

## Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában II.: A Mórági Gránit repedésrendszerei

SZABÓ Bernadett<sup>1</sup>, BENKÓ Zsolt<sup>1</sup>, MOLNÁR Ferenc<sup>1</sup>, Marc LESPINASSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Ásványtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C.  
b.szabo@saubermacher.hu, benkoo@elte.hu, molnar@abyss.elte.hu

<sup>2</sup>Henri Poincaré University Nancy 1, Nancy, France marc.lespinasse@g2r.uhp-nancy.fr

---

*The application of studies on fluid inclusion planes and fracture systems  
in the reconstruction of fracturing history of granitoid rocks II:  
Fracture systems of the Mórági Granite*

### Abstract

In this paper the results of studies on fluid inclusion planes, fractal analyses studies on mineralized fractures, and the calculated paleo-permeability of the Mórági Granite Formation (Mecsek Mountains, Hungary) are presented. Studies on the fluid inclusion planes of quartz from granite and pegmatite revealed differences between regional and local fluid mobilization events. Based on the combination of field observations on faults and joints, with orientation of fluid inclusion planes and fluid inclusion microthermometry results, one regional and three local hydrothermal systems were identified. The common stress orientations which have driven fracture developments were NW–SE and NE–SW. The calculated palaeo-permeability for carbonate veins always fell short in comparison to values calculated for fluid inclusion planes in the quartz of the host rock. This affirms that the fluid percolation properties of rocks are mainly determined by the micro-fracture networks. Fractal analysis has confirmed the fractal properties of the carbonate vein systems and proved that those veins are clustered. Calculation of fractal dimensions revealed the connectivity differences of the vein systems and helped to explain the contradictory paleo-permeability tendencies calculated from fluid inclusion planes and carbonate veins among various outcrops. The investigations that were carried out suggest that a combination of studies on fluid inclusion planes with field observations on mineralized veins, joints and faults constitutes a suitable tool for solving structural geological problems in non-stratified rocks such as granite.

*Keywords: Mórági Granite Formation, fluid inclusion planes, fluid flow system, fractal analyses, palaeo-permeability*

---

### Összefoglalás

Munkánkban a Mórági Gránit Formáció kőzetalkotó kvarckristályaiban előforduló fluidzárványsíkok vizsgálatát, a feltárásokban észlelt ásványosodott repedésrendszerek fraktálanálízisét és a paraméterek alapján paleopermeabilitás- számítását végeztük el. A gránit és pegmatit kőzetalkotó kvarckristályainak fluidzárványsík-vizsgálata feltárta, hogy milyen hidrotermális események érték a Mórági Gránitot. A terepen megfigyelt vetők és repedések irányait összehasonlítva a fluidzárványsíkok irányjaival elkülönítettünk egy regionális és három lokális hidrotermális rendszert.

A legjellemzőbb feszültségtér irányok ÉNy–DK és ÉK–DNy. A karbonáterekben számolt paleo-permeabilitás értékek minden esetben elmaradnak a gránit kőzetalkotó kvarckristályaiban mért fluidzárványsíkok paleopermeabilitás értékeitől. Ezzel bizonyítható, hogy a kőzet fluidum-áteresztőképességét nem a nagy (ásványosodott erek), hanem a mikro-repedésrendszer biztosítja. A fraktálanálízis bebizonyította, hogy a karbonátos érrendszerek fraktáltulajdonságokkal jellemezhetőek és az érrendszerek csoportos elrendeződésűek. A fraktáldimenziók vizsgálata feltárta az érrendszerek fejlettségének különbségeit, és megmagyarázta a feltárásokban a karbonáterek és a zárványsíkok paleopermeabilitás értékei között tapasztalt ellentétes tendenciákat. Vizsgálataink bizonyították, hogy a fluidzárványsík-vizsgálatok és más (általános földtani, geofizikai) módszerek együttes használata alkalmas szerkezetföldtani problémák megoldására, olyan nem rétegzett kőzettettekben, mint például a gránitintrúziók és batolitok.

*Tárgyszavak: Mórági Gránit Formáció, fluidzárványsík, fluidáramlási rendszerek, fraktál analízis, paleopermeabilitás*

## Bevezetés

A mecseki kristályos alaphegység Mórággyi Gránit Formációja a Mecsek hegység DDK-i előterében húzódik, és a Tiszai nagyszerkezeti egység része (1. ábra). A Tiszai egység a középső-juráig az Európai lemez déli szegélyén, helyezkedett el, ahonnan a Pennini-óceán kinyílásával szakadt le, majd mai helyzetébe a kréta kollíziót követő oligocén–miocén szerkezeti mozgások során került (HAAS et al. 1999; BUDA & DOBOSI 2004; KOVÁCS et al. 2000).

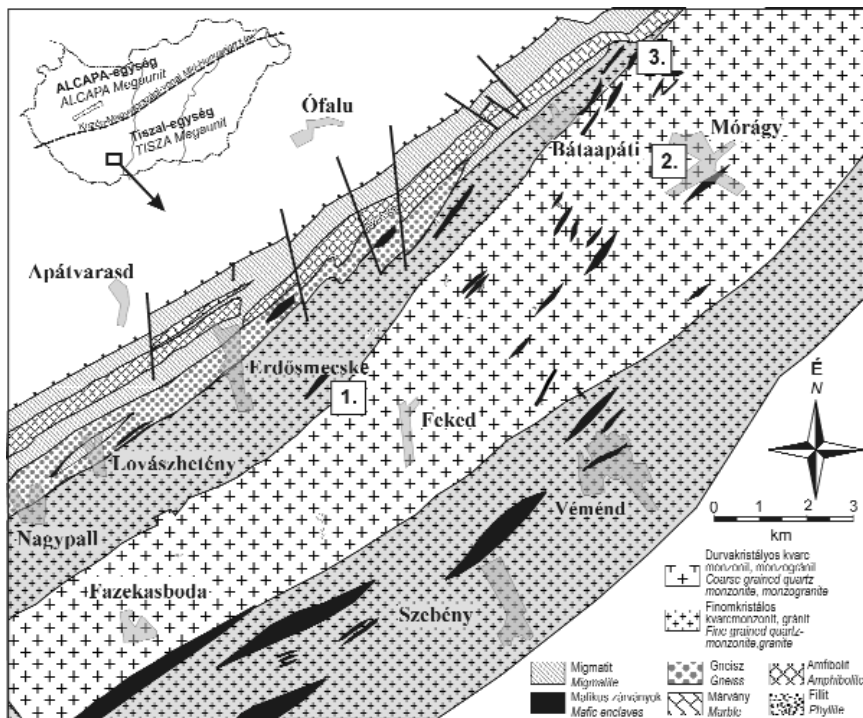
A Mórággyi Gránit Formáció kőzetei heterogén összetételű, K-gazdag, kissé alkáli és monzonitos jellegű, uralkodóan S-típusú granitoidok (BUDA 1985). Négy fő típusra különíthetők el: (1) mikroklin-megakristályokat tartalmazó granitoidok (kvarcmonzonit, monzogránit), (2) amfibol-gazdag kőzetzárványok (szienit, monzonit, diorit), (3) mikrogránitok és (4) pegmatitok (BUDA et al. 2000; BUDA & DOBOSI 2004). A mélységi magmás kőzetek U/Pb izotópos

al. 1998; BUDA et al. 2000; KIRÁLY & KOROKNAI 2004; MAROS et al. 2004).

