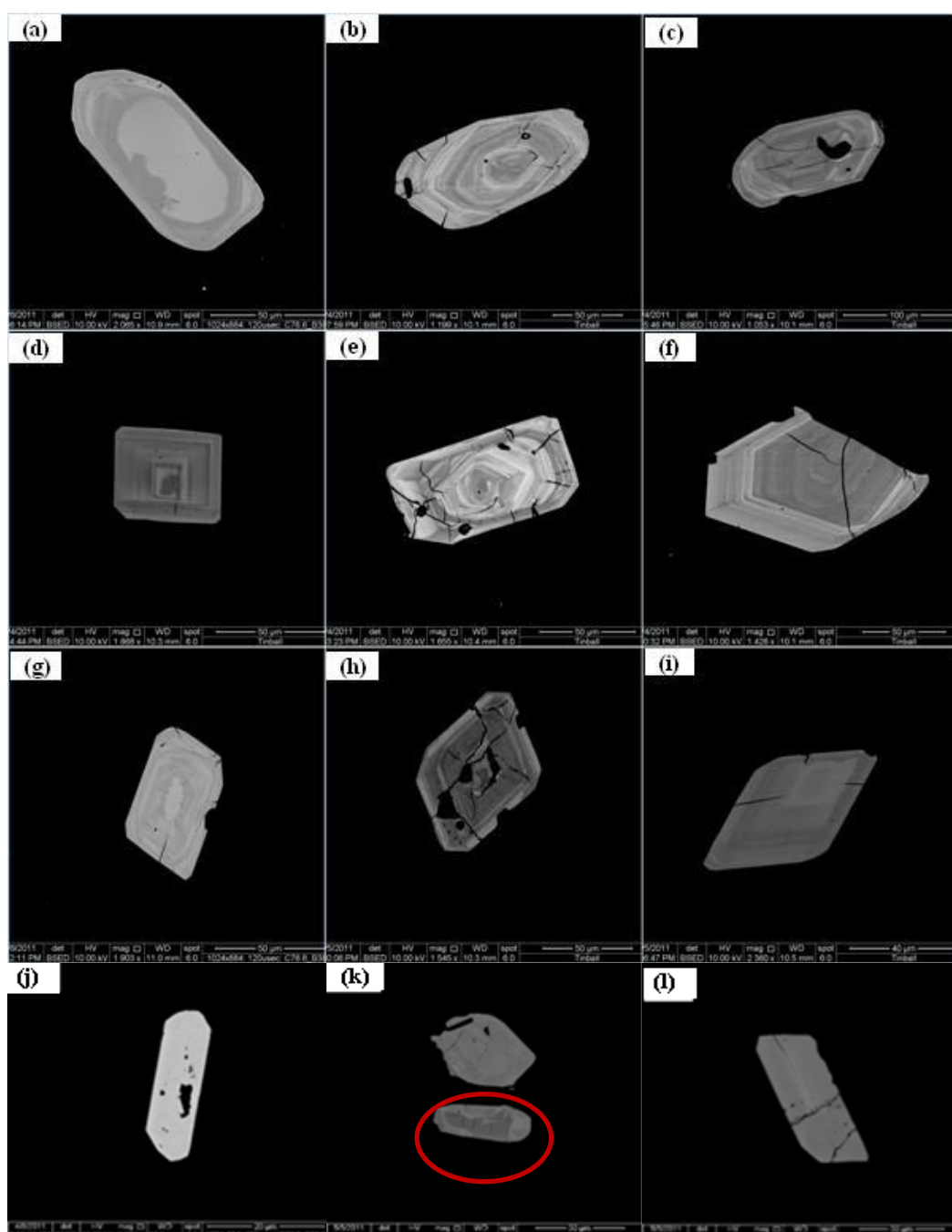
(d) A kristály c-tengellyel párhuzamos metszetét láthatjuk. Az, hogy épen meg tudott maradni ez a szemcse, ez egyben azt jelenti, hogyha a területet, metamorf hatás is érte, akkor, annak igen minimálisnak kellett lenni, ugyanis ellenkező esetben nem maradt volna meg, hanem eltörik. Közepén metamiktesedett mag észlelhető, pontosabban (zónák, repedések) nem lehet meghatározni a szövetet, mivel keskeny (10 µm) a szemcse.

(e) A törések a zárványok körül jelentkeznek. A szemcsében kvarc és káliföldpát zárvány látható, esetenként a körülötte lévő töréseket is a zárvány anyaga tölti ki (kvarc káliföldpát). A szöveten növekedési zónásság észlelhető, amit a cirkonban lévő Si, Zr-t helyettesítő Hf, P, Y, RFF, U, Th elemek okoznak.

(f) A peremen sugárirányú törések (metamiktesedett magot jeleznek), és az eltérő eredetet mutató zónássággal párhuzamos csatornák is megjelennek, de ezek inkább a magban lévő zárványok körül helyezkednek el. Szövege normál oszcillációs zónás, melyet apatit és káliföldpát zárványok szakítanak meg.

#### 7.1.3. *Nyúlt prizmás cirkonok (P<sub>5</sub>)*

(g), (h), (i) A nyúlt prizmás cirkonokban észlelhető repedés (h), de minimális. Magjuk nincs (amely metamiktesedhetett volna), amennyiben zárványt tartalmaznak, akkor az kvarc és káliföldpát. A normál és táblás cirkonokkal ellentétben a szövet homogén, melyből láthatjuk, hogy a kristályosodás során nem mutattak erős nyomelem összetételbeli változásokat.



**14.ábra** Keverék kőzetekben lévő cirkonok morfológiai és szöveti típusai visszaszórt elektron képen a;(1\_158\_014), b;(2\_158\_015), c;(2\_158\_018), d;(2\_158\_037), e;(2\_158\_007), f;(2\_158\_016) normál, mészkalkáli magmás cirkonok ( $S_{24}$ ), ( $S_{25}$ ) biotitban, földpátban, g;(1\_158\_036), h;(3\_158\_011), i;(4\_158\_014) lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) biotitban, j;(1\_158\_022), k;(3\_158\_043), l;(4\_158\_006) nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) földpátban,

## **7.2. Keverék (hibrid) kőzetben megfigyelt cirkon morfológiai és szöveti típusok (BSE)**

### ***A morfológiailag eltérő cirkonszemcsék szöveti jellemzése: (14.ábra)***

Vizsgálataim alapján elmondható, hogy a keverék kőzetben a cirkonok mérete kisebb (van 100  $\mu\text{m}$ -es, de nagyon kevés, amely ezt a mérettartományt eléri, többségében a 100  $\mu\text{m}$  alattiak dominálnak), a zónák vékonyabbak (3  $\mu\text{m}$ ), a mikroklin megakristályos granitoidhoz képest. Továbbá kevésbé metamiktesedtek, de a két fázisban zajló metamiktesedés itt is jelen van. A zárványok mennyisége lecsökken, míg a mikroklin megakristályos granitoid esetén a vizsgált (9db) cirkonok mindegyike tartalmazott zárványt, addig a keverék kőzetben vizsgált 12 db cirkonból csak 5db volt zárványos.

#### **7.2.1. Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ )**

(a) A szemcsén repedés nem látható, magja homogén szövetű és nincs benne zárvány. Közel homogén szemcse, de a peremén növekedési zónásság jelenik meg. A cirkon közepe - melyet a BSE képen világosnak látunk - U-Th-tartalmú.

(b) A kristály peremén sugárirányú törések láthatóak, mely feltételezi a metamiktesedett magot. Itt is látható, hogy van egy középső rész magként, mely körül sugárirányú törések vannak, majd ezt egy ép zóna követi, ami után a szegély ismételt sugárirányú töréseket mutat. Ez feltételezi, hogy a metamiktesedés itt is kétszer zajlott le. Zárvány (apatit) csak a szegélyen jelenik meg, a szövet növekedési zónásságot mutat (mag és a szegély is).

(c) Itt szintén láthatóak repedések, de ezek nem sugárirányúak, hanem a cirkon belsejében ülő zárvány (kvarc, káliföldpát) körül jelennek meg. A szövet növekedési zónásságot mutat.

(d) A szemcsén nem láthatóak repedések, nincs különálló magja, és zárványmentes. C-tengelyre merőleges metszetet mutat a cirkon, ahol jól vizsgálható a zónák szimmetrikussága. Látható, hogy a zónák bár azonos vastagságúaknak mondhatóak, mégsem szimmetrikus elrendeződésűek, így ebben az esetben aszimmetrikus oszcillációs zónásság figyelhető meg.

(e) A cirkonkristály peremén sugárirányú repedések figyelhetőek meg, jelen vannak a más genetikájú csatornák is. A sugárirányú repedések mind a magban, mind a peremen vannak, melyet egy ép zóna választ el. Tehát itt is elmondható, hogy a metamiktizáció kétszer zajlott le. A zárványok a cirkon peremében helyezkednek el. Van magja, mely körül a repedések koncentrálnak. Szövetét tekintve a mag és a perem is növekedési zónásságot mutat, bár a peremen a zárványok körül konvolút zónásság is észlelhető.

(f) A cirkonnak csak kb. a fele bukkan ki a bennfoglalt kőzetalkotó ásvány alól, így bár repedések láthatóak, eredetükről nem lehet biztosat mondani. Látunk egy sötétebb részt, ahol a repedések is elhelyezkednek, ez szövetét tekintve növekedési zónás, míg a körülötte lévő világosabb perem oszcillációs zónásságot mutat.

#### **7.2.2. Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ )**

(g) A szemcsében sugárirányú repedések láthatóak U-Th tartalmú mag körül majd, jön egy ép zóna, ahol nincsenek repedések, ezt követően viszont a peremen szintén megjelennek. Nem tartalmaz zárványokat.

(h) A cirkonban sugárirányú repedések vannak, melyek metamiktesedésre utalnak a magban. Ettől eltérő genetikájú törések is láthatóak. Ezen repedések a zárványok körül helyezkednek el. Zárványok a magban (kvarc) és a peremben (biotit) is vannak. A mag konvolút zónásságot, míg a perem növekedési zónásságot mutat.

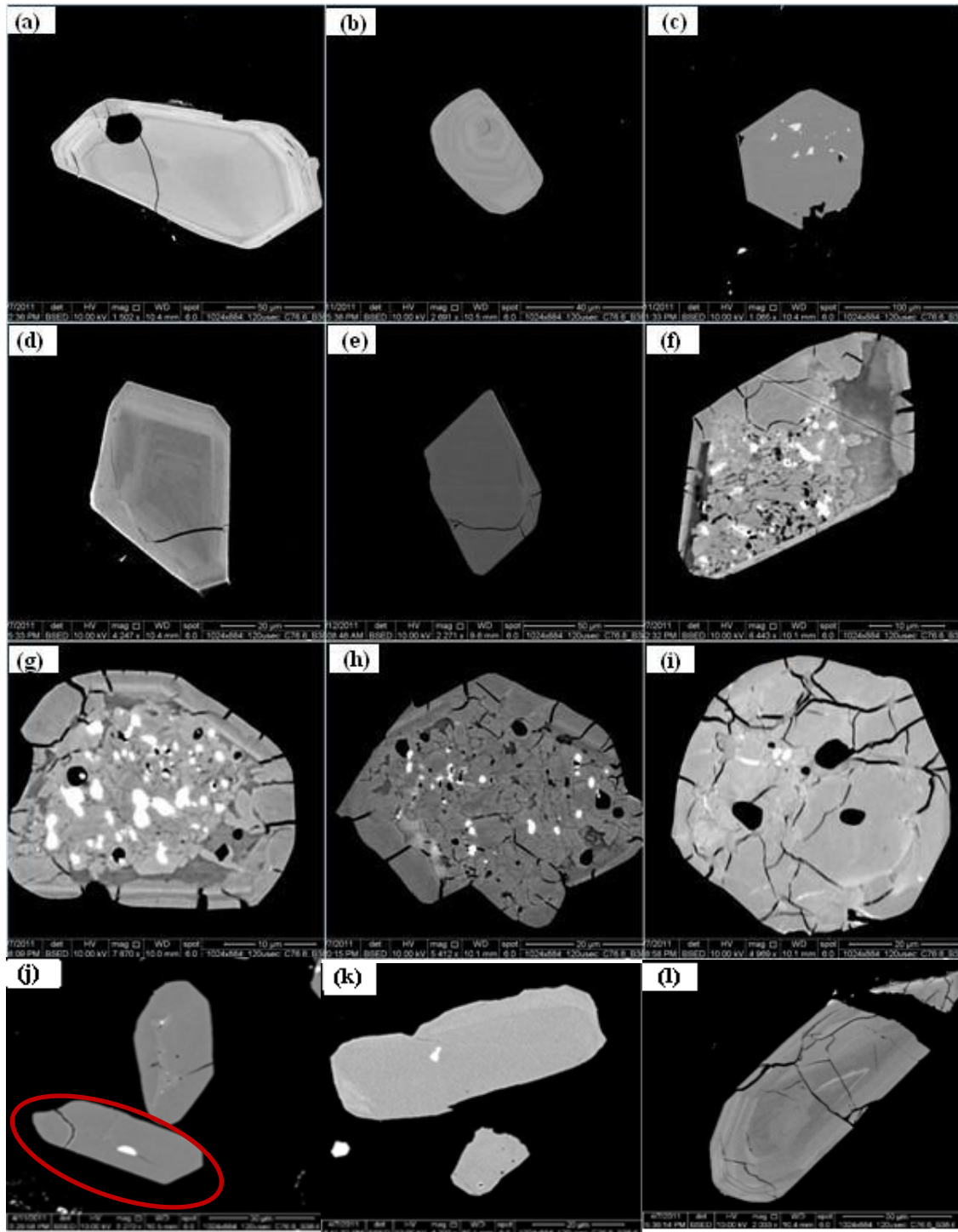
(i) A kristályon vannak repedések, melyek nem sugárirányúak. Nincs külön magjuk, és nem is zárványosak. A szemcsék növekedési zónásságot mutatnak, melyek kontrasztja nem éles, tehát kristályosodásuk során a nyomelem összetétel kis mértékű változást mutat, a szemcse közepe magasabb U-tartalmú (világos), mint a perem.

#### **7.2.3. Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ )**

(j) A kristályon repedés nem látható, azonban közepén kvarc és káliföldpát zárvány ül. Nincs elkülönült magja, és a szövete nem mutat zónásságot, közel homogén.

(k) Szintén nem láthatóak rajta repedések, zárványt sem tartalmaz, és nincs különálló magja. A szövete konvolút zónásságot mutat.

(l) Vannak repedések a szemcsében, de azok nem sugárirányúak, nincs magja, és zárványmentes. A szövetén zónásságot nem észlelünk, homogén.



**15.ábra** Bázisos zárványban (melamonzonit, melaszienit) visszaszórt elektron képen **a**;(2\_48\_073), **b**;(3\_48\_012), **c**;(3\_48\_044) normál mészsalkáli magmás cirkonok ( $S_{24}$ ), ( $S_{25}$ ) földpátban és biotitban, **d**;(2\_48\_074), **e**;(118-119\_007), **f**;(2\_48\_036) lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) biotitban, **g**;(2\_48\_052), **h**;(2\_48\_033), **i**;(2\_48\_047), kerekített cirkonok biotitban **j**;(3\_48\_003), **k**;(2\_48\_065), **l**;(2\_48\_076) nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) földpátban és kvarcban

### **7.3. Mafikus kőzetzárványban ( melamonzonit, melaszienit) megfigyelt cirkon szöveti és morfológiai típusok (BSE)**

*A morfológiailag eltérő cirkonszemcsék szöveti jellemzése: (15. ábra)*

Általános megfigyeléseim során észleltem, hogy a mafikus zárványban előforduló cirkonok mérete a legkisebb (többsége 50  $\mu\text{m}$  alatti), illetve a cirkonok szövetében megfigyelt zónák itt a legkeskenyebbek (1 — 3  $\mu\text{m}$ ). Viszont a metamiktesedés, és a tórit zárványok gyakorisága szemben a szilikát zárványokkal itt a legnagyobb. A vizsgált 12 db cirkonból 7 db zárványokat tartalmaz, melynek többsége tórit.

#### **7.3.1. Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ , $S_{25}$ )**

(a) A kristályban repedések figyelhetőek meg, melyek a kvarc zárvány körül helyezkednek el, nem sugárirányúak, így jelenlétük nem metamiktesedés által létrejött törésekre utal. Homogén szövetű mag körül növekedési zónásság figyelhető meg a cirkon peremén.

(b) A cirkonban nincsenek repedések, nincs külön álló mag, és zárványmentes. A szemcse szövege oszcillációs zónásságot mutat, gyenge kontraszt látható a zónák között, és vékonyak (3  $\mu\text{m}$  alattiak).

