

# Mikromineralógia

Oktatási segédanyag a **IV. éves geológushallgatók** geokémia gyakorlatán tartott **mikromineralógia kurzushoz**

**Szakmány György 2001.**

---

## Bevezetés

A mikromineralógia az üledékes kőzetekben előforduló, apró (általában 0,063-0,250 mm) ásványszemcsék vizsgálatával foglalkozó tudományág.

*A mikromineralógiai vizsgálatok elsődleges célja:* Ismeretek szerzése a lepusztulási területről, illetve annak változásáról térben és időben. További cél lehet a szállítás közbeni változások nyomonkövetése. Ugyanakkor azonban a feladattól függően egy adott minta vagy mintasorozat vizsgálatának számtalan más célja is lehet:

*Használhatóság:*

- **Lepusztulási - lehordási terület jellemzése**, azon történt változások kimutatása.  
A lepusztulási – felhalmozódási terület **nagytektonikai helyzetére** következtetés az ásványegyüttesekből illetve bizonyos ásványok összetételéből.
- **Környezetvédelmi, környezetgeokémiai** – bizonyos (toxikus) elemek milyen ásványfázishoz kötődhetnek, ennek kimutatása.
- **Gazdasági – hasznosítható ásványi nyersanyagok** kimutatása (pl. ónkő stb. torlatok, érctelepek kísérő ásványai [szulfidok, barit, gipsz stb.]).
- **Talajtani** – talajképző kőzetek illetve a talajokban végbemenő folyamatok minőségére következtetések.
- **Szállítási** illetve **diagenetikus folyamatok** viszonyai illetve ezek során történő változások.
- **Archeometriai** vonatkozások – pl. kerámiák vizsgálata, nyersanyagazonosítás (elsősorban soványítóanyag).
- **Bűnülködési** vonatkozások – pl. cipőn, ruhán felragadt talaj vagy laza kőzetmaradványok és a helyszínen előforduló talaj, üledék, laza kőzet összehasonlító mikromineralógiai vizsgálata.

**Nehézasvány zóna** – függőleges (vertikálisan) szelvény mentén vizsgálva az eltérő nehézasvány együttesek (pl. fúrás, szelvény)

**Nehézasvány társulás** (asszociáció) – vízszintesen, egy litológiai egységen belül eltérő nehézasványokat jelez (pl. partmenti és medence belsejei együttesek)

A mikromineralógiai vizsgálatok során elkülönítünk

- **allotigén** (a lepusztulási területről származó, behordott)
- **autigén** (az üledékképződés alatt és főleg a diagenézis során képződő, pl. pirit, glaukonit, barit, gipsz) és
- **epigén** (a közettéválás után képződött, pl. csillámok, színtelen turmalin, barit, gipsz, limonit stb.) elegyrészeket.

Megjegyzés: Az autigén és az epigén elegyrészek elkülönítése gyakran nem egyértelmű.

A mikromineralógiai vizsgálatok során a teljes anyag (nehéz- és könnyűásványok is; ld. később) vizsgálatát el kell végezni (nem csak a nehézásványokét, bár kétségtelenül ez utóbbi általában több információt ad a lepusztult területről).

*Könnnyű részleg* - Általában nagyságrendekkel nagyobb mennyiségű a nehézásványokénál. Leggyakoribb elegyrészei a kvarc, földpátok, karbonátok, fehér csillámok, illetve esetenként egyéb ásványok.

Vizsgálendő a kvarc esetében a szemcsék koptatottsága, kioltási jellege (normál vagy hullámos), zárványossága. Földpátoknál az összetétel (káliföldpát – plagioklász elkülönítés ill. ez utóbbinál a pontos összetétel), átalakulás jellege, mértéke.

*Nehéz részleg* - Ennek mennyisége általában kevés (az összes anyag maximum néhány százaléka, általában azonban mennyisége az 1%-ot sem éri el). Ennek oka, hogy eleve kevés ilyen jellegű szemcsét tartalmaz a lepusztult kőzet (pl. cirkon, rutil, stb.) illetve sokat, de mállékony elegyrészeket (pl. olivin, piroxén, amfibol) Ugyanakkor ezek olyan meghatározó jelentőségű ásványok, amelyek a lehordási terület közetsorozatára jellemzőek.

Nagyon fontos a teljes vizsgálendő anyag pontos lemérése a leválasztás előtt, valamint a könnyű és a nehéz részleg analitikai pontosságú lemérése a leválasztás után, mert a mintasorozatban a nehézásványok jelentős mennyiségi változásából fontos következtetések vonhatók le (pl. új nehézásvány „forrás” egy szelvényben)

### **A nehézásványok stabilitása („ellenállósági” sorrend)**

A nehézásványok a mállási folyamatokkal szemben eltérően viselkednek. Egyes ásványok nagyon mállékonyak, míg mások igen hosszú ideig stabilan megmaradnak. Az átalakulás jellege és mértéke sok tényezőtől függ (pH, redoxi viszonyok, alkáliák jelenléte a környezetben, sós környezet stb.). Éppen ezért egyértelmű sorrendet nem tudunk felállítani, az alábbiakban vázolt sorrend fő irányelvei azonban érvényesek. Az alább felvázolt sorrend a legstabilabb, mállásnak legellenállóbb ásványoktól kiindulva az egyre mállékonyabbak felé halad.

- 1) **Cirkon, turmalin, rutil** – Ezek az ásványok ultrastabilak, gyakorlatilag minden mállási folyamatnak ellenállnak (ld. ZTR-index)
- 2) **Apatit, gránát** – szintén stabil ásványok, de az apatit savas közegben viszonylag jól oldódik. Ugyanakkor azonban karbonátok jelenlétében nem oldódik, mert az oldódást a  $\text{Ca}^{2+}$  jelenléte akadályozza. A gránátok oldhatósága elsősorban összetételük függvényében változik. Legmállékonyabbak azok, amelyek bázisos magmás kőzetekből származnak illetve nagy a Fe- és/vagy a Mn-tartalmuk. A nagy Ca-tartalmú gránátok jobban oldódnak mint a kis Ca-tartalmúak. Általában nagy hőmérsékletű pórúsoldatok oldó hatására (mintegy 3-3,5 km mélységben) a gránátok gyakran teljesen feloldódhatnak.
- 3) **Spinell** – viszonylag kevés adat áll rendelkezésre a spinell változatok stabilitási viszonyaira, de általában véve a mállással szemben erősen ellenálló, stabil ásványoknak mondhatók. Ugyanakkor azonban stabilitásukat összetételük – a gránátokéhoz hasonlóan – erősen befolyásolja. Erősen ellenálló pl. a gahnit (Zn-spinell) és a kromit. Más típusok savas oldatokban (pl. savas kémhatású talajvíz) viszonylag könnyen oldódnak.
- 4) **Staurolit** – a diagenezis kezdeti szakaszán viszonylag stabil ásvány, de nagy hőmérsékletű pórúsfluidumokban feloldódik (pl. az Északi-tenger paleocén homokköveiből 2,4 km mélyen már teljesen kioldódott).
- 5) **Kianit** – Részletes vizsgálati eredmények egyelőre nem állnak rendelkezésre.
- 6) **Titanit** – viszonylag instabil ásvány, már kis hőmérsékletű pórúsoldatokban feloldódik.

- 7) **Epidot** – viszonylag kevésbé vizsgálták eddig az epidot-csoportbeli ásványok stabilitását, annyi azonban elmondható, hogy a sorban következő amfiboloknál ellenállóbb. Az összetétel némileg befolyásolja a oldékonyságukat, a Fe-szegény vagy Fe-mentes zoizit-klinozoizit az epidotnál valamivel stabilabb.
- 8) **Amfibol (hornblende, kékamfibol), klinopiroxén** – viszonylag erősen instabil ásványok, már kis hőmérsékletű pórusfluidumokban gyorsan feloldódnak. Éppen ezért erősen porózus homokkövekben nagyon ritkán maradnak meg, ugyanakkor azonban tömött (esetleg kis porozitású) homokkövekben viszonylag sokáig megőrződhetnek.
- 9) **Andaluzit, sillimanit** – erősen instabil ásványok.
- 10) **Ortopiroxén, aktinolit, olivin** – a legkevésbé ellenálló, felszíni körülmények között legkönnyebben átalakuló ásványok, ezek közül is az olivin a legmállékonyabb.

A lepusztulási területet az allotigén ásványegyüttesek alapján jellemezhetjük. Fontos, hogy mindig ásványegyütteseket vizsgáljunk, ne emeljük ki egy ásványt az együttesből, mert az téves következtetésekre vezethet bennünket. Bizonyos nehézásványok ugyanis többféle környezetben is kialakulhatnak, illetve stabilak lehetnek.

