KARSZTFEJLŐDÉS XII.
Szombathely, 2007. pp. 111-135.

A TIHANYI-FÉLSZIGET ALGÁS EREDETŰ FORRÁSÜLEDÉKEINEK ÁSVÁNY-KŐZETTANI VIZSGÁLATA

KOVÁCS-PÁLFFY PÉTER[1]-KALMÁR JÁNOS[1]-VERESS MÁRTON[2]

[1]Magyar Állami Földtani Intézet; H-1142 Budapest, Stefánia út 14, kp@mafi.hu
[2]Berzsenyi Dániel Főiskola, Természettudományi Főiskolai Kar, 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4., vmarton@bdtf.hu

Abstract: In this paper, the carbonatic, silica-bearing, iron oxy-hydroxide and clay minerals of primary and secondary deposits were presented. The main part of the fine grainad carbonate (calcitic and dolomitic sediments) was formed by activity of Cyanophytae in hot water pools. The limestone was replaced by hydrothermal, cryptocristalline and amorphous silica with a scarce metallic pound. The hydrothermal phenomena is tied to the late Pliocene phreatomagmatic activity.

1. Kutatástörténet

A Tihanyi-félsziget gejzírkúpjai című KAC pályázat keretén belül (*VERESS* 2003) elkészült a források által lerakott üledék részletes ásvány-kőzettani vizsgálata, amelynek eredményeit e tanulmányban kívánjuk ismertetni.

A Tihanyi-félsziget forrásmészköveinek a bemutatása a magyar földtani irodalomban először *ZEPHAROWITZ* (1856) és *BÖCKH* (1874) tanulmányaiban történtek meg. A képződmények *LÓCZY* (1913) szerint gejzírműködés során alakultak ki. A forráskúpok anyagát *HOFFER* (1943) vizsgálta meg. Szerinte a kúpok anyaga nem gejzírit, hanem mészkő és „*hidrokvarcit*". A kúpok szerkezete kétosztatú, alsó részük lemezes („*mész hártyakő*"), felső részük porózus, mészből és hidrokvarcitból áll. A mész a mezozoós mészkövekből, a kvarc a permi homokkőből vagy a pannon homokból származik. A kúpok kora pleisztocén.

VARRÓK (1957) a forráskúpokat szintén gejzírműködéssel hozza kapcsolatba. Szerinte a kúpok kialakulásánál három fázis különböztethető meg: (1) „*szennyezett*" kalcit kiválása; (2) a kalcit kioldódik, helyette durvakristályos „*szferokalcit*" keletkezik; (3) kétféle kovaanyag keletkezik: a kalcitot kiszorító finomszemcséjű kovaanyag és hézagmenti, sugaras kioltású kvarc. A gejzírek működését a terület kétszakaszos vulkáni tevékenységének a második szakaszában, a pleisztocén elején tartja valószínűnek.

LÁNG (1970) szerint a kúpok gejzírek működésével képződtek, a Mindel glaciálisban.

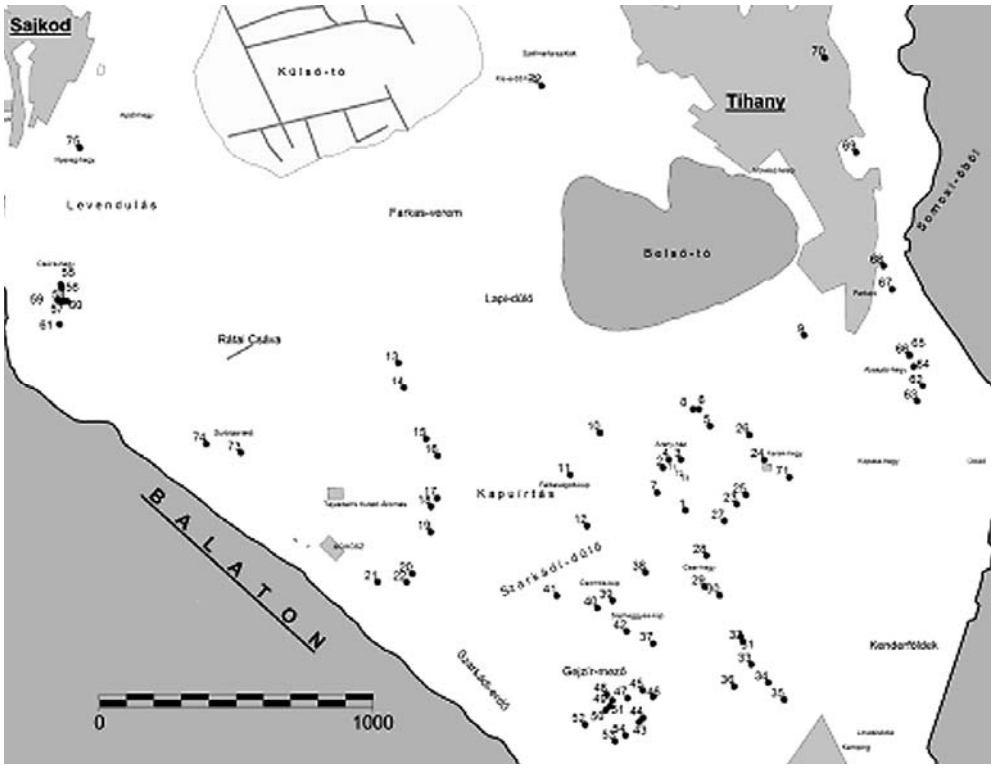
VERESS (2003) tipizálja a kúpokat, értelmezi a különböző kúpok kifejlődését a kúpok formáinak a kialakulását és bemutatja a posztvulkáni működés hidrodinamikai modelljét.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a Tihanyi-félsziget forrásüledékei helyzetéről és a vulkáni tevékenységgel való kapcsolatairól számos munka jelent meg, de ezek jellegükből eredően nem terjednek ki az üledékek ásvány-kőzettani ismertetésére, a karbonátos és kovás kőzetek viszonyának pontosítására és a litológiai leírások nélkülözik a modern terminológia kívánalmait. Ezért találtuk célszerűnek a rendelkezésünkre álló kőzetanyag részletes ásványtani és kőzettani vizsgálatát.

2. A Tihanyi-félsziget természeti adottságai

A Tihanyi-félsziget a Balaton medencéjét két részre osztó, ÉNy-DK irányú földnyelv (*1. ábra*), amely aljzatát a szilúr korú Lovas Agyagpala Formáció és a rátelepülő, perm kori Balatonfelvidéki Vörös Homokkő Formáció képezi. Erre települt a többszáz m vastag triász mészkő és dolomit rétegsor, amely a felszínen Tihanytól 3-4 km-re jelenik meg. A vulkáni összlet felszínen is megjelenő közvetlen feküjét a miocén törmelékes és meszes üledékei képezik, a Dunántúli Egységhez (9,0-7,4 Mév) tartozó pannon agyag, homok és konglomerátum, valamint az alatta lévő pórusos mészkő, jelentős rétegvíz-potenciállal.

A Tihanyi-félszigeten lezajlott vulkáni tevékenység freatomagmás jellegű volt, a Bakony-Balaton vulkáni terület részeként. *MARTIN – NÉMETH* (2004) a tihanyi területen nyolc litofáciest különböztet meg: a négy freatomagmás litofáciest (PH–1, PH–2, PH–3 és PH–4), az üregkitöltő lapilli-fáciest (PHLD), Stromboli- és Havaii-típusú lávakitörés és habláva litofáciest (MS & MSH) és a két tavi maar litofáciest (ML–1 és ML–2). A vulkáni-törmelékes összletekben végzett szedimentológiai vizsgálatok és a geofizikai adatok alapján azonosíthatók voltak az egykori vulkáni központok, amelyek három (északi, középső és déli) területeken koncentrálódnak. Közülük a legjobban feltárt központ a Barátlakások helyen látható. A vulkáni tevékenység jellege közvetlen összefüggésben van a Tihanyi-félsziget aljzatában jelen lévő karsztos és pórusok víztározókkal, amelyekből a feltörő magma hatására explóziós tufa- és lapilliszórás, láva-kilövelés ment végbe. A K/Ar meghatározások a magmás folyamatok korát 7,8–6,6 millió évre datálják.



1. ábra: A Tihanyi-félsziget forráskúpjai, VERESS (2003) után
Fig. 1: Spring cones of Tihany peninsula, after VERESS, 2003)

3. A gejzírkúpok üledékeinek összetétele

3.1. Anyag és módszer

A terepi munkálatok során azonosított 75 gejzírkúp közül az Aranyház, Félbevágott-kúp, Nyereg-hegy és a köztes területek képződményeiből, 48 mintából készültek vékony csiszolatok, háromból felületi csiszolat, 57 röntgen- és termikus vizsgálat, tíz pásztázó elektronmikroszkópos felvétel, 16 teljes kémia, két dilatometrikus mérés és három C és O stabil izotóp meghatározás. A minták a gejzírkúpok szelvényeiből, jellegzetes pontjaiból és a köztes területről származnak. Az ásvány-kőzettani vizsgálatok célja elsősorban a forrásüledék valós összetételének a megismerése volt, s ennek alapján az

üledék keletkezésére és későbbi elváltozásaira vonatkozó információk szerzése. Ez által követhető lesz a félszigeten végbement freatikus-hidrotermális tevékenység kifejlődése és kapcsolata a környező terület vulkáni tevékenységével.