(c) Sajátalakú szemcse, melyben nincsenek repedések. Benne tórit zárványok ülnek. A szövege nem mutat zónásságot, homogén.

#### **7.3.2. Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ )**

(d) A kristályon látható repedés, de nem sugárirányú, így nem metamiktesedett, nincs különálló mag. Zárványmentes, sajátalakú szemcse, mely a peremen növekedési zónásságot mutat.

(e) A cirkonban láthatóak repedések, de csak a peremen, ezek szintén nem sugárirányúak, nincs metamiktesedett elkülönült mag. Zárványokat szintén nem találunk. Szövetileg a szemcse teljesen homogén, ép, illetve sajátalakú.

(f) A kristályon csak a peremen láthatóak sugárirányú repedések. Erősen rezorbeált a mag, tórit zárványok és üres lekerekített üregek töltik ki az itt is jelenlévő „szivacsos” szövetet, melyet utólagos hidrotermás hatások okoztak.

### **7.3.3. *Nem elkülönített morfológiájú, hanem lekerekített normál és táblás cirkonok***

**(g), (h), (i)** A cirkonok pereme sugárirányú repedésekkel átszőtt, ez mutatja, hogy a mag metamiktesedett. A mag erősen rezorbeált, „szivacsos” szövetet mutat, melyben lekerekített üregek és tórit zárványok láthatóak. Ezen szemcsék leginkább a mafikus zárványban fordulnak elő. Kezdetben normál mészkalkáli magmás és táblás cirkonok voltak, majd az erős utólagos hidrotermás hatások következtében alakultak át.

### **7.3.4. *Nyúlt prizmás cirkonok (P<sub>5</sub>)***

**(j), (k)** Ezen cirkonokban nem látunk repedéseket, nincs különálló mag és zárványként tórit jelenik meg. Szövetük nem mutat zónásságot, homogén.

**(l)** A kristályban számos repedés figyelhető meg, melyek nem sugárirányúak, nincs különálló metamiktesedett mag. A szemcse zárványmentes. Míg szövet szempontjából a középső rész homogén, de a perem növekedési zónásságot mutat.

## ***8. Értelmezések és következtetések a különböző kőzettípusokban megfigyelt eltérő morfológiájú cirkonok szövetéből***

A Mórággyi Komplexum granitoidjaiban lejátszódó folyamatokra nem csak a kőzetszövet megfigyelése alapján tudunk következtetni, hanem a kőzetet alkotó ásványok tulajdonságai alapján is.

A három kőzettípus cirkonjai között morfológiai különbséget nem találtam, azonban cirkonszövet szempontjából van eltérés.

Katódlumineszcens vizsgálatok során megfigyelt hasonlóság, hogy a három kőzet cirkonkristályainak szöveti típusai közül a növekedési, oszcillációs zónásságot mutató cirkonok, illetve a xenokristályos mag mind a három kőzet esetén megtalálható. Továbbá a másodlagos szövetet mutató konvolút zónásság, mely egy alacsony hőmérsékletű (100 — 300 °C) folyamatot jelez - mivel a kristálymorfológia nem változott, csak a szövet íródott felül - szintén az összes kőzet cirkonjaiban előfordul.

Ami eltérés az az, hogy a lokális, helyi változásokhoz kötött szektor zónásság csak a hibrid kőzetben látható.

A visszaszórt elektron képek esetén a vizsgálat már kiterjedt a bennfoglaló ásványokra és a közetre is. Észleléseim során kiderült, hogy a lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) elsősorban (90%-ban) biotitban jelennek meg, míg a normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ), ( $S_{25}$ ) biotitban, földpátban egyenlő arányban, kis mértékben amfibolokban is előfordulnak. A nyúlt prizmás cirkonok viszont csak földpátban és kvarcban jelennek meg.

Vizsgálataim során megfigyeltem, hogy a cirkonok mérete a mikroklin megakristályos granitoidtól (szeparált mintában  $200\text{ }\mu\text{m}$ , vékonycsiszolatban  $100 - 50\text{ }\mu\text{m}$ ) a mafikus zárványig (szeparált mintában  $100\text{ }\mu\text{m} >$ , vékonycsiszolatban  $50\text{ }\mu\text{m} >$ ) csökken. Szövetükben is van némi változás, például a zónák vastagsága (mikroklin megakristályos granitoid cirkonjaiban  $3 - 6\text{ }\mu\text{m}$ , míg a mafikus zárvány cirkonjaiban  $3\text{ }\mu\text{m}$  alatti) és kontrasztja a mafikus zárványban a legkisebb. A cirkon zárványok szempontjából a szilikát (biotit, földpát) zárványok a tórit zárványokhoz képest túlsúlyban vannak a mikroklin megakristályos granitoidban, míg a mafikus zárvány esetén ez pont fordítva van. A metamiktesedés is a mafikus zárvány cirkonjaiban a legintenzívebb. Viszont a hibrid közet nem csak petrográfiai vizsgálatok, hanem cirkon morfológiai és szöveti megfigyelések alapján is a két közet között átmenetet képez, jelezve a lokális változások (szektor zónáság) legnagyobb gyakoriságát. Mivel megjelenésük igen kis százalékot tesz ki (4%), így vékonycsiszolatban nem is találtam szektorzónás cirkont, csak szeparálás során.

Az általam elemzett cirkonok közül, azok fognak kormeghatározásra kerülni, melyek növekedési zónásak, zárványmentesek és nem metamiktesedtek – így nem szakítják meg a zónáságot – ugyanakkor szövetükben reprezentálják a kérdéses korú geológiai folyamatokat (mafikus zárvány eredet, kálimetaszomatózis).

**3. táblázat** LA-ICP-MS mérésre alkalmas cirkonok (képek lásd függelék)

| <i>kőzettípusok<br/>morfológia</i>                    | mikroclin<br>megakristályos<br>granitoid                                                                                                                                                                                                                                                          | keverék közet                                                                                                                                                                   | mafikus zárvány                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| normál cirkon (S <sub>24</sub> ,<br>S <sub>25</sub> ) | <b>CL képek</b><br>0199_1_15,<br>0199_1_16,<br>0199_1_18,<br>0199_1_19,<br>0199_3_13,<br>0199_3_14,<br>0199_3_47,<br><b>BSE képek</b><br>1_54_013,<br>1_54_014,<br>1_54_016,<br>1_54_020,<br>2_54_043,<br>2_54_045,<br>2_54_052,<br>3_54_003,<br>3_54_018,<br>3_54_024,<br>3_54_026,<br>4_54_005, | <b>CL képek</b><br>0203_3_11,<br>0203_3_17,<br>0203_3_49,<br><b>BSE képek</b><br>1_158_026,<br>1_158_031,<br>2_158_015,<br>2_158_016,<br>2_158_018,<br>2_158_037,<br>3_158_028, | <b>CL képek</b><br>0204_1_16,<br>0204_2_01,<br>0204_2_26,<br>0204_2_49,<br>0204_3_58,<br>0204_3_60,<br><b>BSE képek</b><br>1_48_017,<br>1_48_019,<br>3_48_012,<br>3_48_014, |
| lapos prizmás<br>cirkon (AB <sub>5</sub> )            | <b>CL képek</b><br>0205_3_4,<br>0205_3_7,<br><b>BSE képek</b><br>1_54_005,<br>1_54_052,<br>4_54_005                                                                                                                                                                                               | <b>CL képek</b><br>0203_1_14,<br>0203_1_17,<br>0205_2_3,<br><b>BSE képek</b><br>1_158_036,<br>3_158_011,<br>4_158_014,<br>4_158_021                                             | <b>CL képek</b><br>0205_1_1,<br><b>BSE képek</b><br>2_48_074,                                                                                                               |
| nyúlt, prizmás<br>cirkonok (P <sub>5</sub> )          | <b>BSE kép</b><br>(2_54_022)                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>BSE képek</b><br>(1_158_022)                                                                                                                                                 | <b>BSE képek</b><br>(2_48_065)                                                                                                                                              |

## ***9. Cirkonokban megjelenő zárványok vizsgálata***

A mórágyi granitoidok cirkonjainak morfológiai és szöveti vizsgálata után a kormeghatározás mintaelőkészítésének legrészletesebb kidolgozásához a cirkonokban megjelenő zárványok mennyiségi és minőségi vizsgálata maradt hátra. Ugyanis a zárványvizsgálatok során lehetőség nyílik arra, hogy a granitoidokban végbement geológiai folyamatok eredményeként visszamaradt ásványok meg tudjanak őrződni a cirkonásványban zárva. Így reprezentálják azt a geokémiai környezetet, amely a cirkonban lévő ásványok képződésekor a magmában uralkodott.

A mórágyi granitoidokban lévő cirkonok zárványaiként elsősorban vasgazdag biotit, klorit (Mg-gazdag), albit, káliföldpát (kevés báriummal és bárium nélkül), kvarc, apatit, kalcit, epidot, galenit jelenik meg.

Amíg a cirkonok záródási hőmérsékletét 200°C körülre tették (a biotit záródási hőmérséklete 300°C), addig ezen ásványok (földpát, apatit, biotit) jelenléte cirkonban nem volt bizonyított. Ma már tudjuk, hogy a záródási hőmérséklet jóval magasabb is lehet, mint 200°C. A cirkon záródási hőmérsékletéről szóló munkák közül Dahl P.S. (1997) cikkét emelném ki, aki monacit mellett a cirkon záródási hőmérsékletéről is írt, és felső tartományát 900°C-ra határozta meg. Ennek oka lehet, hogy a cirkonok összetétele esetenként igen változatos is lehet, és minél nagyobb heterogenitást mutat, azaz minél több nyomelem épül be, annál magasabb lesz a záródási hőmérséklet. Így lehet az, hogy bár biotit, káliföldpát, apatit lehet zárványként cirkonban, mégsem módosítja az eredeti izotóparányokat.

A legutóbbi munka, mely cirkonokban előforduló biotit, földpát és apatit zárványokról részleteiben írt Jennings E.S. (2011) volt.

A továbbiakban a három közettípus cirkonjaiban előforduló zárványok típusait, és azok gyakoriságát, kémiai összetételét fogom bemutatni, egy-egy példával szemléltetve, végül pedig a kijött eredményeket korreláltatni egymással és a kőzetekben jelenlévő ásványok összetételbeli változásával.

A méréseim eredményeit három tényező módosította: Az egyik, hogy a mintáim szemcsepreparátumok voltak, így a minta vastagsága kb 1 cm, túl magasak voltak. A másik, hogy a minták arannyal lettek legőzölve, ami jelentősen torzította a Si csúcsot, végül a harmadik zavaró tényező, hogy a szemcsék esetenként igen bontottak voltak, így a kálium mennyiségét ez csökkentette.

## 9.1. A mikroklin megakristályos granitoidok cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX)

**Vizsgált minta:** szeparált mügyantába ágyazott cirkonszemcsék (150 db) + vékonycsiszolat (10 szemcse)

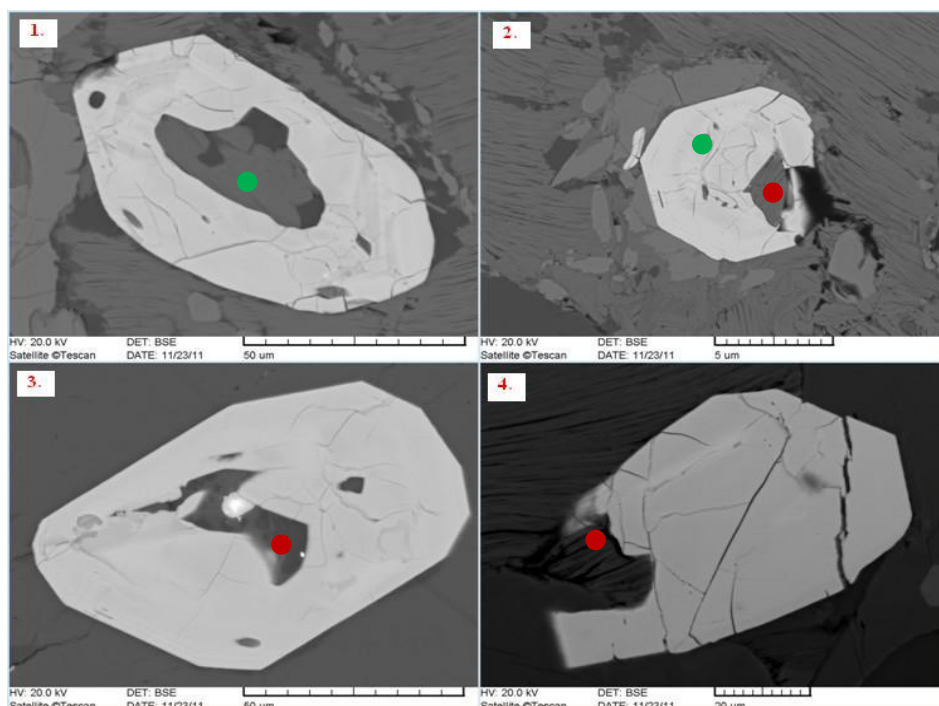
A mikroklin megakristályos granitoidokban megjelenő cirkonok zárványai között találunk biotit (vasban gazdagabb), káliföldpát, apatit, epidot, klorit (Mg-gazdag), kvarc, albit, galenit, tórit/uranotórit, titanit, ilmenit, pirit zárványokat (16.ábra).

Azon belül, hogy az ásványok változnak, összetételük is módosul. Az épen maradt biotitok (18.ábra) kissé vasban gazdagabbak ( $mg\# = 52 \pm 4$ ), míg a kloritok (eredetileg Mg-tartalmú biotit (Buda et al., 2004) inkább magnéziumosak, ( $mg\# = 61 \pm 4$ ). Látható, hogy a granitoidokban inkább több vas épül be a biotitokba, a magnézium helyett, azaz az alacsonyabb olvadáspontú vas dominál, ami jelzi, azt, hogy a granitoidok képződésekor alacsonyabb nyomás és hőmérsékleti viszonyok uralkodtak, mint a mafikus zárvány esetén.

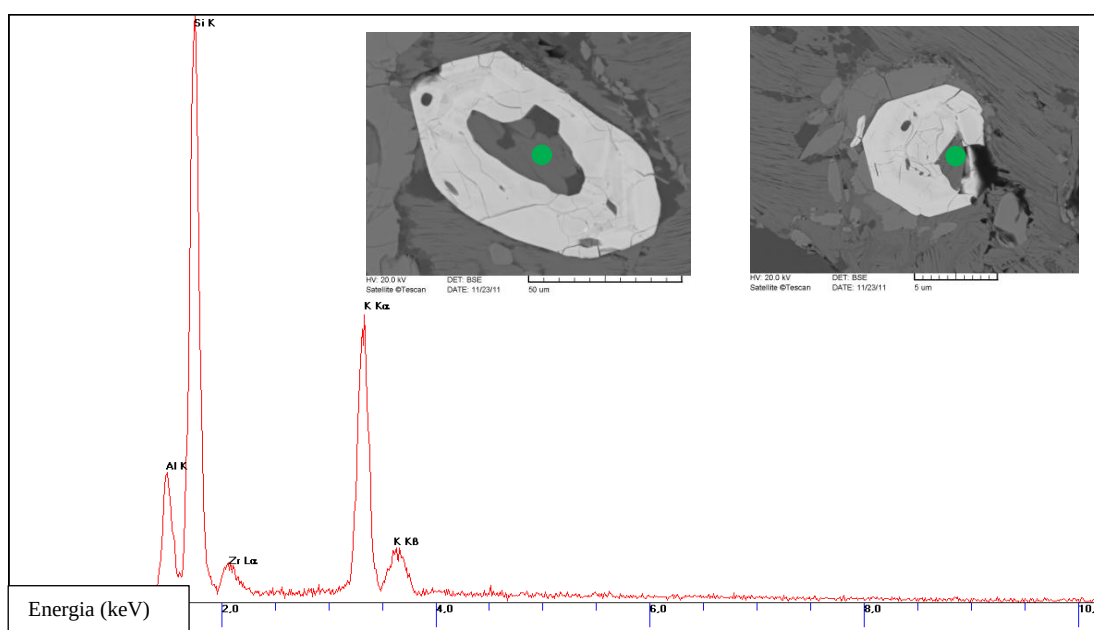
A földpátok közül cirkonzárványként előfordul albit, és káliföldpát (bárium nélkül) (17.ábra) akárcsak a közetben (Buda et al., 2004). Fontos még megjegyezni, hogy a zárványok előfordulása és a cirkonmorfológia között nagy különbség a nyúlt, prizmás cirkonok esetén mutatkozik, ott ugyanis nagyon kevés zárvány fordul elő cirkonokban, de ha mégis, akkor az főleg apatit, illetve kevesebb káliföldpát, kvarc (4.táblázat).