A Mórággyi Gránit Formáció paleozoos magmás képződéseit a képződésük óta eltelt idő során számos fluidumobilizációs hatás érte a tektonikai mozgások által létrehozott repedésrendszerek mentén. A folyamatok sokszínűsége a repedésrendszerek ásványkötéseinek tükröződik szembevetően. KOVÁCS-PÁLFFY & FÖLDVÁRI (2004) szerint a repedéskötések anyaga gyakorisági sorrendben: karbonátok, kvarc, agyagásványok, klorit, epidot, földpát Fe-oxidhidroxidok, és a tisztán kalcit anyagú repedéskötések. Folyadékzárvány vizsgálati eredményeik arra utalnak, hogy változatos hőmérsékletű (340–20 °C) és összetételű oldatokból váltak ki. GATTER & TÖRÖK (2004) vizsgálati leányegében hasonló következtetésekre vezettek. A repedések többszöri felnyílása és újabb, esetleg eltérő összetételű és hőmérsékletű oldatok megnehezítik a kőzetek időbeliségének rekonstrukcióját és a fluidumobilizációs folyamatok tektonikai eseményekhez való kapcsolását.

Vizsgálataink során arra kerestünk választ, hogy a különböző korú magmás, hidrotermás és tektonikai eseményekhez milyen uralkodó repedésrendszerek kialakulása kapcsolódott, és azok térben és időben milyen fejlődéstörténeten mentek keresztül. A területen mód nyílt arra, hogy a hidrotermás áramlási rendszerek szerkezeti kontrollját a leginkább jellemző repedésrendszerek, ásványosodott erek és kőzetátalakulási zónák terepi tanulmányozása mellett a mikroszkóposan tanulmányozható fluidzárványsíkok orientációjának vizsgálatával együtt jellemezzük. A terepi mérési — dőlés/csapás — adatokat megkíséreltük egy-egy fluidumáramlási folyamathoz kapcsolni, és a feltárások nagyságrendjében tapasztalt jellemzőket összehasonlítottuk a fluidzárványsíkok mikroméreteiben tapasztalható sajátosságokkal.

Az ásványosodott telérek vonalmenti szelvényezése segítségével megbecsülhető a szabad kőzet fluidumáteresztő képessége a hidrotermás oldatáramlás során a feltárás mérettartományában. A fluidumok azonban gyakran nem hoznak létre látványos átalakulási zónákat vagy telékeket, hanem az áramlás a mikrorepedésekben zajlik. Erről tanúskodnak a látszólag üde kőzetben a csak mikroszkóp alatt tanulmányozható fluidzárványsíkok és a nyílt mikrorepedések. A kőzet telérrendszerekből számítható fluidumáteresztő képességét ezért összehasonlítottuk a mikroszkópos mérettartomány alapján számítható paleopermeabilitással. Ugyan a telérrendszerek jelenleg már nem



1. ábra. A Mórággyi-rög földtani felépítése (JANTSKY 1979 után módosítva)

A feltárások: 1 – Erdősmecke, kőfejtő, 2 – Mórággyi községi kőfejtő, 3 – Kismórággyi kőfejtő

Figure 1. Geological map of the Mórággyi region (modified after JANTSKY 1979)

The analysed outcrops: 1 – Erdősmecke quarry, 2 – Mórággyi "Village rock mine", 3 – Kismórággyi quarry

kora 340–350 millió év (KLÖTZLI et al. 2004). KLÖTZLI et al. (2004) meghatározott idősebb átörökített kadomi korokat (608 millió év) is az akcesszórius cirkonban.

A formáció kutatástörténetét, ásványtani és kőzettani jellegzetességeit számos korábbi szakcikk ismertette (JANTSKY 1979; FÜLÖP 1994; BUDA 1985; BUDA & DOBOSI 2004; KLÖTZLI et al. 2004). A terület magmás, metamorf jellemzőivel és szerkezeti elemeivel jelenleg is számos munka foglalkozik a kis és közepes radioaktivitású erőművi hulladéktárolók telephelyének kutatása kapcsán (BALLA et

képesek a fluidumok vezetésére, a nyílt mikrorepedések jelenleg is aktív csatornaként működhetnek, a behegedt fluidzárványosok pedig gyengeségi zónák lehetnek egy újabb tektonikai vagy termális hatás során és újra vezetőkké válhatnak (BENKÓ et al. 2008).

Az ásványosodott erek térbeli és geometriai jellemzőinek analizálásával megvizsgáltuk azt, hogy a telérrendszerek rendelkeznek-e fraktáltulajdonságokkal, és ha igen, akkor mely tulajdonságaikban. A fraktálanalízis segítségével kerestük a választ a hidrotermális aktivitás intenzitására is. A különböző módszerekkel kapott eredmények alapján a repedésrendszerek tér-idő és méretbeli fejlődését rekonstruáltuk, természetesen figyelembe véve az adott módszerek alkalmazásának korlátait. A vizsgálati módszerek részleteit BENKÓ et al. (e kötetben) munkájában közöltük.

**A terepi szelvényezés eredményei:  
a makro-repedésrendszerek jellemzői**

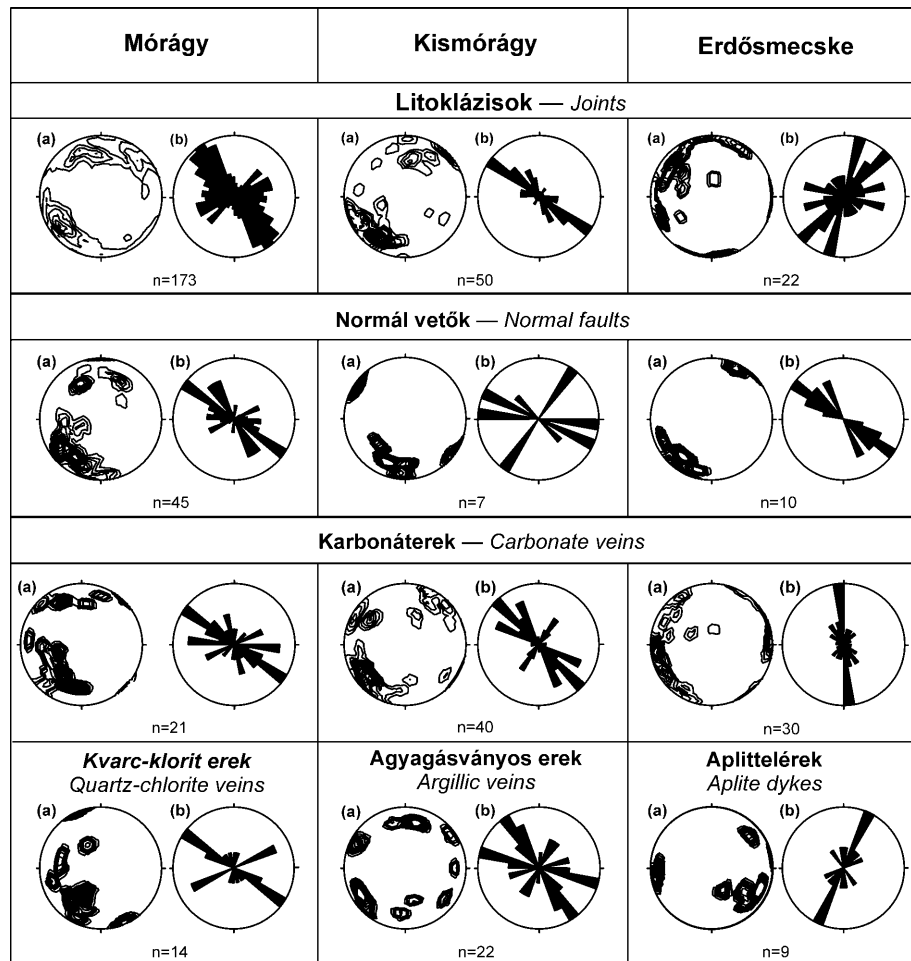
Terepi méréseket három kőfejtőben végeztünk, a vizsgálatok eredményeit az alábbiakban közöljük.