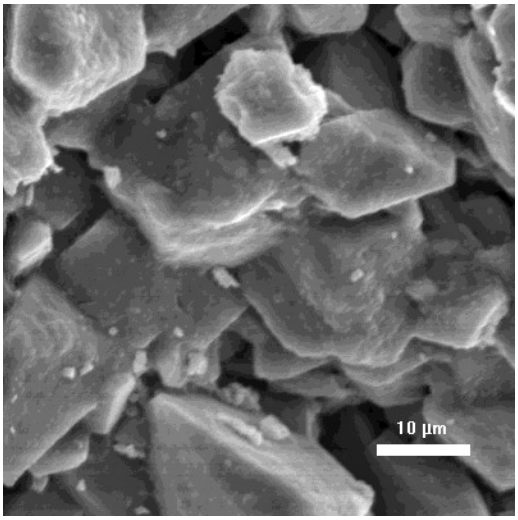
A továbbiakban a minták megjelölésénél a következő rövidítéseket használtuk: A, Aranyház; II, Félbevágott-kúp; N, Nyereg-hegy; T, az Aranyház környéke. Ahol a minta csak számmal lett megjelölve, a mintavétel névtelen kúpok anyagából történt és a minta száma a megmintázott kúp sorszámával egyezik meg.

3.2. Az üledék ásványos fázisai

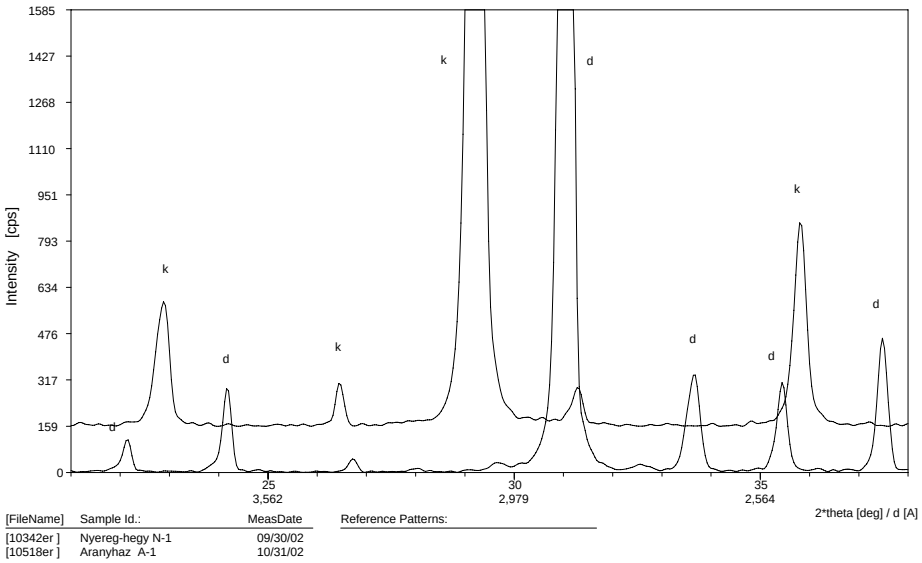
3.2.1. Karbonátos ásványok

Az elsődleges üledék (és részben a másodlagos lerakódások) fő anyagát a karbonátos ásványok alkotják. Jelen vannak a kalcium-, magnézium- és vas karbonátjai, amelyek különböző megjelenésű és összetételű ásványokat, ásványi fázisokat képeznek

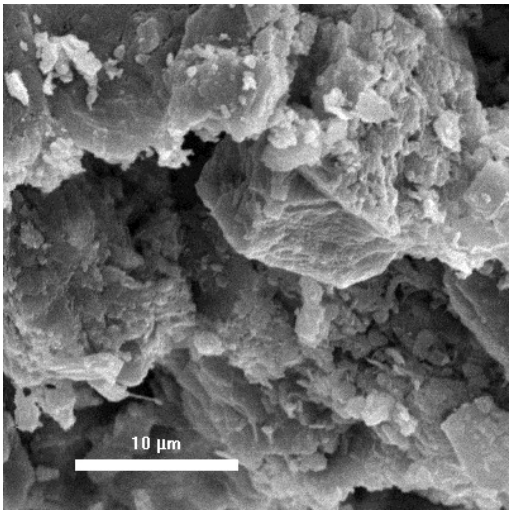
- *Mikrit:* Az Aranyház és a Félbavágott-kúp mintái nagyrészt igen finomszemű karbonátból – mikritből – állnak, amely röntgendiffrakciós és termikus vizsgálat alapján tiszta, vagy max. 5 mol % magnézium beépülést tartalmazó kalcit. A pásztázó mikroszkópos felvételeken a mikrit szemcséi 2-5 μm-es, rizsszem alakú, lekerekített romboéderekként jelenik meg. A másodlagos karbonátos képződmények között a mikrit a póruskitöltésekben képez szivacsos, morzsás, limonittal színezett tömegeket (N-9 minta).
- *Mikropátit:* Az elsődleges mészkő egyik lényeges komponense a mikrit átkristályosodásából kialakult, kissé zavaros mikropátit, amely 15-25 μm-es szemcséket képez, sávokba, szalagokba, lencsés vagy szabálytalan, max. 1 mm-es fészkekbe csoportosulva. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken a mikropátit hipidiomorf kristályalakokat ölt, helyenként ikerlemezekkel; látható a folyamatos átmenet a mikrit és a mikropátit között (*1. kép*).
- *Pátit*: A másodlagos kalcit fő megjelenési formája a 0,05-0,6 mm-es, részben sajátalakú, részben alotriomorf, üde, víztiszta, színtelen vagy enyhén zöldes, ritkán ikerlemezes pátit, esetenként 0,03-0,08 mm-es, kerekded, kristályirányított, kétfázisos zárványokkal. Optikai és termikus jellemzői alapján anyaga tiszta kalcit.
- *Mg-kalcit:* Csak röntgendiffraktogramokon megjelenő, 7 mol % magnéziumkarbonátot tartalmazó karbonát az 1 és 3 mintákban.



1. kép: Mikropátit-fészek a dolomikritben. N-1 minta, pásztázó elektronmikroszkópos fotó
Picture 1: Microspar nests in dolomicrite. Sample N-1, SEM picture

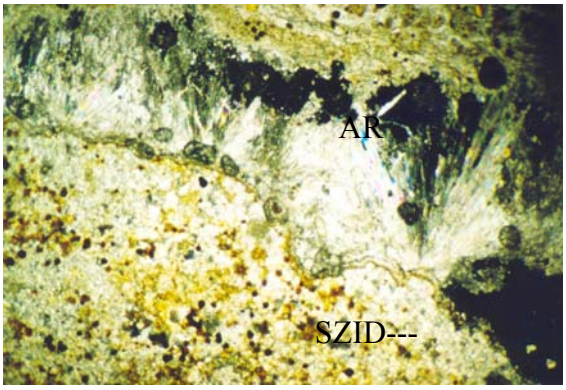


2. ábra: Karbonátos kőzetek röntgendiffrakciós diagramja (1). k, kalcit, d, dolomit
Fig. 2: X-ray diffractogramms of carbonatic rocks (1). k, calcite; d, dolomite

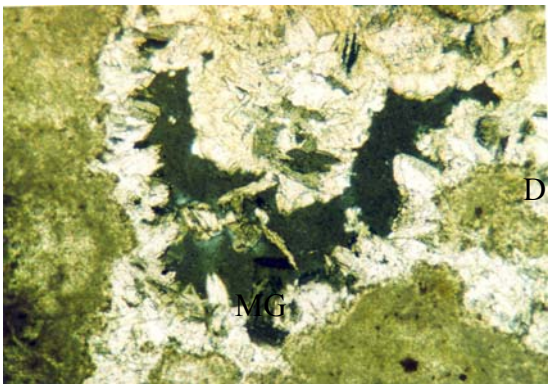


2. kép: Mikrit: kalcitszemcsék lemezes agyagásványokkal, A-6 minta, pásztázó elektronmikroszkópos fotó.
Picture 2: Micritic calcite grains with clay mineral lamellae, sample A-6, SEM picture