**4. táblázat** Mikroklin megakristályos granitoidban az eltérő morfológiájú cirkonokban megjelenő zárványtípusok gyakorisága (összes vizsgált: 151db ebből zárványos: 70db)  
(X jelzi a gyakoriságot)

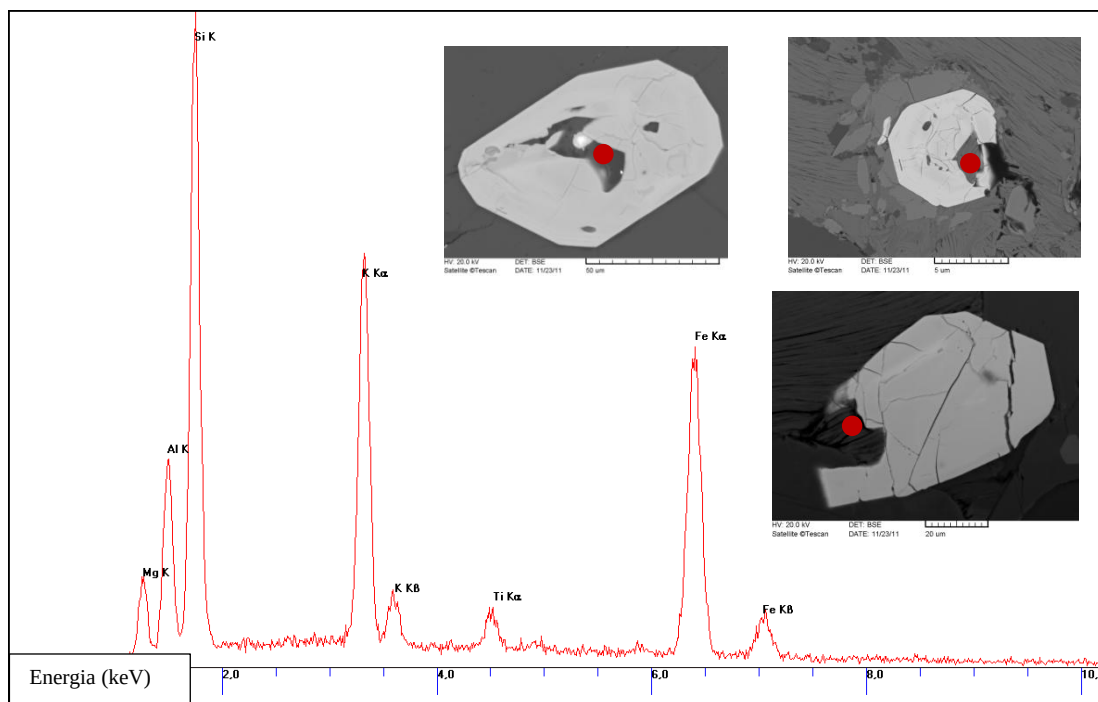
| zárványok                    | normál prizmás cirkon ( $S_{24}$ , $S_{25}$ ) | lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) | hosszú, nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) |
|------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| klorit ( $mg\# = 61 \pm 4$ ) | XXX                                           | XX                                | -                                        |
| biotit ( $mg\# = 52 \pm 4$ ) | XXX                                           | XX                                | -                                        |
| kvarc                        | XXX                                           | XX                                | X                                        |
| káliföldpát                  | XXX                                           | XX                                | X                                        |
| albit                        | XXX                                           | XX                                | -                                        |
| apatit                       | XX                                            | X                                 | XXX                                      |
| kalcit                       | XX                                            | XX                                | -                                        |
| tórit /uranotórit            | XX                                            | X                                 | -                                        |



**16.ábra** Zárványokat tartalmazó cirkonok mikroclin megakristályos granitoidban  
(káli-földpát zárvány ●, biotit zárvány ●)



**17.ábra** Mikroclin megakristályos granitoidban lévő cirkonok káli-földpát zárványainak  
spektruma (1., 2. cirkonban) ● a mérés helyei



**18.ábra** Mikroklin megakristályos granitoidban lévő cirkonok biotit zárványainak spektruma (2., 3., 4., cirkonban)●a mérés helyei

## 9.2. A hibrid kőzet cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX)

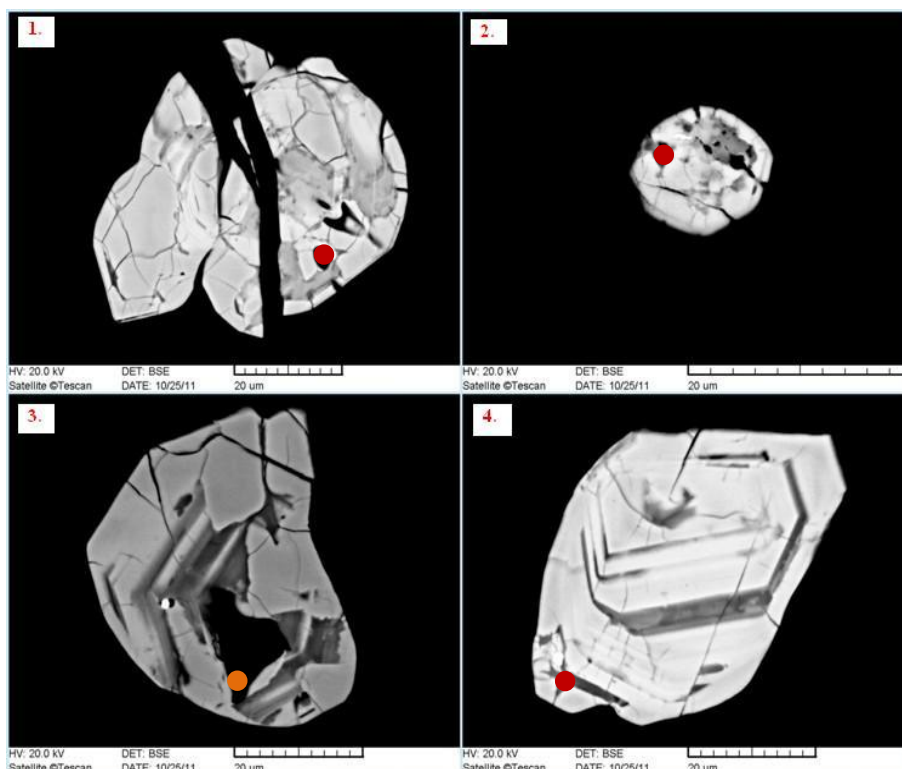
**Vizsgált minta:** szeparált, műgyantába ágyazott szemcsék (130db) + vékonycsiszolat (10 szemcse)

A hibrid kőzet cirkonjaiban megjelenő zárványok (19.ábra) elsősorban biotit ( $\text{mg\#} = 55 \pm 5$ ), klorit ( $\text{mg\#} = 66 \pm 3$ ), káliföldpát, kvarc, apatit, kalcit, albit (5.táblázat).

Ugyan nem sok különbség van a mikroklin megakristályos granitoid és a hibrid kőzet cirkonjainak zárványtípusai között, de megfigyeléseim szerint itt egyáltalán nincs tórit/uranotórit zárvány cirkonban és a  $\text{Mg/Fe}$  ( $\text{mg\#} = 66 \pm 3$ ) arány növekedést mutat a zárványként megjelenő kloritok (21.ábra) esetén. A biotitoknál a  $\text{Mg/Fe}$  arány még hasonló értékeket mutat ( $\text{mg\#} = 55 \pm 5$ ), mint a mikroklin megakristályos granitoid cirkonjaiban (20.ábra) Ki kell emelnem azt a különbséget is, hogy míg a granitoidban megjelenő nyúlt prizmás cirkonokban kevés zárvány található (főleg apatit), addig a hibrid kőzet esetén egyáltalán nem figyelhető meg zárvány ezen nyúlt prizmás morfológiát mutató cirkonokban.

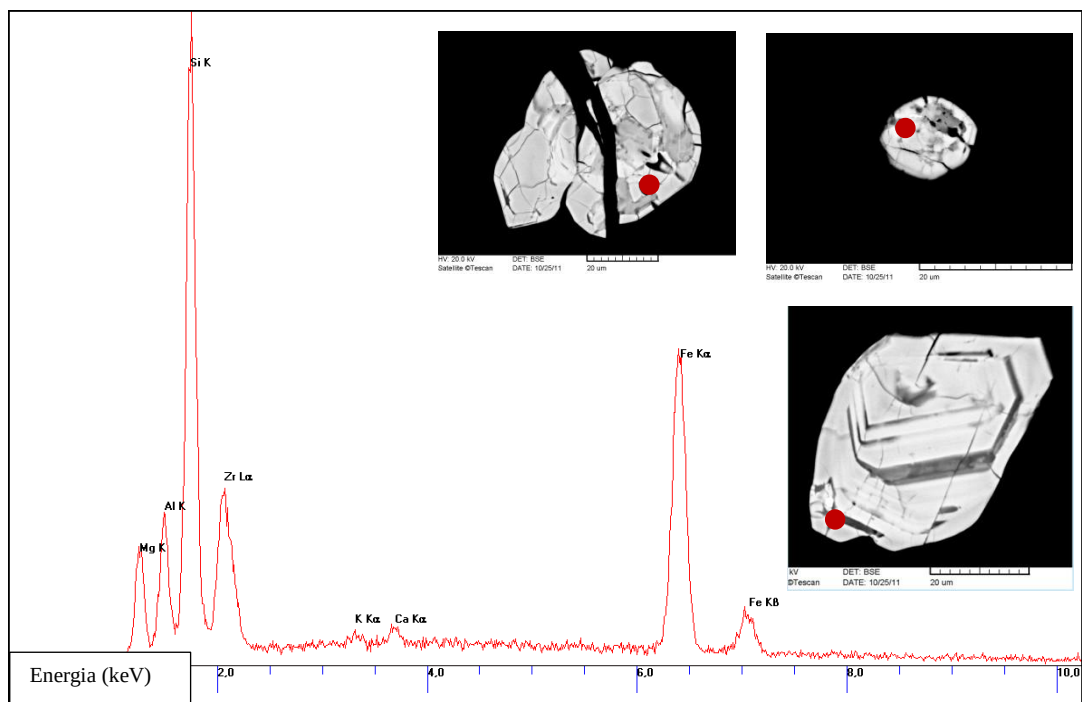
5. táblázat Az eltérő morfológiájú cirkonokban megjelenő zárványtípusok gyakorisága  
(összes vizsgált: 130, zárványos: 41)  
(X jelzi a gyakoriságot)

| zárványok                    | normál prizmás<br>cirkon ( $S_{24}$ , $S_{25}$ ) | lapos prizmás<br>cirkonok ( $AB_5$ ) | hosszú, nyúlt<br>prizmás cirkonok<br>( $P_5$ ) |
|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| klorit ( $mg\# = 66 \pm 3$ ) | XX                                               | X                                    | -                                              |
| biotit ( $mg\# = 55 \pm 5$ ) | XX                                               | X                                    | -                                              |
| kvarc                        | X                                                | XX                                   | -                                              |
| kálföldpát                   | XX                                               | X                                    | -                                              |
| albit                        | XX                                               | X                                    | -                                              |
| apatit                       | X                                                | XX                                   | -                                              |
| kalcit                       | X                                                | X                                    | -                                              |
| tórit/uranotórit             | -                                                | -                                    | -                                              |

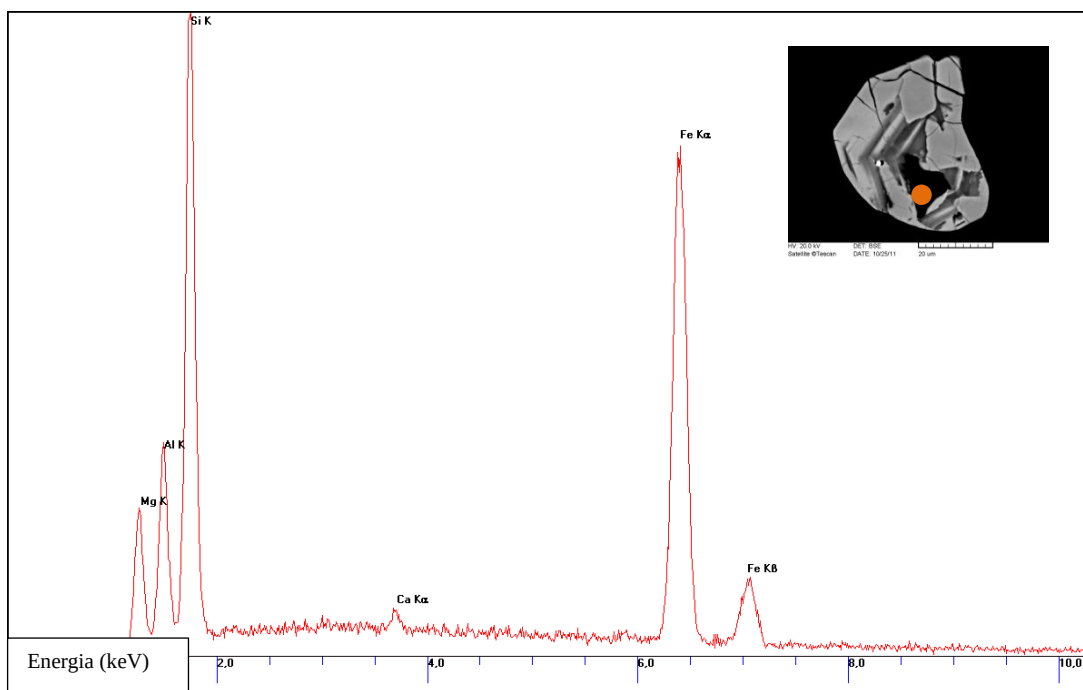


19. ábra Hibrid kőzetből származó zárványos cirkonok

biotit zárványok ●, kloritosodott biotit zárványok ●



**20.ábra** Hibrid kőzetekben előforduló cirkonok biotit zárványainak spektruma (1., 2., 3.. cirkonokban) ● mérés helvei



**21.ábra** Hibrid kőzetekben előforduló cirkonok kloritosodott biotit zárványainak spektruma (3. cirkonban) ● a mérés helyei

### 9.3. *A mafikus zárvány cirkonjaiban megjelenő zárványok (SEM-BSE, SEM-EDX)*

**Vizsgált minta:** szeparált műgyantába ágyazott cirkonok (123 db) + vékonycsiszolat (10 db)

A mafikus zárvány cirkonjaiban megfigyelhető zárványok (22.ábra) a biotit ( $\text{mg\#} = 53 \pm 4$ ), klorit ( $\text{mg\#} = 65 \pm 2$ ), káliföldpát (bárium, bárium nélkül), albit, kvarc, tórit/uranotórit (6.táblázat).