**Mórágy (2. ábra):** A mórágyi kőfejtő mikroklin-megakristályokat tartalmazó üde gránitot tár fel, amelyben mafikus kőzetzárványok is találhatóak. A mafikus kőzetzárványok változatos méretűek (pár centimétertől egy-két méterig). A feltárásban megfigyelt litoklázisok többnyire egymásra közel merőleges ÉNy-DK-i és ÉK-DNy-i csapásúak és 80°-os dőlésűek. Az ÉNy-DK irány erősebben fejlett. A kimért karbonát és kvarc-kloriterek uralkodó csapásiránya ÉNy-DK és dőlése 80°, valamint megjelenik az ÉK-DNy-i és K-Ny-i csapásirány is. Ezek párhuzamosak a litoklázisok irányával. Feltételezésünk szerint, egy korábban képződött, közel merőleges helyzetű repedésrendszer megfelelően orientált szárnyának felnyílása történt meg az aktuális feszültségtérben. A felnyílt repedésekben a hidrotermális oldatáramlás karbonátos, ill. kvarc-kloritos erezést hozott létre. Ezt támasztja alá a normálvetők karbonátos kitöltése is. A feltárásban egy ÉNy-DK-i csapásirányú jobbos oldaltolódási rendszer uralkodik. Az eltolódás meglétét számos

vetőkarc bizonyítja. A normálvetők uralkodó csapásiránya és dőlése szintén ÉNy-DK/80°. ANGELIER (1984) programjával a vetőkarcokon mért pich értékek és terepi dőlés/csapás adatok segítségével kiszámoltuk a feszültségtér tengelyének irányát, amelynek képe ÉK-DNy-i extenziót mutatott.

A felvett szelvény mentén előforduló két pegmatittelér csapásiránya ÉK-DNy, bár megjegyzendő, hogy a pegmatitra inkább a fészkes, lencses megjelenés a jellemző.

**Kismórágyi vasútállomás (2. ábra):** A kismórágyi kőfejtőben a gránit mellett az 1. szelvény 10. méterénél mikrogránit is található. A feltárásban az 1. szelvény 24. méterénél egy 80 mm vastag „bosztonit”-telér (kréta alkálivulkanit) található, amelynek mindkét oldalát 1–2 centiméteres agyagásványos ér kíséri. A telér környezetében sok agyagásványos kitöltésű ér van. Az agyagásványos kitöltések karbonátok közepén jelennek meg, ami arra utal, hogy a karbonátos erek újra felnyíltak. Csapásirányuk ÉNy-DK és NyÉNy-KDK, 80°-os dőléssel. Ezek az irányok természetesen a karbonátok rózsadiagramján is megjelennek. Röntgen pordiffrakciós vizsgálatok alapján ezen erek jellemző agyagásványa kaolinit-dikit-nakrit), infravörös spektroszkópiás vizsgálatok alap-



2. ábra. A terepi szelvényezések során kimért szerkezeti elemek és ásványosodott érrendszerek sztereogramjai (a) és rózsadiagramjai (b)

Figure 2. Structural elements and mineralized veins measured in the outcrops

ján kaolinit. A kimért litoklázisok határozott ÉNy–DK-i csapást és uralkodóan 80° körüli dőlést adnak. A kimért normálvetők csapásiránya NyÉNy–KDK, valamint erre merőleges ÉK–DNY. A számított feszültségtér tenzorai hasonló irányokat mutatnak, mint Mórágyon.

*Erdősmecekei kőfejtő (2. ábra):* A feltárás mikroklin-megakristályokat tartalmazó üde gránitot tárt fel. A kőfejtőben litoklázisok, karbonátos erek, aplittelérek és pegmatitlencsék találhatóak. A kőfejtőben felvett egyik szelvény mentén megfigyelt repedésrendszerek uralkodó dőlése 80°, csapásiránya ÉÉK–DDNy-i és ÉK–DNY-i, valamint NyÉNy–KDK és KÉK–NyDNY-i. Az első két repedésrendszer erősebben fejlett. A kimért karbonát-kalciterek uralkodóan ÉNy–DK-i csapásúak és 80–85° dőlésűek. A második szelvényben mért aplittelérek csapásiránya és dőlése ÉK–DNY/75–80°. A feltárásban mért normálvetők csapása ÉNy–DK-i irányú, dőlése 85° körüli.

Az oldaleltolódások a vetőkarcok alapján balos, illetve jobbos eltolódások. A vetőkarcok segítségével sikerült megmérni a normálvetők és oldaleltolódások pich értékét, aminek alapján a feszültségterek számíthatók. A normálvetők és balos oldalelmozdulások ugyanazon feszültségtérbe tartoznak ANGELIER (1984) számítási módszere alapján. Ugyanilyen jellegű feszültségtérrel állapítottunk meg Mórágyon és Kismórágyon is. Megfigyeltük, hogy ezeket az elmozdulásokat karbonátos kitöltés jellemzi és ezeken jól láthatók a vetőkarcok, tehát megállapítható, hogy az elmozdulás időben a karbonát kiválás után vagy azzal egy időben történt. Azokat a jobbos oldal-elmozdulásokat és normálvetőket, amelyekhez nem tartozik karbonátos kitöltés más feszültségtér jellemzi. MAROS et al. (2004) vizsgálatai alapján ezek a feszültségtérirányok megegyeznek késő-miocén–pliocén során bekövetkezett töréses deformáció irányaiival (ÉK–DNY).

### A mikro-repédrendszer jellemzői a fluidzárványpetrográfia alapján

A konvencionális fluidzárványszegélyvizsgálatokat erdősmecekei pegmatitlencsék pegmatitos kvarckristályából és az erdősmecekei, mórági és kismórági gránit kőzetalkotó kvarckristályjaiból, valamint Erdősmecekeről és Mórágyról származó kalciterekből végeztünk.

### A fluidzárványsíkok típusai




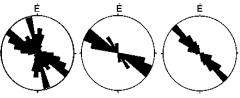
Szobahőmérsékleten a mintákban a következő fázisösszetételű fluidzárvány asszociációkat sikerült elkülönítenünk a kőzetalkotó kvarc behegedt repedéseiben, azaz a fluidzárványsíkokban (3. ábra):

1–2. Kétfázisú folyadék-gázzárványok. A gáz/folyadék aránya 20:80. Többnyire kisméretűek (max. 5 µm), másodlagos zárványsíkok formájában jelennek meg mindhárom területen a gránit kőzetalkotó kvarcban és a pegmatitban.

3–4. Kétfázisú folyadék-gázzárványok. A gáz/folyadék aránya 15:85. Többnyire kisméretűek (2–5 µm), másodlagos zárványsíkok formájában jelennek meg mindhárom területen a gránit kőzetalkotó kvarcban és a pegmatitban.

