



139/1, 3–20., Budapest, 2009

## Eltérő szövetű karbonátterek szerepe a repedéscementáció rekonstrukciójában (Ófalu, Goldgrund-völgy)

DABI Gergely<sup>1</sup>, M. TÓTH Tivadar<sup>1</sup>, SCHUBERT Félix<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, H-6721 Szeged, Egyetem u. 2–6  
e-mail: [dabi@geo.u-szeged.hu](mailto:dabi@geo.u-szeged.hu), [mtoth@geo.u-szeged.hu](mailto:mtoth@geo.u-szeged.hu), [schubert@geo.u-szeged.hu](mailto:schubert@geo.u-szeged.hu)

### *Carbonate veins of different texture and their role in reconstructing fracture cementation (Ófalu, Goldgrund Valley)*

#### Abstract

The amphibolite member of the Ófalu Formation is exposed by an outcrop in the Goldgrund Valley, near Ófalu (Mecsek Hills, South Hungary) and is cut through by carbonate veins composed of several generations of carbonates and quartz. The main aim of the present study is to confirm the phase-sequence and to reconstruct the precipitation mechanisms of the vein minerals. Optical microscopic observations were carried out alongside cathodo-luminescent and scanning electron microscopic studies to enable careful interpretation of internal vein textures. Another goal was to delineate the physico-chemical circumstances of vein material precipitation through fluid inclusion data.

With these it became possible to define six calcite phases, one dolomite phase and one quartz phase from which parent solutions flew advectively through fracture systems or percolated through former mineral phases of the veins. The investigation also sheds light on the possible role of hydrofracturing at the time of certain fluid flow events. Based on the fluid inclusion studies the parent solutions were of a low temperature and low in salinity fluids.

*Keywords: carbonate veins, fracture cementation, Goldgrund Valley, Ófalu, Mecsek Hills, Hungary*

#### Összefoglalás

Az Ófalu Formáció amfibolit tagját — Ófalu határában — a Goldgrund (Aranyos)-völgy keleti mellékvölgye tárja fel. Vizsgálataink során a feltárt amfibolittestet átszelő karbonátterek ásványos összetételét elemeztük. Célunk volt az ereket felépítő ásványok optikai mikroszkópos megfigyelésével, valamint ezt kiegészítő elektronmikroszkópi és katód-lumineszcens mikroszkópi felvételek segítségével a kiválási sorrend felállítását, valamint az egyes ásványtípusok kiválási mechanizmusainak rekonstrukciója. Célunk volt továbbá az ásványkiválások fiziko-kémiai körülményeinek fluidumzárvány vizsgálatokkal történő körvonalazása.

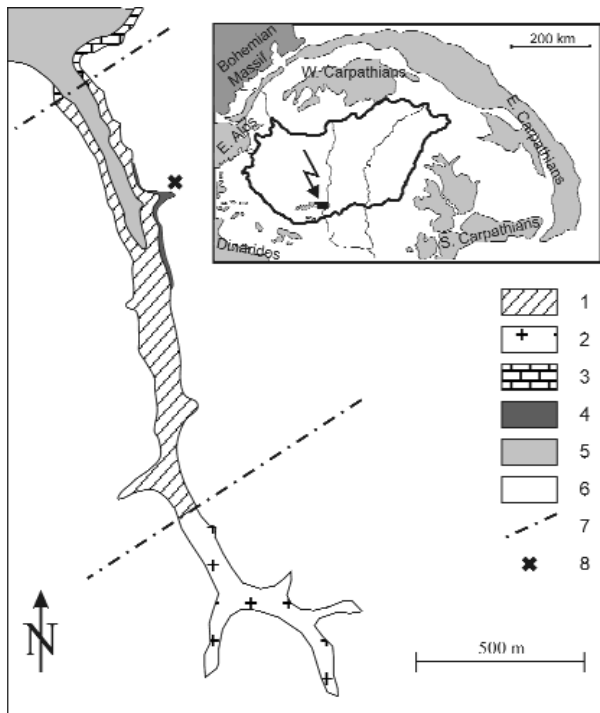
Szöveti vizsgálataink révén hat kalcit-, egy dolomit- és egy kvarckiválást sikerült meghatározni, amelyek szülőoldatai a repedérendszerben advectíven áramló, valamint a korábbi kiválásokon keresztül szivárgó oldatok voltak. Felmerült továbbá a nagy fluidumnyomásból adódó instabil kőzetmechanikai körülmények (hydrofracturing) szerepe egyes oldataramlási események kapcsán. A fluidumzárvány-vizsgálatok alapján az ásványosító fluidumok kis hőmérsékletű és sótartalmú voltára következtettünk.

*Tárgyszavak: karbonátterek, repedéscementáció, Goldgrund-völgy, Ófalu, Mecsek hegység*

#### Bevezetés, előzmények

A különböző fokú metamorfózist és nyírást szenvedett Ófalu Formáció kőzeteit legrészletesebben az Ófalu határában húzódó, É–D-i csapású Goldgrund-völgy tárja fel (1. ábra). A komplex metamorf fejlődéstörténettel jellemezhető kőzetek késői, töréses deformációjáról a felszíni kibúvásokban repedések, repedérendszer tanúskodnak. Ezek között előfordulnak nyitott repedések,

de többségben vannak a több generációban kitöltött, zárt erek. Az alábbiakban ezek szöveti, ásványkémiai vizsgálata alapján kíséreljük meg rekonstruálni a deformációtörténet késői szakaszának fluidumáramlási eseményeit. Célunk a formáció jellegzetes kőzettípusában — az amfibolitban — megjelenő vastag, több fázisban cementált karbonátterek részletes vizsgálata alapján egy olyan kiválási sorrend felállítását, amelybe a területen végzendő hasonló vizsgálatok által feltárt érkítő ásványtípusok beilleszthetők.



1. ábra. Az Ófalu-i-zóna fedett földtani térképe a Goldgrund-völgyben (BALLA 2003 után)

1 – Ófalu Formáció, 2 – Mórággyi Gránit Formáció, 3 – Vasasi Márga Formáció, 4 – pannóniai üledékek, 5 – allúvium, 6 – lösz, 7 – a Mecsek-alja-zóna határai. Részábrázó: a tanulmányozott feltárás elhelyezkedése a Pannon medencében

Figure 1. Geological sketch map of the Ófalu Zone in the Goldgrund Valley (after BALLA 2003)

1 – Ófalu Formation, 2 – Mórággyi Granite Formation, 3 – Vasasi Marl Formation, 4 – Pannonian sediments, 5 – alluvium, 6 – loess, 7 – borders of the Mecsek-alja Shear Zone. Inset: locality of the study area in the Pannonian Basin

Célunk továbbá az érkitöltő ásványok szöveti értelmezését tárgyaló nemzetközi irodalom szempontjainak alkalmazásával — és ezt kiegészítő egyéb módszerekkel — az érkitöltő ásványtípusok vizsgálatának egy lehetséges általános módszertani megközelítését adni.

Jelen munka egyben kísérlet a szintektonikus szövetek kialakulását, illetve repedésekben áramló oldatokból kivált ásványok genetikáját tárgyaló, cementációs kísérleti munkákat is magában foglaló nemzetközi irodalom alkalmazására. BONS (2000) a repedéskitöltő erekre a következő definíciót adja: „nagyobb kőzettesten belül elkülönülő polikristályos ásványi térfogatok, amelyeket egy vagy több, vizes oldatból/fluidumból kivált ásvány tölt ki.” A szintektonikus ereket kitöltő ásványtársulásokra jellemző szövetek kialakulása a növekedési versenyből (*growth competition*), ill. a növekedési anizotrópiából (*growth anisotropy*) vezethető le (BONS 2000, BONS 2001). Eszerint kőzetrepedésekben megjelenő fluidumokból kicsapódó ásványszemcsék közül azok növekednek tovább, amelyek az adott ásvány által meghatározott kedvezőbb növekedési irányok szerint váltak ki (*winner grains*), míg a többi ásványszemcse növekedése „befullad” (*loser grains*). Az érkitöltő ásványtársulásokra jellemző szövetek kialakulásához hozzájárul a „repedés-bezáródás” folyamata („*crack-seal mechanism*” BONS 2000, BONS 2001, HILGERS et al. 2001, HILGERS &

URAI 2005), amely szerint az erek diszkrét felnyílási események (*opening increments*) sorozatának eredményeként érik el végső vastagságukat. Az egyes felnyílási események során a felnyílási térbe beáramló fluidumokból válnak ki a kitöltő ásványok szemcséi. Az előbbieket együttesen vezetnek a jellegzetes rostos (*fibrous*), megnyúlt-tömbös (*elongate blocky*), vagy tömbös (*blocky*) szemcsékből álló szövetek kialakulásához. Az érben a felnyílási eseményeket a hozzájuk kapcsolódó, az egykori felnyílás síkját meghatározó fluidum- és/vagy szilárdzárvány-sorok alapján lehet azonosítani. BONS (2000) az érkitöltő ásványok szemcséinek morfológiája mellett bevezeti a kiválásra jellemző növekedési morfológiát (*growth morphology*), ami az ásványkiválás éren belüli helyzetét adja meg. A kiválás növekedési morfológiája lehet szintaxiális, ilyenkor az ásványkiválás az ér középvonalában történik, advektíven áramló oldatból (BONS 2000). Antitaxiális növekedési morfológia esetén a korábban kivált érkitöltés és a mellékkőzet között történik a kiválás, többnyire az ér mindkét oldalán (BONS 2000, HILGERS & URAI 2002a). Az így létrejövő érszövet többnyire rostos szemcsehalmazokat eredményez és a szülőoldat mellékkőzeten keresztül történő szivárgására utal (HILGERS & URAI 2002a, HILGERS & SINDERN 2005, BONS & MONTENARI 2005) Ataxiális növekedési morfológia esetén a kiválás helye a felnyílási események során változik (BONS 2000, HILGERS & URAI 2002a). A repedéskitöltő szövetek helyes értelmezése hozzájárul továbbá ahhoz, hogy a kitöltő fázisok kiválási sorrendjét, mechanizmusát, a fluidum-kőzet kölcsönhatás mértékét rekonstruálni tudjuk (OLIVER & BONS 2001).

## Földtani háttér

A Mórággyi Komplexumot északról határoló, különböző típusú metamorfotokat feltáró zóna (1. ábra) létrejött már a korai térképező munkák felhívták a figyelmet. Kifejlődését tekintve elsősorban kisméretű metamorfotokat tartalmaz (Ófalu Formáció). A formáció kőzeteire jellemző a nagyfokú szerkezeti igénybevétel, amely az eredeti szöveti kifejlődések eltüntetésével a protolit meghatározását nagymértékben megnehezíti. Korábbi munkák a zóna jellegét meghatározó kőzetek eredetét a szomszédságában lévő és vele tektonikusan érintkező gránittal összefüggésben vizsgálták. JANTSKY (1979) a formáció fő kifejlődését adó, erősen nyírt kőzetet szalagos migmatitként határozta meg, SZEDERKÉNYI (1977) a terület kisméretű metamorf jellegét felismerve vitatta annak regionális ultrametamorf keletkezési módját, ugyanakkor felvetette nyírással jellegét. A szalagos migmatithoz hasonló megjelenést metagrauwacke anyagú protolit nyírással egyidejű K-metaszomatózisával magyarázta. GHONEIM & SZEDERKÉNYI (1977), valamint SZEDERKÉNYI (1983) az Ófalu Formáció metabázikus kőzeteinek kőzet-tani és geokémiai jellegzetességeit vizsgálták, és azok paleotektonikai értelmezését kísérelték meg. A kőzetek protolitját tholeiites óceáni vulkanizmus termékeként határozták meg.

Az újabb vizsgálatok az ófalui „migmatit” kialakulását már a milonitosodással összefüggésben tárgyalták. ÁRKAI & NAGY (1994) Erdősmecskén, a gránit és a milonit tektonikus érintkezésénél található erősen nyírt amfibolitokat vizsgálta. A vizsgált amfibolok zónássága és az ásványparagenezis alapján a milonitosodás hőmérsékletét 580 °C-ban, nyomását 4 kbar-ban határozták meg a gránittal való érintkezéstől távolabb eső, a nyírás által jobban igénybevett részen és azonos hőmérséklet mellett 2 kbar-ban a gránittal való érintkezésnél. Említik a részleges olvadásra utaló szöveti elemek hiányát. LELKES-FELVÁRI et al. (2000) a Mőcsény–I fúrás ultramilonitjait vizsgálták. A kőzet gránátjainak kémiai zónássága, illetve az ásványparagenezis alapján a milonitosodás hőmérsékletét 445 °C körülnek, nyomását 5,7 és 6,3 kbar közöttinek adták meg. A prekursor kőzetet gránátartalmú, amfibolit fáciesű ortogneiszként határozták meg. Az ÁRKAI & NAGY (1994) által megadott milonitosodás körülményeitől való eltérést a zónán belül eltérő nyírás intenzitással magyarázták. A milonitosodás korát a teljes kőzet és annak biotit  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  kora alapján 303 és 270 M év közöttinek határozták meg. KIRÁLY & TÖRÖK (2003) a gránittestet átszelő aplittellérek gránátjainak kémiai analízise alapján tanulmányozták a nyírás körülményeit. A gránátok szegélyén jelentkező, a földpátokon megjelenő képlékeny szerkezetalakulási jegyekkel egyidejű, nagy Ca-tartalmú zóna alapján a milonitosodással együtt fellépő nagy arányú Ca-tartalmú fluidum-áramlást feltételeznek. M. TÓTH et al. (2005) vizsgálatai az Ófalui Formáció „migmatit” kőzettípusának cirkonjai alapján kimutatták, hogy annak protolitja S-típusú, peralumíniumos karakterű gránitgneisz, vagy annak durva, éretlen törmeléke. Monomineralikus kvarc-szemcse-határok alapján kimutatták, hogy a protolit kristályosodása 710 °C körül történnhetett, amit egy 550 °C, majd egy 350 °C körüli deformációs esemény követett, utóbbi a milonitosodás hőmérséklete. A továbbiakban a kőzetet, az utóbbi tanulmánynak megfelelően gneisz milonitnak nevezzük.