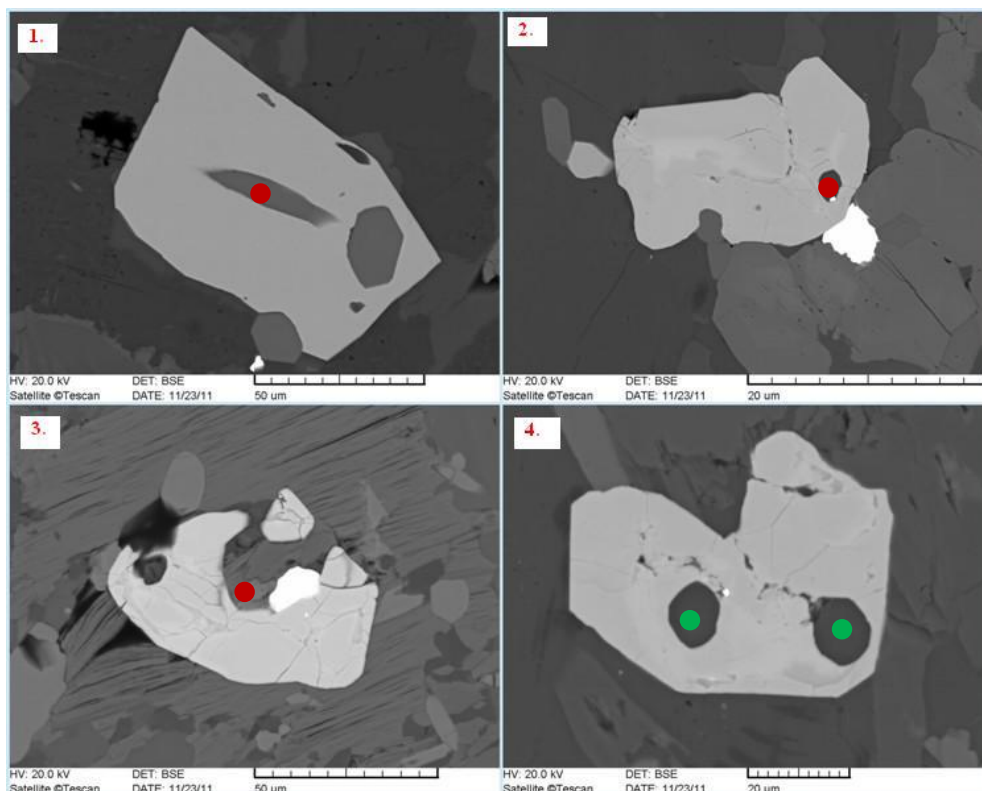
Az itt megjelenő zárványok típusai közül 5 jelentős különbséget emelnék ki a többi kőzet cirkonjainak zárványaihoz képest. Az egyik, hogy a mafikus zárvány cirkonjaiban megjelenő káliföldpát (24.ábra) zárványok mellékelemként báriumot tartalmaznak (csak spektrumon látszik, nem mérhető), itt feltűnik a Ba-tartalom, ami magas nyomás hőmérsékletet jelez (Smith J.V., Browns W.L., 1988) a mafikus zárvány keletkezésekor. A másik, hogy a biotitok (23.ábra) továbbra is kissé vasgazdagok ( $\text{mg\#} = 50,5 \pm 4$ ), de a Mg/Fe arány csökkenést mutat, a klorit viszont egyértelműen magnézium gazdagok ( $\text{mg\#} = 65 \pm 2$ ), mint a mikroklin megakristályos granitoidban és a hibrid kőzetben, és a Mg/Fe arányon csekély növekedés látható. A harmadik jelentős különbség, hogy a mafikus zárvány cirkonjaiban leggyakoribb a tórit/uranotórit zárványok mennyisége. A negyedik, hogy kalcit cirkonok zárványaként csak nyomokban fordul elő, és végül az ötödik, hogy a hosszú, nyúlt prizmás cirkonok esetén apatit mellett, káliföldpát, és kvarc is észlelhető.

**6.táblázat** Az eltérő morfológiájú cirkonokban megjelenő zárványtípusok gyakorisága

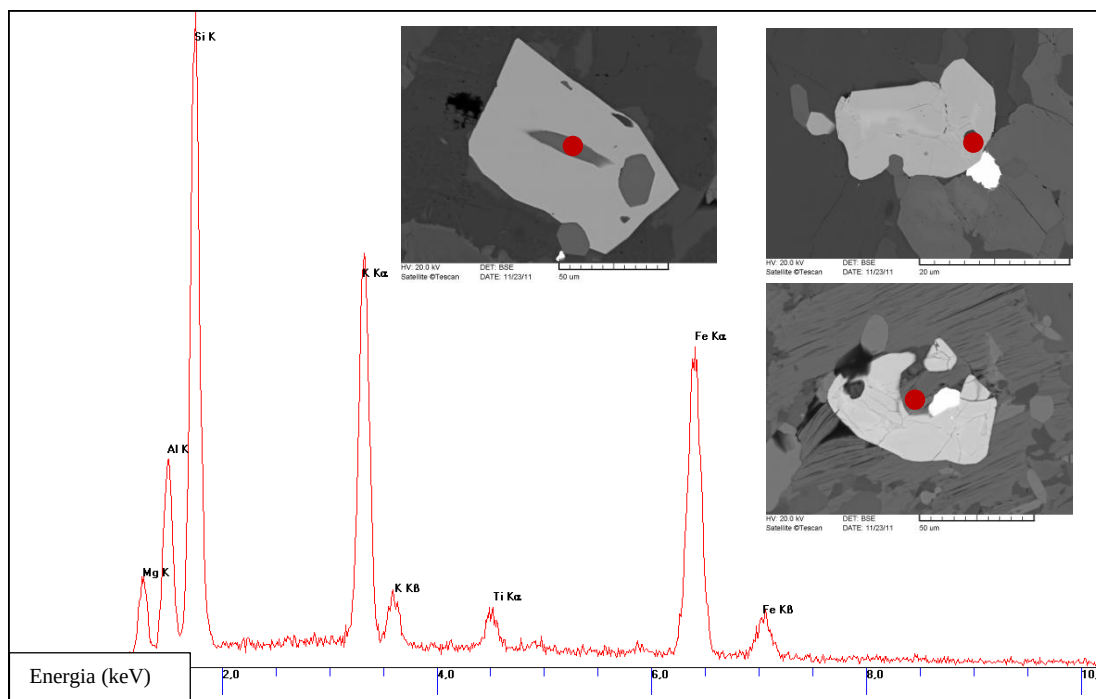
(összes vizsgált: 123, zárványos: 37)

(X jelzi a gyakoriságot)

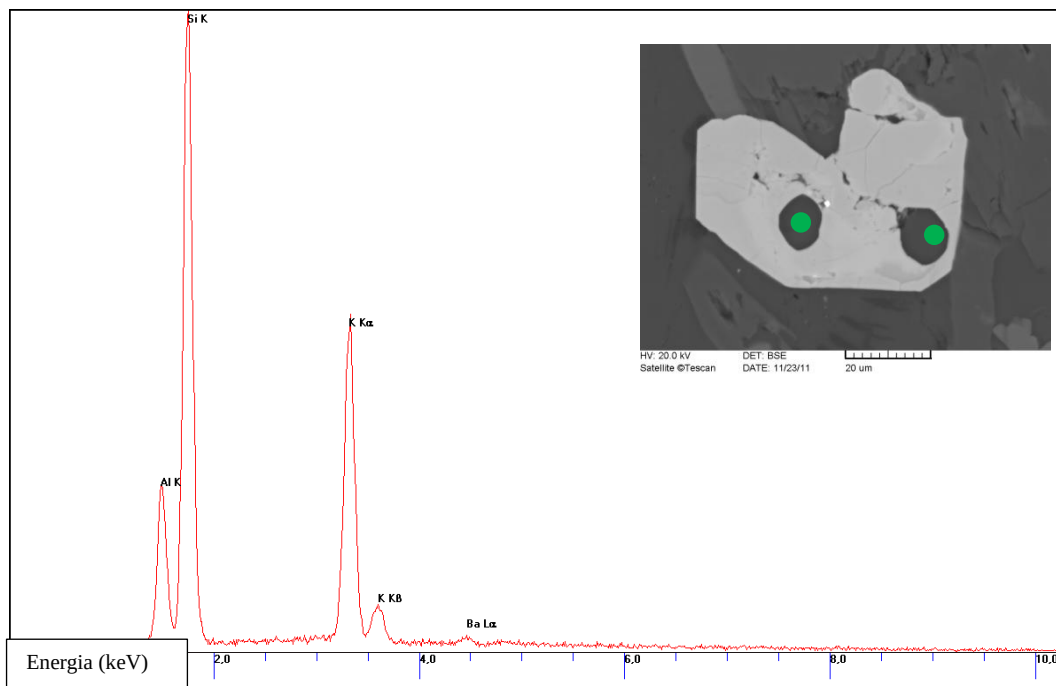
| <i>zárványok</i>                                    | <i>normál prizmás cirkon (<math>S_{24}</math>, <math>S_{25}</math>)</i> | <i>lapos prizmás cirkonok (<math>AB_5</math>)</i> | <i>hosszú, nyúlt prizmás cirkonok (<math>P_5</math>)</i> |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>klorit (<math>\text{mg\#} = 65 \pm 2</math>)</b> | XXX                                                                     | XX                                                | -                                                        |
| <b>biotit (<math>\text{mg\#} = 53 \pm 4</math>)</b> | XX                                                                      | X                                                 | -                                                        |
| <b>kvarc</b>                                        | XXX                                                                     | X                                                 | XX                                                       |
| <b>káliföldpát</b>                                  | XXX                                                                     | X                                                 | XX                                                       |
| <b>albit</b>                                        | XX                                                                      | X                                                 | -                                                        |
| <b>apatit</b>                                       | XXX                                                                     | X                                                 | XX                                                       |
| <b>kalcit</b>                                       | -                                                                       | -                                                 | X                                                        |
| <b>tórit/uranotórit</b>                             | XXX                                                                     | XX                                                | X                                                        |



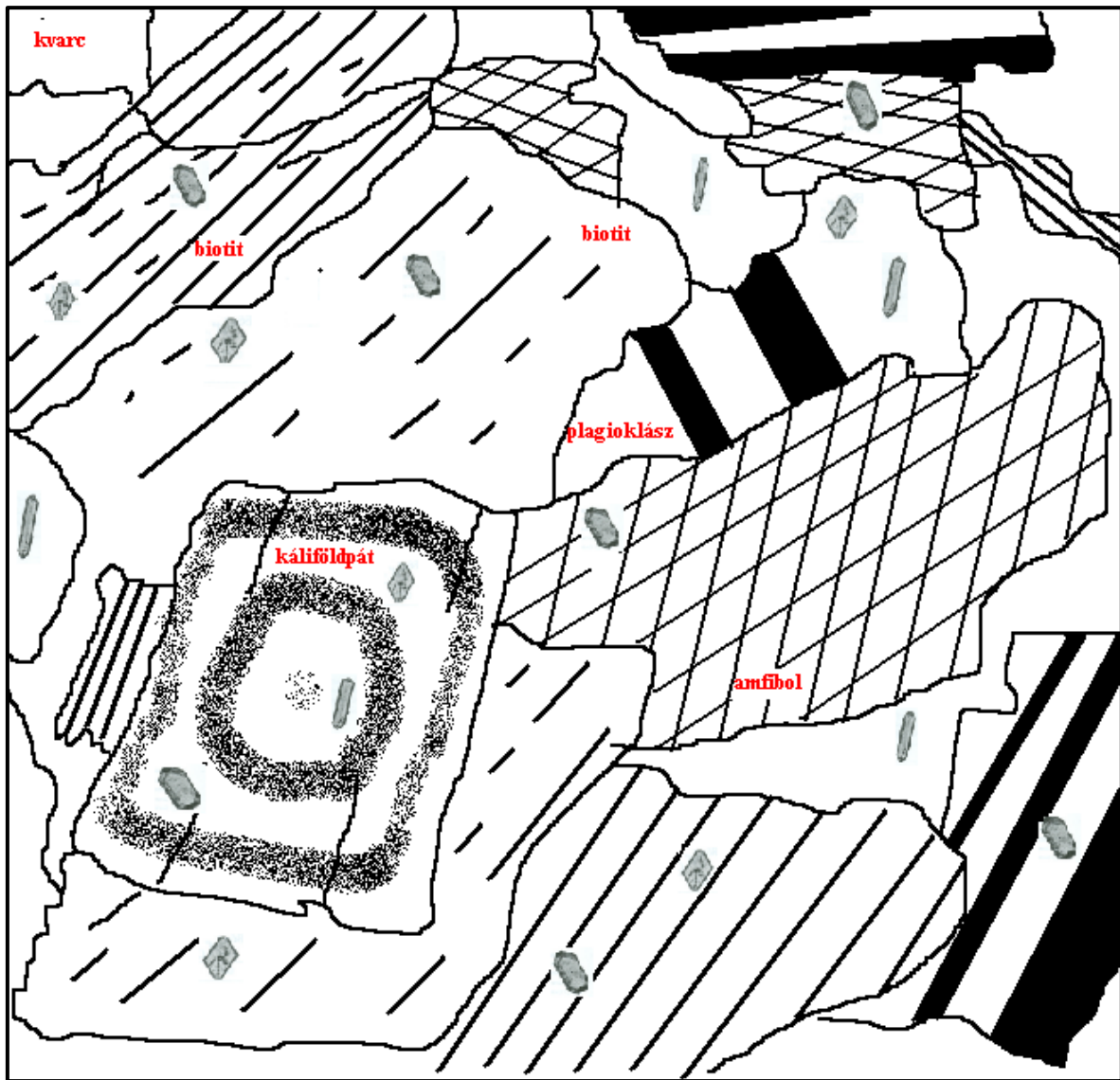
**22.ábra** Mafikus zárványban megjelenő zárványos cirkonok  
(biotit zárványok ● káliföldpát zárványok ●)



**23.ábra** Mafikus zárványban megjelenő cirkonok biotit zárványainak spektruma (1., 2., 3., cirkonban) ● mérés helyei



**24.ábra** Mafikus zárványban megjelenő cirkonok káliföldpát zárványainak spektruma  
(4.cirkonban) ● mérés helyei



25. **ábra** Mindhárom kőzetre (granitoid, hibrid kőzet, mafikus zárvány) jellemző, hogy a normál magmás prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) biotitban, amfibolban, földpátban, míg a lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) biotitban és kisebb mennyiségben földpátban és végül a nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) kvarcban és földpátban fordulnak elő. (kép nem méretarányos, hogy a cirkonok láthatóak legyenek) Az eltérés a bennük előforduló zárványok mennyiségében és minőségében mutatkozik, melyet részletesen az alább lévő 7. táblázat taglal.

**7.táblázat** Összesített táblázat a három kőzet eltérő morfológiájú cirkonjainak zárványtípusaiból.  
(Összes vizsgált cirkon a mikroklin megakristályos granitoidban (150 db), hibrid kőzetben (130 db), mafikus zárványban (123 db) (magyarázat: adott kőzetben adott morfológiából az összes vizsgált cirkon/zárványos cirkon/adott zárvány mennyisége, ami százalékos formában van megadva))

| <b>kőzettípusok</b>              | <b>mikroklin megakristályos granitoid (116/50)</b>                  | <b>hibrid kőzet (91/24)</b> | <b>mafikus zárvány (90/31)</b> | <b>mikroklin megakristályos granitoid (21/10)</b> | <b>hibrid kőzet (29/19)</b> | <b>mafikus zárvány (23/10)</b> | <b>mikroklin megakristályos granitoid (13/6)</b> | <b>hibrid kőzet (10)</b> | <b>mafikus zárvány (10/4)</b> |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>morfológia<br/>zárványok</b>  | <b>„normál” cirkonok (<math>S_{24}</math>, <math>S_{25}</math>)</b> |                             |                                | <b>lapos prizmás cirkonok (<math>AB_5</math>)</b> |                             |                                | <b>nyúlt prizmás cirkonok (<math>P_5</math>)</b> |                          |                               |
| <b>klorit (Mg-dús)</b>           | 20%                                                                 | 29%                         | 26%                            | 30%                                               | 16%                         | 40%                            | -                                                | -                        | -                             |
| <b>biotit (vasban gazdagabb)</b> | 16%                                                                 | 29%                         | 19%                            | 10%                                               | 19%                         | 40%                            | 33%                                              | -                        | -                             |
| <b>kvarc</b>                     | 32%                                                                 | 16%                         | 32%                            | 30%                                               | 37%                         | 60%                            | 83%                                              | -                        | 75%                           |
| <b>káliföldpát</b>               | 36%                                                                 | 29%                         | 32%                            | 20%                                               | 32%                         | 30%                            | 83%                                              | -                        | 75%                           |
| <b>albit</b>                     | 14%                                                                 | 16%                         | 16%                            | 20%                                               | 11%                         | 10%                            | -                                                | -                        | -                             |
| <b>apatit</b>                    | 44%                                                                 | 42%                         | 32%                            | 40%                                               | 42%                         | 60%                            | 83%                                              | -                        | 100%                          |
| <b>kalcit</b>                    | 10%                                                                 | 16%                         | -                              | 10%                                               | 16%                         | -                              | -                                                | -                        | 25%                           |
| <b>tórit/<br/>uranotórit</b>     | 16%                                                                 | -                           | 80%                            | 30%                                               | -                           | 80%                            | -                                                | -                        | 75%                           |

## 10. Következtetések levonása a három kőzettípus cirkonjaiban megjelenő zárványok vizsgálatából

A három kőzet (mikroklin megakristályos granitoid, hibrid kőzet, mafikus zárvány) eltérő morfológiájú cirkonjainak zárványvizsgálata során azonosságok és különbségek is mutatkoznak.

