

Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedezettségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában III.: A Bábaapáti (Üveghuta) radioaktív hulladéktároló telephely kutatófúrásaiban végzett vizsgálatok eredményei

POROS Zsófia¹, MOLNÁR Ferenc¹, KOROKNAI Balázs², Marc LESPINASSE³, MAROS Gyula², BENKÓ Zsolt¹

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Ásványtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C., poroszsofi@gmail.com, molnar@abyss.elte.hu, benkoo@elte.hu

²Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14., koroknai@mafi.hu, maros@mafi.hu

³Henri Poincaré Université Nancy 1, Nancy, Franciaország, marc.lespinasse@g2r.uhp-nancy.fr

*Application of studies on fluid inclusion planes and fracture systems in the reconstruction of the fracturing history of granitoid rocks III:
Results of studies in drillcores from the radioactive waste depository site at Bábaapáti (Üveghuta)*

Abstract

This study concerns investigations into oriented drill cores from granitoid rocks (i.e. Mórággy Granite Formation) from the Bábaapáti (Üveghuta) Nuclear Waste Depository Site. Based on fluid inclusion studies in fluid inclusion planes from rock-forming quartz and in hydrothermal veins, five fluid-flow events were distinguished. Their relative ages and main orientations were also determined.

1st event: This event is related to the formation of the Variscan Mórággy Granite and can be traced in the primary fluid inclusions of pegmatoids. The inclusions — which entrap this type of fluid —, have a homogenization temperature between 260–290 °C and a salinity of 5–6 wt% NaCl equivalent. With respect to pressure correction, a formation temperature of 500–550 °C can be assumed for the pegmatoids. The fluid-flow took place in NNE–SSW-trending fractures.

2nd event: This took place along NE–SW and NW–SE-trending fractures. The fluid can be interpreted in the NaCl–CaCl₂–H₂O system with an average salinity of 22 wt% CaCl₂ equivalent. Homogenization temperatures of the fluid inclusions vary between 175–255 °C. This fluid may be related to either a metamorphic process or it may have a deep basinal origin.

3rd event: In this event quartz and calcite veins were the products of a regional hydrothermal event, probably (Late) Cretaceous in age. Fluid-migration took place both in NE–SW and NW–SE-trending fracture systems. Primary fluid inclusions of the vein-filling quartz have homogenization temperatures between 100–200 °C and a salinity of 8–14 wt% NaCl equivalent. Fluid inclusions in vein-filling calcite have a wide range of homogenization temperatures (i.e. between 100–250 °C), while salinities vary between 0.2–5 wt% NaCl equivalent.

4th event: This took place along — presumably — reactivated NW–SE trending fractures. The event, certainly younger than Cretaceous volcanism, is presumably Early Palaeogene in age. The fluid can be interpreted in the NaCl–CaCl₂–H₂O system, characterized by an average salinity of 19 wt% CaCl₂ equivalent. The inclusions have moderate (60–120 °C) homogenization temperatures.

5th event: In this event a low-temperature fluid-circulation can be assumed and it is characterized by meteoric solutions. A Late Miocene – Pliocene uplift may have triggered the reopening of fractures and these served as channels for the migrating fluids.

Our investigations also indicated that the orientation of open micro- and macrofracture-systems show great similarities.

Keywords: fluid inclusion plane, open microcrack, Mórággy Granite Formation, Bábaapáti Nuclear Waste Depository Site, Mórággy Hills

Összefoglalás

Munkánkban a Mórággyi Gránit Formációt vizsgáltuk folyamatos magvétellel mélyített fúrásokban, amelyek az RHK Kft. megrendelésére készült földtani kutatás során mélyültek a kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végső elhelyezésének céljából Bábaapáti térségében.

Vizsgálatainkat a hulladéktároló telephely Mórággyi Gránitot harántoló fúrásaiból származó, orientált fúrómagokon végeztük. A vizsgált fúrómagok orientálása a komplex digitális archiváló és feldolgozórendszer (ImaGeo, Coredump)

segítségével történt. A granitoid kőzetek kőzetalkotó kvarckristályaiban található fluidzárványsíkok és a kiválasztott hidrotermális erezések ásványain végzett fluidzárvány-vizsgálatok segítségével öt fluidummigrációs eseményt azonosítottunk és meghatároztuk azok relatív időrendiségét és fő irányait is:

1. *esemény*: a variszkuszi gránitképződés késő magmás fázisához köthető fluidummigráció, amely pegmatoidok primer fluidzárványaiban nyomozható. E fluidumot bezáró zárványok homogenizációs hőmérséklete 260–290 °C közötti, sótartalma ~5–6 NaCl ekv. súly%. A nyomáskorrekció figyelembevételével számított képződési hőmérséklet kb. 500–550 °C-ra tehető a pegmatoidok esetében. Az áramlás közel ÉÉK–DDNy-i irányú repedések mentén történt.

2. *esemény*: fluidumáramlás ÉK–DNy-i és ÉNy–DK-i csapású repedésrendszerek mentén. A fluidum összetétele NaCl–CaCl₂–H₂O, koncentrációja átlagosan 22 CaCl₂ ekv. súly% volt. Homogenizációs hőmérséklete 175–255 °C között változik. E fluidum eredete kérdéses: kapcsolódhat metamorf folyamathoz, de a mélymedence-eredet is lehetséges.

3. *esemény*: a vizsgált területen mindenhol ható — feltehetően (késő-)kréta korú — hidrotermális esemény, amely kvarc- és kalciterezést eredményezett. A fluidummigráció az ÉK–DNy-i és az ÉNy–DK-i csapásirányú repedésrendszerekben egyaránt igazolható. A repedéskitöltő kvarcban található elsődleges zárványok homogenizációs hőmérséklete 100–200 °C között változik, sótartalmuk ~8–14 NaCl ekv. súly%. Az érkitöltő kalcitban a homogenizációs hőmérsékleti intervallum igen tág (100–250 °C), a sótartalom ~0,2–5 NaCl ekv. súly% közé esik.

4. *esemény*: az ÉNy–DK-i csapású, valószínűleg reaktiválódott repedésrendszerek menti fluidummobilizációs esemény. Kora a kréta vulkanizmusnál fiatalabb, feltehetően kora-paleogén. A fluidum NaCl–CaCl₂–H₂O összetételű, koncentrációja átlagosan 19 CaCl₂ ekv. súly% és viszonylag alacsony homogenizációs hőmérséklettel jellemezhető (60–120 °C).

5. *esemény*: egy alacsony hőmérsékletű, valószínűleg meteorikus eredetű fluidummigráció, melynek feltehetően a késő-miocén–pliocén kiemelkedés következtében reaktiválódott, nyílt repedésrendszer biztosított áramlási útvonalat.

Vizsgálataink kiderítették továbbá, hogy a granitoid nyílt mikro- és makrorepedés-rendszerének irányai jelentős hasonlóságot mutatnak.

Tárgyszavak: fluidzárványsík, nyílt mikrorepedés, Mórággyi Gránit Formáció, Bábaapáti (Üveghuta)-telephely, Mórággyi-dombság

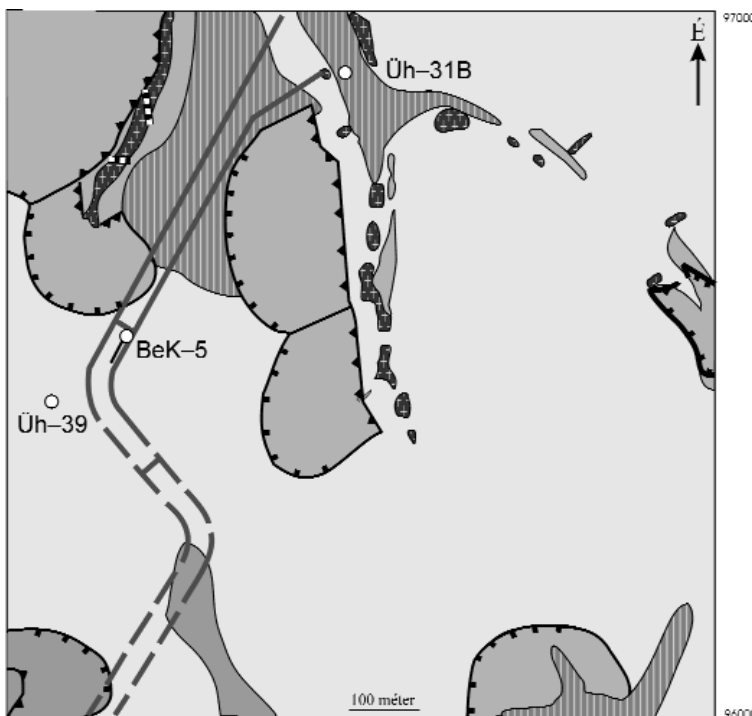
Bevezetés, célkitűzések

Munkánk során a Mórággyi kristályos rög földtani felépítésében meghatározó jelentőségű Mórággyi Gránit Formációt vizsgáltuk folyamatos magvételrel mélyített fúrásokban. Valamennyi tanulmányozott fúrás a kis- és közepes aktivitású

radioaktív hulladéktároló kutatása során mélyült a Bábaapáti (Üveghutai)-telephely szűkebb környezetében (GYALOG et al. 2003; GYALOG, SZEGŐ 2004; GYALOG et al. 2006b; SZÜCS et al. 2006). E kutatások lefolytatását az RHK Kft. által biztosított háttér tette lehetővé. Vizsgálatainkat két függőleges (Üh–31B, Üh–39) és egy közel vízszintes helyzetű (BeK–5)

fúrásban végeztük (1., 2. ábra). Az Üh–31B sekélyfúrás a 2002–2003 során lefolytatott felszíni földtani kutatás során mélyült az Üh–31 csoport-fúrás részeként. Az Üh–39 és a Bek–5 fúrás kivitelezésére a felszín alatti földtani kutatási fázisban került sor 2004-ben, illetve 2005-ben.

A fúrások által harántolt Mórággyi Gránit vizsgálataink szempontjából azért tűnt alkalmas kőzetnek, mert megfelelően nagy a kvarctartalma és nem rétegzett, így a mechanikai behatásokkal szemben első közelítésben izotrópnak tekinthető. A granitoid mikrorepedés-rendszerének vizsgálatára kiváló lehetőséget nyújtanak a kőzetalkotó kvarcban található nyílt és zárt (fluidzárványsíkok) repedések. A fluidzárványsíkok irány szerinti és mikrotermometriai analízise elengedhetetlen granitoid kőzetek fluidummobilizációs eseményeinek vizsgálata során. Alkalmazásukkal lehetőség nyílik az egyes oldatáramlási események sorrendjének megállapítására, továbbá az eseményekhez irányjellemzők is kapcsolhatók.



Pleisztocén–holocén

- Idős löszsorozat, alsó-középső-pleisztocén (1)
- Léjtőképződmények (2)
- Paksi Löss Formáció (3)

Kréta

- Alkáli vulkanitellér (4)

Paleozoikum

- Mórággyi Gránit Formáció (5)

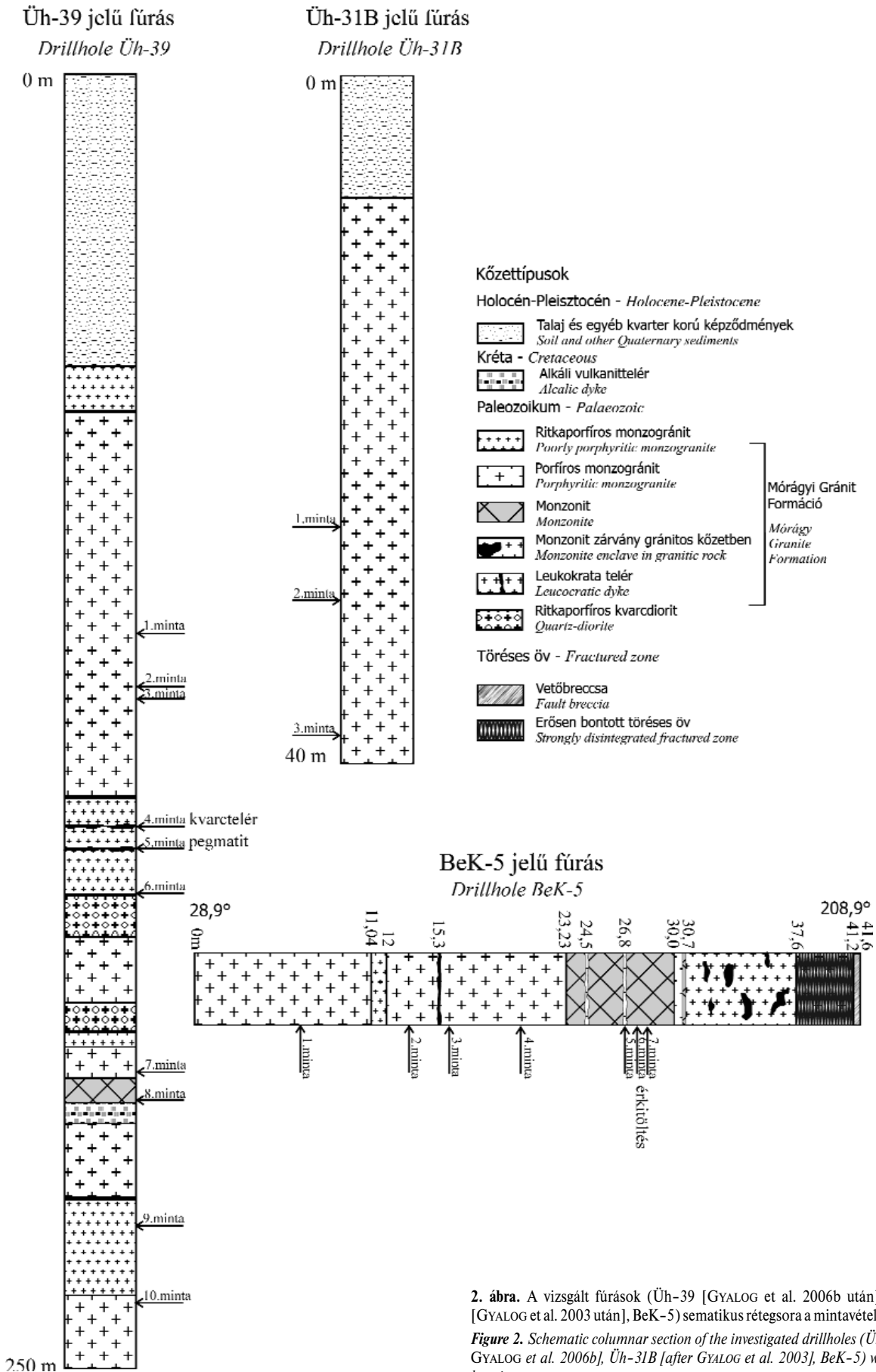
BeK–5

- Vizsgált fúrás helye és jele (6)
- Léjtősáknák nyomvonala (7)
- Atektikus elemek negyedidőszaki üledékekben (8)

1. ábra. A vizsgált fúrások helye és a vágat nyomvonala fedett földtani térképen jelölve (GYALOG et al. 2006a után)

Figure 1. Geological map with locations of the investigated drillholes (after GYALOG et al. 2006a)

- (1) Lower-Middle Pleistocene loess series (2) Slope sediments (3) Paks Loess Formation (4) Alkaline dyke (5) Mórággyi Granite Formation (6) Location and symbol of investigated drillholes (7) Trace of slope shaft (8) Atektic structures in Quaternary sediments



2. ábra. A vizsgált fúrások (Üh-39 [GYALOG et al. 2006b után], Üh-31B [GYALOG et al. 2003 után], BeK-5) szemantik rétegsora a mintavételi helyekkel
Figure 2. Schematic columnar section of the investigated drillholes (Üh-39 [after GYALOG et al. 2006b], Üh-31B [after GYALOG et al. 2003], BeK-5) with sample locations

A fluidzárványok mikrotermometriai vizsgálatával meghatározható az egyes oldatok összetétele (sótartalma) és hőmérséklete. Mindez lehetővé teszi egy adott terület paleo-fluidum-áramlásainak modellezését.