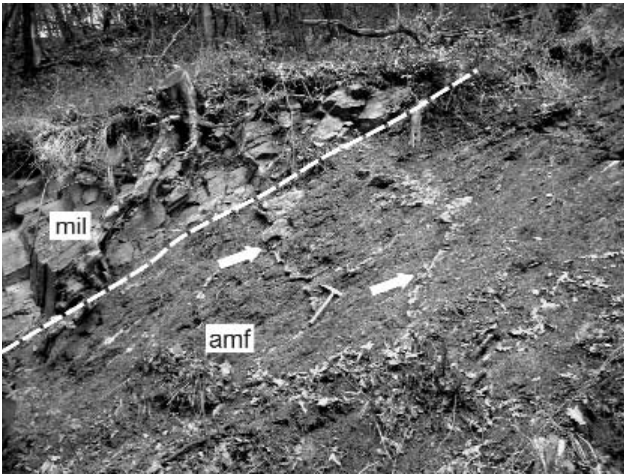
Az Ófalui Formáció paleohidrologiai fejlődése feltehetően szoros kapcsolatban állt a környező területek, elsősorban a Mórágai Komplexum evolúciójával. Itt a repedéskitöltések összetétele alapján a granitoid testet ért hidrotermális tevékenység négy típusa különíthető el: 1) kvarc-kalcit; 2) dolomit-kalcit; 3) dolomit; és 4) kalcit (SZABÓ et al. 2003). A kvarckitöltések képződését egy magas hőmérsékletű, ~250–300 °C oldatrendszerből vezetik le; a dolomitkitöltéseket, azok markáns zónássága alapján, nagy hőmérsékletű, többszörösen bepárlódó oldatokból származtatják. A kalcitok idősebb generációját festés alapján redukzív közegben keletkezettnek tartják, fiatalabb generációit ugyancsak festés eredménye alapján oxidatív környezetből vezetik le. A tisztán kalcit anyagú kitöltések létrejöttét részben egy alacsony hőmérsékletű (100–150 °C között) és mintánként erősen változó,  $0,35\% < w\text{NaCl}$  equiv.  $< 23,1\%$  szalinitású ( $-21,3 < T_m(\text{Ice}) < -0,2$  °C) oldatrendszerből, részben egy magas homogenizációs hőmérsékletű (180–280 °C) és alacsony-közepes átlagos sótartal-

mú oldatrendszerből származtatják. Megemlítik, hogy a kalcitból nyert adatok kizárólag a redukzív közeget jelző, rózsaszínen festődő kalcitból származnak. KOVÁCS-PÁLFFY et al. (2003) SZABÓ et al. (2003) itt tárgyalt és korábbi mikrotermometriai eredményeit felhasználva a karbonátos kitöltések genetikáját tárgyalja. Ugyancsak KOVÁCS-PÁLFFY et al. (2003) a mórágai repedéskitöltésekben megjelenő hidrotermális illitek kora alapján a karbonáterek képződésének idejét kiterjesztik a teljes mezozoikumra. GATTER & TÖRÖK (2004) a gránitban megjelenő pegmatitos kvarcokból valamint kvarc és kalcit anyagú kitöltések kvarc-szemcséiből másodlagos és álmásodlagos szövettű fluidumzárványok homogenizációs és utolsó jégolvadási hőmérsékletét mérték. Méréseik alapján a  $T_h$  értékek 140–150, 200–210, valamint 260–270 °C-os gyakorisági maximumokkal jellemezhetők. Alacsony hőmérsékletű méréseik során kimutatták, hogy az oldatok 0–20%  $w\text{NaCl}$  equiv. mellett  $\text{NaCl-CaCl}_2$  összetételűek. Hangsúlyozzák a Ca-tartalmú fluidumok jelentőségét a térségben. POROS (2007) a Mórágai Komplexum fluidummigrációs eseményeit vizsgálta a gránit kőzetalkotó kvarckristályainak zárványsíkjai, valamint repedéskitöltő kvarc és kalcit elsődleges és másodlagos zárványai alapján. Munkája alapján hat fluidummigrációs eseményt különített el, amelyek közül a harmadik a az érkitöltő kvarcot, a negyedik pedig az érkitöltő kalcitot hozta létre. Az előbbit ~7,6%  $w\text{NaCl}$  equiv. ( $-5,0 < T_m(\text{Ice}) < -4,8 < ^\circ\text{C}$ ) sótartalom mellett  $90 < T_h < 200$  °C homogenizációs hőmérsékletű oldatokból, az utóbbiit 0,17–4,2%  $w\text{NaCl}$  equiv. ( $-2,4 < T_m(\text{Ice}) < -0,2 < ^\circ\text{C}$ ) sótartalom mellett  $100 < T_h < 290$  °C homogenizációs hőmérsékletű oldatokból származtatja. Mindkét esetben magmás felfűtést feltételez (késő-kréta vulkanizmus) és nem zárja ki a szülőoldatok rokonságát.

## Vizsgálati módszerek

Az ófalui Goldgrund-völgyben a gneisz milonittal markáns határ mentén érintkező amfibolitestben jelenlevő karbonátos kitöltéseket vizsgáltuk (2. ábra). A terepi méréseket követően a begyűjtött 13 db minta vizsgálata az erek makroszkópos és polarizációs mikroszkópi jellemzésével kezdődött, majd ezeket katódlumineszcens mikroszkópi és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal egészítettük ki. A katódlumineszcens (CL) mikroszkópi felvételeket az MTA Geokémiai Kutatóintézet Nikon Eclipse E600 típusú mikroszkóphoz csatlakoztatott Reliotron típusú (hidegkatódos) katódlumineszcens berendezéssel készítettük, egy Nikon Coolpix 4500 digitális fényképezőgéppel, automata módban, 7–8 keV közötti gerjesztő feszültség mellett. A visszaszórt elektron (BSE) és a pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek a Szegedi Tudományegyetem Hitachi S-4700 Type II nagyfelbontású hidegkatódos téremissziós pásztázó elektronmikroszkópján készültek. A mikrotermometriai mérések a Szegedi Tudományegyetem Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszékén Olympus BX41 típusú





2. ábra. A vizsgált amfibolit feltárás és határa gneisz milonittal (szaggatott vonallal jelölve)

A mintázott ereket nyíl jelöli

Figure 2. The studied amphibolite outcrop and the contact of the amphibolite body and the gneiss mylonite (marked with dashed line)

Sampled veins are marked with arrows

polarizációs mikroszkópra szerelt Linkam THMSG 600 típusú fűthető-hűthető asztal segítségével készültek. A műszer kalibrálása kvarcba zárt szintetikus zárványokkal történt  $-56,6, 0$  és  $374$  °C-on. A mérések során elsőként a zárványok homogenizációs hőmérséklet értékeit mértük, elkerülendő a fagyasztás során esetlegesen fellépő térfogat-növekedésből adódó sűrűségcsökkenést (GOLDSTEIN & REYNOLDS 1994). A mért végső olvadási hőmérsékleteket BODNAR (1992) alapján számoltuk át NaCl ekvivalens értékekre. A fluidumzárvány-vizsgálatok eredményeinek leírására a SCHUBERT et al. (2007) által ajánlott terminusokat alkalmazzuk.

## Vizsgálatok és azok eredményei

### Mintagyűjtés

A vizsgálat tárgyát képező karbonáttereket az Ófalu melletti Goldgrund-völgyben feltárt amfibolittest foglalja magába (1. ábra). A feltárás kb. 2 m magas, kb. 10 m hosszú, nyugati irányban a gneisz milonittal éles határ mentén érintkezik (2. ábra). Kelet felé, a völgytalp emelkedésével mállott törmelékanyag alá kerül. Tovább keletre, körülbelül 20 m-re a legközelebbi szálban álló feltárásban ismét gneisz-milonit jelentkezik. Az amfibolit palás, a felszínen erősen fellazult. A karbonátos erek meredek dőlésűek, dőlés-irányuk D-DDK között változik, egyenes lefutásúak (1. tábla, a). Vastagságuk 0,5–5 cm között változik. Az erek keletkezésének időbeni viszonyára, valamint a felnyílások jellegére a vizsgált ereknek a feltárás síkjával párhuzamos csapása, dőlése (1. tábla, a) és a mellékkőzet erős bontottsága miatt a terepi megfigyelések alapján nem tudunk következtetni.

## Érpetrográfia

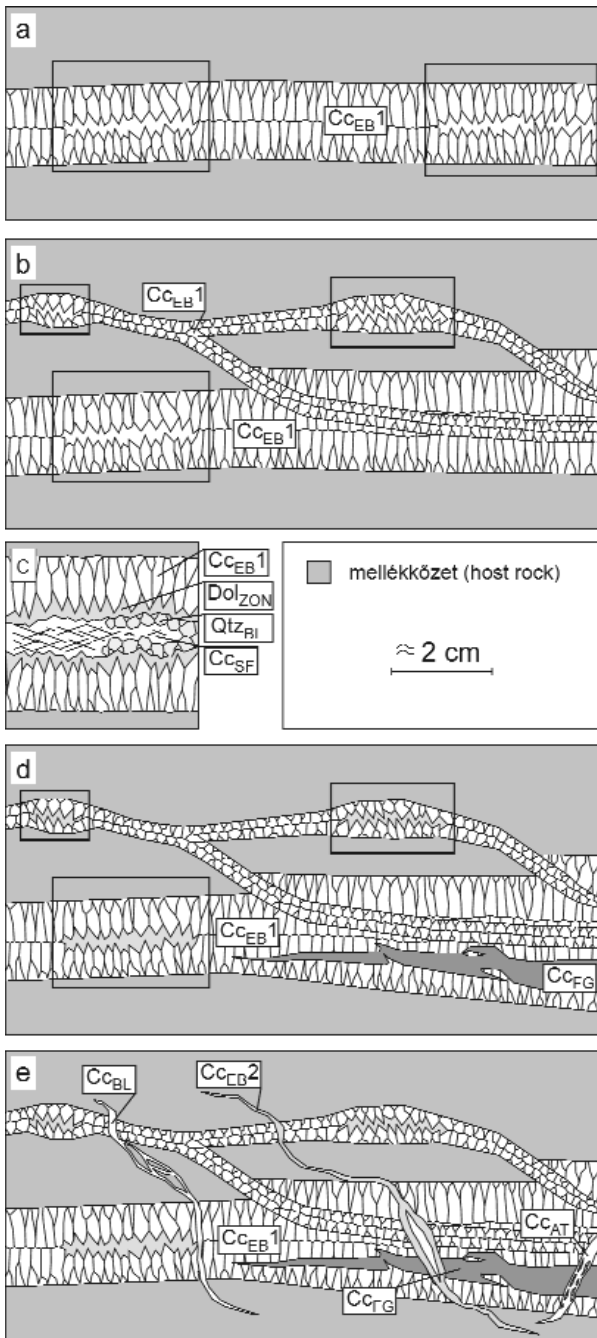
Az ereket és az azokat felépítő karbonátásványok szöveti kifejlődését a befogadó kőzet és a kiegészítő érintkezéséről (a továbbiakban érszegély) a kiegészítő középpontja felé haladva ismertetjük. Az erek szimmetrikusak, így a leírt kiválási sorrend az erek szemközi szegélyeitől indulva azonos (3. ábra, c; II. tábla, a). Az érkitöltő ásványok leírására az alábbiakban a szintektonikus szövetű erek nemzetközi irodalmában használatos terminológiát alkalmazzuk (4. ábra). A továbbiakban a fizikailag elkülönülő szövet-típusokat önálló fázisokként tárgyaljuk. A mikroszkópi megfigyelések során megkülönböztetett ásványfázisokat rövidítésükkel jelöljük, alsó indexben a rájuk jellemző szövet nagyságú rövidítésével, pl.  $Dol_{ZON}$  (zónás dolomite – zoned dolomite).

Az ereket befogadó amfibolit 500–700  $\mu$ m maximális méretű plagioklász és zöld amfibol szemcsékből áll (1. tábla, g). Az amfibolszemcsékben, valamint a szemcsék között biotit jelenik meg. Az amfibolszemcsékben gyakorta megjelennek gránátzárványok. A kőzet szöveve az előbbieken leírt ásványos összetételű mikrolitonokból (PASSCHIER & TROUW 2005) és a mikrolitonok közötti, a kőzet foliációját adó klorithálóból épül fel (1. tábla, g). A mikrolitonok közötti kloritháló egy világosabb és sötétebb kloritfajtából áll.