- *Dolomikrit:* A Nyereg-hegy finomszemű karbonátja optikai mikroszkópal nem azonosítható, de a röntgendiffrakciós és termikus vizsgálatok alapján (*2. ábra*) a mikrites kőzetminták összetétele tiszta, illetve alacsony vastartalmú dolomit. A pásztázó elektronmikroszkópos képeken a nyereghegyi mikrit 3-6 µm-es romboéderekből áll, jellegzetes görbe, domború vagy lépcsőzetes kristálylapokkal, 0,2-0,5 µm-es, babszem alakú goethit-kiválásokkal (N-1 minta).
- *Dolopátit:* A Nyereg-hegyi átkristályosodott mikritben a sárgás, fűrészfog-alakú (mikro-) pátit kiválások anyaga valószínűleg vastartalmú dolomit (T-1 és N-5 minták). Ugyancsak (enyhén vasas) dolomit a másodlagos üreg- és repedéskitöltésekben megjelenő, sárgás, esetenként zónás, romboéderes, 0,1-0,4 mm-es karbonát (N-1, N-2 és N-9 minták).
- *Magnezit:* Másodlagos ásvány, amely lapos romboéderekben, kissé zöldes, fenyőtű alakú, a dolomitnál és a kalcitnál alacsonyabb törésmutatójú kristályokban, algagumók pátitos kitöltésében vagy dolomittal társulva erekben, geodákban jelenik meg (N-1, N-10, T-2 minták, *4. kép*), valamint ezek röntgendiffrakciós felvételein (N-6 és 12. mintákban is).
- *Sziderit:* A mikropátitban barna koszorúval körülvett, vöröses szemcsékként (N-8 minta), a másodlagos üreg- és repedéskitöltésekben szintén gömbölyű, 0,03-0,05 mm-es szemcsékből összeálló, morzsás, javarészt oxidált tömegekben megjelenő ásvány (11 minta) eredetileg sziderit volt (7. *kép*), amely a 11/3 minta difraktogramján is megjelenik.



3. kép: Aragonit (AR) repedéskitöltés a dolomikritben, limonitosodott szideritszemcsékkel (SZID), N-14 minta, + nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 3: Vein filling aragonite (AR) in dolomicrite, with limonitized siderite grains (SZID), sample N-14, + nichols, the lenght of photo is 4 mm.



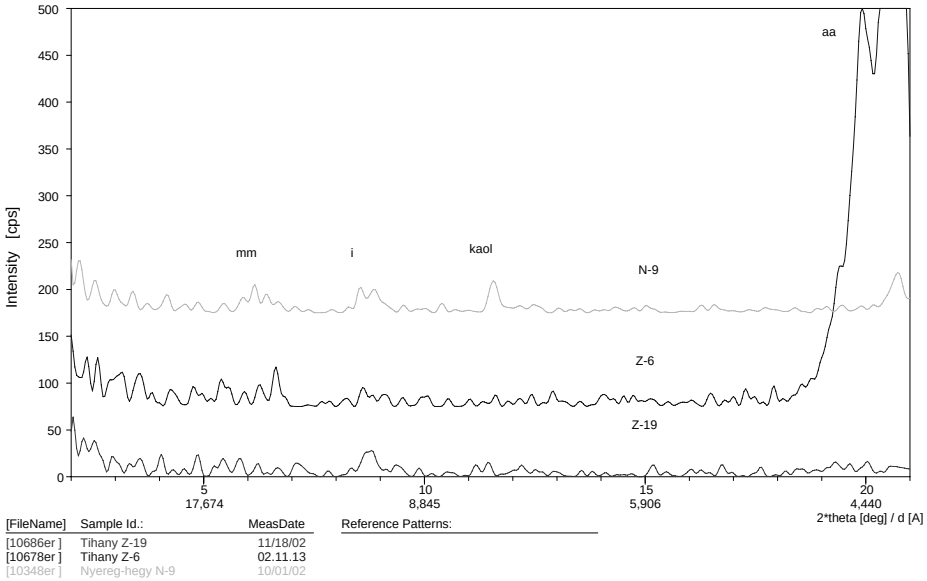
4. kép: Sajátalakú magnezit (MG) és dolomit (D) a dolomikrit pórusaiban, N-1 minta, + nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 4: Euhedral magnesite (MG) and dolomite (D) in pores of the dolomicrite, sample N-14, + nichols, the lenght of photo is 4 mm.

- *Aragonit:* Másodlagos ásvány, amely repedésekben szálas-tűs kévéket (N-14 minta, *3. kép*), üregekben limonitkérges, sugaras, tojásdad ooidokat képez (A-3 minta); megjelenik több pátos-érkitöltéses minta röntgendiffrakciós diagramján is (A-4 és A-5 minták).

3.2.2. Agyagásványok

Az elsődleges karbonátos kőzetekben kis részarányban jelen vannak az agyagásványok, amelyek optikailag nem azonosítható, szürke port képeznek a karbonátos szemcsékben vagy a szemcsék között. A pásztázó elektronmik-

roszkópos felvételeken (A-6 minta) láthatók a kalcit vagy dolomit romboéderekre tapadó, szabálytalan vagy hatszögletes, 0,6-2,2 µm-es agyagásványlemezkék: montmorillonit, illit és kaolinit (*2. kép*).

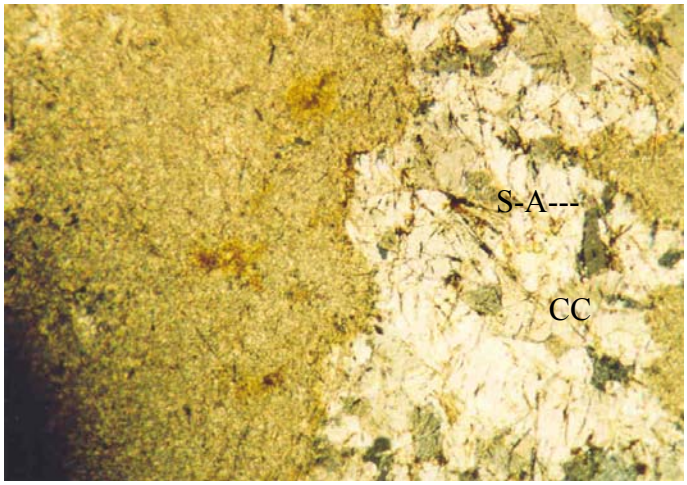


3. ábra: Karbonátos üledékminták röntgendiffrakciós diagramjai (2)
Fig. 3: X-ray diffractogramms of carbonaticsediment samples (2)

A röngendiffrakciós vizsgálatok alapján montmorillonitot, illitet, illit-montmorillonit kevertszerkezetű ásványt és kaolinitot azonosítottunk, max. 7%-os részarányban.

Az agyagásványok, mint a *3. ábrán* is látható röntgendiffrakciós felvételek mutatják, kis mennyiségben jelennek meg. Bázisreflexióik kis intenzításúak, diffúzak. Nagyobb mennyiségre utal az agyagásványok közös reflexiója *(aá)*, ami 4,5 Å d értéknél jelentkezik.

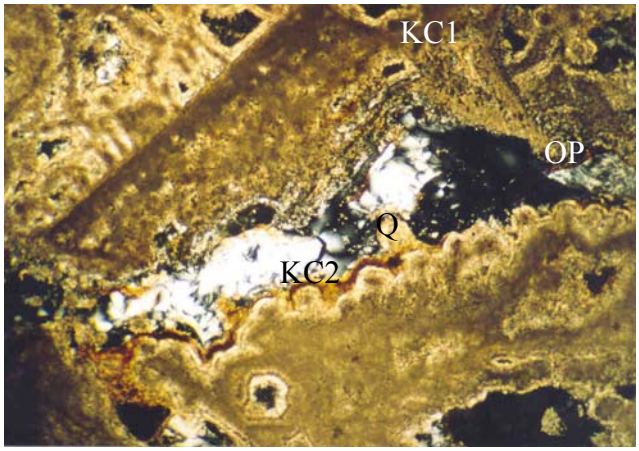
A másodlagos ásványi fázisok között öt mintában (A-1, A-2, A-6, A-7 és T-3) találtunk pátos kalcittal társuló, 0,01-0,02 mm széles, max. 0,5 mm hosszú, ívesen meghajló, kévékbe vagy szabálytalan kötegekben megjelenő, halvány zöldesbarna, gyengén pleokróos, szálas kristályokat, amelyek megjelenésük és optikai tulajdonságaik alapján az attapulgit-szepiolit agyagásványcsoporthoz rendelhetők (5. *kép*). Kis részarányuk miatt nem jelentkeznek a diffraktogramokon.



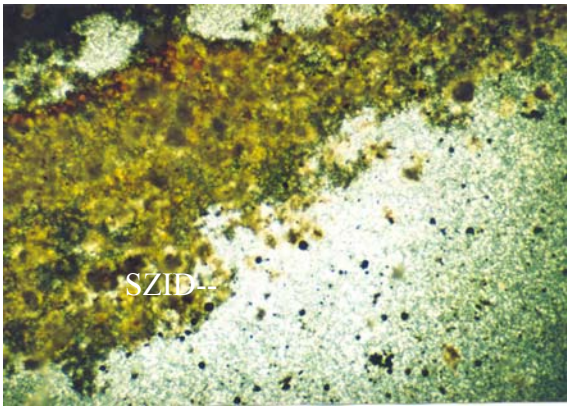
5. kép: Szepiolit-attapulgit agyagásvány (S-A) pátos kalcitban (CC), A-1 minta, + nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 5: Clay minerals from sepiolite-attapulgite group (S-A) in spare calcite (CC), sample A-1, + nichols, the lenght of photo is 4 mm.