A gránittest nyílt és zárt mikrorepedéseinek vizsgálata a radioaktív hulladéktároló befogadó földtani közegének jellemzéséhez fontos információkkal járulhat hozzá. A jelenlegi hidrogeológiai viszonyok ugyanis nyilvánvalóan kapcsolatban állnak a mikrorepedések jellemzőivel is. A zárt mikrorepedések jellemzői felhívhatják a figyelmet arra, hogy mely zónák azok, amelyek egy esetleges újbóli felnyílás-repedeztettség kialakulását preferálhatják. Ezért munkánk alapvető célkitűzése volt, hogy mind a nyílt, mind a zárt mikrorepedéseket részletesen jellemezzük. Ezen felül célunk volt a kőzet makro- és mikrorepedés-rendszereinek összevetése is a csapás- és dőlésviszonyok szempontjából.

Vizsgálati módszerek

A vizsgálatokra kiválasztott fúrómagok orientálása a korszerű, digitális archiválást és a komplex szerkezetföldtani értékelést együttesen lehetővé tevő ImaGeo magzkennert és a csatlakozó CoreDump szoftvert segítségével történt (MAROS, PALOTÁS 2000; MAROS, PÁSZTOR 2001). A fúrómagok orientálását az akusztikus lyukfal-televízió tette lehetővé. A kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladéktároló kutatása során ezen integrált rendszerrel eddig mintegy 5500 m magányig digitális feldolgozásra került sor, amelynek eredményei a Mórágai Gránitról kialakított szerkezeti modell (I. Szerkezet-alakulás c. fejezet) egyik legfontosabb adatforrását képviselik (MAROS et al. 2003, 2004; MAROS 2006; BALLA et al. 2003, 2007).

A mintavételezés során a fúrások azon szakaszait választottuk ki, amelyekben a képlékeny deformáció hatása (palásodás; I. a Földtani háttér c. fejezetet) nem vagy csak elhanyagolható mértékben jelentkezett, így a kiválasztott mintákat tipikus magmás szövet jellemzi. A fúrómagokból származó kőzetmintákból két oldalán polírozott, 100–150 mikrométer vastag, orientált csiszolatokat készítettünk. A fluidzárványsíkok és nyílt mikrorepedések csapásirányainak és hosszúságainak meghatározása az AnIma képelemző program (LESPI-NASSE et al. 2005) felhasználásával történt, míg a dőlésirányok és dőlésszögek meghatározásához polarizációs mikroszkópra szerelt univerzális forgatóasztalt használtunk. A mikrotermometriai vizsgálatok az ELTE Ásványtani Tanszékén Olympus BX51 típusú mikroszkópra szerelt, Chaixmeca típusú, fűthető-hűthető mikroszkópi tárgyasztalon történtek. Az alkalmazott mikroszerkezeti és termometriai módszerek részletes ismertetésétől e munkában eltekintünk, mivel azokról BENKÓ et al. (2008) cikke adott alapos áttekintést.

Földtani háttér

Az alábbiakban irodalmi adatok alapján először röviden összefoglaljuk a vizsgált gránittest földtani keretének leg-

főbb jellemzőit, majd ismertetjük a Mórágai Gránit fejlődéstörténetének meghatározó szerkezeti eseményeit és az azokhoz kapcsolódó hidrotermális folyamatokat.

A Mórágai Gránit földtani környezete

A vizsgált terület a Mórágai kristályos rög északkeleti részén található, amely szerkezetileg a Tiszai-egység leg-északabbi, ún. Mecseki-zónájához tartozik. A Mórágai-rög földtani felépítésében meghatározó jelentőségűek a gránitoid kőzetek (JANTSKY 1953, 1979), amelyek a Mórágai Gránit Formációba tartoznak (BALLA et al. 2003). A kb. ÉK–DNY-i csapású gránittestet északnyugatról a kb. 1,0 km széles, közelítően szintén ÉK–DNY-i csapású, meredek ÉNY-i dőlésű Mecsekalja szerkezeti öv határolja, amelyben az Ófalui Formáció ópaleozoos metamorf képződményei bukkannak felszínre. A rög északnyugati peremén alsó-jura üledékek (Vasasi Márga Formáció) érintkeznek tektonikusan az Ófalui Formáció képződményeivel. A legfiatalabb alaphegységi képződménycsoportot a változatos kőzetegyüttest magukba foglaló, kréta alkáivilkanit-telérek alkotják („bosztonitok”; MAURITZ, CSAJÁGHY 1952), amelyek a korábban említett alaphegységi képződményeket kivétel nélkül harántolják. Az alaphegységi képződményekre nagy üledékhézaggal alsó-miocén, pannóniai, illetve kvarter üledékek települnek.

A Mórágai Gránit két fő kőzettípusának — mikroklin-megakristályokat tartalmazó monzogranit és a javarészt monzonitos összetételű, mafikus kőzetek — képződése a magmás fejlődés korai szakaszához kapcsolódik, amely során két, fiziko-kémiai tulajdonságaiban különböző (felzúsz és mafikus) magma keveredése ment végbe (BUDA 1999; BUDA et al. 2000; KIRÁLY, KOROKNAI 2004; BUDA, DOBOSI 2004). A mafikus kőzetek igen változatos méretű zárványokat (mafic microgranular enclaves = MME; BARBARIN, DIDIER 1991) alkotnak a gránitoid kőzetekben, a nagyobb mafikus testek határán átmeneti jellegű, kontaminált kőzetek is kialakultak a magmakeveredés során. A gránittest fő kristályosodása a karbonban, mintegy 340 millió éve történt (KLÖTZLI et al. 2004, GERDES 2006).

Szerkezetalakulás

A pluton különféle kőzettípusainak uralkodóan ÉK–DNY-i csapása a magmás fejlődés során alakult ki, ami a pluton képződése során fennálló aktív feszültségtérre (ÉNY–DK irányú kompresszió) utal (MAROS et al. 2004). A magmás fejlődés késői szakaszában a már többé-kevésbé megszilárdult kőzeteket leukokrata telérek (aplit, mikrogranit, pegmatoid) harántolták, javarészt ÉK–DNY-i csapással (MAROS et al. 2004).

A magmás kristályosodást követően a variszkuszi orogenezis során a már megszilárdult plutont zöldpala fáciesű, regionális metamorf hatás érte (KOROKNAI 2003, KIRÁLY, KOROKNAI 2004, MAROS et al. 2004), amely mindenekelőtt a gránittest — hely és litológia függvényében — erősen változó intenzitású, kb. ÉK–DNY-i csapású palásodásában

nyilvánult meg, míg a klasszikus metamorf fázisátalakulások mértéke összességében alárendelt jelentőségű. A szerkezetalakulás metamorf szakaszához két főbb, képlékeny deformációs esemény kapcsolódik (MAROS et al. 2004):

D₁ fázis (karbon?): „meredek” ($\geq 75^\circ$), uralkodóan ÉNy-i dőlésű palásság képződése koaxiális lapulással ÉNy–DK-i kompressziós feszültségtérben.

D₂ fázis (karbon?): a meredek palásságot felülbélyegző, „lapos” ($\leq 75^\circ$), uralkodóan szintén ÉNy-i dőlésű palásság kialakulása, és ezzel párhuzamosan keskeny milonitos zónák képződése javarészt (D)DK-i vergenciájú feltolódásos, illetve ritkábban eltolódásos kinematikával.

A nyolc deformációs fázisba sorolt törésszerű eseményeket MAROS et al. (2004) az alpi orogenezishez sorolta a tágabb földtani környezet analógiái alapján, ugyanakkor rámutatott arra is, hogy törések minden bizonnyal már korábban is, részben a variszkuszi szerkezetalakulás során is létrejöttek. Ezek elkülönítése azonban módszertani korlátok miatt egyelőre problematikus. Az alpi szerkezetalakulás során az alábbi deformációs fázisokat különítették el:

D₃ fázis (középső-kréta): transzpressziós deformáció során kialakult törések (rátolódások és eltolódások). A középső-kréta szerkezetek valószínűleg ÉNy–DK-i kompresszióval jellemezhető feszültségtérben jöttek létre.

D₄ fázis (késő-kréta): ÉK–DNy-i csapású balos eltolódások.

D₅ fázis (késő-kréta): magmás telérek benyomulása ÉNy–DK-i távolodásos feszültségtér hatására.

D₆, D₇ és D₈ fázis (kora- és középső-miocén): regionális, óramutató-járásával megegyező irányú rotáció stabil feszültségtérben, transzpressziós mozgásokkal. A KÉK–NyDNy irányú kompressziót előbb egy északias irányú, majd egy ÉÉNy–DDK-i kompresszió váltotta fel.

D₉ fázis (késő-miocén): ÉNy–DK-i tengelyű, tenziós feszültségtér.

D₁₀ fázis (késő-miocén–pliocén): a Mecsek és a Villányi-hegység transzpressziós kiemelkedése következtében törések és palássági elemek reaktiválódtak, nyílt repedés-rendszer jött létre.

Fontos, hogy a területen több deformációs fázist azonos vagy nagyon hasonló feszültségtér jellemez, így bizonyos feszültségtér többször is „visszatérnek”, ami a törések többszörös reaktivációját eredményezi (MAROS et al. 2004).

Hidrotermális események

KOVÁCS-PÁLFFY et al. (2000) az alábbi hidrotermális fázisokat különítette el a Mórágai Gránitban:

— A granitoid komplexum kialakulásához kapcsolódó, korai fluidummigráció.

— I. hidrotermális fázis: 170–210 °C-os oxidatív oldatok, amelyek a granitoid egyes kőzetalkotó ásványait hemattitá, karbonáttá, Fe-oxi-hidroxiddá alakították.

— II. hidrotermális fázis: 90–130 °C-os oldat, melyből agyagásvány (pl. illit), kalcit és kvarc képződött. A kvarc és a kalcit általánosan jelen vannak a különböző hidrotermális eredetű erezésekben (KOVÁCS-PÁLFFY, FÖLDVÁRI 2004), ame-

lyek képződési hőmérséklete GATTER, TÖRÖK (2004) vizsgálatai alapján tág intervallumban változhat. Az illitből mért K/Ar adatok a kora-triász és késő-kréta intervallumban szórnak (KOVÁCS-PÁLFFY, FÖLDVÁRI 2004).

— a szupergén fázis során alacsony hőmérsékletű (40–50 °C) fluidumok migráltak, melyből kalcit képződött. A ¹⁴C-vizsgálatok alapján megállapítható, hogy ez a kalcitgeneráció a holocénnél idősebb (KOVÁCS-PÁLFFY, FÖLDVÁRI 2004).

A Mórágai Gránitban végzett fluidzárvány-vizsgálatok során kétféle, NaCl-H₂O és NaCl-CaCl₂-H₂O összetételű fluidumot azonosítottak (SZABÓ Cs. et al. 1998, 1999; GATTER, TÖRÖK 2004; SZABÓ B. et al. 2008). SZABÓ B. et al. (2008) négy lokális és egy regionális fluidummigrációs eseményt különített el a fluidzárványsíkok vizsgálata során:

1. ÉK–DNy-i csapású irányban, egy 137–209 °C homogenizációs hőmérséklettel és 0,9–2,2 NaCl ekv. súly% sótartalommal jellemezhető lokális oldatáramlás.

2. ÉNy–DK-i irányban 130–238 °C homogenizációs hőmérsékletű 1,9–4,5 NaCl ekv. súly% sótartalmú regionális oldatáramlás.

3. NyÉNy–KDK irányban áramló 250–293 °C-os homogenizációs hőmérsékletű és 9,98–10,85 NaCl ekv. súly% sókoncentrációval jellemezhető lokális hidrotermális oldatáramlás.

4. ÉK–DNy-i irányú 227–275 °C homogenizációs hőmérsékletű és 5–7,3 NaCl ekv. súly% sókoncentrációval jellemezhető lokális esemény (Erdősmecke).

5. ÉK–DNy-i csapásban áramló 130–238 °C homogenizációs hőmérsékletű és 1,9–4,5 NaCl ekv. súly% sótartalmú lokális hidrotermális esemény (Kismórág).

A vizsgált fúrások ismertetése

A vizsgálataink tárgyát képező három fúrásból kettőt (Üh–31B, Üh–39) függőlegesen mélyítették a felszínről, míg a harmadik, közel vízszintes helyzetű előfúrás (BeK–5) a tárolótér megközelítése céljából mélyített lejtőszaknak egyikében (keleti) készült (1. ábra). A két felszíni fúrás a lejtőszaknak közvetlen közelében található, így a három fúrás térbeli közelsége lehetőséget ad az eredmények összevont értelmezésére is. Mindhárom fúrásban a Mórágai Gránit Formáció megfelelően nagy kvarctartalmú, monzogranitos kőzeteit, illetve hidrotermális erezését vizsgáltuk. Az alábbiakban bemutatjuk a fúrási rétegsorokat a mintavételi helyekkel (2. ábra), és röviden ismertetjük a Mórágai Gránit harántolt képződményeit.

Üh–39 jelű fúrás

A fúrás legnagyobb mennyiségben — mintegy 190 m vastagságban — a Mórágai Gránit Formáció képződményeit tárta fel (2. ábra). A granitoid képződmények és a fedőüledékek határa 57,14 méternél van. A fedőüledékek közül a Tengeliczi Vörösagyag Formáció rétegei fölött a Paksi Löss Formáció, valamint formációba nem sorolt lejtőüledék települ. E rétegsort recens talaj fedi.

A Mórógyi Gránit Formációban monzogranitos, monzonitos és hibrid (kontaminált) kőzetcsoporthoz, valamint telérkőzeteket különböztettek meg (GYALOG et al. 2006b). A monzogranitos kőzetek adják az intruzív test fő tömegét, amelyben kisebb-nagyobb zárt testek formájában vannak jelen a monzonitos kőzetek (mafikus zárványok). Jellemzően a két csoport kontaktusán figyelhetők meg a hibrid kőzetek (kontaminált monzogranit és kontaminált monzonit csoport). Mind-ezen kőzeteket savanyú telérkőzetek szelik át. A fúrás legnagyobb vastagságban (174,51 m) monzogranitos kőzeteket harántolt, a monzonit és a savanyú telérkőzetek (főként applit) jelentősége alárendelt (GYALOG et al. 2006b).

Üh–31B jelű fúrás

A fúrás vékony recens talajréteg és 6,95 méter vastagságú alluviális üledékek alatt 40 méteres talpmélységnél a Mórógyi Gránit Formációban állt le (2. ábra).

A fúrás döntően granitoid kőzeteket (31,83 m, 96,31%) harántolt. Monzonitos összetételű kőzetek (1,22 m, 3,69%) csak kisebb (max. 2–3 deciméteres) zárványokban fordultak elő. Telérkőzeteket a fúrás nem tárt fel. A granitoid kőzetek közül a fúrás csak porfíros monzogranitot harántolt. A monzogranit a fúrás felső szakaszán erősen murvásodott (mállott), alatta viszont végig üde. Az üde monzogranit rózsásszürke, az erősebben hidrotermálisan bontott szakaszokon, sárgászöld vagy vöröses elszíneződésű. Jelentékenyebb bontottság elsősorban törések mentén, illetve az erősen összetört szakaszokon észlelhető, ami a színesásványok kloritosodásában és a kőzet agyagásványos elváltozásában jelentkezik (GYALOG et al. 2003).

BeK–5 jelű fúrás

Az előfúrás magszkennelt szakaszát (0–41,6 méter) vizsgáltuk, mert csak ebből a szakaszból volt lehetséges az orientált mintavétel. A fúrás első része (23,2 méter) porfíros monzogranitot, valamint alárendelt mennyiségben ritkaporfíros monzogranitot tárt fel. 23,2 és 30 méter között monzonit és kvarcmonzonit található, amelyek gyakran tartalmaznak vékony, monzogranitos összetételű kőzetsávokat. A 30–41,6 méter között ritkaporfíros monzogranit jelenik meg mafikus zárványokkal és leukokrata telérekkel. 37,6 métertől erősen bontott monzogranit észlelhető. A szkennelt szakasz vetőbreccsával zárul. A szkennelt szakasz 37,6 méterénél kezdődő, erősen bontott szakasz és a vetőbreccsa együttesen egy elsőrendű töréses öv részét képezik (2. ábra).