A karbonáttereket felépítő ásványok közül legnagyobb mennyiséget az a fehér kalcitkiválás képvisel, amely a szegélyre megközelítően merőlegesen, egymással párhuzamos megnyúlt kalcitkristályok építenek fel (II. tábla, a). Az érszegélyen apró, ~500  $\mu$ m legnagyobb átmérőjű kalcit-szemcsékből álló (loser grain) zóna látható (BONS 2000, HILGERS et al. 2001) (II. tábla, a). Ebből az aprószemcsés sávból fejlődik ki az érben uralkodó, megnyúlt-tömbös (elongate blocky) szövetű kalcit-zóna (winner grains) (II. tábla, a). A megnyúlt-tömbös kristályok a befogadó kőzet felől a kiegészítő középvonala felé haladva kiszélesednek (II. tábla, a), sűrűn ikerlemezesek. Ahol az ér középvonalában a sötétebb árnyalatú későbbi kiválások megjelennek, ott a szemközi érszegélyek irányából a kiegészítő középpontja irányában megnyúlt szemcsék szkalenoédes formákkal végződnek (II. tábla, a).

Helyenként a megnyúlt-tömbös szövetű kalcit egy kiegészítő síkon belül összetett érrendszert alkot. Ilyen helyzetben a megnyúlt-tömbös szemcséket vékonyabb, ugyancsak aprószemcsés és ennek továbbnövekedésében megjelenő megnyúlt-tömbös szövetű kalcittal kiegészített ér metszi (3. ábra, b; II. tábla, b). A vékonyabb erek a vastagabbakat részben hegyesszögben metszik, részben párhuzamosan futnak azok középvonalában néhány cm-es szakaszon. Ez a szövet makroszkóposan fonatos érrendszerként jelenik meg (1. tábla, c). A fehér, megnyúlt-tömbös szövetű kalcitkiválást a továbbiakban  $Cc_{EB1}$  fázisként említjük.

A  $Cc_{EB1}$  által kiegészített erekben helyenként aszimmetrikus helyzetben, azaz az ér egyik oldalán az érszegéllyel párhuzamosan futó kb. 1 mm vastagságú sávból aprószemcsés kiválás keresztetzi a megnyúlt-tömbös szem-



**3. ábra**

- a) A repedés felnyílását követően, a repedésrendszerbe belépő oldatokból kivált megnyúlt-tömbös szövetű kalcit ( $Cc_{EB1}$ ). A  $Cc_{EB1}$  fázis kezdeti kiválása után kitöltetlen terek maradnak fenn (négyzettel jelölve)
- b) A második felnyílási esemény során beáramló fluidum és a belőle kiváltó ásvány összetétele nem változik, míg az újonnan kialakuló repedések iránya eltér az előzőétől, kialakul a fonatos érrendszer. Továbbra is fennmaradnak kitöltetlen terek a repedésrendszeren belül (négyzettel jelölve)
- c) A fennmaradó kitöltetlen terekben a  $Dol_{ZON}$ , a  $Qtz_{BL}$  és a  $Cc_{SF}$  fázisok válnak ki (a, b, d ábrák jelölt részletei)
- d) A következő lépésben a már meglévő erek felnyílnak, az így létrejött terekben megjelenik a  $Cc_{FG}$  fázis
- e) Újabb felnyílások, ezekhez kapcsolódóan a késői erek ( $Cc_{BL}$ ,  $Cc_{AT}$  és  $Cc_{EB2}$  fázisok) kiválása

**Figure 3**

- a) Opening of the vein followed by the entering of the solutions precipitate elongate blocky calcite ( $Cc_{EB1}$ ). After closure of the vein there are still open voids exist (marked with quadrangles)
- b) The chemistry of the solution and that of the precipitated calcite belong to the next opening phase doesn't change, while the orientation of the veins differs from that of the former opening phase and the braided vein system evolves. There are still open voids exist (marked with quadrangles)
- c) The  $Dol_{ZON}$ , the  $Qtz_{BL}$  and the  $Cc_{SF}$  phases precipitates in the open voids (insets marked with quadrangles in fig a, b, d)
- d) Reopening of existing veins, precipitation of  $Cc_{FG}$
- e) Opening and precipitation of late veins ( $Cc_{BL}$ ,  $Cc_{AT}$  és  $Cc_{EB2}$ )

Az ereket felépítő ásványfázisok és azok nevezéktana a kiválás sorrendjében	Az egyes ásványfázisokat létrehozó töréses és szivárgási események
$Cc_{EB1}$ EB : elongate blocky (BONS 2000) - megnyúlt tömbös kalcit	
$Dol_{ZON}$ zónás dolomit	
$Qtz_{BL}$ BL : blocky (BONS 2000) - tömbös kvarc	
$Cc_{SF}$ SF : space filling - térkitöltő kalcit	
$Cc_{FG}$ FG : fine grain - finom szemcsés kalcit	
$Cc_{EB2}$ EB : elongate blocky (BONS 2000) - megnyúlt tömbös	
$Cc_{AT}$ AT : ataxial (BONS 2000) - ataxiális kalcit	
$Cc_{BL}$ BL : blocky (BONS 2000) - tömbös kalcit	

idő ↓

1    2

**4. ábra.** Az ereket felépítő ásványfázisok nevezéktana és a kialakulásukban szerepet játszó töréses/szivárgási események

1 – töréses esemény (a téglalapok mérete és száma a fázist létrehozó felnyílások nagyságával és számával arányos), 2 – szivárgó oldat

**Figure 4.** Terminology of vein filling mineral phases with corresponding brittle/percolation events

1 – brittle event (size and number of quadrangles is proportional to the magnitude and number of brittle episodes producing veins), 2 – percolating fluid

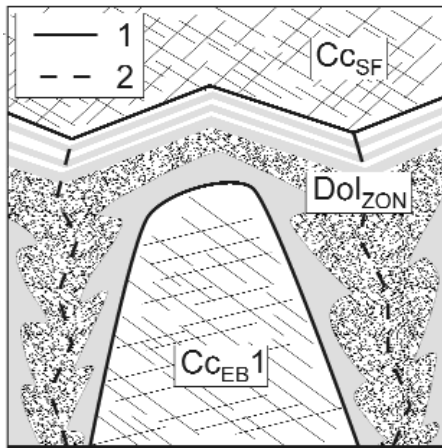
cséket (II. tábla, c). Az aprószemcsés kiválás áteső fényben részben sötétvörös, részben átlátszó karbonátszemcsékből áll. Ehhez az aprószemcsés sávhoz gyakorta sugarasan kioltó kvarc kapcsolódik (II. tábla, c).

Az ér középvonala felé haladva a  $Cc_{EB1}$  megnyúlt-tömbös szemcséi szürkésbarna, romboédes zónás dolomittal érintkeznek —  $Dol_{ZON}$  fázis (4. ábra). Ez a kiválás mindig a fehér karbonátterek középvonalában, azok maradék pórustereiben, kizárólag a megnyúlt-tömbös szemcsék szkaloédes elvégződéseinek továbbnövedéseként jelenik meg (II. tábla, a).

A  $Dol_{ZON}$  kiválás felépítése gyakran összetett (II. tábla, d; V. tábla, c), maximum 3,5 mm széles. A zóna szemcséin belül három alzóna különíthető el (5. ábra), amelyek egymással és a velük érintkező  $Cc_{EB1}$  szemcséivel folyamatos

kioltásban jelennek meg, romboédes habitusúak. A  $Cc_{EB1}$  szemcsék továbbnövedéseként rendszerint egy barnásszürke dolomitzóna jelenik meg (V. tábla, c). Ezt követi egy sötét-szürke zóna, amelynek sötét színét apró, <1  $\mu m$  zárványokból álló zárványfelhő adja (5. ábra; V. tábla, c). A  $Dol_{ZON}$  fázis legfiatalabb alzónája nem mindenütt jelenik meg, helyenként közvetlenül az első, szürkésbarna zónából fejlődik ki, mindig a kiválás utolsó alzónájaként (II. tábla, e). Szövetét tekintve tiszta, átlátszó dolomit, vékony, 7–50  $\mu m$  szélességű szürkésbarna sávokkal (5. ábra; II. tábla, e).





**5. ábra.** A Dol<sub>ZON</sub> fázis a szövetileg elkülönülő három alzónájának feltüntetéseivel, a Cc<sub>EB1</sub> és a Cc<sub>SF</sub> fázisokkal való érintkezésben

1 – fázishatárok, 2 – szemcsehatárok. A második alzóna a szemcsehatárokat kíséri

**Figure 5.** Sketch of the three optically differing subzones of Dol<sub>ZON</sub> phase, in contact with Cc<sub>EB1</sub> and Cc<sub>SF</sub>

1 – phase boundaries, 2 – grain boundaries. The second subzone follows grain boundaries

Az ércementáció következő lépcsőjében kvarc vált ki, Qtz<sub>BL</sub> fázis (4. ábra; II. tábla, d, e). A kvarckiválás a növekedési verseny (growth competition, BONS 2000) eredményeképpen létrejött kiválások szöveti bélyegeit mutatja, a Dol<sub>ZON</sub> kristályaival érintkező apró (loser grains), majd továbbnövekedésükben nagyobb átmérőjű kvarc-szemcsékkel (winner grains) (II. tábla, e). Maximális szélessége 1 mm, az egyes érsíkokban igen eltérő mértékben fejlődött ki, helyenként a Dol<sub>ZON</sub> fázis kristályain megjelenő összefüggő szemcseort alkot, máshol csak egy-egy fennőtt kristály formájában van jelen. Helyenként a Qtz<sub>BL</sub> fázis környezetében, a Dol<sub>ZON</sub> fázison belül ~1 µm vastagságú kvarccal kitöltött utólagos ér figyelhető meg.

A kalciterek utolsó fázisaként homogén, térkitöltő kalcit jelenik meg — Cc<sub>SF</sub> fázis (4. ábra). A Cc<sub>SF</sub> fázis a korábbi fázisok által közbezárt lencse alakú tereket tölti ki (3. ábra, c; II. tábla, a, d).

Helyenként előfordul, hogy a Cc<sub>EB1</sub>, a Dol<sub>ZON</sub> és a Cc<sub>SF</sub> fázisok azok teljes szélességében visszaoldódtak, átalakultak, ilyen esetben az ér makroszkóposan barna elszíneződésű (I. tábla, e). A barna erek szövetében ugyanakkor jól felismerhetők mind a Cc<sub>EB1</sub> kiválás megnyúlt tömbös szemcséi, mind a Dol<sub>ZON</sub> fázis romboéderes zónái (II. tábla g). A barna elszíneződés a Cc<sub>SF</sub> kiválás Dol<sub>ZON</sub> fázissal érintkező szegélyén is megjelenik (II. tábla, h), azaz az elszíneződést okozó fluidum a Cc<sub>SF</sub> fázis kiválását közvetlen szívargott. A barna elszíneződésű erekben nagyobb gyakorisággal fordulnak elő táblás kvarc-szemcsék (II. tábla, h).

A fehér, zónás karbonátokhoz kapcsolódóan megjelenik egy vörös színű ásvány-fázis. Szövede pátos, finomszemcsés, 60–130 µm átmérőjű szemcsékből áll (II. tábla, f), fehér és narancssárga kalciterek (I. tábla, d) metszik át. A fázis a Cc<sub>EB1</sub> fázis szemcséivel érintkezik, helyenként annak leszakított megnyúlt-tömbös szövetű szemcse-sorait tartal-

mazza (II. tábla, f). A továbbiakban Cc<sub>FG</sub> fázisként említjük (4. ábra).

A makroszkóposan elkülönülő fehér karbonát értípust vékonyabb, maximum 1,5 mm vastagságú kalciterek metszik át. A fehér karbonátokban elfoglalt helyzetük, illetve az azokat átmetsző jellegük a vékony erek előbbiekhöz viszonyított utólagos voltát bizonyítja, a továbbiakban késői erekként utalunk rájuk.

A késői erek között leggyakoribb a narancssárga színe alapján makroszkóposan is elkülönülő, megnyúlt tömbös szemcsékből álló Cc<sub>EB2</sub> fázis (4. ábra). Kristályai két zónából épülnek fel, az érszegéllyel érintkező, narancssárga felhőszerű sávokat tartalmazó kiválás zónáját tiszta kalcit váltja fel (III. tábla, a), az utóbbi nem mindenütt fejlődött ki (III. tábla, b). A késői erek közül az egyetlen, ami a befogadó közettesten belül önálló érként is megjelenik, középvonalában kitöltetlen terrel (I. tábla, f).

Szövede alapján az előbbtől elkülönülő a mellékközet szemcséinek töredékeiből, vagy az ér által átmetszett kalcit-szemcsék változatos méretű darabjaiból álló szilárd zárványsorokat tartalmazó kalcitér — Cc<sub>AT</sub> fázis (III. tábla, e, f). A befogadó közet, vagy átmetszett ér szemcséiről letépett szilárd zárványsorokat tartalmazó szövetet kialakító folyamat a többször ismétlődő felnyílás-bezáródás (crack-seal, BONS 2000, HILGERS & URAI 2005). Ugyanakkor az átmetszett szemcsék elhurcolt darabjai nem rendeződnek az ér síkjával párhuzamos sorokba, ami alapján a többszöri felnyílás-bezáródás során a felnyílási síkok helyzete változott, ataxiális szövetet eredményezve (BONS 2000, HILGERS & URAI 2002a).

A késői erek között gyakoriak a fehér, homogén kalciterek. Vastagságuk legfeljebb 1,5 mm, tömbös szemcsékből épülnek fel, amelyek nem töltik ki teljes egészében a rendelkezésükre álló teret — Cc<sub>BL</sub> fázis (4. ábra, III. tábla, c, d). A saját alakú szemcsék között gyakori a kitöltetlen póruster, tekintve a szemcsék saját alakú, szkalenoéderes elvégződéseit az ér középvonában, a kristálynövekedés az érfal felől annak középvonala felé irányult.