Azonosság, hogy a zárványtípusok biotit (vasban gazdagabb), klorit (Mg-gazdag), káliföldpát, albit, kvarc, apatit, kalcit ugyanúgy előfordul mindhárom kőzet cirkonjaiban

(7.táblázat). A mafikus zárványban a káliföldpátokban a bárium megjelenik, ez a nyomás és hőmérséklet növekedését jelzi. Mindemellett a három kőzet cirkonjaiban megjelenik az inkább Mg-gazdag klorit (mikroklin megakristályos granitoidban  $mg\# = 61 \pm 4$ , hibrid kőzetben  $mg\# = 66 \pm 3$ , mafikus zárványban  $mg\# = 65 \pm 2$ ), és biotit (vasban gazdagabb) (mikroklin megakristályos granitoidban  $mg\# = 54 \pm 4$ , hibrid kőzetben  $mg\# = 55 \pm 5$ , mafikus zárványban  $mg\# = 50,5 \pm 4$ ) is, de nem fordulnak elő ugyanazon cirkonban (8.táblázat).

**8.táblázat** Biotitok és kloritok összetétele a három kőzet cirkonjainak zárvényaiban (Az oktaéderes (összesen biotitnál 3 kloritnál 5) és a tetraéderes (összesen biotitnál 4 kloritnál 5) pozíciók betöltöttsége nem pontos, az Al, és  $Fe^{+3}$  mindkét pozícióba való beépülése miatt a biotitok és kloritok esetén.)

|                 | <i>Mikroklin megakristályos granitoid</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <i>Hibrid kőzet</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <i>Mafikus zárvány</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Biotitok</b> | $K_{0,75}(Mg_{2,03},Fe_{1,38})Al_{1,3}Si_{2,3}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,7}(Mg_{2,13},Fe_{1,58})Al_{1,22}Si_{2,07}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,83}(Mg_{1,94},Fe_{1,54})Al_{1,31}Si_{2,2}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,87}(Mg_{2,17},Fe_{1,55})Al_{1,17}Si_{2,12}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,63}(Mg_{2,17},Fe_{1,54})Al_{1,3}Si_2O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,9}(Mg_{1,93},Fe_{1,56})Al_{1,41}Si_{2,1}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,63}(Mg_{1,77},Fe_{1,84})Al_{1,46}Si_{1,93}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,98}(Mg_{1,77},Fe_{1,93})Al_{1,28}Si_{2,02}O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 52 \pm 4</math></b>                                                       | $K_{0,82}(Mg_{2,05},Fe_{1,53})Al_{1,43}Si_2O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,84}(Mg_{1,93},Fe_{1,66})Al_{1,33}Si_{2,08}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,82}(Mg_{1,87},Fe_{1,74})Al_{1,24}Si_{2,14}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,76}(Mg_{1,96},Fe_{1,38})Al_{1,56}Si_{2,1}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,78}(Mg_2,Fe_{1,5})Al_{1,4}Si_{2,1}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,8}(Mg_{1,58},Fe_{1,91})Al_{1,48}Si_{2,03}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,85}(Mg_{1,94},Fe_{1,6})Al_{1,32}Si_{2,14}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,74}(Mg_{2,25},Fe_{1,39})Al_{1,28}Si_{2,08}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,85}(Mg_2,Fe_{1,63})Al_{1,3}Si_{2,06}O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 55 \pm 5</math></b> | $K_{0,76}(Mg_{1,89},Fe_{1,82})Al_{1,04}Si_{2,25}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,8}(Mg_{0,76},Fe_{2,12})Al_{0,61}Si_{3,51}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,71}(Mg_{2,15},Fe_{1,69})Al_{0,99}Si_{2,17}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,92}(Mg_{2,2},Fe_{1,46})Al_{1,7}Si_{1,64}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,76}(Mg_{1,84},Fe_{1,56})Al_{1,72}Si_{1,88}O_{10}(OH)_2$<br>$K_{0,7}(Mg_{2,29},Fe_{1,62})Al_{1,09}Si_2O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 53 \pm 4</math></b> |
| <b>Kloritok</b> | $(Mg_{3,55},Fe_{2,69})Al_{1,35}Si_{2,4}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,58},Fe_{2,82})Al_{1,44}Si_{2,16}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_4,Fe_{2,25})Al_{1,47}Si_{2,29}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,48},Fe_{2,56})Al_{1,87}Si_{2,09}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{4,26},Fe_{1,96})Al_{1,5}Si_{2,28}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{4,11},Fe_{2,17})Al_{1,45}Si_{2,27}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{1,63},Fe_{3,8})Al_{2,16}Si_{2,41}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,8},Fe_{2,26})Al_{1,54}Si_{2,41}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{4,25},Fe_{1,98})Al_{1,43}Si_{2,34}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{4,01},Fe_{2,1})Al_{1,54}Si_{2,34}O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 61,2 \pm 4</math></b> | $(Mg_{3,26},Fe_{2,4})Al_{1,61}Si_{2,73}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{4,15},Fe_{1,82})Al_{2,33}Si_{0,7}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,38},Fe_{1,83})Al_{2,15}Si_{2,64}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,69},Fe_{1,71})Al_2Si_{2,6}O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 66 \pm 3</math></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $(Mg_{4,65},Fe_{1,52})Al_{1,42}Si_{2,41}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,64},Fe_{2,13})Al_{2,13}Si_{2,1}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,58},Fe_{2,07})Al_{1,63}Si_{2,72}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,88},Fe_{2,24})Al_{1,43}Si_{2,45}O_{10}(OH)_2$<br>$(Mg_{3,8},Fe_{2,3})Al_{1,55}Si_{2,35}O_{10}(OH)_2$<br><b><math>mg\# = 65,2 \pm 2</math></b>                                                                                                  |

Első jelentős különbség, hogy a zárványok a cirkonokban eltérő gyakorisággal fordulnak elő. Második a tórit/uranotórit zárványok előfordulásában mutatkozik, mert ezek, a mafikus zárvány cirkonjaiban dominálnak, a mikroklin megakristályos granitoidban előfordulnak, viszont a hibrid kőzetek cirkonjaiban nem találtam.

További különbség a cirkonok morfológiája és zárványtípusok megoszlása során mutatkozik. Az egyik, hogy a nyúlt prizmás cirkonok a mikroklin megakristályos granitoidban főleg apatit zárványokat tartalmaznak, mellette kisebb mennyiségben káliföldpátot, kvarcot, kloritot. Ugyanezen morfológiájú cirkonok a hibrid kőzetben már egyáltalán nem tartalmaznak zárványokat, míg a mafikus zárvány esetén ezen cirkonokban a káliföldpát, kvarc, apatit hasonló előfordulással jelentkezik.

Az egyes zárványként megőrződött ásványok mellé eltérő folyamatokat rendelhetünk. A kvarc, káliföldpát, albit egyértelműen alacsony hőmérsékletű (600-700 °C) maradék magmát (eutektikumot) jelez, mely mutatja, a három kőzet kialakulását követően a magma hűlése során bekövetkező frakcionációs folyamatot.

A másik folyamat (metaszomatózis, metamorfózis), melynek 300-600°C közötti tartományban kellett lennie - de azért alacsonyabb hőmérsékletű volt az előzőnél - eredményezte az ásványok pl.: a nagy mennyiségben megjelenő földpátok káliumban való dúsulását.

Végül az utólagos hidrotermás hatásokat kell kiemelnünk. Az itt megjelenő ásványok a galenit, kloritosodott biotit, kalcit, illetve a tórit/uranotórit.

A zárványok, melyek mind a három kőzettípusban megjelenő összes morfológiájú cirkon esetén előfordulnak a káliföldpát, kvarc, a kloritosodott biotit (Mg-gazdag), illetve az vasgazdag biotit. Ezen zárványvizsgálatok is jól mutatják, hogy a cirkonok kristályosodása, két szakaszban zajlott, ennek döntő bizonyítéka, hogy a biotitok (vasban gazdagabb, magnéziumban gazdagabb) kétféle kémiai összetétellel mutatkoznak a cirkonokba zárva, de soha nem fordulnak elő egy ugyanazon cirkonban egyszerre. Az egyik, mikor a három kőzettípus (mikroklin megakristályos granitoid, hibrid kőzet, mafikus zárvány) kialakult, ezt jelzi, mind cirkonzárványként, mind pedig kőzetalkotó ásványként jelenlévő magnéziumos biotit, mely helyenként kloritosodott (kőzetben a tektonika által szabott repedéseken keresztül, cirkonokban a metamiktisedés során keletkezett repedéseken át). A másik cirkonkristályosodás a magma hűlése során bekövetkező frakcionációs folyamatokhoz kötődően valósult meg, melyet jeleznek a cirkonba zárt vasgazdag biotit zárványok (ilyen domináns Fe-tartalommal ( $\text{mg\#} = 38,2 \pm 2$ ) csak cirkonzárványként fordulnak elő).

Vizsgálataim során elmondható, hogy amennyiben a cirkonok esetén előforduló két generáció biztos megvan, mely egyértelműen nem morfológiához kötött, akkor a pontos kor megadásával nem csak a három közet kialakulásának kora adható meg, hanem az is, hogy a frakcionációs folyamat meddig tartott.

**Összefoglaló táblázat (9.táblázat)**

|                                                                         | <b>mafikus zárvány</b><br>(melamonzonit,<br>melaszienit)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>keverék közet</b><br>(kvarcszienit)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>mikrokin<br/>megakristályos<br/>granitoid</b><br>(monzonit, kvarc<br>monzonit)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipológia<br/>(cirkon<br/>habitusa<br/>szerinti<br/>osztályozás)</b> | összesen <b>127</b> db<br>(vékonycsiszolatban)<br>cirkonok mérete főleg<br>50 µm<br><b>normál</b> (S <sub>24</sub> , S <sub>25</sub> )<br>(95db→75%),<br><b>lapos prizmás</b><br>(AB <sub>5</sub> )(29db→23%),<br>nyúlt, prizmás (P <sub>5</sub> )<br>(3db→2%)<br>(összesen 123 db<br>szemcsepreparátumban)<br>cirkon (100 µm)                                                                                         | összesen <b>131</b> db<br>(vékonycsiszolatban)<br>cirkonok mérete 50-100 µm<br><b>normál</b> (S <sub>24</sub> ,<br>S <sub>25</sub> )(95db→73%) ,<br><b>lapos prizmás</b><br>(AB <sub>5</sub> )(34db→26%),<br>nyúlt, prizmás (P <sub>5</sub> )<br>(2db→2%)<br>(összesen 137 db<br>szemcsepreparátumban)<br>cirkon (100-150 µm)                                                               | összesen <b>124</b> db<br>(vékonycsiszolatban)<br>cirkonok mérete többsége<br>eléri a 100-150µm-t<br><b>normál</b> (S <sub>24</sub> ,<br>S <sub>25</sub> )(85db→67%),<br><b>lapos prizmás</b> (AB <sub>5</sub> )<br>(35db→28%),<br>nyúlt, prizmás (P <sub>5</sub> )<br>(4db→3%)<br>(összesen 150 db<br>szemcsepreparátumban)<br>cirkon (150 µm)                                   |
| <b>cirkont bezáró<br/>közettalkotó<br/>ásványok</b>                     | <b>normál</b> Mg-biotitban,<br>földpátban, kvarcban,<br>hornblendében; <b>lapos<br/>prizmás</b> Mg-biotitban,<br>földpátban (csak néhány),<br><b>nyúlt prizmás</b> földpátban,<br>kvarc                                                                                                                                                                                                                                | <b>normál</b> Mg-biotitban,<br>földpátban, kvarcban,<br>hornblendében; <b>lapos<br/>prizmás</b> biotitban,<br>földpátban (kevés), <b>nyúlt,<br/>prizmás</b> földpátban, kvarc                                                                                                                                                                                                               | <b>normál</b> Mg-biotitban,<br>földpátban, kvarcban,<br>hornblendében; <b>lapos<br/>prizmás</b> biotitban (kevés<br>földpátban is) ; <b>nyúlt,<br/>prizmás</b> földpátban, kvarc                                                                                                                                                                                                  |
| <b>cirkonokban<br/>megfigyelhető<br/>másodlagos<br/>hatások</b>         | nagyon sok metamiktesedett<br>cirkon (mag), a szegélyek<br>töredezték (kisebb<br>cirkonokban kevesebb a<br>repedés)<br><b>normál (magban és a<br/>szegélyen is sok a repedés )</b><br><b>lapos prizmás (szegély<br/>repedezett csak)</b><br><b>nyúlt, prizmás (van<br/>repedés)</b><br>A metamiktesedés lezajlott a<br>cirkon továbbnövekedése<br>után és előtt is (két<br>metamiktesedett rész között<br>van ép zóna) | kevesebb a repedés, nem<br>annyira metamiktesedtek a<br>cirkonok + néhány csatorna<br><b>normál (magban és a<br/>szegélyen is sok a<br/>repedés )</b><br><b>lapos prizmás (szegély<br/>repedezett csak)</b><br><b>nyúlt, prizmás (nincs<br/>repedés)</b><br>A metamiktesedés lezajlott a<br>cirkon továbbnövekedése<br>után és előtt is (két<br>metamiktesedett rész között<br>van ép zóna) | sok repedés,<br>metamiktesedett mag és<br>csatorna<br>(káli földpát, kvarc)<br><b>normál (magban és a<br/>szegélyen is sok a<br/>repedés)</b><br><b>lapos prizmás (szegély<br/>repedezett csak)</b><br><b>nyúlt, prizmás (van<br/>repedés)</b><br>A metamiktesedés lezajlott<br>a cirkon továbbnövekedése<br>után és előtt is (két<br>metamiktesedett rész<br>között van ép zóna) |
| <b>cirkon<br/>zárványok</b>                                             | kvarc, káli földpát,<br>tórit/uranotórit (nagyon sok)<br><b>normál, lapos prizmás</b><br>(szilikát 50%,<br>tórit/uranotórit 50%<br>egymás mellett)<br><b>nyúlt, prizmás (főleg</b>                                                                                                                                                                                                                                     | kvarc, káli földpát,<br>tórit/uranotórit<br>(legkevesebb)<br><b>nagyon kevés<br/>tórit/uranotórit (5 %)</b><br><b>zárvány és az is normál<br/>cirkonokban található. A</b>                                                                                                                                                                                                                  | kvarc, káli földpát,<br>tórit/uranotórit, apatit<br>(kevés)<br><b>normál (szilikát 80%,<br/>tórit/uranotórit 20%)</b><br><b>lapos prizmás (inkább<br/>szilikát zárvány)</b>                                                                                                                                                                                                       |

|                  |                                                                                                        |                                                                                                                                   |                                                                                         |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | kvarc, aptatit, káliföldpát)                                                                           | legtöbb zárvány normál és lapos prizmás cirkonokban található.<br>nyúlt, prizmás cirkonok egyáltalán nem tartalmaznak zárványokat | nyúlt, prizmás ( főleg kvarc, aptatit, káliföldpát)                                     |
| <b>Zónák</b>     | növekedési zónásság, kaotikus zónásság a metamiktesedett magban, konvolút zónásság (másodlagos szövet) | növekedési, kaotikus zónásság, metamiktes magban, szektor zónásság, konvolút zónásság (másodlagos szövet)                         | növekedési, kaotikus zónásság, metamiktes magban, konvolút zónásság (másodlagos szövet) |
| <b>Rezorpció</b> | nagyon erős + magban tórit zárványok („szivacsos” szövet magban)                                       | gyenge                                                                                                                            | erős + kevés tórit-zárvány („szivacsos” szövet magban)                                  |

## Összefoglalás

A dolgozat tárgya a mórággyi granitoidokban előforduló cirkonok morfológiai, szöveti és zárvány vizsgálatai, melyek nélkülözhetetlen elővizsgálatai az LA-ICP-MS-vel történő U-Pb, Th-Pb kormeghatározásnak. Célom az volt, hogy a mafikus zárvány eredetének és a kálimetaszomatózis korának meghatározásakor, már olyan cirkonokon végezzem az U-Pb, U-Th LA-ICP-MS-vel történő kormeghatározást, melyek épek, zónásak, ugyanakkor reprezentálják morfológiai és egyben szöveti tulajdonságaik alapján ezen folyamatokat.

Vizsgálataim során a Pupin-diagram szerint három cirkonmorfológiai típust különítettem el. Ezek mindhárom közettípusban (granitoid, keverék kőzet, mafikus zárvány) megegyeznek. Nevezetesen a lapos prizmás cirkonok (AB<sub>5</sub>) elsősorban (90%-ban) biotitban jelennek meg, míg a normál prizmás cirkonok (S<sub>24</sub>), (S<sub>25</sub>) biotitban, földpátban egyenlő arányban, kis mértékben amfibolokban is előfordulnak. A nyúlt prizmás cirkonok (P<sub>5</sub>) viszont csak földpátban és kvarcban jelennek meg (9.táblázat).