Az alábbi öt **alapvető lepusztulási környezetet**, illetve azok jellemző **ásványegyütteseit** jelölhetjük ki:

**Áthalmazott és/vagy idős üledékek:** rutil, cirkon (koptatott), turmalin (koptatott) (ld. ZTR index)

**Kisfokú metamorfítok:** biotit, klorit, epidot, glaukofán, turmalin (halványbarna, idiomorf)

**Közepes-nagyfokú metamorfítok:** andaluzit, sillimanit, kianit, staurolit, kloritoid, diopszid, gránát, hornblende (zöld-kékeszöld), (epidot)

**Savanyú-neutrális magmatitok:** apatit, hornblende (barnászöld), monacit, titanit, turmalin (rózsaszínű, idiomorf vagy kék-zöld), cirkon (idiomorf)

**Bázisos-ultrabázisos magmatitok:** augit, enstatit, hipersztén, hornblende (vörösbarna), anataz, olivin, kromit, Cr-spinell

A többszörösen áthalmazott, illetve idős üledékekben a cirkon, turmalin és rutil relatív mennyisége növekszik, lévén, hogy ezek azok az ultrastabil ásványok, amelyek a mállással szemben a legellenállóbbak. Ezek mennyiségét az anyagban az ún. **ZTR-index** mutatja, amely tehát a cirkon (Z), turmalin (T) és rutil (R) mennyisége az összes allotigén nehézásvány mennyiségéhez viszonyítva. Pontos értékének kiszámításához a teljes nehézásvány mennyiségből le kell vonni a csillámokat, valamint az autigén és epigén elegyrészeket.

### **A lepusztulási területen történt változások időbeli nyomonkövetése**

A lepusztulási terület jellegét és a lepusztuló anyag időbeli változásait legjobban függőleges szelvényben követhetjük nyomon. A lepusztuló anyag megváltozásával nehézásvány zónák jönnek létre. A nehézásvány zónák - időben - az idősebbtől a fiatalabb rétegek felé haladva általában növekvő összetettséget (komplexitást) mutatnak, vagyis a fiatalabb rétegekben többféle nehézásvány található. Gyakori, hogy egy fiatalabb rétegekben előforduló ásvány az idősebb rétegekből hiányzik (1. ábra).

Az *összettség (komplexitás) növekedésének okozói* lehetnek:

- a) A lepusztulás során felszínre kerül, feltáródik egy új forrásközet.

- b) A lepusztulási és a felhalmozódási terület szintkülönbségének, így reliefenergiájának megnövekedésével a patak vagy folyó mélyebbre vágódásával az áramlási együttható - és így a lepusztulás mértéke fokozódik, egyes olyan ásványok is eljutnak az üledékgyűjtőbe, amelyek gyengébb áramlási viszonyok között nem értek el oda (korábban kiüledtek, vagy a hosszabb szállítási idő miatt elmállottak).
- c) Éghajlati okok is közrejátszhatnak a komplexitás megnövekedésében. Amennyiben a területen az éghajlat humidról aridra változik, akkor a még nedves éghajlaton az instabil ásványok elmállanak (akár még a lepusztulási területen, vagy akár szállítás közben), és csak a stabilak jutnak el az üledékgyűjtőbe. Az éghajlat szárazabbá válásával a kevésbé ellenálló ásványok is megmaradnak, és eljutnak az üledékgyűjtőbe, így növekszik a komplexitás.
- d) Az ásványok eltérő ellenállóképessége miatt gyakori, hogy a kezdetben lepusztult, kevésbé stabil ásványok időközben elbomlanak, és ezért a korábban leülepedő, idősebb rétegekből hiányoznak.

Más esetekben viszont előfordulhat, hogy időben a *komplexitás csökken* egy adott rétegsorban alulról felfelé, a rétegek fiatalodásával. Ennek okai például az alábbiak lehetnek:

- e) Elfedődik, vagy teljesen lepusztul egy korábban felszínen levő réteg.
- f) A lepusztulási és felhalmozódási terület közötti szintkülönbségének és így reliefenergiája csökkenése következtében csökken a patak vagy folyóvíz bevágódása, ezáltal csökken az áramlási együttható és így a lepusztulás intenzitása. A lassabb áramlási viszonyok miatt egyes ásványok nem jutnak el az üledékgyűjtőbe (kiülednek, vagy a hosszabb szállítási idő miatt elmállanak).
- g) A területen az éghajlat aridról humida változása szintén a komplexitást csökkentő tényező lehet. Nedves klímán (akár még a lepusztulási területen, vagy akár szállítás közben), a kevésbé stabil ásványok mállása erőteljesebb, így nem jutnak el az üledékgyűjtőbe.
- h) Az üledékgyűjtőben előfordulhat, hogy csak a szelvény felső részén alakulnak ki olyan mállási és oldódási viszonyok (pl. hosszabb ideig szünetel a behordódás, vagy egy közbeeső vízzáró réteg megakadályozza a fluidumok mélyebb rétegekbe vándorlását), amelynek következtében a felsőbb rétegekből oldódnak ki a kevésbé stabil ásványok, és ez szintén a komplexitás csökkenését okozza egy rétegsorban alulról felfelé haladva.

A fentiekben vázolt eseteket szemlélteti a 2. ábra.

### **A nehézásványok méret szerinti elkülönülése**

A szállítás és a lerakódás során az egyes nehézásványok méret és sűrűség szerint is elkülönülhetnek. Ennek során, akár még ugyanabban a rétegben is, a különböző szemcseméretű frakciókban eltérő lehet az egyes ásványok mennyiségi eloszlása. Pl. a cirkon relatív mennyisége a vizsgált szemcseméret csökkenésével növekszik, a gránát mennyisége viszont csökken. Ezt jól mutatja annak a nehézásványvizsgálatnak az eredménye, amelyet a virginiai Potomac Csoport alsó kréta homokkövein végeztek (Lindholm, 1978). A vizsgálatot három szemcseméret frakcióban végezték (0,0625-0,125 mm, 0,125-0,25 mm, és 0,25 mm felett). A vizsgált frakciók közül a cirkon a 0,0625-0,125 mm-es, a gránát pedig a 0,25 mm feletti frakcióban dúsult leginkább. Az apatit mennyisége a közbeeső, a 0,125-0,25 mm-es mérettartományban volt a legnagyobb (3. ábra).

## **Mintaelőkészítés, nehézásvány-leválasztás**

Mikromineralógiai vizsgálatot elvileg bármilyen kőzetből végezhetünk. Elsősorban azonban a törmelékes üledékes kőzeteket vizsgáljuk ezzel a módszerrel, valamint olyan, más üledékes kőzeteket, amelyekben előfordulnak kívülről behordott, terrigén szemcsék (pl. homokos mészkő stb.). Ritkán azonban más, magmás vagy metamorf kőzetekből is végzünk mikromineralógiai vizsgálatokat, elsősorban ha valamelyik kőzetalkotó ritkább ásványra vagyunk részletesebben kíváncsiak (pl. cirkon vizsgálatok granitoid kőzetekben).

### ***Mintaelőkészítés***

A mintaelőkészítést – amennyiben a vizsgálandó mintánk laza, vagyis kötőanyag mentes – szitálással (jelentős mennyiségű 2 mm feletti szemcseméretű anyag jelenléte esetén rostálással, majd ezután a 2 mm alatti részleg szitálásával) kezdjük, hogy a megfelelő szemcseméretű frakciókra szétválasszuk az anyagot. Amennyiben a vizsgálandó kőzet kötött, először a kötőanyagot kell eltávolítanunk, vagyis dezaggregálnunk kell a kőzetet. Ez a kötőanyag minőségétől függően különböző módokon lehetséges, de ekkor mindig figyelembe kell vennünk, hogy a nehéz- valamint a könnyűásványok is sérülhetnek a dezaggregálás során (mechanikailag, vagy kémiai oldódhatnak az alkalmazott módszertől függően). Ezért a dezaggregálást - lehetőleg - mindig a törmelékes elegyrészekre legkevésbé roncsoló módszerrel kell kezdeni és fokozatosan haladni a „drasztikusabb” szétválasztó módszerek felé. A dezaggregálás módszerei elsősorban a kötőanyag minőségétől függenek, így fontos, hogy azt valamilyen előzetes vizsgálattal jobban megismerjük. A fent leírtak miatt nagyon fontos, hogy a dezaggregálás módszereit jegyzőkönyvben pontosan rögzítsük!

#### *A dezaggregálás módszerei:*

- vízben oldás
- többszörös fagyasztás - olvasztás
- sóoldatban ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) telítés - kristályosítás
- oldószerben (savban, lúgban, szerves oldószerekben) oldás
- törés

A vízben oldás, a fagyasztásos módszer (és általában a sóoldatos kezelés sem), gyakorlatilag nem tesz kárt a törmelékes alkotókban. Az oldás során azonban az oldószer minőségétől függően már nemcsak a kötőanyag, hanem a törmelékes elegyrészek is oldódhatnak, ezért mindig hígabb oldattal kezdjük a munkát és csak ha ez nem vezet eredményre, akkor töményítjük az oldatot! A törés során a szemcsék mechanikailag sérülnek, tehát ezzel a módszerrel történt előkészítés során kapott anyagon pl. koptatottsági vizsgálatot ne végezzünk!