#### A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek értékelése

A fázisokról, azok határain Mg-, Ca-, Fe-, Mn- és Sr-elemterképeket és visszaszórt elektronképeket készítettünk.

A Cc<sub>EB1</sub> fázis kristályai tiszta kalcitből épülnek fel, az összes mért elem közül kimutatható mennyiségben csak Ca van jelen a rácsban (IV. tábla, l, v). A Dol<sub>ZON</sub> a BSE felvételeken, valamint az elemterképeken a fázis szemcséibe beépülő Mg alapján a Cc<sub>EB</sub> fázistól jól elkülönül (IV. tábla, m, x). A Cc<sub>EB1</sub> fázishoz képest a Mn-tartalom megnövekedik (IV. tábla, n, y). A fázis második alzónája a BSE felvételeken mint egy vastagabb sávba rendeződő, felhőszerű foltokból álló zóna jelenik meg (IV. tábla, k, u), amelyben a Ca-tartalom a Mg-tartalom rovására megnő, a Mn-tartalommal együtt (IV. tábla, n). A Dol<sub>ZON</sub> harmadik alzónájában a Mg és a Ca az első alzónához hasonlóan homogén eloszlású, a szövetben megfigyelhető sávos oszcilláció a Mn-elemterképeken nem jelentkezik (IV. tábla, s). A Cc<sub>SF</sub> fázis az elemterképeken alap-

ján Mn-tartalmú kalcit (IV. tábla, s). Az elemterképek alapján a  $Cc_{EB1}$  a  $Dol_{ZON}$  és a  $Cc_{SF}$  fázisok Fe-tartalmában nincs különbség (IV. tábla, o, t, z).

Az  $Cc_{BL}$  kiválasztásról készített elemterképen a szomszédos fázisokhoz ( $Cc_{EB1}$ ) viszonyítva az elemeloszlásban nem tudunk különbséget kimutatni. Az  $Cc_{AT}$  és a  $Cc_{FG}$  fázisról készült elemterkép az  $Cc_{AT}$  által kitöltött eret a  $Cc_{FG}$  kiválasztás átmetsző helyzetben tárja fel (IV. tábla, a–e). A felvétel a  $Cc_{FG}$  fázis magas vastartalmára, valamint a  $Cc_{AT}$  fázis  $Cc_{FG}$ -hez viszonyított magasabb Mn-tartalmára hívják fel a figyelmet. A  $Cc_{FG}$  fázisról készült visszaszórt elektronképeken látható, hogy annak fő tömegét kalcit alkotja, benne hematit- és kvarczárványokkal (III. tábla, g). A hematitárványok rostos, szálas szemcsék koncentrikus halmazaiént jelennek meg (III. tábla, h).

A visszaoldott, barna elszíneződésű, megnyúlt tömbös szövétű szemcsékről készült visszaszórt elektronkép és elemterkép (IV. tábla, f–j) alapján a szemcséket főképp kalcit építi fel, foltokban Fe és Mn dúsul. A visszaszórt elektronképen 120  $\mu$ m legnagyobb átmérőjű táblás kvarcsejtszemcse is megjelenik (IV. tábla, f), valamint elszórtan apró hematitsejtszemcsék (IV. tábla, j).

#### Katódlumineszcens mikroszkópia

A mikroszkóposan elkülönülő érkitöltő fázisok a katódlumineszcens felvételeken is jól elkülönülnek, illetve az utóbbiak több, áteső fényben végzett vizsgálat mellett nem felismerhető mikroerek (*healed microfracture*, MILLIKEN & LAUBACH 2000, LAUBACH et al. 2004), mikroérrajok létre is felhívják a figyelmet (V. tábla, a).

A  $Cc_{EB1}$  fázis kristályai nem lumineszkálnak (V. tábla, b, d), szemcséit utólagos sárga lumineszcens színű érraj metszi át (V. tábla, a). Ugyancsak a  $Cc_{EB1}$  fázis kristályainak érintkezési vonalában gyakorta megjelenik egy sárga lumineszcens színű fázis (V. tábla, e), a kristályokon belül több helyütt a dolomitra jellemző piros CL szín jelentkezik, felhőszerű ám egyértelműen az egyes szemcsék szkaloenoédes kristálylapjaival párhuzamos zónákban (V. tábla, e). Ugyanez a piros lumineszcens szín pontszerűen elszórva is megjelenik a  $Cc_{EB1}$  kristályjaiban. A  $Dol_{ZON}$  fázis a dolomitra jellemző piros CL színt mutatja (V. tábla, b, d, e). A szemcséken belül gyakorta felhőszerű zónákban sárga lumineszcens színű zóna jelenik meg. Utóbbi az áteső fényben megfigyelt második alzónával egyértelműen azonosítható (V. tábla, c, d). A mikroszkópi vizsgálatokkal elkülönített harmadik alzóna katódlumineszcens felvételeken vékony, eltérő lumineszcens színű sávokból álló oszcilláló zóna (V. tábla, b). A  $Cc_{SF}$  fázis homogén, sárga-narancssárga lumineszcens színű (V. tábla, b).

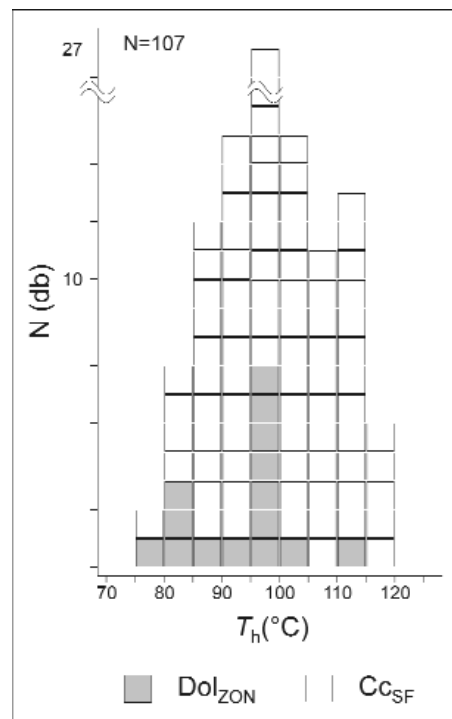
Az  $Cc_{BL}$  fázis kristályai nem lumineszkálnak, ugyanakkor a fázisról készült katódlumineszcens kép egy korábbi lumineszcens mikroeret tett láthatóvá, amelynek az újrafelnyílásával kialakult repedésben vált ki az  $Cc_{BL}$  fázis (V. tábla, f). Erre utalnak a korábbi ér leszakított darabjai (V. tábla, f). Az  $Cc_{AT}$  fázis lumineszcens színe sárga-narancssárga (V. tábla, g), a  $Cc_{FG}$  fázis pirosas-barnás (V. tábla, e).

A  $Cc_{EB1}$  és a  $Dol_{ZON}$  fázisról készült lumineszcens felvételek a  $Cc_{EB1}$  valamint a  $Dol_{ZON}$  fázisokat átmetsző hajszálérrajot tártak fel (V. tábla, a). Ezek lumineszcens színe sárga, vastagságuk max. 10  $\mu$ m. Kifejlődésük alapján elkülöníthetők az ereken belül kevésbé összetöredezett, valamint az átmetsző sárga lumineszcens színű erek által sűrűn átjárt, erősen összetöredezett zónák.

#### Fluidumzárvány-petrográfia és mikrotermometria

Mikrotermometriai méréseket a  $Dol_{ZON}$ , a  $Cc_{SF}$  és a  $Qtz_{BL}$  fluidumzárványain végeztünk, mivel a vizsgált fázisok közül csak ezek tartalmaztak mérhető fluidumzárványokat.

A  $Dol_{ZON}$  fázis petrográfiailag elkülönülő, a romboéderlapokkal párhuzamos átlátszó és szürkésbarna sávokból álló harmadik alzónájában előforduló elsődleges zárványai bizonyultak mérhetőnek, a fázis középső, zárványfelhős zónájában jelenlévő zárványok apró méretük (3  $\mu$ m legnagyobb átmérő) miatt mérésre alkalmatlannak bizonyultak. A zárványok a szemcsék átlátszó sávjaiában foglalnak helyet, 5  $\mu$ m legnagyobb átmérőjű, kis gőz/folyadék térfogatarányú ( $f_v$  (25 °C) ~0,1) kétfázisú fluidumzárványok. A zárványok homogenizációs hőmérséklete 75 és 118 °C közötti intervallumban változik, 95 és 100 °C közötti gyakorisági maximummal (6. ábra). Homogenizáció után szobahőmérsékletre való visszahűtés után a zárványokban nem következik be a gázfázis nukleációja, így azok végső olvadási hőmérséklet mérésére alkalmatlanná váltak.



6. ábra. A  $Dol_{ZON}$  és a  $Cc_{SF}$  fázisokban mért zárványok  $T_h$  értékeinek gyakorisági hisztogramja

Figure 6. Histogram of measured  $T_h$  data of fluid inclusions in  $Dol_{ZON}$  and  $Cc_{SF}$  phases

Azokban a zárványokban, amelyekre vonatkozóan homogenizációs hőmérsékletmérések nem zajlottak, sem sikerült utolsó jégolvadási hőmérsékleteket mérni, mivel a szilárd fázis — buborék megjelenése nélkül — 0 °C fölött, meta-stabilan olvadt meg.

A  $Qtz_{BL}$  fázis zárványai változatos méretűek, egyes esetekben elérik a 20  $\mu m$  legnagyobb átmérőt és a saját alakú kvarckristályok szemcsehatáraival párhuzamos zónákban helyezkednek el. Jellemző továbbá, hogy a nagyobb méretű kvarckristályok  $Dol_{ZON}$  fázissal való érintkezésénél az apró (~5  $\mu m$  legnagyobb átmérőjű) zárványok egymással és a kristálylapokkal párhuzamos sorokba rendeződnek. A fluidumzárványok Raman-spektrumuk alapján (publikálatlan adat) egyfázisú vizes zárványok.

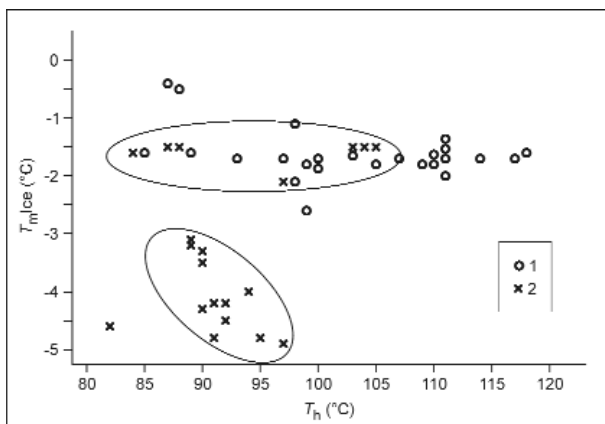
A  $Cc_{SF}$  fázis fluidumzárványainak genetikai típusa nem határozható meg bizonyosan, mivel a térkitöltő kalcit nem mutat növekedési zónákat, amelyek alapján elsődleges zárványgenerációkat egyértelműen azonosítani lehetne. Így a fázist hosszabb-rövidebb szakaszon átszelő síkba rendeződő zárványokat másodlagos, míg az ilyen síkokhoz nem köthető, elszigetelten előforduló zárványokat elsődleges eredetűnek tételeztük fel. A mért zárványok kis hányadában — szobahőmérsékletre visszahűtve — nem jelent meg buborék, így nem volt alkalmas további jégolvadási hőmérséklet mérésekre, a zárványok nagyobb hányadában ugyanakkor az utolsó jégolvadási hőmérséklet mérések sikerrel zajlottak. Az elsődleges zárványok alakja változatos, méretük 5–15  $\mu m$  maximális átmérő között változik, a jellemző  $f_v(25\text{ °C})$  érték körülbelül 0,1. Az elsődleges zárványok homogenizációs hőmérsékletei a 85 és 119 °C közötti intervallumban helyezkednek el (7. ábra), utolsó jégolvadási hőmérsékleteik pedig a jól körülhatárolható, -2,7 – -0,4 °C közötti intervallumban szóródnak (7. ábra). Ez alapján az elsődleges zárványok szalinitása 0,7% <  $wNaCl$  equiv. < 4,7%. A másodlagos zárványok homo-

genizációs hőmérsékletei 82 és 98 °C között adódtak (7. ábra). Végso jégolvadási hőmérsékleteik alapján elkülöníthető egy, az elsődleges zárványokkal azonos, -2,1 °C <  $T_m(Ice)$  < -1,5 °C (2,6% <  $wNaCl$  equiv. < 3,6%) és egy alacsonyabb -4,8 °C <  $T_m(Ice)$  < -3,1 °C (5,1% <  $wNaCl$  equiv. < 7,6%) végso jégolvadási hőmérséklettel jellemezhető fluidum.

## Diszkusszió

Az együttesen alkalmazott mikroszkópi-szöveti, pász-tázó elektronmikroszkopos és katódlumineszcens vizsgálataink az amfibolit ereit kitöltő ásványfázisok és azok relatív időbeli sorrendjének azonosítását tették lehetővé. Az utolsó három fázis kiválási sorrendje nem tisztázott, mivel az egymást átmetsző szöveti viszonyait feltáró mintát nem találtunk.