3.2.3. SiO_2-ásványok

A SiO_2 ásványok, ill. ásványi fázisok másodlagos képződmények, amelyek a karbonátos kőzetet vagy a másodlagos ásványokat szorítják ki. A vizsgált mintákban a következőket azonosítottuk:



6. kép: Két generációs kalcedon (KC1 és KC2), kvarc (Q) és opál (OP) egy póruskitöltésben, 5. minta, + nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 6: Two generation of chalcedony (KC1 and KC2), pore filling quartz (Q) and and opale (OP), sample 5, + nichols, the lenght of photo is 4 mm.



7. kép: Limonitkoszorús szideritszemcsék (SZID) a dolomikritben, N-8 minta, II nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 7: Siderite grains with limonite rims (SZID) in dolomicrite, sample N-8, II nichols, the lenght of photo is 4 mm.

- *Kvarc:* A karbonátos kőzetekben szórványosan megjelenő, korrodált kvarcszemcse extraklasztokon kívül (A-7 minta) a kvarc másodlagos ásványként az erek, pórusok kitöltéseinek közepén, üde, víztiszta szemcsék mozaikját (5 minta, *6. kép*) vagy a kalcedonban lévő geodák hipidiomorf bélését képezik (N-16 minta), gyakran szabad szemmel is látható kristályokban (T-2 minta)
- *Kalcedon:* Másodlagos kriptokristályos ásványi fázis, amely az optikai mikroszkópal három különböző megjelenésben látható: *(6. kép)* irányítatlan, zavaros, szürke tömeg (N-16 minta), 0,05-0,1 mm-es csillagok, rozetták, kévék halmaza (6 minta), ill. algapelletek pszeudomorfózisa (N-9 és T-2 minták) és körkörös, zónás, sugaras szerkezetű félgömbök és hullámos kérgek, üregek falain, repedésekben (A-9, N-9 és T-2 minták) vagy gömbalakú, sugaras-zónás szerkezetű kiválások a kriptokristályos kovában (N-3 minta)
- *Tridimit:* Az N-16 minta kriptokristályos, optikailag nem azonosítható része a röntgendiffrakciós vizsgálat szerint 16% magas hőmérsékletű SiO_2-ásványt, tridimitet tartalmaz 64 % kvarc mellett.
- *Opál:* A másodlagos ásványok között két szakaszban megjelenő hidratált kovagél az üregek, pórusok, repedések belsejét (A-9 minta), ill. a másodlagos ásványok nagy részét – az üregkitöltő opált is beleértve – átszelő ereket tölti ki (N-10 minta). Az opál színtelen vagy sárgás, helyenként kontrakciós hajszálrepedéseket tartalmazó ásványi fázis, karbonát, kova vagy limonit-zárványokkal (A-5 minta), gázbuborékokkal (A-11 minta), szórványos átkristályosodási gócokkal (N-2 minta). Az opál a röntgendiffraktogrammokon mint amorf fázis jelenik meg.

3.2.4. Vas oxihidroxidok

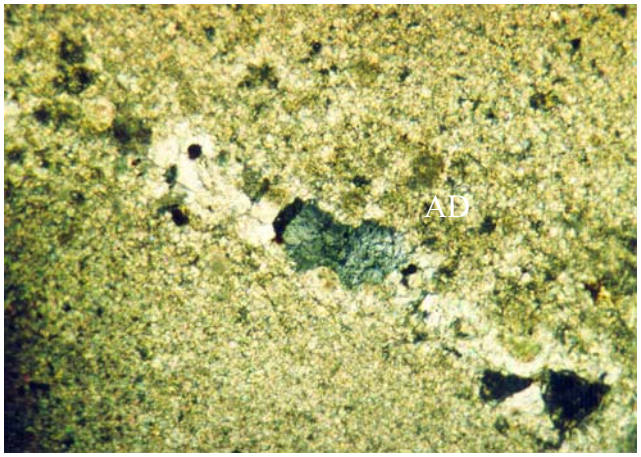
Az elsődleges karbonátos kőzetben az 1%-ot meg nem haladó, 0,02-0,05 mm-es, négyszögletes, vagy szabálytalan, karéjos, barna szegélyes opak szemcsék valószínűleg limonittá oxidálódott vasásványok (sziderit – *7. kép*, pirit, markazit) maradványai (T-1 minta). Tulajdonképen ezek is, akárcsak a vas oxihidroxidok nagy része másodlagosan képződött ásványi fázis, amelyekben a következőket azonosítottuk:
- *Hematit:* Nyomokban a vörös színű II/2 mintában a röntgendiffrakciós vizsgálat alapján.
- *Goethit:* A Félbevágott kúp mintáiban 1–5%-os részarányban és szórványosan a többi lelőhelyeken látható, így pl. az N-2, N-3, 11 és 20 mintákban, amelyekben sötét barnásvörös, erősen pleokroós, vagy opak, sugaras vagy szabálytalan szálakból álló halmazokat képez, a pátos kalcit alatt és benne vagy az erek falán redőnyös szalagokban jelenik meg (A-2 és A-8 minták)
- *Limonitgél:* Világosbarna, morzsás szemcséket, kérgeket, halmazokat képez a kalcedonban (5 minta), a kalcedon/karbonát határon (N-2 és 11 minták), algagumók, laminák *(9. kép)* és ooidok kérgében (A-3 minta), erekben, pórusok kitöltésében. A limonitgél keletkezése végig követhető az ásványképződés összes fázisában.

3.2.5. Földpátok

A mikroszkópos vizsgálat során szórványosan megjelenő plagioklász- és mikroklin extraklasztokon kívül (amelyek a röntgendiffrakciós felvételeken is megjelennek, 1-3%-os részarányban) az N-15 mintában a kalcitérben több adulárszemcsét azonosítottunk (*8. kép).*

3.2.6. Szulfidok, szulfátok

Valószínű, hogy a mikritben lévő, szegletes, limonitosodott opak ásványok, valamint a gömbölyded limonitszemcsék a kalcedonban eredetileg *pirit* és/vagy *markazit* voltak. Az N-16 mintából készült felületi csiszolatban a limonitmezőkben 0,006-0,012 mm-es pirit-reliktumokat, sugaras kalcedonban lemezes, 0,010-0,017 mm-es markazitot találtunk. Az N-15 mintában az adulárt is tartalmazó kalcitérben háromszögletes, széleiken borostyánkő színű *szfalerit*kristályok is láthatók *(8. kép).*



8. kép: Adulár (AD) és szfalerit (SZF) egy pátos kalcitérben.(CC), N-15 minta, + nikolok, a kép hossza 2,5 mm.
Picture 8: Adular (AD) and sphalerite (SZF) in a spare calcite vein (CC), sample 5, + nichols, the lenght of photo is 2,5 mm.

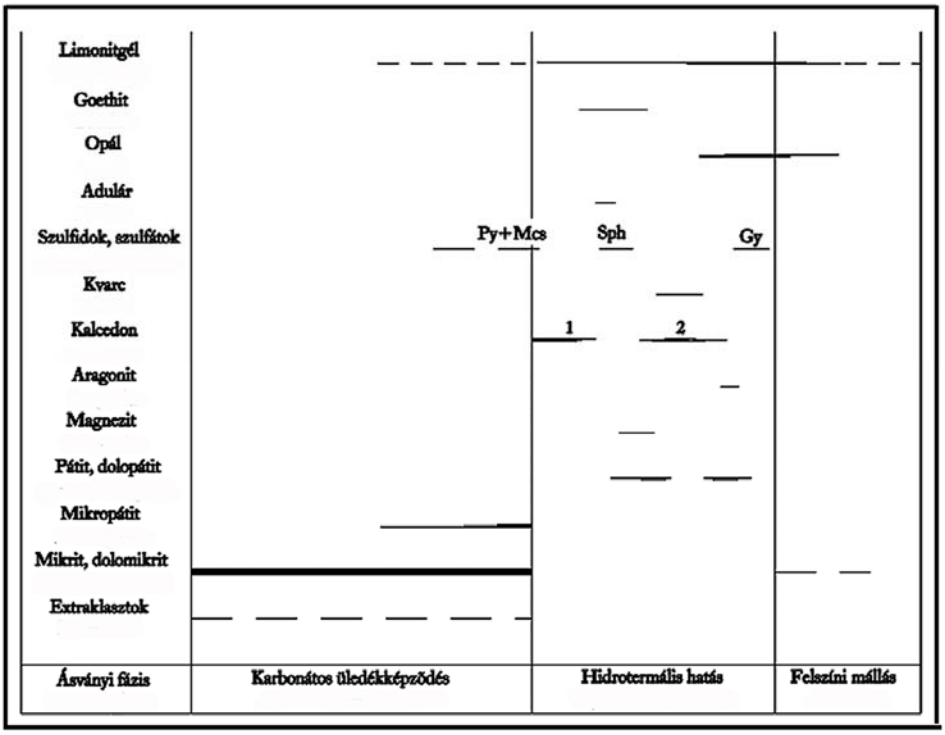
A *gipsz* az utolsók között van másodlagos ásványok keletkezési sorrendjében. Legyezőszerű, gyöngyházfényű, sugaras halmazokat képez az üregek kitöltésében (N-3 és N-4 mintákban) és hintve számos más mintában a rontgendiffrakciós vizsgálat alapján.