Az alábbiakban néhány gyakorlati oldószeres példát említünk a különböző kötőanyagok eltávolítására:

|                    |                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| agyag              | vízben áztatás                                    |
| kalcit             | híg (5-10%-os) sósav vagy ecetsav oldat           |
| dolomit            | tömény sósav                                      |
| limonit, (Fe-oxid) | hideg, tömény sósav                               |
| pirit, markazit    | híg salétromsavban főzés                          |
| szerves anyag      | hidrogén-peroxid, aceton, éter, kloroform, benzol |
| kova               | Na- vagy K-hidroxid tömény oldata                 |

Újabban ultrahangos dezaggregálással is választanak szét kötött üledékes kőzeteket, ennek a módszernek szintén nagy előnye, hogy a vizsgálandó anyagunkban előforduló ásványszemcsék nem roncsolódnak.

A szitálás során nedves vagy száraz szitálással megfelelő szemcseméretű tartományokra választjuk szét a kőzetet. Általában az alábbi három frakciót használjuk a további munkához:

0,0625-0,125 mm

0,125-0,250 mm

>0,250 mm

A fentiek közül is leggyakrabban a 0,125-0,250 mm-es részlegről végzünk leválasztást, mert ebben a szemcsék mérete még megfelelő nagyságú ahhoz, hogy sztereomikroszkópban az ásványok kényelmesen megfigyelhetők és vizsgálhatók legyenek, ugyanakkor polarizációs mikroszkópban nézve ezek a szemcseméretű kőzetalkotó ásványok már áttetszőek, és optikai tulajdonságai polarizációs mikroszkópban jól megfigyelhetők. A 0,0625-0,125 mm-es frakciót akkor vizsgáljuk, ha a 0,125-0,250 mm-es frakcióban nincs megfelelő mennyiségű anyagunk, vagy ha kifejezetten olyan ásványokra vagyunk kíváncsiak, amelyek eredetileg is kis méretűek voltak (pl. cirkon, monacit stb.), és a kisebb szemcseméretű részlegről dúsulnak elsősorban. A korábban említettek alapján azonban, miszerint a különböző szemcseméretű frakciókban eltérő mennyiségben dúsulhatnak az ásványok, a minta teljes mikromineralógiai vizsgálatához mindkét szemcseméret frakció leválasztása szükséges.

Ritkán előfordulhat egyes speciális ásványokra irányuló vizsgálatok esetében (ilyen lehet pl. a már említett cirkon), hogy azok szemcsemérete a 0,0625 mm-t sem éri el. Ilyen esetben még ennél kisebb szemcseátmérőjű szitát is alkalmazhatunk a szitáláskor, de ekkor a szitálást (és később a nehézásvány leválasztást is) már rendkívüli gondossággal kell végeznünk a kis szemcseméretetek miatt.

### ***Nehézásvány-leválasztás***

A vizsgálni kívánt anyag megfelelő szemcseméretű tartományokra történt bontása után megkezdhetjük a nehézásványok leválasztását. Ehhez azonban először, a leválasztandó anyagot analitikai pontossággal le kell mérnünk (majd a szétválasztás végén a nehéz és könnyű frakciót is külön-külön meg kell mérni), mert egyrészt egy mintasorozatban a nehézásványok mennyisége nagyon jól jellemzi a lepusztulás, szállítás, lerakódás közben történt esetleges változásokat, másrészt a leválasztás körülményeit jellemzi, hogy a kiinduló anyagból mennyi volt az anyagvesztés. Amennyiben a könnyű és a nehéz frakció tömege meghaladja a kiinduló anyagunk tömegét, akkor vagy nem mostuk ki jól a nehézfolyadékot a leválasztás során, vagy mintakeveredés történt (az első esetben újbóli atmoszárral segíthetünk, az utóbbi esetben előlről kell kezdenünk a munkát).

A nehézásvány leválasztást többféle módszerrel végezhetjük. Korábban csaknem kizárólag a leválasztó tölcserrel végzett, gravitációs úton történő szétválasztó eljárás uralkodott, újabban azonban a flotációs szétválasztáson alapuló centrifugálásos módszer terjedt el. Ez utóbbi előnye hogy gyors, hátránya viszont, hogy egy-egy küvetében csak viszonylag kevés anyag fér, valamint, hogy a nehéz és könnyű frakció szétválasztása nem mindig tökéletes, így azt ebben az esetben meg kell ismételni. Amennyiben lehetőségünk van választani, lehetőleg olyan centrifugával végezzük, amelybe mintegy 3-4 cm átmérőjű küvetta fér, mert ezzel tökéletesebb lesz a nehéz és könnyű részlegről szétválasztása.

A nehézásvány leválasztást ún. **nehézfolyadékkal** végezzük. Ezek sűrűsége nagyobb, mint a törmelékes kőzetekben uralkodóan előforduló kvarc, földpát, kalcit stb. sűrűsége, így ezek az ásványok a könnyű frakcióban halmozódnak föl, míg a lepusztulási területre különösen jellemző ásványok a nehéz frakcióban dúsulnak. Az alábbi nehézfolyadékokkal végezhetünk leválasztást (megjelölve azok sűrűségét is):

|                                       |                        |
|---------------------------------------|------------------------|
| bromoform (tribróm-etán)              | 2,87 g/cm <sup>3</sup> |
| acetilén tetrabromid (tetrabrom-etán) | 2,96 g/cm <sup>3</sup> |
| metilén jodid (dijód-metán)           | 3,32 g/cm <sup>3</sup> |
| Clerici oldat                         | 4,24 g/cm <sup>3</sup> |
| Na-poliwolframát                      | 3,1 g/cm <sup>3</sup>  |

A felsoroltak közül az első három anyag kizárólag alkoholban oldódik. A Clerici oldat tallium-formát-malonát nagy sűrűségű vizes oldata. A Na-poliwolframát kivételével rendkívül mérgező, rákkeltő folyadékok, ezért a velük való munkát csak rendkívül óvatosan, elszívó fülke alatt és megfelelő védőfelszereléssel (maszk, védőkesztyű) szabad végezni! A Na-poliwolframát vízben oldódó nem mérgező anyag, ezért az 1980-as évektől kezdve elsősorban ezt ajánlották nehézasvány-leválasztás céljaira. Újabban azonban a legtöbb helyen visszatértek a „hagyományos” nehézfolyadékokhoz, ugyanis a Na-poliwolframát vizes oldata rendkívül nagy viszkozitású anyag, amely a nehézasvány-leválasztást nagyon lassúvá és körülményessé teszi. A nagyobb sűrűségű nehézfolyadékokkal történő leválasztást általában a bromoformos illetve Na-poliwolframátos leválasztást követően végezzük, mivel ezek a folyadékok nagyságrenddel drágábbak a szintén nem olcsó, fent felsorolt vegyszereknél.

#### *Gravitációs leválasztás menete:*

A leválasztás az erre a célra kialakított sajátos, alul csappal ellátott leválasztó tölcserrel történik (4. ábra). A leválasztó tölcserbe annak mintegy egyharmadáig nehézfolyadékot töltünk, majd beleszórjuk a légszáraz, lemért mintát (maximum 10 g mennyiségűt, de ajánlatos inkább csak 4-5 g mennyiséget). Ezután – óvatosan – további nehézfolyadékot töltünk még hozzá, és mintegy 3-5 órát állni hagyjuk. Ezalatt az idő alatt a nehézasványok a tölcser aljára süllyednek, a könnyűek pedig felemelkedve a folyadék felszínén gyűlnek össze. A szétválasztás során a nehézfolyadékot egymás után elkülönítlen, szűrőpapírral bélelt tölcseren át engedjük le egy főzőpohárba, ezáltal az első tölcserben a nehéz, a másodikban a könnyű frakció marad fenn a szűrőpapíron. Az így átszűrt nehézfolyadék újra felhasználható, így gondosan visszatöltjük az üvegbe. Az ásványfrakciókat tartalmazó szűrőpapírt ezután alkohollal többször átmoszuk, majd megszáritjuk. A szárítás után a nehéz és könnyű frakciót is lemérjük, majd megcímkézzük az üvegbe tesszük. Ritkán előfordulhat, hogy a leválasztó tölcserben nemcsak annak az alján és a tetején gyűlik össze anyag, hanem a középső részben lebegve is látunk ásványszemcséket. Ezek sűrűsége éppen megegyezik a nehézfolyadék sűrűségével, leggyakrabban csillámok tartoznak ide. Érdekes külön, harmadik tölcserben felfogni ezt a közbeeső tartományt, mert előfordulhat, hogy a későbbi munkánk során éppen ezt az ásványt kívánjuk tovább vizsgálni.