A repedésrendszerek irányítottsága

Nyílt mikrorepedések és fluidzárványsíkok

Vizsgálataink során két repedéstípus irányait határoztuk meg kőzetalkotó kvarckristályokban:

1. behegedt mikrorepedések, azaz fluidzárványsíkok (Fluid Inclusion Plane, FIP),
2. nyílt mikrorepedések (Open Crack, OC).

Üh–39 jelű fúrás

A fúrásban összesen nyolc mintán (porfíros monzogranit kvarckristályain, valamint egy-egy pegmatittelér és kvarctelér anyagából) végeztünk képanalizátoros méréseket, és ebből három minta (4., 5., 6. minta) esetében univerzális forgatóasztalos méréseket is (I. tábla). Ez utóbbi három minta esetében a két különböző módszerrel meghatározott fluidzárványsík-csapásirányok összességében jó egyezést mutatnak (I. a, b tábla), bár az Üh–39/4 jelű mintában az egyes irányok eltérő súllyal jelentkeznek a kétféle módszer adataiban. A fluidzárványsíkok dőlésszöge a fúrásban döntően 70 és 90° közt mozog, de ritkán 50°-hoz közeli dőlésszögértékek is megjelennek.

A fluidzárványsíkok és a nyílt mikrorepedések fő csapásirányai a legtöbb esetben jelentősen különböznek. Megállapítható továbbá, hogy a különböző mintákban mért irányok mindkét vizsgált repedéstípusban (nyílt mikrorepedés és fluidzárványsík) nagy változatosságot mutatnak, így a repedésmintázat a fúrás szelvényében egyik típus esetében sem állandó.

Az 1. és 2. mintában a fluidzárványsíkok fő csapásiránya KÉK–NyDNy-i valamint ÉK–DNy-i. A kvarctelérben (települése: 341/70°, 4. minta) az ÉNy–DK-i csapásirány a domináns, valamint nagy adatsűrűséggel jelentkezik még az ÉÉK–DDNy-i csapásirány is. Ezen kívül jelentős mennyiségű fluidzárványsík jellemezhető a kvarctelér csapásával megegyező, KÉK–NyDNy-i csapásiránnyal. A pegmatittelér (települése 300/55°, 5. minta) kvarckristályain mért irányok két maximummal jellemezhetőek, egy KÉK–NyDNy, valamint egy NyÉNy–KDK-i csapással. A pegmatittelér csapásával megegyező irány (ÉÉK–DDNy) csak az univerzális forgatóasztallal mért adatok között jelentkezik, ott is nagyon alárendelten. A 6. mintában a NyÉNy–KDK a főirány, mely irány az eddigi mintákban nem, vagy csak nagyon alárendelten jelent meg. Ezen kívül az ÉK–DNy-i csapásirány is gyakori. A 7. mintában ugyancsak eddig nem észlelt főirány jelenik meg, az É–D, valamint gyakori még az ÉK–DNy-i csapásirány. Végül a 9. és 10. mintában az ÉK–DNy, valamint a NyÉNy–KDK-i csapásirány a legjellemzőbb.

A nyílt mikrorepedésekre jellemző, hogy fő irányaik a fúrásban szakaszonként változnak. Az 1. és 2. minta esetében az ÉK–DNy a jellemző csapásirány. A kvarc- és pegmatittelérben a nyílt mikrorepedéseknél is csak nagyon alárendelten jelentkezik a telérekkel párhuzamos irány, ezekben a mintákban az ÉNy–DK-i csapás a leggyakoribb. A 6. és 7. mintában az ÉÉK–DDNy a legjellemzőbb irány. A 9. és 10. minta eltér a fúrás többi részétől, ugyanis itt a KÉK–NyDNy valamint a NyÉNy–KDK-i csapásirány a legjellemzőbb. Az 5. és 6. minta esetében a nyílt repedések közel merőlegesek a fluidzárványsíkokra, míg az 1., 2., 7., 9., és 10. minta esetében igen hasonló irányok észlelhetők.

Összefoglalva megállapítható, hogy a fúrás teljes hosszában a vizsgált két repedéstípus irányai nem állandóak. Ezért az összesített diagramok sem mutatnak jelentősen kiugró maximumokat, a kétféle típus csak bizonyos szakaszaiban

szokban mutat egyezést. A fúrás összesített adatai a fluidzárványsíkok esetében a két különböző módszerrel közel azonosak. A fluidzárványsíkok két fő csapásiránnyal jellemezhetőek: ÉK–DNy-i, valamint KÉK–NyDNy-i, míg a nyílt repedések irányaira az ÉK–DNy-i csapáson kívül főként az ÉNy–DK-i a jellemző.

Üh–31B jelű fúrás

A sekélyfúrásban összesen három mintában (mindhárom esetben porfíros monzogranit kvarckristályain) vizsgáltuk a fluidzárványsíkok térbeli helyzetét képelemző programmal, két mintán (1. és 2. minta) pedig univerzális forgatóasztal felhasználásával is kaptunk adatokat (II. tábla). A kétféle módszerrel nyert eredmények nagyfokú hasonlóságot mutatnak, de eltérések is adódtak.

A fúrásban mind a két repedéstípusnál ugyanazt a két fő irányt lehet azonosítani, ÉNy–DK-i és egy erre merőleges, ÉK–DNy-i csapásút. A fluidzárványsíkok kevés kivétellel közel vertikális helyzetűek a magtengelyre merőleges irányú csiszolatokban. A vertikális irányú (magtengellyel párhuzamos) csiszolatokban horizontális helyzetű fluidzárványsíkok egyáltalán nem, viszonylag lapos dőlésszögek is csak alárendelten jelentkeznek.

Az 1. mintában univerzális forgatóasztallal döntően ÉNy–DK-i csapásirányú fluidzárványsík-populáció jellemző, míg a képelemző módszerrel egy másik, erre merőleges maximum is jelentkezik a rózsadiagramon. A 2. minta esetében ugyanezt láthatjuk, azzal az eltéréssel, hogy az ÉNy–DK-i csapás mintegy 10–20 fokkal északi irányba tolik. A legmélyebből származó mintában az ÉK–DNy-i csapásirány jelentkezik maximális értékkel.

A nyílt mikrorepedések döntően ÉK–DNy-i csapásirányúak, a legmélyebből származó mintánál a maximum KÉK–NyDNy irányt mutat, és jelentős az ÉNy–DK-i csapásirány is.

Összefoglalva megállapítható hogy mind a nyílt, mind a behedgt mikrorepedés-rendszerek irányai zömében a terület két fő szerkezetföldtani irányával (ÉK–DNy és ÉNy–DK) párhuzamosak. A nyílt repedések esetében inkább az ÉK–DNy-i csapásirány a domináns, továbbá határozottan jelentkezik egy KÉK–NyDNy-i irány is. A behedgt repedéseknél a két fő irány közel azonos súllyal jelenik meg. Az univerzális forgatóasztallal mért adatok esetében csak az ÉNy–DK-i csapásirány észlelhető, és kisebb jelentőséggel az É–D-i csapásirány is jelentkezik.

BeK–5 jelű fúrás

A közel vízszintes fúrás anyagából öt mintán végeztünk képanalizátoros, és két mintán (1. és 5.) univerzális forgatóasztalos méréseket. Minden mérést monzogranit kőzetalkotó kvarcsemcséjén végeztük. E fúrásban a két különböző módszerrel kapott eredmények nagyon jó egyezést mutatnak. A fluidzárványsíkok e mintákban is döntően vertikálisak, ill. szubvertikálisak. Az 5. mintából készített függőleges irányú csiszolatban vízszintes (vagy ahhoz közeli dőlésű) mikrorepedések nem jelentkeznek, de a lapos dőlésszögű behedgt repedések is csak nagyon csekély

menyiségben vannak jelen.

E fúrásban a fluidzárványsíkok és a nyílt mikrorepedések irányai többnyire igen jó egyezést mutatnak. A fúrásban is a „szokásos” két fő irány jelentkezik: ÉK–DNy-i és ÉNy–DK-i. A főirányok mellett még két irány — az É–D és a K–Ny-i — is hangsúlyos (III. a, b tábla).

Az 1. és 2. mintában a behedgt repedések esetében a két főirány közel azonos súllyal jelentkeznek. A 3. és 4. mintában a fluidzárványsíkok döntően ÉNy–DK-i csapásirányúak, azonban minden mintában megtalálható a két mellékirány (É–D és K–Ny) is. Az 5. minta kismértékben eltér a többitől, ebben az esetben a KÉK–NyDNy-i irány az uralkodó mindkét repedéstípus esetében.

Az összes minta fluidzárványsíkját ábrázoló rózsadiagramról leolvasható, hogy négy, közel hasonló súlyú maximumirány adódik: ÉK–DNy-i és ÉNy–DK-i, illetve É–D-i és K–Ny-i csapásirány. Az univerzális forgatóasztallal mért adatok esetében csak a két főirány jelentkezik. Az összes nyílt mikrorepedést ábrázoló diagramon két főirány látható: KÉK–NyDNy és ÉÉNy–DDK, némileg kisebb súllyal jelentkezik az ÉK–DNy-i irány.

Mikro- és makrorepedés-irányok viszonya

Az összehasonlítást kétféle módon végeztük el. Egyrészt összehasonlítottuk fúrásonként az összes mikro- és makrorepedés-irányt ábrázoló diagramokat (I. a, b; II. és III. a, b tábla), másrészt két fúrás (Üh–39 és Üh–31B) esetében a mintavételezési helyek 5 méteres sugarú környezetében található makrorepedéseket az egyes mintákban mért mikrorepedés-irányokkal vetettük össze. A minták jelentős részénél hosszúság szerinti leválogatást is végeztünk, hogy a főirányokhoz kis szögben hajló rövidebb repedésektől megszűrjük az adatbázist. A fluidzárványsíkoknál és a nyílt mikrorepedéseknél azért indokolt e művelet, mert minél rövidebb egy repedés annál nehezebb pontosan meghatározni annak csapásirányát. Továbbá gyakori jelenség, hogy egy hosszabb repedést több rövid repedés alkot. Ha a hosszú repedést egy darabként értelmezzük és csapásirányát a két végpontjának összekötésével határozzuk meg, akkor igen eltérő adatokat kaphatunk a sok rövid repedés irányához képest. A leválogatással tehát a rövid repedéseknél jelentkező esetleges hibák kiszűrése volt a célunk. A küszöbértéket minden mintára egyénileg állapítottuk meg olyan hosszúságértéknél, amely fölött hirtelen adatsűrűség-csökkenést észleltünk.

Üh–39 jelű fúrás

Az Üh–39 jelű fúrásban nem egységes a törésirány, ugyanakkor a fúrásban harántolt törészónák közötti rövidebb szakaszokat többé-kevésbé hasonló törésirányok jellemzik (MAROS 2006).

A diagramokról (I. a, b tábla) leolvasható, hogy bár a makrorepedés-irányok nem egységesek, de összességében a legjellemzőbb csapásirány az ÉK–DNy-i ebben a fúrásban. Az összes makrorepedés-adat a nyílt mikrotörések irányival mutat hasonlóságot, míg a fluidzárványsíkok esetében a

legjellemzőbb csapásirány a KÉK–NyDNy-i. A vizsgált nyolc mintából öt minta esetében a nyílt mikrorepedések irányai közelítik jobban a makrorepedések irányait. Ezen minták közül a legnagyobb mértékű hasonlóságot a 2. minta esetében tapasztaljuk. Csak egy mintánál fordul elő (5. minta), hogy a fluidzárványsíkok irányai nagyobb mértékű egyezést mutatnak a makrorepedés-irányokkal, mint a nyílt mikrorepedések. Továbbá az is előfordul, hogy egyik mikrorepedés-típus sem egyezik meg a makrorepedés irányokkal (7. minta).

Összességében tehát a nyílt mikrorepedések csapásirányai jobban megközelítik az összes makrorepedés irányát, mint a fluidzárványsíkok. A hosszabb mikrorepedések irányeloszlása — mindkét típus esetében — általában jól tükrözi az adott mintára jellemző összképet, de az egyes maximumirányok relatív súlyában helyenként előfordulnak jelentős eltérések, néhol pedig irányvesztés is fellép (I. a, b tábla). Ebből fakadóan a hosszabb mikrorepedések iránystatisztikái nem tekinthetők teljesen megbízhatóknak és reprezentatívnak az összkép vonatkozásában.

Üh–31B jelű fúrás

A makrorepedések leggyakoribb csapásiránya a fúrásban kb. (K)ÉK–(Ny)DNy-i. A mintavételi helyek környezetéből leválogatott diagramokon is mindhárom esetben ebben az irányban van a maximális gyakoriság. A makrorepedések irányai mindhárom vizsgált minta esetében nagyfokú hasonlóságot mutatnak a nyílt mikrorepedések irányjaival. A fluidzárványsíkok esetében is nagy megnyiságú repedés jellemezhető ÉK–DNy-i csapásiránnyal, azonban e típusnál a leggyakoribb csapásirány az ÉNy–DK-i.

Összefoglalva megállapítható, hogy ebben a fúrásban mind a mikro-, mind a makrorepedéseknél a legjellemzőbb az (K)ÉK–(Ny)DNy-i csapásirány. A törések orientációja a fúrás teljes hosszában egységesnek mondható. A fluidzárványsíkok irányai nem korrelálnak olyan mértékben a makrorepedés-irányokkal, mint a nyílt mikrorepedések. A hosszabb mikrorepedések irányeloszlása e fúrásban jól közelítik a teljes eloszlási képet.

BeK–5 jelű fúrás

A BeK–5 jelű fúrásban csak az összes repedést ábrázoló diagramokat hasonlítottuk össze. A makrorepedések esetében a K–Ny-i csapásirányú törések a leggyakoribbak, a második leggyakoribb csapásirány az ÉNy–DK-i. A K–Ny-i törések dominanciája jól korrelál a fúrás utolsó néhány méterében észlelt kb. K–Ny-i csapású, elsődrendű törészónával (MOLNOS et al. 2006). A makrorepedések esetében az ÉK–DNy-i csapásirány — a másik két fúrással ellentétben — csak alárendelten szerepel.

A K–Ny-i csapásirány mind a nyílt, mind a zárt mikrorepedésekben megjelenik, de nem olyan gyakorisággal, mint a makrorepedéseknél. A fúrásban az előrehaladás irányában egyre nagyobb gyakorisággal jelentkezik ez a csapásirány a „hosszú” nyílt mikrorepedéseknél (BeK–5/4. és 5. minták, III. a, b tábla). Jelentős különbség a makro- és mikrorepedések irányai között, hogy az északias csapásirány csak a mikrorepedéseknél jelenik meg. A két mikrorepedés-típus

ebben a fúrásban mutatja a legnagyobb hasonlóságot.

A három vizsgált fúrás adatait összegezve megállapítható, hogy:

— a mikro- és makrorepedés-irányok hasonlóak, de eltérés is mutatkozhat,

— a nyílt mikrorepedések csapásirányai jobban megközelítik az összes makrorepedés irányát, mint a fluidzárványsíkok,

— a csapásirányok hosszúság szerinti leválogatása többnyire jól kiemeli a jellemző csapásirányokat, de néhol e módszer következtében az egyes maximumirányok súlya torzulhat a rózsadiagramban, illetve ritkábban akár irányvesztés is felléphet. A hosszabb mikrorepedések tehát nem minden esetben párhuzamosak a leggyakoribb csapásiránnyal, ezért önmagukban nem tekinthetők reprezentatívnak az általános törésképre.