5. Kétfázisú folyadék-gázzárványok. A gáz/folyadék aránya 15:85. Többnyire kisméretűek (max. 5 µm), elsődleges zárványsíkok formájában jelennek meg a kalcitlencsékben.

6. Kétfázisú folyadék-gázzárványok. A gáz/folyadék aránya 5:95. Többnyire kisméretűek (max. 5 µm), másodlagos zárványsíkok formájában jelennek meg a kalcitlencsékben.

Zárvány típus Fluid inclusion type	Fázisarány Phase ratio	Előfordulási terület Occurrence	Sókonzentráció Salinity	Homogenizációs hőmérséklet Homogenization temperature	Jellemző csapásirány Characteristic orientation
1	F(L)~80%, G(V)~20%	Erdősmeceke	5,0-7,3 NaCl	227-275°C	
2	F(L)~80%, G(V)~20%	Kismórágó	9,98-10,85 NaCl	250-293°C	
3	F(L)~85%, G(V)~15%	Mórágó	0,9-2,2 NaCl	137-209°C	
4	F(L)~85%, G(V)~15%	Erdősmeceke, Mórágó, Kismórágó	1,9-4,5 NaCl	130-238°C	
5	F(L)~85%, G(V)~15%	Mórágó	2,6-4,4 NaCl	129-167°C	-
6	F(L)~95%, G(V)~5%	Erdősmeceke, Mórágó	0,3-1,4 NaCl	61-107°C	-

3. ábra. A fluidzárványsíkok petrográfiaja, mikrotermometriai vizsgálatának eredményei és a hozzájuk tartozó zárványsíkok csapásiránya

Figure 3. Results of fluid inclusion petrography, microthermometry and the orientation of the different fluid inclusion plane generations

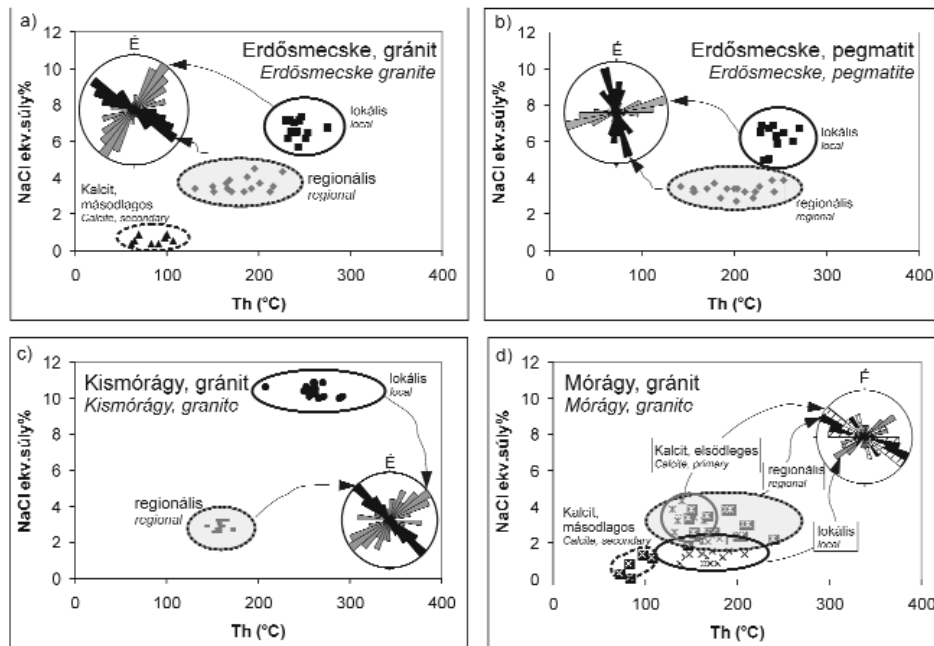
*Az erdősmecskei gránit és pegmatit kvarckristályaiban végzett fluidzárványsík orientációs vizsgálatainak eredményei (3., 4. ábra a–b)*

A gránit kőzetalkotó kvarckristályaiban az univerzális forgatóasztallal végzett mérések alapján ÉNy–DK és ÉK–DNY-i csapásirányok jellemzők a fluidzárványsíkokra. Képelemző módszerrel (Anima) egy határozott harmadik irányt is sikerült elkülöníteni, ÉÉNy–DDK-i csapással. A terepi mérések alapján a karbonátterek jellemző csapásiránya ÉNy–DK és ÉÉNy–DDK (2. ábra). A pegmatit

irány mellett egy harmadik, NyÉNy–KDK-i csapásirányt is kimutattak. Ez utóbbi a terepen mért agyagásványos erek egyik csapásirányával párhuzamos (2. ábra).

*Az mórági gránit kvarckristályain végzett fluidzárványsík orientációs vizsgálatok eredményei (3., 4. ábra d)*

A mórági kőfejtőben az univerzális forgatóasztallal és képelemző programmal végzett vizsgálatok szintén ÉNy–DK és egy ÉK–DNY-i csapású fluidáramlási repedésrendszert azonosítottak a kőzetalkotó kvarcban. E repedésrendszerek orientációi a karbonátos erek csapásirányaival párhuzamosak, és hasonló csapásirányokat mutat a kvarc-klorit ezredések egyik csoportja is (2. ábra).



4. ábra. A fluidzárványsík mikrotérmetriai vizsgálatának eredményei és a hozzájuk tartozó zárványsíkok csapásiránya

Figure 4. Results of fluid inclusion microthermometry and the orientation of the fluid inclusion generations

kvarckristályain végzett vizsgálataink alapján szintén az ÉNy–DK és ÉK–DNY-i csapásirány jellemző a fluidzárványsíkokra.

*Az kismórági gránit és mikrogránit kvarckristályain végzett fluidzárványsík orientációs vizsgálatok eredményei (3., 4. ábra c)*

A feltárásból származó gránitot szintén ugyanaz a két csapásirány (ÉNy–DK; ÉK–DNY) jellemzi, mint amelyeket az erdősmecskei kőfejtőben meghatároztunk. A terepi megfigyelések alapján ezek az irányok a karbonátos ezredéseket szintén jellemzik (2. ábra), azonban a begyűjtött ÉNy–DK-i csapású karbonáttelérekben nem lehetett fluidzárvány vizsgálatokat végezni a telérek nagyon finomszemcsés jellege miatt. A gránitban található másik irány szintén a terepen megfigyelt karbonáttelék csapásirányával egyezik meg.

A mikrogránit kvarckristályainak fluidzárványsíkjain végzett vizsgálatok az ÉNy–DK és KÉK–NyDNY-i csapás-

**A fluidzárványsík mikrotérmetriai vizsgálatának eredményei**

*Az erdősmecskei kőfejtő (4. ábra a–b)*

A pegmatitban található 1. típusú zárványok homogenizációs hőmérsékletei 227 és 270 °C, míg a gránitos kvarc fluidzárványsíkjában 230–275 °C közötti. E zárványokban a fluidum eutektikus hőmérséklete –22 és –21 °C között van, aminek alapján NaCl–H<sub>2</sub>O rendszerrel modellezhetjük fluidzárványainak összetételét.

(NaCl–H<sub>2</sub>O rendszer eutektikus hőmérséklete –21,1 °C, az ennél alacsonyabb hőmérsékletek más kationok jelenlétét is feltételezik; BODNAR & VITYK 1994). A jégfázis olvadáspontja a pegmatitban –3,0 és –4,3 °C között változik, ami 6,2–7,3 NaCl ekvivalens súly%-nak felel meg. A gránit kvarckristályainak fluidzárványsíkjában a jégfázis olvadáspontok –3,5 és –4,6 °C közöttiek, melyek 5,0–6,9 NaCl ekv. súly% sókoncentrációnak felelnek meg.