#### *Leválasztás centrifugával:*

A centrifugálás leválasztás előnye a gravitációs ülepítéssel szemben, hogy jóval rövidebb ideig tart, mintegy 10-15 perc alatt szétválak a nehéz és a könnyű frakció. A durvább szemcseméret-tartomány esetében a szétválasztási idő még rövidebb is lehet. A centrifugálás sebessége 2000-3000 fordulat/perc között legyen, és - mint korábban említettük -, a küvetta átmérője – lehetőleg - minél vastagabb legyen!

Az előkészített, szitált mintát a centrifugának megfelelő küvetta (5. ábra) helyezzük és hozzátöltjük a nehézfolyadékot. A minta és a nehézfolyadék közötti legmegfelelőbb arány kb. 1:10. A centrifugálás után a nehézasványok a küvetta alján, a könnyűek pedig a tetején helyezkednek el. Amíg a centrifugálás tart, addig két szűrőpapírral ellátott tölcserrel előkészítünk. A centrifugálás után, a centrifuga kinyitása után a küvetta óvatosan kivesszük. A frakciók elkülönítéséhez a küvetta alsó részét cseppfolyós nitrogénbe mártjuk, ami által a

nehézasványokat tartalmazó nehézfolyadék rész megfagy, és így a tetejéről a könnyű frakciót tartalmazó rész az egyik szűrőpapírral ellátott tölcserbe (amely alá főzőpoharat tettünk) leönthető. Vigyázni kell azonban a küvetta falára tapadt könnyű szemcsékre, amelyeket nehézfolyadékkal kell kimosni és hozzátölteni a könnyű frakcióhoz. A nehéz frakciót a másik szűrőpapírral ellátott tölcserbe mossuk bele (6. ábra). Ezután az atmoszféra és a szárítást, illetve súlymérést a gravitációs leválasztásnál leírtakhoz hasonlóan végezzük. (Megjegyzés: a centrifugálás leválasztás esetén más típusú [pl. duplafalú] küvetta illetve szétválasztási módok is ismertek, erre itt most nem térünk ki.)

*Az anyag további szeparálása:*

A nehézfrakció további szétválasztását vagy másik nehézfolyadékkal, vagy egyéb módszerekkel végezhetjük. Ez utóbbiak sorában a leggyakrabban használt módszer a mágneses szeparálás, amely az ásványok egymástól eltérő mágneses szuszceptibilitásán alapuló módszer. A mágneses szeparáláshoz a legközöségebb ásványok mágneses szuszceptibilitási értékeit táblázatok közlik (pl. Hess 1956). Ezt a módszert elsősorban a gránátok, piroxének és amfibolok további kémiai elemzésre történő dúsítására illetve az apatit és a cirkon kormeghatározási célra, illetve az utóbbinak a cirkonmorfológiai vizsgálatokra történő dúsítására használják. A csillámok és egyéb rétegszilikátok dúsítására egy nagyon egyszerű módszer a legalkalmasabb. A mintát durva felületű lapra (leggyakrabban szűrőpapírra) szórva, majd azt enyhén megdöntve a filloszilikátok nagy része a lapon marad, miközben a többi ásvány a lapon legurul. Bármilyen módszert használunk is az ásványok szétválasztásához, a legvégén sztereomikroszkóppal ellenőrizni kell az elkülönített ásványfrakció tisztaságát, és az esetlegesen megmaradt egyéb ásványszemcséket nedves tűvel vagy kihegyezett pálcikával kicsipegetve el kell távolítani. Nagyon fontos, hogy a szeparálási módszerekről jegyzőkönyvet vezessünk, pontosan rögzítve az elvégzett műveleteket.

### **Mikroszkópos vizsgálatok illetve az anyag előkészítése mikroszkópos vizsgálatra**

A mikromineralógiai vizsgálatokhoz az anyagot leggyakrabban először mikroszkóppal vizsgáljuk meg. Elsőként sztereomikroszkópot érdemes használni és ezzel az anyagot áttekinteni, illetve a sztereomikroszkóppal is biztosan elkülöníthető szemcséket meghatározni. A sztereomikroszkópos vizsgálatokkal nagyon jó áttekintést kaphatunk egy-egy minta nehéz (és könnyű) ásvány összetételéről. A sztereomikroszkópos vizsgálatokat polarizációs mikroszkóppal történt vizsgálatokkal egészítjük ki, amelyek segítségével egyes ásványok biztosabban-pontosabban meghatározhatók, sőt egyes nagyobb ásványcsoportokon belül (pl. piroxének, amfibolok stb.) további elkülönítések is végezhetők az ásványok optikai tulajdonságai alapján. Nagyon fontos, hogy a polarizációs mikroszkóppal meghatározott illetve pontosított ásványokat sztereomikroszkóppal is azonosítsuk, hogy a mennyiségi meghatározások során már ezeket az új tapasztalatokat is hasznosíthassuk. Zárójelben megjegyezzük, hogy az elmúlt években egyes kutatók (pl. Mange, 1992) a csak polarizációs mikroszkóppal történt vizsgálati módszert elégségesnek tartják és azt helyezik előtérbe. Miután azonban a sztereomikroszkópos vizsgálat még nagyon elterjedt, egyszerűbb és olcsóbb, ezért azt is ismertetjük.

A sztereomikroszkópos vizsgálatokhoz nincs szükség különösebb előkészítésre. Amennyiben nagy mennyiségű nehézasványunk van, akkor a megfelelő módszerrel (általában negyedeléssel) történő mintacsökkentést nagy gonddal kell elvégezni, mert gyakran előfordul, hogy az üvegcsében, amelyben a mintát tároljuk, a nagyobb sűrűségű szemcsék idővel (mozgatással) az üveg alján, a kis sűrűségűek pedig az anyag tetején dúsulnak. A vizsgálathoz a mintát a fentiek figyelembevételével fehér (illetve amennyiben mennyiségi elemzést is



kívánunk végezni megfelelő sűrűséggel rácsozott) lapra egyenletesen kiszórjuk és azon vizsgáljuk.

A polarizációs mikroszkópos vizsgálatokhoz az anyagot többféle módszerrel készíthetjük elő. A legegyszerűbb, amikor a kérdéses szemcsét tüvel vagy hegyes pálcikával kiemelve, azt vajt tárgylemezre helyezük és közvetlenül a petrográfiai mikroszkóp alá helyezve vizsgáljuk meg. Ehhez esetleg a szemcsét valamilyen anyagba (pl. glicerin, szegfűszegolaj vagy más folyadék, esetleg kanadabalzsam) be is ágyazhatjuk, ezáltal a fénytörési viszonyok kedvezőbbek lesznek a vizsgálathoz, illetve ismert törésmutatójú folyadék esetén a törésmutató értékek is pontosan meghatározhatók lesznek, ami az ásványszemcse pontos meghatározását igen nagy mértékben elősegítheti. A polarizációs mikroszkópos vizsgálatokhoz az egyedi ásványszemcsék kiválasztása és vizsgálata mellett az anyagból nagyobb mennyiséget is elkülöníthetünk, és kanadabalzsamba vagy műgyantába ágyazva az egész mintáról átfogó vizsgálatot végezhetünk. Amennyiben kanadabalzsamot használunk, a lágy balzsamba a mintát beleszórjuk és fedőlemezzel lefedjük. Ha a preparátumkészítés során a kanadabalzsam oldószerét nem égetjük ki, akkor lehetőségünk van a fedőlemez kismértékű mozgatásával a szemcséket elforgatni, és így több irányból is megvizsgálni. Nagyon fontos, hogy az így elkészített preparátumokat vízszintesen és nem egymásra helyezve tároljuk, mert a lágy kanadabalzsam a fedőlemez alól kifolyva a preparátumot összeragaszthatja. Műgyantás preparátum készítése során a még lágy műgyantába beleszórva az anyagot, az a lemez aljára süllyed, majd a műgyanta megszilárdulása után a preparátum csiszolható, így a kellő (30  $\mu\text{m}$ ) vékonyságúra csiszolt preparátumban a vékonycsiszolatos vizsgálatok során „megszokott” interferenciaszíneket látjuk. Sőt amennyiben a műgyantás preparátumot valamivel vastagabbra hagyjuk, mint 30  $\mu\text{m}$ , és nem fedjük le, hanem polírozzuk, további (pl. elektronmikroszkopos vagy katódlumineszcenciás stb.) vizsgálatnak is alávetethetjük a kérdéses szemcséket. Amennyiben a preparátumunkat nem kívánjuk megőrizni, akkor egyéb anyagba is beágyazhatjuk. Az egyik legalkalmasabb és legelterjedtebb anyag erre a szegfűszegolaj, amelynek a törésmutatója a kanadabalzsamétól csak kevésbé különbözik.