A fluidzárvány-vizsgálatok eredményei

Érkitöltő fázisokon végzett fluidzárvány-vizsgálatok eredményei

Fluidzárvány petrográfia

A fluidzárvány-vizsgálatokat a granitoidban található hidrotermális erek kvarc- és kalcitkitöltéseiben, valamint pegmatit kvarckristályain végeztük (öt minta, I. táblázat). Ezek közül értelemszerűen a pegmatit a legidősebb képződésű. Az érkitöltéseken végzett paragenetikai megfigyelések alapján megállapítható, hogy vizsgált mintákban a kvarcerek, illetve a repedések kvarccal történő kitöltése a kalciterek/kitöltések képződését megelőzte.

A petrográfiai vizsgálatok során szobahőmérsékleten a következő hat fluidzárványtípust lehetett elkülöníteni:

1. típus: elsődleges, kétfázisú (L-V) zárványok. A zárványokban a gőzfázis mennyisége 15-20%. A szemcsékben általában elszórtan egyesével jelennek meg, ritkán „zárványfelhőket” formálnak. A hidrotermális erek kvarc-, illetve kalcitkristályjaiban fordulnak elő. Méretük 10–15 µm között változik (I. fotó, a).

2. típus: elsődleges, háromfázisú (L-V-S) zárványok, amelyekben a gőz-, folyadék- és szilárdfázis 15:60:25 arányban oszlanak meg. Méretük 15 µm. Kizárólag egy minta (BeK–5/6. minta) kvarckristályjaiban fordulnak elő. A szilárd fázis befogott kristallit.

3. típus: elsődleges, kétfázisú (L-V) zárványok. A gőzfázis mennyisége 30%. Minden esetben csoportosan, azaz „zárványfelhőket” alkotva jelennek meg. Méretük maximum 10 µm. Ezt a típust egyedül a pegmatit kvarckristályjaiban azonosítottunk.

4. típus: álmásodlagos, kétfázisú zárványok (L-V), amelyek hamar elhaló, rövid repedések mentén, zárványsorokat formálnak. A gőzfázis mennyisége nem haladja meg az 5%-ot. Csak egy minta (BeK–5/2. minta) kalcitkristályjaiban fordulnak elő.

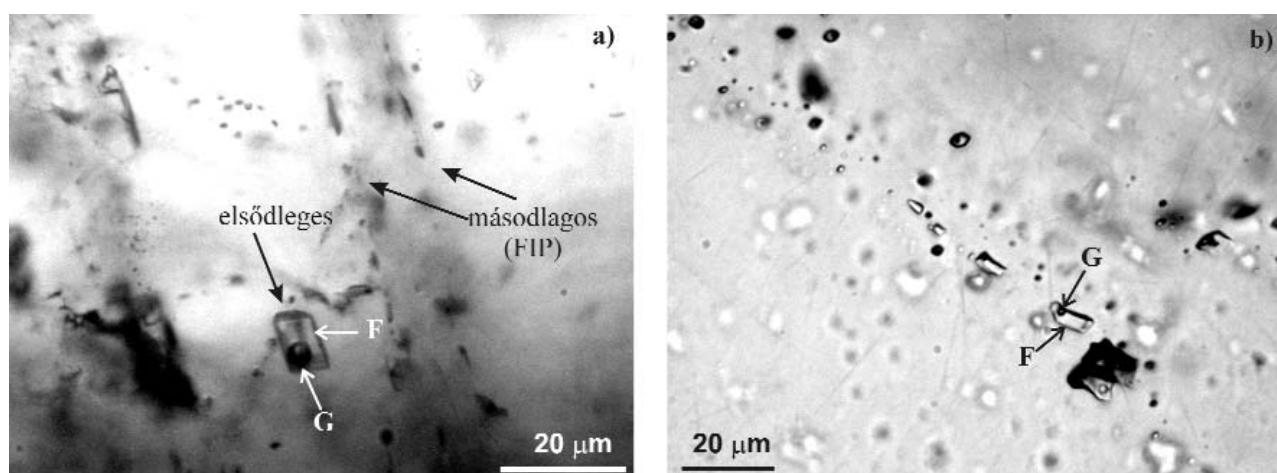
5. típus: másodlagos, kétfázisú (L-V) zárványok, me-

I. táblázat. A zárványtípusok adatai mintákra lebontva

Table I. Fluid inclusion characteristics for each sample

Minta sorszám	Zárványtípus	Befogadó ásvány	Eredet	Fázisok	Gőzfázis mennyisége (%)	Ásványosodott ér dőlése	Ásványosodott ér csapásiránya
BeK-5/6.	1.	kalcit	p	L-V	15-20	51/77°	ÉNy-DK
BeK-5/6.	1.	kvarc	p	L-V	20		
BeK-5/2.	1.	kalcit	p	L-V	10-20	25/87°	ÉNy-DK
BeK-5/3.	1.	kalcit	p	L-V	15-20	50/71°	ÉNy-DK
Üh-39/8.	1.	kalcit	p	L-V	15-20	301/68°	ÉÉK-DDNy
BeK-5/6.	2.	kvarc	p	L-V-S	15		
Üh-39/5. (pegmatit)	3.	kvarc	p	L-V	30	300/55°	ÉÉK-DDNy
BeK-5/2.	4.	kalcit	ps	L-V	5		
BeK-5/6.	5.	kvarc	s	L-V	5		
BeK-5/6.	5.	kalcit	s	L-V	5		
BeK-5/2.	5.	kalcit	s	L-V	maximum 5		
BeK-5/3.	5.	kvarc	s	L-V	5		
Üh-39/8.	5.	kalcit	s	L-V	maximum 5		
BeK-5/6.	6.	kvarc	s	L	0		

p = elsődleges, s = másodlagos, ps = álmásodlagos, L = folyadék, V = gőz, S = szilárd
 p = primary, s = secondary, ps = pseudosecondary, L = liquid, V = vapour, S = solid



1. fotó. a) Elsődleges, kétfázisú fluidzárvány (F = folyadékfázis, G = gőzfázis) (1. típus) másodlagos fluidzárványsíkokkal érkítöltő kvarcban, b) Fluidzárványsík kétfázisú zárványokkal (gőzfázis maximum 5%) (2. típus)

Photo 1. a) Primary, two phase fluid inclusion (F = liquid phase, G = vapour phase) (type 1) with secondary fluid inclusion planes in vein-filling quartz; b) Fluid inclusion plane with two phase inclusions (vapour phase max. 5%) (type 2)

lyek zárványsík formájában jelennek meg. A gőzfázis mennyisége legfeljebb 5%. Általában nagyon kicsi méretűek (maximum 5 µm). Mindkét ásványban és minden mintában megtalálhatóak.

6. típus: másodlagos egyfázisú (L) zárványok, melyek törésekhez kötődően jelennek meg. A zárványok átlagos átmérője 5 µm. Minden mintában és mindkét ásványban előfordulnak.

Mikrotermometria

A fluidzárványokon homogenizációs és kriozskópos vizsgálatokat végeztünk. A homogenizáció mindig folyadékfázisban történt. A ~-21 °C eutektikus hőmérséklet értékek esetében az adatokat NaCl-H₂O rendszerben értel-

meztük. Míg az ~-52 °C-os eutektikus hőmérséklet alapján NaCl-CaCl₂-H₂O rendszert azonosítottunk. A NaCl-CaCl₂-H₂O rendszerben értelmezett adatok esetében a koncentráció értéket CaCl₂ ekv. súly%-ra számoltuk, mert hidrohalit olvadását nem lehetett észlelni, így a NaCl/CaCl₂ arányt sem lehet meghatározni. Mivel a koncentrációértékeket a NaCl-H₂O rendszerű oldatokban NaCl ekv. súly%-ra számoltuk, a CaCl₂ tartalmúak esetében nem, ezért az összehasonlíthatóság érdekében a homogenizációs hőmérséklet értékeket nem a sótartalom, hanem a végső olvadási hőmérséklet függvényében ábrázoltuk minden esetben. A sótartalom értékeket Flincor szoftver segítségével számítottuk (BROWN 1989).

Az érkítöltő fázisok mikrotermometriai vizsgálatai

alapján öt különböző fizikai tulajdonságokkal jellemezhető fluidumot azonosítottunk. Összesítve a petrográfiai és a mikrotermometriai vizsgálatokat relatív időbeli sorrend is felállítható az egyes események között az ásványkiválások sorrendje és az ásványok zárványainak relatív befogódási ideje (elsődleges, másodlagos) alapján. A 3. ábra a) részén a

folyamatok időrendiségét számokkal jelöltük.

1. A legelső fluidumból a pegmatit kvarckristályai képződtek, melynek elsődleges zárványai 260–290 °C-os homogenizációs hőmérséklettel és –4 °C körüli végső olvadási hőmérséklettel (6,4 NaCl ekv. súly%) jellemezhetőek (3. zárványtípus).

2. Ezt követően kvarckristályok képződtek egy 90–200 °C-os homogenizációs hőmérséklettel és –5 °C-os végső olvadási hőmérséklettel, 7,6 NaCl ekv. súly% sótartalom értékkel jellemezhető fluidumból (1. és 2. zárványtípus).

3. A harmadik esemény a kalcit képződéséhez kötődik. Ebben a zárványgenerációban 107–286 °C között változik a homogenizációs hőmérséklet, a végső olvadási hőmérséklet pedig –0,1––2,4 °C közötti értékeket vesz fel, így a sótartalom-érték viszonylag alacsony (kb. 0,2–4 NaCl ekv. súly%) (1. és 4. zárványtípus).

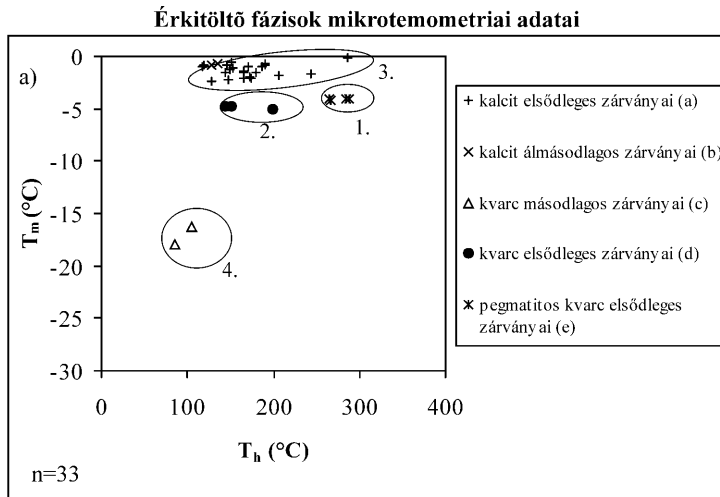
4. Ezt követően csapdázódtak az 5. típusú, másodlagos zárványok, mert ezek mind a kvarc- mind a kalcitkristályokban egyaránt megjelennek, tehát biztosan a kalcit képződése utáni folyamatról van szó. Ez a fluidum NaCl-CaCl₂-H₂O összetételű, végső olvadási hőmérséklete –16,3 – –18 °C, ami ~ 19 CaCl₂ ekv. súly% koncentrációnak felel meg. Alacsony homogenizációs hőmérséklettel (kb. 60–120 °C) jellemezhető.

5. Legvégül, pedig a 6. típusú fluidzárványok csapdázódhattak. A fluidum valószínűleg meteorikus eredetű.

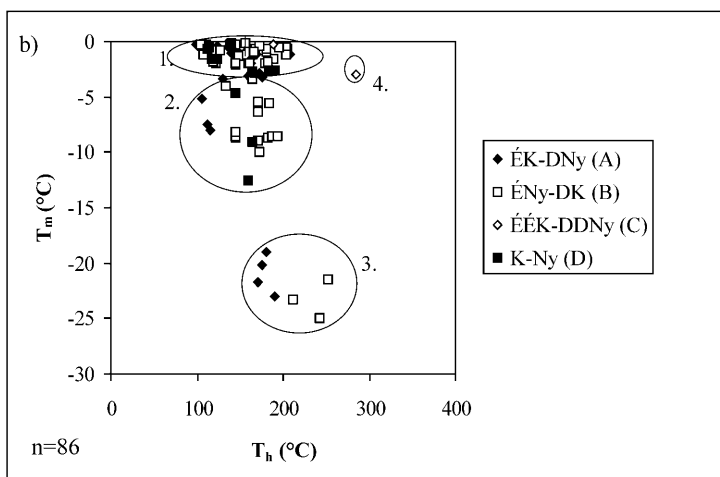
A fluidzárványsíkok vizsgálata a kőzetalkotó kvarckristályokban

Fluidzárvány petrográfia

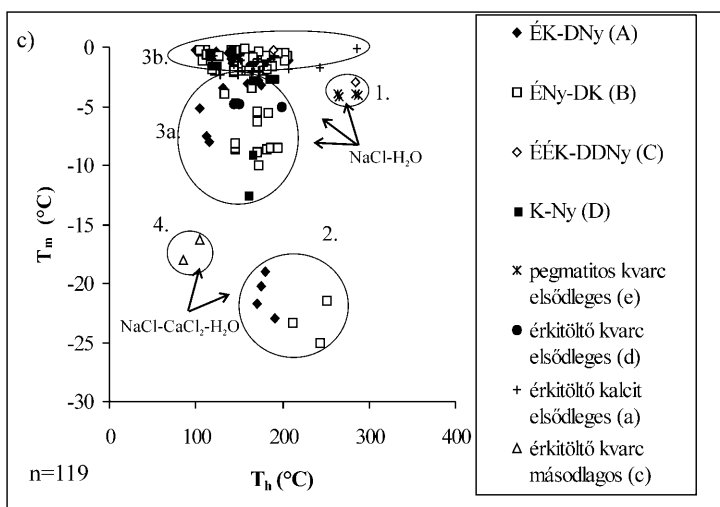
Összesen öt orientált minta (Üh–31B/2, Üh–39/5 és 6., BeK–5/1 és 5) kőzetalkotó kvarckristályokban előforduló fluidzárványsíkok vizsgálatát végeztük el. A zárványsíkok for-



Kőzetalkotó kvarc fluidzárvány-síkjainak mikrotermometriai adatai



Összes mikrotermometriai adat



3. ábra. a) Az érkitöltő fázisok fluidzárványaiban mért homogenizációs hőmérséklet (T_h) adatai a végső olvadási hőmérséklet (T_m) függvényében (a számok időrendiséget jelölnek), b) Fluidzárványsíkokból mért homogenizációs hőmérséklet (T_h) értékei a végső olvadási hőmérséklet (T_m) függvényében ábrázolva (a számok nem időrendiséget jelölnek, hanem az egyes fluidumgenerációkat), c) Az érkitöltő fázisokból és a fluidzárványsíkokból mért homogenizációs hőmérsékletek (T_h) a végső olvadási hőmérséklet (T_m) függvényében ábrázolva (a számok időrendiséget jelölnek)

Figure 3. a) Homogenization temperature (T_h) measured in fluid inclusions of vein-filling phases plotted against final melting temperature (T_m). Numbers indicate timing, b) Homogenization temperature (T_h) measured in fluid inclusion planes plotted against final melting temperature (T_m). Numbers do not indicate timing but indicate the fluid generation, c) Homogenization temperature (T_h) measured in fluid inclusions in both vein-filling mineral phases and fluid inclusion planes plotted against final melting temperature (T_m). Numbers indicate timing

(a) primary inclusions in calcite (b) pseudosecondary inclusions in calcite (c) secondary inclusions in quartz (d) primary inclusions in quartz (e) primary inclusions in pegmatitic quartz (A) NE-SW (B) NW-SE (C) NNE-SSW (D) E-W

májában megjelenő fluidzárványok értelemszerűen másodlagosak a kőzetalkotó kvarc kristályosodásához képest. Ezért ezen vizsgálatok során a zárványokat a fázisösszetétel, a fázisarány és a befogadó zárványosítási orientációja alapján csoportosítottuk. Szobahőmérsékleten a következő zárványtípusokat lehetett elkülöníteni:

1. típus: egyfázisú folyadékzárványok (L), maximum 5 μm átmérővel.