A szöveti vizsgálatokat katódlumineszcens (CL) és visszaszórt elektron képek (BSE) segítségével készítettem el. Azonosság, hogy mind a három kőzetben hasonló mennyiségű cirkon fordul elő, és a szöveti tulajdonságaik is nagyrészt (részleteiben van különbség) megegyeznek (növekedési, konvolút zónásság, kristályon belül xenokristályos mag), azonban van kivétel pl.: szektor zónásság. A ritka szektor zónásság - mely az intenzív lokális változások során alakulhat ki cirkonokban - csak a hibrid kőzet (két kőzet határán) cirkonjai esetén figyelhető meg.

A szövetek közül a konvolút zónásság, ami egy feltételezett kálimetaszomatózis eredménye lehet, amely során az eredeti zónásság felülíródott – de a morfológia

változatlan. Ez szintén mindhárom kőzet cirkonjainak szövetében jelentkezik, ez egyúttal azt is jelenti, hogy ez a fölülbélyegző folyamat a három kőzet kialakulása után következett be.

Ki kell emelnünk a közetszövetek közül a keverék kőzetét, ahol az ásványok, köztük a cirkonok is inkább xenomorfok. Ezenkívül a mafikus zárvány cirkonjaiban is akad xenomorf, ezek kisebbek és a metamiktesedés is erőteljesebben jelentkezik. Ez már a mafikus zárvány eredetére adhat választ, miszerint előfordulhat, hogy a granitoid és a mafikus zárvány között egy „in situ unmixing” folyamat játszódott le, ami azt jelenti, hogy a két kőzet képlékeny állapotban keveredett, aminek bizonyítéka, hogy a magma megszilárdulását követően az ásványok nem sajátalakokkal rendelkeznek.

A zárványvizsgálatok alapján a cirkonok kristályosodása valószínűleg két szakaszban zajlott. Erre utal, hogy a biotitok (magnéziumban gazdagabb, vasban szegényebb) két eltérő összetételbeli előfordulással mutatkoznak a cirkonokba zárva. Az egyik, mikor a három kőzettípus (mikroklin megakristályos granitoid, hibrid kőzet, mafikus zárvány) kialakult, ezt jelzi, mind cirkonzárványként, mind pedig kőzetalkotó ásványként jelenlévő magnézium gazdag biotit (magasabb olvadáspont), mely helyenként kloritosodott. A másik cirkonkristályosodás a magma hűlése során bekövetkező frakcionációs folyamatokhoz kötődően valósult meg, melyet jeleznek a cirkonba zárt vasgazdag biotit (alacsonyabb olvadáspont) zárványok, amelyek ilyen domináns Fe-tartalommal ( $\text{mg\#} = 38,2 \pm 2$ ) csak cirkonzárványként fordulnak elő.

Mint látható a legjobb szöveti elemzést a cirkonok esetében a CL, BSE képek és a részletes zárványelemzések adják, ezért ezek elengedhetetlen elővizsgálatai a továbbiakban tervezett izotóp kormeghatározásnak, melynél a koradatok nemcsak a kort, hanem ezzel együtt a pontosabb genetikát megadhatják.

## ***Irodalomjegyzék***

**Benisek A., Finger F. (1993):** Factors controlling the development of prism faces in granite zircons: A microprobe study. Contributions to Mineralogy and Petrology 114: 441-451

**Buda et al. (1988):** Összefoglaló jelentés az Üveghuta-22.,23.,24. sz. mélyfúrások granitoid kőzeteinek vizsgálatáról. ELTE, TTK, (MÁFI-részére) pp.10, fig.44.

**Buda Gy., Dobosi G. (2004):** Lamprophyre-derived high-K mafic enclaves in variscan granitoids from the Mecsek Mts. (South Hungary). Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abh. 180: 115-147.

**Dahl P.S. (1997):** A crystal-chemical basis for Pb retention and fission-track annealing systematics in U-bearing minerals, with implications for geochronology: Earth and Planetary Science Letters, v. 150: 277–290

**Damien G., J. Stephen D., Andreas K. (2010):** Zircon texture and chemical composition as a guide to magmatic processes and mixing in a granitic environment and coeval volcanic system. Contributions to Mineralogy and Petrology 159: 579-596

**Erdey-Grúz T., Fodorné Csányi P. (1974):** A magyar kémiai elnevezés és helyesírás szabályai, Akadémiai Kiadó, Budapest, 3.kötet

**Finger F., Steyrer H.P. (1988):** Granite-types in the Hohe-Tauern (Easterns Alpen, Austria) - some aspects on their correlation to Variscan plate tectonic processes. Acta Geodynamica et Geomaterialia 2: 75-87

**Fowler A., Prokoph A., Stern R., Dupuis C. (2002):** Organization of oscillatory zoning in zircon: Analysis, scaling, geochemistry, and model of a zircon from Kipawa, Quebec, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta 66: 311-328

**Hanchar J.M., Miller C.F. (1993):** Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. Chemical Geology 110: 1-13

**Hanchar J.M., Rudnick R.L. (1995):** Revealing hidden structures: the application of cathodoluminescence and backscattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths. *Lithos* 36: 289-303

**Holub F., Cocherie A., Rossi P. (1997):** Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of the thermal and tectonic events along the Moldanubian - Barradian boundary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences II A Earth Planet Sciences* 325: 19-26

**Jennings E.S., Marshall H.R., Hawkesworth C.J., Storey C.D. (2011):** Characterization of the magma from inclusions in zircon: Apatite and biotite work well, feldspar less so. *Geology*; 39: 863-866

**Király E., Koroknai B. (2004):** The magmatic and metamorphic evolution of the north-eastern part of the Mórág Block, Annual Report of the Geological Institute of Hungary, 299-310

**Klötzli U., Buda Gy., Skiöld T. (2004):** Zircon typology, geochronology and whole rock Sr-Nd isotope systematics of the Mecsek Mountain granitoids in the Tisia Terrane (Hungary). *Mineralogy and Petrology*, 81: 113-134.

**Köppel V., Sommerauer J. (1974):** Trace elements and the behaviour of the U-Pb system in inherited and newly formed zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 43: 71-82

**Krogh T.E., McNutt R.H., Davis G.L. (1982):** Two high precision U-Pb zircon ages for the Sudbury Nickel Irruptive. *Canadian Journal of Earth Sciences* 19: 723-728

**Paterson B.A., Rogers G., Stephens W.E. (1992a):** Evidence for inherited Sm-Nd isotopes in granitoid zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111:378-390

**Paterson B.A., Stephens W.E., Rogers G., Williams I.S., Hinton R.W., Herd D.A. (1992b):** The nature of zircon inheritance in two granite plutons. Transactions of the Royal Society Edinburgh: Earth Sciences 83: 459-471

**Pidgeon R.T. (1992):** Recrystallization of oscillatory zoned zircon: some geochronological and petrological implications. Contributions to Mineralogy and Petrology 110: 463-472

**Pidgeon R.T., Nemchin A.A., Hitchen G.J. (1998):** Internal structures of zircons from Archean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. Contributions to Mineralogy and Petrology 132: 288-299

**Pupin J.P., (1972):** Zircon and granite petrology. Contributions to Mineralogy and Petrology, 73: 207-220.

**Schaltegger U., Fanning C.M., Gunther D., Maurin J.C., Schulmann K., Gebauer D. (1999):** Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: Conventional and in situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence. Contributions to Mineralogy and Petrology 134: 186-201

**Smith J.V., Browns W.L. (1988):** Feldspar Minerals, 1. Crystal Structures, Physical, Chemical and Microtextural Properties, 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin

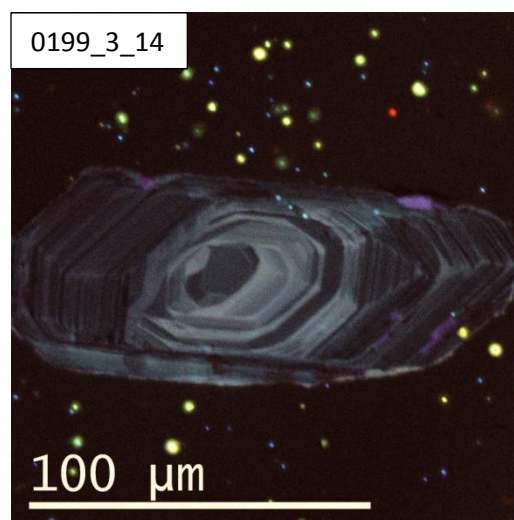
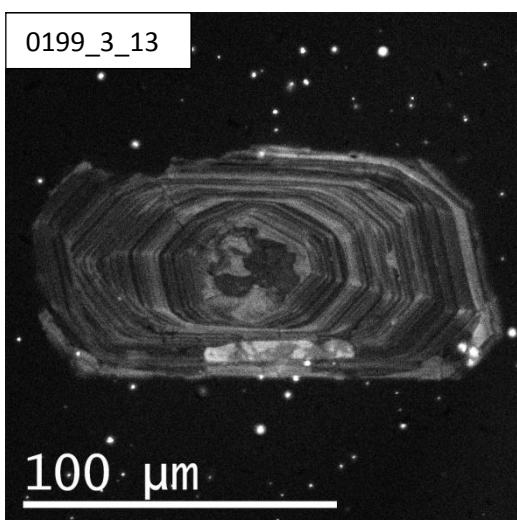
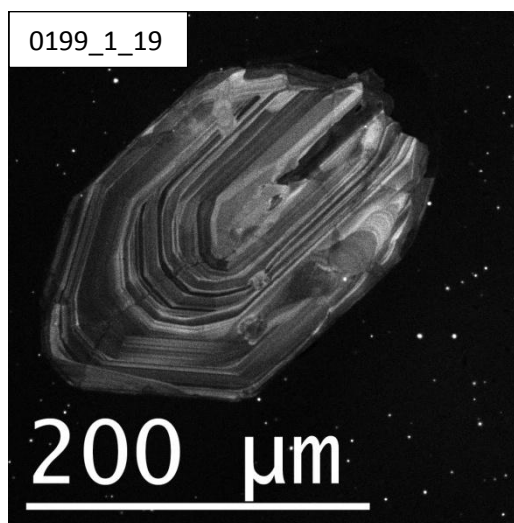
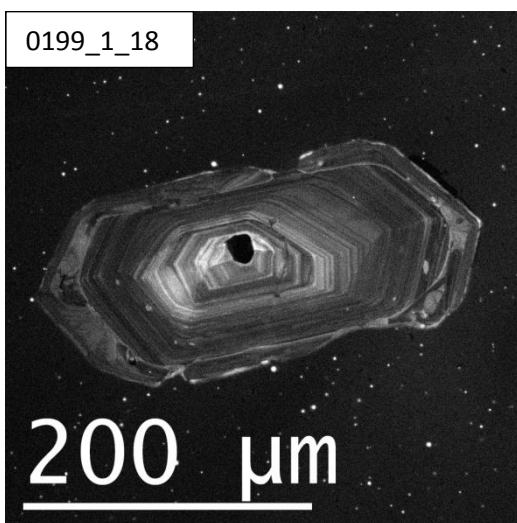
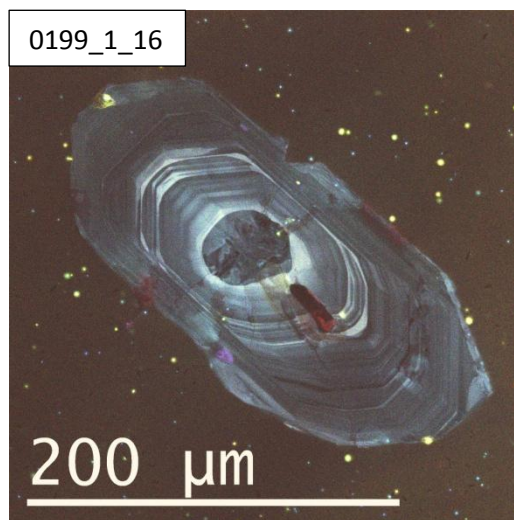
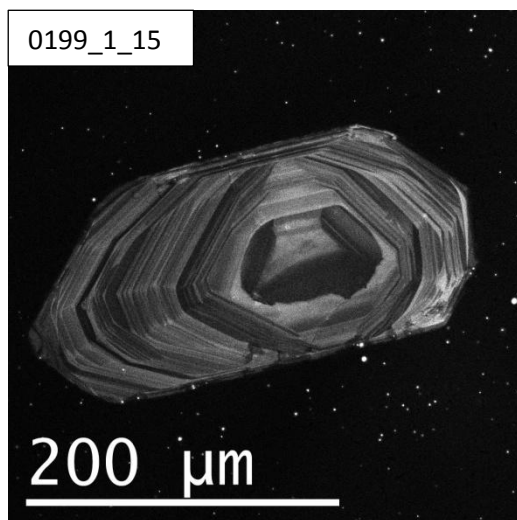
**Sztrókay K., (1967):** Ásványtan II., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2.kötet, 936

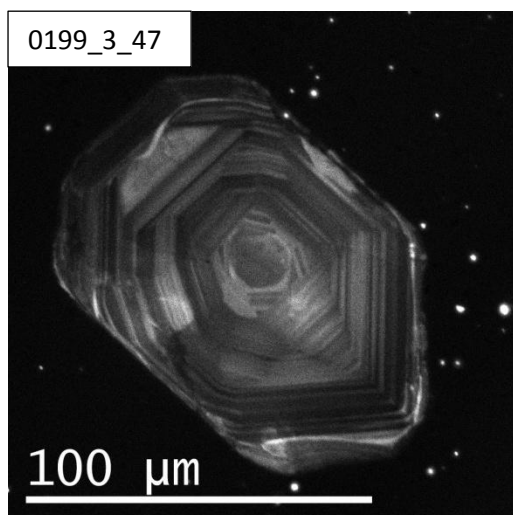
## *Függelék*

### *LA-ICP-MS vizsgálatra kiválasztott cirkonszemcsék*

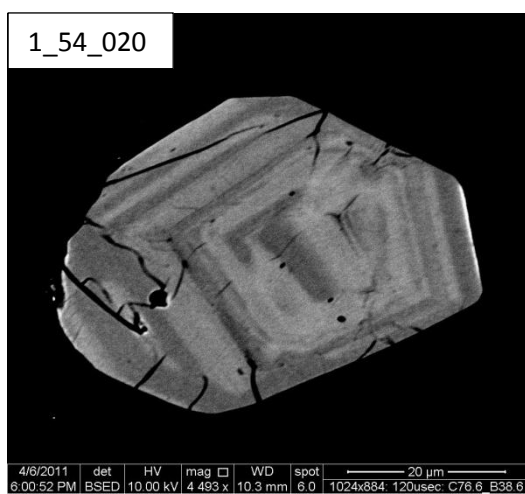
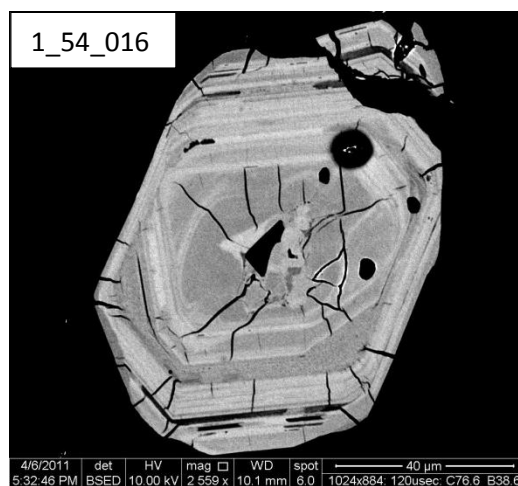
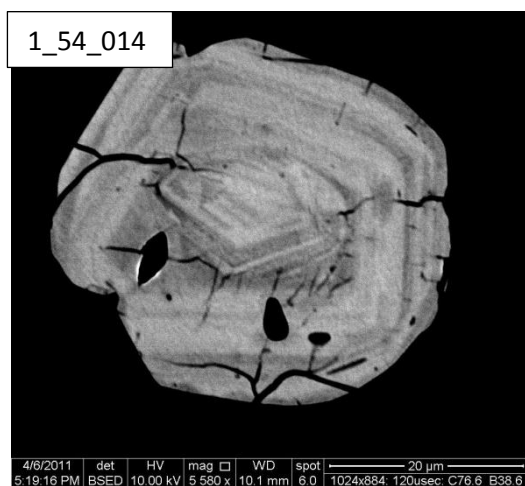
#### *Mikroclin megakirstályos granitoid*