A polarizációs mikroszkópos vizsgálatok során az ásványok optikai tulajdonságainak segítségével végezzük az ásványhatározást a vékonycsiszolatos vizsgálatokból történő ásványhatározásnak megfelelően. Figyelni kell azonban arra, hogy a nehézásvány leválasztást általában a 0,125-0,250 illetve esetleg a 0,0625-0,125 mm-es frakcióból végezzük, és egy egyszerű beágyazás esetében, a preparátumban az ásványszemcsék vastagsága a vékonycsiszolatban megszokott 30  $\mu\text{m}$  helyett annál nagyobb, ami az interferenciaszínnek jelentős megnövekedését vonja maga után. Sőt, miután a szemcsék általában a középső részükön a legvastagabbak, és a szélük felé elvékonyodnak, ez az interferenciaszínük egy szemcsén belüli változását (belülről kifelé történő csökkenését) okozza, hasonlóan egyes zónás ásványokéhoz. A fentiek alapján ez azonban csak látszólagos zónáság. Ez kiküszöbölhető az előzőekben leírt, műgyantás preparátum megfelelő vékonyságúra történt lecsiszolásával.

Az anyagunk ásványszemcséinek fent leírt mikroszkópos vizsgálatával a minta minőségi nehézásványvizsgálatát végezzük el. Ahhoz, hogy egy lepusztulási területről megbízható információt kapjunk, a mintánknak legalább 300-500 allotigén nehézásvány szemcsét kell tartalmaznia, ennél kevesebb szemcse esetén adataink csak tájékoztató jellegűnek tekinthetők. A minta pontosabb jellemzéséhez mennyiségi vagy félmennyiségi meghatározás szükséges. A mennyiségi meghatározáshoz válogatás nélkül minimálisan 300, de inkább 500 nehézásványszemcsét kell megszámolnunk. Ehhez segít, ha nem fehér papíron, hanem megfelelő sűrűséggel bevonalazott vagy rácsozott papíron történik a meghatározás, elkerülendő egy szemcse többszöri megszámolását illetve egyes szemcsék figyelmen kívül

hagyását. Az eredményeket százalékban kifejezve adjuk meg, általában az 1 % alatti mennyiségű szemcsék esetén a „nyomokban” jelzőt alkalmazva.

Gyorsabb, de eredményében kevésbé pontos módszer a nehézasvány szemcsék félmenyiségi becslése. Többféle becslési módszer használatos, ezek közül az 5 fokozatú illetve a 9 fokozatú ún. Milner-Watts féle skála a legelterjedtebb. Fontos, hogy az egyes fokozatok számértéke mellé hozzávetőleges százalékos értéket, illetve a 9 fokozatú Milner-Watts értékek mellé jellemző meghatározást adjunk, amit eredményünk dokumentálásánál illetve publikálásánál mindig mellékelnünk kell. Az 5 fokozatú skála esetében ezek az értékek általában 10 %-onként változnak (általában 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, >40%), de ettől eltérő értékek is megadhatók az adott minta(sorozat) sajátosságait illetve a munka célját figyelembe véve.

A 9 fokozatú *Milner-Watts skála* (amely inkább egy féllogaritmusos eloszlást jelez) értékei a következő meghatározásokat jelentik:

- 1 – igen ritka
- 2 – ritka
- 3 – igen gyér
- 4 – gyér
- 5 – közönséges
- 6 – igen közönséges
- 7 – dús
- 8 – igen dús
- 9 – túlnyomó

A félmenyiségi meghatározásoknál ügyelni kell arra, hogy a mintában az egyes csoportokba kerülő ásványok mennyisége a választott skálának megfelelően reálisan alakuljon a minta egészét tekintve. Pl. 5 fokozatú skálán, ahol az 5-ös fokozat a >40% mennyiséget jelent, ne essen 3 ásványfajta is ebbe a kategóriába, vagy a Milner-Watts 9-es (túlnyomó) fokozatba csak egy ásványt jelöljünk meg stb.

Az eredmények minél pontosabb értelmezéséhez további megfigyelésekkel kell kiegészítenünk az ásványegyüttesek minőségi és mennyiségi meghatározását. Ezek közül nagyon fontos a **koptatottsági és étetettségi-oldási jellegek** megfigyelése. Azonos jellegű, de koptatottságában lényegesen eltérő szemcsék eltérő lepusztulási környezetből származhatnak. Az eltérő oldási jellegekkel bíró szemcsék esetében azonban már óvatosabban kell eljárni. Elképzelhető, hogy egy azonos területről lepusztult rétegsorban az egyes rétegekben vándorló, eltérő jellegű oldatok okozzák az eltérő étetettségi viszonyokat. Ugyancsak érdemes megvizsgálni az **eltérő színű**, de azonos anyagú szemcséket. Az eltérő színt elsősorban az eltérő összetétel okozza, ami viszont – legtöbbször – eltérő származási eredetre is utal. Egyes ásványtípusoknál - amennyiben megfigyelhető - az **eltérő kristályalak**, illetve habitus szintén a képződés körülményeire jellemző. Ügyelni kell azonban arra, hogy ebben az esetben csak az idiomorf kristályokból tudunk biztos következtetéseket levonni, egy esetleg a szállítás során eltört szemcsén a későbbi koptatás miatt a törési sík gyakran nem figyelhető meg egyértelműen, ami téves következtetésekre vezethet. Érdemes megfigyelni az esetleges továbbnövekedéseket, ami elsősorban a diagenezis közbeni folyamatokra utalhat. Pl. az allotigén színes turmalinon a digenezis során általában színtelen továbbnövekedési szegély alakul ki.

## **Az eredmények megjelenítése, ábrázolása**

A mikromineralógiai vizsgálatok eredményeit (amennyiben mennyiségi-félmennyiségi meghatározás is történt) általában táblázatban érdemes közölni, illetve különböző diagramokon ábrázolni. Feltétlenül közzendő a teljes anyaghoz viszonyított nehézásvány mennyiség, és – amennyiben meghatározható - az allotigén-autigén-epigén ásványok aránya, mennyisége is.

A grafikus ábrázolás során számtalan lehetőség van az eredmények megjelenítésére. Egyes minták esetében a kördiagram a leginkább elterjedt, szelvények-fúrások adatsorainak bemutatására az oszlopdiagram, vagy a mélység függvényében ábrázolt ásványeloszlási diagram a legkifejezőbb (7., 8., 9., 10. ábra).

### **A lepusztulási területek azonosítása a leggyakoribb allotigén ásványok kémiai összetétele és egyéb sajátosságai alapján**

A leggyakoribb allotigén ásványok kémiai összetétele nagyban hozzásegíthet bennünket a lepusztulási terület jellemzéséhez, behatárolásához. Az első ilyen jellegű összefoglalást Morton (1991) végezte, ez alapján tárgyaljuk ezt a témakört, néhány újabb adattal kiegészítve.

Egy homokkőben megtalálható ásványegyüttes összetételét számos tényező befolyásolja a lepusztulási terület kőzettani felépítésén kívül. Ezek közül a legfontosabbak a szállítási viszonyok, a szállított anyag megoszlása, leülepedési viszonyai. Ezeket az adatokat a kiértékelés során figyelembe kell vennünk, hogy minél pontosabban el tudjuk képzelni a lepusztulási területet.

Sok nehézásvány alkalmas az eredeti lepusztulási terület jellemzésére. Ugyanakkor azonban nagyon sok tényező befolyásolja a nehézásványok kémiai összetételét. Egy adott nehézásvány-együttes kialakulását számos hibaforrás illetve tényező is átalakíthatja a lepusztulástól a laboratóriumi vizsgálatig, és ezek figyelmen kívül hagyása téves következtetések levonásához vezethet. A forrásközetben való megjelenéstől kezdve a mikroszkópos vizsgálatokig az alábbi fő tényezők lehetnek befolyással a vizsgált ásványegyüttesre:

- (i) A forrásközet területén bekövetkező mállási viszonyok megváltozása (legtöbbször éghajlatváltozásra visszavezethetően), ami a lepusztult és elszállított anyag összetételét megváltoztatja.
- (ii) Szállítás közben végbemenő mechanikai folyamatok.
- (iii) A leülepedési környezet hidraulikus körülményei, ami a lerakódott anyag szemcseméretét és szemcseeloszlását határozza meg.
- (iv) A leülepedést követően, a diagenezis során, az üledéken átszivárgó pórusfluidumok átalakító hatása.
- (v) Az üledékes kőzet feltárásában, a mintavétel előtt bekövetkező mállási folyamatok befolyásoló hatása.
- (vi) A laboratóriumban a mintaelőkészítés során bekövetkező változások (kémiai oldás, szeparálási módszerek) során bekövetkező átalakulás illetve anyagvesztés, valamint az ásványhatározási körülmények, módszerek (pl. sztereomikroszkóppal, polarizációs mikroszkóppal, elektronmikroszondával, SEM-mel történt az azonosítás), ezek a meghatározás pontosságát befolyásolják.