2. típus: kétfázisú (L-V) zárványok, a gőzfázis mennyisége legfeljebb 5%. Általában nagyon kisméretűek (maximum 5 μm ; 1. fotó, b).

3. típus: kétfázisú (L-V) zárványok, ahol a gőzfázis mennyisége 15–25% között változik. Méretük átlagosan 5–10 μm .

4. típus: háromfázisú (L-V-S) zárványok, ahol a gőzfázis mennyisége 20% a szilárd fázis 15%. A szilárd fázis befogott kristallit.

A vizsgált mintákban két fő csapásirány (ÉK–DNy és ÉNy–DK) észlelhető, ezek mellett alárendelten jelentkező irányok a K–Ny és az ÉÉK–DDNy. Az egyes irányokhoz nem lehetett adott zárványtípust rendelni, azaz egy-egy irányban több zárványtípus is megjelenik. Megállapítható azonban, hogy az 1. típus leggyakrabban az ÉK–DNy-i, és az erre merőleges ÉNy–DK-i csapású fluidzárványosítókban jelenik meg. A 2. és a 3. típus gyakran előfordul szinte minden mintában, mind a már említett négy irányban. A 4. típus csak egy mintában (BeK–5/5.) azonosítottam egy ÉK–DNy-i csapású zárványosítókban.

Mikrotermometria

Mikrotermometriai vizsgálatok során az alábbiakban bemutatott fluidumgenerációkat azonosítottuk irányok szerint (3. ábra, b). Fontos rámutatni, hogy a zárványpetrográfia során azonosított zárványtípusok nem feleltethetők meg egyértelműen a mikrotermometriai vizsgálatokkal azonosított fluidumgenerációknak, ezért a 3. ábra b) részén levő számok nem az egyes zárványtípusokat, hanem az egyes fluidumgenerációkat jelzik.

ÉK–DNy-i csapásban az 1., 2., 3. és 4. zárványtípus is megjelenik. A homogenizációs-hőmérséklet intervalluma igen tág (99–221 °C) az adott irányban mért fluidzárványokban. A 2. zárványtípus 103–116 °C homogenizációs hőmérsékletű, sótartalma pedig 8,13–11,69 NaCl ekv. súly% között változik a végső olvadási hőmérséklet értékei alapján (–5,2 – –8 °C). A 3. zárványtípus két féle eutektikus hőmérséklettel jellemezhető. Megjelenik benne a NaCl–H₂O és a NaCl–CaCl₂–H₂O rendszerű fluidum is. A CaCl₂-os oldat –23 – –19 °C közötti végső olvadási hőmérséklettel, míg a NaCl–H₂O rendszerű fluidum –3,4 – –0,2 °C-os végső olvadási hőmérséklettel jellemezhető. Előbbi 20,15–22,16 CaCl₂ ekv. súly%-nak, utóbbi 5,56–0,35 NaCl ekv. súly% koncentrációnak felel meg. A CaCl₂-tartalmú oldat zárványai 176–215 °C közötti homogenizációs hőmérséklettel jellemezhetőek, míg a NaCl-víz rendszerű zárványok 99–212 °C között homogenizálódtak. A háromfázisú zárvány (4. típus) szilárd fázisában fagyasztás és homogenizáció során fázisátalakulást nem

észleltünk, tehát nem az anyaooldatból kristályosodott, hanem szilárd fázisban fogódott be.

Az ÉNy–DK-i csapásirányú fluidzárványosítók is tartalmaznak az első három zárványtípust. A homogenizációs hőmérséklet intervalluma igen tág (98–252 °C). Ebben az irányban ugyanazokat a típusú fluidumokat lehet azonosítani, mint az előzőben. A 3. típusú zárványok NaCl–CaCl₂–H₂O tartalmú fluiduma –25 – –21,5 °C közötti végső olvadási hőmérséklet értékeket vesz fel, amely 21,44–23,08 CaCl₂ ekv. súly% koncentrációt jelent. Homogenizációs hőmérséklete pedig, 212–252 °C között változik. A 3. típusú, NaCl–H₂O rendszerű fluidumok homogenizációs hőmérséklete 98–205 °C, végső olvadási hőmérsékletük pedig, –4,0 – –0,1 °C között változik. Ez 0,17–6,44 NaCl ekv. súly%-nak felel meg. A 2. típusú zárványok 145–194 °C közötti homogenizációs hőmérsékletűek, végső olvadási hőmérsékletük –5,45 – –10 °C, ez alapján sótartalmuk 8,41–13,93 NaCl ekv. súly%.

A K–Ny-i irányban a 2. és a 3. típusú zárványok jelennek meg. Az eutektikus hőmérséklet alapján az összes zárvány NaCl–H₂O rendszerű. A 2. típusú zárványok végső olvadási hőmérséklete –4,6 – –12,5 °C között változik, ez 7,3–16,43 NaCl ekv. súly%-nak felel meg. A homogenizációs hőmérséklet 144–164 °C intervallumba esik. A 3. típusú zárványok végső olvadási hőmérséklete –2,7 – –0,1 °C közötti értéket vesz fel, mely 0,17–4,49 NaCl ekv. súly% koncentrációt jelez. A homogenizációs hőmérséklet intervalluma ebben az irányban is igen széles, 114–221 °C.

Az ÉÉK–DDNy-i csapásiránnyal jellemezhető fluidzárványosítókban az 1. és a 3. zárványtípus jelenik meg. Mivel ez az irány csak alárendelt, ezért a mérőszám is alacsonyabb, mint a főirányokban. Ebben az irányban csak NaCl–H₂O rendszerű fluidumot azonosítottunk. A 3. típusú zárványhoz ebben az irányban 133,6–205 °C-ig terjedő homogenizációs hőmérséklet és –0,3 °C végső olvadási hőmérséklet érték tartozik, mely 0,53 NaCl ekv. súly%-nak felel meg. A 2. típusú zárvány 273–285 °C homogenizációs hőmérsékletű, sótartalma 4,95 NaCl ekv. súly%, mivel végső olvadási hőmérséklete –3 °C.

Összefoglalva megállapítható, hogy a fluidzárványosítók mikrotermometriai vizsgálatai során öt különböző fluidumgenerációt lehetett azonosítani (3. ábra, b).

1. Minden irányban megjelenik a körülbelül 100–200 °C közötti homogenizációs hőmérsékletű és viszonylag alacsony sótartalmú (0,17–6,44 NaCl ekv. súly%) fluidum.

2. Ugyancsak minden irányban jellemző a nagyobb sótartalmú (5–14 NaCl ekv. súly%) fluidum, de a homogenizációs hőmérséklet intervalluma irányonként eltér.

3. Mind a két főirányban (ÉK–DNy és ÉNy–DK) megjelenik a nagyon nagy fagyáspontcsökkenésű, és ezáltal CaCl₂-ban gazdag (OAKES et al. 1998) oldat, átlagosan 22 CaCl₂ ekv. súly%-os koncentrációval, homogenizációs hőmérséklete 175–255 °C között változik.

4. Csak az ÉÉK–DDNy-i csapásirányban jelenik meg az átlagosan 280 °C-os, 5 NaCl ekv. súly%-kal jellemezhető fluidum.

5. Az egyfázisú folyadékzárványok valószínűleg meteorikus eredetűek, a K–Ny-i csapás kivételével minden irány-

ban megtalálhatóak (E fluidumgeneráció nincs jelölve a 3. ábrán, mert mikrotermometriai méréseket nem végeztünk rajta.)

Diszkusszió

Fluidummigrációs események rekonstrukciója

Az egyes események relatív időrendiségének megállapításához az alábbiakat kell feltétlenül figyelembe venni:

— A fluidzárványsíkok vizsgálata alapján megállapítható, hogy különböző fluidumok nem köthetők meghatározott csapásirányokhoz, tehát ugyanazok az oldatok többféle irányú repedésben is jelen voltak.

— A jelen munka keretében megvizsgált érkítöltő fázisok és a zárványsíkok mikrotermometriai eredményei szerint a rendszerben nem minden oldatáramlási esemény eredményezett ásványkiválást, ugyanis a kőzetalkotó kvarc-kristályok zárványsíkjaihoz kötődő fluidumok között azonosítottunk olyan paraméterekkel (homogenizációs hőmérséklet, sókoncentráció) jellemezhető oldatot, mely az érkítöltő ásványok elsődleges zárványaiban nem jelenik meg. Mivel ezen oldatáramláshoz tartozó fluidum az ásványosodott erek másodlagos zárványaiban sem jelenik meg, ezért igen valószínű, hogy ezen fluidum az érkítöltő fázisok előtt cirkulált a kőzetben.

— Minden olyan oldat megjelenik a kőzetalkotó kvarc fluidzárványsíkjai mentén csapadózott zárványokban, amelyekből az érkítöltő fázisok kristályosodtak, vagyis ami megjelenik az érkítöltő ásványok elsődleges fluidzárványaiban. Figyelembe véve az előző megállapítást, ez egyértelműen azt jelzi, hogy az ásványosodott erek képződése időben jól elkülönül a kőzet magmás fejlődéstörténetétől.

— Mind az érkítöltések, mind a zárványsíkok fluidzárványaiban kétféle összetételű oldatot lehetett azonosítani, egy NaCl-H₂O összetételűt és NaCl-CaCl₂-H₂O összetételűt.

Összesítve az érkítöltő fázisok és a fluidzárványsíkok petrográfiai és mikrotermometriai eredményeit valamint a megfigyelt szerkezetföldtani irányait, a következő fluidumáramlási események azonosíthatók (3. ábra, c):

1. A legelső esemény pegmatitos kifejlődésű kvarc képződését eredményezte, ugyanis egy plutonban az első fluidumszegregációs esemény mindig a pegmatitok képződéséhez kötődik. Ebből egyértelműen következik, hogy ez a fluidum magmás eredetű, amely megjelenik a pegmatit képződése előtt kristályosodott kőzetalkotó kvarcok fluidzárványsíkjaiában is. E fluidumot bezáró zárványok homogenizációs hőmérséklete 260–290 °C közötti, végső olvadási hőmérséklete átlagosan –3 és –4 °C, tehát sótartalma ~5-6 NaCl ekv. súly%. A vizsgált pegmatittelér csapása és a fluidzárványsíkok megegyező irányai alapján (ÉÉK–DDNy) feltételezhető, hogy a magmás fluidumáramlási eseményhez ÉÉK–DDNy irányú repedésrendszer kialakulása társult. Ez az irány igen hasonló a leukokrata telérek leggyakoribb csapásirányához (MAROS et al. 2004).

2. Az ezt követő fluidummigrációs esemény csak fluidzárványsíkokat alkotó zárványokon nyomon követhető, tehát valószínűleg az érkítöltő kvarc és kalcit képződése előtti folyamatról van szó, mert a vizsgált érkítöltések elsődleges zárványaiban egyáltalán nem jelenik meg ilyen összetételű fluidum. Összetétele NaCl-CaCl₂-H₂O rendszerrel modellezhető, végső olvadási hőmérséklete átlagosan –23 °C, és az ebből számított koncentrációja átlagosan 22 CaCl₂ ekv. súly%. Homogenizációs hőmérséklete 175–255 °C között változik. További ásványosodott erek vizsgálata szükséges annak eldöntéséhez, hogy ezen fluidumból történt-e ásványkiválás, ugyanis a vizsgált mintákban az érkítöltő fázisok elsődleges zárványaiban nincs jelen az oldat. A vizsgált területen mélyített Űh–3 jelű fúrásban SZABÓ Cs. et al. (1998) hidrotermális eredetű kalcit-grosszulár(?)-ereket említenek, melyek képződése esetleg ehhez az eseményhez köthető az oldat nagy CaCl₂-tartalma és homogenizációs hőmérséklete alapján. KIRÁLY, TÖRÖK (2003) szintén említenek Ca-dús szegélyeket gránátban a Mórógyi Gránit Formációban, illetve a szomszédos Mecsek-alja-öv metamorfitaiban található aplittélérekből. Ez a jelenség szerintük az aplittélérek deformációja során migráló Ca-gazdag fluidumra utalhat vagy megemelkedett nyomást és/vagy hőmérsékletet jelez. Ennek alapján a fluidum metamorf eredete tételezhető fel, bár a viszonylag magas CaCl₂-tartalom alapján akár a fluidum mélymedence eredete is lehetséges (FYFE 1978).

A fluidum a terület két fő szerkezeti irányához kötődően jelenik meg ÉK–Dny-i és ÉNy–DK-i csapásban, ami feltehetőleg feszültségtér-permutációval hozható összefüggésbe. Pusztán a szerkezetföldtani irányok alapján ez a fluidummigrációs esemény MAROS et al. (2004) modellje szerint a középső–krétára tehető (vö. Szerkezetalakulás c. fejezet). A fluidzárvány-vizsgálatok alapján azonban nem zárható ki az sem, hogy ez az esemény a középső–krétánál idősebb, amivel összeeseng MAROS et al. (2004) azon megállapítása, mely szerint a középső–kréta előtti repedések reaktivációja is lehetséges. Jelen munkában inkább az utóbbi lehetőséget valószínűsítjük, azaz egy krétánál idősebb ÉK–Dny-i és erre merőleges ÉNy–DK-i csapású repedésrendszert feltételezhetünk. E repedésrendszer menti fluidummigráció pontosabb koráról nincs információnk.

3a. Hidrotermális eredetű kvarc kiválását eredményező, több fázisú fluidumáramlási esemény. A zárványok homogenizációs hőmérséklete 100–200 °C között változik, átlagosan –5 – –10 °C közötti olvadáspanja alapján sótartalma ~8–14 NaCl ekv. súly%. Ez a fluidum az ásványosodott ér csapása (ÉNy–DK) és a fluidzárványsíkok orientációja alapján mind a két főirányban (ÉK–Dny és ÉNy–DK) és K–Ny-i csapásban is megjelenik. Az oldat irányonként kissé eltérő homogenizációs hőmérséklettel jellemezhető: legmagasabb értéket (150–200 °C) az ÉNy–DK-i csapásirányú zárványsíkoknál tapasztalható, a 150–160 °C a K–Ny-i csapásirányra jellemző, míg a legalacsonyabb értéket (100–120 °C) az ÉK–Dny-i csapású zárványsíkokban mértük. Ez azzal magyarázható, hogy a fluidum hűlése során újabb repedésrendszerek nyílhattak fel.

3b. A következő, a vizsgált területen belül mindenhol megjelenő oldatáramlási esemény kalcit kiválását eredményezte. Ez a fluidum ugyancsak megjelenik mind az érkitöltő fázisok, mind a zárványsíkok fluidzárványjaiban. A homogenizációs hőmérsékleti intervallum igen tág (100–250 °C), a $-0,1$ – -3 °C közötti végső olvadási hőmérséklet alapján a sótartalom $\sim 0,2$ – 5 NaCl ekv. súly% közé esik. Az oldat főképp az ÉNy–DK-i csapásirányú repedésrendszerekben migrált a kalcittartalmú erezések irányai alapján, de egyaránt jelen van az ÉK–DNy, a K–Ny és az ÉÉK–DDNy-i csapásirányú zárványsíkokban.