A 4. típusú zárványok hevítése során a homogenizációs hőmérséklet a pegmatitban 141 és 253 °C, a gránitban 130 és 226 °C közé esik. Itt szintén NaCl–H<sub>2</sub>O típusú oldatösszetételeket tapasztaltunk. A pegmatitban e zárványokban a jégfázis olvadása –1,7 és –2,3 °C között következett be, aminek alapján a sókoncentráció 2,7–3,7 NaCl ekvivalens súly% közötti. A gránitban a jégfázis olvadáspontja –1,9 és –2,7 °C közötti, mely 3,2–4,5 NaCl ekvivalens súly% sókoncentrációnak felel meg.

Az 6. típusú már a kalcittelérekben mért másodlagos zárványokhoz tartozik, mely 61 és 107 °C homogenizációs

hőmérséklettel és a jégfázis  $-0,2 - -0,5$  °C közötti olvadásponttal rendelkeznek. Ez utóbbi adatok 0,35–0,87 NaCl ekvivalens súly%-nak felelnek meg.

#### *A mórágyi kőfejtő (4. ábra d)*

A gránit kőzetalkotó kvarckristályáiban a 3. típusú zárványok homogenizációs hőmérséklete 137 és 209 °C között van. Az eutektikus hőmérséklete közel áll a NaCl-H<sub>2</sub>O rendszer eutektikus pontjához, azaz  $-22$  és  $-21$  °C közötti. A sótartalom 0,9–2,2 NaCl ekvivalens súly% között van a fagyáspontra megfelelően ( $-0,5$  és  $-0,9$  °C).

A gránitban megjelenő másik zárványgeneráció a 4. típus, mely Erdősmecskén is előfordult. Homogenizációs hőmérséklete 145 és 238 °C között változik. A jégfázis olvadáspontja ( $-0,8$  és  $-2,3$ ) alapján a sókoncentráció 1,9–3,86 NaCl ekvivalens súly%.

A kalcitellérben lévő 5. típusú zárványok elsődleges típusúak (azaz a kalcitér képződésének körülményeit rögzítik). Viszonylag alacsony homogenizációs hőmérsékletűek ( $129-167$  °C). E zárványokban az eutektikus hőmérséklet  $-21$  °C körüli, ami a NaCl-H<sub>2</sub>O rendszernek megfelelően. A jég olvadáspontja  $-1,5$  és  $-2,6$  °C közötti. Ezen hőmérsékletek alapján a sókoncentráció 2,6–4,4 NaCl ekvivalens súly%.

A szintén kalcitellérben mért másodlagos zárványok (6. típus) homogenizációs hőmérséklete 72 és 107 °C közötti. A jégfázis olvadáspontja  $-0,2$  és  $-0,8$  °C között változott, így a sókoncentráció értéke 0,3–1,4 NaCl ekv. súly%.

#### *A kismórágyi kőfejtő (4. ábra c)*

Ezen a területen a gránit kvarckristályainak fluidzárványsíkjaiban szintén megtalálhatóak a 4. típusú zárványok, 141 és 170 °C közötti homogenizációs hőmérséklettel. Az olvadáspontjuknak megfelelően ( $-1,5 - -1,9$  °C) 2,5 és 3,2 NaCl ekvivalens súly% közötti a sókoncentrációjuk.

Az itt előforduló 2. típusú fluidzárványok homogenizációs hőmérséklete 250–293 °C. Az eutektikus hőmérséklet  $-22 - -21$  °C, azaz a zárványösszetétel itt is NaCl-H<sub>2</sub>O típusú. A jégfázis olvadáspontok alapján ( $-6,6$  és  $-7,3$  °C között) a sókoncentráció 9,98–10,85 NaCl ekvivalens súly%.

### **A kőzetalkotó kvarc fluidzárványsík orientációi és zárványaik mikrotermometria adatai közötti összefüggések**

A különböző előfordulásokból származó gránit kőzetalkotó kvarckristályáiban előforduló fluidzárványsíkok orientációi és a bennük csapódott zárványok homogenizációs hőmérséklet és a sókoncentráció adatai közötti összefüggéseket a 4. ábra szemlélteti. Az eredmények alapján megállapítható, hogy egy regionális, mindhárom vizsgált területre jellemző és három lokális oldatáramlási rendszer különíthető el a gránithoz kapcsolódóan. A regionális

hidrotermás eseményre a fluidzárványok 130 és 238 °C közötti homogenizációs hőmérsékletei jellemzők. E zárványokban a sókoncentráció értéke 1,9–4,5 NaCl ekvivalens súly% és síkjaiknak csapásiránya ÉNy–DK és NyÉNy–KDK. A Mórágyon talált karbonátér primer zárványai hasonló mikrotermometria adatokkal jellemezhetőek és uralkodó csapásirányuk ÉNy–DK-i (2. ábra). Tehát a karbonátterezés valószínűleg e regionális esemény során képződött.

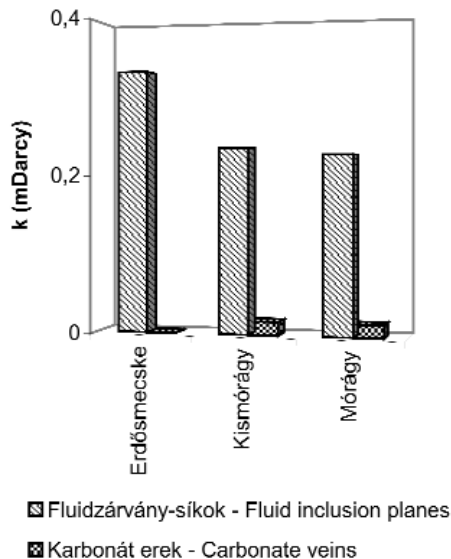
Mindhárom lokális eseményt jelző zárványsíkok csapásiránya megegyezik, mégpedig ÉK–DNY-i, de eltérőek az egyéb mikrotermometria paraméterei és így nem ugyanazon hidrotermás eseményhez kapcsolhatóak. Erdősmecskén és Kismórágyon a lokális hidrotermás eseményekhez kapcsolódó fluidzárványok homogenizációs hőmérsékletei hasonlóak (227–293 °C), de sókoncentrációjuk eltér, utóbbi magasabb (3. ábra). Mórágyon a homogenizációs hőmérséklet és a sókoncentráció is alacsonyabb (137–209 °C; 0,9–2,2 NaCl súly%) az előző két területhez képest.