3.2.7. Extraklasztok, bioklasztok, szerves maradványok

A karbonátos kőzetek igen kis hányadát képezik az *extraklasztok*: a kívülről (porhullásból?) származó, hullámos kioltású kvarc-, ikerlemezes plagioklász- és mikroklinszemcsék, kifakult csillámlapocskák, 0,01-0,02 mm-es cirkon- és titanitszemcsék. Az N-14 mintában egy 1,5 mm-es, erősen limonitosodott hólyagos bazalt habláva-töredék látható, amely valószínűleg a közvetlen aljzatból származik.

A mikritben csak néhány mintában találtunk *bioklasztokat*: 0,02-0,05 mm vékony, hajlított, meszes váztöredéket (gasztropoda vagy osztrakoda? A-2, A-6, N-2 és N-7 minták). Szintén a mikritben, az algás eredetű képződményeken kívül több helyen azonosítottunk 0,2×1,5 mm-es, szálas-sejtes szövetű, elmeszesedett *növényi töredéket* (N-13 minta, *13. kép*).

Az ásványok, ásványi fázisok keletkezési sorrendjét a *4. ábrán* szemléltetjük.



4. ábra: A vizsgált forrásüledékek ásványainak kiválási sorrendje (Py+Mcs, Pirit és markazit, Sph, szfalerit, Gy, gipsz)
Fig. 4: Succession of minerals of the studied spring sediments (Py+Mcs, pyrite and marcasite, Sph, sphalerite, Gy, gipsum.)

3.3. A forrásüledék kőzettana

A fent felsorolt ásványok két, időben és esetenként térben is elkülönülő együttest képeztek: az elsődleges üledéket és a másodlagos ásványok asszociációját.

3.3.1. Az elsődleges üledék

A mikroszkópos vizsgálat azt mutatja, hogy a gejzírkúpok elsődleges üledéke finomszemű karbonátos jellegű volt és ez képezte a későbbi elváltozások és lerakódások kőzettani hátterét. A karbonátos kőzetek *FOLK* (1959) és *TODD* (1966) által ajánlott nevezéktanát használva, amelyet *FORD-PENDLEY* (1994) a mésztufák és travertinek osztályozásában is elfogad,

elsődleges kőzetként mudstone-típusú mikrit (mikropátitos pelletit, laminit), intraklasztos és grapestone típusú pelszparit azonosítható.

A mudstone vagy *kalcilutit* (mész- vagy dolomitiszapból keletkezett) mészkő teljesen vagy részben mikronos nagyságú karbonátszemcsékből, mikritből tevődik össze. A kőzet igen finomszemű, egynemű, sem szabad szemmel, sem mikroszkóp alatt nem láthatók az ásványi összetevői, csak esetenként jelenik meg egy-egy azonosíthatatlan váztöredék (bioklaszt), korrodált kvarc- vagy földpátszemcse, kőzettörmelék (bazalt habláva, N-14 minta), kifakult csillámlap, rutil, cirkon (extraklasztok), vagy elmosódott foltokban opak ásványok pora.

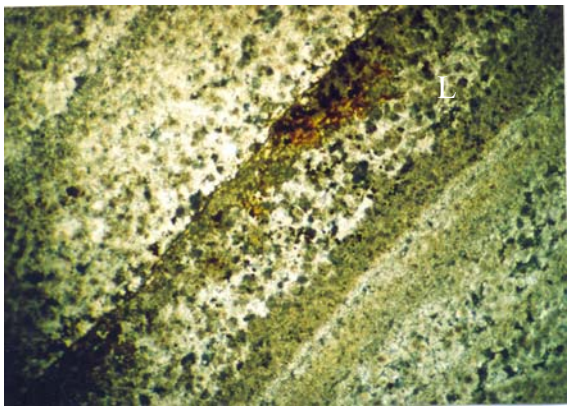
A tömeges, mudstone-típusú mikritben gyakran 0,06-0,15 mm-es, kerek vagy elliptikus, szintén mikritből lévő testek, pelletek különböztethetők meg, szorosan egymásba „*csomagolva*" vagy szabadon „*úszva*"' az őket egybefogó, kissé zavaros mikropátitba – 15-25 µm-es kristályos karbonátba; ez a *pelletit* vagy a *mikropátitos pelletit*. Egyes mintákban látható, hogy a mudstone valójában egymásra halmozódott, majd összefolyt, homogenizálódott pelletekből keletkezett.

Számos vizsgált mintában a mikrit 0,05-0,1 mm széles lemezeket, sávokat képez, melyek vagy folyamatosan mennek át a következő mikropátitos sávba, vagy éles, esetenként limonithártyás határral. A mikrites és mikropátitos lemezek váltakozásából jön létre a *laminit* (N-10 minta, *9. kép*), amelynél gyakran látható az átmenet a pelletitbe vagy a tömeges mudstone-ba.

Optikailag nem kölönböztethető meg a mikrites mészkő a szintén mikrites dolomittól (dolomikrit), de a rötgendiffrakciós és termikus vizsgálatok kimutatták, hogy a Nyereg-hegyből származó minták dolomitból, míg az Aranyház mintái kalcitból vannak, úgy a tömeges mudstone-típus, mint a laminites vagy pelletes változatok (*2. ábra*). Ugyancsak a röntgendiffrakciós vizsgálat mutatta ki, hogy a mikrites kőzetekben a mikroszkópal nem azonosítható agyagásványok (illit, montmorillonit, kaolinit) is jelen vannak, pár százalékos részarányban.

A fent jellemzett finomszemcsés mészkő- ill. dolomittípusok szerkezetük és szövetük alapján algás eredetűnek minősíthetők, akárcsak számos, hasonló forrás esetében (pl. Kirşehir és Kayabaşi, *ATABEY*, 2002). A kis mélységű, napfénynek kitett, táp- és nyomelemekben gazdag és meleg forrásvíz medencéje ideális élőhely a magas hőmérsékletet (70-80 C°) is kibíró zöldeskék algáknak (*Cyanophytae*), amelyek sejtjei egy átlátszó, polizaharid összetételű nyákban, század mm-es hártyákban (biofilmekben) tapadnak az aljzatra (*PENDLEY*, 1994). A fotoszintézis során a vízben oldott, egyensúlyi széndioxidból, s ha ez elfogyott, az oldott hidrogénkarbonátokban kötött

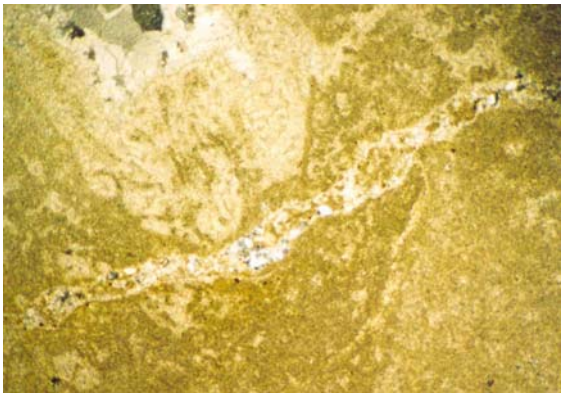
CO_2-ból táplálkoznak, mindaddig, míg a kicsapódó, 0,2-1μm-es nagyságú karbonátszemcsék és a vízben lebegő, a nyákba beragadó egyéb szilárd részecskék el nem zárják a fénytől az algasejteket, s ezek egy része elpusztul. Így keletkezik az első meszes hártya, amelyen aztán megtapad a következő algatenyészet és így tovább. A sekély tengerek sztromatolitjaihoz hasonlóan (*LOGAN* 1961) több m vastag, finoman laminált, lemezes mészkőlerakatok jönnek létre, vagy ha a még képlékeny algaszőnyeg összefolyik (*VASCONCELOS-McKENZIE*, 1997), a méteres padokat képező, homogén, mikrites mészkő. Az így keletkezett kőzetben megtalálhatók a szerves anyag elbomlásából, erjedéséből keletkezett gázbuborékok, amelyek a tihanyi anyagban is láthatók.



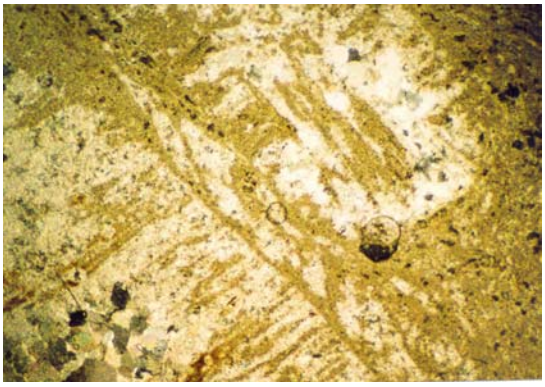
9. kép: Laminit: mikrites és mikropátitos lemezek váltakozása; a középső mikrites lemezen limonitkéreg (L). N-10 minta, II nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 9: Laminite: alternance of micritic and microsparitic ribbons, with a limonitic crust int he center (L). Sample N-10, II nichols, the lenght of photo is 4 mm.