Lehetséges, hogy a kvarcot (3a esemény) és a kalcitot (3b esemény) kristályosító oldatok egyazon fluidum hígulását és kémiai tulajdonságainak (pl. pH) változását tükrözik, mivel a mikrotermometriai adatok alapján nem képeznek két jól elkülönülő csoportot. Feltételezhetjük tehát, hogy nem két külön fluidummobilizációs eseményt tükröznek, hanem egyazon folyamat részeit képezik. A 3a és 3b fluidummigrációt egy eseménynek tekintve, elmondható, hogy a kalcit-kvarc erezést létrehozó fluidum a vizsgált fúrásokban és SZABÓ B. et al. (2008) által vizsgált területen is mindenhol nagy adatsűrűséggel jelenik meg. Ebből adódóan viszonylag nagy területre kiterjedő, jelentős fluidummigrációval számolhatunk, amihez sok nyílt repedésre volt szükség. Ilyen feltételek a leginkább a későkrétában voltak, ugyanis a CSÁSZÁR (2004) által a vizsgált területre szerkesztett süllyedésgörbéről leolvasható, hogy a középső-krétától kiemelkedés zajlott a területen, amelynek során jelentős mennyiségű repedés nyílhatott fel. Ekkor a középső-kréta korú vagy annál idősebb ÉNy–DK-irányú és az ÉK–DNy-i repedések is reaktiválódhattak. A fluidumok az ekkor felnyíló, ÉÉK–DDNy-i csapásirányú repedések mentén is migráltak.

4. Ez a fluidum mind az érkitöltő kvarcban, mind a kalcitban másodlagos zárványokban őrződött meg, tehát biztosan a kalcit képződése utáni folyamathoz köthető. Összetétele NaCl-CaCl₂-H₂O rendszerrel modellezhető, végső olvadási hőmérséklete átlagosan -17 °C, így koncentrációja átlagosan 19 CaCl₂ ekv. súly%. Az eddigi oldatoknál alacsonyabb homogenizációs hőmérséklettel (60–120 °C) jellemezhető fluidzárványokban csapdázódott. Mivel ezt a fluidumgenerációt a kőzetalkotó kvarc zárványsíkjában nem észleltük, ezért a fluidum áramlásának iránya az erek csapása alapján feltételezhetően ÉNy–DK-i, tehát valószínűleg reaktiválódott, ÉNy–DK-i csapású repedésrendszerek mentén áramlott. Ebben az esetben a geotermikus gradiens értéke szabhatta meg az oldatok hőmérsékletét, így az oldatáramlás 2–4 km fedettség mellett mehetett végbe. Az esemény feltételezen a kora-paleogénre tehető.

5. Legvégül egy alacsony hőmérsékletű, valószínűleg meteorikus eredetű fluidum migrált, amely a K–Ny-i csapásirány kivételével minden irányban megjelenik, az érkitöltő fázisok és kőzetalkotó kvarcok másodlagos, egyfázisú zárványjaiban. Az oldatnak feltehetően a későmiocén–pliocén transzpressziós kiemelkedés következtében reaktiválódott (MAROS et al. 2004), nyílt repedésrendszer biztosított áramlási útvonalat.

Az eredmények korrelációja a korábbi vizsgálatokkal

Eredményeink szerint a Mórággyi Gránitban kétféle összetételű fluidum (NaCl–CaCl₂–H₂O, NaCl–H₂O) azonosítható, ami a korábbi vizsgálatokkal összhangban van (SZABÓ Cs. et al. 1998, 1999; GATTER, TÖRÖK 2004; SZABÓ B. et al. 2008).

A SZABÓ B. et al. (2008) által azonosított első két esemény (egy lokális és egy regionális; l. a Hidrotermális események c. fejezetet) az általunk vizsgált mintákban is megjelenik (3b folyamat). Megfigyeléseink szerint e fluidumok azonban nem különböznek a területen jellemző két főirány szerint, hanem megjelennek mind az ÉK–DNy-i, mind az ÉNy–DK-i csapásirányban. Ezt az eseményt regionálisnak tekinthetjük, azaz a vizsgált területen belül mindenhol jelenlevő fluidumáramlásról van szó. A karbonátos érkitöltések kiválása is főként ehhez a folyamathoz kötődik. Ezen kívül SZABÓ B. et al. (2008) három lokális hidrotermális eseményt is azonosított, melyek közül egy az általunk vizsgált területen is megjelenik. E lokális esemény a hidrotermális kvarc kiválását eredményezte (3a folyamat).

A KOVÁCS-PÁLFFY et al. (2000) által leírt négy hidrotermális eseményt az alábbiak szerint korreláljuk saját eredményeinkkel:

— a granitoid képződéséhez kapcsolódó hidrotermális hatás: ennek feleltethető meg a jelen dolgozatban közölt pegmatit képződéséhez kötött folyamat.

— az I. hidrotermális fázis korát pontosabban nem határozták meg, de megállapították, hogy biztosan megelőzte a kréta vulkanizmust. Az általunk azonosított 2. fluidummobilizációs esemény ennek feleltethető meg.

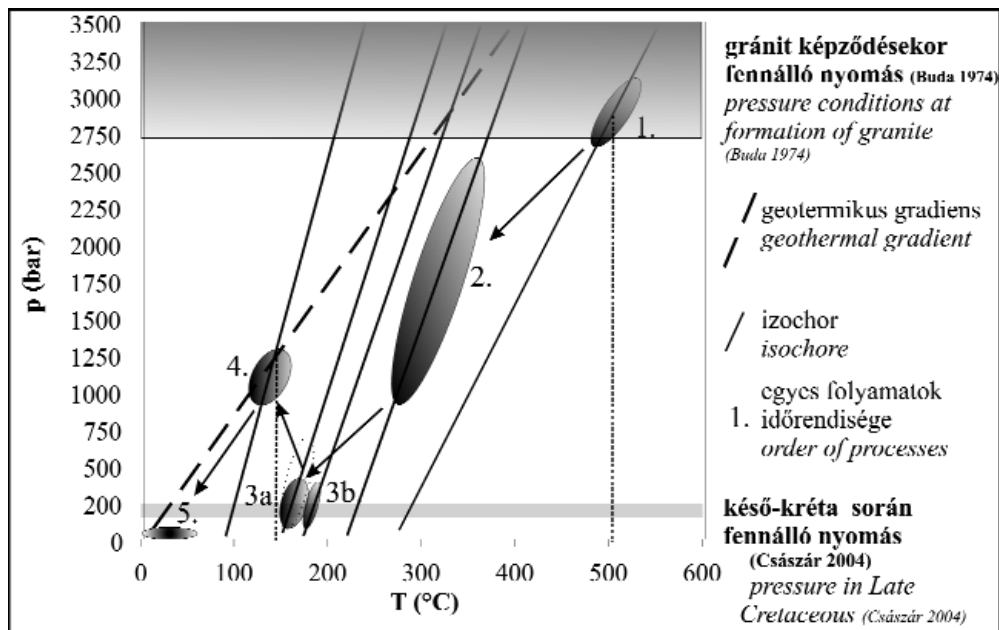
— a 3a és 3b események megfeleltethetők a KOVÁCS-PÁLFFY et al. (2000) által definiált, II. hidrotermális fázisnak, mely feltételezhetően a kréta vulkanizmushoz kötődik.

— Az utolsó (5.) folyamatot az általunk definiált szupergén fázissal azonosítjuk.

A fluidumáramlási események kapcsolata a földtani fejlődéstörténettel

A 4. ábra az összes fluidumgenerációra vonatkozó információ összefoglalását szemlélteti a nyomás és hőmérséklet függvényében. Az ábráról leolvasható, hogy ismerve a pegmatitban csapdázódott fluidzárványok reprezentatív izochorjának meredekségét a vizsgált pegmatit képződési hőmérsékletét tovább lehet pontosítani. Földpátszerkezeti vizsgálatok alapján BUDA (1974) ugyanis a pegmatit képződési hőmérsékletére 550 °C alatti tartományt adott meg. BUDA (1985) szerint a pegmatitos földpátok képződési hőmérséklete 518 ± 35 °C-nak adódik a földpát termometerek felhasználásával. A pegmatit elsődleges fluidzárványainak izochorja és a gránit feltételezhető képződési mélysége a pegmatitokra vonatkozóan 500–550 °C képződési hőmérsékletet valószínűsít.

Az ezt követő, második folyamat pontos lehatárolására nincs lehetőség, ugyanis csak annyit tudunk, hogy a peg-



4. ábra. A különböző fluidumáramlási folyamatok litosztikus nyomás és hőmérséklet függvényében ábrázolva a zárványgenerációk izochorjai alapján

Az egyes zárványgenerációk reprezentatív izochorját ZHANG és FRANTZ (1987) egyenletéből számolva határoztuk meg. A sötét ellipszisek az egyes zárványgenerációk valószínűsített befogódási körülményeit jelölik

Figure 4. Different fluid-migration events based on the isochores of different generations of fluid inclusions plotted against lithostatic pressure and temperature

Each isochore of a fluid inclusion generation was calculated with the equation of ZHANG & FRANTZ (1987). Dark areas indicate assumed trapping conditions for each fluid inclusion generation

matit kristályosodása utáni, de az érkítöltő fázisok képződését megelőző folyamatról van szó. Ez esetben szükség volt hőhatóra (magmás, vagy metamorf), ugyanis ha azt feltételezzük, hogy az oldat felfűtését kizárólag a geotermikus gradiens okozta, akkor még a gránit képződését is meghaladó nyomással kellene számolnunk. Ez azonban igen kevésbé valószínű, mert a pluton a magmás kristályosodás és a metamorfózis után sekélyebb kéregrégióba emelkedett.

Felhasználva a CSÁSZÁR (2004) által készített süllyedésgörbét, a kréta kiemelkedés során fennálló nyomásviszonyok is ismertek. Feltételezve a vizsgált kvarc- és kalciterezések (3a, b esemény) késő-kréta korát, így nyomáskorrekció céljából felhasználhatjuk e nyomásértéket. A süllyedéstörténet alapján rekonstruált viszonylag sekély eltemetődés (max. 1000 m) mellett az átlagos termikus gradiens alapján e mélységben várható hőmérsékletnél lényegesen magasabb hőmérséklet csak magmás felfűtéssel magyarázható, mivel a közel 150 °C eléréséhez, az átlagos geotermikus gradiens értékkel számolva (3 °C/100 méter) 5 km-es mélységet kellene feltételeznünk. Bár a kréta alkáli vulkanizmus kora még vita tárgyát képezi (l. BALLA et al. 2007), a diagram késő-kréta során fennálló nyomást mutatja. Ezáltal a kalcit és a kvarc valós képződési hőmérséklete is megadható, ami csak nagyon kis mértékben tér el a mért homogenizációs hőmérséklettől. (Ha a vulkanizmusra a kora-kréta kort valószínűsítjük, és a fluidumáramlási eseményt ehhez kötjük, úgy lényegesen nagyobb mélységgel kell számolnunk.)

Az 4. folyamat már valószínűleg nem kapcsolódik magmás felfűtéshez, ugyanis a krétát követően nem ismerünk

ilyen jellegű eseményt a kutatási területen és annak környezetében, ezért ebben az esetben a valós hőmérsékletet a fluidumhoz tartozó izochor és a geotermikus gradiens metszéspontja alapján határozhatjuk meg. Az átlagosan 90 °C-os homogenizációs hőmérséklettel rendelkező fluidum valós hőmérséklete közel 130 °C lehetett. A süllyedéstörténeti görbe alapján ez az esemény a kora-paleogénbe helyezhető.

Következtetések

Vizsgálataink eredményeképpen a Mórógyi Gránitban öt fluidumáramlási eseményt különítettünk el, valamint meghatároztuk az egyes fluidummigrációs események fő irányait, relatív korukat és az oldatok összetételét:

1. Az első fluidumáramlási esemény a variszkuszi gránitképződéshez köthető, amely a pegmatit elsődleges fluidzárványaiban nyomozható. E fluidumot bezáró zárványok homogenizációs hőmérséklete 260–290 °C közötti, sótartalma ~ 5–6 NaCl ekv. súly%. E fluidumok áramlása közel ÉÉK–DDNy-i irányú repedésrendszerhez köthető.

2. Ezt követően ÉK–DNy-i és ÉNy–DK-i csapású repedésrendszerek menti fluidumáramlást feltételezhetünk. A fluidum összetétele NaCl–CaCl₂–H₂O, koncentrációja átlagosan 22 CaCl₂ ekv. súly% volt. Homogenizációs hőmérséklete 175–255 °C között változik. A viszonylag magas CaCl₂-tartalom alapján lehetséges, hogy a fluidum mélymedence eredetű, de a metamorf eredet is elképzelhető.

3. A feltételezeten késő-kréta korú, a vizsgált területen mindenhol megjelenő hidrotermális esemény kvarc- és kalciterezést eredményezett. A fluidummigráció mind az ÉK–DNY-i, mind az ÉNY–DK-i csapásirányú repedés-rendszerekben valószínűsíthető, ami a repedések újbóli megnyílásával magyarázható. Az áramlás alárendelten a K–NY-i és ÉÉK–DDNY-i csapásirányban is nyomozható. A repedés-kitöltő kvarcban található elsődleges zárványok homogenizációs hőmérséklete 100–200 °C között változik, sótartalmuk ~8–14 NaCl ekv. súly%. Az érkítöltő kalcitban a homogenizációs hőmérsékleti intervallum igen tág (100–250 °C), a sótartalom ~0,2–5 NaCl ekv. súly% közé esik.

4. Az ÉNY–DK-i csapású, valószínűleg reaktiválódott repedésrendszerek menti fluidummobilizációs esemény, amely a kréta vulkanizmusnál biztosan fiatalabb, feltehetően kora-paleogén. A fluidum összetétele NaCl–CaCl₂–H₂O, koncentrációja átlagosan 19 CaCl₂ ekv. súly% és viszonylag alacsony homogenizációs hőmérséklettel jellemezhető (60–120 °C). Ebben az esetben valószínűleg a geotermikus gradiens értéke szabhatta meg az oldatok hőmérsékletét, az oldatáramlás 2–4 km fedettség mellett mehetett végbe. Az oldat valószínűleg mélymedence eredetű.

5. Legfiatalabb eseményként egy alacsony hőmérsékletű, valószínűleg meteorikus eredetű fluidum migrált, melynek feltehetően a késő-miocén–pliocén transzpressziós kiemelkedés következtében reaktiválódott, nyílt repedésrendszer biztosított áramlási útvonalat.

A repedésirányok vizsgálata alapján levonható legfontosabb következtetések a következők: a mikro- és makrorepedések irányai alapvetően hasonlóak, de különbség is mutatkozik; a nyílt mikrorepedések csapásirányai jobban megközelítik az összes makrorepedés irányát, mint a fluidzárványsíkok.

Ezen újszerű módszer alkalmazása révén tehát kristályos kőzeteket ért fluidummigrációs események azonosítása válik lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a kézirat gondos lektorálásáért TÖRÖK Kálmánnak és M. TÓTH Tivadarnak. Köszönettel tartozunk továbbá a Mecsekérc Zrt.-nek, illetve a Magyar Állami Földtani Intézetnek, hogy a vizsgált mintákat rendelkezésünkre bocsátották.