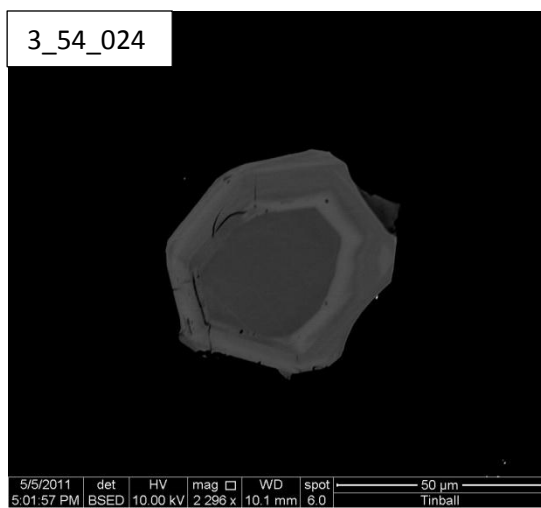
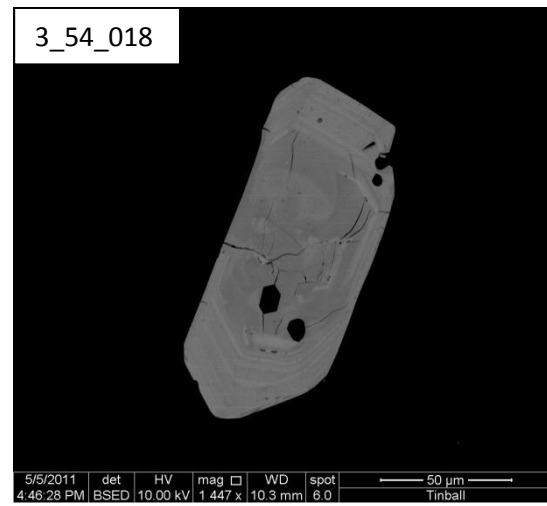
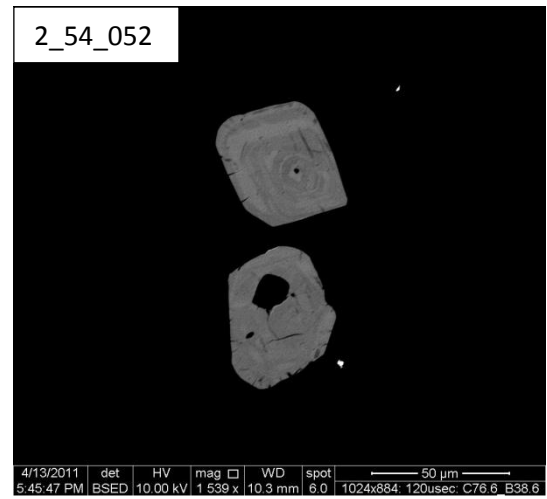
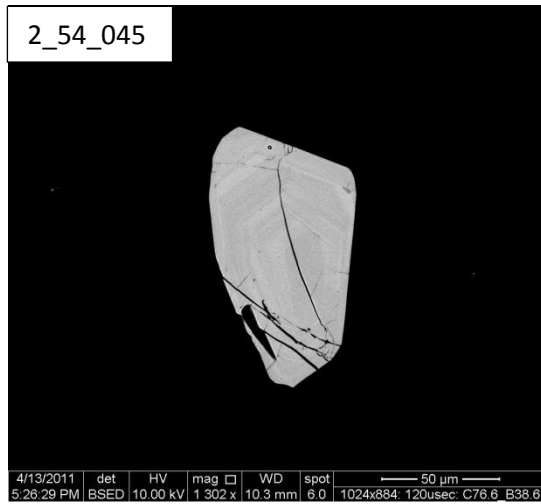
*Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (CL képek)*

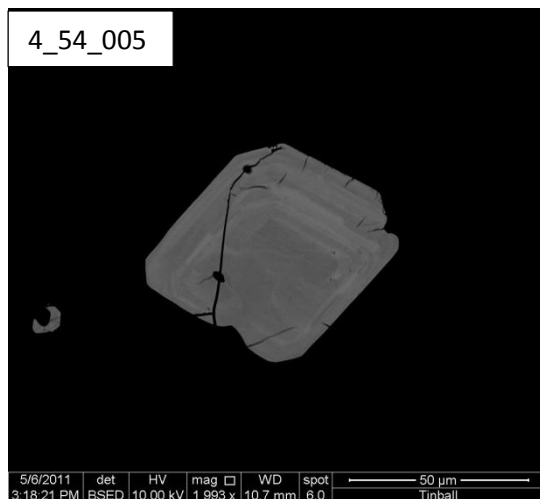




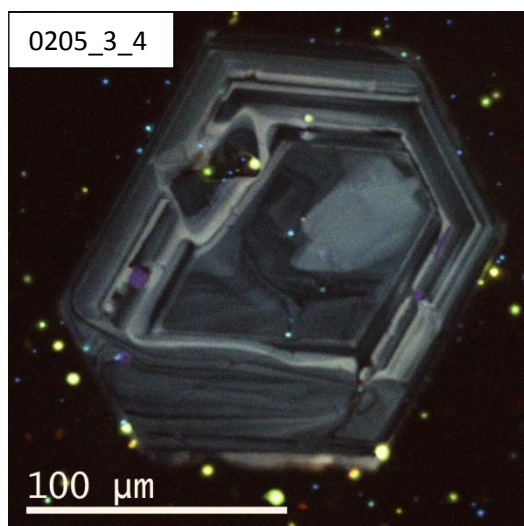
*Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (BSE képek)*



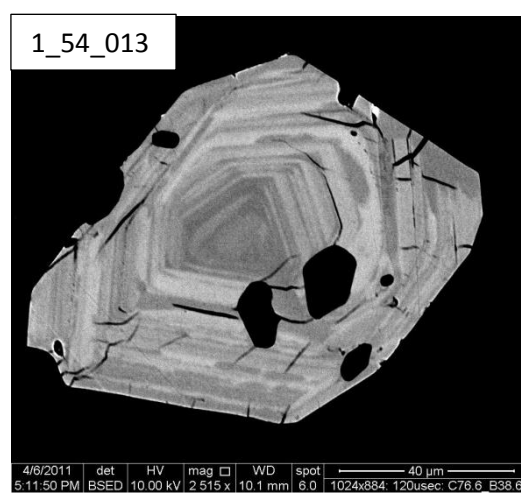
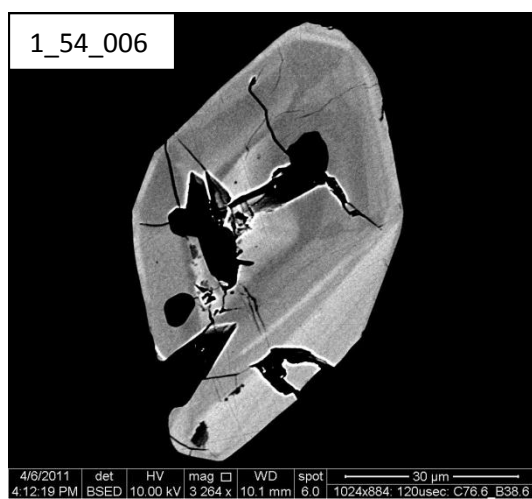


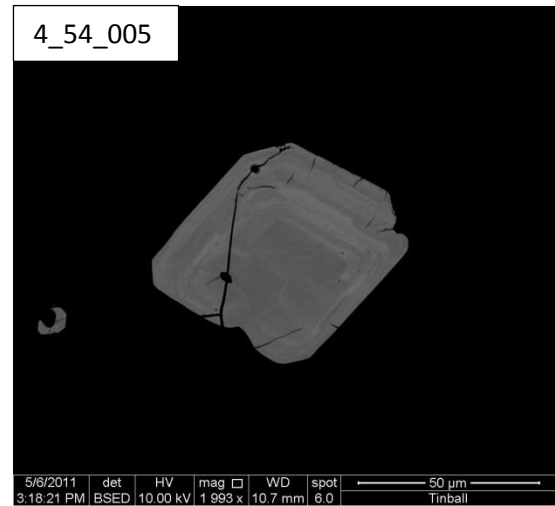
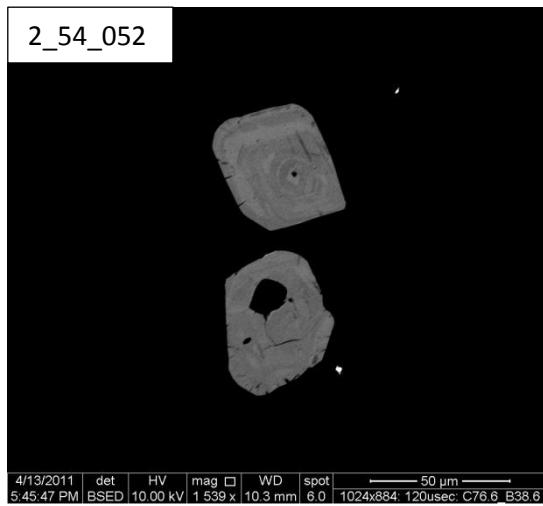


*Lapos prizmás cirkonok (AB<sub>5</sub>) (CL kép)*



*Lapos prizmás cirkonok (AB<sub>5</sub>) (BSE képek)*



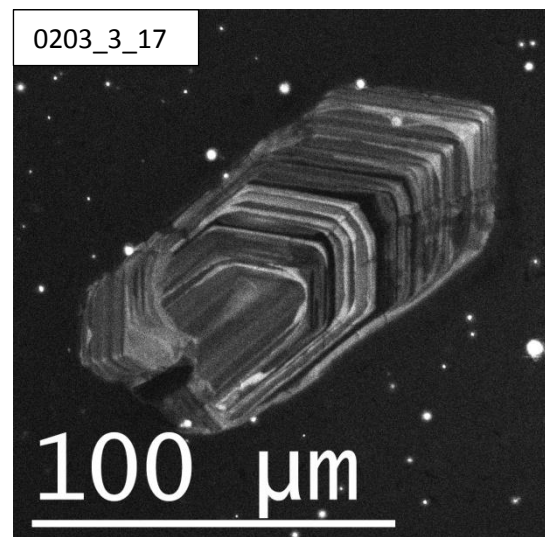
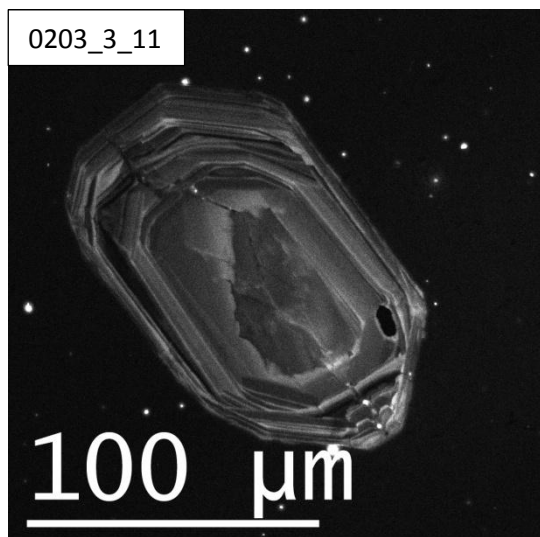


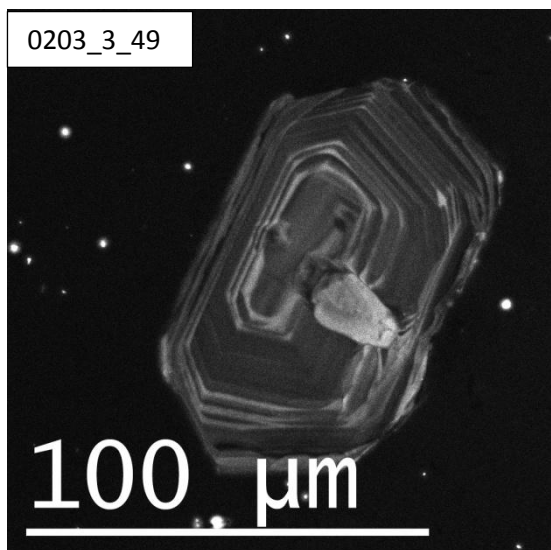
*Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) (BSE kép)*



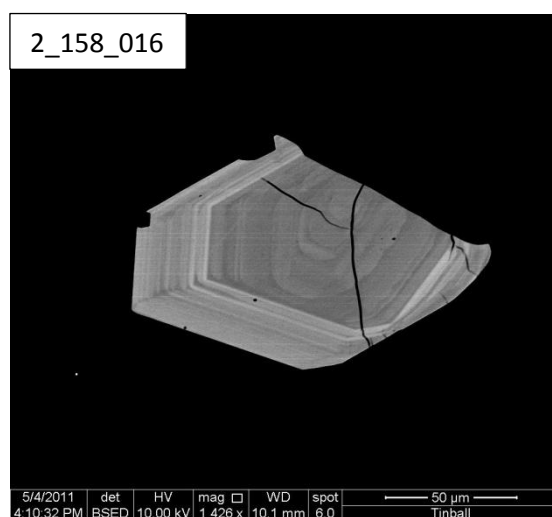
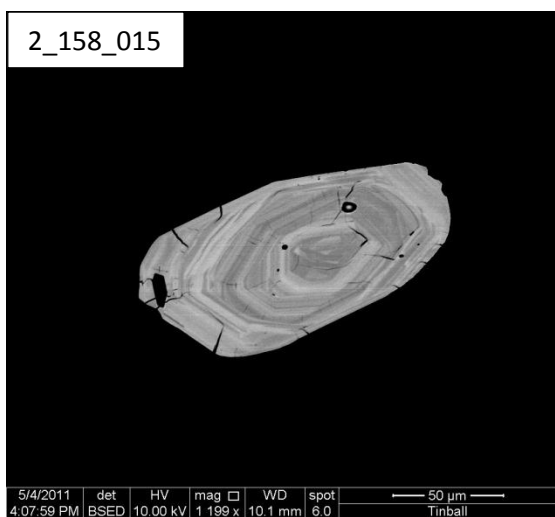
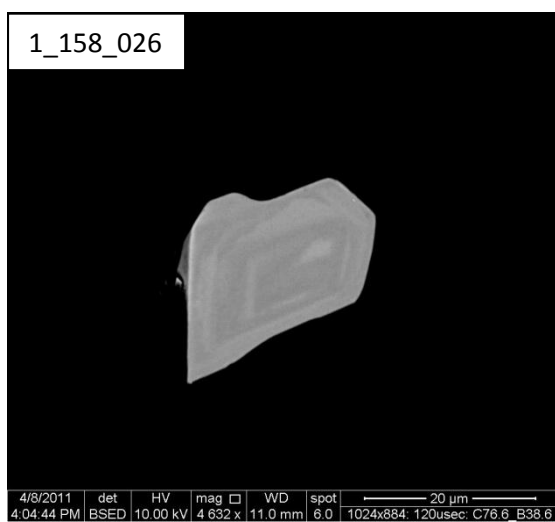
## ***Keverék kőzet***

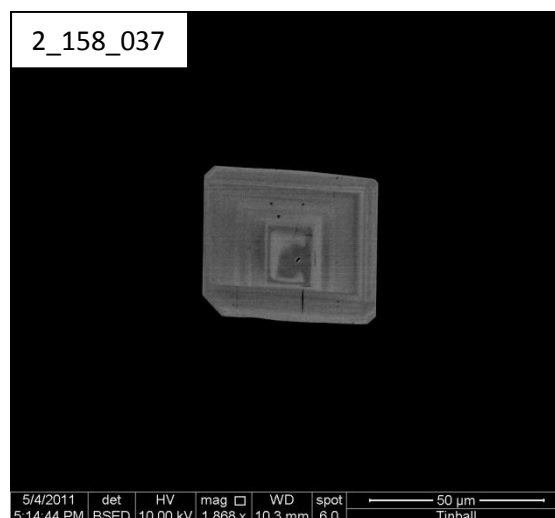
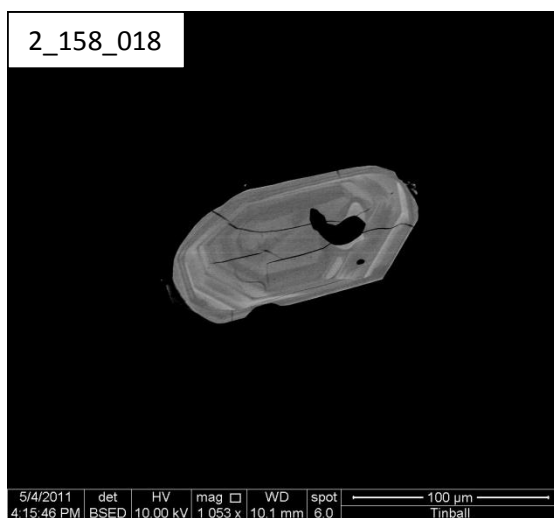
*Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (CL képek)*