A mikromineralógiai vizsgálatok során az egyes szemcsék pontos meghatározásához a legutóbbi években egyre inkább előtérbe kerülnek az elektronmikroszondával történő ásványkémiai vizsgálatok. A módszer alkalmazásánál azonban sosem elég egy adott ásvány egyetlen szemcséje összetételének meghatározása, mert az téves következtetésekre vezethet [ld. (i)-(vi) pontok]. Törekedni kell egy mintából lehetőleg minél több azonos típusú

ásványszemcse kémiai összetételének a meghatározására, hogy az adott ásvány összetételbeli változatosságát ki lehessen mutatni. Az elektronmikroszondás elemzések alkalmazása nehézásványokon az alábbi előnyökkel illetve többletinformációval jár a mikroszkópos vizsgálatok kiegészítéseként:

- 1) Egyes szemcsék optikai jellegek alapján, mikroszkóppal történt meghatározása helyességének megerősítése, pontosítása. Az elektronmikroszondás elemzés gyors és hatásos, bár nem igazán olcsó módszer a szemcsék azonosítására. Különösen jól használható ritka vagy kérdéses szemcsék esetén. Például Savoy környékén (Franciaország), miocén molassz üledékben a polarizációs mikroszkóppal meghatározott lawsonit szemcsék jelenlétének megerősítése történt elektronmikroszondával (Mange-Rajetzky és Oberhänsli, 1982). Az Északi-tenger paleocén homokkővében elektronmikroszondával sikerült azonosítani a nagyon ritka, goldmanit [vanádium-gránát] nevű ásványt, amelyet optikai módszerekkel először spinellnek határoztak meg. Ezek a nagyon ritka ásványok különösen alkalmasak a forrásközet és így a lepusztulási terület azonosítására (Deer et al., 1982).
- 2) Kisméretű, mikroszkóppal nem meghatározható mikro- vagy kriptokistályos szemcsék, aggregátumok azonosítása. Ezzel a módszerrel sikerült például kimutatni az alpi molasszban előforduló pumpellyitet (Mange-Rajetzky és Oberhänsli, 1986)
- 3) Az elektronmikroszondás vizsgálatok igazi értéke, hogy ez a legpontosabb és gyakorlatilag egyedüli módszer az egyes ásványszemcsék kémiai összetételének és ezáltal geokémiai viszonyainak meghatározására, ezáltal a lepusztulási terület pontosabb azonosítására illetve esetleg az üledékes kőzetképző folyamatok nyomkövetésére.

Újabban az ionmikroszondás méréseket is felhasználják egyes ásványok kémiai illetve bizonyos izotópösszetételének meghatározására. Miután az ionmikroszondával egy nagyon kis terület összetételét mérhetjük meg, lehetőség van kisméretű, zónás ásványok egyes zónáinak mérésére is, ami az ásványok képződésének pontosítását és a lepusztulási terület illetve képződmény még pontosabb leszűkítését segíti elő.

### ***Származási hely meghatározására alkalmas nehézásványok***

Amint korábban már említettük, számos nehézásvány faj használható az eredeti lepusztulási terület jellemzésére, meghatározására. A legfontosabbak ezek közül a piroxén, amfibol, epidot, staurolit, gránátok, spinellek, kloritoid, monacit, turmalin és a cirkon, valamint részben az apatit, titanit, rutil és az olivin azok közül az ásványok közül, amelyek gyakran előfordulnak a nehézásvány-együttesekben. Ugyanakkor előbb láttunk arra is példákat, hogy – amennyiben jelen vannak az anyagban - a ritka vagy különleges összetételű ásványok is mennyire jól használhatók a lepusztulási területek azonosítására.

### **Piroxén**

A piroxéncsoporthoz nagyon sokféle ásvány tartozik. Ezek nagy csoportjai, sőt azon belül legtöbbször az egyes fajták is optikailag elkülöníthetőek (ortopiroxének, alkáli piroxének, a leggyakoribb kőzetalkotó klinopiroxének), de a pontos kémiai összetételük, amely alapján a rendszerbe foglalásuk is történik (Morimoto, 1988; Rock, 1990) csak elektronmikroszondával határozható meg. A mikromineralógiai vizsgálatok során, első

megközelítésben a klinopiroxének közül szín alapján érdemes elkülöníteni a *zöld (diopszidos augit)* piroxéneket a *barna (Ti-augit)* színüektől.

A sokkal gyakoribb magmás eredetű piroxének lehordási területének meghatározása, illetve különböző lehordási területekről származó piroxének elkülönítése elsősorban ezen ásványok **Ca-, Ti-, Cr-, Na-** és **Al**-tartalma alapján történik. A piroxének összetételét ábrázolhatjuk a Ca-Mg-Fe háromszögdiagramon (11. ábra), amely segítségével fő vonalaiban már megadhatjuk az adott minta piroxénjeinek összetételét. A további elkülönítéshez Leterrier et al. (1982) három egymást követő vizsgálati módszert javasol. A tholeiites illetve alkáli kőzetekből származó piroxének elkülönítése a **Ti-(Ca+Na)** diagrammal történhet (12.a. ábra). Ezt követően a **(Ti+Cr)-Ca** diagram segítségével az orogén és nem orogén származású piroxének elkülönítését végezhetjük (12.b. ábra). Az orogén eredetű piroxének további, mészkáli vagy tholeiites sorozatba tartozását a **Ti-Al<sub>tot</sub>** diagram alapján dönthetjük el (12.c. ábra). A piroxén lepusztulási területek elkülönítésének egy másik, nagyon jól használható módszere a **TiO<sub>2</sub>-MnO-Na<sub>2</sub>O** háromszög alkalmazása (13. ábra) (Nisbet & Pearce, 1977), amely segítségével különböző nagytektonikai környezetből származó piroxének elkülönítése lehetséges.

A piroxénnek, mint lepusztulási terület jellegzetes ásványának használati lehetőségeit erősen korlátozza az ásvány erős instabilitása. Már kis hőmérsékletű pórusoldatok hatására is könnyen mállik és feloldódik, így porózus homokkövekben, már sekély betemetődési mélységekben is csak nagyon ritkán marad meg a nehézásvány-együttesben. Ugyanakkor azonban nagyon kis porozitású homokkövekben gyakran hosszú időn át megőrződhet.

## Amfibol

Az amfibolok geokémiája rendkívül bonyolult, összetett. Osztályozásuk – a piroxénekhez hasonlóan – szintén a kémiai összetételük alapján történik (Leake, 1978; Leake et al., 1997), amely szerint Na-, Na-Ca-, Ca-Na- és Ca-amfibolok csoportjait különítik el. Az amfibolok kémiai összetételének változását az optikai tulajdonságok jól tükrözik, így például az alkáli amfibolok (glaukofán, riebeckit) egyértelműen elkülöníthetők a hornblende csoport tagjaitól (edenit, pargasit). Ez alapján - első megközelítésben - az üledékekben megjelenő zöld színű, illetve zöldes árnyalatú amfibolt '*hornblende*'-nek, a kék színű alkáli amfibolokat pedig '*glaukofán*'-nak nevezzük. A további felosztás során a zöldes árnyalatú amfibolok esetében a kékeszöld színűeket az *aktinolit* csoportba sorolhatjuk, illetve érdemes elkülöníteni a tisztán *zöld* illetve *zöldesbarna-barna hornblende* változatokat is. A tisztán *barna* - *sötét barna* színű amfibolokat szintén a *hornblende* csoportba soroljuk. Az elektronmikroszondás ásványkémiai vizsgálatok természetesen ennél sokkal pontosabb kémiai összetételbeli, és így a lepusztulási területre megbízhatóbb ismereteket adnak az amfibolokról, mivel kémiai összetételbeli változatosságuk jól jellemzi paragenézisük változatosságát. Az elektronmikroszondás vizsgálatokból kapott eredményeket tehát a megfelelő Leake-diagramokban ábrázolva a különböző területekről származó, eltérő paragenézisű amfibolok jól elkülöníthetők. Ezzel együtt, illetve ezen túlmenően jól használhatók az amfibolok elkülönítésében a **Mg/(Mg+Fe)-Si, (Na+K)<sub>A</sub>/Si, Na-Ti** diagramok, valamint az **Al<sup>VI</sup>-Fe<sub>tot</sub>-Mg** háromszögdiagram (14., 15., 16. ábrák).

Az amfibol – a piroxénekhez hasonlóan – szintén könnyen átalakuló ásvány, már viszonylag kis hőmérsékletű pórusfluidumok hatására is feloldódik illetve átalakul, így nagy porozitású homokkövekben általában nem marad meg, és ez korlátozza jó felhasználhatóságát a lepusztulási területek azonosításában. Viszonylag hosszú ideig megmaradhat azonban az idős, kis porozitású homokkövekben.