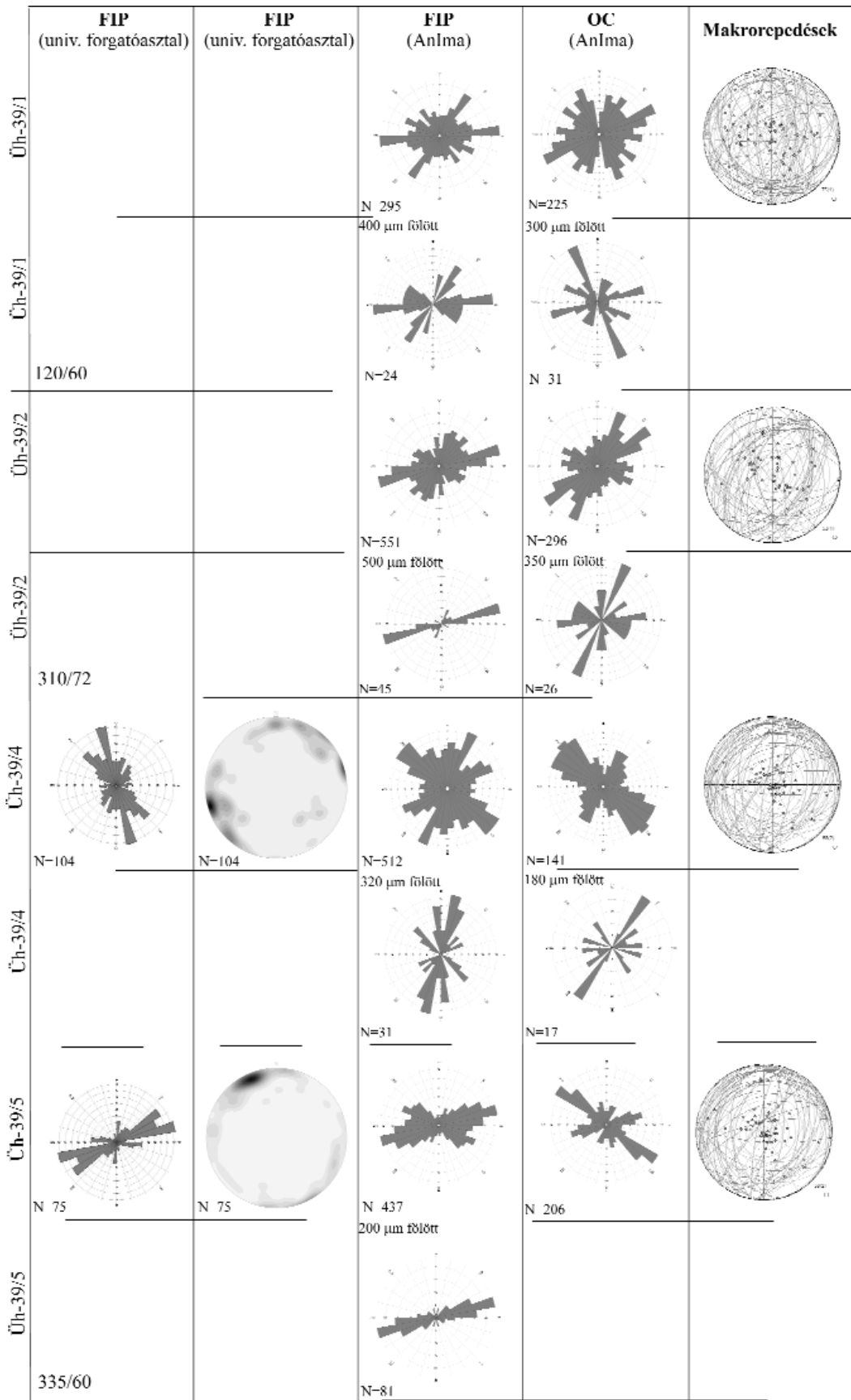
Irodalom — References

- BALLA Z., ALBERT G., CHIKÁN G., DUDKO A., FODOR L., FORIÁN-SZABÓ M., FÖLDVÁRI M., GYALOG L., HAVAS G., HORVÁTH I., JÁMBOR Á., KAISER M., KOLOSZÁR L., KOROKNAI B., KOVÁCS-PÁLFFY P., MAROS GY., MARS I., PALOTÁS K., PEREGI ZS., RÁLISCH L.-NÉ, ROTÁRNÉ SZALKAI Á., SZŐCS T., TÓTH GY., TURCZI G., PRÓNAY ZS., VÉRTESY L., ZILAH-SEBESS L., GALSA A., SZONGOTH G., MEZŐ GY., MOLNÁR P., SZÉKELY F., HÁMOS G., SZÜCS I., TURGER Z., BALOGH J., JAKAB G. & SZALAI Z. 2003: Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló program. A felszíni földtani kutatás zárójelentése, Bataapáti (Üveghuta), 2002–2003. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1102, 392 p.
- BALLA Z., CSÁSZÁR G., FÖLDVÁRI M., GULÁCSI Z., GYALOG L., HORVÁTH I., KAISER M., KOLOSZÁR L., KOROKNAI B., LANTOS Z., MAGYARI Á., MAROS GY., MARS I., PEREGI ZS., RÁLISCH E., ROTÁRNÉ SZALKAI Á., SZŐCS T., TÓTH GY. (MÁFI); ANDRÁSSY M., BENEDEK K., MOLNÁR P., SZEGŐ I., TUNGLI GY. (GOLDER); BERTA J., CSICSÁK J., DEÁK F. GORJÁNÁCS Z., HÁMOS G., HOGYOR Z., KOVÁCS B., MENYHEI L., MOLNOS I., ORSZÁG J., SIMONCSICS G., SZAMOS I., SZIKSZAI ZS., SZÜCS I., TURGER Z., VÁRHEGYI A. (Mecsekérc); VÁSÁRHELYI B. (BMÜ); MADARASI A., PRÓNAY ZS. (ELGI); SZONGOTH G. (Geo-Log); GACSÁLYI M. (Geopard) & KOVÁCS L. (Kútfej) 2007: Bataapáti hulladéktároló felszín alatti létesítményeinek előkészítési munkái 2006–2007. A földtani kutatás eredményeinek összefoglalása a Nyugati-lejtősakna 600. méterénél 1–3. kötet. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1351., 782 p.
- BARBARIN, B. & DIDIER, J. 1991: Review of the main hypotheses proposed for the genesis and evolution of mafic microgranular enclaves. — In: DIDIER, J. & BARBARIN, B.: *Enclaves and granite petrology*. Elsevier, Amsterdam, 367–375.
- 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 Közlemények* **138/2**, 229–246.
- BROWN, P. E. 1989: Flincor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data — *American Mineralogist* **74**, 1390–1393.
- BUDA, GY. 1974: Investigation of the alkali feldspar polymorphs of the Hungarian granitoid rocks. — *Acta Geologica Scientiarum Hungaricae* **18/3–4**, 465–480.
- BUDA GY. 1985: Variszkuszi korú kollíziós granitoidok képződése Magyarország, Ny-Kárpátok és a Központi Cseh (Bohémiai)-masszívum granitoidjainak példáin — Kandidátusi értekezés, Budapest.
- BUDA GY. 1999: Összefoglaló jelentés az Üveghuta–22, –23, –24 mélyfúrások granitoid kőzeteinek vizsgálatáról. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 634., 95 p.
- BUDA, GY., PUSKÁS, Z., GÁL-SÓLYMOS, K., KLÖTZLI, U. & COUSENS, B. L. 2000: Mineralogical, petrological and geochemical characteristics of crystalline rocks of the Üveghuta boreholes (Mórág Hills, South Hungary). — *MÁFI Évi Jelentés 1999-ről*, 231–253.
- BUDA, GY. & DOBOSI, G. 2004: Lamprophyre derived high-K mafic enclaves in Variscan granitoids from the Mecsek Mts. (South Hungary) — *N. Jb. Miner. Abh.* **180/2**, 115–147.

- CSÁSZÁR G. 2004: A Mórággyi-rög és környezetének betemetődési viszonyai az alpi földtani ciklus folyamán — *MÁFI Évi Jelentés 2003-ról*, 395–406.
- FYFE, W. S., PRICE, N. J. & THOMPSON, A. B. 1978: Chemistry of natural fluids — In: FYFE, W. S., PRICE, N. J. & THOMPSON, A. B. (eds): *Fluids in the Earth's crust*. Elsevier, Amsterdam, 19–45.
- GATTER, I. & TÖRÖK, K. 2004: Mineralogical notes and fluid inclusion studies on quartz-feldspar granite pegmatites and quartz veins from Mórággy and Erdősmecske granitoid, S-Hungary — *Acta Mineralogica-Petrographica*, Szeged **45/1**, 39–48.
- GERDES, A. 2006: Report on the LA-ICP-MS U-Pb dating of four borehole samples from the Mecsek Mountain granitoids. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1304., 15 p.
- GYALOG L., KOROKNAI B., GULÁCSI Z., MARS I. & KOLOSZÁR L. 2003: Az Üveghuta Üh–31 fúrás csoport (Üh–31A, Üh–31B, Üh–31C fúrás) földtani leírása — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 991., 7 p.
- GYALOG L. & SZEGŐ I. 2004: Fúrások mélyítése a Bábaapáti (Üveghuta)-telephelyen — *MÁFI Évi Jel. 2003-ról*, 93–117.
- GYALOG L., BALLA Z., CSÁSZÁR G., GULÁCSI Z., KAISER M., KOLOSZÁR L., KOROKNAI B., LANTOS Z., MAGYARI Á., MAROS GY., MARS I. & PEREGI ZS. 2006a: Földtani és geomorfológiai térképezés jelentése 1–3. kötet. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1339., 297 p.
- GYALOG L., BALLA Z., DON GY., DUDKO A., MAROS GY. & ZSÁMBOK I. 2006b: Az Üveghuta Üh–39 jelű fúrás földtani és tektonikai leírása — Kézirat, MÁFI, Budapest Tekt.1251., 54 p.
- JANTSKY B. 1953: A mecseki kristályos alaphegység földtani viszonyai. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1950-ről*, 65–77.
- JANTSKY B. 1979: A mecseki gránitosodott kristályos alaphegység földtana. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **60**, 385 p.
- KIRÁLY, E. & TÖRÖK, K. 2003: Magmatic garnet in deformed aplite dykes from the Mórággy granitoid, SE-Transdanubia, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **46/3**, 239–254.
- KIRÁLY E. & KOROKNAI B. 2004: A Mórággyi-rög ÉK-i részének magmás és metamorf fejlődéstörténete — *MÁFI Évi Jelentés 2003-ról*, 299–318.
- KLÓTZLI, U. S., BUDA, GY. & SKIÖLD, F. 2004: Zircon typology, geochronology and whole rock Sr–Nd isotope systematics of the Mecsek Mountain granitoids in the Tisia Terrane (Hungary). — *Mineralogy and Petrology* **81/1–2**, 113–134.
- KOROKNAI B. 2003: Az irányított minták mikrotektonikai vizsgálata és összefoglaló értékelése. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1004., 173 p.
- KOVÁCS-PÁLFFY P., FÖLDVÁRI M., RÁLISCH L. & BARÁTH I. 2000: Az üveghutai gránitban található repedéskitöltések ásványtani jellemzése. — *MÁFI Évi Jelentés 1999-ről*, 369–378.
- KOVÁCS-PÁLFFY P. & FÖLDVÁRI M. 2004: Hidrotermális képződmények és jelenségek a Mórággyi Gránit Formációban — *MÁFI Évi Jelentés 2003-ról*, 319–331.
- LESPINASSE, M., DÉSIDES, L., FRATCZAK, P. & PETROV, V. 2005: Microfissural mapping of natural cracks in rocks: Implication for transfers quantification in the crust — *Chemical Geology* **223**, 170–178.
- MAROS, GY. & PALOTÁS, K. 2000: Evaluation of planar features in Boreholes Üveghuta Üh–22 and Üh–23 with CoreDump software. (Az üveghutai Üh–22 és Üh–23 fúrásban észlelt síkszerű jelenségek értékelése CoreDump szoftverrel.) — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi jelentése 1999-ről*, 315–340.
- MAROS, GY. & PÁSZTOR, SZ. 2001: New and oriented core evaluation method: ImaGeo — *European Geologist* **12**, 40–43.
- MAROS GY., BALLA Z., DUDKO A., FODOR L., FORIÁN-SZABÓ M., KOROKNAI B., LANTOS M. & PALOTÁS K. 2003: Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló program. Felszíni földtani kutatás. Tektonikai zárójelentés. — Kézirat, MÁFI, Tekt. 1046., 199 p.
- MAROS GY., KOROKNAI B., PALOTÁS K., FODOR L., DUDKO A., FÓRIÁN-SZABÓ M., ZILAHÍ-SEBESS L. & BÁNGYÖRGY E. 2004: A Mórággyi-rög ÉK-i részének tektonikai elemzése és szerkezetalakulása — *MÁFI Évi Jelentés 2003-ról*, 371–394.
- MAROS GY. 2006: A Mórággyi Gránit szerkezeti fejlődése az ImaGeo magszkennéssel történt fúrásértékelések alapján. — PhD doktori értekezés, Miskolci Egyetem, 143 p.
- MAURITZ B., CSAJÁGHY G. 1952: Alkáli telérkőzetek Mórággy környékéről. — *Földtani Közölny* **82/4–6**, 137–142.
- MOLNOS I., DEÁK F., JAKAB A., SOMODI G., VÁSÁRHELYI B. (Mecsekérc Zrt.), BALLA Z., GYALOG L., GULÁCSI Z., MAROS GY., PALOTÁS K., RÁLISCH E. & SZEBÉNYI G. (MÁFI) 2006: Jelentés a Bábaapáti mélyített lejtőszaknák 0–600 fm-es szakaszán elvégzett földtani-tektonikai, geotechnikai és vízföldtani dokumentálási munkákról — Térképezési munkák — Kézirat; MÁFI, Tekt.: 1332, Mecsekérc Zrt. RHK-K-075/06., 155 p.
- OAKES, CH. S., PITZER, K. S. & STERNER, S. M. 1998: The system NaCl–CaCl₂–H₂O: Part 3. Heats of dilution and mixing at 373 to 573 K and 2105 MPa using a new high-temperature, flow-through calorimeter — *Geochimica and Cosmochimica Acta* **62**, 1133–1146.
- SZABÓ B., BENKÓ ZS. & MOLNÁR F. 2008: Fluidzárványsíkok és repedésrendszerek vizsgálatának alkalmazása granitoid kőzetek repedeztségének fejlődéstörténeti rekonstrukciójában II.: A Mórággyi Gránit repedésrendszerei. — *Földtani Közölny* **138/2**, 247–256.
- SZABÓ CS., GÁLNÉ SÓLYMOS K. & SZABÓNÉ BALOG A. 1998: Karbonátos repedéskitöltés vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid kőzetein. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 481., 71 p.
- SZABÓ CS., SZABÓNÉ BALOG A. & GÁLNÉ SÓLYMOS K. 1999: Karbonátos repedéskitöltés vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid kőzetein. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 636., 99 p.
- SZÜCS N., ANDRÁSSY M., KORPAI F. & MOLNÁR P. (Golder) 2006: A BEK–5 előfúrás kútvizsgálati záródokumentációja. — Kézirat, MÁFI, Budapest, Tekt. 1263., 14 p.
- ZHANG, Y. G. & FRANTZ, J. D. 1987: Determination of homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl–KCl–CaCl₂–H₂O using synthetic fluid inclusions. — *Chemical Geology* **64**, 335–350.

Kézirat beérkezett: 2007. 12. 18.