### **A permeabilitásvizsgálatok eredménye**

Permeabilitásszámításokat a karbonátterek (SNOW 1969) és a fluidzárványsíkok alapján (LESPINASSE 2002, LESPINASSE et al. 2005) végeztük. A számítási módszerek részleteit BENKÓ et al. (2008) cikkében közöltük. A különböző képződményekből eltérő módszerekkel számított paleopermeabilitás értékek számértékben való összehasonlítása nem, azonban a tendenciák összehasonlítása lehetséges. A kapott értékek a hidrotermás rendszer által érintett kőzettest látszólagos, a kőzetalkotó kvarc repedezettségére, illetve a makroszkóposan észlelhető repedésrendszerekre vonatkozó paleopermeabilitását tükrözik és nem a kőzet valódi permeabilitás értékeit, bár ez utóbbiakkal korrelálnak (POROS 2007). Az erek és fluidzárványsíkok az idő folyamán fokozatosan hozták létre a jelenlegi repedésrendszert. Ez azt jelenti, hogy a hidrotermás telérek és a fluidzárványsíkok nem pillanatszerűen egy már meglévő nyílt repedésrendszert töltöttek ki illetve forrasztottak be, hanem annak képződése epizodikus, többfázisú folyamat volt és a jelenleg észlelt állapot egy hosszabb felnyílási-behegedési folyamat végeredménye. Ezen értékek tehát egy végállapotot tükröznek, és nem adnak információt a repedésrendszer hidrotermás oldatáramlások előtti állapotáról. Egyes repedésrendszerek közel párhuzamos irányokban fejlődtek ki (lásd Mórágyon karbonát és kvarctelérek), így irány szerint sem lehet különbséget tenni. Feltételezhető a párhuzamos irányok miatt a repedésrendszerek felújulása, esetleg áttöltődése, így annak megállapítása, hogy melyik hidrotermális rendszer milyen porozitást hozott létre, már teljesen lehetetlenné vált.

A legnagyobb paleopermeabilitást a zárványsíkok alapján (5. ábra) Erdősmecskén tapasztaltuk (0,33 mDarcy), bár ez az eltérés nagyon kicsi a másik két kőfejtő permeabilitásértékeihez (0,23 mDarcy, 0,22 mDarcy) képest. A karbonát-

	Permeabilitás zárványsíkok alapján Permeability calculated from fluid inclusion planes	Permeabilitás a karbonátterek alapján Permeability calculated from carbonate veins
Erdősmecke	0,334	0,0005
Kismórágy	0,236	0,017
Mórágy	0,227	0,016



5. ábra. A paleopermeabilitás értékei a fluidzárványsíkok és a karbonátterek alapján

Figure 5. Paleo-permeability, calculated from fluid inclusion planes and carbonate veins

erek permeabilitásértékei alapján fordított képet látunk, Erdősmeckén kaptuk a legkisebb (0,0005 mDarcy) értéket, Mórágyon és Kismórágyon viszont ismételtelen hasonló permeabilitásértékeket kaptunk (0,17 és 0,16 mDarcy) (5. ábra). A különbség abból adódik, hogy amíg Mórágyon és Kismórágyon mindkét hidrotermás irányhoz (ÉNy–DK, ÉK–DNy) kapcsolódott karbonátterek, addig Erdősmeckén csak az ÉNy–DK-i csapású hidrotermás rendszerhez csatlakozott karbonátkitöltés. A karbonátterek alapján számított paleopermeabilitás minden esetben elmaradt a fluidzárványsíkokétól, így bizonyítható, hogy a kőzet fluidum-áteresztőképességét nem elsősorban a makro-, hanem a mikrorepedések biztosítják.

### Fraktálanálízis

A fraktálanálízist GILLESPIE et al. (1999) alapján végeztük. A fraktálanálízisből levonható következtetések és a repedésrendszer fejlődés kapcsolatát BENKÓ et al. (2008) összegezte.

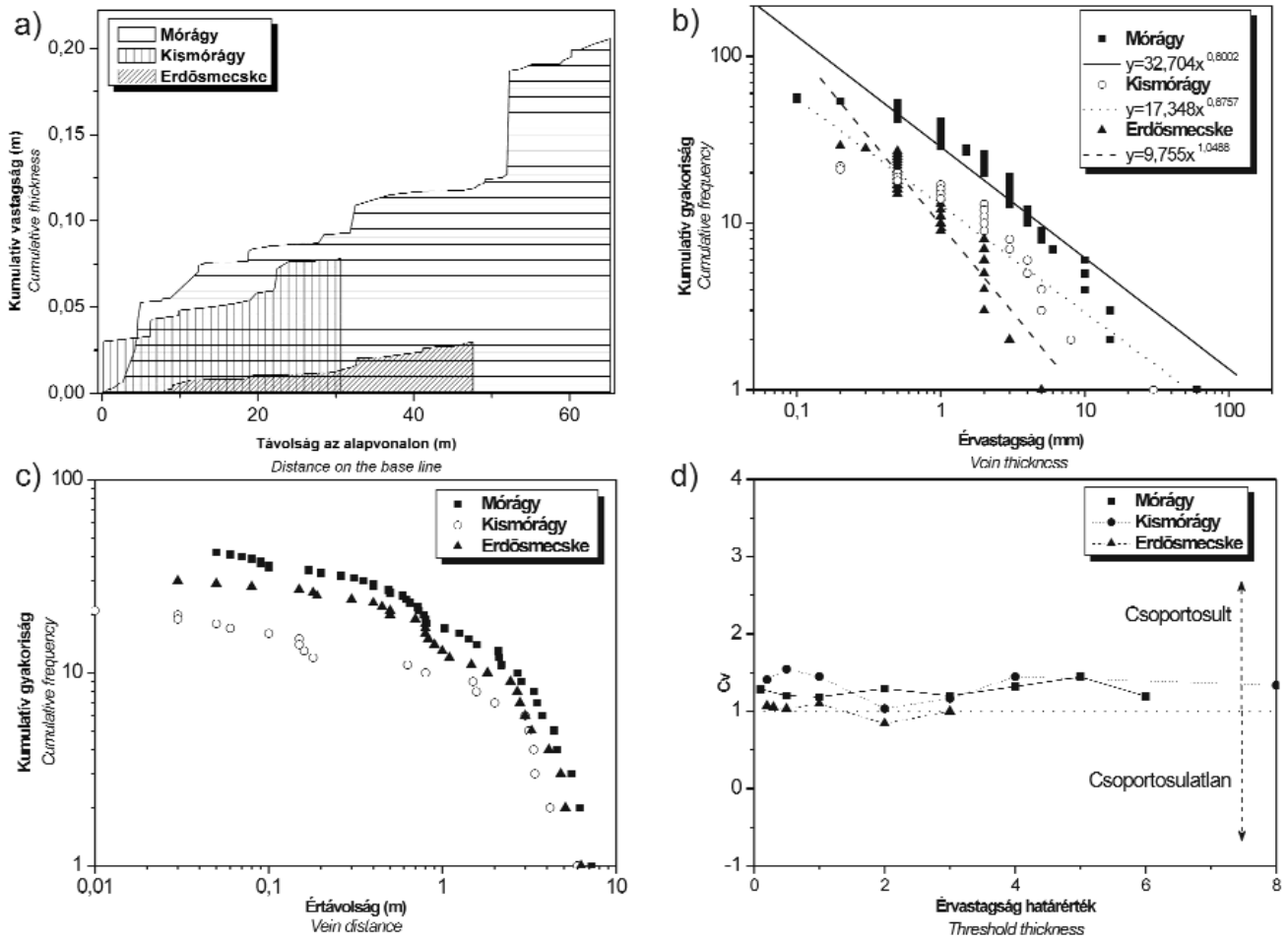
A Mórágyi Gránit vizsgált feltárásaiban szelvényezett érrendszerek (ásványkiválásokkal kitöltött repedések —

paleofluidum-áramlási csatornák) lépcsős diagramjai (6. ábra a) minden esetben szabálytalan elrendeződést mutatnak, ami a rétegzetlen kőzettestet érő feszültség inhomogén felhalmozódásának következménye. Az inhomogén érelaszás előrevetíti, hogy a repedések nem Poisson (véletlenszerű) vagy periodikus elrendeződésűek, ahogy az a rétegzett kőzetekben jellemző, hanem Kolmogorov-hatvány vagy fraktáloslaszt vesznek fel, ahogy az rétegzetlen kőzetben elvárható.