A vizsgált erek kitöltő fázisai közül az első a  $Cc_{EB1}$  fázis (3. ábra, a–e; II. tábla, a) amely egyben a legnagyobb tömeget képviseli, az elemterképek alapján tiszta kalcit-fázisnak tekinthető (IV. tábla, k–o, u–z). Növekedési morfológiáját tekintve szintaxiális, azaz a fázist alkotó szemcsék kiválása az ér középvonalában zajlott, a szemcsék az érfal felől az ér középvonala felé fiatalodnak (BONS 2000, PASSCHIER & TROUW 2005). A szemcsék morfológiáját tekintve megnyúlt-tömbös szövetű kitöltés, amely a szemcsék közötti növekedési verseny eredményeként létrejövő szövetek sajátja, egyben advektív áramlással szállítottó oldatokból történő kiválást jelez (BONS 2000, PASSCHIER & TROUW 2005, HILGERS et al. 2001). Az esetenként több cm vastag repedésekben történő advektív fluidumáramlás ugyanakkor kizárja a befogadó kőzettel való kölcsönhatást (OLIVER & BONS 2001), mivel a kezdeti kiválás után a fluidum már nem érintkezik a mellékkőzettel. Az érrendszert a  $Cc_{EB1}$  fázis kristályai egyenletes mértékben töltik ki, az erek középső, megnyúlt lencseszerű tereit leszámítva, a teljes teret elfoglalják. LEE et al. (1996) kalcit-cement egyenletes érbeli eloszlásának kialakulási feltételeit vizsgálták MORSE & MACKENZIE (1993) kalcitkiválásra vonatkozó termodinamikai modelljének alkalmazásával. Eredményeik alapján egy repedésrendszerbe belépő oldatban a megváltozott körülmények hatására meginduló ásványkiválás miatt a túltelítettség mértéke jelentősen csökken, a beáramlás helyétől távolodva egyre kisebb mértékű ásványkiválást eredményezve. Így az érrendszerbe való belépés helyszínéhez közel az áramlási pályák bezáródnak, az érrendszer pedig nem képes teljes mértékben kitöltődni. Következéseiket HILGERS & URAI (2002b, 2003) cementációs kísérleti eredményei is alátámasztják. LEE et al. (1996) modellje alapján egyenletes érbeli kalcit-cement eloszlás az ásványosító oldat nagy mértékű túltelítettsége esetén csak nagy, a természetben valószínűtlen áramlási sebességek esetén alakulhat ki. Alacsonyabb áramlási sebesség esetén az ásványosító oldat kismértékű túltelítettsége teszi lehetővé a kalcit-cement egyenletes érbeli eloszlását, ami ugyanakkor extrém ( $10^5$ – $10^6$ ) oldat/



7. ábra. A  $Cc_{SF}$  fázisban mért fluidumzárványok végso jégolvadási hőmérséklet ( $T_m(Ice)$ ) értékei a homogenizációs hőmérséklet ( $T_h$ ) értékek függvényében

1 – elsődleges zárványok, 2 – másodlagos zárványok. Az elkülönülő másodlagos fluidumzárványok csoportjai bekarikázva

Figure 7. Final melting temperature ( $T_m(Ice)$ ) vs. homogenisation temperature ( $T_h$ ) diagram of fluid inclusions in  $Cc_{SF}$  phase

1 – primary inclusions, 2 – secondary inclusions. The different groups of secondary fluid inclusions are marked



ásvány térfogatarányt feltételez. Az érképződéshez szükséges időtartam tízezer-től néhány millió év lehet, az ásványosított fluidum kemizmusának és az érrendszer dimenzióinak függvényében (LEE & MORSE 1999). DABI et al. (2006) a  $Cc_{EB1}$  fázis kristályainak növekedési irányával párhuzamos vonalak mentén felvett UV spektrumok matematikai analízise alapján oszcillációs mintázatokat mutatott ki. Folyadékokból kicsapódó ásványok kiválásával egyidejűen keletkező oszcillációs mintázatok kialakulásának fontos feltétele az ásványosító oldat nagy mértékű túltelítettsége (WANG & MERINO 1992). Ez ugyanakkor LEE et al. (1996) modellje értelmében a  $Cc_{EB1}$  fázis keletkezésekor a repedésrendszerben mozgó oldatok nagy áramlási sebességét, ezzel együtt pedig az ásványosító fluidum forrásának a kiválás helyétől való nagyobb távolságát valószínűsíti.

BONS (2001), HILGERS et al. (2001), valamint NOLLET et al. (2005) numerikus modelljei értelmében megnyúlt-tömbös szövetű érképződés akkor jöhet létre, ha az egyes felnyílási események közötti időtartam a szemcsék lassú növekedési sebességéből adódóan vagy az egyszeri felnyílás nagysága miatt nem elegendő a repedés teljes kitöltéséhez. Ilyen esetekben a repedés falán kivált ásványszemcsék „növekedési anizotrópiája” eredményeként beindul a szemcsék közötti növekedési verseny, megnyúlt-tömbös szemcsehalmozott eredményezve. A vizsgált fonatos érrendszerre jellemző, hogy a  $Cc_{EB1}$  fázis kristályai vékonyabb kitöltést alkotnak a fázis által kitöltött korábbi repedésen keresztül (I tábla, c, 3. ábra, b–e; II tábla, b). Ezek a vékonyabb erek aztán néhány cm-en belül egyesülnek a korábbi érrel. A kialakult szerkezet lehetséges magyarázata, hogy a  $Cc_{EB1}$  fázist létrehozó oldat több nagyobb felnyílás során érkezett a kiválás helyszínére, mialatt a felnyílási eseményt létrehozó feszültségtér megváltozott. A  $Dol_{ZON}$  fázissal érintkező szkalenoéderek olyan szemcsék jelenlétét jelzik, amelyek növekedése az érrendszer bezáródása miatt leállt. Ezután a többszöri felnyílás és cementáció után is maradtak fenn az érrendszeren belül kitöltetlen térrészek (3. ábra, b).

A  $Cc_{EB1}$  fázis nem lumineszkál, ugyanakkor a katód-lumineszcens felvételek a fázison belül elkülönülő narancssárga lumineszcens színű mikroérraj létrehozására hívják fel a figyelmet (V. tábla, a). Ez az érraj áteső fényben készült mikroszkópi képeken nem figyelhető meg, mivel az újonnan megjelenő kalcitfázis a befogadó kalcittal optikailag folytonos kiválást képez és visszaszórt elektronképen sem látható (MILLIKEN & LAUBACH 2000). A megnyúlt-tömbös szemcsék határához kapcsolódó narancssárga lumineszcens színű fázis (V. tábla, e) a szemcsehatárok között kialakuló áramlási pályák létrehozására enged következtetni. A szemcsehatárok közötti kiválás a  $Dol_{ZON}$  fázisban is megjelenik.

Az éren belül a  $Cc_{EB1}$  fázisok kiválása után visszamaradt terekben zajlott a zónás dolomit ( $Dol_{ZON}$ ) kiválása (3. ábra, c). A  $Dol_{ZON}$  fázis minimális kiválási hőmérséklete a  $T_h$  adatok alapján 95–100 °C. Lumineszcens színe vörös, ami a dolomitra jellemző 590 és 676 nm-es lumineszcens csúcsokból tevődik össze és a  $Ca^{2+}$  és a  $Mg^{2+}$  helyére

beépülő  $Mn^{2+}$  bocsátja ki (MACHEL et al. 1991). A  $Mn^{2+}$  jelenlétét a fázisról készített elemterképek is alátámasztják (IV. tábla, n). MACHEL & BURTON (1991), valamint MACHEL (2000) munkáikban a diagenetikus karbonátok katód-lumineszcens színét meghatározó  $D_{Me}$  értéket (a fluidum és a szilárd fázis közötti, a lumineszcenciát okozó nyomelemre vonatkozó megoszlási együttható) geokémiai tényezők összetett rendszerének eredőjeként vezetik le és felhívják a figyelmet az ezekben érvényesülő lokális folyamatok jelentőségére. A jelen munkában alkalmazott lumineszcens analitikai eljárás nem tesz lehetővé további geokémiai következtetéseket, viszont alkalmas az egyes fázisokat létrehozó szülőoldatok áramlási pályáinak azonosítására, behegedett mikroerek kimutatására (*healed microfracture*, MILLIKEN & LAUBACH 2000, LAUBACH et al. 2004), illetve ezek egymást átmetsző viszonyai alapján egyes esetekben a kiválási sorrend meghatározására. A  $Dol_{ZON}$  fázisra jellemző vörös lumineszcens színű erek, mikroerek formájában nem jelentkezik a vizsgált mintákban, viszont gyakorta azonosítható a  $Cc_{EB1}$  fázison belül felhőszerű alakzatokban (V. tábla, e). Ennek alapján a fázis szülőoldatának áramlási pályái nem repedésekhez kapcsolódtak, hanem a korábbi  $Cc_{EB1}$  fázison keresztül szivárogtak, a szivárgási pályák mentén metasomatizálva azt. A  $Dol_{ZON}$  fázis által kitöltött maradvány porozitás egymástól elszigetelt üregek formájában létezett az érrendszerben, ami kizárja a szülőoldat advektív áramlási módját. A  $Dol_{ZON}$  fázis harmadik alzónája párhuzamos, változó intenzitású és színű lumineszcens sávokból álló zóna (V. tábla, b), ami MACHEL & BURTON (1991), valamint MACHEL (2000) értelmezésében zárt rendszerben történő kristályosodás során alakulhat ki. Ez a szöveti bélyeg megerősíti azt az értelmezést, miszerint a fázis szülőoldata nem repedésrendszerbeli áramlással, hanem a korábbi  $Cc_{EB1}$  fázison keresztül történő szivárgással a kiválás helyszínére érkezett, majd zárt rendszerben bepárlódó oldat lehetett (MACHEL 2000). Ugyanakkor a  $Dol_{ZON}$  fázison belül sárga-narancssárga lumineszcens színű felhők jelentkezők, a dolomitszemcsék szemcsehatárához kapcsolódó és a romboéderlapokkal párhuzamos zónákban, a zóna szövetileg elkülönülő második alzónájával egyértelműen azonosíthatóan (V. tábla c, d). Ez a lumineszcens szín a  $Cc_{EB1}$  fázis megnyúlt szemcséinek a határain is megfigyelhető, azaz a  $Dol_{ZON}$  fázis kiválását követően egy újabb, a szemcsék határain szivárgó oldatból kivált kalcitfázis azonosítható. A  $Dol_{ZON}$  fázis második alzónáját létrehozó oldattal kapcsolatban felmerülhet, hogy advektíven áramlott a korábbi fázisok által kitöltetlen terekben és a  $Dol_{ZON}$  fázison belül annak felhőszerű megjelenése az áramlással egyidejű visszaoldódás következménye. Ennek azonban ellentmond és a szülőoldat szemcsehatárok mentén zajlott szivárgását támasztja alá az a tény, hogy a lumineszcens alzóna a  $Dol_{ZON}$  fázis szomszédos szemcsehatárain is megjelenik, nemcsak az első alzóna érközépvonala felé eső részén, ahol az áramló oldattal a  $Dol_{ZON}$  fázis érintkezhetett volna. Ezt a lehetőséget támasztja alá, hogy a visszaszórt elektronképeken a második alzóna gyakran felhőszerű foltokként jelenik meg (IV. tábla, u).

A  $Qtz_{BL}$  tömbös szövetű szemcsehalmozai (3. ábra, c) mentén megjelenő, a  $Dol_{ZON}$  fázist átmetsző kvarccal kitöltött repedések alapján a fázist létrehozó szülőoldat repedésrendszerben áramlott a kiválás helyszínére. Ezt a  $Qtz_{BL}$  fázis kisebb vesztes és azok továbbnövekedésében megjelenő nagyobb győztes szemcsékből felépülő szövete is jelzi (II. tábla, e), ami a szülőoldat advektív áramlással történő szállítódásának jellemzője (BONS 2000, PASSCHIER & TROUW 2005, BONS 2001, HILGERS et al. 2001). GOLDSTEIN & REYNOLDS (1994) szerint szobahőmérsékleten egyfázisú fluidumzárványok a fluidum 50 °C alatti hőmérsékletét jelzik a csapdázódáskor. Ilyen alacsony kiválási hőmérséklet ugyanakkor nehezen értelemezhető a  $Qtz_{BL}$  fázis kiválását megelőző  $Dol_{ZON}$  és az azt követően kivált  $Cc_{SF}$  elsődleges folyadékzárványainak magasabb homogenizációs hőmérsékletei alapján. Sokkal valószínűbb, hogy a zárványokban lévő fluidum szobahőmérsékleten metastabil állapotban van, ami szintén alacsony elméleti homogenizációs hőmérsékletet jelez, de a megfelelő nyomáskorrekcióval nem zárja ki a magasabb csapdázódási hőmérsékletet.