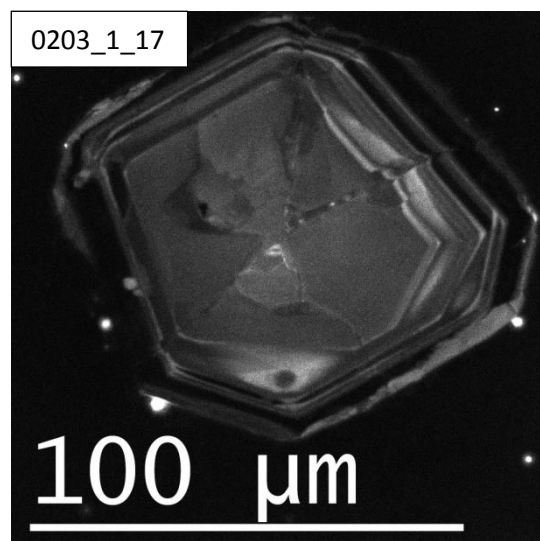
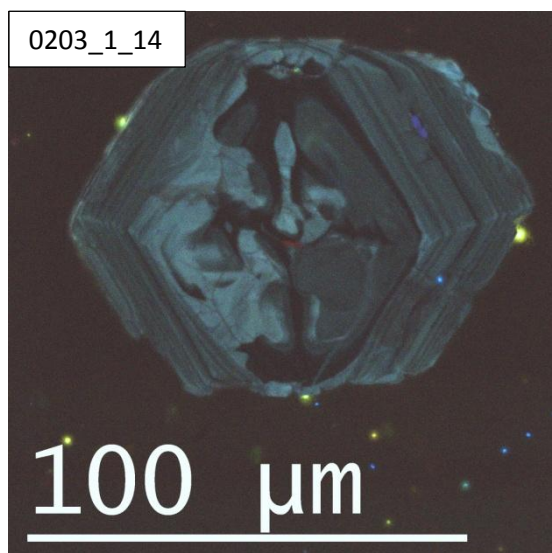


*Normál prizmás cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (BSE képek)*

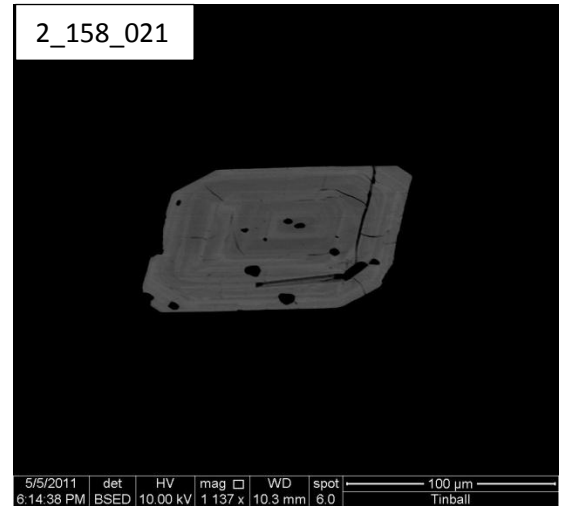
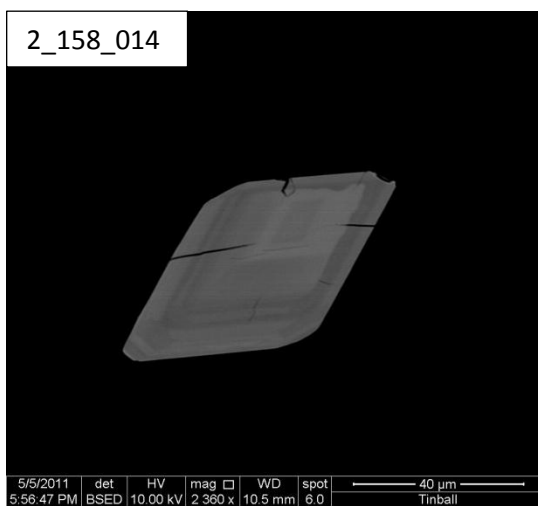
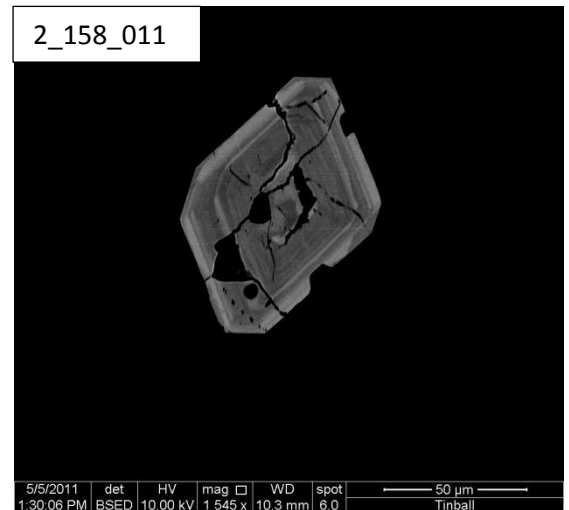
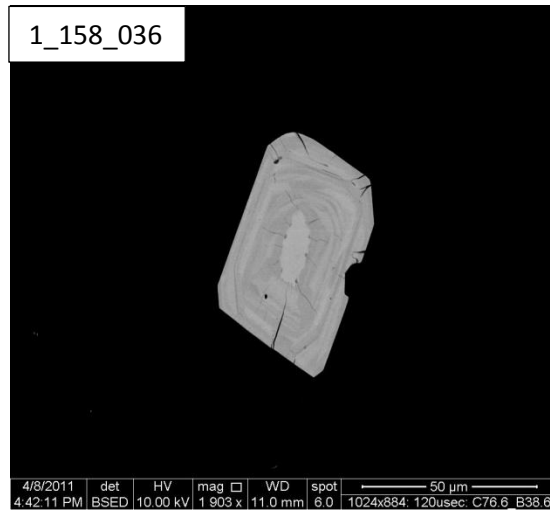




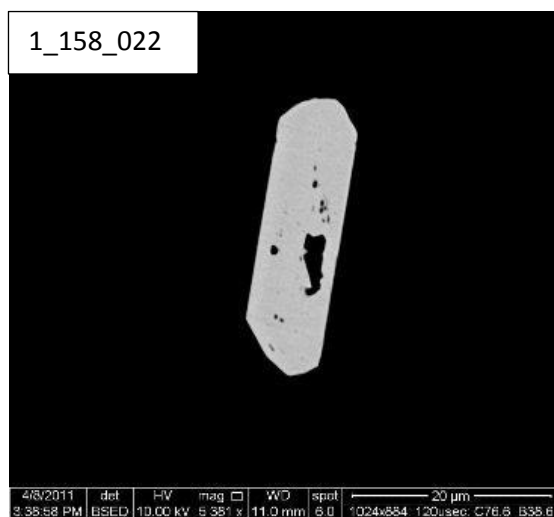
*Lapos prizmás cirkonok (AB<sub>5</sub>) (CL képek)*



*Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) (BSE képek)*

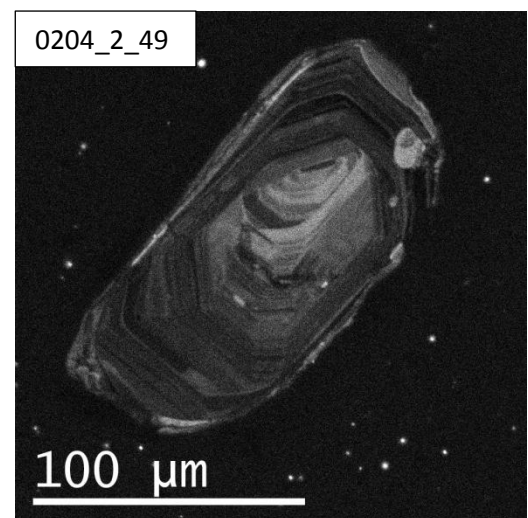
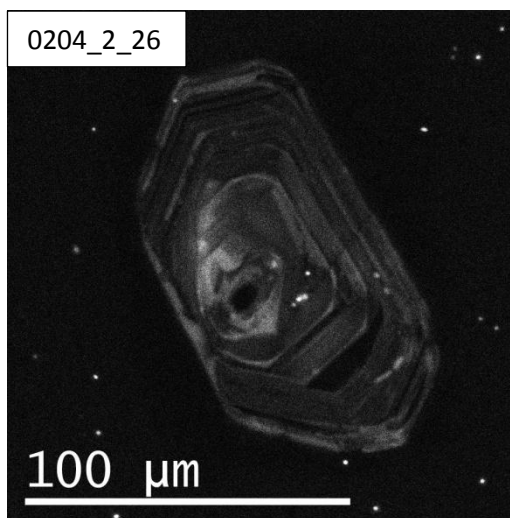
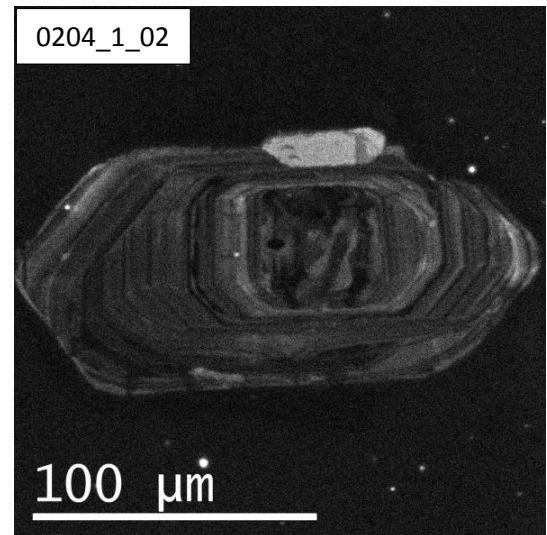
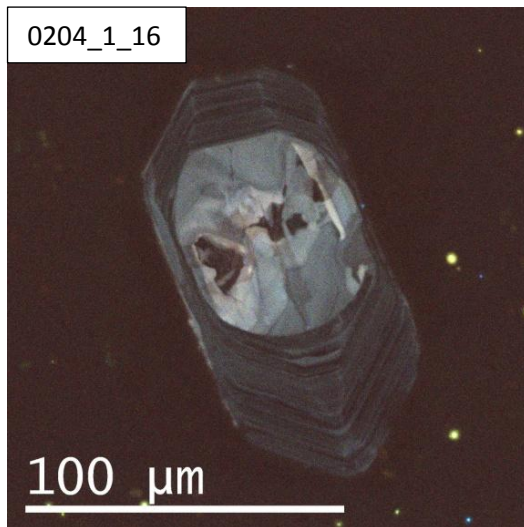


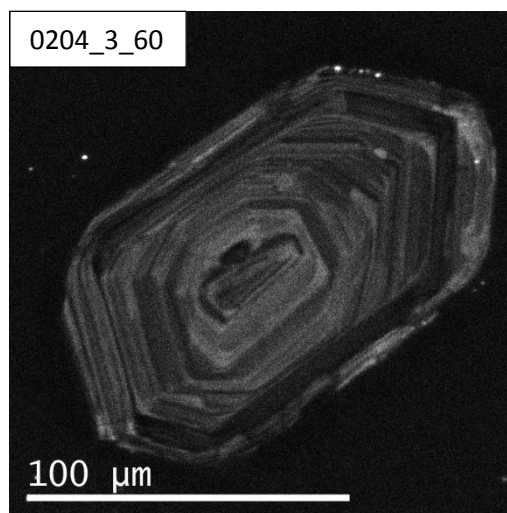
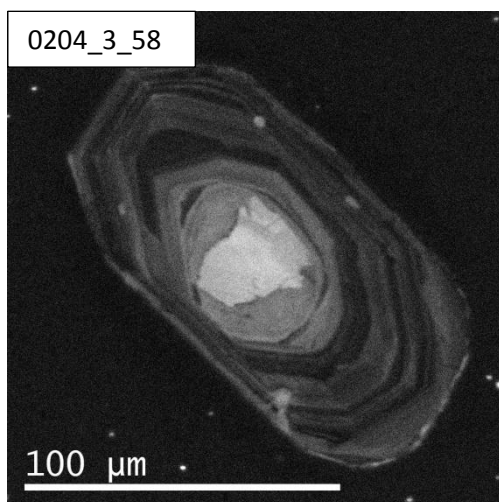
*Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) (BSE kép)*



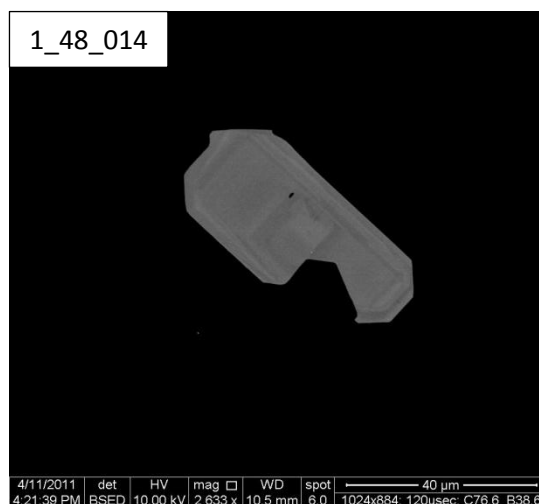
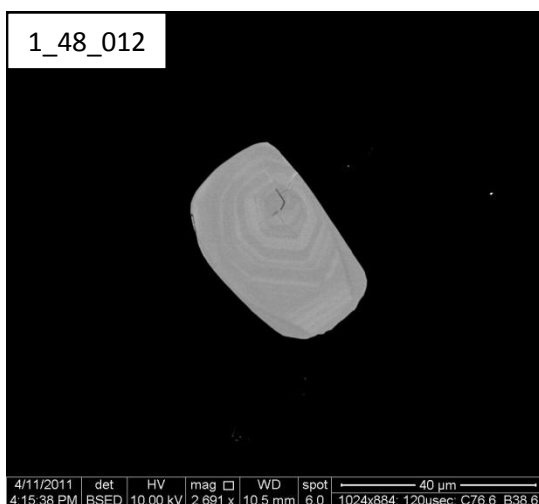
## ***Mafikus zárvány***

*Normál cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (CL képek)*

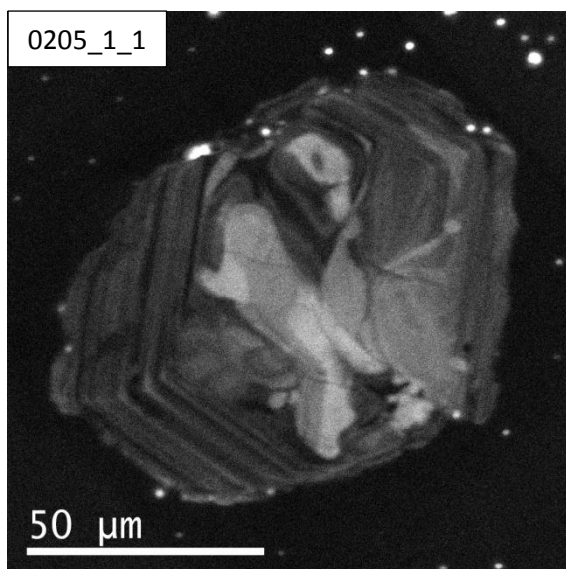




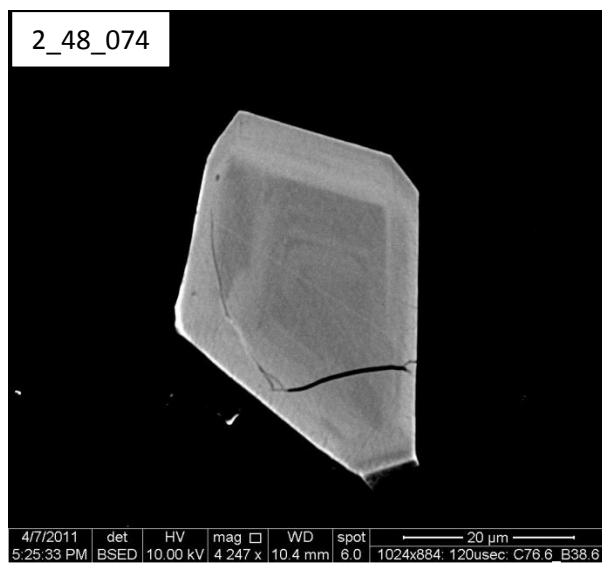
*Normál cirkonok ( $S_{24}$ ,  $S_{25}$ ) (BSE képek)*



*Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) (CL kép)*



*Lapos prizmás cirkonok ( $AB_5$ ) (BSE kép)*



*Nyúlt prizmás cirkonok ( $P_5$ ) (BSE képek)*