Az érvastagság–kumulatívgyakorisági diagram (6. ábra b) alapján mindhárom feltárás érvastagságainak pontsorára egyenes illeszthető, ezért mindhárom érrendszer fraktáltulajdonságokkal rendelkezik. A kismórágyi és a mórágyi feltárások érvastagságeloszlása majdnem azonos, 0,8 körüli  $D_m$  értéket mutat, míg az erdősmeckei kalciterek  $D_m$  értéke 1,1. Ezek az értékek megfelelnek más területeken leírt fraktáldimenzióknak (GILLESPIE et al. 1999), érdemes azonban egymáshoz való viszonyukat is vizsgálni. A 0,8 körüli  $D_m$  értékek Mórágyon és Kismórágyon egy fejlettebb, összekötöttebb erekből álló repedésrendszert valószínűsítenek, míg Erdősmeckén az 1,04-es  $D_m$  érték a kalciterek izoláltságát, azaz egy gyengébben fejlett érhálózatot tükröz.

A vizsgált három kőfejtőben az értávolságok eloszlása (6. ábra c) legjobban lognormális és exponenciális eloszlással közelíthető (bár egyes szakaszokra egyenes lenne fektethető), ami ellentmondásban van a telérvastagságok alapján a telérvastagság megállapított fraktálvisselkedéssel. Az értávolság-diagramok azonban számos körülményre „érzékenyek”: (1) a nem mérhető méretű erek kimaradnak a vizsgálatból, (2) az érrendszert elválasztó alapvonal (a feltárás) csapásiránya befolyásolja hány eret és milyen távolságban metsz az alapvonal (BENKÓ 2003). Az egy dimenzióban vizsgált értávolságok a nem rétegzett kőzetekben más területeken (GILLESPIE et al. 1999) többnyire szintén lognormális vagy exponenciális eloszlást mutattak, ami az ásványos erek véletlenszerű elrendezését feltételezi. Ez a jelenség azonban egyértelműen a nem reprezentatív mintavételre vezethető vissza, ugyanis egyes, kiválóan vizsgálható és több mérettartományban vizsgált területeken egyértelműen bebizonyosodott, hogy a telérvastagságok is fraktál jellemzőkkel rendelkeznek (GILLESPIE et al. 1999). A telérvastagságok fraktálanálízise így nem cáfolja és nem erősíti meg a kalcitérhálózat kialakulásának fraktáljellegét.

A variációs együtthatók (6. ábra d), minden határértékre mindhárom feltárásban 1-nél nagyobb értékeket adnak leszámítva egy esetet, ami a kalciterek szabályos, Kolmogorov- vagy fraktálmódellek szerinti csoportosultságát bizonyítja. Más, rétegzetlen kőzetekben (GILLESPIE et al. 1999), a mecsekihez hasonló, rendezetlen lefutású pontsorokat kaptak, növekvő érvastagság függvényében csökkenő  $C_v$  értékekkel. A csökkenő (valamint Kismórágy esetében inkább stagnáló)  $C_v$  értékek az érrendszer képződésének fraktáloslasztó-modell szerinti törvényszerűségét tükrözi, amennyiben a vastagabb erek erősebben csoportosultak, mint a vékonyabbak. A mecseki három feltárás



6. ábra. A karbonátos érrendszerek fraktálanálízisének eredményei  
 Figure 6. Results of fractal analysis of the carbonate veins

esetében ez utóbbi tulajdonság nem áll fenn, a vastag és vékony erek közti csoportosultságban nincsen jelentős eltérés.

### Következtetések

A Mórógyi Gránit három feltárásában a magmás telérek, nyílt makrorepedések, fluidzárványsíkok és hidrotermás erek vizsgálata alapján az alábbi következtetésekre jutottunk:

— A gránit benyomulásakor fennálló feszültségtérrel az aplittelérek csapása (ÉK–DNy) alapján szerezhethetünk információt, eszerint a gránit megszilárdulása során ÉNy–DK-i extenziót feltételezhetünk.

— A gránit hűlési repedésrendszeréről nincsen információnk, elképzelhető hogy a Velencei-hegységhez hasonlóan egy egymásra merőleges repedésrendszerpár már ekkor létrejött, azonban erre nincsen közvetlen bizonyíték.

— A regionális oldatáramlás ÉNy–DK csapású repedésrendszer mentén történt, ami ÉK–DNy extenziót bizonyít az oldatáramlás során. A karbonátterek egy csoportja hasonló csapással rendelkezik és elsődleges fluidzárványaik mikrotermometriai jellemzői megegyeznek a gránit

kőzetalkotó kvarcában talált másodlagos zárványokéval, így a karbonátterezések egy részéért is a regionális oldatáramlás felelős.

— Lokális, csak egy-egy feltárára jellemző oldatgenerációból hármat sikerült elkülöníteni. A lokális események közös jellemzője az erdősmecke és a kismórógyi kőfejtőben, hogy magasabb homogenizációs hőmérsékletűek és magasabb szalinitásúak a regionális eseménynél és azonos, ÉK–DNy-i a csapásuk. Elkülönítésük alapja, hogy az erdősmecke kőfejtőben a zárványok szalinitása valamivel kisebb a kismórógyinál. A Mórógyi feltárás lokális fluidumai még a regionális fluidgenerációnál is kisebb szalinitásúak és kicsivel alacsonyabb hőmérsékletűek, bár zárványsíkjaik orientációja, megint csak ÉNy–DK. Mivel az ásványosodott érrendszerek (karbonát, kvarc-klorit, agyagásványos) minden esetben párhuzamosak a regionális érrendszer orientációjával, ezért kapcsolatuk a lokális eseményekkel nem tűnik valószínűnek. A kimért regionális eseménnyel való kapcsolatuk teljes bizonyossággal csak arra a karbonátér-generációra bizonyítható, amelyikben primer zárványokat sikerült kimérni. A regionális fluidgeneráció és a kvarc-klorit ásványparagenezis közti kapcsolatot csak feltételezhetjük, de primer zárványok hiányában ez nem bizonyítható.



— A nyílt litoklázisrendszer Kismórágyon és Mórágyon ÉNy–DK csapású, azaz párhuzamos a regionális oldat-áramláshoz tartozó fluidzárványsíkok orientációjával. Erdősmeckén egy erre merőleges repedésrendszer dominál, bár a normálvetők itt szintén ÉNy–DK csapásúak.

— A legfiatalabb repedések orientációját, más területekhez hasonlóan (Velencei-hegység, BENKÓ et al. 2008) tehát a Mórági Gránit esetében is a hidrotermás oldat-áramlást biztosító zárt repedésrendszer felújulása determinálja.

— A kisszámú észlelt vető menti elmozdulás komplex szerkezetföldtani rekonstrukcióra nem alkalmazható.