A  $Cc_{SF}$  fázis (3. ábra, c) Mn-tartalmú kalcit, a mikrotermometriai mérések alapján alacsony szalinitású (0,7% <  $wNaCl$  equiv. < 4,3%) oldatokból vált ki, 95–100 °C minimális kiválási hőmérséklet mellett. Az azonos végső jégolvadási hőmérséklettel rendelkező másodlagos zárványsorok alapján a fluidum összetétele a későbbiekben nem változott, ám ugyanezen zárványok alacsonyabb homogenizációs hőmérséklet értékei alapján hűlő oldatrendszerrel számolhatunk. A  $Cc_{SF}$  fázis lumineszcens színe alapján megegyezik a  $Cc_{EB1}$  fázis szemcsehatáraihoz kapcsolódó narancssárga lumineszcens színű fázissal, valamint a  $Dol_{ZON}$  fázisban megfigyelhető narancssárga lumineszcens színű metasomatikus fázissal, és a  $Cc_{EB1}$  fázist átmetsző mikroérrajjal. A CL képeken azonosítható szivárgó oldatokkal és a korábbi fázisokat átmetsző mikroérrajokkal való lehetséges azonosságok alapján a szivárgó oldatok repedések kialakulásában játszott szerepe valószínűsíthető (*hydrofracturing*, TWISS & MOORES 1997, BONS 2000). Azaz a fázis szülőoldata a mellékközetben és a korábbi kitöltő fázisokon keresztül szivárgott, amivel párhuzamosan a pórusnyomás nőtt, ami a hatékony feszültséget csökkentette egészen addig, míg a kőzet megrepedt (a  $Cc_{EB1}$  fázist átmetsző mikroérrajok mentén felnyílt). Ez a folyamat a narancssárga lumineszcens színű mikroerek egymást helyenként átmetsző viszonya alapján nem egyszeri esemény lehetett. Ezt alátámasztják a  $Cc_{SF}$  fázisban a fázis szülőoldatához hasonló kemizmusú másodlagos zárványsorok, azaz a fázis szülőoldata a fázis kiválása után bekövetkező felnyílások során is jelen volt. A többszöri felnyílás során a szülőoldat hőmérséklete csökkent, változatlan sótartalom mellett (másodlagos zárványsorok: 84 °C <  $T_h$  < 105 °C, 2,5% <  $wNaCl$  equiv. < 3,5%). A homogenizációs hőmérsékletek csökkenése a másodlagos petrográfiai helyzetben levő zárványok esetében értelmezhető továbbá úgy is, hogy azok a  $Cc_{SF}$  szülőoldatával azonos, ám annál nagyobb sűrűségű fluidumok voltak. A

nagyobb sűrűség annak következménye lehet, hogy a későbbi felnyílásokkor nem álltak rendelkezésre a nagyobb mértékű sűrűségcsökkenést lehetővé tevő, a  $Cc_{SF}$  által kitöltött pórusterek.

A kiválási-felnyílási sorozat következő tagja a  $Cc_{FG}$  vörös, mikroszemcsés kalcitfázis lehetett (3. ábra, d). A nagy tömegű kiválás (1), az aszimmetrikusan megjelenő mikroszemcsés kiválás (az ér egyik oldalán a  $Cc_{EB1}$  fázis szemcséit átmetsző helyzetben) (2) és a korábbi kiválások makroszkóposan barna elszíneződését létrehozó metasomatikus fázis (3) ennek az eseménynek lehetnek a különböző módozatai. Az (1) és a (2) és a (3) kapcsolatára a mikroszemcsés ásványok jelenléte enged következtetni, a (1) és a (3) kapcsolatára a mindkét helyzetben megjelenő kvarc és hematit, valamint a (1) és a (3) többi fázishoz viszonyított időbeli helyzete.

Az  $Cc_{BL}$  fázis  $Cc_{FG}$  fázist létrehozó eseménnyel való időbeli viszonya nem tisztázott, mivel a kettő közötti átmetsző viszonyt feltáró mintát nem találtunk. A  $Cc_{EB2}$  és az  $Cc_{AT}$  fázisok  $Cc_{FG}$ -hez való utólagos viszonya (I. tábla, d; III. tábla, f) az átmetsző szöveti helyzetük alapján egyértelmű, míg egymáshoz való időbeni viszonyuk nem tisztázott.

Az érrendszer fejlődésének záró szakasza a narancssárga erek kialakulását létrehozó töréses esemény és az ahhoz kapcsolódó  $Cc_{EB2}$  fázis kialakulása volt (3. ábra, e) figyelembe véve annak átmetsző viszonyát az összes többi megfigyelt fázissal. Ez alól kivétel a  $Cc_{AT}$  és a  $Cc_{BL}$  fázis, aminek a  $Cc_{EB2}$  fázissal való azonossága nem kizárható.

A  $Cc_{SF}$  fázis másodlagos zárványai egy alacsony hőmérsékletű, 82 és 97 °C közötti minimális bezáródási hőmérsékletű, kis sótartalmú (6,5% <  $wNaCl$  equiv. < 7,6%) oldat, a  $Cc_{SF}$  fázis kiválását követő jelenlétére hívták fel a figyelmet. Az előbbiektől a mért értékek kis száma miatt nem egyértelműen különül el egy hasonló homogenizációs hőmérsékletű ( $T_h \sim 90$  °C), kisebb sótartalmú (5,1% <  $wNaCl$  equiv. < 5,7%) oldat. Ezek az eredmények a  $Cc_{SF}$  fázis kiválását követően az alacsony hőmérsékletű és kis sótartalmú oldatok dominanciájára hívják fel a figyelmet.

## Következtetések

A Goldgrund-völgy első keleti mellékvölgye által feltárt amfibolit test karbonáterei szöveti alapon nyolc típusra különíthetők, melyek alapján legalább hat eltérő fluidumáramlási esemény rekonstruálható:

1. Az első fluidumáramlási esemény advektíven áramló oldatok megjelenésére utal, melyek a befogadó kőzet legalább két fázisban bekövetkezett töréses szerkezetalakulását követték. A megnyílt tömbös szövetű kalcit ( $Cc_{EB1}$ ) esetében a mikrotermometriai módszerek alkalmazhatóságát a későbbi oldatáramlási események metasomatikus hatása megkérdőjelezi. A szövet alapján a szülőoldat nagymértékű tútelítettsége és nagy áramlási sebessége valószínűsíthető, ami annak extraformációs eredetét is felveti.

2. A második fluidumáramlási esemény a zónás dolomit fázist (Dol<sub>ZON</sub>) hozta létre, a korábbi érrendszer maradványtereihe a Cc<sub>EB1</sub> szemcséin keresztül szivárgó oldatból, 80–100 °C-os minimális kiválási hőmérsékleten.

3. A harmadik fluidumáramlási esemény a tömbös szövetű (Qtz<sub>BL</sub>) fázist létrehozó, advektíven áramló oldat megjelenése volt. A Qtz<sub>BL</sub> szemcséinek egyfázisú elsődleges zárványai alapján az oldat alacsony hőmérsékletű voltára következtethetünk, felvetődik annak meteorikus eredete.

4. A negyedik fluidumáramlási esemény a Cc<sub>SF</sub> fázist létrehozó oldat, kialakulásában a megnövekedett fluidumnyomásból eredő instabil kőzetmechanikai állapot hatására bekövetkező törések (*hydrofracturing*) játszhattak szerepet. A Cc<sub>SF</sub> fázis elsődleges zárványai alapján a kiválás minimális hőmérséklete 95–100 °C, az oldat szalinitása 0,7–4,3% wNaCl equiv. volt.

5. Az ötödik fluidumáramlási esemény a hematit- és kvarczárványokat tartalmazó Cc<sub>FG</sub> fázist létrehozó oldat, a Cc<sub>SF</sub> fázis másodlagos zárványai alapján szintén kis hőmérsékletű (81 °C < T<sub>h</sub> < 98 °C), kis szalinitású (5,1–7,6% wNaCl equiv) szülőfluidummal.

6. A hatodik fluidumáramlási esemény esetében a Cc<sub>EB2</sub> és a Cc<sub>BL</sub> fázisok nem különíthetők egymástól egyértel-

műen. A Cc<sub>AT</sub> fázis szövete többször ismétlődő felnyílást és oldatáramlást („*crack-seal mechanism*”) jelez, ami alapján szülőoldata nem lehetett azonos a Cc<sub>EB2</sub> és a Cc<sub>BL</sub> fázisokéval.

Összegzésként elmondható, hogy a szülőoldatok érszövetek alapján rekonstruált áramlási mechanizmusai lokálisan ható paleohidrogeológiai folyamatokat tükröznek, azaz az amfibolitból leírt érkítőltő ásványok a területen más szövettel is megjelenhetnek. Így további feltárások hasonló szemléletű vizsgálata az Ófalu Formáció, általában véve pedig egy heterogén kristályos komplexum hidraulikai viselkedésének megértését szolgálhatja.

### Köszönetnyilvánítás

Megköszönjük Bajnóczi Bernadettnek, az MTA Geokémiai Kutatóintézet munkatársának a katódlumineszcens felvételek elkészítése során nyújtott önzetlen segítségét. A kutatásokat támogatta az OTKA (No. K-60768). Köszönjük továbbá Szabó Csaba és Poros Zsófia alapos bírálatát, mely nagyban hozzájárult a cikk végső formájának kialakításához.

### Irodalom – References

- ÁRKAI, P. & NAGY, G. 1994: Tectonic and magmatic effects on amphibole chemistry in mylonitized amphibolites and amphibole bearing enclaves associated with granitoid rocks. — *Acta Geologica Hungarica* **37/3–4**, 235–268.
- BALLA Z. (szerk.) 2003: Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló program. Felszín alatti és kiegészítő felszíni földtani kutatás 2004–2007. — *Kézirat*, Magyar Állami Földtani Intézet.
- BODNAR, R. J. 1992: Revised equation and table for freezing point depressions of H<sub>2</sub>O-salt fluid inclusions – PACROFI IV, – Fourth Biennial Pan-American Conference on Research on Fluid Inclusions, Lake Arrowhead, Abstract.
- BONS, P. D. 2000: The formation of veins and their microstructures. — *Journal of the Virtual Explorer* **2**, p. 12.
- BONS, P. D. 2001: Development of crystal morphology during uniaxial growth in a progressively widening vein: I. The numerical model. — *Journal of Structural Geology* **23**, 865–872.
- BONS, P. D. & MONTENARI, M. 2005: The formation of antitaxial calcite veins with well developed fibres, Oppaminda Creek, South Australia. — *Journal of Structural Geology* **27**, 231–248.
- DABI, G., M. TÓTH, T. & SCHUBERT, F. 2006: Analysis of oscillatory zoning in syntectonic calcite crystals evaluating UV-spectra. — SZTE Földtani és Őslénytani Tanszék, Kézirat, X. Geomatematikai Ankét, Szeged, Abstract, 1 p.
- 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**, 39–48.
- GHONEIM, M. F. & SZEDERKÉNYI, T. 1977: Preliminary petrological and geochemical studies of the area Ófalu, Mecsek Mountains, Hungary. — *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged* **23**, 15–28.
- GOLDSTEIN, R. H. & REYNOLDS, T. J. 1994: Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. — SEPM Short Course, 31. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa. 199 p.
- HILGERS, C., KOEHN, D., BONS, P. D. & URAI, J. L. 2001: Development of crystal morphology during uniaxial growth in a progressively widening vein: II. Numerical simulations of the evolution of antitaxial fibrous veins. — *Journal of Structural Geology* **23**, 873–885.
- HILGERS, C. & URAI, J. L. 2002a: Microstructural observations on natural syntectonic fibrous veins: implications for the growth process. — *Tectonophysics* **352**, 257–274.
- HILGERS, C. & URAI, J. L. 2002b: Experimental study of syntaxial vein growth during lateral fluid flow in transmitted light: first results. — *Journal of Structural Geology* **24**, 1029–1043.
- HILGERS, C. & URAI, J. L. 2003: Microstructures grown experimentally from advective supersaturated solution and their implication for natural vein systems. — *Journal of Geochemical Exploration* **78–79**, 221–225.
- HILGERS, C. & SINDERN, S. 2005: Textural and isotopic evidence on the fluid source and transport mechanism of antitaxial fibrous microstructures from the Alps and the Appalachians. — *Geofluids* **5**, 239–250.
- HILGERS, C. & URAI, J. L. 2005: On the arrangement of solid inclusions in fibrous veins and the role of the crack-seal mechanism. — *Journal of Structural Geology* **27**, 481–494.
- JANTSKY, B. 1979: a mecseki gránitosodott alapegység földtana. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* **60**, 385 p.
- KIRÁLY, E. & TÖRÖK, K. 2003: Magmatic garnet in deformed aplite dykes from the Mórág granitoid, SE-Transdanubia, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **46/3**, 239–254.