## Epidot-csoport

Az epidot-csoport ásványai (zoizit, klinozoizit, epidot, ortit [allanit], piemontit) szintén változatos kémiai összetételűek, optikailag az egyes típusok viszonylag jól azonosíthatóak. Eddig az üledékekben viszonylag kevés figyelmet fordítottak az epidot csoport ásványaira. Geokémiai lehordási terület azonosítására eddig nem sok alkalmazása történt. Korlátozottan esetleg az epidotban mért **Fe/(Fe+Al)** hányados használható azonosításra.

Az epidot-csoport ásványainak stabilitási viszonyai kérdésesek, az amfibolnál valamivel ellenállóbbnak tűnnek, stabilitásukat azonban a kémiai összetétel némileg befolyásolja.

### **Staurolit**

A staurolit viszonylag kis összetételbeli változatosságú ásvány, de a metamorf foktól függően összetétele („ferruginitása”, vagyis Fe- és Mn-tartalma) némileg változó lehet, ami részben alkalmassá teszi a lepusztulási terület viszonyainak pontosítására. Ez alapján a **(Fe+Mn)/(Fe+Mn+Mg)** hányados jellemző lehet a lepusztulási területre (17. ábra). Ez az érték a “normál” staurolitoknál 89-91 között mozog, egyes területeken ennél kisebb illetve nagyobb értékek is előfordulhatnak.

A nyomelemek közül a **Co** és a **Zn** helyettesíti leggyakrabban a staurolit fő elemeit, így a relatíve nagy Zn- és Co-tartalmú detritális staurolitok jól alkalmazhatók a forrásközet azonosítására.

A staurolit viszonylag stabil ásvány, különösen a diagenézis kezdeti szakaszán, de később, nagy hőmérsékletű pórusfluidumokban oldódik. Például az Északi-tenger paleocén homokköveiből 2,4 km mélységben a staurolit már teljesen kioldódott (Morton 1984a).

### **Gránát**

A különböző környezetekben képződött gránátok összetételbeli változékonysága és változó mértékű, de viszonylag jó stabilitása (ld. korábban) miatt ez az ásványcsoport különösen alkalmas a lepusztulási terület jellemzésére, azonosítására. A különböző paragenezisekben képződött, eltérő összetételű gránátokat általában háromszögdiagramokban ábrázolják, amely háromszögek csúcspontjain a gránát leggyakoribb kationjait illetve a gránát szélsőtagokat (illetve részben azok összegét) ábrázolják. Pl. egyik legelterjedtebb az **Almandin+Spessartin-Pirop-Grosszulár** háromszög diagram (18., 19. ábra). A gránátok esetében azonban figyelembe kell venni, hogy a különböző lepusztulási térszínekről származó gránátok gyakran keveredhetnek egymással az üledékes anyagban, vagy a forrásterület összetettsége miatt, esetleg a gránátok áthalmazódása illetve diagenézise következtében, így az eredmények értelmezésénél erre különös gondot kell fordítani. Különösen a kis Ca-tartalmú gránátok azok, amelyek a gránátok között a legellenállóbbak, így számítani kell arra, hogy ezek idős homokkövekből, áthalmazódással kerülhetnek bele az üledékgyűjtőbe.

### **Spinell**

A spinell csoport tagjai rendkívül változatos összetételűek, de izotróp ásvány voltak miatt az optikai tulajdonságaik vizsgálata viszonylag szűk területen mozog. Elsősorban szín és törésmutató alapján lehet optikailag elkülöníteni egymástól a spinell változatokat, de a törmelékes spinellek egyes fajtái mikroszkópban könnyen összetéveszthetőek a gránátokkal, illetve gyakran átlátszatlanok, vagyis opakok. Így az üledékes környezetben megjelenő spinellek elektronmikroszondás ásványkémiai vizsgálata – a lehetőségekhez mérten – mindenképpen indokolt. Változó összetételük alapján a spinell csoport ásványai jól alkalmazhatók a lepusztulási terület jellemzésére, különösen a mállásnak viszonylag jól

ellenálló Cr-spinellek vizsgálatának van nagy jelentősége. Az üledékekben előforduló detritális eredetű Cr-spinellek jelentőségét Zimmerle (1984) ismerte fel, azóta számos példa bizonyítja ennek az ásványnak a jelentőségét a törmelékes kőzetek lepusztulási területének azonosításában. A Cr-spinellek esetében a Cr-szám alkalmas a különböző eredetű spinellek azonosítására, amelyet a  $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})\text{-Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$  diagramon ábrázolunk. Például Árgyelán (1995), a gerecsei alsó kréta homokkövek spinelljeinek összetételi vizsgálatából arra következtetett, hogy a spinellek összetétele megegyezik a harzburgitokban előforduló spinellek összetételével és az alpi-típusú peridotitok II. és III. csoportjába sorolhatók (20. ábra). Hasonló jellegű, jelentős és ugyanilyen összetételű Cr-spinell tartalmú alsó kréta törmelékes képződmények az Északi Mészkő Alpok Rossfeldi rétegeiben található, így a mikromineralógiai vizsgálatokkal sikerült bebizonyítani, hogy a gerecsei és a rossfeldi képződmények fő forrásterülete egykor azonos volt (Árgyelán, 1995).

### **Kloritoid**

A kloritoid változó, elsősorban **Mg**-, **Mn**- és **Fe**-tartalma következtében szintén jól használható nehézásvány a lepusztulási terület azonosítására. Erre a **MnO-FeO/10-MgO** háromszögdiagramot használják (21. ábra).

A kloritoid stabilitásáról csak nagyon kevés adat áll rendelkezésre. Az Északi tengerben 4 km mélységből származó jura homokkövekből teljesen üde, korrózió nélküli detritális kloritoid szemcsék kerültek elő. Egyes területeken azonban kis pH-jú (savanyú kémhatású) talajvizek oldóhatását figyelték meg erre az ásványra nézve.

### **Monacit**

A monacit viszonylag sok könnyű ritkaföldfém (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd) tartalmaz, amely általában elegendő mennyiségű ahhoz, hogy elektronmikroszondával energia-diszperzív módszerrel határozzuk meg a mennyiségét. Az ásványban előforduló Eu és a nehézritkaföldfémek mennyiségét azonban - azok kisebb mennyisége miatt - már csak hullámhossz-diszperzív módszerrel lehet pontosan megmérni. A könnyűritkaföldfém gazdagság miatt a monacit esetében a **La/Nd arány** jellemző a lepusztulási környezetre. Gránitok és gránit pegmatitok esetében a La/Nd arány értéke kicsi (általában 1,06-1,23 közötti érték), míg az alkáli magmatitokban és a karbonatitokban ez az érték nagy (átlagosan 3,11).

A monacit feltehetően viszonylag stabil, bár stabilitási viszonyai alig ismertek. Egyes üledékes kőzetek másodlagos RFF-foszfát (rabdofán) és másodlagos monacit tartalma az elsődleges monacit oldódására utal (Milodowski & Zalasiewicz, 1991), ami az jelentheti, hogy a monacit oldódása során a benne levő RFF-k mobilizálódnak, majd kicsapódnak és ezáltal autigén monacit képződik. Napjainkban várhatóan egyre inkább előtérbe kerülhet a LA-ICP-MS módszer alkalmazásának előretörése a törmelékes monacit (és cirkon) szemcsék esetében is.

### **Turmalin**

A turmalin kémiája viszonylag összetett, számos szélsőtaggal jellemzett ásvány. Leginkább a **Fe**- és **Mg**-tartalma változik. A leggyakoribb változatait (drávit, uvit, sörl, elbait) a **FeO-MgO** diagramon láthatjuk (22. ábra). Változatai közül a drávit és az uvit metamorf vagy metasomatikus eredetű, a sörl és az elbait viszont gránitos vagy pegmatitos eredetű.

A turmalin régóta használatos a lehordási terület meghatározására. A turmalin kémiai összetétele jellemző a kőzet képződési körülményeire, ennek jellemzésére az **Al-Al<sub>50</sub>Fe<sup>t</sup><sub>50</sub>**

$\text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}$  valamint a  $\text{Ca-Fe}^{\text{t}}\text{-Mg}$  háromszögdiagramokat használjuk (Henry & Guidotti, 1985) (23.a., 23.b. ábra).

Amint már korábban említettük, a turmalin nagyon stabil (ún. „ultrastabil”) ásvány, ezért lepusztulási terület meghatározására nagyon alkalmas. Ügyelni kell azonban - a nagy stabilitása miatt – az abragban esetlegesen előforduló, többszörösen áthalmazott turmalinszemcsékre, nehogy téves következtetéseket vonjunk le mérési eredményeinkből. A típusok elkülönítését elsősorban és elsődlegesen a mikroszkópos vizsgálatok során kell elvégeznünk (szín, alak, megjelenés, koptatottság stb.)