Magyarázatra szorul az a tény, hogy egymástól mindössze pár száz méterre fekvő gejzírkúpok karbonátos anyaga miért különbözik: miért kalcitos az Aranyház mikritje és miért dolomitos a Nyereg-hegyé?

Mint ismeretes, vizes hidrogénkarbonát oldatból a kalcium karbonát kiválása egyaránt lehetséges normál, illetve meleg vízben (*BATHURST*, 1975)., míg a dolomit, mint elsődleges ásvány csak 64 °C fölött keletkezhet; ez alatt a Mg^{+2} ionok oldatban maradnak; esetleg magnéziumtartalmú kalcit is képződhet, de csak biogén hatásra



10. kép: Grapestone típusú pelszpárit, amelyet egy kalcedonér szel át. A-6 minta, II nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 10: Grapestone-type pelsparite, traversed by a chalcedony vein. Sample A-6, II nichols, the lenght of photo is 4 mm.

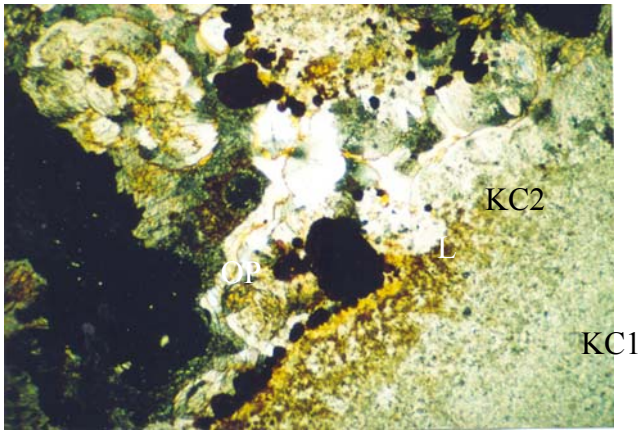


11. kép: Mikrobreccsás pelszpárit, részben kalcedonnal helyettesítve. A-10 minta, II nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 11: Pelspartitic microbrechia, partially remplaced by chalcedony. Sample A-10, II nichols, the lenght of photo is 4 mm.

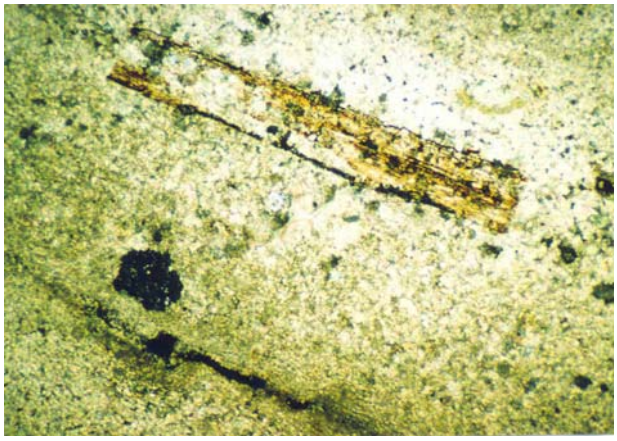
Ha a Tihanyi-félszigeten lejátszódó gejzírtevékenységet egy közös hőközponthoz kötjük, kevés a valószínűsége annak, hogy az egymás közelében lévő források hőmérséklete között lényeges különbség legyen. Ezért feltételezhető, hogy a két forrás különböző időpontban keletkezett: a Nyereg-hegy a tevékenység kezdetén, forró vízben, az Aranyház viszont később, amikor a kiáramló víz hőmérséklete 64 °C alá csökkent.

A szórványosan megjelenő, valószínűleg eolikus eredetű kvarc, földpát és kőzettöredék-szemcséken és csillámlapokon kívül az eredeti karbonátos kőzet csak intraklasztokat, saját anyagának törmelékeit tartalmazza. A 0,1-0,4 mm-es, szegletes mikrit-darabokat vagy a hengeres szemcséket mikropátit köti össze (*intraklasztos pelsparit*) vagy szorosan egymásba fogazódó halmazt alkotnak (*intraklasztos mikrobreccsa*, A-10 minta, *11. kép*).

Nem ritkák a mikropátitos kalciterekkel behálózott álbreccsás szerkezetek sem. Végül megjelenik a szőlőfürtként egymásba tapadó pelletek halmazából kialakult grapestone-típusú *pelszparit* (A-6 minta, *10. kép*).



12. kép: Finomszemcsés kova (KC1), sugaras kalcedon (KC2), limonit (L) és opál (OP) üregkitöltés, N-9 minta, + nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 12: Fine grained flint (KC1), void filling fibroradial chalcedony (KC2), limonite (L) and opale (OP), sample N-9, + nichols, the lenght of photo is 4 mm.



13. kép: Karbonátosodott növénytöredék a mikropátitos, laminált forrásmészkőben, N-13. minta, II nikolok, a kép hossza 4 mm.
Picture 13: Carbonatized plant fragment in mictopsparitic, laminated spring limestone, sample N-13, II nichols, the lenght of photo is 4 mm.

3.3.2. A karbonátos üledékben történt szingenetikus változások

Az elsődleges üledékben nyomon követhetők az üledékképződés korai szakaszában történő változások és a kőzetté való szilárdulás folyamata.
- *Szingenetikus deformációk:* A még képlékeny mésziszapból keletkezett finomszemű mészkőben helyenként láthatók a folyásra utaló nyomok (N-11 minta), valamint az elnyírt gázbuborékokból létrejött kerekded vagy féregjáratszerű pórusok (A-3 és N-12 minták), körkörös, kontrakciós hajszálrepedésekkel (N-9, N-12 és T-1 minták) Az üledékképződés elsődleges fázisának végén, az algás folyamatok időszakos megszakítására utalnak a bekérgező limonithártyák és a száradási repedések (A-8 és 12 minták).
- *Mikropátitos átkristályosodás:* A képlékeny karbonátos üledékben már közvetlenül a keletkezésük után megkezdődött a szilárdulást eredményező átkristályosodás. A mikropátitos átkristályosodás a laminiteknél egyértelmű. A mikropátitban még látható a mikrit foltos, zavaros szerkezete, de már megjelennek a dolomit, sziderit és pirit? kiválások.
- *Pátos átkristályosodás:* A mikrites és mikropátitos üledékben foltokban észlelhető a nagyobb méretű, pátos kristályok keletkezése, a 0,5 mm-es kalcitszemcséké és a sajátalakú dolomité (*„dolorhombs”*). A kristályok üdék, tiszták, az opak anyag a kristályokon kívül, az átkristályosodott zóna peremén képez szegélyeket, hártyákat. Ugyancsak pátos karbonát tölti ki a száradási repedéseket és a gázbuborékok egy részét

Mindezek a folyamatok a karbonátos üledék megkeményedéséhez vezettek, amely a további elváltozások (kovásodás, limonitosodás) előtt már megtörtént.

3.3.3. Epigenetikus kovásodás, hidrotermális és recens érkitöltés

A megszilárdult karbonátos kőzeten másodlagos elváltozások, helyettesítések, repedések keletkezése és kitöltése észlelhető.
- *Kovásodás:* A javarészt finomszemű mészkő szemcséit számos mintában kova helyettesítette. A kova megjelenik a szemcseközi, finom pórusokban, a laminák felületén, kiszorítja a mikritet és a mikropátitot, majd az egész kőzetet, amelyben az eredeti karbonát csak reliktumokként marad meg. Ezek a reliktumok általában megőrzik a mészkő eredeti szövetét.

A kova első generációja, amely kalcedonból, (=kriptokristályos kvarcból), amorf fázisból (opálból) vagy egy esetben krisztobalitból áll, igen finomszemű, szerkezetnélküli és a kis mennyiségű opak ásványoktól és a karbonátos reliktumoktól eltekintve gyakorlatilag monomineralikus jellegű kőzet. A második generáció, amely az elsőt kiszorítja és kitölt egyes póru-

sokat, szálas-kévés szerkezetű *(6. kép*), üde csokrokat, rozettákat, körkörösen zónás, 0,5-1 mm-es gömböket képez, mozaikos kvarcból álló maggal. Gyakran limonittal színezett zónákat, -hártyákat tartalmaz (N-3 minta); a limonit szegélyeket képez az üde kiválások körül (A-9 minta).
- *Repedések:* Az említett kontrakciós és száradási repedéseken kívül a karbonátos kőzetben, beleértve a kovásodott részeket is, három generációs, széthúzó jellegű repedések észlelhetők. Az első közvetlenül a tömeges kovásodás után keletkezett, a második a pátos karbonát érkitöltést keresztezi, míg a harmadik a tömeges limonitképződés és a mészszap-zagy megszilárdulása után keletkezett. A szakításos jellegre a repedésfalak egyenetlen, szegletes, ásványszemcsék határát követő vonala és a falakból levált törmelék-„*szigetek*" tanúskodnak (A-5, N-11 és 12 minták). A két repedésfal egymáshoz viszonyítva csapásirányban nem mozdult el.
- *Repedés- és üregkitöltés:* A repedések mentén a környezetüknél magasabb hőfokú oldatok áramlottak, amelyek a repedésfalakat képező kőzetben átkristályosodásokat, színváltozást okoztak (A-6 és A-9 minták).