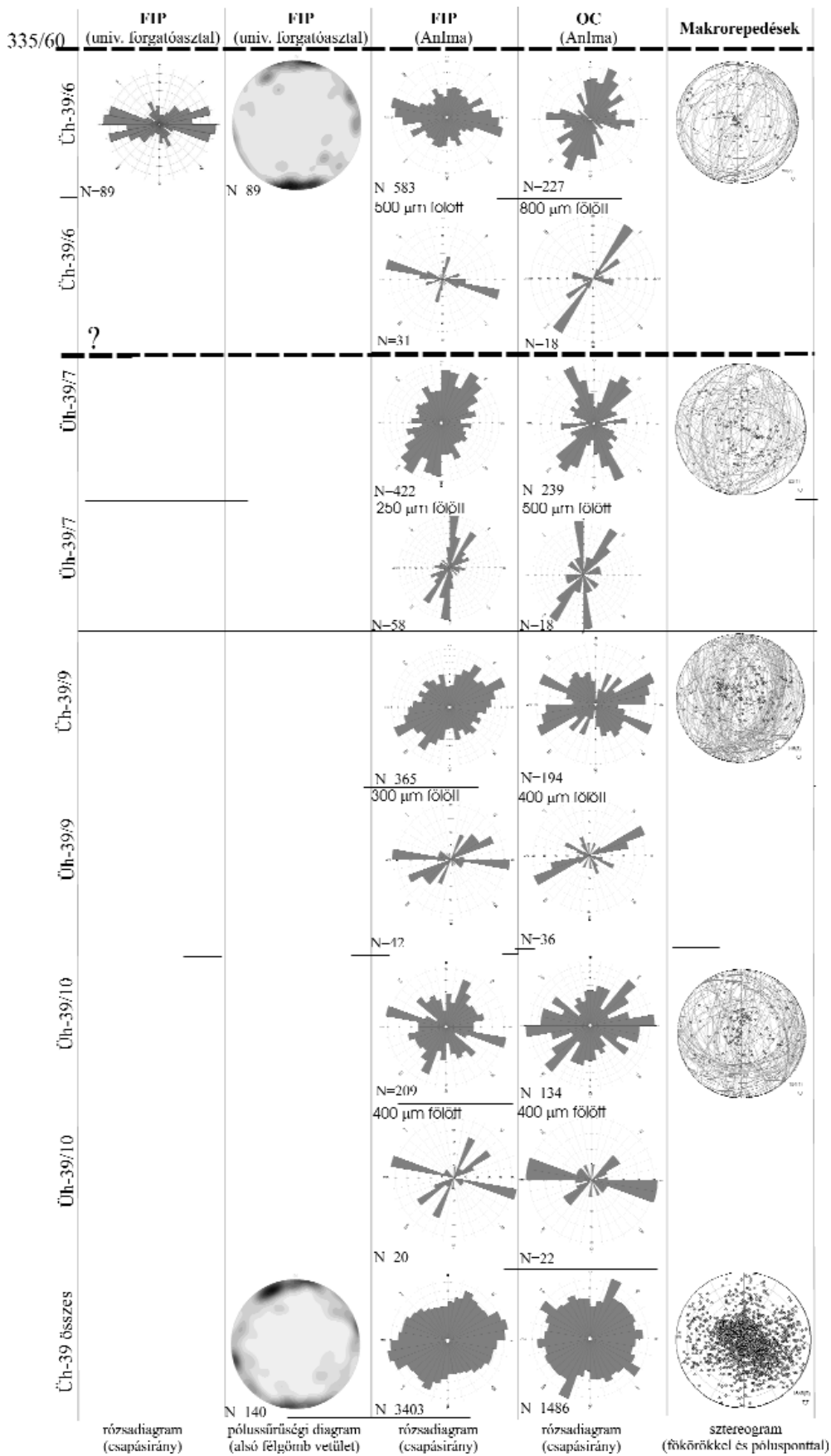
Ia. tábla — Plate Ia



Az Üh-39 jelű fúrás 1–5. mintáiban két különböző módszerrel mért mikro- és makrorepedés-irányok rózsadiagramon, pólussűrűségi diagramon és sztereogramon ábrázolva (FIP= fluidzárványsík, OC= nyílt mikrorepedés)

Orientation of micro- and macrofractures measured with two different methods on 1–5. samples from the drillhole Üh-39 on rose-diagram, density-plot (lower hemisphere projection) and stereogram (FIP= fluid inclusion plane, OC= open crack)

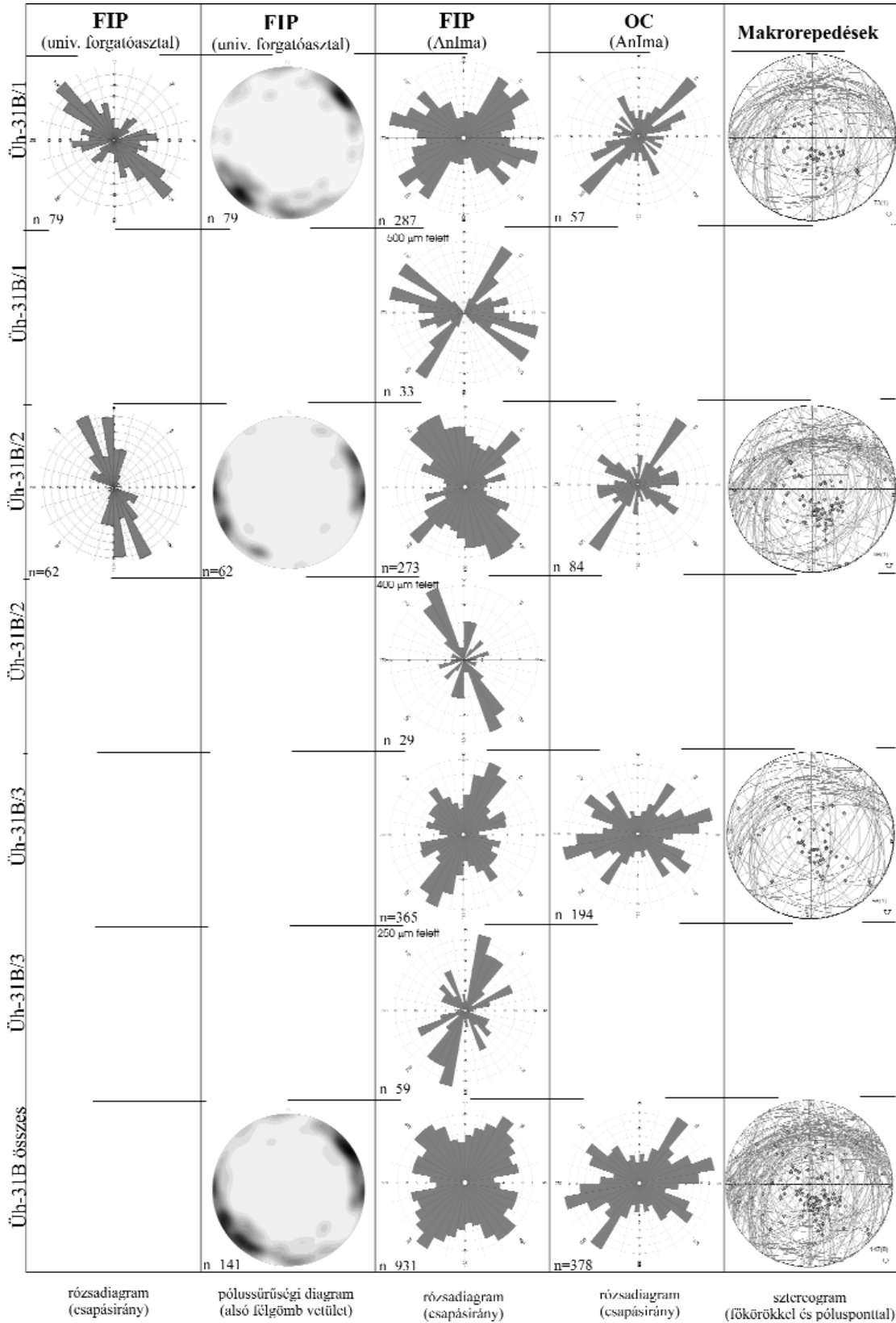
Ib. tábla — Plate Ib



Az Üh-39 jelű fúrás 6–10. mintáiban két különböző módszerrel mért mikro- és makrorepedés-irányok és a fúrásban mért összes adat rózsadiagramon, pólussűrűségi diagramon és sztereogramon ábrázolva (FIP= fluidzárványsík, OC= nyílt mikrorepedés)

Orientation of micro- and macrofractures measured with two different methods on 6–10. samples from the drillhole Üh-39 and the summarized data on rose-diagram, density-plot (lower hemisphere projection) and stereogram (FIP= fluid inclusion plane, OC= open crack)

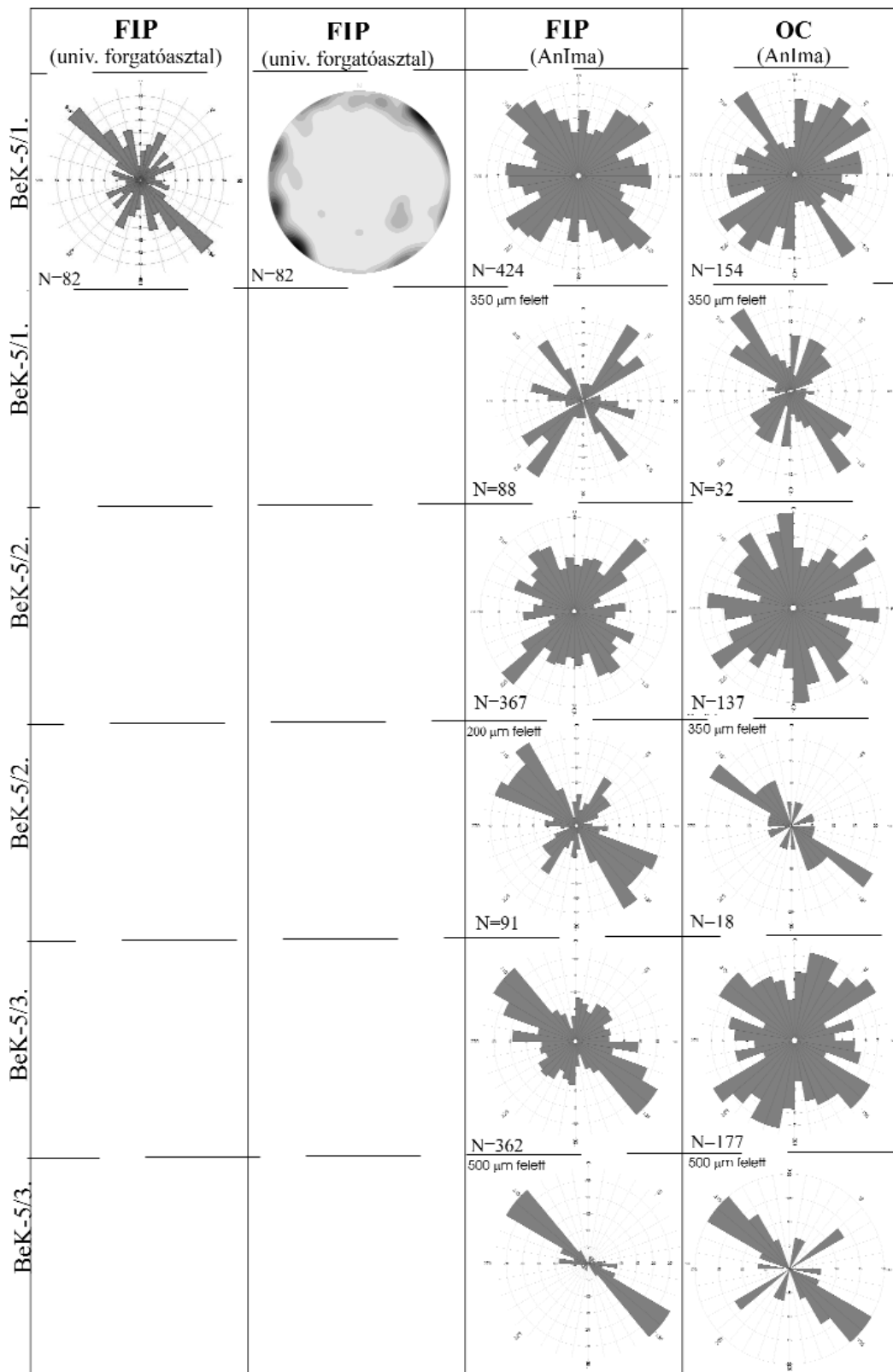
II. tábla — Plate II



Az Üh-31B jelű fúrásból származó mintákban két különböző módszerrel mért mikro- és makrorepedés-irányok rózsadiagramon, pólussűrűségi diagramon és sztereogramon ábrázolva (FIP= fluidzárványsík, OC= nyílt mikrorepedés)

Orientation of micro- and macrofractures measured with two different methods on samples from the drillhole Üh-31B on rose-diagram, density-plot (lower hemisphere projection) and stereogram (FIP= fluid inclusion plane, OC= open crack)

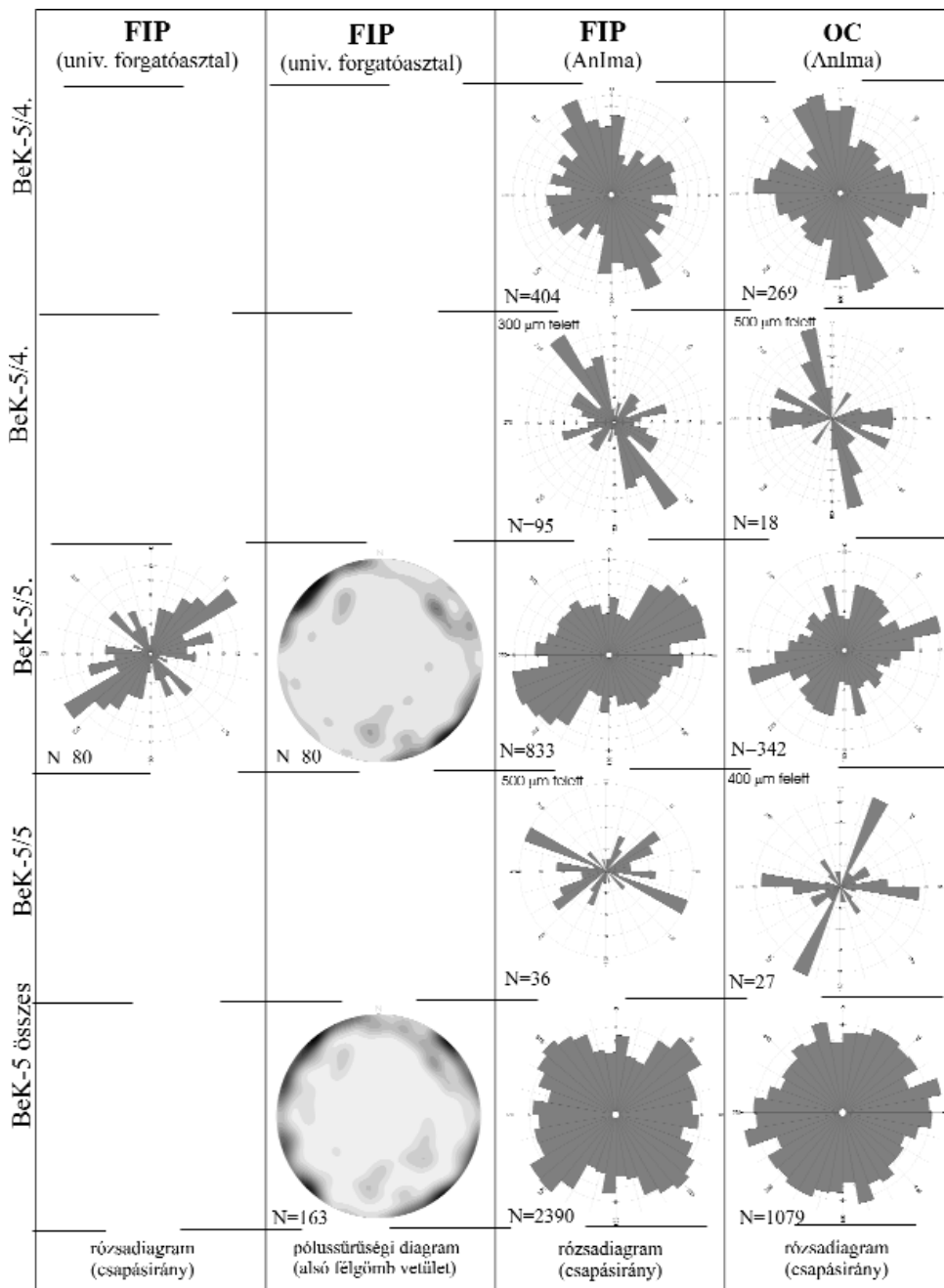
IIIa. tábla — Plate IIIa



A BeK-5 jelű fúrás 1–3. mintáiban két különböző mért mikrorepedés-irányok rózsadiagramon és pólussűrűségi diagramon ábrázolva

Orientation of microfractures measured with two different methods on samples 1–3. from the drillhole BeK-5 on rose-diagram, density-plot (lower hemisphere projection)

IIIb. tábla — Plate IIIb



A BeK-5 jelű fúrás 4-5. mintáiban két különböző mért mikrorepedés-irányok és a fúrásban mért összes adat rózsadiagramon és pólussűrűségi diagramon ábrázolva

Orientation of microfractures measured with two different methods on samples 4-5 and summarised data from the drillhole BeK-5 on rose-diagram, density-plot (lower hemisphere projection)