## Cirkon

A cirkon – a turmalinhoz hasonlóan – szintén jól használható lepusztulási terület jellemzésére. A cirkonnak viszonylag kicsi a kémiai változatossága. Az ásványban leginkább a Zr-t kismértékben helyettesítő Hf-tartalom változik a különböző típusú magmás kőzetekben, és így, az ezek lepusztulásából az üledékes kőzetekbe kerülő cirkonban is (a cirkon Zr-tartalma 40 tömeg%, míg a Hf-tartalma általában 0,6-3,0 tömeg% között mozog). A Hf - annak kis mennyisége miatt - elektronmikroszondával csak hullámhossz-diszperzív módszerrel mérhető. A Hf mellett a cirkonban kis mennyiségben **Ta**, **Th**, **U**, **W** és **Sr** is előfordulhat, amelyek mennyisége, eloszlása szintén jellemző lehet a lepusztulási területre, amennyiben a fent felsorolt elemek mérhető mennyiségben vannak jelen az ásványban.

A cirkon nagyobb jelentőségű, lepusztulási területre jellemző használhatóságát az ún. cirkonmorfológiai vizsgálatok jelentik. A módszert Pupin (1980) dolgozta ki granitoid kőzetekre, de vulkanitokra illetve vulkanoklasztitokra is jól használható. A módszer lényege, hogy a kőzetekben képződött cirkon kristályok morfológiája a képződés hőmérsékletétől valamint a magmakémiai (elsősorban alkalinítási) viszonyoktól függ, vagyis a különböző körülmények között kristályosodó cirkonzemcsék alakja (a prizma és piramislapok kifejlődése, egymáshoz viszonyított aránya) különböző és jellemző lesz a képződési körülmények során fennálló állapotokra, vagyis ebből képződésük körülményeire következtethetünk. A cirkontípusokat Pupin diagramban ábrázolta és a legalább 100 (esetenként elég 50-60 db), lehetőleg a 0,125-0,250 mm-es frakcióból szeparált cirkonzemcsé vizsgálatára és diagramba helyezése alapján kialakult cirkonpopuláció (cirkonforma eloszlási kép) segítségével a lepusztulási területre értékes ismeretek nyerhetők (24., 25., 26. ábra).

A cirkon – a turmalinhoz hasonlóan – szintén az „ultrastabil” ásványok közé tartozik, vagyis lepusztulási terület azonosításában jól hasznosítható. Stabilitása miatt a cirkonzemcsék többszöri áthalmazódása nagyon gyakori az üledékes kőzetekben, amelyre – a turmalinnál leirtaknál hasonlóan – már a mikroszkópos vizsgálatok során fel kell figyelniünk, és az eltérő sajátságok alapján típusokat különíthetünk el (27. ábra).

## Egyéb nehézásványok

Az *apatit* és a *titanit* kémiai összetételét tekintve mindkét ásványban a **ritkaföldfém-** és az **Y**-tartalom (különösen az előbbi) változékonysága lehet petrogenetikai indikátor a lepusztulási terület azonosításában. Emellett az apatit viszonylag stabil, csak savanyú kémhatású talajvizekben oldódik, de a titanit viszonylagos instabilitása (már kis hőmérsékletű pórusoldatokban is oldódik) korlátozza használhatóságát a lepusztulási területek azonosításában.

A *rutil* esetében **Nb** és **Ta** helyettesítheti a Ti-t, így ennél az „ultrastabil” ásványnál ezeknek a nyomelemeknek a vizsgálata használható a lepusztulási terület azonosítására.



Az **olivin** esetében a **Fe/Mg** arány jól használható a forrásterület jellemzésére. Miután azonban az olivin a legkönnyebben málló nehézásvány (még a piroxéneknél is jobban oldódik), ezért üledékes kőzetekben csak rendkívül korlátozott körülmények között használható lepusztulási terület azonosítási vizsgálatok során, elsősorban olyan fiatal üledékek vagy üledékes kőzetek esetén, amelyek forrásterülete viszonylag közel volt a lerakódási-felhalmozódási területéhez.

### **A nagytektonikai környezet azonosításának lehetőségei nehézásvány-együttesek alapján** (Nechajev és Isphording, 1993 munkája alapján)

Különböző nagytektonikai környezetben lerakódó recens, illetve nagyon fiatal üledékekben megtalálható nehézásvány együtteseket vizsgált és tipizált Nechaev és Isphording (1993). Megfigyeléseik alapján – bizonyos feltételekkel - idős üledékek nehézásvány-együtteseinek vizsgálatával, az üledékképződés környezetének nagytektonikai helyzetére következtethetünk.

Fenti szerzők a kontinens szegélyeknek három fő tektonikus helyzetét különítették el:

- passzív kontinens szegély (pl. Északi-tenger)
- divergens (távolodó) lemezhatár melletti partszegély (pl. Vörös tenger)
- konvergens (torlódó) lemezhatár melletti partszegély (pl. Vancouver szigetek területe, Kelet-Kínai tenger, Dél-Kínai tenger)

A nehézásvány vizsgálatok során mindenekelőtt a klinopiroxének és az amfibolok esetében, azok mikroszkópban látható színe alapján 2-2 csoportot kell elkülönítenünk:

- 1, klinopiroxén **cpx1**: barna színű, Ti-augit  
**cpx2**: zöld színű, diopszidos augit
- 2, amfibol **Hb**: zöld és barna színű hornblende  
**Am**: (tremolit-aktinolit és egyes hornblendék)

A nehézásványokat a következő csoportokba sorolták:

**GM**: Granitoidokból és nagy Si-tartalmú metamorfítokból származó ásványok (kontinentális magmás és metamorf kőzetekből származók):

*cirkon, turmalin, staurolit + sillimanit, andaluzit, monacit, kianit*

**MT**: Bázisos metamorf kőzetekből (zöldkő, zöldpala, amfibolit) származó ásványok:

*halvány színű valamint kék-zöld színű amfibol (Am), epidot-csoport ásványai, gránát*

**MF**: Ultrabázisos-bázisos kőzetek mafitos ásványai:

*olivin, iddingsit, az összes piroxén, zöld és barna színű hornblende (Hb)*

Az eredményeket egyenlőszárú derékszögű háromszögdiagramon ábrázoljuk úgy, hogy a derékszögnél levő csúcson van az MT ásványegyüttes. A derékszögű háromszög ábrázolás miatt történik, mert a GM, MT és MF ásványegyütteseknek nem azonos a jelentősége a nagytektonikai helyzet tekintetében. Elsősorban az MT csoport ásványai azok, amelyek a különböző tektonikai helyzetben lerakódott üledékek elkülönítésében kevésbé használhatóak a másik két csoport ásványainál, ezért került az MT a derékszög csúcsához.

Az **MF-MT-GM** háromszögdiagram alapján a kontinens szegélytől távoli tektonikai helyzetű, az aktív kontinens peremhez közeli és az érett, passzív kontinens peremen lerakódott üledékek különíthetők el. (28. ábra)

Az aktív kontinens peremeken belül a divergens és a konvergens szegélyek elkülönítését egy másik derékszögű háromszögdiagrammal végezhetjük. A derékszögű

csúcsnál a **Hb**, az átfogó egyik csúcsánál az **olivin+iddingsit+cpx1**, a másik csúcsánál az **opx+cpx2** együtteseket ábrázoljuk. (29. ábra)

A fenti elkülönítés egyik legfontosabb alkalmazhatósági feltétele az, hogy diagenetikus („intrastratal”) oldódás nincs, vagy csak rendkívül kismértékű. A módszer kidolgozói Nechajev és Isphording (1993) szerint ez tengeri üledékeknél így is van, ezért a módszer használható. Másik feltétel, hogy a lepusztulási és lerakódási környezet közötti távolság kicsi legyen, hogy a szállítás során történő változások (oldódás, hozzákeveredés) ne befolyásolják az eredményt.

### **Irodalom:**

Árgyelán, 1995  
Bustamante-Santa Cruz, 1995  
Deer et al., 1982  
Henry és Guidotti, 1985  
Hess 1956  
Leake, 1978  
Leake et al., 1997  
Letellier et al., 1982  
Lindholm, 1978  
Lindholm, 1987  
Lonergan és Mange, 1994  
Mange, 1992  
Mange és Maurer 1992  
Mange-Rajetzky és Oberhänsli, 1982  
Mange-Rajetzky és Oberhänsli, 1986  
Milodowski és Zalasiewicz, 1991  
Morimoto, 1988  
Morton 1984a  
Morton, 1991  
Nechaev és Isphording, 1993  
Nisbet és Pearce, 1977  
Pupin, 1980  
Rock, 1990  
Zimmerle, 1984