Az I. generációs repedések falain hullámos, sugaras kalcedonkérgek képződtek, gyakori limonitszalagokkal (A-8 és N-4 minták), amelyre üde, sugaras, legyezőszerű kalcedon telepedett, gyakori oszlopos vagy mozaikos kvarckiválásokkal. A limonittá oxidált pirit és markazit szintén itt található. Ugyancsak ezekben a repedésekben jelenik meg a gipsz (N-3 és N-4 minták), valamint az aragonit is (N-14 minta). A repedés tengelyét rendszerint opál vagy opál+limonit tölti ki (N-2 minta, *12. kép*). Ezek a repedések átszelik a pórusokat, az üde kalcedonfészkeket és a karbonátos kőzetek pátos kiválásait.

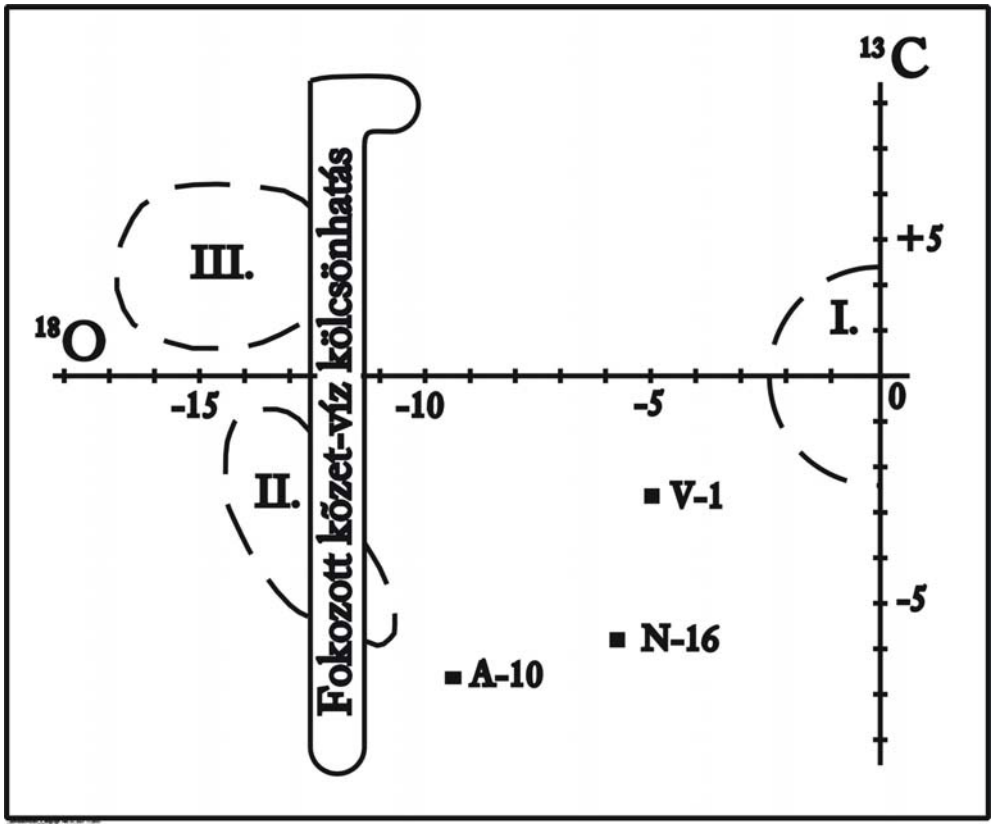
A II. generációs repedések kitöltése üde kalcedon és pátos karbonát: dolomit és nagykristályos kalcit, kétfázisos zárványokkal (A-6 minta). Kalcittal kitöltött érben jelennek meg az adulár és a szfaleritkristályok (N-15 minta). Ugyancsak a kalcitos erekben és az erek közelében láthatók a szálas attapulgit-szepiolit agyagásványok (A-1, A-2 és A-6 minták). A repedés átszeli az előző, kovás-kvarcos repedéseket.

A III. hidegvizes, jelenleg is keletkező generációba vékony, 0,1-0,3 mm-es repedések tartoznak, kitöltésük kolloidális limonit és opál (A-5 és N-10 minták).

Egyes üregekbe (N-7 és N-9 minták) morzsás-mikrites, limonittal színezett, folyásos szövetű karbonát található, amely egy része valószínűleg egy kései (jelenkori?) karbonátos zagy beszivárgása folytán keletkezett.

4. Hőmérséklet, sókoncentráció

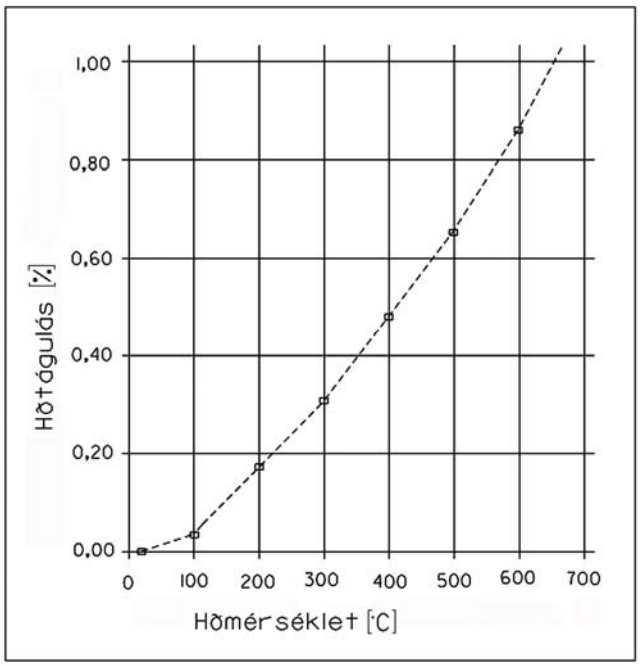
Az ásványi fázisok keletkezésének hőmérsékletéről az O és C stabil izotópok vizsgálata, a dilatometrikus mérések, a karbonátos ásványok egyensúlyállapota, a kova oldási diagramja és a kék algák életkörülményei alapján kaptunk információkat.



5. ábra: $d^{18}O/d^{13}C$ stabil izotóp diagram különböző karbonátos üledékek esetében, részben NÁDOR (2000) után I. tengeri eredetű mészkő, II. csapadékvízből kiváló meszes képződmények, III. hidrotermális tevékenység folyamán képződött karbonátok. A-10, N-16 és V-1, tihanyi minták.
Fig. 5: $d^{18}O/d^{13}C$ stable isotope diagram for different carbonate sediments, partially after NÁDOR (2000) I. marine limestones, II. Carbonate precipited from meteoric water, III. Carbonates formed by hydrothermal activity, A-10, N-16 and V-1, samples from Tihany spring sediments. In box: Accentuated rock-water reactions.

Az A-10 (mikrites-mikropátitos mészkő), N-16 (finomszemű kova, karbonát-reliktumokkal) és 1. minta (kalciteres dolomikrit) oxigén és szén stabil izotóparányai a *NÁDOR* (2000) által használt diagramon a tengeri üledékek és a kontinentális karbonátok mezői közé vetülnek (*5. ábra*). A negatív $d^{13}C$ és $d^{18}O$ értékek azonban jelentős mértékű párolgást feltételez-

nek, amely a két elem nehéz izotópjainak koncentrálásához vezet. *SZÖŐR* et al. (1992) a különböző hőmérsékletű vizekből kicsapódott meszes üledékek izotópos vizsgálata eredményeként publikált C/O diagramra vetítve az A-10 és N-16 minták a „*langyos*" (15-22 C°) tartomány közelében vannak, a V-1 nem értelmezhető.



6. ábra: Az N-7 minta dilatációs diagramja
Fig. 6: Dilatometric diagramm of the sample N-7

Az A-9 és N-7 minták anyaga finomszemcsés kova, mikrit-reliktumokkal. A dilatációs görbe (*6. ábra*) a 20-100°C intervallum a diagram további szakaszához képest kisebb lejtővel indul és 100 °C körül törik meg, ami azt jelenti, hogy a kőzet által elért legmagasabb hőmérséklet 100°C alatt van.

A karbonátos ásványok fázisdiagramjából kitűnik, hogy a dolomit kicsapódása 64°C-nál kezdődik, azzal a megjegyzéssel, hogy a biogén vegyes karbonát akár 10-20°C-kal is alacsonyabb hőmérsékleten is kialakulhat (*VASCONCELOS-MCKENZIE* 1997). Mindez egybevág a *PENTECOST* (1990) vizsgálatainak eredményeivel a Mammoth (Wyoming) gejzírmedencéiben tenyésző karbonátkiválasztó kékalgákról, amelyek optimális szaporodási hőmérséklete 45-60 °C között van és életképesek egész 80 °C-ig.