- KOVÁCS-PÁLFFY, P., FÖLDEVÁRI, M. & BARÁTH I.-NÉ 2003: Repedéskitöltések vizsgálata az Üveghuta térségében mélyített fúrások granitoid közeteiben. Az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló program. Felszíni földtani kutatás. — *Kézirat*, Magyar Állami Földtani Intézet, 53 p.
- LAUBACH, S. E., REED, R. M., OLSON, J. E., LANDERA, R. H. & BONELLA, L. M. 2004: Coevolution of crack-seal texture and fracture porosity in sedimentary rocks: cathodoluminescence observations of regional fractures. — *Journal of Structural Geology* **26**, 967–982.
- LEE, Y.-J., MORSE, J. W. & WILTSCHKO, D. V. 1996: An experimentally verified model for calcite precipitation in veins. — *Chemical Geology* **130**, 203–215.
- LEE, Y.-J. & MORSE, J. W. 1999: Calcite precipitation in syntectonic veins: implications for the time and fluid volume necessary for vein filling. — *Chemical Geology* **156**, 151–170.
- LELKES-FELVÁRI, GY., ÁRKAI, P., FRANK, W. & NAGY, G. 2000: Late Variscian ultramylonite from the Mórág Hills, SE Mecsek Mts., Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **43/1**, 65–84.
- MACHEL, H. G., MASON, R. A., MARIANO, A. N. & MUCCI, A. N. 1991: Causes and emission of luminescence in calcite and dolomite. — In: BARKER, C. E. & KOPP, O. C. (Ed) *Luminescence Microscopy and Spectroscopy — Qualitative and quantitative applications*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Short Course **25**, 9–29.
- MACHEL, H. G. & BURTON, E. 1991: Factors governing cathodoluminescence in calcite and dolomite, and their implications for studies of carbonate diagenesis. — In: BARKER, C. E. & KOPP, O. C. (eds) *Luminescence Microscopy and Spectroscopy. Qualitative and quantitative applications*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Short Course **25**, 37–57.
- MACHEL, H. G. 2000: Application of Cathodoluminescence to Carbonate Diagenesis. — In: PAGEL, M. (ed.): *Cathodoluminescence in Geosciences*. Springer, 225–243.
- MILLIKEN, K. L. & LAUBACH, S. E. 2000: Brittle Deformation in Sandstone Diagenesis. — In: PAGEL, M. (ed.): *Cathodoluminescence in Geosciences*. Springer, 225–243.
- MORSE, J. W. & MACKENZIE, F. T. 1993: Geochemical constraints on CaCO<sub>3</sub> transport in subsurface sedimentary environments. — *Chemical Geology* **105**, 181–196.
- M. TÓTH, T., KOVÁCS, G., SCHUBERT, F. & DÁLYAI, V. 2005: Az ófalui „migmatit” eredete és deformációtörténete. — *Földtani Közlemény* **135**, 331–352.
- NOLLET, S., ÚRAI, J. L., BONS, P. D. & HILGERS, C. 2005: Numerical simulation of polycrystal growth in veins. — *Journal of Structural Geology* **27**, 217–230.
- OLIVER, N. H. S. & BONS P. D. 2001: Mechanisms of fluid flow and fluid-rock interaction in fossil metamorphic hydrothermal systems inferred from vein-wallrock patterns, geometry and microstructure. — *Geofluids* **1**, 137–162.
- PASSCHIER, C. W. & TROUW, R. A. J. 2005: *Microtectonics*. — Springer, 366 p.
- POROS ZS. 2007: A Mórágyi Gránit paleo-fluidumáramlás rekonstrukciója és repedésrendszereinek vizsgálata Bátaapáti fúrásokban. — Szakdolgozat, ELTE, Budapest, 115 p.
- SCHUBERT F., KÓTHAY, K., DÉGI, J., M. TÓTH, T. BALI, E., SZABÓ, CS., BENKÓ, ZS. & ZAJACZ, Z. 2007: A szakirodalomban használt fluidum- és olvadékszárnyokkal kapcsolatos kifejezések és szimbólumok szótára. — *Földtani Közlemény* **137/1**, 83–102.
- SZABÓ, CS., GÁLNÉ DR.SÓLYMOS, K. & FALL, A. 2003. Karbonátos repedéskitöltés vizsgálatok Üveghuta környékén mélyített fúrások granitoid közetein. — Kutatási Jelentés, Magyar Állami Földtani Intézet, 100 p.
- SZEDERKÉNYI, T. 1977: Geological evolution of South Transdanubia (Hungary) in Paleozoic time. — *Acta Mineralogica-Petrographica Szeged* **23/1**, 3–14.
- SZEDERKÉNYI, T. 1983: Origin of amphibolites and metavolcanics of crystalline complexes of South Transdanubia, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* **26/1–2**, 103–136.
- TWISS, R. J. & MOORES E. M. 1997: *Structural Geology*. — Freeman, New York, 532 p.
- WANG, Y. & MERINO, E. 1992. Dynamic model of oscillatory zoning of trace elements in calcite: Double layer, inhibition, and self-organization. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* **56**, 587–596.
- Kézirat beérkezett: 2008. 01. 22

## Táblamagyarázat — Explanation of plates

### I. tábla — Plate I

- a) A vizsgált amfibolit feltárás, a meredek dőlésű kalcit erekkel. — *The studied amphibolite outcrop, with the studied, steeply dipping calcite veins.*
- b) Fehér kalcit ér (Cc<sub>EB1</sub>) középvonalában később kivált dolomittal (Dol<sub>ZON</sub>) és átmetsző, a Cc<sub>EB2</sub> által kitöltött sárga érrel. — *White calcite vein (Cc<sub>EB1</sub>) with later dolomite (Dol<sub>ZON</sub>) precipitated in the middle line and with transecting yellow vein filled with Cc<sub>EB2</sub>.*
- c) Fehér kalcit ér (Cc<sub>EB1</sub>) fonatos érrendszere, szaggatott vonal jelöli az átmetsző ereket, nyíl jelöli a később kivált dolomitot (Dol<sub>ZON</sub>). — *Braided vein system of the white calcite vein (Cc<sub>EB1</sub>). Dashed line marks cross cutting vein of Cc<sub>EB1</sub>, arrow marks later dolomite (Dol<sub>ZON</sub>) precipitated in the middle line of the transecting vein.*
- d) Vörös kalcitkiválás a fehér kalcit (Cc<sub>EB1</sub>) érhez kapcsolódóan, átmetsző sárga érrel (Cc<sub>EB2</sub>). — *Red calcite associating the white calcite veins (Cc<sub>EB1</sub>) with transecting yellow vein (Cc<sub>EB2</sub>).*
- e) Barna színű ér, a középvonalában áttetsző kalcitkiválással. — *Brown coloured vein with transparent calcite precipitated in the middle line.*
- f) Narancssárga kalcitér (Cc<sub>EB2</sub>), a középvonalában kitöltetlen térrel. — *Orange calcite vein (Cc<sub>EB2</sub>) with open void in its middle line*
- g) A befogadó amfibolit mikroszkópi szövege, 1N — *Microscopic texture of the host amphibolite, 1N.*

**II. tábla — Plate II**

a) A fehér kalcitér szövete, annak teljes keresztmetszetében, az ér középvonala felé vastagodó megnyúlt tömbös szemcsékkel ( $Cc_{EB1}$ ), a középen kivált barna zónás dolomittal ( $Dol_{ZON}$ ) és térkitöltő kalcittal ( $Cc_{SF}$ ), +N. — *The texture of the white calcite vein in its full cross section, with elongate blocky crystals ( $Cc_{EB2}$ ) widening towards the median line with brown zoned dolomite ( $Dol_{ZON}$ ), and with space filling calcite ( $Cc_{SF}$ ) precipitated in the middle line, +N.*

b) A  $Cc_{EB1}$  fázis két generációja a fonatos érrendszereknél, középen a fiatalabb, ugyancsak  $Cc_{EB1}$  fázissal kitöltött átmetsző ér, +N. — *two generations of the  $Cc_{EB1}$  phase at the braided vein system, the upper and the middle zones are the younger, transsecting veins of  $Cc_{EB1}$ , +N.*

c) A  $Cc_{EB1}$  fázis megnyúlt-tömbös szemcséit átmetsző vörös finomszemcsés kiválás, sugarasan kioltó kvarccal, +N. — *Thin line of red, fine grained calcite transsecting the zone of  $Cc_{EB1}$  grains, with radially extinguishing quartz, +N.*

d) A  $Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$ ,  $Qtz_{BL}$  és  $Cc_{SF}$  fázisok, +N. —  *$Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$ ,  $Qtz_{BL}$  and  $Cc_{SF}$  phases precipitated in remaining void, +N.*

e) A „d” jelű kép részlete, a  $Dol_{ZON}$  fázis annak barnásszürke és sávos alzónájával, továbbnövekedésükben a  $Qtz_{BL}$  fázis kristályaival, +N. — *detail of picture „d”, with brownish grey and striped subzones of  $Dol_{ZON}$  and with blocky crystals of  $Qtz_{BL}$  phase, +N.*

f) A  $Cc_{EB1}$  fázis leszakított töredékét tartalmazó  $Cc_{FG}$  fázis, +N. —  *$Cc_{FG}$  phase containing dragged off fragment of  $Cc_{EB1}$ , +N*

g) A metasomatizált  $Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$  és  $Cc_{SF}$  fázisok szövete képe a barna érben, +N. — *Texture of the metasomatized  $Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$  and  $Cc_{SF}$  phases in the brown vein, +N.*

h) A „g” jelű kép részlete, a barna elszíneződés keskeny sávban a  $Cc_{SF}$  fázist is érinti, +N. — *Detail of picture „g”, the  $Cc_{SF}$  phase with the brown pigmentation in a narrow zone, +N.*

**III. tábla — Plate III**

a) A  $Cc_{EB2}$  fázis által kitöltött önálló ér szövete képe, +N. — *Texture of a vein filled with  $Cc_{EB2}$ , +N.*

b) A  $Cc_{EB2}$  által kitöltött késői ér  $Cc_{EB1}$  és a  $Dol_{ZON}$  fázisokat átmetsző szövete helyzetben, 1N. — *Late vein filled with  $Cc_{EB2}$  transsecting earlier phases of  $Cc_{EB1}$  and  $Dol_{ZON}$ , 1N.*

c) A  $Cc_{BL}$  fázis által kitöltött mikroér (szaggatott vonallal jelölve), a  $Cc_{EB}$  zónát átmetsző szövete helyzetben, +N. — *The microvein of  $Cc_{BL}$  phase (bounded by dashed lines) transsecting the zone of  $Cc_{EB}$ , +N.*

d) A „c” jelű kép részlete, a  $Cc_{BL}$  által kitöltött mikroérben az átmetszett  $Cc_{EB1}$  szemcsék leszakított darabjaival, 1N. — *Detail of picture „c”, microvein of phase  $Cc_{BL}$  containing dragged off fragments of transsected  $Cc_{EB1}$  phase, 1N.*

e) A  $Cc_{EB1}$ -hez kapcsolódó  $Cc_{FG}$  fázis, valamint az azokat átmetsző  $Cc_{AT}$  fázis által kitöltött mikroér, +N. — *The  $Cc_{FG}$  phase within  $Cc_{EB}$  grains and both transsected by microvein filled with  $Cc_{AT}$  phase, +N.*

f) Az „e” jelű kép részlete, az átmetszett  $Cc_{FG}$  fázis elhurcolt töredékei a  $Cc_{AT}$  fázis által kitöltött érben, +N. — *Detail of picture „e”, dragged off fragments of  $Cc_{FG}$  phase within a microvein filled with  $Cc_{AT}$  phase, +N.*

g) A  $Cc_{FG}$  fázisról készült visszaszórt elektronkép hematit és kvarc zárványokkal. — *Backscattered electron image of  $Cc_{AT}$  with inclusions of hematite and quartz.*

h) Szálas hematit gömbszerű halmaza zárványként a  $Cc_{FG}$  kalcitjában. — *Spherical aggregation of stringy hematite as inclusion in calcite of  $Cc_{FG}$ .*

**IV. tábla — Plate IV**

a–z) Visszaszórt elektron felvételekből és elem térképekből álló táblázat, a soronként változó szövetei helyzettel, az első oszlopban a visszaszórt elektronképpel majd eltérő elem térképpel az egyes oszlopokban: BSE, Ca, Mg, Mn, Fe. — *Table composed of BSE images and element maps, with different textures in rows and with BSE image in the first column and with element maps of Ca, Mg, Mn and Fe in following columns, respectively.*

**V. tábla — Plate V**

Eltérő szövetei helyzetekről készült katódlumineszcens felvételek. — *Cathodoluminescent images of different vein textures.*

a) A  $Cc_{EB1}$  fázis szemcséit átmetsző narancssárga lumineszcens színű mikroérraj. — *Orange cathodoluminescent microvein swarm transsecting the grains of the  $Cc_{EB1}$ .*

b) A  $Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$ ,  $Cc_{SF}$  fázisokról készült katódlumineszcens felvétel. A  $Dol_{ZON}$  utolsó alzónája oszcillációsávos CL képet mutat. — *cathodoluminescent image of phases  $Cc_{EB1}$ ,  $Dol_{ZON}$  and  $Cc_{SF}$ . Last subzone of  $Dol_{ZON}$  shows striped oscillatory CL image.*

c)  $Cc_{EB1}$  szemcse szkalenoéderes elvégződése valamint a  $Dol_{ZON}$  fázis első és második alzónája, 1N. — *Scalenoedral end of a  $Cc_{EB}$  grain, and  $Dol_{ZON}$  with its first two subzones, 1N.*

d) A „c” jelű kép katódlumineszcens megfelelője. A sárga lumineszcens foltok a  $Dol_{ZON}$  második zónájánál azonosíthatók. — *cathodoluminescent equivalent of picture „c”. — Yellow luminescent patches correspond to the second subzone of  $Dol_{ZON}$ .*