— Granitoidok hidrotermális rendszereiben megfigyelték, hogy nagy  $D_m$  értékek esetén a repedések izoláltsága folytán a fluidáramlás nem fejlett törések mentén, hanem a kisebb (rövidebb és vékonyabb) repedések mentén történik, így a fluid-kőzet kölcsönhatás intenzívebb (ROBERTS et al. 1998). Az intenzív kőzet-fluid kölcsönhatás viszont ásványos átalakulásban jelentkezik (pl. agyag-ásványosodásban, mint például a Velencei-hegységben (BENKÓ et al. 2008). A mecseki feltárásokban az átalakultság mértékét ugyan részletesen nem vizsgáltuk, azonban

egyik kőfejtőben sem figyelhető meg jelentős, a teljes kőzetre kiható hidrotermás kőzetátalakulás. A fluidzárványsíkok magasabb száma és a  $D_m$  értéke az erdősmeckei kőfejtőben a mórági és kismórági kőfejtőkhöz viszonyítva világosan tükrözi, hogy a fluidáramlás nem egy jól fejlett gerinccsatornával rendelkező telérrendszeren, hanem sok kisebb, egyenrangú repedésen, és a mikrorepedéseken keresztül történt. A kőzetátalakulás hiánya feltehetően a fluidumoknak a kőzetre vonatkoztatott alacsony aktivitásával magyarázható. A kismórági és mórági feltárásokban a zárványsíkok száma alacsonyabb, a karbonátterek alapján számolt paleopermeabilitás viszont magasabb, ami egy fejlettebb, fő vezetősatornával rendelkező repedés-hálózatot valószínűsít.

### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk megköszönni bírálóink dr. KIRÁLY Edit és dr. KOROKNAI Balázs minden részletre kiterjedő alapos bírálatát és értékes észrevételeit. Az infravörös vizsgálatok elvégzéséért dr. VASS Elemért illeti köszönet.

### Irodalom — References

- ANGELIER, J. 1984: Tectonic analysis of fault slips data soft. — *Journal of Geophysical Research* **8** (B7), 5835–5848.
- BALLA Z., CHIKÁN G., DUDKO A., GYALOG L., HORVÁTH I., KÓKAI A., KOLOSZÁR L., MAROS GY., MARS I., PÁLFI É., PALOTÁS K., RÁLISCH-FELGENHAUER E., ROTÁR-SZALKAI A., TÓTH GY., VETŐ I., MOLNÁR P., TUNGLI GY., BUDA GY., DIDRÓI-PUSKÁS Z., MEZŐ GY. & SZILÁGYI G. 1998: Kis és Középes radioaktivitású erdőmüvi hulladékok végleges elhelyezése. Telephelykutató és alkalmazási vizsgálat zárójelentése, Üveghuta 1997–1998. — *Kézirat*, Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- BENKÓ ZS. 2003: Hidrotermális áramlási rendszerek szerkezeti kontrolja a Velencei-hegység keleti részében repedésrendszerek, érhálózatok és fluidzárványsíkok vizsgálata alapján. — *Diplomamunka*, ELTE Budapest, 106 p.
- BENKÓ ZS., MOLNÁR F. & LESPINASSE M. 2008: Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában I.: Mőszertani alapvetés és alkalmazás a Velencei-hegység fluidmobilizációs folyamataira. — *Földtani Közlemény* **138/3**, 229–246.
- BODNAR, R. J. & VITYK, M. O. 1994: Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. — In: DE VIVO, B., FREZZOTTI, M. L. (eds): Fluid inclusions in minerals: Methods and applications: Short Course of the Working Group (IMA) "Inclusions in Minerals", September 1–4, 1994, Pontignano-Siena, 117–130.
- BUDA Gy. 1985: Variszkuszi korú kollíziós granitoidok képződése Magyarország, Ny-Kárpátok és a Központi Cseh (bohémiai)-masszívum granitoidjainak példáin — *Kandidátusi értekezés tézisei*, ELTE, Budapest, 147 p.
- BUDA, Gy. & DOBOSI, G. 2004: Lamprophyre-derived high-K mafic enclaves in Variscan granitoids from the Mecsek Mts. (South Hungary) — *N. Jb. Miner. Abh.* **180**, 115–147.
- BUDA GY., PUSKÁS Z., GÁL-SÓLYMOS K., KLÖTZLI U. & COUSENS L. B. 2000: Üveghutai mélyfúrások kristályos kőzeteinek ásvány-kőzettani és geokémiai jellemzése (Mórági-rög) — *MÁFI Évi. Jel.* **1999**, 245–252.
- FÜLÖP J. 1994: *Magyarország geológiája Paleozoikum II.* — Akadémia Kiadó, Budapest, 306–321, 391–394.
- GATTER, I. & TÖRÖK, K. 2004: Mineralogical notes and fluid inclusion studies on quartz-feldspar granite pegmatites and quartz veins from Mórág and Erdősmecke granitoid, S-Hungary — *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged* **45/1**, 39–48.
- GILLESPIE, P., JOHNSTON, J. D., LORIGA, M. A., MCCAFFREY, K. J. W. & WATTHERRSON, J. 1999: Influences of layering on vein systematics inline samples. — In: MCCAFFREY, K. J. W., LONERGAN, L. & WILKINSON, J.: Fractures, fluid flow and mineralization. — *Geological Society Special Publication, London* **155**, 35–56.
- JANTSKY B. 1979: A mecseki gránitosodott kristályos alaphagység földtana — *MÁFI Évkönyv* **60**, 385 p.
- HAAS, J., HÁMOR, G. & KÖRPÁS, L. 1999: Geological setting and tectonic evolution of Hungary. — *Geologica Hungarica series Geologica* **24**, 179–196.
- KIRÁLY E. & KOROKNAI B. 2004: A Mórági-rög ÉK-i részének magmás és metamorf fejlődéstörténete — *MÁFI Évi. Jel.* **2003**, 311–318.
- KLÖTZLI, U. S., BUBA, 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.
- KOVÁCS-PÁLFFY P. & FÖLDVÁRI M. 2004: Hidrotermális képződmények és jelenségek a Mórági Gránit Formációban — *MÁFI Évi. Jel.*, **2003**, 327–331.

- KOVÁCS, S., HAAS, J., CSÁSZÁR, G., SZEDERKÉNYI, T., BUDA, GY. & NAGYMAROSY, A. 2000: Tectonostratigraphic terranes in the pre-Neogene basement of the Hungarian part of the Pannonian area — *Acta Geologica Hungarica* **43/3**, 225–328.
- LESPINASSE, M., DÉSINDES, L., FRATCZAK, P. & PETROV, V. 2005: Microfissural mapping of natural cracks in rocks: Implications for fluid transfers quantification in the crust. — *Chemical Geology* **223**, 170–178.
- MAROS GY., KOROKNAI B., PALOTÁS K., FODOR L., DUDKO A., FORIÁN-SZABÓ M., ZILAHÍ-SEBESS L. & BÁN-GYŐRY E. 2004: A Mórággyi-rög ÉK-i részének tektonikai elemzése és szerkezetalakulása — *MÁFI Évi Jelentés*, **2003**, 387–394.
- POROS Zs. 2007: A Mórággyi Gránit paleo-fluidumáramlás rekonstrukciója és repedésrendszereinek vizsgálata Bátaapáti fúrásokban. — *Szakkolgozat* ELTE TTK Ásványtani Tanszék, 126 p.
- ROBERTS, S., SANDERSON, D. J. & GUMIEL, P. 1998: Fractal analysis of Sn-W mineralization from Central Iberia: Insights into the role of fracture connectivity in the formation of an ore deposit. — *Economic Geology* **93**, 360–365.
- SNOW, D. T. 1969: Anisotropic permeability of fractured media. — *Water Resource Research* **5/6**, 1273–1289.
- Kézirat beérkezett: 2007. 10. 04.