Végül az amorf kovagél oldatba maradása 9,5 pH-értéknél 95-110 °C között a legnagyobb – 150 mg/l (*MORAY* et al., 1962).

A kiáramló víz sótartalma, ahhoz, hogy Mg-szilikátok keletkezzenek, 30 °C -on 250 mMol/l, viszont 100 °C körül csak 120 mMol/l Mg^{+2} szükséges, tehát a kovaképződést követően még meleg, aránylag sós (keserűsós) víz áramlott a repedések mentén, amelyből többek között a szepiolit-attapulgit csoportba tartozó kis mennyiségű agyagásvány keletkezhetett, akár a meleg, száraz-félszáraz klíma viszonyok között tavi környezetben (*KAUFMANN–RUTH*, 1978).

5. Összefoglaló és következtetések

A forrásüledékek ásvány-kőzettani vizsgálata során megállapítható volt a forrásüledékeket létrehozó víz eredete, az üledékkeletkezés időrendje és kapcsolata a helyi, freatomagmás folyamatokkal.

A stabil szén- és oxigénizotópok vizsgálata arra enged következtetni, hogy keverednek a tengeri és a szárazföldi eredetű izotópforrások: a karbonátos, tengeri képződésű (triász) mészkő- és dolomitegyüttesbe beszivárgott a javarészt terresztrikus üledékeken átszűrődő csapadék, más szóval alapjában a karsztvíz volt a kicsapódás közege.

A szükséges energiaforrást a mélységben lévő magmakamra fluidumjainak (CO_2, H_2O, kevés H_2S) feláramlása szolgáltatta, habár az utolsó kitörés K-Ar 6 Ma kora és a pleisztocén közepe (~0,5 Ma) közötti időintervallum felvet bizonyos problémákat a posztvulkáni tevékenység kontinuitását illetően.

Az ásványtani adatok alapján állítható, hogy a különböző kúpok különböző időben keletkeztek és élettartalmuk is különbözött, de összességükben egy koherens folyamat részei voltak. A magmakamra fűtőhatása miatt a feláramló karsztvíz hőmérséklete időben valószínűleg növekedett. Ezért feltehetően a kezdetben molettás jellegű működést gejzír, majd esetleg fumarola jellegű követte.

A forrásüledékek összességükben három fázisban keletkeztek.

A Tihanyi-félsziget forrásüledékei elsődleges képződménye a nagyrészt algás eredetű karbonátos kőzet: mikrit, pelletit, mikropátitos laminit, pelszparit. A források meleg vizében megfelelő életteret találó algák anyagcseréjükhöz szükséges szénsavat a feláramló, egyensúlyi, oldott CO_2-ből és a vízben jelenlévő Ca és Mg hidrogénkarbonátokból vonták ki és az így keletkezett karbonát lecsapódott az algasejtek felületére vagy az algákat körülvevő nyákba.

Az ásványképződés második fázisa a kovásodás volt. A karbonátos kőzetek kovásodása és a tömeges kiszorítást követő repedés- és üregkitöltés egyértelműen a hidrotermális tevékenység reaktiválására utal. A langyos, semlegespont körüli hidrokarbonátos feláramlást lúgos kémhatású forró oldatok váltották fel, amelyek jelentős mennyiségű SiO_2-t tartottak oldott állapotban (*MORAY* et al. 1962). A karbonátos kőzetekből felszabadult CO_2 hatására az oldat pH-értéke drasztikusan csökkent és a kova kicsapódott, kiszorítva a karbonátokat. A hideg környezetbe benyomuló kova első fázisban igen aprószemcsés, alaktalan halmazokban szilárdult meg, amely később – szintén a lentről áramló lúgos oldatok hatására – helyenként átkristályosodott.

A hidrotermális tevékenység csúcspontját a kis mennyiségű fémeket is szállító, *low sulfidation* típusú kvarcos-kalcitos érkitöltések képezték, amelyekben megtalálhatók az adulár és a szálas agyagásványok (attapulgit-szepiolit) is. Ez utóbbiak aránylag magas (100°C körüli) hőmérsékletre és jelentős sókoncentrációra (KCl, $MgCl_2$) utalnak.

A forrásüledékeket átszelő, három generációs repedéshálózat szakításos jellegű, ami azt feltételezi, hogy a kúpokban, a feláramlást és érkitöltést megelőzően gravitációs mozgások, üregek, csatornák feltörése és későbbi kitöltése ment végbe.

A forrásüledékek kifejlődésének legutolsó, napjainkban is folytatódó harmadik fázisa egyes ásványok limonitosodása, a felszíni kioldások, limonit- és opálkicsapódás egyes repedésekben és üregkitöltések felszíni eredetű karbonátos zaggyal.

IRODALOM

ATABEY, E. (2002): The formation of Fissure ridge type laminated travertine-tufa deposits: microscopical characteristics and diagenesis, Kirşehir Central Anatolia. — Bulletin of the Mineral Research and Exploration. 2001-2002. (Foreign Edition), p. 123-124 és 59-65. Ankara

BATHURST, R.G.C., (1975): Carbonate sediments and their diagenesis. — *Elsevier*, Amsterdam, II. p. 3-638.

BÖCKH V.P. (1878): A Bakony déli részének földtani viszonyai. — A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve, III. p. 3-102.

FOLK, R.L. (1959): Practical petrographical classification of limestones. — American Asasociation of Petroleum Geologists Bulletin, 43., p. 1-38.

FORD, T.D, — PENDLEY, H.M. (1996): A review of tufa and travertine deposits of the world — Earth-Sciences Reviews, Elsevier, 41 p. 117-175.

*KAUFMANN, J.*A. — RUTH, I.N. (1978): Mg-silicates in Recent hipersaline lacustrine deposits, Negeev Desert, Israel. — IX. International Congress of Sedimentology, II. p. 26-28. Jerusalem.
HOFFER A. (1943): A Tihanyi-félsziget vulkáni képződményei. — Földtani Közlöny, LXXIII, p. 375-429.
LÁNG G. (1970): Tihany. Magyarázó a Balaton környéke 1:10.000-es építésföldtani térképsorozatához. — Magyar Állami Földtani Intézet, Alkalmi Kiadvány. 12. p.
LÓCZY L. (1913): A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. — A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I. p. 42-58.
LOGAN, P.W. (1961): Cryptozoa and associated stromatolites from the Recent Shark Bay, Western Australia. — Journal of Geology, 69., p. 517-523.
LOGAN, P.W.—REZAK, P.—GINSBURG, D.N. (1964): Classification and environmental significance of algal stromatolites. — Journal of Geology, 72., p. 68-83.
MARTIN, U.—NÉMETH K. (2004): Tihany Maar Volcanic Complex. In: Mio-Pliocene phreatomagmatic Volcanism in the Western Pannonian Basin — Geologica Hungarica, Series Geologica, 26., p. 74-109.
MORAY, G.W.—FOURNIER, R.O.—ROWIE, J.J. (1962): The solubility of quartz in water in the temperature interval from 20 to 300 °C. — Geochimica et Cosmochimica Acta, 26., p. 1029-1043.
NÁDOR A. (2000): Fabrics and origin of speleothems in hydrothermal caves, Buda Hills, Hungary. — Annual Report of the Geological Institute of Hungary, 1994-1995/I-II, p. 217-230.
PENTECOST, A. (1990): The formation of travertine schrubs, Mammoth Hot Springs, Wyoming. — Geological Magazine, 127. p. 159-168.
PENTECOST, A. (1999): The origin and development of the travertines and associated thermal waters at Matlock Bath, Derbyshire. — Proceedings of the Geologists' Association, 1100. London, p. 217-232.
SZÖŐR GY.—BALÁZS É.—SÜMEGI P.—SCHEUER GY.—SCHWEITZER F.—HERTELENDI E. (1992). Thermoanalytical and isotope-geochemical study of the travertines in Hungary with facies and stratigraphical evaluation. — In *SZÖŐR GY.,* (szerk.): „Research studies on facies, palaeobiogeochemistry and palaeoecology" p. 93–107.
TODD, T.W. (1966): Petrogenetic classification of carbonate rocks. — J. Sed. Petrogr., 36., p. 317-340.
VARRÓK K. (1957)*:* Jelentés az 1957. évben a Tihanyi-félszigeten végzett munkáról. — Kézirat, Magyar Állami Földtani Intézet, Adattár, p. 3-12.

VERESS M. (2003): Zárójelentés a Tihanyi-félsziget gejzírkúpjai című 43956/OKTP (2001) számú KAC pályázatról. — Berzsenyi Dániel Főiskola Szombathely, 25 p.
ZEPHAROVICH, V.R. (1856): Die Halbinsel Tihany in Plattensee und die nächste Umgebung von Füred. — Sitzungberichte der königlichen Akademie der Wissenschaften, XIX., p. 33-54..