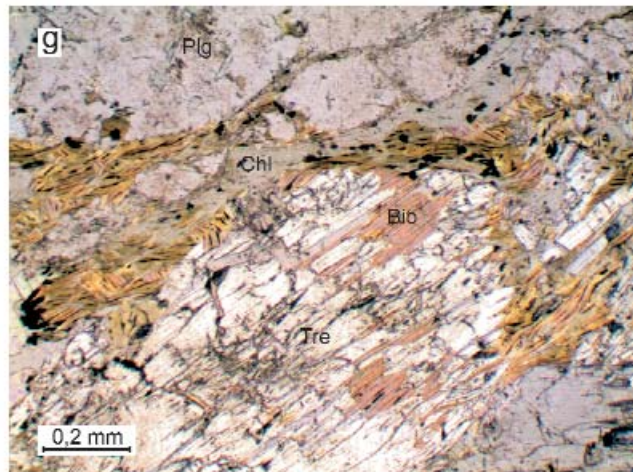
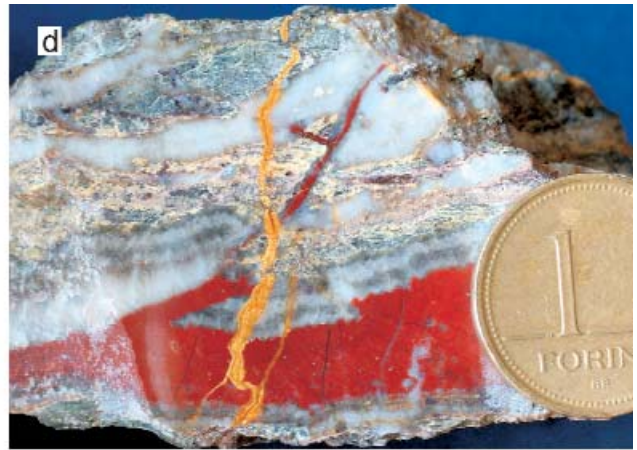
e) A  $Cc_{EB1}$  kristályaiban jelenlevő piros és sárga, valamint a  $Dol_{ZON}$  kristályaiban jelenlevő, a fázis második alzónájával azonosítható sárga lumineszcens foltok szívargó oldatok metasomatikus hatását tükrözik. — *Yellow and red luminescent patches in crystals of  $Cc_{EB1}$  and yellow luminescent patches in crystals of  $Dol_{ZON}$  indicate percolating fluids, which metasomatized older phases.*

f) Az  $Cc_{BL}$  fázis által kitöltött mikroér az átmetszett  $Cc_{EB1}$  és egy a katódlumineszcens felvétel által feltárt mikroér leszakított darabjaival. — *Microvein of  $Cc_{BL}$  containing dragged off fragments of transsected  $Cc_{EB1}$  grains and of an older microvein.*

g) Az  $Cc_{AT}$  fázis által kitöltött mikroér az átmetszett  $Cc_{FG}$  fázis elvonszolt töredékeivel. — *Microvein filled with  $Cc_{AT}$  phase containing dragged off fragments of the transsected  $Cc_{FG}$  phase.*

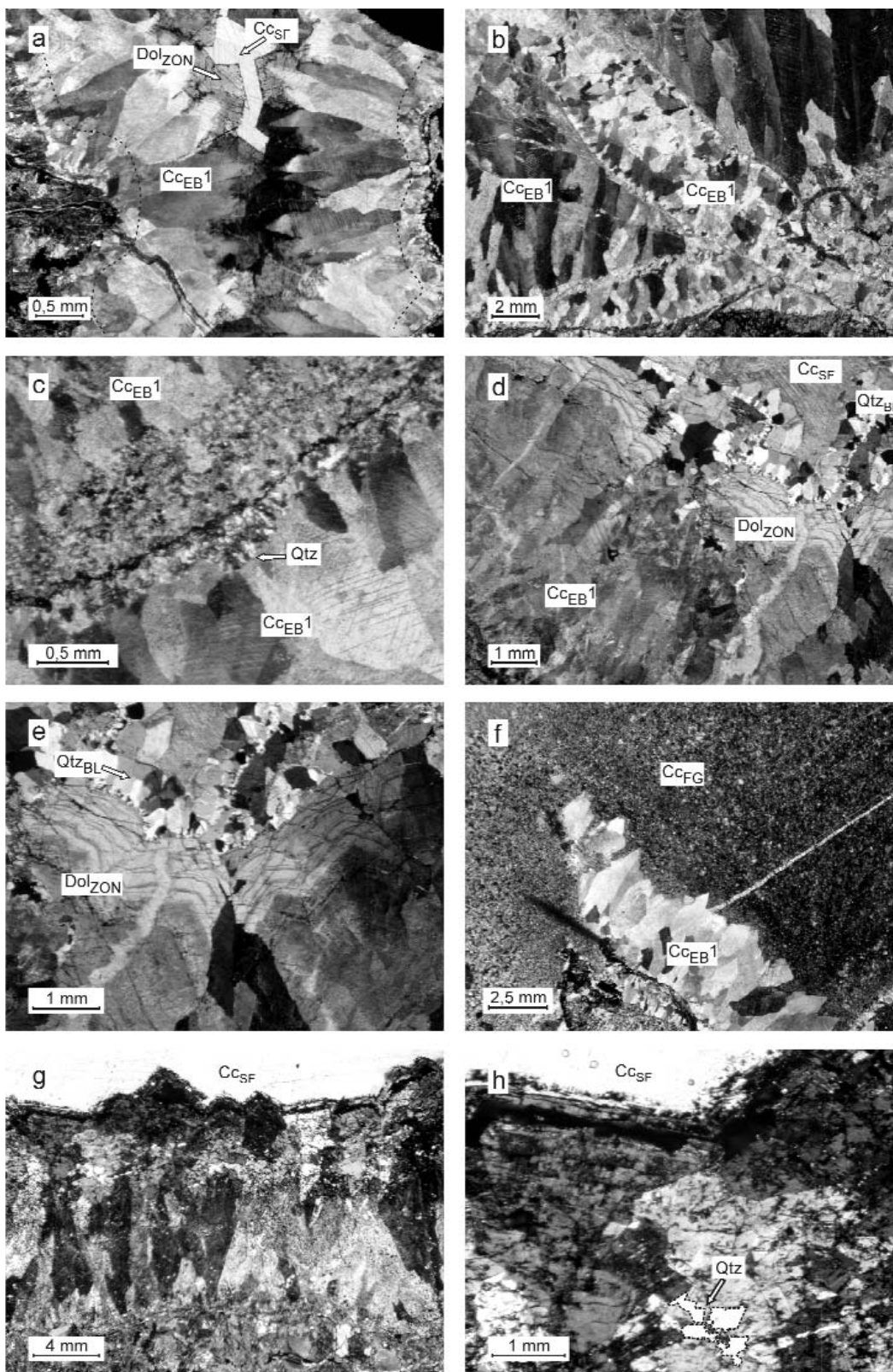


## I. tábla – Plate I



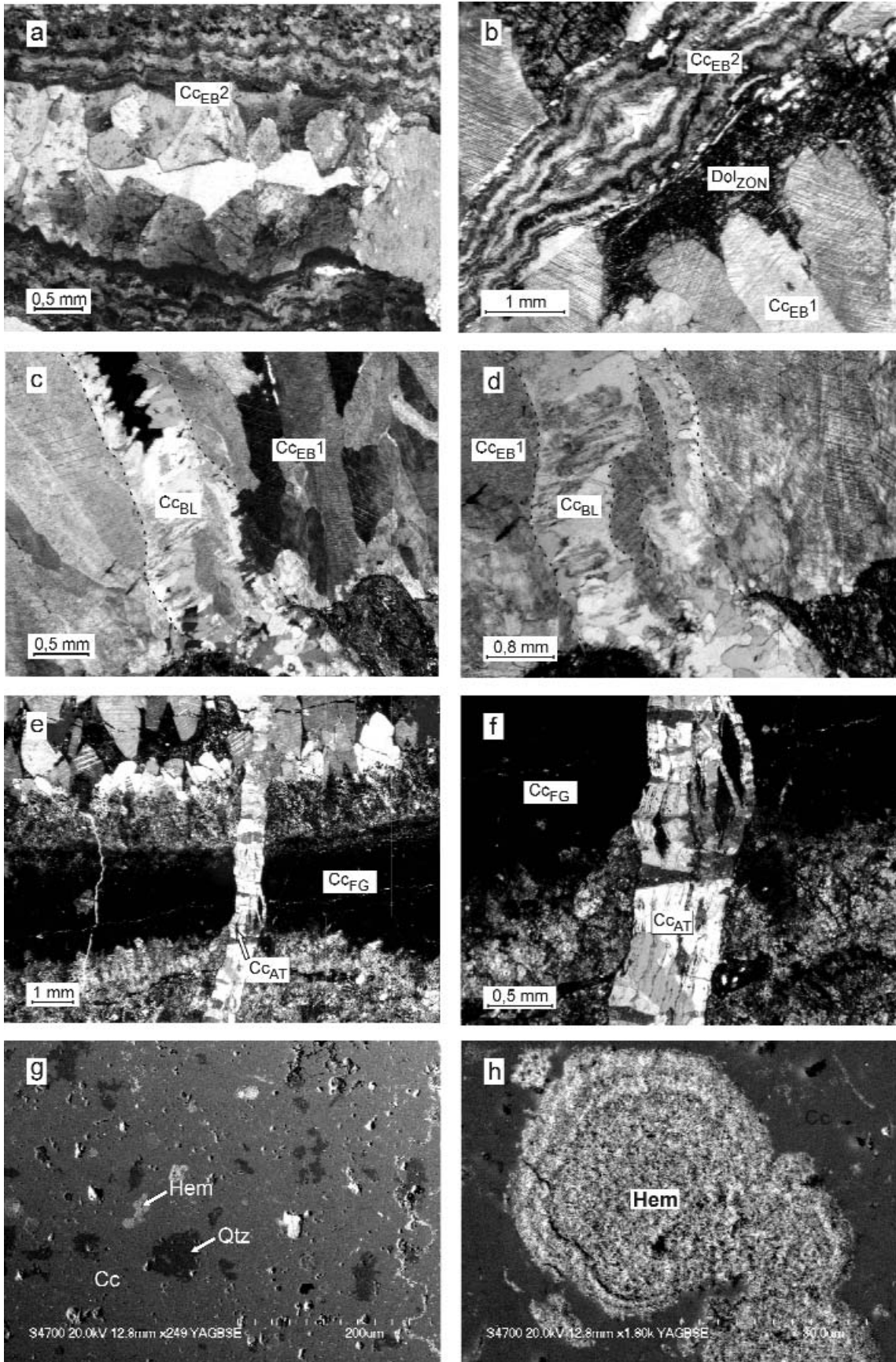


II. tábla – Plate II



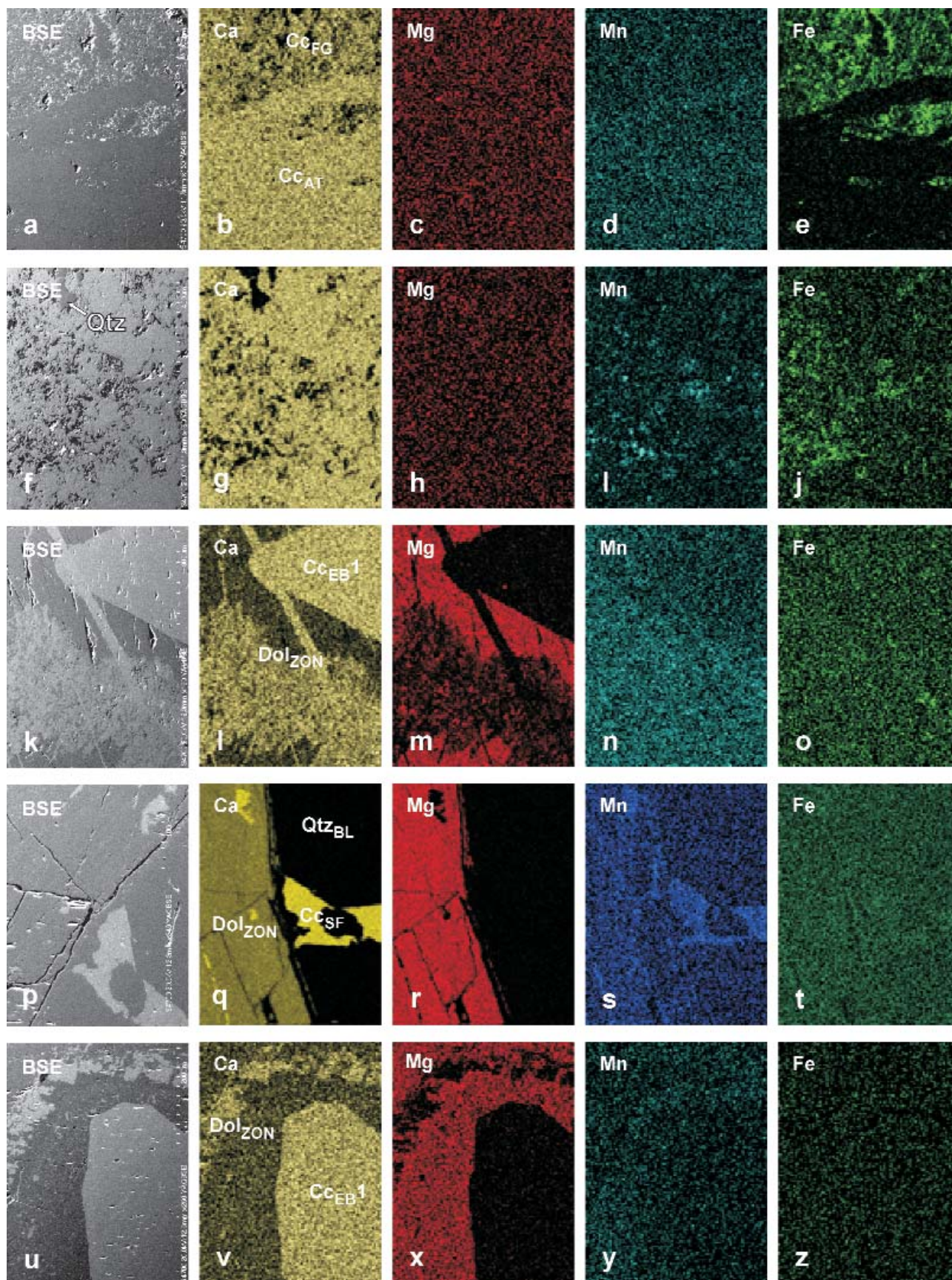


## III. tábla – Plate III





IV. tábla – Plate IV





V. tábla – Plate V

